

ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์
ที่มีการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์หรือเฟอร์ริกคีเลต

นางสาวปณิตา พงษ์ไพโรจน์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL EFFICIENCY OF NITRATE AND SULFATE
IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR (ABR) BY ADDITION OF FERRIC ION
OR FERRIC CHELATE

Ms. Panita Prucpirojkul

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์
เอปาร์ที่มีการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์หรือเฟอร์ริกคลอไรด์

โดย

นางสาวปณิตา พุกษ์ไพโรจน์กุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตันทุลเวศม์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตันทุลเวศม์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

ปณิตา พุกกะษ์ไพโรจน์กุล : ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์
เอปปีอาร์ที่มีการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกไอออนหรือเฟอร์ริกคีเลต. (REMOVAL EFFICIENCY
OF NITRATE AND SULFATE IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR (ABR) BY
ADDITION OF FERRIC ION OR FERRIC CHELATE)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. วิบูลย์ลักษณะณ์ ฟังรัศมี,

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ. ดร. มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 152 หน้า.

งานวิจัยนี้ทดสอบการเติมเหล็กใน 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน คือ เฟอร์ริกไอออนและเฟอร์ริกคีเลต
ลงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ ซึ่งมีปริมาตรในสวนใช้งาน 16 ลิตร แบ่งออกเป็น 4 ช่องย่อยที่มีปริมาตรเท่ากัน
ช่องละ 4 ลิตร โดยมีสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีไอดีต่างกัน 3 ระดับ คือ ในช่วงการทดลองที่ 1 เท่ากับ 0.1
มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี ซึ่งเป็นค่าที่คาดว่าจะเพียงพอต่อการเดินระบบในสภาวะไร้อากาศ และเพิ่มสัดส่วน
ในช่วงการทดลองที่ 2 และ 3 เท่ากับ 1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/กรัมซีไอดี ตามลำดับ แบ่งการทดลอง
ออกเป็น 3 ชุด คือ (1) ชุดควบคุม (2) ชุดทดลองที่เติมเฟอร์ริกไอออนในรูปเฟอร์ริกคลอไรด์ และ (3) ชุด
ทดลองที่เติมเฟอร์ริกคีเลตในรูปเฟอร์ริกซิเตรต โดยทั้ง 3 ชุดการทดลองทำการเดินระบบพร้อมกัน
แบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีไอดี 3,600 มก./ล. ไนเตรต-ไนโตรเจน 300 มก.ไนโตรเจน/ล.
และซัลเฟต 300 มก.ซัลเฟต/ล. ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินไปสำหรับการกำจัดไนเตรต
และซัลเฟตตามสมการสโตยชิโอเมตริก มีระยะเวลาเก็บ 2 วัน และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.8 กก.
ซีไอดี/ลบ.ม.วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมเหล็กส่งผลให้กระบวนการดีไนทริฟิเค
ชันและซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นได้ดี โดยถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมเหล็กทั้งสองรูปแบบมีประสิทธิภาพการ
กำจัดซีไอดีและไนเตรตประมาณร้อยละ 90 และพบการเกิดแอมโมเนียผ่านกระบวนการดีเอ็นอาร์เอขึ้น
ในระบบ ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าประมาณร้อยละ 50 สำหรับสัดส่วนการเติมเหล็ก
ต่อซีไอดีเท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี และการกำจัดซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 เมื่อเพิ่มสัดส่วน
การเติมเหล็กให้สูงขึ้น 10 เท่า (1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี) จึงอาจกล่าวได้ว่ารูปแบบของเหล็ก
ไม่ได้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชัน แต่การเพิ่มสัดส่วนของ
เหล็กส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นและเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270377721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ANAEROBIC BAFFLED REACTOR (ABR) / NITRATE REMOVAL /
SULFATE REMOVAL / FERRIC ION / FERRIC CHELATE

PANITA PRUCPIROJKUL : REMOVAL EFFICIENCY OF NITRATE AND SULFATE
IN ANAEROBIC BAFFLED REACTOR (ABR) BY ADDITION OF FERRIC ION OR
FERRIC CHELATE. ADVISOR : ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D.,
CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. MUNSIN TUNTOOLAVEST, Ph.D., 152 pp.

This research focused the studies on the addition of 2 different forms of iron ; ferric ion and ferric chelate into the Anaerobic Baffled Reactor (ABR). The reactor volume of 16 liters was separated into 4 compartments with equal volume of 4 liters. Both different forms of iron were added with 3 trial ratios of Fe^{3+} : COD as 0.1, 1.0 and 10.0 mg-Fe/g-COD, which is expected to be sufficient for the anaerobic process reaction. The experiment reactor was divided into 3 systems, (1) the control system; (2) the system of ferric ion adding by using ferric chloride and ; (3) the system of ferric chelate adding by using ferric citrate. Those three reactor systems were operated simultaneously under continuous feeding by synthetic wastewater of the COD = 3,600 mg/l, $\text{NO}_3\text{-N}$ = 300 mg-N/l and SO_4 = 300 mg- SO_4 /l. A hydraulic retention time (HRT) was 2 days and an organic loading rate (OLR) is 1.8 kg-COD/m³-day. The results showed that the reactors with iron adding for both two iron forms indicated no different results. As for the removal efficiency in the three system were likely in the same way, which the COD and nitrate removal efficiency were approximately 90 percent and Ammonia was formed in the system by Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonia (DNRA) while the efficiency of sulfate removal through sulfate reduction were approximately 50 percent in the first trial ratio of 0.1 mg-Fe/g-COD and increased to approximately 80 percent in second trial when increase the Fe^{3+} : COD for ten times to 1.0 and 10.0 mg-Fe/g-COD. It can be concluded that the iron form did not result to make a difference in denitrification and sulfate reduction. However, increasing the Fe^{3+} : COD ratio was increased the sulfate removal efficiency and enhanced DNRA process.

Department : Environmental Engineering Student's Signature :

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature :

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature :

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สำหรับทุกคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งทั้งในเชิงวิชาการและกระบวนการคิดในการทำงาน แนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงกำลังใจและความเมตตาที่มีให้ตลอดมา จนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตันทุลเวศม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ตลอดมา

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, ผศ.ดร.ศรัณย์ เตชะเสน และ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ด้านต่างๆ แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาฯ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2554 และขอขอบคุณบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวข้อวิทยานิพนธ์ในการทำทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์จนสามารถสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 ลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ..... | 5 |
| 2.2 วัฏจักรไนโตรเจน..... | 8 |
| 2.3 ดีไนทริฟิเคชัน..... | 11 |
| 2.4 กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ..... | 14 |
| 2.5 แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์ | 16 |
| 2.6 วัฏจักรซัลเฟอร์..... | 16 |
| 2.7 ซัลเฟตรีดักชัน..... | 19 |
| 2.8 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต..... | 21 |
| 2.9 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบมีแผ่นกั้นหรือเอปปีอาร์..... | 23 |
| 2.9.1 การทำงานของระบบเอปปีอาร์..... | 26 |
| 2.9.2 ลักษณะของกลุ่มแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 27 |
| 2.10 ธาตุเหล็ก..... | 28 |
| 2.11 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 32 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 40 |

| | หน้า |
|---|------|
| 3.1 แผนการวิจัย..... | 40 |
| 3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง..... | 43 |
| 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์..... | 46 |
| 3.4 รูปฟอร์มของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง..... | 47 |
| 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 3.6 เทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสีย | 50 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... | 51 |
| 4.1 ช่วงการทดลองที่ 1 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์.... | 54 |
| 4.1.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย..... | 57 |
| 4.1.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟต..... | 63 |
| 4.2 ช่วงการทดลองที่ 2 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์.... | 68 |
| 4.2.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย..... | 71 |
| 4.2.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟต..... | 76 |
| 4.3 ช่วงการทดลองที่ 3 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์.... | 80 |
| 4.3.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย..... | 81 |
| 4.3.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟต..... | 89 |
| 4.4 ผลของการเติมเหล็กต่อประสิทธิภาพของระบบเอปปีอาร์..... | 93 |
| 4.4.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี..... | 93 |
| 4.4.2 ผลต่อการกำจัดไนเตรต และการเกิดแอมโมเนีย..... | 96 |
| 4.4.3 ผลต่อการกำจัดซัลเฟต..... | 101 |
| 4.4.4 ผลต่อการเกิดซัลไฟด์..... | 104 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 112 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 112 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 113 |
| รายการอ้างอิง..... | 115 |

| | หน้า |
|---------------------------------|------|
| ภาคผนวก..... | 118 |
| ภาคผนวก ก การคำนวณ..... | 119 |
| ภาคผนวก ข ผลการทดลอง..... | 124 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 152 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ปฏิบัติการรดน้ำและการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ..... | 5 |
| 2.2 กระบวนการหลักในวัฏจักรไนโตรเจนและแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง..... | 10 |
| 2.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มโปรคาริโอต..... | 12 |
| 2.4 กระบวนการหลักในวัฏจักรซัลเฟอร์และแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง..... | 17 |
| 2.5 ข้อมูลการออกแบบและเดินระบบเอปียอร์เมื่อใช้สับสเตรทต่างกัน..... | 25 |
| 2.6 สูตรอาหารเสริมสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ..... | 31 |
| 3.1 แสดงค่าสัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี..... | 40 |
| 3.2 การเพิ่มค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในถังปฏิกรณ์เอปียอร์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง..... | 44 |
| 3.3 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง..... | 44 |
| 3.5 ค่าที่ใช้ในการเดินระบบถังปฏิกรณ์เอปียอร์ 3 ชุดการทดลอง..... | 46 |
| 3.6 องค์ประกอบและสัดส่วนธาตุอาหารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์..... | 47 |
| 3.7 รายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ความถี่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการ วิเคราะห์ก่อนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว..... | 49 |
| 3.8 รายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ความถี่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการ วิเคราะห์หลังระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว..... | 50 |
| 4.1 รหัสการเรียกชื่อของถังปฏิกรณ์เอปียอร์ 3 ชุดในแต่ละช่วงการทดลอง..... | 53 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปียอร์จาก 3 ชุด การทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 56 |
| 4.3 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์ เอปียอร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 63 |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปียอร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 67 |
| 4.5 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปียอร์จาก 3 ชุดการ ทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| 4.6 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ในเทรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 76 |
| 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 79 |
| 4.8 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการ ทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 81 |
| 4.9 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ในเทรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 87 |
| 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 92 |
| 4.11 ปริมาณซีไอดีในทุกสภาวะการทดลองเมื่อแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 93 |
| 4.12 ปริมาณไนเทรตในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 96 |
| 4.13 ปริมาณแอมโมเนียในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 99 |
| 4.14 ปริมาณซัลเฟตในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 102 |
| 4.15 ปริมาณเหล็กทั้งหมดในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์..... | 107 |
| 4.16 ปริมาณการเปลี่ยนแปลง ซัลเฟต ซัลไฟด์ และเหล็กชนิดต่างๆ แบ่งตาม ช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเดิมเฟอริกคลอไรด์..... | 109 |
| 4.17 ปริมาณการเปลี่ยนแปลง ซัลเฟต ซัลไฟด์ และเหล็กชนิดต่างๆ แบ่งตาม ช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเดิมเฟอริกซีเทรต..... | 111 |

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| ก-1 แสดงค่าสัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี..... | 122 |
| ก-2 แสดงค่าสัดส่วนเหล็กที่ใช้ในการทดลอง..... | 123 |
| ข-1 ค่าซีโอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถึงปฏิกรณ์.. | 125 |
| ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตาม ถึงปฏิกรณ์..... | 134 |
| ข-3 ค่าซีลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตาม ถึงปฏิกรณ์..... | 140 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ลำดับขั้นของกระบวนการหายใจ โดยเรียงลำดับก่อนและหลังของการเกิดปฏิกิริยาจากด้านล่างขึ้นด้านบน..... | 7 |
| 2.2 กระบวนการต่างๆ ในวัฏจักรไนโตรเจน..... | 10 |
| 2.3 กระบวนการต่างๆ ในวัฏจักรซัลเฟอร์..... | 17 |
| 2.4 สถานะต่างๆ ของเหล็กในน้ำธรรมชาติ..... | 29 |
| 2.5 โครงสร้างของเฟอริกซีเทรตและเฟอริกคลอไรด์..... | 30 |
| 3.1 แผนผังสรุปการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด..... | 42 |
| 3.2 สูตรโครงสร้างของเฟอริกไฮดรอกไซด์และเฟอริกคีเลตที่ใช้ในการทดลอง..... | 47 |
| 3.3 ดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 3.4 แผนภาพการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์และรูปถ่ายดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีไอดี ในเทรต และซัลเฟตในน้ำทิ้งของดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 55 |
| 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีไอดี ในเทรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียของดังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 58 |
| 4.3 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 59 |
| 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 60 |
| 4.5 ความเข้มข้นซัลไฟต์ในดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 61 |
| 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ในเทรต และซัลเฟตในดังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)..... | 62 |

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 64 |
| 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าจากถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 66 |
| 4.9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตในน้ำทิ้งจาก ถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 69 |
| 4.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ในเทรต ไนไทรต์ และแอมโมเนียของ ถังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 72 |
| 4.11 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุด การทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 73 |
| 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 74 |
| 4.13 ความเข้มข้นซัลไฟต์ในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 74 |
| 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 75 |
| 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 77 |
| 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 78 |
| 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตในน้ำทิ้ง ของถังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ตลอดช่วงระยะเวลาการวิจัย ตั้งแต่การทดลองช่วงที่ 1-3 | 82 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ในเทอร์ต ไนไทรต์ และแอมโมเนีย ของถังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 84 |
| 4.19 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุด การทดลองในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 85 |
| 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 86 |
| 4.21 ความเข้มข้นซัลไฟต์ในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 87 |
| 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทอร์ต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)... | 88 |
| 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)..... | 90 |
| 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)... | 91 |
| 4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง | 94 |
| 4.26 ปริมาณความเข้มข้นซีโอดี ในน้ำขาเข้าและในแต่ละช่องย่อยของ ถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ตลอดช่วงระยะเวลาการวิจัยตั้งแต่ การทดลองช่วงที่ 1-3..... | 95 |
| 4.27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรตเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง | 97 |
| 4.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง | 100 |
| 4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟตเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง | 103 |

ภาพที่

หน้า

| | |
|---|-----|
| 4.30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง | 106 |
| 4.31 การเกิดซัลไฟด์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเต็มเฟอริกคลอไรด์ในทั้ง 3 ช่วงการทดลอง..... | 108 |
| 4.32 การเกิดซัลไฟด์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อย ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเต็มเฟอริกซิเทรตในทั้ง 3 ช่วงการทดลอง..... | 110 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากภาวะการณ์ปัจจุบันที่มีการเติบโตของชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และเกษตรกรรมที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำเสียที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมมีความสกปรกเจือปนในรูปสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูงมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยอุตสาหกรรมบางประเภทมีการใช้กรดในตริกและกรดซัลฟูริกในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ อุตสาหกรรมการผลิตวัตถุระเบิดและอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยเคมี เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตปนเปื้อนในปริมาณสูง หากถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัด จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียงเป็นอย่างมาก เช่น ทารกแรกเกิดหากบริโภคน้ำที่มีปริมาณไนเตรตปนเปื้อนสูงจะทำให้เกิดโรค Methemoglobinemia หรือ “ทารกเขียว” ส่วนซัลเฟตเป็นต้นเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาสำคัญในเรื่องกลิ่นเหม็นเน่าและการกัดกร่อนในท่อน้ำเสีย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการคิดค้นเทคโนโลยีต่างๆ ที่อาศัยทั้งกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่สามารถกำจัดไนเตรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องด้วยลักษณะสมบัติที่คล้ายคลึงกันของไนเตรตและซัลเฟต คือ เป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี ส่งผลทำให้การกำจัดสารดังกล่าวออกจากน้ำเสียทำได้ยาก การใช้เทคโนโลยีขั้นสูงที่มีราคาแพงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมาก ทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาคือ การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพซึ่งจัดเป็นแนวทางที่ใช้บำบัดน้ำเสียอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการบำบัดต่ำกว่าวิธีการแบบอื่นๆ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) พบว่าถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงในสภาวะที่มีค่าสัดส่วนซีโอดีต่อไนเตรตสูงได้ดีโดยไนเตรตถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ซัลเฟตถูกกำจัดได้เพียงบางส่วน แต่ยังมีปริมาณซีโอดีเหลือในน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เมื่อมีปริมาณซีโอดีที่มากเกินไประบบฯ ก็จะสามารถกำจัดซีโอดีที่มีอยู่ให้ลดลงจนเหลือน้อยได้ นอกจากนี้จากงานวิจัยยังพบว่าการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในปริมาณสัดส่วนเทียบต่อซีโอดีที่สูงขึ้นจากค่าที่แนะนำสำหรับระบบบำบัดไร้อากาศโดยทั่วไป สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามเหล็กที่เติมในรูปเฟอร์ริกไอออนนั้นสามารถตกตะกอนได้ง่าย โดย

เกิดเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าหากทำการเติมเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมและในรูปฟอร์มที่ไม่ตกตะกอน (เหล็กคิเลต) ก็น่าจะส่งผลให้แบคทีเรียสามารถดึงธาตุเหล็กไปใช้ได้โดยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการเดินระบบในสภาวะดังกล่าว คือ น้ำเสียมีแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนหรือค่าซีโอดีมากเกินไปที่จะสามารถกำจัดได้ทั้งไนเทรตและซัลเฟตอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่แท้จริงภายใต้สภาวะที่มีทั้งไนเทรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงด้วยถังปฏิกรณ์แบบเอปียอร์ และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการเติมเหล็กใน 2 รูปฟอร์ม คือ เฟอริกไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเฟอริกคลอไรด์ และเฟอริกคิเลตซึ่งได้จากเฟอริกซิเทรตมาใช้ในการทดลอง และแปรค่าปริมาณการเติมเหล็ก 3 สัดส่วน คือ 0.1 1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี โดยค่าแรกเป็นค่าที่เคยทำการทดลองโดยมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดไนเทรตและซัลเฟตได้ดี แต่ปริมาณซีโอดียังคงมีเหลืออยู่มาก ส่วนค่าสัดส่วนที่สองเป็นตัวเลขที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งคาดว่าจะมากเพียงพอต่อความต้องการของระบบในการกำจัดทั้งไนเทรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสัดส่วนสุดท้ายเป็นปริมาณการเติมเหล็กที่เพิ่มขึ้น 10 เท่าจากค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี โดยในช่วงแรกของงานวิจัยจะเริ่มดำเนินการเดินระบบในสภาวะที่น้ำเสียมีแหล่งสารอินทรีย์หรือค่าซีโอดีมากเกินไป และทำการศึกษาพฤติกรรมตลอดจนประสิทธิภาพของระบบเอปียอร์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของไนเทรตและซัลเฟตสูง จากนั้นทำการเติมเหล็กใน 2 รูปฟอร์มลงในถังปฏิกรณ์ คือ เฟอริกไฮดรอกไซด์และเฟอริกคิเลต ที่ค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี ($\text{Fe} : \text{COD}$) แตกต่างกัน เพื่อศึกษาลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา และผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในรูปฟอร์มของเหล็กที่ต่างกัน ที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเทรตและซัลเฟตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอปียอร์ ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์เอปียาร์
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และกระบวนการซัลเฟตรีดักชันที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกไอออนและเฟอร์ริกคีเลตที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ และกระบวนการซัลเฟตรีดักชันในถังปฏิกรณ์เอปียาร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

1. น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำประปา โดยมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน มีโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นแหล่งของไนเตรตและซัลเฟตตามลำดับ
2. ถังปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นถังปฏิกรณ์เอปียาร์แบบเปิดฝา ลักษณะถังทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12 x 48 ซม. สูง 35 ซม. ปริมาตรรวมทั้งสิ้น 20 ลิตร โดยเป็นปริมาตรในส่วนใช้งาน 16 ลิตร แบ่งออกเป็น 4 ช่องย่อยที่มีปริมาตรเท่ากันช่องละ 4 ลิตร
3. หัวเชื้อที่ใช้ในการเดินระบบเป็นหัวเชื้อแอนแอโรบิกจากสลัดจ์ในถังย่อยเศษผักและผลไม้ของบริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด
4. เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กใน 2 รูปแบบ คือ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) โดยเตรียมขึ้นจากเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride ; $FeCl_3$) และเฟอร์ริกซิเตรต (Ferric Citrate ; $FeC_6H_5O_7$)

5. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณซีโอดีเริ่มต้น 3,600 มก./ล. ไนเตรต 300 มก. ไนโตรเจน/ล. และซัลเฟต 300 มก.ซัลเฟต/ล. โดยแปรค่าสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีโอดีลงในน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ค่า เท่ากับ 0.1 1.0 และ 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี
6. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทำตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 21th edition (2005)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรม ลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา และความสามารถของระบบเอปียาร์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของซีโอดี ไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูง
2. ทำให้ทราบถึงผลของการเติมธาตุเหล็กและรูปฟอร์มที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอดี ไนเตรตและซัลเฟตด้วยระบบถังปฏิกรณ์แบบเอปียาร์ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนอย่างเหลือเฟือ
3. เป็นแนวทางที่จะนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมที่มีทั้งองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตปริมาณสูง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะสมบัติทางชีวเคมีของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

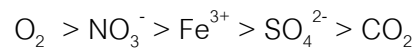
การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นไม่ว่าจะเป็นกระบวนการแบบใช้อากาศหรือแบบไร้อากาศ ล้วนแต่มีกลไกพื้นฐานร่วมกัน กล่าวคือ เป็นปฏิกิริยาชีวเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) โดยสารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียส่วนใหญ่ที่มีพลังงานในตัวสูงจะทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน ส่วนสารอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน ซึ่งหากพิจารณาโดยจำแนกกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ จากสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายของกระบวนการแล้วจะสามารถจำแนกรูปแบบของปฏิกิริยาชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียออกได้ดังตารางที่ 2.1 โดยจะเห็นได้ว่าถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนอิสระ (O_2) จะจัดเป็นปฏิกิริยาแบบใช้อากาศหรือแอโรบิก แต่ถ้าสารรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ออกซิเจนอิสระแต่เป็นสารอื่นๆ เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^-) หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก็จัดเป็นปฏิกิริยาแบบไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก ซึ่งในกรณีที่มีสารรับอิเล็กตรอนหลายชนิดปะปนกัน在水เสียหนึ่งๆ ปัจจัยที่จะเป็นตัวตัดสินว่ากระบวนการใดจะเกิดขึ้นได้บ้าง และมีลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นเช่นไรนั้น ก็คือ ปริมาณพลังงานที่จุลินทรีย์จะได้รับจากการใช้สารรับอิเล็กตรอนตัวนั้นๆ

ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

| สารให้อิเล็กตรอน | สารอินทรีย์ | | | | | |
|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|-------------------|------------------------|------------------|
| สารรับอิเล็กตรอน | ออกซิเจน | ไนเตรต | เฟอร์ริก | ซัลเฟต | สารอินทรีย์ | คาร์บอนไดออกไซด์ |
| ผลของปฏิกิริยา | ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | ก๊าซไนโตรเจน | เฟอร์รัส | ซัลไฟด์ | สารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก | ก๊าซมีเทน |
| ชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์ | Aerobic oxidation | Denitrification | Iron reduction | Sulfate reduction | Fermentation | Methanogenesis |

(ที่มา : ดัดแปลงจากมันสิน ตันกุลเวศม์, 2546)

โดยเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ออกซิเจน ไนเตรต เหล็ก ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะสามารถเรียงลำดับความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากมากไปน้อยได้ ดังนี้

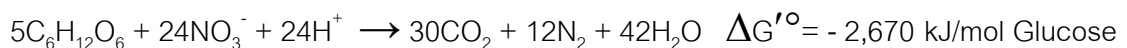


โดยภาพที่ 2.1 แสดงลำดับชั้นของกระบวนการหายใจโดยเรียงลำดับก่อนและหลังของการเกิดปฏิกิริยาจากด้านล่างขึ้นด้านบน และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่จุลินทรีย์จะได้รับเมื่อเรียงตามลำดับความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของออกซิเจน ไนเตรต เหล็ก ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ คือ -2,870, -2,670, -1,410, -452 และ -350 กก.จูล/โมลของกลูโคสตามลำดับ ดังแสดงได้ด้วยปฏิกิริยาต่อไปนี้

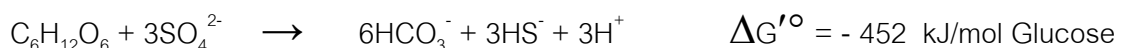
Aerobic respiration



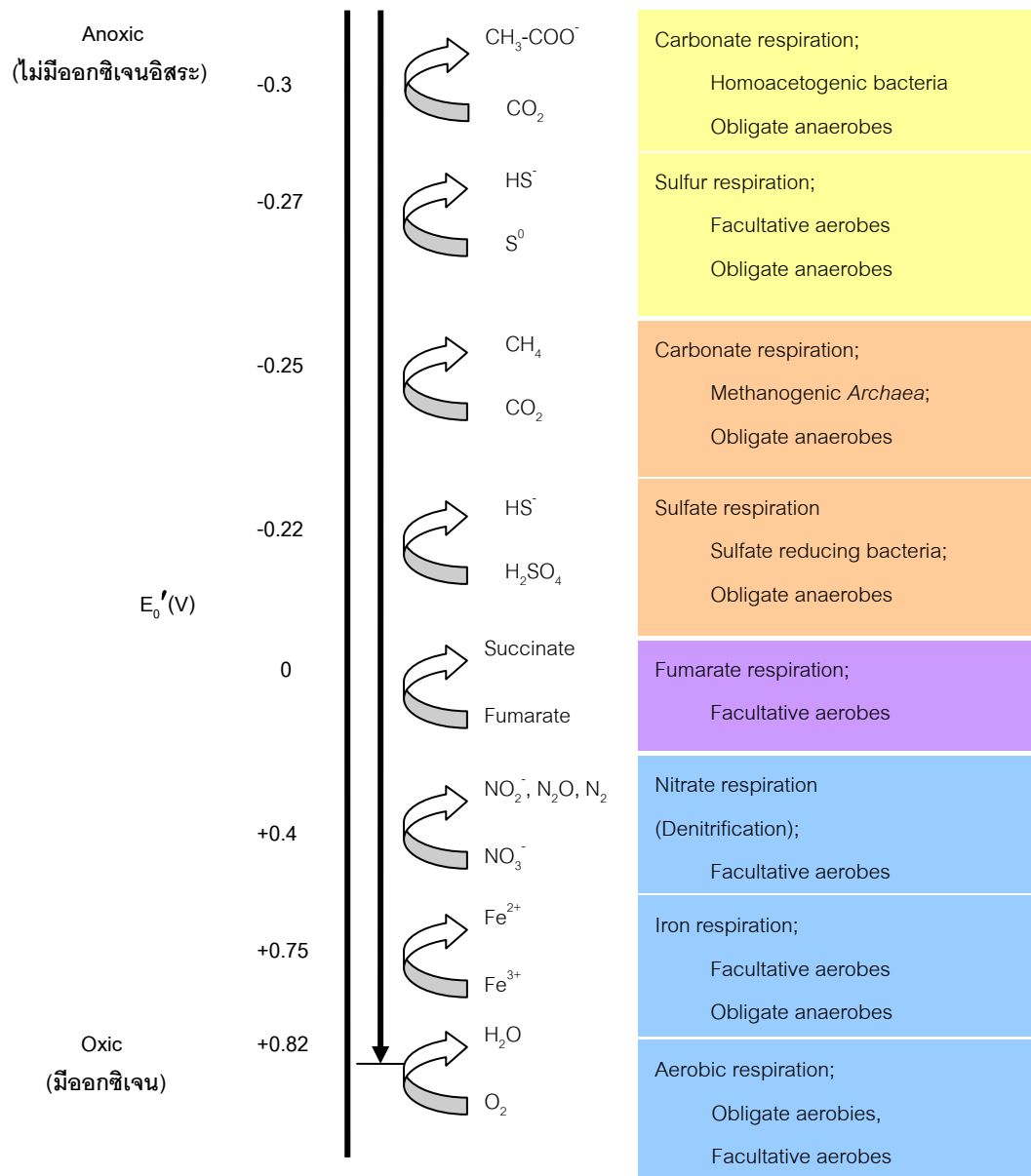
Denitrification



Sulfate reduction



แต่อย่างไรก็ตามการแข่งขันเพื่อแย่งชิงการใช้สับสเตรตของจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ช่วงอุณหภูมิและค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนั้นๆ และรวมถึงสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย



ภาพที่ 2.1 ลำดับชั้นของกระบวนการหายใจ (Electron tower) โดยเรียงลำดับก่อนและหลังของการเกิดปฏิกิริยาจากด้านล่างขึ้นด้านบน (Medigan และ Martinko, 2006)

กระบวนการแบบไร้อากาศมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแตกต่างจากกระบวนการแบบใช้อากาศอย่างเด่นชัดหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น

- เป็นกระบวนการที่สามารถให้ก๊าซมีเทนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยาได้
- เป็นกระบวนการที่มีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำ
- เป็นกระบวนการไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ให้เหลือในระดับต่ำมากได้เมื่อเทียบกับกระบวนการแบบใช้อากาศ
- เป็นกระบวนการที่มีเสถียรภาพค่อนข้างต่ำ
- เป็นกระบวนการที่มีความต้องการธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ

โดยลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้ล้วนสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นแตกต่างกันในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนั่นเอง (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

2.2 วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle)

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของโปรตีนและกรดนิวคลีอิกในเซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิดจึงมีความสำคัญต่อวงจรของสิ่งมีชีวิตทุกรูปแบบ ถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะเป็นธาตุที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 79 ในชั้นบรรยากาศ แต่ไนโตรเจนก็เป็นธาตุที่มีอยู่อย่างจำกัดในดินและน้ำเนื่องจากก๊าซไนโตรเจน (N_2) มีความคงตัวมากและเปลี่ยนรูปได้ยาก ในธรรมชาติไนโตรเจนสามารถอยู่ในสารประกอบต่างๆ โดยมีค่าเลขออกซิเดชันตั้งแต่ +5 (Nitrate ; NO_3^-) จนถึง -3 (Ammonia ; NH_3) กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรไนโตรเจนสามารถแสดงดังภาพที่ 2.2 และจำแนกตามชนิดของปฏิกิริยาได้ดังตารางที่ 2.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Bitton, 2005)

1. **Nitrogen fixation** เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปก๊าซไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียหรือไอออนซึ่งอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ แต่ด้วยกระบวนการดังกล่าวต้องแตกพันธะสามของไนโตรเจนออกจึงต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นจะมีแบคทีเรียเพียงบางชนิดและไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) ที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้

2. **Nitrogen assimilation** เป็นกระบวนการนำเอาไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียหรือไอออน (NH_4^+) หรือไนเตรตไปใช้ในการสร้างเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนและสารประกอบกรดนิวคลีอิก โดยทั่วไปเซลล์จะต้องการปริมาณไนโตรเจนเมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการสร้างเซลล์ (C/N) เท่ากับ 1:10

3. **Nitrogen mineralization (Ammonification)** เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น การย่อยสลายโปรตีนเป็นกรดอะมิโนซึ่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นแอมโมเนีย โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นในสภาวะแอนอกซิก (Anoxic) ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสและ/หรือขั้นตอนของกระบวนการหมัก

4. **Nitrification** เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรต ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรีย *Ammonia oxidizing bacteria (AOB)* ได้แก่ *Nitrosomonas Nitrospira Nitrosococcus Nitrosolobus* และ *Nitrosovibrio* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่ม *Aerobic chemolithoautotrophs* ทำงานได้ดีในสภาวะที่พีเอชเป็นกลาง 7 – 8 โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นได้สองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไฮดรอกซิลามีน (NH_2OH) แต่ขั้นตอนนี้ไม่ให้พลังงานแก่แบคทีเรีย ดังนั้นไฮดรอกซิลามีนจะถูกย่อยสลายต่ออย่างรวดเร็วในขั้นตอนที่สองเพื่อเปลี่ยนเป็นไนไตรต์

2. การเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต โดยแบคทีเรีย *Nitrite oxidizing bacteria (NOB)* ได้แก่ *Nitrobacter Nitrospira* และ *Nitrococcus*

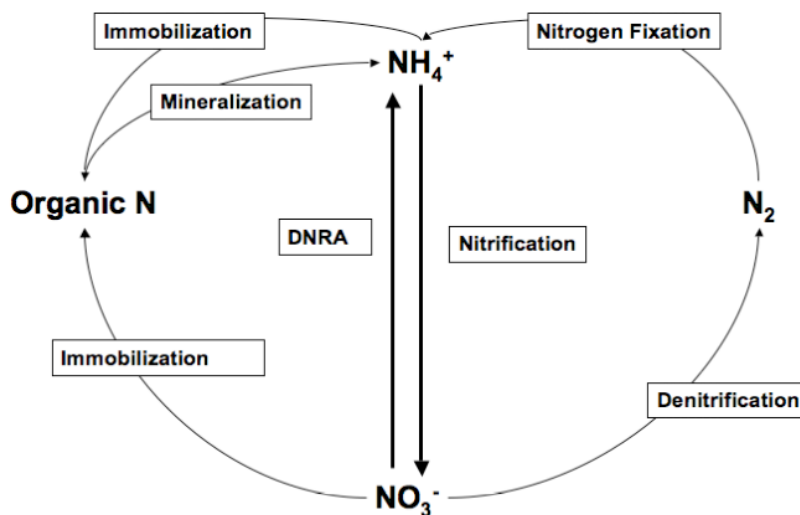
กระบวนการไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นต้องมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ อีกทั้งต้องมีสภาพต่างเพียงพอสำหรับการสะสมไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเซลล์แบคทีเรีย ในทางทฤษฎีแล้วการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตต้องการออกซิเจนเท่ากับ 4.6 มก. ออกซิเจนต่อ มก.แอมโมเนีย (Haandel และคณะ, 2006)

5. **Dissimilatory nitrate reduction** เป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรตเพื่อสร้างพลังงานจากกระบวนการหายใจ (Respiration) กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน โดยมีไนไตรต์เป็นสารตัวกลาง (Intermediate product) ของกระบวนการ ซึ่งไนไตรต์จะถูกรีดิวซ์ต่อได้ 3 รูปแบบ คือ

1. ไนไตรต์ถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจน โดยกระบวนการที่เรียกว่า **Denitrification** ที่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนย่อย คือ $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในลำดับถัดไป

2. ไนไตรต์ถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) โดยกระบวนการที่เรียกว่า **Nitrate ammonification** หรือ **Dissimilatory nitrate reduction to ammonia (DNRA)**

3. ไนโตรที่ถูกตรึงได้เข้าไปเป็นก๊าซไนโตรเจนควบคู่ไปกับการออกซิไดซ์แอมโมเนียในไอออนโดยกระบวนการที่เรียกว่า แอนนามอกซ์ (Anammox)



ภาพที่ 2.2 กระบวนการต่างๆ ในวัฏจักรไนโตรเจน (McGowan, 2007)

ตารางที่ 2.2 กระบวนการหลักในวัฏจักรไนโตรเจนและแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

| กระบวนการ | ตัวอย่างกลุ่มแบคทีเรีย |
|---|---|
| Nitrification ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) | |
| ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$) | <i>Nitrosomonas</i> |
| ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) | <i>Nitrobacter</i> |
| Denitrification ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$) | <i>Bacillus, Paracoccus, Pseudomonas</i> |
| N_2 Fixation ($\text{N}_2 + 8\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2$) | |
| Free-living - Aerobic | <i>Azotobacter, Cyanobacteria</i> |
| - Anaerobic | <i>Clostridium, purple และ green bacteria</i> |
| Symbiotic | <i>Rhizobium, Bradyrhizobium, Frankia</i> |
| Ammonification ($\text{Organic-N} \rightarrow \text{NH}_4^+$) | แบคทีเรียหลายกลุ่ม |
| Anammox ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2$) | <i>Brocadia</i> |

(ที่มา : Medigan และ Martinko, 2006)

2.3 ดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

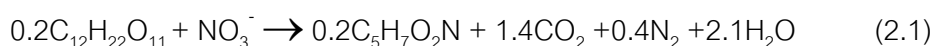
คือกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรต โดยไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนและถูกเปลี่ยนรูปเป็นไนโตรเจน ไนทริก ไนทรีออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ จึงเรียกปฏิกริยาดังกล่าวว่า ดีไนทริฟิเคชันหรือไนเตรตรีดักชัน (Nitrate reduction) ซึ่งหมายถึงปฏิกริยาที่ใช้ในการกำจัดไนเตรต โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการนี้คือ ดีไนทริฟิเคชันแบคทีเรีย (Denitrifier Bacteria) เมื่อพิจารณาตามประโยชน์และกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เกิดขึ้น พบว่าแบคทีเรียสามารถใช้นิเตรตได้ 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน (Assimilation denitrification)

เป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียมไอออนเพื่อประโยชน์ในการสร้างเซลล์ ซึ่งหากในน้ำเสียมีปริมาณแอมโมเนียมไอออนไม่เพียงพอ แบคทีเรียก็สามารถที่จะรีดิวซ์ไนเตรตเป็นแอมโมเนียมไอออนและนำไปใช้สร้างเซลล์ได้ ซึ่งความสามารถในการรีดิวซ์ไนเตรตในลักษณะนี้พบได้ในแบคทีเรียทั่วไป

2. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน (Dissimilation denitrification)

เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียใช้นิเตรตเป็นสารรับอิเล็กตรอนเพื่อสร้างพลังงาน โดยกระบวนการแบบดิสสิมิเลชันสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 รูปแบบตามผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ที่ได้ก๊าซไนโตรเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งกระบวนการในการเปลี่ยนรูปไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนเมื่อมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งคำนวณตามสมการสโตยชิโอเมตริก แสดงดังสมการที่ 2.1



ส่วนอีกกระบวนการที่เกิดขึ้นได้คือ กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonia (DNRA) ซึ่งไนเตรตถูกเปลี่ยนรูปไปกลายเป็นแอมโมเนีย ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มโปรคาริโอต

| Dissimilatory branch | | Assimilatory branch |
|--|---|---|
| <p>Denitrification (สร้างพลังงาน การทิ้งอิเล็กตรอน)</p> <p>↓</p> <p>Respiratory nitrate reduction $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ (ไนเตรตถูกปล่อยออกมาออกเซลล์หรือถูกรีดิวซ์ต่อไป)</p> <p>↓</p> <p>Denitrification $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ (ที่อยู่ในรูปก๊าซก็จะหลุดออกไป)</p> <p>↓</p> <p>Nitrous oxide respiration $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$</p> | <p>Ammonification (การทิ้งอิเล็กตรอน สร้างพลังงาน กำจัดสารพิษ)</p> <p>↓</p> <p>Ammonifying nitrite reduction $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ (แอมโมเนียมีไฮดรอกซิลถูกปล่อยออกมาออกเซลล์)</p> <p>↓</p> <p>($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$) (Nitrate reduction to ammonia, DNRA)</p> | <p>Assimilation (การสร้างเซลล์)</p> <p>↓</p> <p>Assimilatory nitrate reduction $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ (ไนเตรตถูกรีดิวซ์ต่อไป)</p> <p>↓</p> <p>Assimilatory nitrate reduction $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ (แอมโมเนียมีไฮดรอกซิลถูกนำไปสร้างเซลล์)</p> |

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Zumft, 1997)

สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

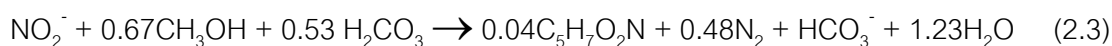
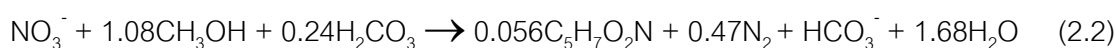
มีรายงานจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีพบว่า มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

พีเอช ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์คือประมาณ 7.0 - 8.5 โดยระดับพีเอชที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และเกิดการสะสมของไนไตรต์ หรือสารตัวกลาง (Intermediate products) อื่นๆ เช่น ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 7.0 จะเกิดไนตรัสออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายแทนที่จะเป็นก๊าซไนโตรเจน

ออกซิเจน ออกซิเจนมีผลต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ 2 ทางคือ 1) แบคทีเรียจะเลือกใช้ ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนก่อนไนเตรตเนื่องจากให้พลังงานที่สูงกว่า จึงทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าในระบบมีปริมาณออกซิเจนไม่มาก กระบวนการดีไนทริฟิเคชันก็สามารถเกิดควบคู่กันได้ ตัวอย่างเช่น การเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในปลีอกหรือภายในชั้นฟิล์มชีวภาพของระบบบำบัดแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ และ 2) ออกซิเจนจะไปยับยั้ง

การทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เช่น มีรายงานว่าค่าออกซิเจนละลายที่สูงกว่า 0.2 มก.ออกซิเจน/ลิตร จะสามารถยับยั้งกระบวนการดีไนทริฟิเคชันของแบคทีเรีย *Pseudomonas* ได้ (ธงชัย พรภณสวัสดิ์, 2544)

สภาพต่าง ปฏิริยาดีไนทริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ผลิตสภาพต่าง (Alkalinity) ขึ้นในระบบฯ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วกระบวนการดีไนทริฟิเคชันจะสร้างสภาพต่างเฉลี่ยประมาณ 3.57 มก.หินปูน/มก.ไนเตรตที่ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 (Haandel และ คณะ, 2006) แต่ในทางปฏิบัติค่าสภาพต่างที่เกิดขึ้นอาจลดลงเหลือประมาณ 3.0 มก.หินปูน/มก.ไนเตรต



อุณหภูมิ แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์สามารถเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 35-50°C แต่ก็พบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถเติบโตได้แม้ในอุณหภูมิต่ำ (5-10°C) แต่จะมีค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันจำเพาะ (Specific denitrification rate) ลดลง

อายุสลัดจ์ เมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้นการผลิตเซลล์สุทธิจะลดลง ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ต้องการสำหรับปฏิริยาดีไนทริฟิเคชันในปริมาณไนเตรตที่เท่ากันจะลดลง นอกจากนี้ถ้าอายุสลัดจ์ในถัง แอนีอกซิกเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้อัตราดีไนทริฟิเคชันจำเพาะลดลงด้วย

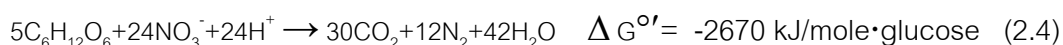
ไนไตรต์ ไนไตรต์ที่อยู่ในรูปกรดไนทริคอิสระที่ไม่แตกตัวเป็นอิออนจะสามารถยับยั้งปฏิริยาดีไนทริฟิเคชันได้แม้มีความเข้มข้นเพียง 0.13 มก.ไนไตรต์/ล. เนื่องจากที่ค่าความเข้มข้นนี้และที่พีเอช 6 - 8 จะเทียบเท่ากับไนไตรต์ที่แตกตัวเป็นอิออนเท่ากับ 100 มก.ไนไตรต์/ล. โดยการสะสมตัวของไนไตรต์เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ (Tiedje, 1988) ได้แก่ การมีสารให้อิเล็กตรอน (สารอินทรีย์) น้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณสารรับอิเล็กตรอน ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิริยาช้าหรือหยุดที่ขั้นตอนการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนทริคออกไซด์ หรืออาจเกิดจากการมีสารที่เป็นพิษต่อระบบ จึงส่งผลให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ หรือเกิดจากความไม่สมดุลกันของอัตราเร็วของปฏิริยาในขั้นตอนไนเตรตรีดักชัน (Nitrate reduction) และไนไตรตรีดักชัน (Nitrite reduction) เมื่อในระบบฯ มีไนเตรตความเข้มข้นสูง เนื่องจากปกติแล้วค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิริยาไนเตรตรีดักชันจะสูงกว่าไนไตรตรีดักชัน

อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต (COD/N) เนื่องจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความต้องการสารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ดังนั้นอัตราส่วน COD/N จึงมีผลต่อกระบวนการที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าทางทฤษฎีของอัตราส่วนนี้อยู่ที่ประมาณ 4.5 - 5.3 กรัมซีโอดี/กรัมไนเตรต (Tchobanoglous และคณะ, 2002) แต่ในทางปฏิบัติค่าอัตราส่วนนี้อาจแตกต่างกันโดยขึ้นกับลักษณะรูปแบบและประเภทของสารอินทรีย์

2.4 กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ (Dissimilatory nitrate reduction to ammonia; DNRA)

ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกกระบวนการเปลี่ยนรูปไนเตรตที่สำคัญจะประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ Respiratory denitrification หรือ Denitrification และ Dissimilatory nitrate reduction to ammonia หรือ DNRA ซึ่งโดยในภาวะปกติแล้วกระบวนการ Respiratory denitrification มักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นก่อน เนื่องด้วยค่าพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนจะให้พลังงานที่สูงกว่ากระบวนการดีเอ็นอาร์เอ ตัวอย่างเช่น ในสมการการย่อยสลายกลูโคส (ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5) (Strohm และคณะ, 2007) อีกทั้งค่าอีลด์ของการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์มีค่าสูงกว่าของแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ

กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

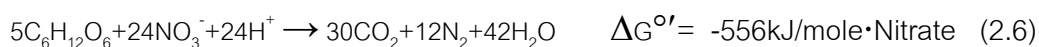


กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ

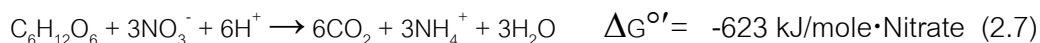


แต่ในหลายงานวิจัยกลับพบว่าในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ (สารให้อิเล็กตรอน) อยู่เป็นจำนวนมากแต่มีไนเตรต (สารรับอิเล็กตรอน) อยู่อย่างจำกัด กระบวนการดีเอ็นอาร์เอก็สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากเมื่อคำนวณค่าพลังงานที่แบคทีเรียได้รับโดยเทียบต่อโมลไนเตรตกลับพบว่าค่าพลังงานที่ได้จากกระบวนการดีเอ็นอาร์เอมีค่าที่สูงกว่าจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตัวอย่างเช่นกระบวนการดีเอ็นอาร์เอสามารถพบได้ในชั้นตะกอนดินใต้ทะเลสาบ หรือระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงกล่าวว่าค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนที่ทำให้เกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอมีค่าไม่แน่นอนเพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการแข่งขันระหว่างกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น กลุ่มประชากรแบคทีเรีย

กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน



กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ



นอกจากนี้แล้วกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอก็มีความแตกต่างจากแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ เนื่องจากแบคทีเรียที่ใช้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอได้นั้นมักเป็นกลุ่มแอนแอโรบิก และ/หรือเป็นแบคทีเรียที่ใช้กระบวนการหมักในการสร้างพลังงานทำให้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอมักถูกยับยั้งด้วยปริมาณออกซิเจน ในทางกลับกันแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์จะเป็นแบคทีเรียในกลุ่มแอโรบิกที่สามารถอยู่ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการดีเอ็นอาร์เอและแอสซิมิเลชันไนเทรตรีดักชัน (Assimilatory nitrate reduction) ที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียเช่นเดียวกัน แต่กลไกควบคุมการทำงานของกระบวนการทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมาก กล่าวคือ กระบวนการแอสซิมิเลชันสามารถเกิดขึ้นได้โดยแบคทีเรียหลายกลุ่ม โดยแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์และไม่ถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งกระบวนการนี้จะถูกยับยั้งเมื่อในระบบฯ มีปริมาณแอมโมเนียที่มากเกินไปพอต่อความต้องการของเซลล์ ส่วนกระบวนการดีเอ็นอาร์เอเป็นกระบวนการที่แบคทีเรียได้พลังงานจากการรีดิวซ์ไนเทรต ดังนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งแอมโมเนียที่เกิดขึ้นมีมากเกินไปความต้องการเพื่อการเติบโตของเซลล์ โดยไม่มีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาดีเอ็นอาร์เอ

ในขั้นตอนแรกของกระบวนการดีเอ็นอาร์เอคือ การเปลี่ยนไนเทรตเป็นไนไตรต์ เช่นเดียวกับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน หลังจากนั้นไนไตรต์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการดีเอ็นอาร์เอไม่มีการสะสมตัวของไนไตรต์เกิดขึ้นเช่นเดียวกับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เนื่องจากไนไตรต์สามารถเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในระบบที่มีกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ร่วมอยู่ด้วยก็จะช่วยเปลี่ยนไนไตรต์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นขั้นตอนที่เป็นขั้นวิกฤติ (Critical step) ของกระบวนการดีเอ็นอาร์เอคือขั้นตอนของการเปลี่ยนไนไตรต์ไปเป็นแอมโมเนีย (Strohm และคณะ, 2007) โดยประโยชน์ที่น่าจะเกิดขึ้นกับเซลล์เมื่อใช้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอคือ 1) เพื่อกำจัดความเป็นพิษของไนไตรต์ที่สะสมในระบบ 2) เพื่อให้เกิดการหมุนเวียน Nicotinamide adenine dinucleotide หรือ NADH (ตัวขนถ่าย

อิเล็กตรอน) กลับไปเป็น NAD^+ ในระบบฯ และ 3) เพื่อสร้างพลังงานจากกระบวนการขนถ่ายอิเล็กตรอน (Electrons transport phosphorylation; ETP) (Tiedje, 1988)

2.5 แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์ (Denitrifier Bacteria)

แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์ที่พบโดยส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มเคโมเฮเทอโรโทรฟ (Chemoheterotrophic Bacteria) กล่าวคือ ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในสภาพที่ใช้ไนเตรตหรือไนไตรต์เป็นสารรับอิเล็กตรอน นอกจากนี้แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์ยังสามารถใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายได้ในกรณีที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้อยู่ได้ในทั้งสภาพที่มีหรือไม่มีอากาศ หรือที่เรียกว่า Facultative Aerobes ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้มักเป็นกลุ่มแกรมลบ (Gram negative bacteria) ที่อยู่ในตระกูล Proteobacteria เช่น *Pseudomonas* *Alcaligenes* และ *Thiobacillus* โดยพบว่าแบคทีเรียในกลุ่ม *Pseudomonas* และ *Alcaligenes* เป็นสายพันธุ์ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียในกลุ่มแกรมบวก (Gram positive bacteria) รวมทั้งอาร์เคีย (Archaea) บางสายพันธุ์ เช่น *Halobacterium* ก็หายใจได้ด้วยไนเตรตเช่นกัน จึงเป็นการยืนยันให้เห็นว่าแบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์มีหลากหลายสายพันธุ์ นอกจากนี้ยังพบว่าในบางกรณีที่ไม่มีทั้งออกซิเจนและไนเตรต แบคทีเรียดีไนทริฟายเออร์อาจสามารถเจริญเติบโตโดยใช้เหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนไนเตรตได้อีกด้วย

2.6 วัฏจักรซัลเฟอร์ (Sulfur cycle)

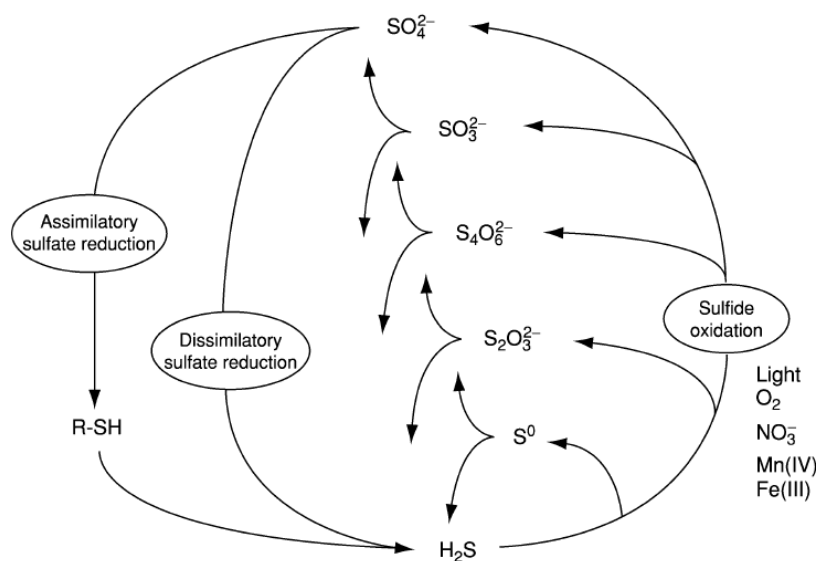
ซัลเฟอร์ที่พบในธรรมชาติจะมีค่าเลขออกซิเดชันอยู่เพียง 3 ค่า คือ -2 (Sulphydyl ; R-SH และ Sulfide ; HS^-) 0 (Elemental sulfur) และ +6 (Sulfate ; SO_4^{2-}) ซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์แบคทีเรีย คิดเป็นน้ำหนักประมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักแห้ง โดยสามารถพบซัลเฟอร์ได้ในกรดอะมิโน เช่น ซิสเตอีน (Cysteine) เมไธโอนีน (Methionine) และในวิตามินต่างๆ ตลอดจนสารกลุ่มโคแฟกเตอร์หรือแม้แต่ในสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น ไขมันและคาร์โบไฮเดรต

ซัลเฟตเป็นรูปที่เสถียรของซัลเฟอร์เมื่ออยู่ในสภาวะแอโรบิกเพราะซัลเฟตไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อีก ส่วนซัลไฟด์เป็นรูปที่เสถียรของซัลเฟอร์ในสภาวะแอนแอโรบิกเพราะซัลไฟด์ไม่สามารถถูกรีดิวซ์ได้อีกเช่นเดียวกัน โดยกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในวัฏจักรซัลเฟอร์สามารถแสดงดังตารางที่ 2.4 และภาพที่ 2.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.4 กระบวนการหลักในวัฏจักรซัลเฟอร์และแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

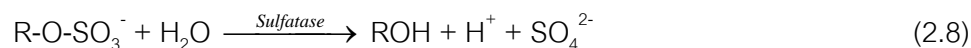
| กระบวนการ (process) | ตัวอย่างกลุ่มแบคทีเรีย |
|--|---|
| Sulfide/Sulfur oxidation ($\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S}^0 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$) | |
| Aerobic | Sulfur chemolithotrophs |
| Anaerobic | (<i>Thiobacillus</i> , <i>Beggiato</i>) |
| Sulfate reduction (Anaerobic) ($\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$) | <i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfobacter</i> |
| Sulfur reduction (Anaerobic) ($\text{S}^0 \rightarrow \text{H}_2\text{S}$) | <i>Desulfuromonas</i> , Hyperthermophilic Archaea |
| Sulfur disproportionation ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{SO}_4^{2-}$) | <i>Desulfovibrio sulfodesmutans</i> |
| Organic sulfur compound oxidation /reduction ($\text{CH}_3\text{SH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$) | แบคทีเรียหลายกลุ่มที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้ |
| Desulfurylation (Organic-S $\rightarrow \text{H}_2\text{S}$) | แบคทีเรียหลายกลุ่มที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้ |

(ที่มา : Medigan และ Martinko, 2006)



ภาพที่ 2.3 กระบวนการต่างๆ ในวัฏจักรซัลเฟอร์ (Canfield, 2005)

1. **Mineralization of organic sulfur** เป็นกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ซัลเฟอร์โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบแอโรบิกหรือแอนแอโรบิก ตัวอย่างเช่น ในสภาวะแอโรบิกซัลเฟตเอสเทอร์จะถูกย่อยสลายได้ซัลเฟต ดังสมการที่ 2.8



2. **Assimilation** เป็นกระบวนการที่เซลล์แบคทีเรียใช้ซัลเฟอร์เพื่อการสร้างเซลล์ โดยพบว่าแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรบิกจะใช้ซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์ ส่วนแบคทีเรียในกลุ่มแอโรบิกจะใช้ซัลเฟอร์ในรูปอื่นๆ ที่มีค่าเลขออกซิเดชันสูงขึ้นไป

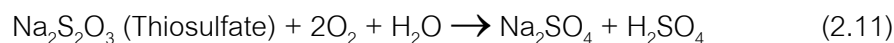
3. **Oxidation reaction** เป็นกระบวนการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

1. *H₂S oxidation* เป็นกระบวนการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ไปเป็นธาตุซัลเฟอร์ภายใต้สภาวะแอโรบิกหรือแอนแอโรบิก โดยหากเกิดภายใต้สภาวะแอโรบิกจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.9



ส่วนกระบวนการออกซิเดชันภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะเกิดโดยแบคทีเรียกลุ่ม Photoautotrophs เช่น Purple sulfur bacteria หรือ Green sulfur bacteria และกลุ่ม Chemoautotrophs เช่น *Thiobacillus denitrificans*

2. *Oxidation of elemental sulfur* เป็นกระบวนการออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟตซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งสภาวะแอโรบิกและแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ภายใต้สภาวะแอโรบิก เช่น *Acidithiobacillus thiooxidans* โดยเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



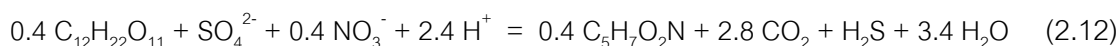
4. **Sulfate reduction** เป็นกระบวนการรีดิวซ์ซัลเฟตไปเป็นซัลเฟอร์ในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งกระบวนการซัลเฟตรีดักชันที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. *แอสสิมิเลชันซัลเฟตรีดักชัน (Assimilation sulfate reduction)* เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ ซึ่งเกิดได้ทั้งสภาวะแอโรบิกและแอนแอโรบิก

2. *ดิสสิมิเลชันซัลเฟตรีดักชัน (Dissimilation sulfate reduction)* เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนเพื่อให้ได้พลังงานโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นซัลไฟด์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในลำดับถัดไป

2.7 ซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ โดยมีความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยกลไกที่เกิดขึ้นนั้นเป็นลักษณะเฉพาะของแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB) ซึ่งโดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้สารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นซัลไฟด์ ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน คำนวณได้จากสมการสโตยชิโอเมตริก



จะเห็นได้ว่าผลสุดท้ายของปฏิกิริยาจะสร้างซัลไฟด์จากการเกิดซัลเฟตรีดักชัน ถึงแม้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีจุดมุ่งหมายในการผลิตมีเทน แต่หากน้ำเสียมีซัลเฟตหรือซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะเกิดขึ้นได้เสมอเพราะให้พลังงานมากกว่าปฏิกิริยาสร้างมีเทน โดยกระบวนการซัลเฟตรีดักชันที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. *แอสสิมิเลชันซัลเฟตรีดักชัน (Assimilation sulfate reduction)* เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ ซึ่งเกิดได้ทั้งสภาวะมีอากาศและสภาวะไร้อากาศ

2. *ดิสสิมิเลชันซัลเฟตรีดักชัน (Dissimilation sulfate reduction)* เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนเพื่อให้ได้พลังงานในสภาวะไร้อากาศ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นซัลไฟด์

โดยการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันและสร้างซัลไฟด์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ดังนี้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2546)

1. ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ลดลง เนื่องจากมีซัลไฟด์เกิดขึ้นในน้ำทิ้งของกระบวนการไม่ใช้อากาศ โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 กรัมสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปซีโอไซด์เท่ากับ 2 กรัม ทำให้มีความจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำทิ้งที่มีซัลไฟด์เจือปนอยู่
2. บางส่วนของซัลไฟด์กลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ โดยหากมีการนำเอาก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิง การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพก็เป็นเรื่องจำเป็น หรือถ้ามีการเผาก๊าซชีวภาพก็จะเกิดก๊าซ SO₂ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ
3. การเกิดซัลเฟตรีดักชันต้องแบ่งสารอินทรีย์บางส่วนจากน้ำเสีย มีผลทำให้แหล่งคาร์บอนสำหรับสร้างมีเทนลดน้อยลงไปตามส่วน ผลผลิตก๊าซมีเทนจะลดน้อยลงด้วย
4. การเกิดซัลไฟด์ในน้ำทิ้งและในก๊าซชีวภาพ สร้างปัญหากรดกรอนโลหะและสร้างกลิ่นเหม็น
5. ซัลไฟด์เป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้อากาศต่างๆ เช่น แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Producing Bacteria; MPB) แบคทีเรียสร้างกรด (Acid Producing Bacteria; APB) และ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB) โดยถ้ามีความเข้มข้นซัลไฟด์สูง ระบบบำบัดต้องทำงานที่อัตราภาวะอินทรีย์ต่ำ มิฉะนั้นระบบจะล้มเหลวหรือมีประสิทธิภาพต่ำ

ในทางกลับกันนอกจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันจะมีข้อเสียต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ยังมีข้อดีดังนี้

1. กระบวนการซัลเฟตรีดักชันใช้กำจัดซัลเฟตออกจากน้ำเสียได้ แต่ควรตระหนักด้วยว่าต้องมีวิธีการกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นด้วย โดยในประเทศเนเธอร์แลนด์มีข้อกำหนดว่าน้ำทิ้งจะต้องมีปริมาณซัลเฟตไม่เกิน 300 มก./ล. เพื่อมิให้มีซัลไฟด์เกิดขึ้นมากเกินไป
2. ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักโดยอาศัยปฏิกิริยาสร้างผลึก (Precipitation) เพื่อตกตะกอนโลหะหนักออกในรูปโลหะซัลไฟด์

ในอดีตปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันมักถูกมองเป็นเรื่องน่ารังเกียจและถือเป็นปัญหาต่อปฏิกิริยาการสร้างมีเทน โดยมีความพยายามอย่างมากในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน เพื่อมิให้เกิดผลเสียต่อปฏิกิริยาสร้างมีเทน แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าการเกิดซัลเฟตรีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้และจะต้องเกิดขึ้นไม่มากก็น้อย

2.8 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB)

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดในธรรมชาติโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นพืชชั้นสูง สหรัาย ราก และเซลล์ของพวกโปรคาริโอตหลายชนิดสามารถใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ในการสร้างเซลล์ แต่ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่แต่ในแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียไร้อากาศชนิดเด็ดขาด (Strictly anaerobic bacteria) นั่นคือไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในที่มีออกซิเจน ยกเว้นกลุ่ม *Desulfovibrio* ที่ค่อนข้างจะทนต่อออกซิเจน นอกจากนี้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนยังสามารถรีดิวซ์ในเทรตเป็นแอมโมเนียได้ด้วย ในการจัดจำแนกพบว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มเคโมเฮเทอโรโทรฟ ซึ่งดำรงชีพและเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ มีลักษณะเด่นคือ สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดส์สารให้อิเล็กตรอน ซึ่งอาจเป็นไฮโดรเจนโมเลกุลหรือสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ได้หลายชนิด เช่น แลคเตท อะซิเตท เป็นต้น โดยขั้นตอนดังกล่าวนี้จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างมีเทนตามปกติ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่มีซัลเฟตจึงมักจะพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดอินทรีย์ระเหยและแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่เสมอ สำหรับการแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถจำแนกออกอย่างกว้างๆ ตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและเจริญเติบโตได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (Incompletely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria; I-SRB)
- แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Completely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria; C-SRB)

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความสามารถในการใช้สารอาหารได้หลากหลายชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับแบคทีเรียสร้างมีเทนตรงที่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่า 1 อะตอมได้ แต่ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์กลุ่มเมทิลได้

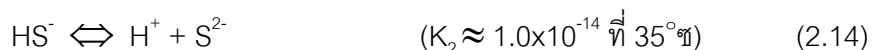
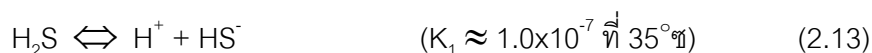
ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Haandel และคณะ, 2006)

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการซัลเฟตรีดักชันสามารถจำแนกได้ดังนี้

พีเอช แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตชอบอยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 - 8.0 โดยจะเกิดการยับยั้งกระบวนการซัลเฟตรีดักชันเมื่อพีเอชต่ำกว่า 5.5 หรือสูงกว่า 9.0 แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานว่ากระบวนการซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดได้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักและอยู่ในสภาวะเป็นกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3.0

อุณหภูมิ แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตส่วนใหญ่เติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง คือ 28-58°C ส่วนแบคทีเรียชนิดที่เป็นกลุ่มที่ชอบอาศัยในช่วงอุณหภูมิสูง หรือ Thermophilic SRB สามารถพบได้ในหลายพื้นที่ที่มีแหล่งความร้อนจากใต้ดิน ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม *Desulfotomaculum* และ *Thermodesulfobacterium* ซึ่งสามารถเติบโตได้ที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูงเท่ากับ 54 - 70°C

ความเป็นพิษของซัลไฟด์ (Speece, 1996) ซัลไฟด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน โดยซัลไฟด์มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ รวมถึงต่อแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตด้วย ซึ่งความเป็นพิษของซัลไฟด์จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช เนื่องจากมีเพียงไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปที่ไม่แตกตัว (Unionized hydrogen sulfide) เท่านั้นที่สามารถผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรียและก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ โดยสมการการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงได้ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14



นั่นคือ ที่พีเอช 8 - 9 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำทั้งหมดจะอยู่ในรูปที่แตกตัวได้ (Ionized form) ส่วนที่ค่าพีเอชเป็นกลางพบว่าประมาณ 20-50% ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำอยู่ในรูปที่ไม่แตกตัว (Unionized form) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย นอกจากนี้ยังพบว่าผลของความเป็นพิษของซัลไฟด์ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของแบคทีเรียในระบบฯ ด้วย กล่าวคือ แบคทีเรียที่เติบโตอยู่แบบแขวนลอยในระบบ (Suspended growth) จะได้รับผลกระทบมากกว่าแบคทีเรียที่เติบโตอยู่เป็นชั้นฟิล์ม (Attached growth หรือ Biofilm) และที่เป็นลักษณะของเม็ดตะกอน (Granular growth)

2.9 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบมีแผ่นกั้นหรือเอปีอาร์ (Anaerobic Baffled Reactor)

(Barber และ Stuckey, 1999)

ถังปฏิกรณ์เอปีอาร์เป็นถังบำบัดที่ออกแบบมาสำหรับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศซึ่งถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 พร้อมกับช่วงที่ Lettinga ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบี (UASB) โดย McCarty และคณะได้สังเกตเห็นว่าในระบบบำบัดแบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor ; RBC) กลุ่มแบคทีเรียส่วนมากสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย และเมื่อเอาแผ่นจานหมุนออกก็ดัดแปลงมาเป็นระบบเอปีอาร์ ซึ่งในช่วงแรกใช้สำหรับการผลิตก๊าซมีเทน ถังปฏิกรณ์เอปีอาร์เป็นระบบบำบัดที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ที่อัตราการสูง (High rate) เนื่องจากสามารถเก็บกักเซลล์จุลินทรีย์ได้จำนวนมาก (SRT สูง) โดยไม่ขึ้นอยู่กับเวลากักพักน้ำ (HRT) ที่เข้ามาในระบบฯ ซึ่งแตกต่างกับถังบำบัดแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor ; CSTR)

สำหรับข้อดีที่สำคัญของระบบเอปีอาร์คือ สามารถแบ่งแยกกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรด (Acidogenesis bacteria) และกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis bacteria) ด้วยช่องถังของระบบ จึงเรียกระบบนี้ว่า ระบบบำบัดแบบสองเฟส (Two-phase system) ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวเป็นการส่งเสริมการทำงานของระบบบำบัดได้อย่างดี เนื่องจากแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มชอบอยู่ในสภาวะที่ต่างกัน ทำให้ง่ายต่อการควบคุมระบบ แม้ว่าระบบเอปีอาร์จะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อเสียบางประการสำหรับการออกแบบระบบบำบัดเพื่อการนำไปใช้งานจริง กล่าวคือ ต้องทำการออกแบบถังให้ตื่นเพื่อควบคุมระดับความเร็วการไหลขึ้นของน้ำและก๊าซ และต้องทำให้การกระจายน้ำเสียเข้าถังมีความสม่ำเสมออีกด้วย

โดยข้อดีด้านต่างๆ ของถังปฏิกรณ์แบบเอปีอาร์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ด้านการออกแบบและการก่อสร้าง

1. ออกแบบง่าย ค่าก่อสร้างไม่สูง
2. ไม่จำเป็นต้องมีระบบกวนผสม
3. ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบไม่สูง ไม่มีการอุดตันของตะกอน

- ด้านการควบคุมระบบ

1. สามารถทำงานได้ที่เวลากักเก็บน้ำต่ำ
2. สามารถคงทนต่อสภาวะ Hydraulic shock load และ Organic shock load ได้ดี
3. สามารถป้องกันระบบจากน้ำเสียที่เป็นพิษได้ โดยสามารถเดินระบบได้ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

- ด้านจุลินทรีย์ในระบบ

1. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อย
2. มีเวลาการกักเก็บเซลล์จุลินทรีย์ได้มาก (SRT สูง) โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง (Fixed media) หรือห้องตกตะกอน
3. ระบบสามารถแยกก๊าซ หรือสลัดจ์ได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ

ส่วนข้อเสียของระบบเอปียาร์คือ

1. ใช้พื้นที่ในการบำบัดมากกว่าระบบอัตราสูง (High rate) อื่นๆ เพราะแม้ว่าการสัมผัสระหว่างน้ำเสีย (อาหาร) กับเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับระบบบ่อหมัก แต่ก็ยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบอัตราสูงอื่น เช่น ระบบยูเอเอสบี เป็นต้น
2. ในกรณีที่ไม่มีกรคลุมบ่อ อาจเกิดกลิ่นเหม็นรบกวนในกรณีที่บ่อรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic load) สูง
3. ในการออกแบบระบบบำบัดเพื่อการนำไปใช้งานจริงต้องทำการออกแบบถังให้ต้นเพื่อควบคุมระดับความเร็วการไหลขึ้นของน้ำและก๊าซ และต้องทำให้การกระจายน้ำเสียเข้าถังมีความสม่ำเสมอ

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอปียาร์เมื่อใช้สัปดาห์ประเภทต่างๆ โดยมีการแสดงค่าขนาดของถังปฏิกรณ์ จำนวนช่องของถังปฏิกรณ์ ซีโอดีที่เข้าระบบ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี ระยะเวลาที่พักน้ำ และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเดินระบบเอปียาร์ โดยข้อมูลเหล่านี้มีารใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบเอปียาร์ต่อไปได้

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลการออกแบบและเดินระบบเปิดอาร์เมื่อใช้สับสเตรทต่างกัน (Barber และ Stuckey, 1999)

| Substrate | Volume(l) | Chambers | Biomass(gVSS/l) | InletCOD(mgCOD/l) | Loadingrate(kg/m ³ /d) | CODremoval(%) | HRT(h) | Temperature(8C) |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------------|-------------------|-----------------------------------|----------------|----------|-----------------|
| Undilutedseakelp | 9.8 | 5 | | 6000±36,000 | 0.4±2.4 | | 360 | 35 |
| Dilutedseakelp | 10 | 4 | | | 1.6 | | | 35 |
| | 10 | 4 | | 67,200±89,600 | 5.6±6.4 | | 288±336 | 35 |
| | 10 | 4 | | 80,000 | 1.6 | | 1200 | 35 |
| Carbohydrate±protein | 6.3 | 5 | | 7100±7600 | 2±20 | 79±82 | | 35 |
| Syntheticgreywater | 8 | 6 | | 480 | 0.1±0.4 | 63±84 | 48±84 | 25±33 |
| Carbohydrate±protein | 6.3 | 5 | | 8000 | 2.5±36 | 55±93 | 4.8±71 | 35 |
| Dilutedswine wastewater | 20 | 5 | | <5000 | 1.8 | 75 | 60 | 30 |
| Molasses wastewater | 150 | 3 | 5.3 | 5000±10,000 | 5.5 | 98 | | 37 |
| Sucrose | 75 | 11 | | 344±500 | 0.7±2 | 85±93 | 6±12 | 13±16 |
| Whiskydistillery wastewater | 6.3 | 5 | | 51,600 | 2.2±3.5 | 90 | 360 | 30 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | | 4000 | 1.2±4.8b | 99 | 20 | 35 |
| Carbohydrate±protein | 7.8±10.4 | 4±8 | 30 | 4000 | 1.2±4.8 | 95 | 20±80 | 35 |
| Molasses wastewater | 150 | 3 | 4.01 | 115,771±990,000 | 4.3±28 | 49±88 | 138±850 | 37 |
| Molasses wastewater | 150 | 3 | 4.01 | 115,771±990,000 | 20 | 70 | 138 | 37 |
| Swinemanure | 15 | 2±3 | | 58,500 | 4 | 62±69 | 360 | 35 |
| Municipal wastewater | 350 | 3 | | 264±906 | 2.17 | 90 | 4.8±15 | 18±28 |
| Slaughterhouse wastewater | 5.16 | 4 | | 450±550 | 0.9±4.73 | 75±90 | 2.5±26 | 25±30 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 4±8 | 0±8.5 | 4000 | | | 1±80 | 35 |
| Molasses wastewater | 150 | 3 | | 115,771±990,000 | 10 | 40±75 | 24±144 | 37 |
| Molasses wastewater | 150 | 3 | 4.11and7.21 | 115,771±990,000 | 20 | >70 | 140 | 37 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | 18 | 4000 | 1.2±4.8 | 98,93 | 20,80 | 35 |
| Pharmaceutical wastewater | 10 | 5 | | 20,000 | 20 | 36±68 | 24 | 35 |
| Phenolic | | 5 | 20±25 | 2200±3192 | 1.67±2.5 | 83±94 | 24 | 21 |
| Glucose | 6 | 5 | | 1000±10,000 | 2±20 | 72±99 | 12 | 35 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | 18 | 1000±4000 | 1.2±4.8 | 98 | 20±80 | 35 |
| Domestic sewage/industrialw | 394,000 | 8 | | 315c | 0.85 | 70 | 10.3 | 15 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | 18 | 4000 | 1.2±4.8 | 75±83,93±97,96 | 20,20,20 | 15,25,35 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | 18 | 4000 | 4.8±9.6 | 90±98 | 20 | 35 |
| Carbohydrate±protein | 10 | 8 | 18 | 4000 | 4.8±18 | 52±98 | 1±20 | 35 |

2.9.1 การทำงานของระบบเอปีอาร์

ลักษณะการไหล ลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์และความสามารถในการกวนผสม (Degree of mixing) จะส่งผลต่อการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และสารอาหารในน้ำเสีย ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ ได้มีงานวิจัยของ Grobicki และ Stuckey (1992) (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) พบว่าระบบเอปีอาร์มีระดับการเกิด Hydraulic dead space หรือพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้งานน้อยกว่าร้อยละ 8 สำหรับถังเปล่าที่ไม่มีเซลล์จุลินทรีย์ และร้อยละ 18 เมื่อมีเซลล์จุลินทรีย์ 8 ก.วีเอสเอส/ล. ซึ่งน้อยกว่าถังปฏิกรณ์แบบอื่นๆ และการเกิดพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้งานนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับเซลล์จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์หากเดินระบบที่เวลากักเก็บน้ำต่ำๆ แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและจำนวนช่องของถัง (การวางแผ่นกั้น) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับ Biological dead space หรือบริเวณที่แบคทีเรียไม่ได้ทำงานที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ อัตราการเกิดก๊าซและอัตราการไหล โดยค่า Biological dead space จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น (เวลากักเก็บน้ำลดลง) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าที่ค่าเวลากักเก็บน้ำสูงๆ พื้นที่ที่ไม่ถูกใช้งานของระบบจะเกิดจากบริเวณที่แบคทีเรียไม่ได้ทำงานเป็นส่วนหลักและจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตเมื่อค่าเวลากักเก็บน้ำต่ำลง

ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากแบคทีเรียมีการเติบโตที่ช้าในระบบไร้อากาศ ดังนั้นในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบ (Start up) จึงต้องมีไหลที่ต่ำและอัตราการไหลที่ต่ำ โดย Barber และ Stuckey (1997) ได้พบว่าการเริ่มต้นเดินระบบด้วยค่าเวลากักเก็บน้ำที่สูงๆ (มากกว่า 80 ชม.) แล้วค่อยๆ ลดเวลากักเก็บน้ำลงเป็นขั้นๆ โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของสับสเตรตคงเดิมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความคงตัวของระบบได้ดี

- *การใช้ระบบเอปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ*

เนื่องจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีแรงผลักดันในการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer driving force) ต่ำลง ซึ่งทำให้อัตราการย่อยสลายต่ำลงด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เป็นการยากที่จะแยกกลุ่มแบคทีเรียในแต่ละช่อง และยังพบว่า การบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ต้องใช้ค่าอายุตะกอน (θ_c) ที่สูงเพื่อต้องกักเก็บปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้มาก เพราะอัตราการเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำเสียนี้นี้จะมีค่าต่ำจึงทำให้ชั้นตะกอนน้อยลง

- การใช้ระบบเอปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูง

ในทางตรงกันข้ามกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงอาจต้องทำการเจือจางหรือเดินระบบที่เวลากักเก็บน้ำต่ำ เนื่องจากการเกิดก๊าซจำนวนมากในระบบทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นตะกอน ดังนั้นความสามารถในการตกตะกอนจึงลดลง และมีโอกาสที่เซลล์จุลินทรีย์จะถูกชะล้างออกไปได้ เมื่อพิจารณาในแง่ของโคเนติกส์ การที่น้ำเสียมีความเข้มข้นสูงทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่มีค่า K_s สูง มีการเติบโตมากขึ้น และผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น

- การใช้ระบบเอปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต

Fox และ Venkatasubbiah (1996) (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ทดลองใช้ระบบเอปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตจากอุตสาหกรรมยา โดยมีความเข้มข้นซัลไฟด์ 20 ก./ล. และอัตราส่วนซัลไฟด์ต่อซัลเฟตเท่ากับ 8:1 พบว่าสามารถกำจัดซัลไฟด์ได้ร้อยละ 50 และกำจัดซัลเฟตได้ร้อยละ 95 ในช่วงเวลากักเก็บน้ำ 1 วัน และพบว่าซัลเฟตส่วนใหญ่ถูกกำจัดในช่องแรกของถังปฏิกรณ์เอปีอาร์ แต่ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อช่องหลังๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งอาจแก้ปัญหาโดยการเวียนน้ำกลับมาเพื่อลดผลกระทบจากซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป

- การใช้ระบบเอปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรต

Barber และ Stuckey (2000) ได้ทดลองนำระบบเอปีอาร์มาบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรต พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโซเดียมไนเตรต 1,000 มก./ล. และซัลไฟด์ 4,000 มก./ล. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นในช่องที่ 1 และ 2 ของถังปฏิกรณ์ที่เวลากักเก็บ 5 ชม. โดยมีประสิทธิภาพการเกิดดีไนทริฟิเคชันเท่ากับร้อยละ 82 และ 96 ตามลำดับ และมีอัตราดีไนทริฟิเคชัน 0.335 และ 0.085 กก.ไนเตรต/กก.วีเอสเอส-วัน ในช่องที่ 1 และ 2 ของถังปฏิกรณ์ตามลำดับ

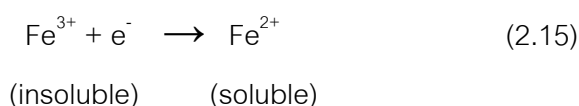
2.9.2 ลักษณะของกลุ่มแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์เอปีอาร์

สำหรับลักษณะของแบคทีเรียที่เติบโตในแต่ละช่องของถังปฏิกรณ์เอปีอาร์นั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด โดยปกติกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดจะเกิดขึ้นในช่องทางด้านหน้า เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตที่เร็ว อีกทั้งสามารถเจริญอยู่ได้ในสภาวะที่มีสารอาหารมากและพีเอชต่ำ ส่วนแบคทีเรียกลุ่มที่เติบโตช้าและทนทานได้ในช่วงพีเอชที่สูงขึ้นก็จะอยู่ในช่องถัดๆ ไป โดยถึงแม้ว่าการสร้างเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกรณ์เอปีอาร์จะไม่ใช่วิธี

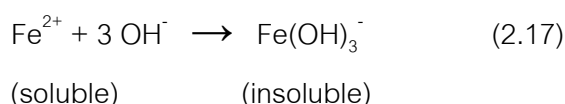
จำเป็นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบยูเอเอสบี แต่ก็มีรายงานว่าเม็ดตะกอนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบในลักษณะเดียวกันกับยูเอเอสบี โดยเม็ดตะกอนดังกล่าวจะประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนชนิด *Methanosarcina* ที่ถูกห่อหุ้มด้วยแบคทีเรียเส้นใย จำพวก *Methanosaeta* และพบว่าขนาดเม็ดตะกอนในแต่ละช่องของถังปฏิกรณ์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยขนาดใหญ่ที่สุดจะพบในช่องทางด้านหน้าจนถึงเล็กที่สุดในช่องถังลำดับสุดท้าย เนื่องจากการสร้างเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซีโอดีและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น

2.10 ธาตุเหล็ก (Iron)

เหล็กที่พบในธรรมชาติมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยภายใต้สภาวะไร้อากาศ ไอออนของเหล็กที่พบอยู่ในน้ำผิวดินจึงมีความเข้มข้นต่ำมาก โดยทั่วไปมักพบไอออนของเหล็กในน้ำธรรมชาติเข้มข้นไม่เกิน 0.05 ถึง 0.2 มก./ล. อย่างไรก็ตามหากเหล็กอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอริก (Fe^{3+}) การละลายน้ำของเหล็กเฟอริกจะไม่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ด้วย แม้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำอยู่ในปริมาณสูงก็ตาม แต่หากอยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนแล้ว แบคทีเรียหลายชนิดสามารถใช้เหล็กเฟอริกในการหายใจแทนออกซิเจนได้ เช่น ในดินที่ปราศจากออกซิเจนแบคทีเรียสามารถใช้เหล็กเฟอริกเป็นสารรับอิเล็กตรอนและกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) นั่นคือ เหล็กเฟอริกถูกรีดิวส์กลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสซึ่งสามารถละลายน้ำได้ โดยสมการแสดงการเปลี่ยนรูปของเหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.15 คือ

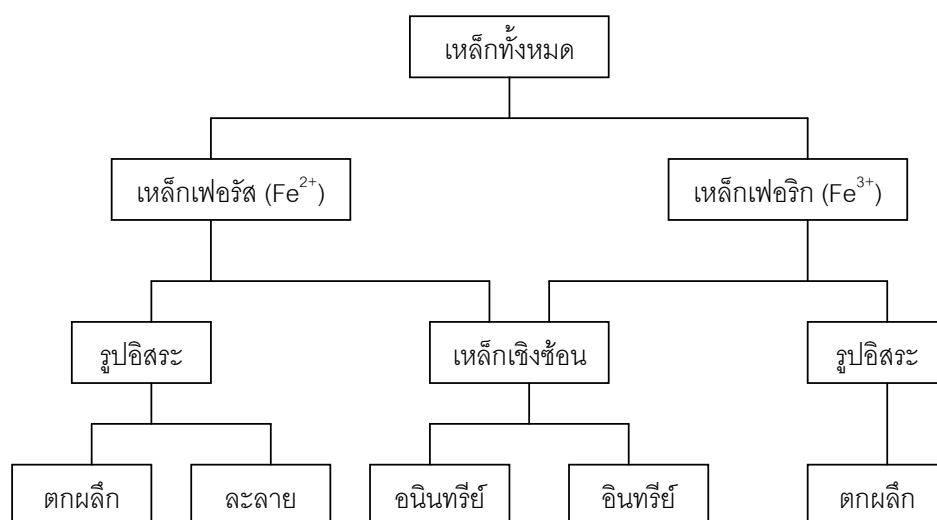


ซึ่งเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่ละลายน้ำสามารถรวมกับ OH^- สร้างเป็นเหล็กเชิงซ้อนรูปต่างๆ เช่น



รูปฟอร์มของเหล็กและความสำคัญ

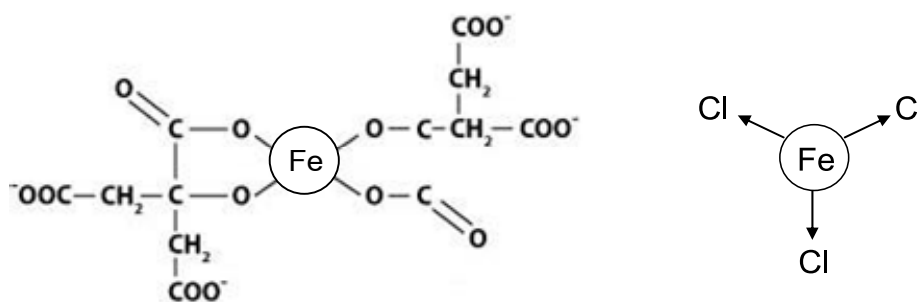
เหล็กที่อยู่ในน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือเหล็กเฟอร์รัส (Ferrous iron ; Fe^{2+}) และเหล็กเฟอร์ริก (Ferric iron ; Fe^{3+}) โดยเมื่ออยู่ในน้ำเหล็กทั้งสองประเภทอาจอยู่ในรูปเหล็กอิสระหรือเหล็กเชิงซ้อนก็ได้ ในน้ำธรรมชาติที่มีพีเอชเป็นกลาง เมื่อน้ำสัมผัสกับอากาศ เหล็กจะอยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์ริกเสมอ ซึ่งสังเกตได้จากสีแดงในน้ำของเหล็กเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ส่วนในน้ำบาดาลเหล็กมักจะอยู่ในรูปเหล็กเฟอร์รัสที่ละลายน้ำ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดสถานะของเหล็กได้แก่ พีเอช และโออาร์พี (ORP) ในธรรมชาติเหล็กเฟอร์รัสและเฟอร์ริกอาจพบในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) โดยการปฏิกริยาระหว่างเหล็กกับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ดังแผนภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สถานะต่างๆ ของเหล็กในน้ำธรรมชาติ (มันสัน ตันทูลเวคม์, 2547)

สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กหรือเหล็กคีเลต (Chelated iron) คือสารอินทรีย์เคมีซึ่งรวมตัวกับธาตุเหล็กด้วยปฏิกริยาการรวมตัวที่เรียกว่าคีเลชัน (Chelation) ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกริยา คือ สารคีเลต (Chelate) โดยสารคีเลตจะห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic cation) เข้าไว้จนไม่เปิดโอกาสให้นิวคลีอื่น ๆ ยื่นมือ (bond) เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกนั้นได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มีพีเอชสูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนอยู่ในสารละลายธรรมดา กล่าวง่ายๆ ก็คือโลหะธาตุในโครงสร้างคีเลตได้รับการคุ้มครองทำให้การตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น ซึ่งปัจจุบันมักนิยมใช้ในด้านเกษตรกรรมเพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช โดยจุลธาตุอาหารอย่างเหล็ก

มักตกตะกอนได้ง่ายเมื่อมีซัลไฟด์มากขึ้น แต่จะไม่ตกตะกอนเมื่อรวมตัวเป็นโลหะคีเลต ทำให้โลหะคีเลตนี้จะคงอยู่ในสภาพของสารละลายได้นาน และคงทนต่อสภาพแวดล้อมทางเคมีสูงกว่าไฮดรอกไซด์ของโลหะในสารละลายธรรมชาติ ในทางด้านเกษตรกรรมเหล็กคีเลตจะประสบผลสำเร็จเป็นที่น่าพอใจทราบเท่าที่ค่าพีเอชของดินไม่สูงจนเกินไป (พีเอชในช่วง 4 - 6) พีชก็จะดูดเอาจุลธาตุอาหารนั้นไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างสะดวก โดยโครงสร้างของเฟอริกซีเทรตซึ่งเป็นสารคีเลตชนิดหนึ่งของเหล็กและโครงสร้างของเฟอริกไอออนจากเฟอริกคลอไรด์แสดงดังภาพที่ 2.5 ดังจะเห็นได้ว่าโมเลกุลของเหล็กคีเลตที่ถูกจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจะถูกจับเพื่อทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ยากกว่าเหล็กในรูปอิสระซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย โดยไอออนเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแคตไอออนของธาตุอื่นๆ และตกตะกอนได้ง่าย



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของเฟอริกซีเทรต (Ferric Citrate ; $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$)
และเฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride ; FeCl_3)

การเริ่มต้นเดินระบบในกระบวนการไร้อากาศ เป็นสิ่งที่ดำเนินการได้ยากและต้องใช้เวลา การใช้น้ำเสียที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศให้เจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ และเมื่อทำการเลี้ยงเชื้อได้แล้ว การควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดไปก็ไม่ใช่ว่าจะง่าย ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและต้องควบคุมให้เป็นอย่างดีเพียงพอในระบบคือ ปริมาณสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งจุลธาตุอาหารและมหธาตุตัวอย่างเช่น ธาตุเหล็ก เนื่องจากโดยทั่วไปความต้องการธาตุเหล็กของจุลินทรีย์มีปริมาณต่ำมาก จึงมักถูกละเลยความสำคัญและไม่คำนึงถึงความขาดแคลนธาตุดังกล่าว ส่วนใหญ่มักคิดว่าในน้ำเสียจะต้องมีธาตุอาหารนั้นปนเปื้อนมาจากแหล่งใดแหล่งหนึ่งอยู่แล้ว ดังนั้นในการออกแบบและควบคุมระบบไร้อากาศจึงหันไปใส่ใจกับปัจจัยในด้านอื่นๆ มากกว่าแนวความคิดดังกล่าวจึงเป็นอุปสรรคต่อความสำเร็จของการเดินระบบไร้อากาศ แต่การเติมธาตุ

เหล็กเพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อการที่จุลินทรีย์จะใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีก็ไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุที่ละลายน้ำได้น้อย และสามารถรวมกับซัลไฟต์ในระบบทำให้แยกตัวออกจากน้ำ จึงเกิดการตกตะกอนผลึกในรูปของเหล็กซัลไฟด์ (FeS) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการไร้อากาศที่มีซัลเฟตเจือปนอยู่ในน้ำเสียซึ่งมักได้ผลิตภัณฑ์เป็นซัลไฟต์เกิดขึ้นเสมอ โดยทั่วไปในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความต้องการเหล็กในปริมาณที่สูง ดังนั้นการตกตะกอนของเหล็กซัลไฟด์จึงทำให้เกิดการสูญเสียธาตุเหล็กจนเกิดการจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากการขาดธาตุเหล็กได้ นอกจากนี้ยังอาจทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนมีข้อได้เปรียบและสามารถเอาชนะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ ซึ่งค่าปริมาณธาตุอาหารที่มีการแนะนำในการเติมในรูปอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สูตรอาหารเสริมสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

| Element (Micronutrients) | Requirement mg/g COD | Typical Form for Addition |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Iron | 0.020 | FeCl ₃ .6H ₂ O |
| Cobalt | 0.003 | CoCl ₂ .6H ₂ O |
| Nickel | 0.004 | NiCl ₂ .6H ₂ O |
| Zinc | 0.020 | ZnCl ₂ |
| Copper | 0.004 | CuCl ₂ .2H ₂ O |
| Manganese | 0.004 | MnCl ₂ .2H ₂ O |

เหล็กและการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรีย

ธาตุเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบหลักของโคเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อการรวมตัวกับเอนไซม์เพื่อให้อยู่ในรูปที่สามารถทำงานได้ (Holoenzyme) มีรายงานว่าเอนไซม์หลายชนิดมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไซโตโครม (Cytochrome) ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบพวกโปรตีนหรือเอนไซม์หลักภายในเซลล์ โดยจะเรียงตัวจับต่อกันเป็นลูกโซ่ มีหน้าที่สำคัญในการรับและส่งอิเล็กตรอนเป็นต้น โดยเหล็กจะทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์สำหรับเอนไซม์ หรือเป็นส่วนประกอบของสปอร์ภายในเซลล์ (Endospore) หากขาดธาตุเหล็กการทำงานของเอนไซม์จะถูกยับยั้งส่งผลให้กระบวนการต่างๆ ทางชีวภาพของเซลล์ เช่นการหายใจ กระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันถูกยับยั้งหรือเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ แต่หากมีการเพิ่มปริมาณธาตุเหล็กให้เพียงพอจะช่วยส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ และเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทั้งในเตรทและซัลเฟตได้

2.11 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- การบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์เอปียอร์

Barber และ Stuckey (2000) ศึกษาการกำจัดไนเตรดด้วยระบบบำบัดแบบเอปียอร์เมือใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยซัลไฟด์และโปรตีนที่มีค่าซีโอดี 4,000 มก.ซีโอดี/ล. และความเข้มข้นโซเดียมไนเตรด 1,000 มก./ล. (165 มก.ไนเตรด-ไนโตรเจน/ล. และ COD/N = 24.2) โดยเดินระบบด้วยอัตราภาระเชิงปริมาตร (Volumetric loading rate) เท่ากับ 4.8 ก.ซีโอดี/ล.วัน หรืออัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 0.274 ก.ซีโอดี/ก.วีเอสเอส-วัน ผลการทดลองพบว่า

1. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ในช่องถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 (HRT เท่ากับ 2.5 และ 5 ชม.ตามลำดับ) โดยพบว่ามีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 0.335 และ 0.085 กก.ไนเตรด/กก.วีเอสเอส-วัน ตามลำดับ โดยได้เปอร์เซ็นต์การกำจัดไนเตรดเท่ากับร้อยละ 82 และ 96 ตามลำดับ และมีการสะสมตัวของไนโตรเจนในช่องที่ 1 และ 2 เท่ากับ 43 และ 0.7 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. การเติมไนเตรดส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยพบว่าการเติมไนเตรดทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้น (แต่เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนก๊าซลดลง) ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายว่าอาจเกิดจากมีแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบฯ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ

และทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำแอมโมเนียไปใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนได้ง่ายขึ้น

3. พบการเพิ่มขึ้นของ SMPs (Soluble Microbial Products; สารที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายหรือการตายของเซลล์) ในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ ซึ่งในระบบเอปปีอาร์ค่าซีไอดีที่เหลือในน้ำทิ้งจะเป็นส่วนของ SMPs ประมาณร้อยละ 26 – 48 ของซีไอดีทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวว่า SMPs ที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์มีการเติบโตและย่อยสลายเซลล์ได้เร็วกว่าระบบแอนแอโรบิกทั่วไป ดังนั้น SMPs ที่เกิดน่าจะมาจากการย่อยสลายของเซลล์ (Endogenous decay) เหล่านี้
4. เมื่อวิเคราะห์ค่ากรดไขมันระเหย (VFAs) ในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ที่มีไนเทรตพบว่าส่วนใหญ่เป็นอะซิเตต ซึ่งมีค่าลดลงในช่องถัดไป ส่วนปริมาณไพโรไพโอเนตจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชุดที่ไม่มีไนเทรต ซึ่งโดยปกติแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์จะชอบใช้สับสเตรตที่เป็นอะซิเตตมากกว่า
5. พบแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบฯ ที่มีการเติมไนเทรต โดยพบว่ามีการเกิดแอมโมเนียเฉลี่ย 177 มก.แอมโมเนีย/ล. หรือ 0.177 มก.แอมโมเนีย/มก.ไนเทรต ซึ่งอัตราการเกิดแอมโมเนียจะขึ้นอยู่กับสับสเตรต เช่น ในกระบวนการหมักกลูโคสที่ใช้ไนเทรตและไนโทรต์เป็นสารรับอิเล็กตรอน จะมีอัตราการเกิดแอมโมเนียเท่ากับ 2.7 และ 5.9 มก.ไนโตรเจน/ก.วีเอสเอส-ซม.ตามลำดับ หรือจากสมการของกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ 1 โมลของไนเทรตจะเกิด 1 โมลของแอมโมเนีย หรือไนเทรต 1,000 มก./ล. จะให้แอมโมเนีย 290 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อคิดที่ร้อยละ 50 ของการเกิดตามสมการเคมี

Vossoughi และคณะ (2003) ศึกษาการกำจัดซัลเฟตด้วยระบบบำบัดแบบเอปปีอาร์เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์จากโมลาส ในสภาวะที่มีค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตแตกต่างกันระหว่าง 16.7 ถึง 6.0 โดยควบคุมค่าซีไอดีคงที่ประมาณ 3,000 มก./ล. และแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นซัลเฟตระหว่าง 150 – 500 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า

1. ระบบบำบัดเอปปีอาร์สามารถกำจัดซัลเฟตได้มากกว่า 88% เมื่อใช้ความเข้มข้นซัลเฟตตั้งแต่ 180 – 500 มก./ล. ที่อัตราภาวะสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน โดยพบว่าประมาณร้อยละ 65 ของการกำจัดซัลเฟตเกิดขึ้นในช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์

(เวลากักเก็บ 0.2 วัน) นอกจากนี้กระบวนการกำจัดซัลเฟตยังเกิดขึ้นได้ในเฟสของการสร้างกรด (Acidogenic phase)

2. ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่ลดลงจาก 16.7 ถึง 6.0 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ แต่การเพิ่มอัตราภาวซัลเฟตจะส่งผลให้กระบวนการกำจัดซัลเฟตเกิดขึ้นได้สูงสุดในช่วงลำดับถัดไปแทนที่จะเกิดขึ้นในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์
3. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการสร้างก๊าซมีเทนสามารถเกิดควบคู่กับกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้

มนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ศึกษาพฤติกรรมของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ในการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต (COD/NO₃-N) ในน้ำเสียก่อนเข้าระบบจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2 6 และ 12 ก.ซีโอดี/ก.ไนโตรเจน ซึ่งแต่ละค่าเป็นตัวแทนของอัตราส่วนที่น้อยกว่าพอดี และมากเกินไป เมื่อเทียบกับอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต-ไนโตรเจนในปริมาณที่ต้องการตามสมการเคมี และศึกษาผลของปริมาณธาตุเหล็กซึ่งเติมในรูปเฟอร์ริกไอออน (Fe³⁺) ที่มีต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อซีโอดี (Fe³⁺: COD) ที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 0.02 และ 0.10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ผลการทดลองพบว่า

1. ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตดีที่สุดเมื่อใช้ค่าอัตราส่วน COD/NO_x-N เฉลี่ยเท่ากับ 5.49 ± 0.62 ก.ซีโอดี/ก.ไนโตรเจน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 100 และ 48 ตามลำดับ ที่เวลากักเก็บ 2 วัน
2. ปริมาณเฟอร์ริกไอออนส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและซัลเฟต โดยการเติมเฟอร์ริกไอออนที่อัตราส่วนต่ำ (Fe³⁺: COD = 0.02 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) สามารถกำจัดไนเตรตได้มากกว่าร้อยละ 91 และกำจัดซัลเฟตได้ร้อยละ 44
3. เมื่อเติมเฟอร์ริกไอออนที่อัตราส่วนสูง (Fe³⁺: COD = 0.10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 87 โดยยังคงประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตดีเช่นเดิม

- อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต-ไนโตรเจน ต่อปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชัน

Akunna และ คณะ (1992) ศึกษาผลของอัตราส่วน COD/NOx-N ที่มีต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนด้วยระบบบำบัดแบบ Completely stirred anaerobic digester ที่มีค่าเวลากักเก็บ 10 วันโดยใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และค่าซีโอดีคงที่เท่ากับ 5,318 มก./ล. แต่แปรเปลี่ยนความเข้มข้นไนเตรตหรือไนไตรต์เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N ที่แตกต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามค่าอัตราส่วน COD/NOx-N คือ COD/NOx-N มากกว่า 53 ระหว่าง 8.86-53 และต่ำกว่า 8.86 ดังนี้

1. ที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N ที่ต่ำกว่า 8.86 (สำหรับไนเตรต) และ 6.65 (สำหรับไนไตรต์) อัตราส่วนการกำจัดไนเตรตหรือไนไตรต์จะลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน COD/NOx-N ลดลง (โดยเพิ่มอัตราภาชนะไนโตรเจน) และเมื่อค่าอัตราส่วนนี้ต่ำกว่า 2.13 พบว่าไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำทิ้งมีค่าสูง โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าเกิดจากความ เป็นพิษของออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx-N) ที่มีค่าสูงกว่า 2,500 มก./ล.
2. ที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N ระหว่าง 8.86 – 53 จะมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นควบคู่ กับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ COD/NOx-N ที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าชุดที่ใช้ไนไตรต์จะให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่าชุด การเติมไนเตรต นอกจากนี้ในช่วงอัตราส่วนดังกล่าวยังพบว่าไนเตรตและไนไตรต์ถูก รีดิวซ์เป็นแอมโมเนีย (กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ) ซึ่งปริมาณแอมโมเนียจะแปรผันตาม อัตราส่วน COD/NOx-N กล่าวคือ ปริมาณแอมโมเนียสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน COD/NOx-N สูงขึ้น (โดยการลดความเข้มข้นไนเตรตหรือไนไตรต์)
3. ที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N มากกว่า 53 ไนเตรตและไนไตรต์จะถูกรีดิวซ์ไปเป็น แอมโมเนียเป็นส่วนใหญ่ควบคู่กับกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน โดยที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N เท่ากับ 106 พบว่าไนเตรตและไนไตรต์ทั้งหมดถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนีย และยังพบว่ามีการบวนการดีเอ็นอาร์เอเกิดขึ้นในทุกชุดการทดลองที่เติมไนไตรต์ มากกว่าชุดทดลองที่เติมไนเตรต ซึ่งอาจเป็นเพราะกระบวนการดีเอ็นอาร์เอใช้ไนไตรต์ ได้ดีกว่าไนเตรต
4. จากการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในระบบฯ พบว่า ที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N ต่ำ จะ พบเชื้อกลุ่ม True denitrifier เป็นกลุ่มเด่นในระบบฯ ได้แก่ *Pseudomonas fluorescens* แต่ที่ค่าอัตราส่วน COD/NOx-N เท่ากับ 53 และ 106 กลับไม่พบเชื้อ

กลุ่มดีไนทริฟายเออร์ในระบบฯ ดังนั้นหากต้องการกำจัดไนเตรตหรือไนไตรต์ผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันต้องใช้อัตราส่วน COD/NO_x-N ที่ต่ำ

Percheron และคณะ (1999) ศึกษาผลของการเติมไนเตรตลงไปในระบบบำบัดน้ำเสียต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ โดยทำการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่สภาวะไร้อากาศและใช้น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีซัลเฟตเข้มข้นสูง ผลการทดลองพบว่า

1. น้ำเสียที่มีไนเตรตสูงและค่าอัตราส่วน COD/NO₃-N สูง โดยการทดลองนี้ใช้ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 29.2 15.5 และ 9.3 พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการดีไนทริฟิเคชันให้กลายเป็นกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ
2. การเติมไนเตรตลงไปในช่วงการทดลองจะทำให้เกิดช่วง Lag phase ของกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณก๊าซมีเทนไม่ได้รับผลกระทบจากไนเตรตที่เติมลงไป แม้ว่าปริมาณไนเตรตจะมีค่าความเข้มข้นสูงถึง 500 มก./ล. แต่หลังจากที่กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเริ่มเกิดขึ้น ทั้งกระบวนการซัลเฟตรีดักชันและกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนจะถูกขัดขวางทันที
3. เมื่อมีการเติมธาตุเหล็กในรูป FeCl₂ (12 mM) ลงไปเพื่อกำจัดซัลไฟด์ในระบบ (เพื่อทดสอบผลของซัลไฟด์ต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน) พบว่าการเติม FeCl₂ ทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นทันทีโดยไม่มีช่วงของ Lag phase แต่การเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเมื่อมีการเติม FeCl₂ ลงไปนั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อไม่มีการเติม FeCl₂ โดยไม่พบการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบฯ แต่กลับไปเพิ่มการเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอให้กับระบบ

Ruiz และคณะ (2006) ศึกษาผลของอัตราส่วน COD/N ที่มีต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนทริฟายเออร์และแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์แบบ Upflow sludge bed โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นจากเม็ดตะกอนแอนแอโรบิกจากระบบบำบัดแบบยูเอเอสบี โดยค่าอัตราส่วน COD/N ที่ศึกษา คือ 1 5 10 และ 100 และใช้อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 7.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ค่าความเข้มข้นไนเตรต 20 - 2,000 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล.และซีโอดี 2,000 - 6,000 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า

1. ที่ค่าอัตราส่วน COD/N เท่ากับ 1 5 และ 10 เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเป็นส่วนใหญ่ โดยที่อัตราส่วน COD/N = 1 สามารถกำจัดไนเตรตได้ต่ำและมีการสะสมตัว

ของไนโตรเจนในระบบ ซึ่งแสดงถึงปริมาณซีโอดีไม่เพียงพอต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และเมื่อปรับอัตราส่วน COD/N = 5 พบว่าสามารถกำจัดไนเตรตได้ร้อยละ 100 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนนี้เพียงพอต่อการเกิดดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์

2. ที่ค่าอัตราส่วน COD/N = 10 และ 100 พบว่ามีกิจกรรมของทั้งดีไนทริฟายเออร์และแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยที่ค่าอัตราส่วน COD/N = 100 พบการสร้างมีเทนสูงถึงร้อยละ 97 แสดงให้เห็นว่าไนเตรตสามารถถูกกำจัดได้พร้อมกับการผลิตก๊าซมีเทนภายในถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว
3. ที่ค่าอัตราส่วน COD/N \leq 5 ลักษณะการจับตัวเป็นเม็ดตะกอน (Granular) ของเชื้อจุลินทรีย์จะหายไป โดยจะมีลักษณะเป็นฟล็อก (Floc) เข้ามาแทนที่
4. ที่ค่าอัตราส่วน COD/N = 10 และ 100 พบว่ามีแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบฯ เฉลี่ยเท่ากับ 60 – 80 มก. แอมโมเนียไนโตรเจน/ล.

- ผลของเหล็กต่อการบำบัดน้ำเสีย

Patidar และ Tare (2006) ศึกษาผลของโลหะหนักต่อกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Total methanogenic activity ; TMA) และกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Total sulfidogenic activity ; TSA) โดยโลหะหนักที่ศึกษาได้แก่ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และโคบอลต์ (Co) ที่ความเข้มข้น 0.048 0.011 0.026 และ 0.021 มก./ก. โดยในการทดลองได้เตรียมน้ำเสียที่มีค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 3.5 (ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 571.43 มก.ซัลเฟต/ล.) จากการทดลองสรุปได้ว่า

1. การเติมสารอาหารร่วมกันคือ Fe-Co-Zn Fe-Ni-Zn และ Ni-Zn-Co จะให้ค่า TMA และ/หรือ TSA สูงสุด
2. การทดลองหา TSA พบว่าแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตมีกิจกรรมสูงขึ้นเมื่อมีการเติม Fe และ CO ในปริมาณที่สูงขึ้น
3. การเติม Fe และ Co จะช่วยเพิ่มจำนวนแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนและกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตได้สูงสุด ส่วนการเติม Ni Zn และ Co ร่วมกันจะเพิ่มการทำงานของเฉพาะกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนแต่ไม่เพิ่มการทำงานของกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก

การขาด Fe หรืออาจเกิดจากผลของ Ni ไปลดการดูดซึม Zn และโลหะหนักตัวอื่นๆ หรือที่เรียกว่า Antagonism effect

Wang และคณะ (2006) ศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันของเฟอริกคลอไรด์ภายใต้สภาวะการหมักไร้อากาศแบบมีโซฟิลิก (Mesophilic) ในการบำบัดน้ำชะขยะที่มีพีเอชและความเข้มข้นสูงรวมทั้งมีซัลเฟตเจือปนสูง ซึ่งซีโอไซด์ของน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 22,900 มก./ล. มีปริมาณซัลเฟต 8,700 มก./ล. โดยในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) ทั้งหมด 3 ถัง และหัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยมีระยะเวลาพักน้ำ 20 วัน มีอัตราการระบรทุกซีโอไซด์เท่ากับ 1.15 กก./ลบ.ม.-วัน ทำการเติมเฟอริกคลอไรด์ในแต่ละวัน โดยควบคุมปริมาณการเติมที่ 5 10 และ 15 ก./ล. ในแต่ละถัง เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนซัลเฟตต่อเฟอริกคลอไรด์เท่ากับ 1.74 0.87 และ 0.58 ตามลำดับ โดยจากการทดลองพบว่า

1. การเติมเฟอริกคลอไรด์ลงในถังปฏิกรณ์เป็นการช่วยฟื้นฟูกิจกรรมของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) และมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
2. ปริมาณของเฟอริกคลอไรด์ที่แสดงประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดซีโอไซด์และซัลเฟตในน้ำชะขยะที่ทำการทดลอง คือ 10 ก./ล. โดยสามารถกำจัดซีโอไซด์ได้ร้อยละ 76 และกำจัดซัลเฟตได้ร้อยละ 88.4

สรุปการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. มีความเป็นไปได้ว่าการบำบัดน้ำเสียที่มีทั้งองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตความเข้มข้นสูงสามารถเกิดขึ้นได้ภายในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ไบเดียว โดยประสิทธิภาพการกำจัดทั้งไนเตรตและซัลเฟตต่างก็ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรตและซีไอดีต่อซัลเฟตตามลำดับ สำหรับการกำจัดไนเตรตให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นจะขึ้นกับองค์ประกอบของน้ำเสียและชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ ทำให้ในการบำบัดจะมีค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรตที่เหมาะสมแตกต่างกัน แต่ในทางกลับกันการใช้ค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรตที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียด้วยกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเปลี่ยนรูปไนเตรต
2. กระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอปปีอาร์ไบจะเกิดขึ้นแยกกันตามช่องถังปฏิกรณ์อย่างชัดเจน โดยการบำบัดไนเตรตจะเกิดขึ้นในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ และการบำบัดซัลเฟตจะเกิดขึ้นในช่องถังลำดับถัดไป ภายใต้สภาวะที่จะต้องมีความซีไอดีเพียงพอ
3. การเติมเหล็กลงในถังปฏิกรณ์จะช่วยส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศได้โดยปริมาณเฟอร์ริกไอออนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ไบให้สูงขึ้น
4. เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และเฟอร์ริกคีเลตเป็นรูปฟอร์มของเหล็กที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเตรียมธาตุอาหารเสริมสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยมุ่งศึกษาถึงพฤติกรรมของถังปฏิกรณ์แบบเอปียอร์ ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูง และศึกษาลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา ตลอดจนผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในรูปแบบของเหล็กที่ต่างกัน ที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตและซัลเฟต ด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชัน ในถังปฏิกรณ์แบบเอปียอร์ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำประปา แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุด คือ (1) ชุดควบคุม (2) ชุดทดลองที่เติมเฟอริกไอออนในรูปแบบเฟอริกคลอไรด์ และ (3) ชุดทดลองที่เติมเฟอริกคีเลตในรูปแบบเฟอริกซิเทรต ที่แปรค่าสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีโอดี แตกต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งปริมาณความต้องการเหล็กของแบคทีเรียในสภาวะต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการสตอซิโอเมตริก และแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี

| กระบวนการ | สัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี (mg-Fe/g COD) |
|-------------------|---|
| Denitrification | 0.93 |
| Sulfate reduction | 0.12 |
| Anaerobic | 0.06 |
| | 1.11 |

หมายเหตุ: แสดงวิธีการคำนวณดังกล่าวในภาคผนวก ก

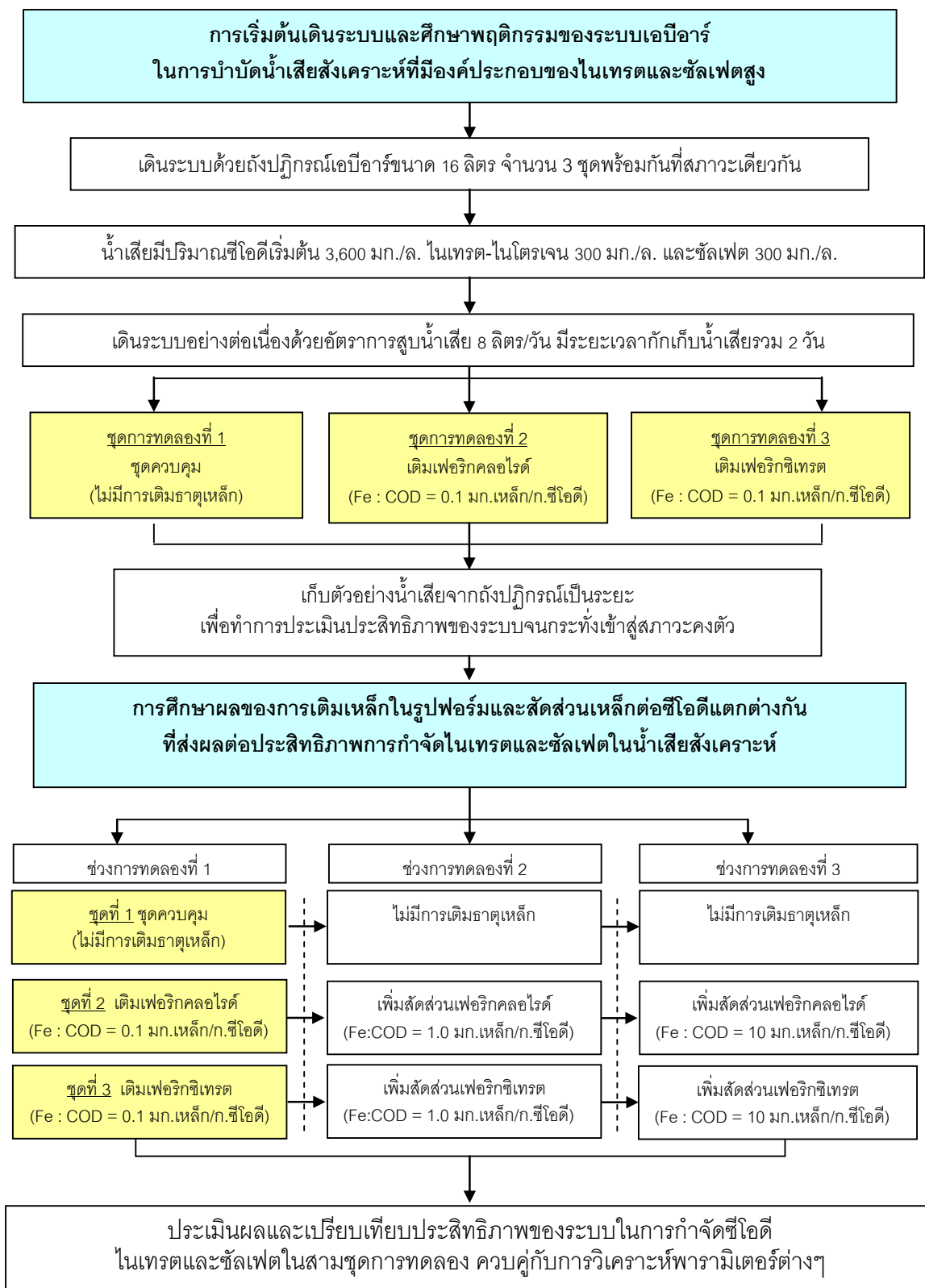
ดังนั้นสัดส่วนการเติมเหล็กในการทดลองนี้จึงเป็นค่าที่อ้างอิงตามสโตยชิโอเมตริก และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังมีรายละเอียด คือ

ช่วงการทดลองที่ 1 เติมเหล็กต่อซีโอดีในสัดส่วนเท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่เคยทำการทดลองโดยมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดไนเตรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังคงมีปริมาณซีโอดีคงเหลืออยู่ในระบบมาก

ช่วงการทดลองที่ 2 เติมเหล็กต่อซีโอดีในสัดส่วนเท่ากับ 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการสโตยชิโอเมตริก โดยเป็นปริมาณที่คาดว่าจะเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ช่วงการทดลองที่ 3 เติมเหล็กต่อซีโอดีในสัดส่วนเท่ากับ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้น 10 เท่าจากค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยคาดว่าจะมากเกินไปต่อแบคทีเรียไร้อากาศในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยแผนภาพสรุปขั้นตอนทั้งหมดของงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังสรุปการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

เริ่มต้นเดินระบบเอปียาร์ในช่วงแรกโดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำประปา ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้น 3,600 มก./ล. ไนเตรต-ไนโตรเจน 300 มก.ไนโตรเจน/ล. และซัลเฟต 300 มก.ซัลเฟต/ล. เพื่อใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบการทดลอง 3 ชุดอย่างต่อเนื่องเต็มหัวเชื้อจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ และแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมธาตุเหล็ก ส่วนชุดการทดลองที่ 2 และ 3 จะทำการเติมเหล็กในรูปเฟอริกคลอไรด์และเฟอริกซิเทรต ตามลำดับ กำหนดให้ค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี (Fe : COD) เริ่มต้นเท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ทำการเดินระบบด้วยอัตราการสูบน้ำเสีย 8 ลิตร/วัน มีระยะเวลาเก็บน้ำเสียรวม 2 วัน คิดเป็นอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 1.8 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.ต่อวัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์เป็นระยะ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเอปียาร์ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยพิจารณาจากปริมาณซีโอดี ไนเตรตและซัลเฟตที่ถูกกำจัดควบคู่กับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการประเมินพฤติกรรมต่างๆ ของระบบ เช่น ปริมาณไนไตรต์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ พีเอช ไออาร์พี ค่าสภาพนำไฟฟ้า สภาพต่างทั้งหมด และปริมาณกรดไขมันระเหย เป็นต้น

จากนั้นเดินระบบต่อเนื่องในช่วงการทดลองที่ 2 โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ให้มีปริมาณการเติมเหล็กทั้งสองรูปฟอร์มเพิ่มขึ้น 10 เท่า หรือมีค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีเท่ากับ 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์เป็นระยะเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้ง ทำการแปรเปลี่ยนค่าปริมาณสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีเพิ่มขึ้นในช่วงการทดลองที่ 3 อีก 10 เท่า โดยมีค่าเป็น 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์เป็นระยะๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน โดยขั้นตอนการเพิ่มค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเพิ่มค่าสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

| | ชุดการทดลองที่ 1 | ชุดการทดลองที่ 2 | ชุดการทดลองที่ 2 |
|-------------------|------------------|--|---|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | ไม่เติมเหล็ก | เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (Fe : COD = 0.1) | เติมเฟอร์ริกซิเตรต (Fe : COD = 0.1) |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | ไม่เติมเหล็ก | เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (Fe : COD = 1.0) | เติมเฟอร์ริกซิเตรต (Fe : COD = 1.0) |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | ไม่เติมเหล็ก | เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (Fe : COD = 10.0) | เติมเฟอร์ริกซิเตรต (Fe : COD = 10.0) |

โดยตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 และค่าที่ใช้ในการเดินระบบถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ทั้ง 3 ชุดแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

| ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|--|------------------------|
| 1. ชนิดของถังปฏิกรณ์ | - เอปปีอาร์ |
| 2. ขนาดถังปฏิกรณ์ | - 12x48x35 ซม. |
| 3. ปริมาตรน้ำในถัง | - 16 ล. |
| 4. จำนวนช่องย่อยในถังปฏิกรณ์ | - 4 ช่อง |
| 5. ปริมาณน้ำในแต่ละช่องย่อย | - 4 ล./ช่อง |
| 6. ปริมาตรหัวเชื้อในถังปฏิกรณ์ | - 1 ใน 3 ของถังปฏิกรณ์ |
| 7. แหล่งของสารอินทรีย์ | - น้ำตาลทราย |
| 8. แหล่งของเฟอร์ริกไอออน | - เฟอร์ริกคลอไรด์ |
| 9. แหล่งของเฟอร์ริกซิเตรต | - เฟอร์ริกซิเตรต |
| 10. ความเข้มข้นซีโอดี | - 3,600 มก./ล. |
| 11. ความเข้มข้นไนเตรต | - 300 มก.ไนโตรเจน/ล. |
| 12. ความเข้มข้นซัลเฟต | - 300 มก.ซัลเฟต/ล. |
| 13. เติมน้ำเสียสังเคราะห์จาก | - น้ำประปา |
| 14. ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย | - 2 วัน |
| 15. อัตราการสูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบ | - 8 ล./วัน |

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

| ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|---------------------------|---|
| 1. รูปฟอร์มของเหล็ก | - เหล็กไอออนและเหล็กคีเลต |
| 2. สัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี | - 0.1, 1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี |
| ตัวแปรตามที่ทำกรวิเคราะห์ | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ |
| 1. พีเอช | - pH meter |
| 2. โออาร์พี | - ORP meter |
| 3. สภาพการนำไฟฟ้า | - Conductivity meter |
| 4. สภาพต่างทั้งหมด | - Potentiometric method |
| 5. กรดไขมันระเหย | - Titration method |
| 6. ซีโอดี | - Closed reflux method |
| 7. ปริมาณไนเตรต | - Nitrate ISE meter (Membrane type ; Polymer) |
| 8. ปริมาณไนไตรต์ | - Colorimetric method |
| 9. ปริมาณแอมโมเนีย | - Distillation and titrimetric method |
| 10. ปริมาณซัลเฟต | - Turbidity method |
| 11. ปริมาณซัลไฟด์รวม | - Sulfide ISE meter (Membrane type ; Solid state) |
| 12. ปริมาณเหล็ก | - Colorimetric method |

ตารางที่ 3.5 ค่าที่ใช้ในการเดินระบบถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง

| ค่าที่ใช้ในการทดลอง | ถังปฏิกรณ์ที่ 1 | ถังปฏิกรณ์ที่ 2 | ถังปฏิกรณ์ที่ 3 |
|---|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ปริมาณรวมของระบบ (L) | 16 | 16 | 16 |
| อัตราการสูบน้ำเสียสังเคราะห์ (L/d) | 8 | 8 | 8 |
| ระยะเวลาพักเก็บ (d) | 2 | 2 | 2 |
| ปริมาณซีโอดี (mg/L) | 3,600 | 3,600 | 3,600 |
| ไนเตรต (mg/L NO_3^- -N) | 300 | 300 | 300 |
| ซัลเฟต (mg/L) | 300 | 300 | 300 |
| ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ($\text{kg-COD/m}^3\text{-d}$) | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| สัดส่วนซีโอดีต่อไนเตรต-ไนโตรเจน (g COD/g NO_3^- -N) | 12 | 12 | 12 |
| สัดส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต (g COD/ g SO_4^{2-}) | 12 | 12 | 12 |
| สัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี (Fe : COD) (ทั้งเหล็กไอออนและเหล็กคีเลต) | - | 0.1 1.0 และ 10 | 0.1 1.0 และ 10 |
| รูปของเหล็กที่เติมในถังปฏิกรณ์ | ไม่เติม | เหล็กไอออน (เฟอร์ริกคลอไรด์) | เหล็กคีเลต (เฟอร์ริกซิเตรต) |

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำประปา โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (ค่าซีโอดีของน้ำตาลทรายเท่ากับ 1 กรัมซีโอดีต่อ 1 กรัมน้ำตาลทราย) โดยปริมาณน้ำตาลทรายที่เติมจะเป็นตัวกำหนดค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต-ไนโตรเจนเริ่มต้น ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 3,600 มก./ล. เตรียมความเข้มข้นของไนเตรตและซัลเฟตให้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 ชุดการทดลอง โดยใช้โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เป็นแหล่งไนเตรตที่มีความเข้มข้น 300 มก./ล. ในรูปไนเตรต-ไนโตรเจนและโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นแหล่งซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 300 มก./ล. ในรูปซัลเฟต ทำการเติมฟอสฟอรัสในรูปโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในอัตราส่วนที่แนะนำสำหรับระบบไร้อากาศโดยทั่วไป (Speece, 1996) โดยถือว่าธาตุอาหารรองชนิดอื่นๆ น่าจะมีอยู่ในปริมาณที่เพียงพอแล้วในน้ำประปาที่ใช้เป็นตัวทำละลาย เติมโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับน้ำเสีย โดยค่าอัตราส่วนองค์ประกอบต่างๆ และปริมาณที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.6 สำหรับความถี่ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์คือ ทุก 2 วัน โดยบรรจุลงในถังพักน้ำเสียในปริมาณที่เพียงพอต่อหนึ่งรอบการไหลผ่านถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์หรือที่เวลากักเก็บ 2 วัน

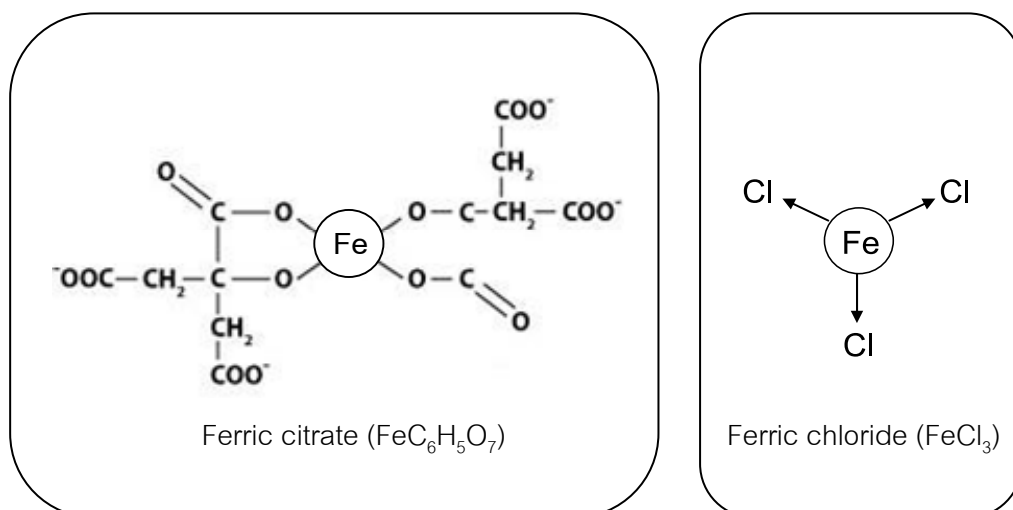
ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบและสัดส่วนธาตุอาหารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

| องค์ประกอบของน้ำเสีย | แหล่งของธาตุอาหาร | หน่วย | ปริมาณที่เติมให้กับระบบ |
|--|-------------------|-------|-------------------------|
| ธาตุอาหารหลัก | | | |
| - น้ำตาลทราย | คาร์บอน | มก. | 3,600 |
| - โพแทสเซียมไนเตรต (KNO ₃) | ไนเตรต | มก. | 300 |
| - โซเดียมซัลเฟต (Na ₂ SO ₄) | ซัลเฟต | มก. | 300 |
| ธาตุอาหารรอง | | | |
| - เฟอริกคลอไรด์ (FeCl ₃) | เฟอริก | มก. | 0.36, 3.6 และ 36 |
| - เฟอริกซิเตรต (FeC ₆ H ₅ O ₇) | เฟอริก | มก. | 0.36, 3.6 และ 36 |
| ตัวทำละลาย | | | |
| - น้ำประปา | | ลิตร | 1 |

หมายเหตุ ค่าซีไอดีของน้ำตาลทราย (C₁₂H₂₂O₁₁) เท่ากับ 1 กรัมซีไอดีต่อ 1 กรัมน้ำตาลทราย

3.4 รูปฟอร์มของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้เหล็ก 2 รูปฟอร์ม ได้แก่ เฟอริกไอออน (Fe³⁺) และ เฟอริกคีเลต (Fe-chelate) โดยเตรียมขึ้นจากเฟอริกคลอไรด์ (FeCl₃) และเฟอริกซิเตรต (FeC₆H₅O₇) ตามลำดับ โดยมีสูตรโครงสร้าง ดังภาพที่ 3.2

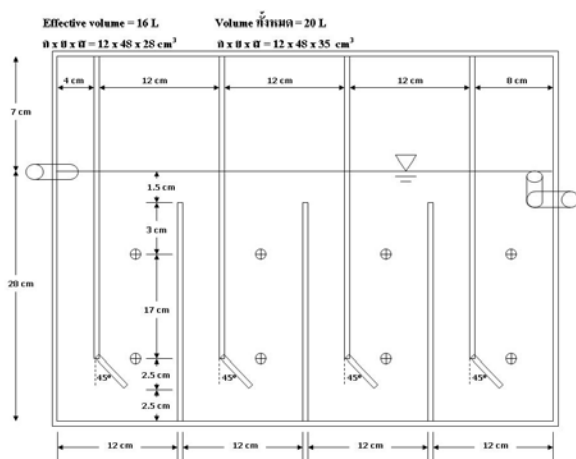


ภาพที่ 3.2 สูตรโครงสร้างของเฟอริกไอออนและเฟอริกคีเลตที่ใช้ในการทดลอง

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ถังปฏิกรณ์

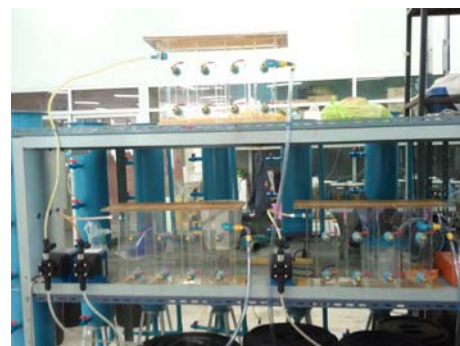
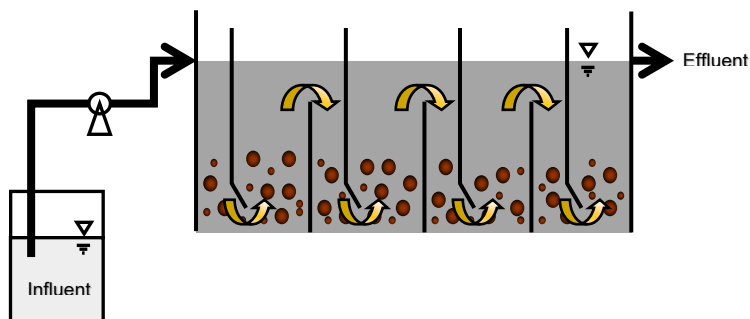
ถังปฏิกรณ์เอปเปอาร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นถังทรงสี่เหลี่ยมแบบเปิดฝามีขนาด 12 x 48 ซม. สูง 35 ซม. มีปริมาตรรวมทั้งสิ้น 20 ลิตร โดยเป็นปริมาตรในส่วนใช้งาน 16 ลิตร แบ่งออกเป็น 4 ช่องย่อยที่มีปริมาตรเท่ากัน คือช่องละ 4 ลิตร ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์เอปเปอาร์ที่ใช้ในการทดลอง

- การเชื่อมต่ออุปกรณ์

ใช้ปั้มน้ำสูบน้ำเสียจากถังพักน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จนเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัดแล้วก็จะไหลผ่านไปตามสายยางลงสู่ถังน้ำทิ้ง ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์กับถังปฏิกรณ์เอปเปอาร์ และรูปถ่ายถังปฏิกรณ์เอปเปอาร์ ที่ใช้ในการทดลอง

- จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและการเก็บตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียมีด้วยกัน 5 จุด ได้แก่

- น้ำจากถังพักน้ำเสีย 1 จุด
- น้ำจากถังปฏิกรณ์ 4 จุด โดยแยกเก็บจากช่องที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ (โดยจะให้น้ำเสียจากช่องที่ 4 เป็นตัวแทนของน้ำที่ออกจากระบบ)

ในการเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละครั้งจะทำพร้อมกันทั้งสามชุดการทดลอง โดยแต่ละจุดจะเก็บตัวอย่างจากก๊อกตัวบนในแต่ละช่องของถังปฏิกรณ์ และเก็บใส่ขวดพลาสติกปิดฝาชนิดซีดครั้งละประมาณ 200 มล. และเนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต้องการเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 30 วัน การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทุกตัวของน้ำเสียและติดตามสมรรถนะของระบบในช่วงเวลาดังกล่าวก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงไม่มีความจำเป็น ดังนั้นแผนการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อติดตามผลคุณภาพน้ำของงานวิจัยนี้ในช่วงแรกจึงดำเนินการตามตารางที่ 3.7 จนกระทั่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากแต่ละจุดด้วยความถี่ตามรายละเอียดแยกในแต่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.8 โดยวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005)

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ความถี่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ก่อนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

| พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่างและความถี่ | | | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | ถังพักน้ำเสีย | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 1. พีเอช | A | A | A | A | A |
| 2. ไบโอดี | B | B | B | B | B |
| 3. ซีโอดี | B | B | B | B | B |
| 4. ไนโตรเจน | B | B | B | B | B |
| 5. ซีลเฟต | B | B | B | B | B |

หมายเหตุ : A = วิเคราะห์ทุกวัน

B = วิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ความถี่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์
ภายหลังระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

| พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่างและความถี่ | | | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | ถังพักน้ำเสีย | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 1. พีเอช | A | A | A | A | A |
| 2. ไออาร์พี | A | A | A | A | A |
| 3. สภาพการนำไฟฟ้า | B | B | B | B | B |
| 4. สภาพต่างทั้งหมด | B | B | B | B | B |
| 5. กรดไขมันระเหย | B | B | B | B | B |
| 6. ซีไอดี | B | B | B | B | B |
| 7. ปริมาณไนเตรต | B | B | B | B | B |
| 8. ปริมาณไนไตรต์ | B | B | B | B | B |
| 9. ปริมาณแอมโมเนีย | B | B | B | B | B |
| 10. ปริมาณซัลเฟต | B | B | B | B | B |
| 11. ปริมาณซัลไฟด์รวม | B | B | B | B | B |
| 13. ปริมาณเหล็ก | B | B | B | B | B |

หมายเหตุ : A = วิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง

B = วิเคราะห์สัปดาห์ละครั้ง

3.6 เทคนิคการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสีย

ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียโดยทันทีภายหลังการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ พีเอช ไออาร์พี สภาพต่าง และกรดไขมันระเหย เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วหากถูกตั้งทิ้งไว้นานซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ โดยแบ่งตัวอย่างน้ำออกเป็นสามส่วน ส่วนที่หนึ่งทำการกรองไว้เพื่อการวิเคราะห์ค่าปริมาณซีไอดีละลาย (Soluble COD) ไนเตรต ไนไตรต์ ซัลเฟต และเหล็ก ส่วนที่สองไม่กรองเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 120 มล. เพื่อการวิเคราะห์แอมโมเนีย และส่วนที่สามวิเคราะห์ค่าปริมาณซัลไฟด์ โดยต้องบรรจุในขวดพลาสติกขนาด 60 มล. จนเต็มไม่ให้มีอากาศแล้วปิดฝาให้สนิท การ

วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนใหญ่อ้างอิงตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005) โดยมีเทคนิคเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์บางพารามิเตอร์ดังนี้

- ส่วนที่ 1 ทำการกรองไว้เพื่อการวิเคราะห์ค่าปริมาณซีโอดีละลาย (Soluble COD) ในเทรตไนไตรต์ ซัลเฟต และเหล็ก
 - การวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลาย เนื่องจากน้ำเสียในบางจุดมีปริมาณซัลไฟด์เจือปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ค่าซีโอดีผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ซีโอดีจะต้องทำการกรอง และเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1-2 หยด ทุกครั้ง
 - การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน ทำการตรวจวิเคราะห์โดยใช้หัววัดชนิด Combination Ion Selective Electrodes with Polymer Membrane (METTLER TOLEDO) (Membrane type ; Polymer) โดยทำกราฟมาตรฐานปริมาณไนเตรตที่ความเข้มข้นมาตรฐานที่ค่า 50 100 300 และ 500 มก/ล. ไนเตรต-ไนโตรเจน เพื่อให้ครอบคลุมกับช่วงค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ต้องการวิเคราะห์ และหากตัวอย่างน้ำเสียมีความเข้มข้นไนเตรตเกินกว่าช่วงค่าดังกล่าวจะต้องทำการเจือจางก่อนนำมาทำการวิเคราะห์
 - การวิเคราะห์ไนไตรต์-ไนโตรเจน ทำการวิเคราะห์โดยการวัดสี โดยสีและความขุ่นในน้ำเสียจะรบกวนการวิเคราะห์ได้ ฉะนั้นจึงต้องทำการกรองน้ำเสียก่อน หากไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในทันที สามารถเก็บรักษาตัวอย่างน้ำได้ประมาณ 1-2 วัน โดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ช^๐
 - การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต ทำการวิเคราะห์โดยวิธีวัดความขุ่น ซึ่งต้องทำกราฟมาตรฐานทุกครั้งที่ทำกรวิเคราะห์ เนื่องจากเครื่องวัดความขุ่นที่ใช้ในแต่ละครั้งจะมีค่าเริ่มต้นไม่คงที่ ซึ่งก่อนการวิเคราะห์จะกรองน้ำเสียก่อนทุกครั้ง เพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอยซึ่งเป็นตัวรบกวนการวัดความขุ่น โดยกราฟมาตรฐานมีปริมาณซัลเฟตความเข้มข้นมาตรฐานที่ค่า 10 50 100 300 และ 500 มก.โซเดียมซัลเฟต/ล.
 - การวิเคราะห์เหล็ก ทำการวิเคราะห์โดยวิธีพีแนนโทโรลีน (Phenanthroline method) โดยเป็นการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในรูปละลายน้ำซึ่งต้องทำการกรองตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ แต่หากไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีต้องเติมกรดเกลือเข้มข้น 2 มล. ต่อตัวอย่าง 100 มล. เพื่อรักษาคุณภาพน้ำก่อนนำเข้าสู่เย็นที่ 4 ช^๐

- ส่วนที่ 2 ไม่กรองเพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณแอมโมเนีย
 - การวิเคราะห์แอมโมเนีย ทำการวิเคราะห์โดยวิธีไตเตรชันซึ่งถ้ามีพีเอชสูงหรือต่ำมาก ต้องทำการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลางหรือเท่ากับ 7 ก่อน
- ส่วนที่ 3 ทำการวิเคราะห์โดยทันทีได้แก่ การวิเคราะห์ซัลไฟด์ สภาพต่างทั้งหมด และกรดไขมันระเหย
 - การวิเคราะห์ซัลไฟด์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้หัววัดชนิด Combination Ion Selective Electrodes (METTLER TOLEDO) (Membrane type ; Solid state) ซึ่งเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า โดยทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐานที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ในช่วง 0-150 มก./ล. ซึ่งครอบคลุมกับช่วงค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำตัวอย่าง
 - การวิเคราะห์ค่าสภาพต่างทั้งหมดและปริมาณกรดไขมันระเหย ทำการวิเคราะห์โดยวิธีโพเทนทิอเมตริก (Potentiometric method) และวิธีไตเตรชัน ซึ่งควรวิเคราะห์ทันทีหลังการเก็บตัวอย่างน้ำ โดยจะไม่ทำการกรองหรือเจือจางตัวอย่างน้ำโดยเด็ดขาด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง และแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุด คือ (1) ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเหล็ก (2) ชุดทดลองที่เติมเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ในรูปเฟอร์ริกคลอไรด์ และ (3) ชุดทดลองที่เติมเฟอร์ริกคีเลตในรูปเฟอร์ริกซิเตรต โดยทั้ง 3 ชุดการทดลองทำการเดินระบบพร้อมกันด้วยถังปฏิกรณ์แบบเอปปีอาร์ขนาด 16 ลิตร จำนวน 3 ถัง ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 8 ล./วัน นั่นคือ คิดเป็นระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียเท่ากับ 2 วัน ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีไอดีต่อไนโตรเจนต่อซัลเฟตเท่ากับ 12:1:1 (ซีไอดี 3,600 มก./ล. ไนเตรต-ไนโตรเจน 300 มก.ไนโตรเจน/ล. และซัลเฟต 300 มก.ซัลเฟต/ล.) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินไปสำหรับการกำจัดไนเตรตและซัลเฟต มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ไนโตรเจน และซัลเฟตเท่ากับ 1.8 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.วัน 0.15 กก.ไนโตรเจน/ลบ.ม.วัน และ 0.15 กก.ซัลเฟต/ลบ.ม.วัน ตามลำดับ โดยการทดลองช่วงที่ 1 เป็นการทดลองที่เติมเหล็กต่อซีไอดี (Fe^{3+} :COD) ลงในถังปฏิกรณ์ในสัดส่วนเท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/กก.ซีไอดี ซึ่งเป็นค่าที่เคยทำการทดลองโดยมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ที่สามารถกำจัดไนเตรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ปริมาณซีไอดียังคงมีเหลืออยู่มาก ส่วนการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 เป็นการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 1 โดยเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีไอดีขึ้นทีละ 10 เท่า เป็น 1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/กก.ซีไอดี ตามลำดับ โดยปริมาณดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งคาดว่าจะมากเพียงพอต่อความต้องการของระบบในการกำจัดทั้งไนเตรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในที่นี้จะขอกำหนดชื่อเรียกของชุดถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุดในแต่ละช่วงการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

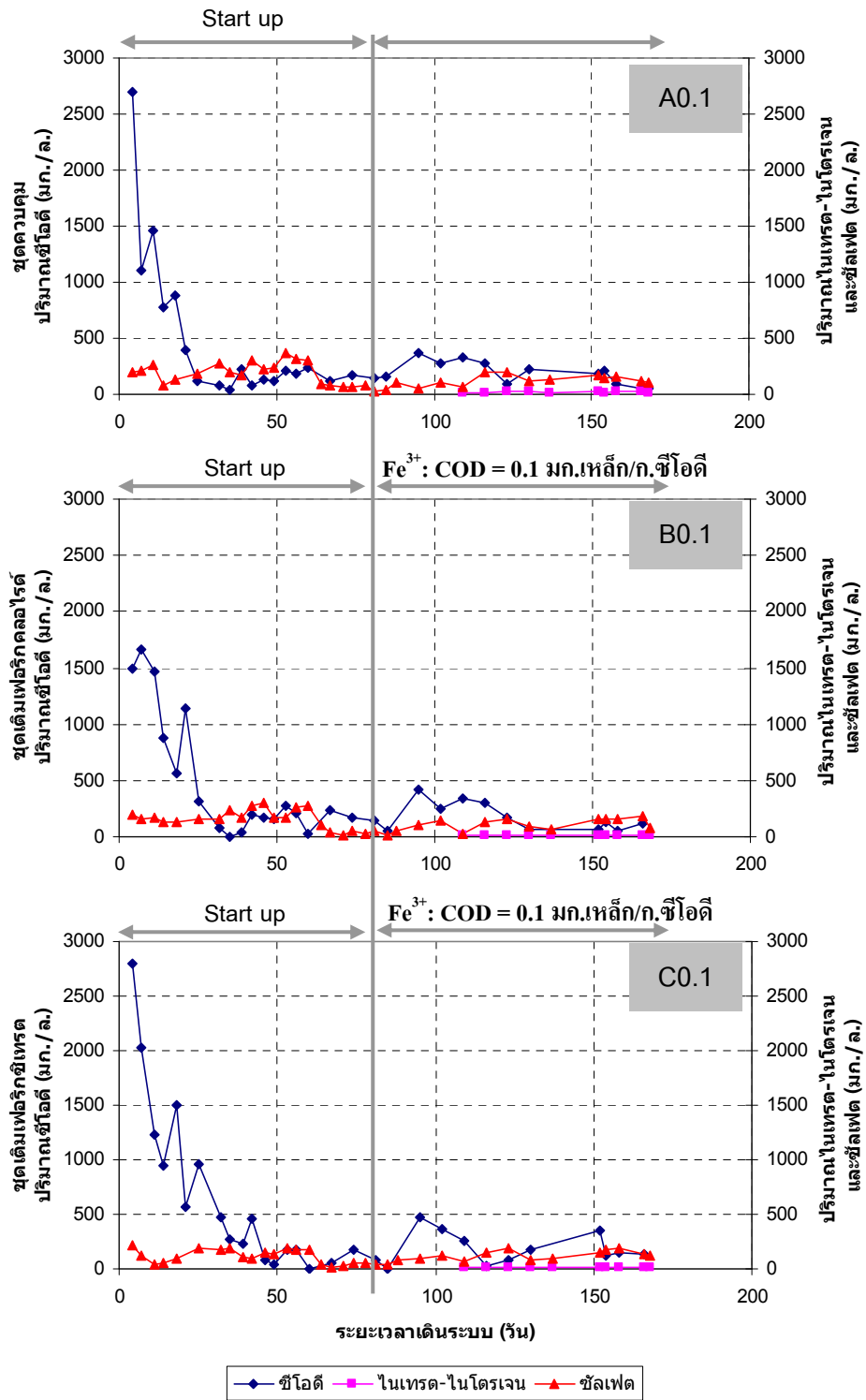
ตารางที่ 4.1 รหัสการเรียกชื่อของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดในแต่ละช่วงการทดลอง

| ประเภทของชุดถังปฏิกรณ์ | สัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีไอดี (มก.เหล็ก/กก.ซีไอดี) | | |
|----------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| | ช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1) | ช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0) | ช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0) |
| ชุดถังปฏิกรณ์ควบคุม | A0.1 | A1 | A10 |
| ชุดถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ | B0.1 | B1 | B10 |
| ชุดถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเตรต | C0.1 | C1 | C10 |

4.1 ช่วงการทดลองที่ 1 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

การทดลองในช่วงที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบทั้งสิ้น 168 วัน โดยแบ่งเป็นช่วงเริ่มต้นเดินระบบ 73 วัน ซึ่งยังไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ อย่างครบถ้วน และหลังจากระบบเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัวแล้วในวันที่ 74 ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง พบว่า ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในช่องที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแทนของน้ำทิ้งจากระบบเอปปีอาร์ แสดงดังในภาพที่ 4.1 โดยปริมาณซีโอดีและซัลเฟตในน้ำทิ้งของทั้ง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ A0.1 B0.1 และ C0.1 ซึ่งเป็นชุดควบคุมชุดที่เติมเฟอริกคลอไรด์ และชุดที่เติมเฟอริกซัลเฟตในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีการแกว่งเป็นช่วงๆ จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและซัลเฟตจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นหลังจากหนึ่งเดือนผ่านไป ส่วนค่าในเทรตมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาไม่มากนัก แสดงถึงสภาวะคงตัวของระบบ

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลค่าซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตของการทดลองทั้ง 3 ชุดแล้ว จึงพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 152 ถึง 168 ของการเดินระบบฯ มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวระบบฯ มีแนวโน้มที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว โดยค่าเฉลี่ยของข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับช่วงการทดลองที่ 1 นี้ แสดงดังตารางที่ 4.2



(A) ขุดควบคุม (B) ขุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ขุดเติมเฟอริกซิงเกิล

ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ไนเตรด และซัลเฟตในน้ำทิ้งของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|---|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ ควบคุม (A0.1) | COD (mg/l) | 3,655±336 | 2,004±287 | 860±348 | 199±73 | 120±74 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 326±37 | 59±27 | 27±4 | 26±4 | 21±4 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.04 | 6.85 | 0.12 | 0.05 | 0.04 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 22±11 | 31±6 | 34±6 | 32±6 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 326 | 88 | 58 | 60 | 53 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 337±25 | 246±42 | 90±18 | 140±21 | 142±29 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 7±8 | 45±8 | 37±13 | 37±14 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 86 | 73.8 | 82 | 82 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.05 | 0.15 | 0.21 | 0.28 | 0.20 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.33 | 0.09 | ND | ND | 0.22 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.38 | 0.24 | 0.11 | 0.13 | 0.43 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B0.1) | COD (mg/l) | 3,451±139 | 1,641±161 | 770±141 | 75±58 | 86±35 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 321±39 | 27±7 | 22±3 | 19±2 | 18±2 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.03 | 0.04 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 5±8 | 6±6 | 8±5 | 9±5 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 321 | 32 | 28 | 27 | 27 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 339±14 | 267±23 | 88±23 | 150±17 | 145±41 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 7±10 | 64±16 | 51±15 | 50±16 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 92 | 92 | 99 | 96 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.11 | 0.14 | 0.37 | 0.10 | 0.14 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.11 | 0.09 | 0.12 | 0.02 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.23 | 0.23 | 0.50 | 0.12 | 0.13 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C0.1) | COD (mg/l) | 3,439±215 | 1,527±91 | 1,020±135 | 112±30 | 187±96 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 328±35 | 26±6 | 18±3 | 18±3 | 16±4 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.04 | 0.05 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 3±3 | 4±3 | 4±3 | 8±6 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 328 | 29 | 22 | 22 | 24 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 338±12 | 274±12 | 117±47 | 145±65 | 157±25 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 6±9 | 39±3 | 47±13 | 44±10 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 94 | 76 | 93 | 94 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.03 | 0.20 | 0.34 | 0.19 | 0.26 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.25 | 0.12 | ND | 0.09 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.28 | 0.32 | 0.26 | 0.29 | 0.18 |

หมายเหตุ : เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 152 ถึงวันที่ 168 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล,

ND. = Not Detectable

4.1.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี ในเทรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย

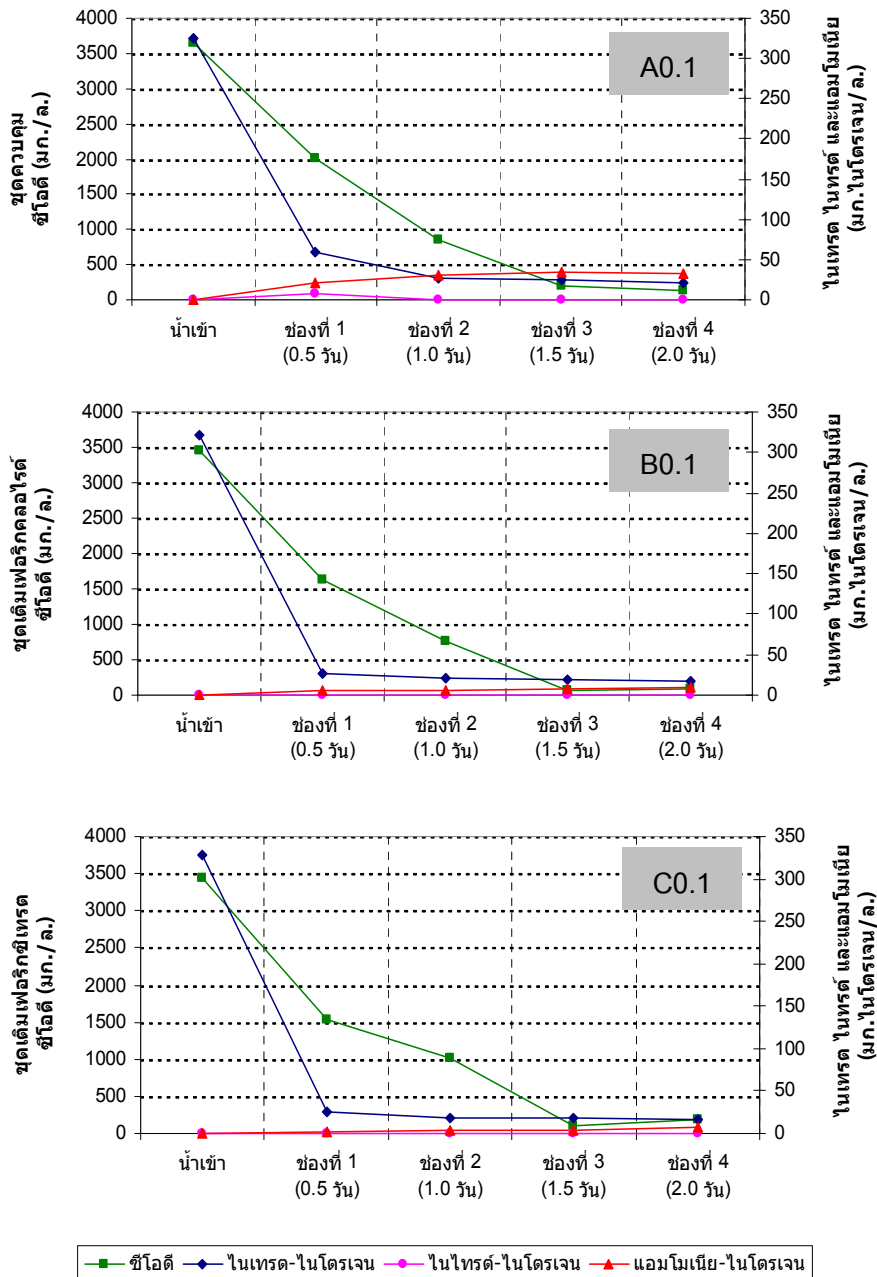
1) การเปลี่ยนแปลงซีโอดี

จากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในการทดลองช่วงที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 152 ถึงวันที่ 168 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล พบว่าในทั้ง 3 ชุดการทดลองปริมาณซีโอดีจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ (ที่มีระยะเวลาพักเก็บ 0.5 วัน) นั่นคือปริมาณซีโอดีลดลงจากน้ำเข้าเกือบครึ่งหนึ่งและลดลงจนปริมาณซีโอดีคงเหลือในช่วงที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ มีค่าเท่ากับ 120 ± 74 , 86 ± 35 และ 187 ± 96 มก./ล. ในชุดควบคุม (A0.1) ชุดที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B0.1) และชุดที่เติมเพอริกซิเทรต (C0.1) ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vossoughi และคณะ (2002) ที่ใช้ถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้น 3,000 มก./ล. ซึ่งพบการบำบัดซีโอดีมากกว่า 65% ในช่วงแรกของถังปฏิกรณ์และมีประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงสุดท้ายเท่ากับ 86%

2) การเปลี่ยนแปลงไนเทรต ไนไตรต์ และแอมโมเนีย

ในทั้ง 3 ชุดการทดลองพบว่า ปริมาณไนเทรตลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 ของทุกถังปฏิกรณ์ โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่มีการเติมเหล็กทั้ง 2 ชุด จะเห็นว่าปริมาณไนเทรตที่เหลืออยู่มีค่าน้อยกว่าชุดควบคุม กล่าวคือ ในช่วงที่ 1 ของ A0.1 มีค่าปริมาณไนเทรตคงเหลือ 59 ± 27 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนใน B0.1 และ C0.1 คงเหลือปริมาณไนเทรตเท่ากับ 27 ± 7 และ 26 ± 6 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยทั้ง 3 ชุดการทดลองยังมีปริมาณไนเทรตลดลงอีกเล็กน้อยในช่วงที่ 2 และ 3 (ดังภาพที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่า ปฏิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรกของถังปฏิกรณ์ โดยที่อัตราการเกิดปฏิริยาจะช้าลง และดูเหมือนจะสิ้นสุดในถังปฏิกรณ์ช่วงที่ 2 เนื่องจากความเข้มข้นของไนเทรตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ถังปฏิกรณ์ช่วงที่ 2 ถึง 4 โดยปริมาณไนเทรตลดลงจากเริ่มต้น 300 มก.ไนโตรเจน/ล. จนเหลือประมาณ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบเอปปีอาร์ โดยตรวจไม่พบการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบฯ แสดงให้เห็นว่าในชุดการทดลองนี้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันน่าจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barber (2000) ที่ศึกษาการกำจัดไนเทรตเข้มข้นสูงด้วยถังปฏิกรณ์ชนิดเอปปีอาร์แล้วพบว่า ไนเทรตจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 และ 2 ของถังปฏิกรณ์ จึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณซีโอดีที่เติมลงไปในระบบฯ ของการทดลองช่วงนี้ เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการกำจัดทั้งไนเทรตและไนไตรต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ และกระบวนการดีไนทริฟิเคชันน่าจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกรณ์ของทุกชุดการทดลอง

แต่สิ่งที่น่าสังเกตคือ การตรวจพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียตั้งแต่ช่องแรกจนถึงปฏิกรณ์ชุดควบคุม (A0.1) โดยมีปริมาณสะสมและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความยาวของถังจนถึงช่องสุดท้าย ซึ่งมีค่าประมาณ 30 มก.ไนโตรเจน /ล. ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมเหล็กทั้งรูปเฟอร์ริกไอออนและเฟอร์ริกคีเลต (B0.1 และ C0.1) จะพบการเกิดและสะสมของแอมโมเนียน้อยมาก โดยมีค่าไม่เกิน 10 มก.ไนโตรเจน/ล.

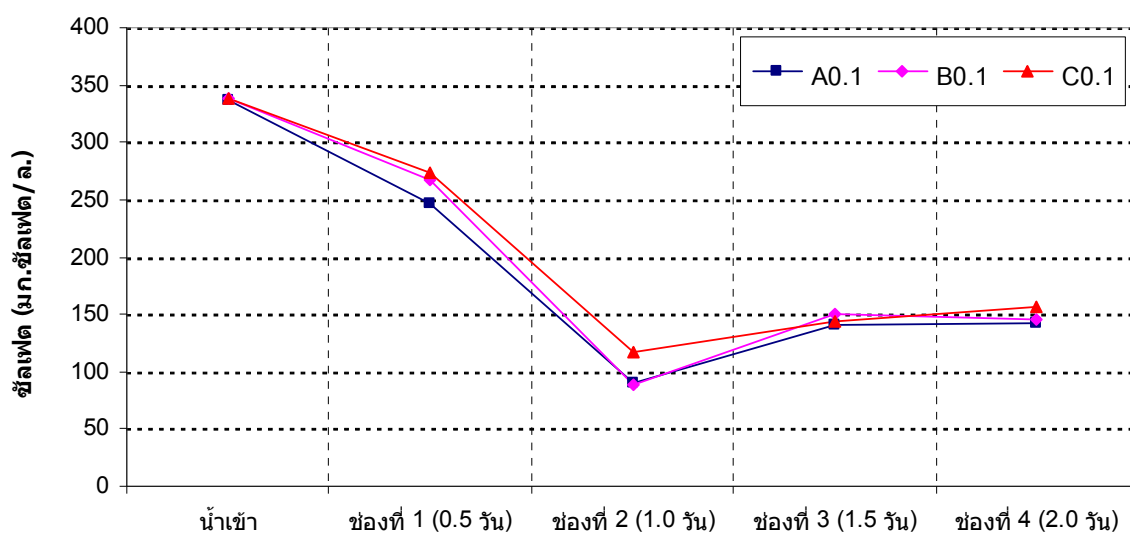


(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอร์ริกซีเทรต

ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียของถังเอปียาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

3) การเปลี่ยนแปลงซัลเฟตและซัลไฟด์

จากภาพที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปียาร์จาก 3 ชุดการทดลอง พบว่าซัลเฟตไม่สามารถถูกกำจัดได้หมดในทั้ง 3 ชุดการทดลอง โดยมีปริมาณซัลเฟตคงเหลือในระบบเท่ากับ 142 ± 29 145 ± 41 และ 157 ± 25 มก. ซัลเฟต/ล. ในชุดควบคุม ชุดที่เติมเพอริกคลอไรด์ และชุดที่เติมเพอริกซิเทรต ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณคงเหลืออยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยอาจสรุปได้ว่าปริมาณเหล็กที่เติมลงไปในระบบฯ ทั้งเพอริกคลอไรด์และเพอริกซิเทรตยังไม่สามารถกำจัดซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

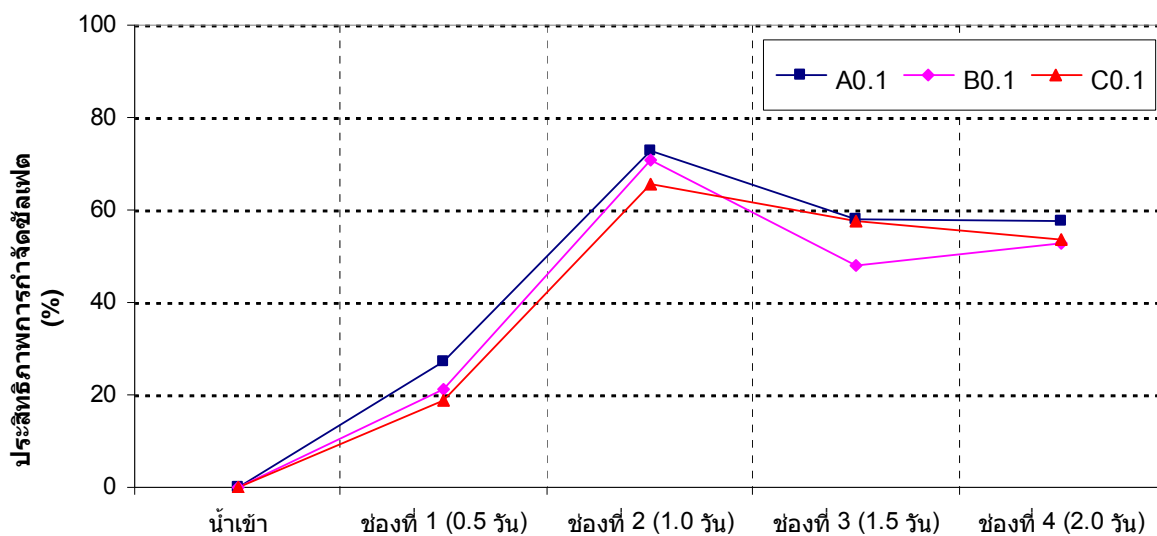


(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเพอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเพอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.3 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปียาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซัลเฟตเริ่มถูกกำจัดได้ในช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ แต่เป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 20 เท่านั้น ซึ่งอาจเกิดจากในระบบยังคงมีไนเตรตจึงทำให้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในแง่ของกลไกการทำงานของแบคทีเรียพบว่า ไนเตรตมีผลยับยั้งกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Barton และ Fauque, 2009; Lens และคณะ, 1998) และที่ระบบสามารถกำจัดซัลเฟตได้เล็กน้อยนั้นอาจเป็นผลมาจากการมีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนสามารถเติบโตได้ในระบบฯ ถึงแม้ว่าเป็นสภาวะที่ยังคงมีไนเตรตและไนไตรต์เหลืออยู่ก็ตาม เช่น สภาวะที่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเจริญเติบโตอยู่ภายในโครงสร้างของเม็ดตะกอนก็จะสามารถทนทานต่อสภาวะที่มีไนเตรตและไนไตรต์ได้ดีกว่า

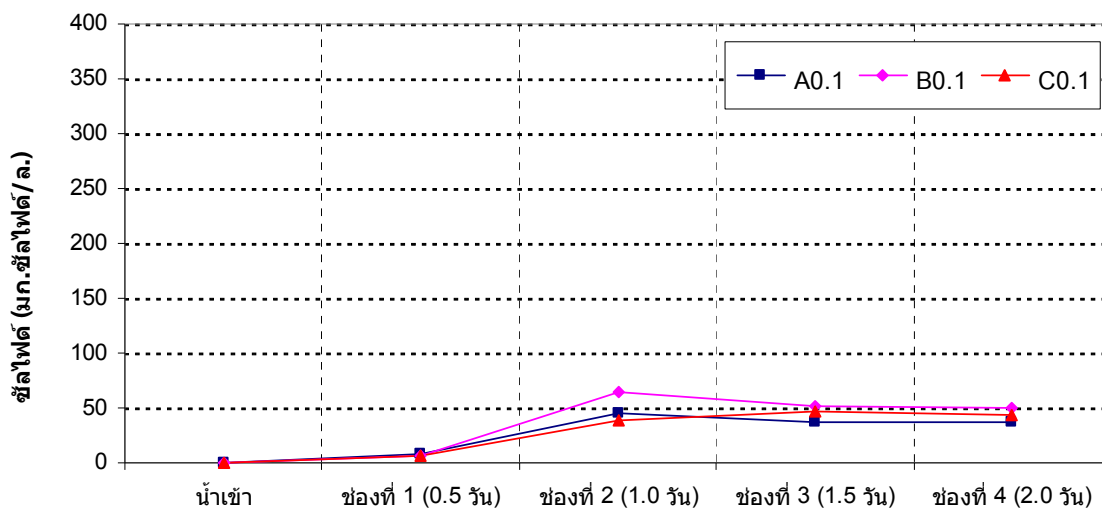
นอกจากนั้นยังพบว่าในทั้ง 3 ชุดการทดลอง ซัลเฟตสามารถถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็วและดีที่สุดในช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณไนเตรตในถังปฏิกรณ์ถูกกำจัดจนเกือบหมดแล้ว โดยมีปริมาณซัลเฟตคงเหลือในน้ำทิ้งจากช่องที่ 4 ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.4



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

จากการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ดังภาพที่ 4.5 พบว่า มีค่าสูงสุดในช่องที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ในการทดลองทั้ง 3 ชุด คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37 50 และ 44 มก.ซัลเฟอร์/ล. ในชุดควบคุม (A0.1) ชุดที่เติมเฟอริกคลอไรด์ (B0.1) และชุดที่เติมเฟอริกซิเทรต (C0.1) ตามลำดับ

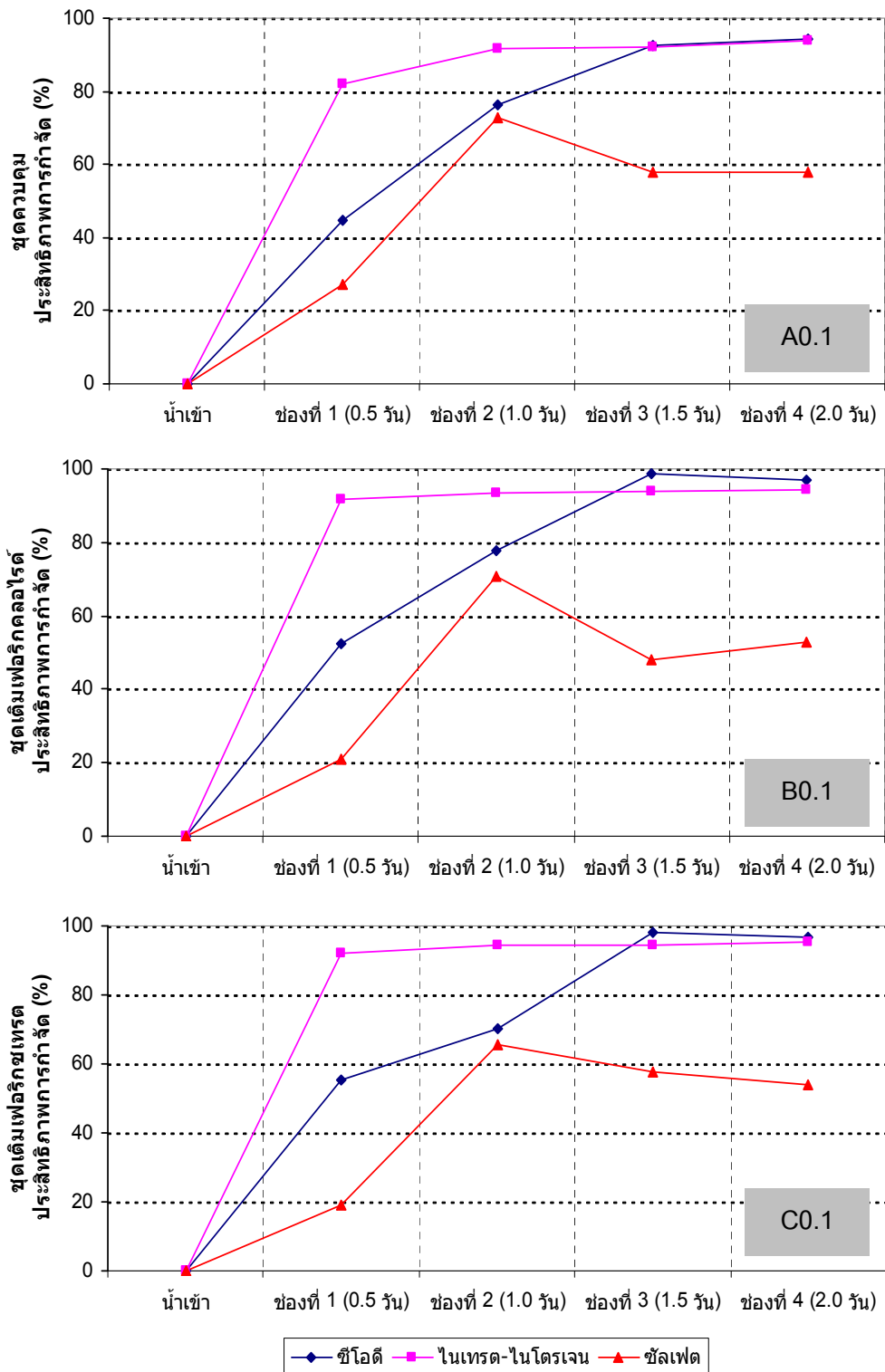


(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเพอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเพอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.5 ความเข้มข้นซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์เอปียาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

4) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟต

จากภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์เอปียาร์มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดควบคุม (A0.1) ชุดที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B0.1) และชุดที่เติม เพอริกซิเทรต (C0.1) เท่ากับร้อยละ 94 97 และ 97 มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเทรตเท่ากับร้อยละ 94 95 และ 95 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าในชุดควบคุมจะไม่มีสารเติมเหล็กแต่ก็ยังสามารถกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตได้ ทั้งนี้ข้อมูลปริมาณเหล็กในน้ำเสียจากชุดควบคุม (A0.1 A1 และ A10) มีค่าเท่ากับ 0.38 0.30 และ 0.18 มก./ล. ซึ่งสูงกว่าค่าปริมาณเหล็กสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่แนะนำโดย Speece 0.072 มก./ล. (0.02 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) ดังนั้นจึงมีเหล็กพอเพียงในน้ำเสียที่เตรียมขึ้น และจากการวิเคราะห์ค่าอื่นๆ มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเทรตและไนโตรเจนเกิดขึ้นสูงสุดในช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุด ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Ruiz (2006) ที่ศึกษาผลของการกำจัดไนเทรตจากถังปฏิกรณ์แบบยูเอสบี (Upflow Sludge Bed ; USB) ได้ผลว่าค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน (COD/N) ที่ 5 และ 10 สามารถกำจัดไนเทรตได้ 100% และที่ COD/N เท่ากับ 100 สามารถกำจัดไนเทรตได้มากกว่า 90% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน COD/N เท่ากับ 5 นี้ก็เพียงพอต่อการเกิดดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตพบว่าชุดการทดลอง A0.1 B0.1 และ C0.1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 58 53 และ 54 ตามลำดับ



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซัลเฟต

ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ไนเตรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

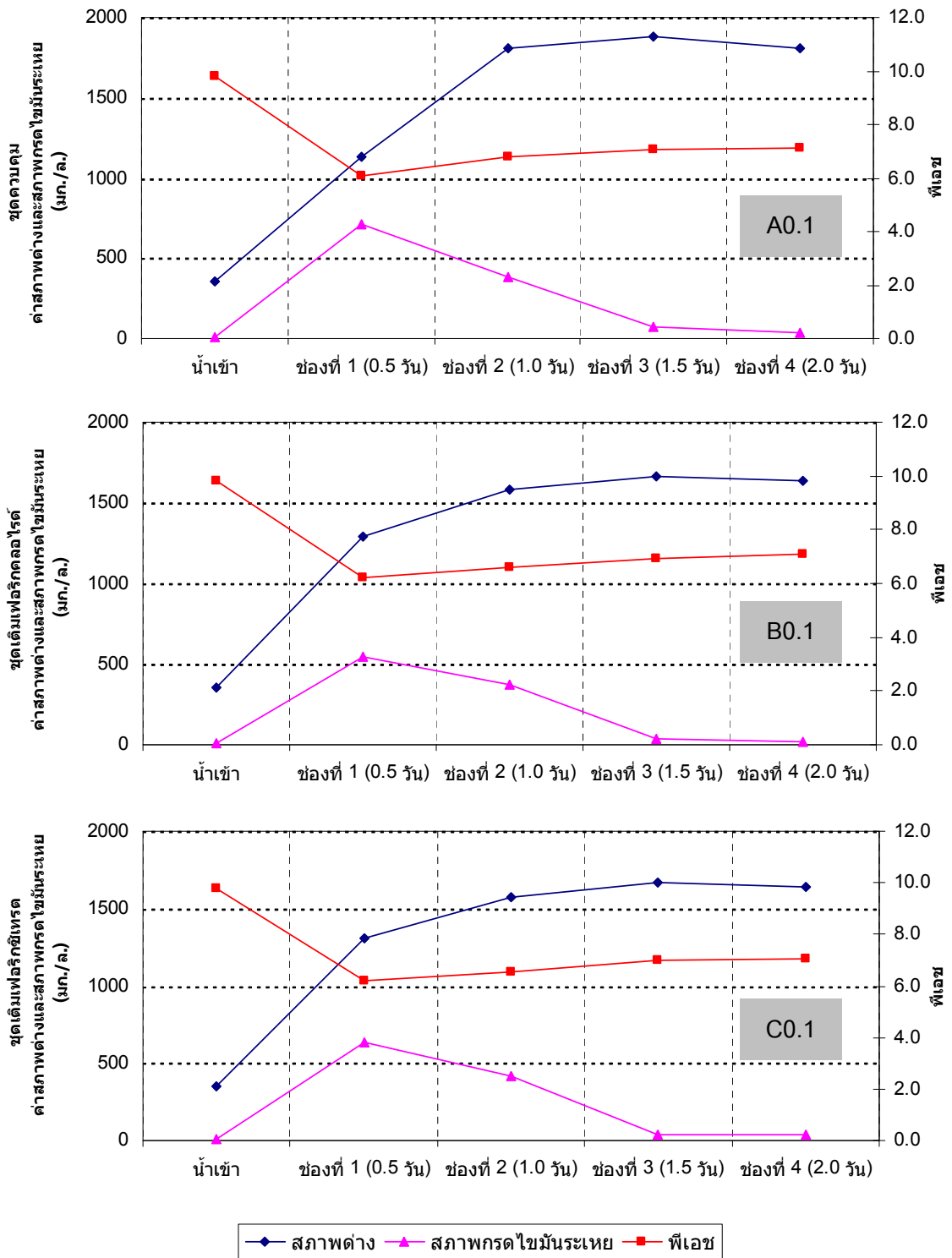
| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|------------------------------------|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (A0.1) | COD | 0 | 45 | 76 | 93 | 94 |
| | Nitrate | 0 | 82 | 92 | 92 | 94 |
| | Sulfate | 0 | 27 | 73 | 58 | 58 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (B0.1) | COD | 0 | 53 | 78 | 99 | 97 |
| | Nitrate | 0 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| | Sulfate | 0 | 21 | 71 | 48 | 53 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (C0.1) | COD | 0 | 55 | 70 | 98 | 97 |
| | Nitrate | 0 | 92 | 94 | 95 | 95 |
| | Sulfate | 0 | 19 | 66 | 58 | 54 |

หมายเหตุ : เป็นผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 152 ถึงวันที่ 168 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล

4.1.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีไอดี ไนเตรต และซัลเฟต

1) ค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหย

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 พบว่าน้ำเสียในระบบฯ ของการทดลองทั้ง 3 ชุด มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.1-7.1 โดยน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 9.8 และลดต่ำลงเมื่อเข้าสู่ช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการสร้างและสะสมกรดอินทรีย์ในระบบฯ โดยพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ในช่องลำดับถัดไป โดยในทางทฤษฎีกระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถสร้างสภาพต่างได้ประมาณ 3.57 ก.หินปูน/ก.ไนโตรเจน (Haandel และคณะ, 2006) ส่วนซัลเฟตรีดักชันจะสร้างสภาพต่างได้ประมาณ 1.04 ก.หินปูน/ก.ซัลเฟต แต่ทั้งนี้ค่าดังกล่าวอาจแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสับสเตรต นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพต่างที่เกิดขึ้นในระบบของชุดควบคุม (A0.1) ชุดที่เติมเฟอริกคลอไรด์ (B0.1) และชุดที่เติมเฟอริกซิเทรต (C0.1) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,810 \pm 96$ $1,640 \pm 37$ และ $1,643 \pm 54$ มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยพบว่ามีค่าสูงที่สุดในช่องแรกของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 710 ± 39 550 ± 132 และ 635 ± 122 มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ โดยมีปริมาณลดลงตามความยาวของช่องถังปฏิกรณ์ ซึ่งแสดงถึงปริมาณกรดอินทรีย์ที่ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไร้อากาศ



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าฟิเชช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

2) โออาร์พี (ORP)

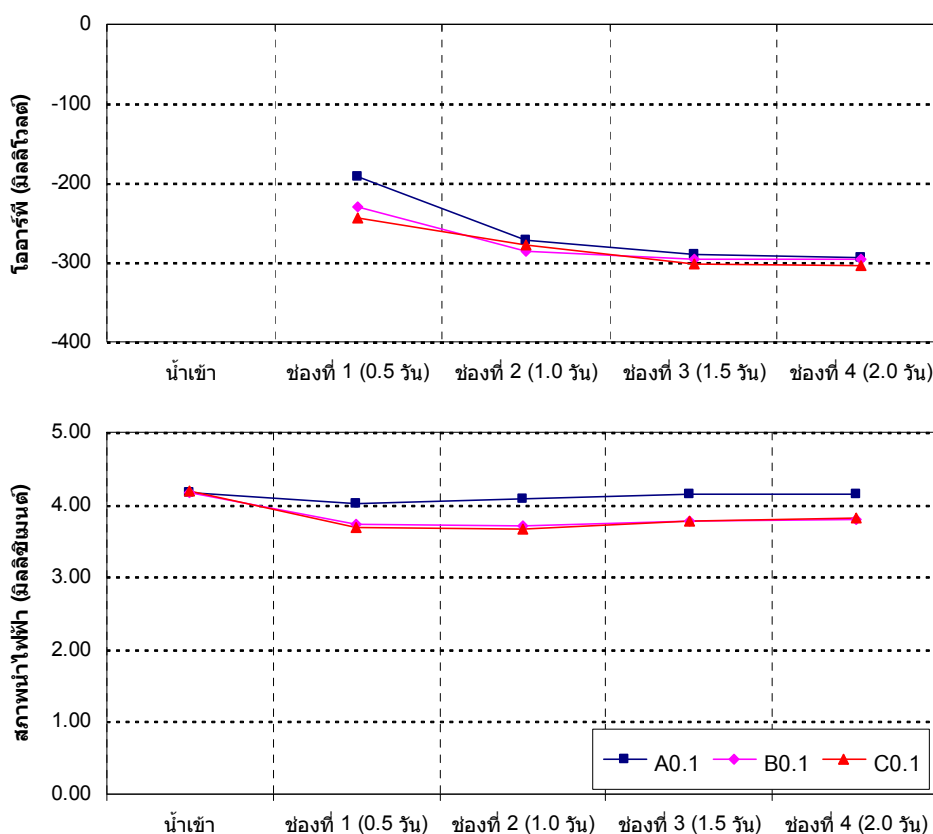
การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีในถังปฏิกรณ์ของการทดลองทั้ง 3 ชุด แสดงดังภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.4 โดยพบว่าค่าโออาร์พีของระบบในแต่ละช่องถังปฏิกรณ์เป็นค่าที่แสดงถึงสภาวะไร้อากาศ นั่นคือ ชุดควบคุม (A0.1) มีค่าอยู่ในช่วง -191 ถึง -293 มิลลิโวลต์ ชุดที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B0.1) มีค่าอยู่ในช่วง -229 ถึง -296 มิลลิโวลต์ และชุดที่เติมเพอริกซิเทรต (C0.1) มีค่าอยู่ในช่วง -244 ถึง -304 มิลลิโวลต์ ซึ่งยืนยันอย่างชัดเจนว่าปฏิกิริยาการกำจัดไนเทรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปียาร์เกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศ ถึงแม้ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชนิดฝาเปิดก็ตาม เพราะค่าโออาร์พีหากมีค่าเป็นบวกแสดงว่าอยู่ในสภาวะแอโรบิก เช่น +100 ถึง +350 สามารถเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันขึ้นได้ แต่หากค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -200 ถึง +200 จะอยู่ในสภาวะที่เรียกว่าแอนน็อกซิก ซึ่งในช่วง -50 ถึง +50 สามารถเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันขึ้นได้ ส่วนถ้ามีค่าโออาร์พีเป็นลบตั้งแต่ -200 เป็นต้นไปจะแสดงให้เห็นว่าระบบได้เข้าสู่สภาวะไร้อากาศ และถ้ามีค่าตั้งแต่ช่วง -100 ถึง -225 จะเกิดกระบวนการสร้างกรด และช่วง -175 ถึง -400 จะเกิดกระบวนการสร้างมีเทนขึ้น (Michael, 2007)

3) สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าสภาพนำไฟฟ้าเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณของสารอนินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียได้โดยคร่าวๆ ว่ามีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใด หากน้ำเสียมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง แสดงว่ามีแนวโน้มที่จะมีองค์ประกอบของไอออนต่างๆ ของสารอนินทรีย์ในน้ำเสียเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้าของทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าลดลงจากน้ำเข้าในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ นั่นคือ ปริมาณไอออนในน้ำเสียมีค่าต่ำลง หรืออาจบ่งบอกได้ถึงปริมาณไอออนลบของไนเทรตและซัลเฟตที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย โดยพบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเกือบคงที่ในช่องที่ 3 และ 4 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งอาจเป็นผลจากไอออนของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟต ที่ไม่ได้ช่วยลดปริมาณไอออนในน้ำเช่นเดียวกับการกำจัดไนเทรต

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณค่าสภาพนำไฟฟ้าแล้วพบว่ายังมีค่าค่อนข้างสูง แม้ว่าระบบจะสามารถกำจัดไนเทรตได้เกือบทั้งหมดแล้วก็ตาม หากทดลองคำนวณปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolve solid) โดยใช้แฟคเตอร์ 0.86 (มันซิน ตันซูลเวสท์ และมันรัช ตันซูลเวสท์, 2547) คุณค่าสภาพนำไฟฟ้าที่วัดได้ จะพบว่าค่าปริมาณของแข็ง

ละลายในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการบำบัดจาก A0.1 B0.1 และ C0.1 แล้วมีค่าเท่ากับ 3,570 3,260 และ 3,280 มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ ซึ่งตัวเลขดังกล่าวยังถือว่ามีค่าสูงอยู่ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ คือ ประการแรกการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองนี้ใช้สารเคมีที่อยู่ในรูปสารประกอบโซเดียมและโพแทสเซียมเป็นส่วนใหญ่ ทั้งโพแทสเซียมไนเตรตและโซเดียมซัลเฟตเมื่อคำนวณเป็นปริมาณโซเดียมจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,355 มก./ล. โดยโซเดียมนี้เป็นรูปของไอออนที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปจากน้ำเสียได้ จึงทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของระบบไม่ลดลงมากนัก ประการที่สองนั้นอาจเนื่องมาจากทั้งกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันล้วนแล้วแต่เป็นการสร้างสภาพต่างให้กับระบบ ซึ่งสภาพต่างที่เกิดขึ้นนี้อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่ละลายอยู่ในระบบและมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกัน และประการสุดท้ายสารผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทั้งไนเตรตและซัลเฟต เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ กรดอินทรีย์ระเหย หรือแอมโมเนีย ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวจากชุดการทดลองทั้งสามมีค่าค่อนข้างสูง



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซัลเฟต

ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าจากถังปฏิกรณ์เอปียาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

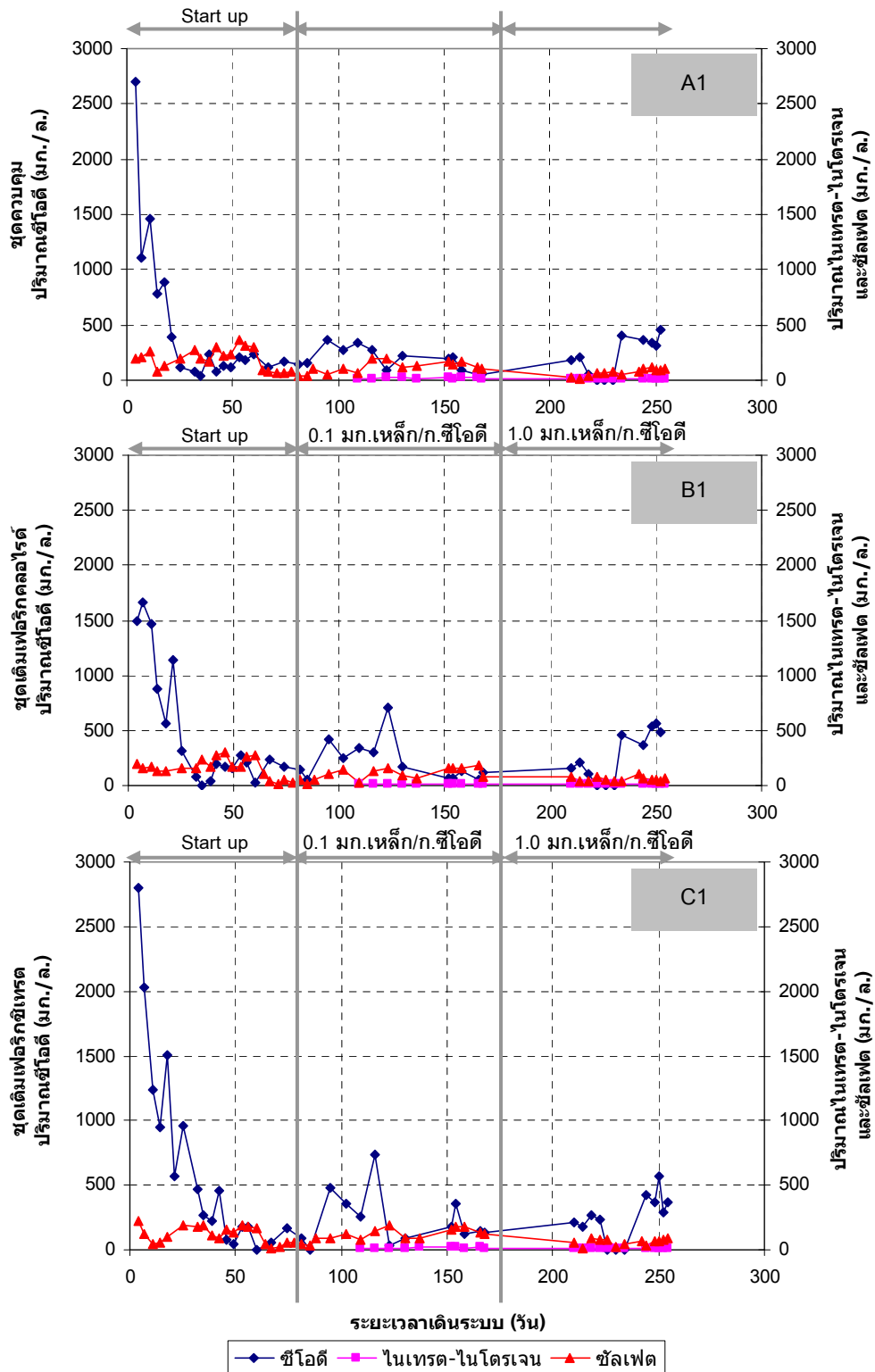
| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|---|--|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A0.1) | pH | 9.8 | 6.1 | 6.8 | 7.1 | 7.1 |
| | ORP (mV) | N/A | -191 | -272 | -291 | -293 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.17 | 4.02 | 4.09 | 4.14 | 4.15 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 355±19 | 1,130±139 | 1,808±139 | 1,878±106 | 1,810±96 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 11±3 | 710±39 | 380±128 | 73±45 | 38±18 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B0.1) | pH | 9.8 | 6.2 | 6.6 | 6.9 | 7.1 |
| | ORP (mV) | N/A | -229 | -285 | -296 | -296 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.17 | 3.73 | 3.70 | 3.78 | 3.79 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 353±27 | 1,295±36 | 1,585±45 | 1,665±62 | 1,640±37 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 13 | 550±132 | 373±53 | 33±7 | 23±10 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C0.1) | pH | 9.8 | 6.2 | 6.5 | 7.0 | 7.1 |
| | ORP (mV) | N/A | -244 | -278 | -301 | -304 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.18 | 3.68 | 3.65 | 3.76 | 3.81 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 350±18 | 1,305±42 | 1,573±60 | 1,673±41 | 1,643±54 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 12 | 635±122 | 420±114 | 38±12 | 35±10 |

หมายเหตุ: เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 152 ถึงวันที่ 168 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล, N/A = Not Analysis

4.2 ช่วงการทดลองที่ 2 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

การเดินระบบในช่วงการทดลองที่ 2 นี้เป็นการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองในช่วงที่ 1 โดยทำการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีโอดีในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ให้สูงขึ้น 10 เท่า เป็น 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณเหล็กทั้งรูปเฟอร์ริกไอออนและเฟอร์ริกคีเลต ต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูง โดยมีระยะเวลาการเดินระบบฯ 44 วัน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างครบถ้วนหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วดังตารางที่ 4.5 และจากภาพที่ 4.9 เป็นผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในช่องที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งสมมติให้เป็นตัวแทนของน้ำทิ้งจากระบบในทั้ง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม (A1) ชุดที่เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B1) และชุดที่เติมเฟอร์ริกซิเตรต (C1) โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในน้ำทิ้งจากถังปฏิกรณ์ตามช่วงเวลาต่างๆ ของการเดินระบบฯ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากช่วงการทดลองที่ 2 นี้กับการทดลองที่ผ่านมาในช่วงที่ 1 พบว่า ปริมาณซีโอดีจากชุดการทดลองที่มีการเติมเหล็กในปริมาณ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี (B0.1 และ C0.1) ปริมาณซีโอดีจะถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วและมากกว่าการทดลองที่เติมเหล็กในปริมาณที่สูงขึ้นเป็น 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี (B1 และ C1) เป็นผลทำให้ปริมาณซีโอดีคงเหลือในระบบของช่วงการทดลองที่ 2 นี้มีปริมาณมากกว่าช่วงการทดลองแรก ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตยังคงดีและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในทั้ง 3 ชุดการทดลอง ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของชุดการทดลอง B1 และ C1 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่า มีผลดีขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มสัดส่วนและปริมาณการเติมเหล็กสูงขึ้นจากการทดลองช่วงที่ 1 ถึง 10 เท่า



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในน้ำทิ้งจากถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|---|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ ควบคุม (A1) | COD (mg/l) | 3,688±134 | 1,685±244 | 512±116 | 393±187 | 376±55 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 295±14 | 12±1 | 14±1 | 10±3 | 9±1 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.09 | 0.83 | 0.06 | 0.09 | 0.15 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 13±11 | 24±10 | 29±10 | 27±7 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 295 | 26 | 38 | 39 | 36 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 334±9 | 216±9 | 141±23 | 106±51 | 103±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 8±7 | 64±12 | 32±7 | 27±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 107 | 77 | 109 | 66 | 60 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.06 | 0.28 | 0.35 | 0.54 | 0.88 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.23 | ND | ND | ND | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.30 | 0.26 | 0.14 | 0.35 | 0.80 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอริกคลอไรด์ (B1) | COD (mg/l) | 3,722±207 | 1,702±185 | 1,133±101 | 376±89 | 484±78 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 307±12 | 11±3 | 9±2 | 9±1 | 8±1 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.09 | 4.35 | 0.06 | 0.10 | 0.14 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | ND | 40±35 | 28±22 | 35±17 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 307 | 15 | 49 | 37 | 43 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 333±7 | 243±19 | 68±16 | 81±49 | 55±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 0.48±0.42 | 63±9 | 102±23 | 143±19 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 107 | 78 | 85 | 128 | 161 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.10 | 0.62 | 0.69 | 0.68 | 0.45 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.11 | ND | ND | 0.05 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.21 | 0.50 | 0.49 | 0.73 | 0.32 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอริกซิเทรต (C1) | COD (mg/l) | 3,836±105 | 1,816±126 | 1,656±216 | 541±85 | 404±105 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 315±15 | 17±7 | 11±5 | 9±1 | 8±1 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.08 | 5.52 | 5.24 | 0.12 | 0.10 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 2±4 | 97±19 | 98±15 | 106±12 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 315 | 25 | 113 | 107 | 114 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 353±27 | 262±15 | 190±10 | 53±28 | 70±21 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 32±9 | 119±15 | 133±18 | 185±6 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 113 | 116 | 180 | 150 | 207 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.19 | 0.60 | 0.63 | 1.85 | 1.06 |
| | Iron(III) (mg/l) | 1.75 | 0.74 | 0.38 | ND | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 1.95 | 1.34 | 1.01 | 1.02 | 0.53 |

หมายเหตุ : เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 244 ถึงวันที่ 254 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล

ND. = Not Detectable

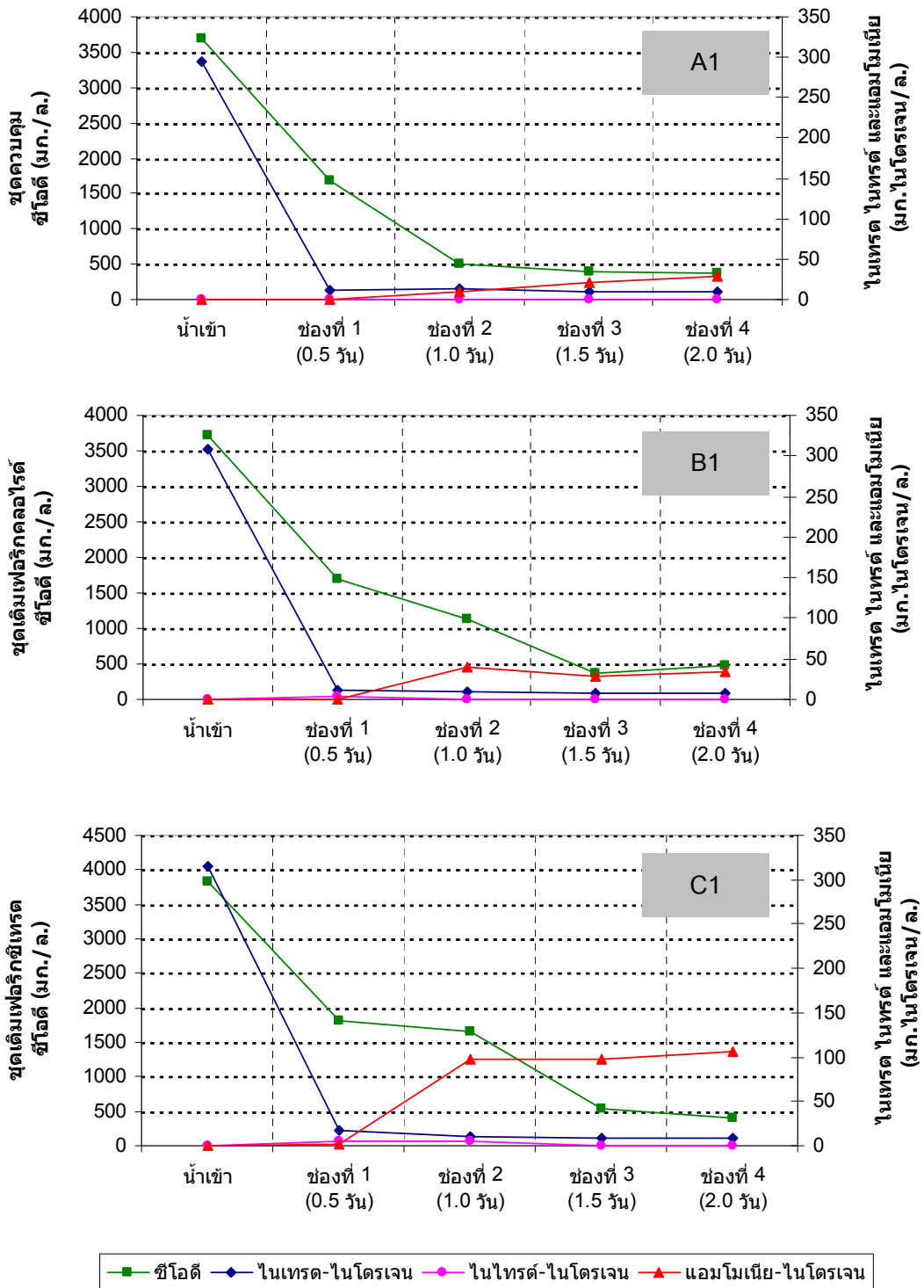
4.2.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี ในเทรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย

1) การเปลี่ยนแปลงซีโอดี

จากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในการทดลองช่วงที่ 2 นี้พบว่าปริมาณซีโอดีจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์เช่นเดียวกับช่วงการทดลองที่ 1 โดยมีค่าลดลงจนคงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งจากปริมาณซีโอดีของน้ำเข้า แต่ในช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ชุด B1 และ C1 พบว่าซีโอดีจะถูกนำไปใช้ได้ช้าลงเมื่อเทียบกับชุด B0.1 และ C0.1 ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กสูงขึ้น จนส่งผลให้ปริมาณซีโอดีคงเหลือในช่วงที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ชุด B1 และ C1 มีค่าเท่ากับ 484 ± 78 และ 404 ± 105 มก./ล. ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งจากช่วงการทดลองที่ 2 นี้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากในช่วงการทดลองที่ 1 ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ เกิดซัลไฟด์ในระบบเพิ่มมากขึ้นและซัลไฟด์นี้เองส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบฯ จนทำให้บำบัดซีโอดีได้ลดลง

2) การเปลี่ยนแปลงไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนีย

ภายใต้สภาวะการเติมเหล็กต่อซีโอดี 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ในชุด B1 และ C1 พบว่าปริมาณไนเตรตลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ และลดลงอีกเล็กน้อยในช่วงที่ 2 และ 3 ของถังปฏิกรณ์ โดยปริมาณไนเตรตจากเริ่มต้นที่มีค่าประมาณ 300 มก.ไนโตรเจน/ล. ลดลงจนคงเหลือสะสมในระบบฯ ไม่เกิน 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการบำบัด และพบการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบฯ น้อยมากไม่เกิน 5 มก.ไนโตรเจน/ล. แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ค่าปริมาณแอมโมเนียในระบบฯ ของชุดการทดลองที่มีการเติมเหล็กในรูปเฟอร์ริกคลอไรด์ (B1) และเฟอร์ริกซิเตรต (C1) กลับพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กให้สูงขึ้นจะเกิดแอมโมเนียขึ้นในระบบฯ ตั้งแต่ช่วงที่ 3 ของถังปฏิกรณ์เป็นต้นไป โดยในช่วงสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ยังคงมีปริมาณแอมโมเนียสะสมอยู่ในชุด B1 และ C1 เท่ากับ 35 ± 17 และ 106 ± 12 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (ดังภาพที่ 4.10) ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มสูงขึ้นจากถังปฏิกรณ์ควบคุม (A1) และถังที่เติมเหล็กในสัดส่วนต่ำ (B0.1 และ C0.1) จากการทดลองช่วงที่ 1 จึงคาดว่า การเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียนี้จะเป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ที่พบการว่ามีกระบวนการดีเอ็นอาร์เอเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ภายใต้สภาวะที่มีการเติมเฟอร์ริกไอออนลงในระบบ โดยผลจากการทดลองสื่อให้คิดได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่ปฏิกิริยาการเปลี่ยนไนเตรตเป็นแอมโมเนียผ่านกระบวนการดีเอ็นอาร์เอ จะถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่มีการเติมเหล็กลงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ในปริมาณที่สูงขึ้น

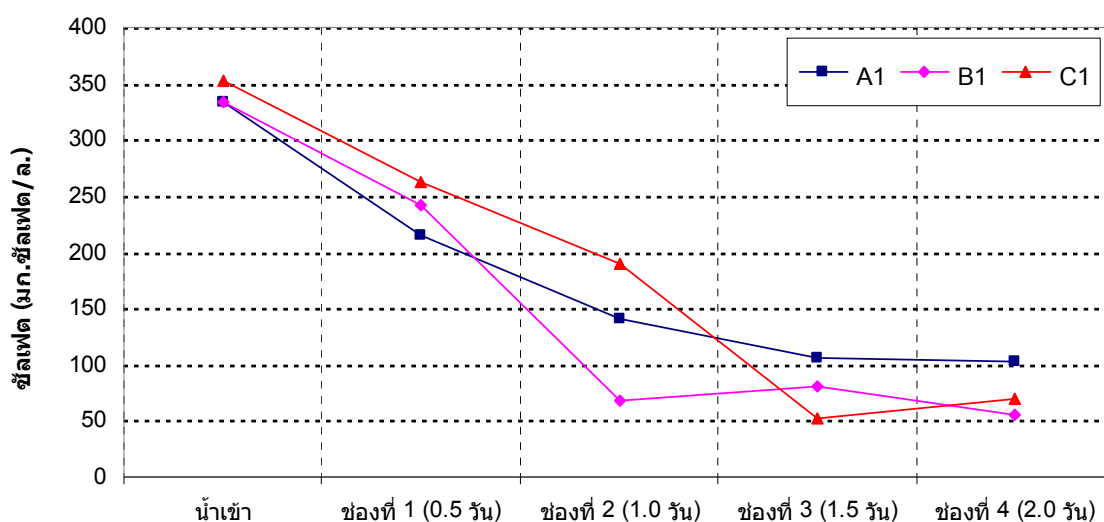


(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเต็มเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเต็มเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซึ้อัด ไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียของถังอบีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซึ้อัด)

3) การเปลี่ยนแปลงซัลเฟตและซัลไฟด์

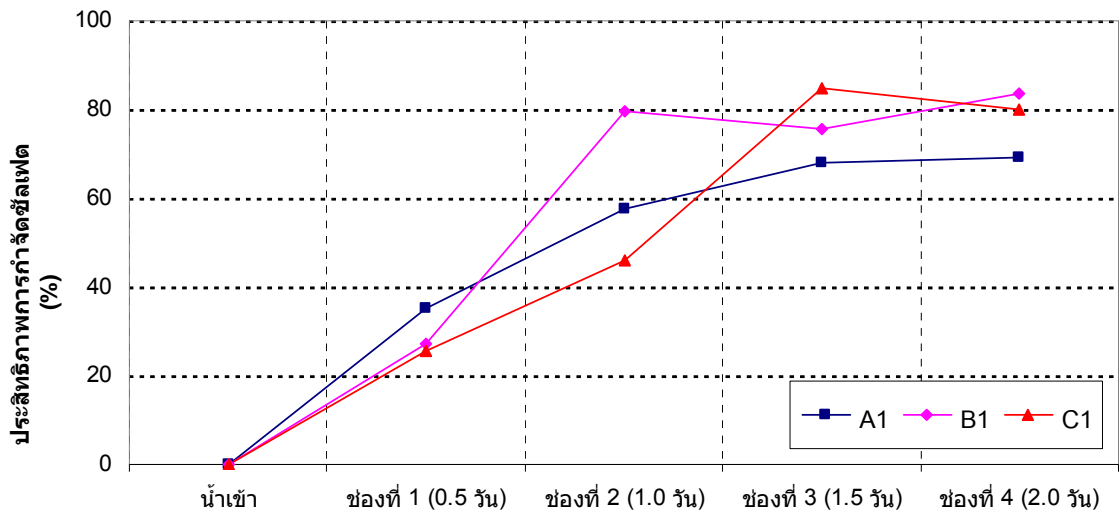
จากภาพที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์พบว่า B1 และ C1 มีปริมาณซัลเฟตคงเหลือในระบบเท่ากับ 55 ± 11 และ 70 ± 21 มก.ซัลเฟต/ล. ตามลำดับ โดยเป็นปริมาณคงเหลือที่ลดลงจาก B0.1 และ C0.1 ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กขึ้น 10 เท่า โดยอาจสรุปได้ว่าปริมาณเหล็กที่เติมลงไปในระบบฯ ทั้งรูปเฟอร์ริกคลอไรด์และเฟอร์ริกซิเทรต สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ที่กล่าวว่าปริมาณเฟอร์ริกไอออนที่เติมเข้าไปในระบบฯ ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการเติมเหล็กในรูปแบบที่ต่างกันลงในถังปฏิกรณ์ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเติมเฟอร์ริกไอออนและเฟอร์ริกซิเทรต



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอร์ริกซิเทรต

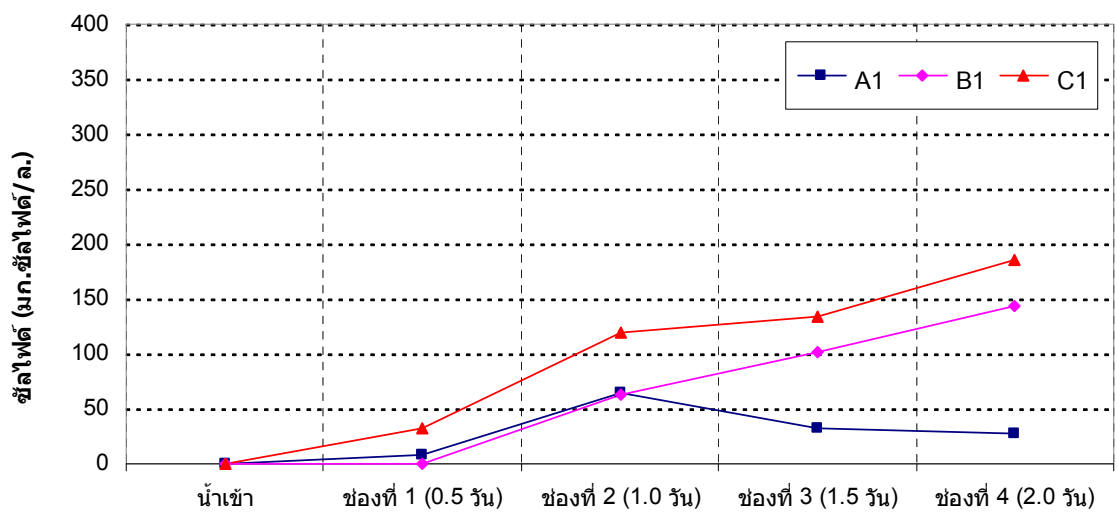
ภาพที่ 4.11 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ในการทดลองช่วงที่ 2 นี้พบว่าซัลเฟตเริ่มถูกกำจัดได้ตั้งตั้งแต่ช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์แต่เป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 25 เท่านั้น (ดังภาพที่ 4.12) โดยประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในชุด B1 และ C1 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69 ในชุดควบคุมเป็นร้อยละ 84 และ 80 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังตรวจพบปริมาณซัลไฟด์สูงสุดในช่องที่ 4 ของทุกถังปฏิกรณ์ (A1 B1 และ C1) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27 143 และ 185 มก.ซัลเฟอร์/ล. ตามลำดับ (ดังภาพที่ 4.13)



(A) ซูดควบคุม (B) ซูดเต็มเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ซูดเต็มเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

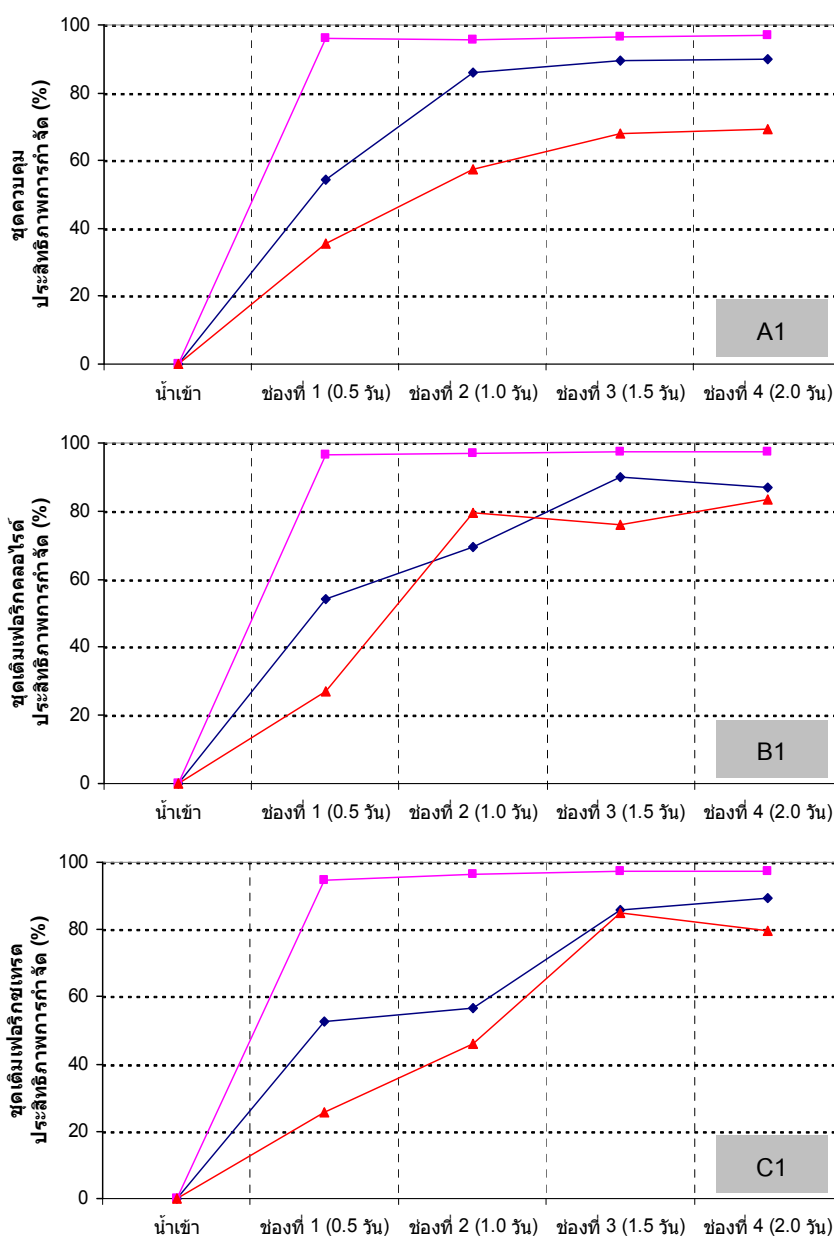


(A) ซูดควบคุม (B) ซูดเต็มเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ซูดเต็มเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

4) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ไนเตรต และซัลเฟต

จากภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์เอปียาร์ในช่วงการทดลองที่ 2 (A1 B1 และ C1) เท่ากับร้อยละ 90 87 และ 89 ตามลำดับ ทั้งยังมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตเท่ากันในทุกๆ 3 ชุดการทดลอง คือร้อยละ 97 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าเท่ากับร้อยละ 69 84 และ 80 ตามลำดับ



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซัลเฟต

ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ตารางที่ 4.6 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ในเทรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์เอบีอาร์ จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

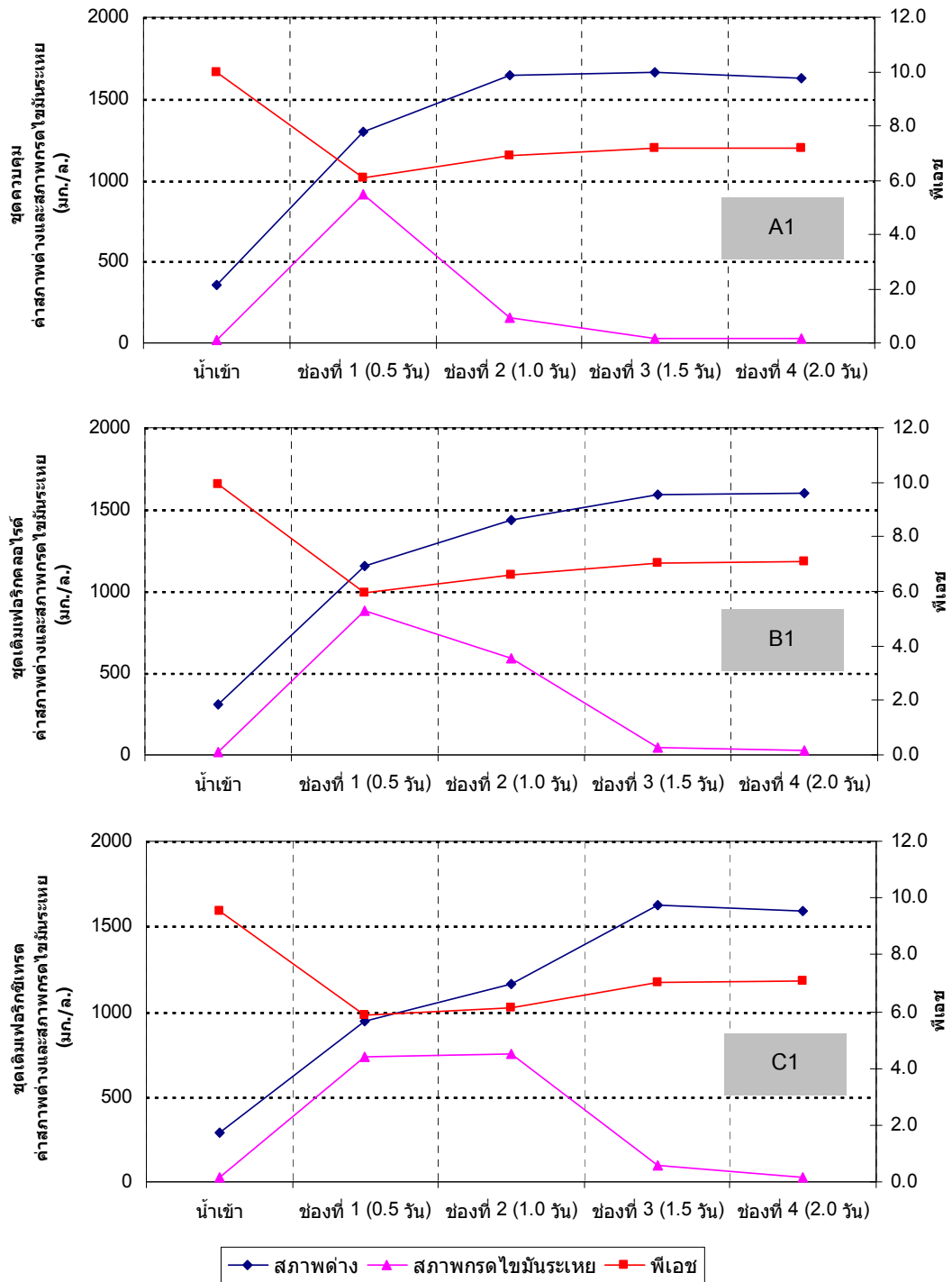
| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|------------------------------------|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (A1) | COD | 0 | 54 | 86 | 89 | 90 |
| | Nitrate | 0 | 96 | 95 | 97 | 97 |
| | Sulfate | 0 | 35 | 58 | 68 | 69 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B1) | COD | 0 | 54 | 70 | 90 | 87 |
| | Nitrate | 0 | 96 | 97 | 97 | 97 |
| | Sulfate | 0 | 27 | 80 | 76 | 84 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C1) | COD | 0 | 53 | 57 | 86 | 89 |
| | Nitrate | 0 | 95 | 96 | 97 | 97 |
| | Sulfate | 0 | 26 | 46 | 85 | 80 |

หมายเหตุ : เป็นผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 244 ถึงวันที่ 254 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล

4.2.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีไอดี ในเทรต และซัลเฟต

1) ค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหย

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.7 พบว่าน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ในชุด B1 และ C1 มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.8-7.1 ซึ่งพีเอชในน้ำเสียเข้าระบบมีค่าอยู่ที่ 9.9 และ 9.5 ตามลำดับ โดยเมื่อน้ำเสียเข้าสู่ช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์จะมีค่าพีเอชลดลง ซึ่งเกิดจากการสร้างกรดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ช่องแรก โดยค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ช่องลำดับถัดไป ส่วนค่าสภาพต่างพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,630 \pm 58$ $1,598 \pm 53$ และ $1,593 \pm 85$ มก.หินปูน/ล. สำหรับถังปฏิกรณ์ A1 B1 และ C1 และยังพบว่า A1 และ B1 มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ คือ เท่ากับ 913 ± 64 และ 885 ± 80 มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ ส่วน C1 มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในช่องที่ 1 และ 2 ของถังปฏิกรณ์ โดยมีค่าใกล้เคียงกัน คือเท่ากับ 733 ± 93 และ 753 ± 86 หินปูน/ล. ตามลำดับ



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเพอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเพอริกซิเทรต

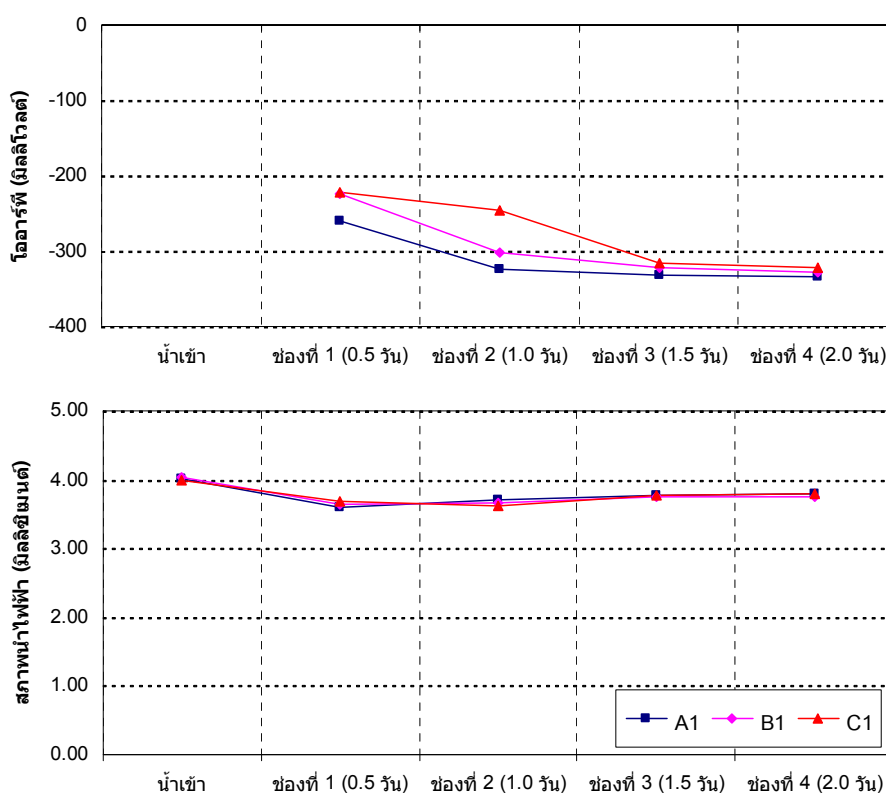
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังเอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

2) โออาร์พี (ORP)

การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีในถังปฏิกรณ์ของทั้ง 3 ชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 โดยค่าโออาร์พีของระบบในแต่ละช่องของถังปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันในทุกละรอบปฏิกรณ์ โดยถังควบคุม (A1) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -261 ถึง -334 มิลลิโวลต์ ถังที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B1) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -224 ถึง -329 มิลลิโวลต์ และถังที่เติมเพอริกซิเทรต (C1) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -223 ถึง -323 มิลลิโวลต์

3) สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 พบว่าทุกละรอบปฏิกรณ์ (A1 B1 และ C1) ค่าสภาพนำไฟฟ้าลดลงจากน้ำเสียขาเข้า ตั้งแต่ในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ และยังพบว่า B1 และ C1 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเกือบคงที่ในช่องที่ 3 และ 4 ของถังปฏิกรณ์ โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าในช่องสุดท้ายของทั้งสองถังเท่ากับ 3.75 และ 3.79 มล.ซีเมนส์/ซม. ตามลำดับ



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเพอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเพอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วน 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|-------------------------------------|--|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A1) | pH | 10.0 | 6.1 | 6.9 | 7.2 | 7.2 |
| | ORP (mV) | N/A | -261 | -325 | -331 | -334 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.02 | 3.59 | 3.71 | 3.77 | 3.79 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 360±16 | 1,295±53 | 1,643±48 | 1,660±80 | 1,630±58 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 15±6 | 913±64 | 153±29 | 27±14 | 28±6 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (B1) | pH | 9.9 | 5.9 | 6.6 | 7.0 | 7.1 |
| | ORP (mV) | N/A | -224 | -302 | -323 | -329 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.05 | 3.63 | 3.65 | 3.74 | 3.75 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 313±28 | 1,158±172 | 1,440±74 | 1,593±70 | 1,598±53 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 15±6 | 885±80 | 595±133 | 45±7 | 25 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (C1) | pH | 9.5 | 5.8 | 6.1 | 7.0 | 7.1 |
| | ORP (mV) | N/A | -223 | -246 | -317 | -323 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.00 | 3.68 | 3.62 | 3.76 | 3.79 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 285±14 | 945±169 | 1163±51 | 1625±76 | 1593±85 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 23±10 | 733±93 | 753±86 | 100±20 | 30±7 |

หมายเหตุ: เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 244 ถึงวันที่ 254 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล, N/A = Not Analysis

4.3 ช่วงการทดลองที่ 3 : ผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดี 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในเทรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

การเดินระบบการทดลองในช่วงการทดลองที่ 3 นี้เป็นการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองในช่วงที่ 2 โดยทำการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีโอดีให้สูงขึ้นอีก 10 เท่าจากช่วงการทดลองที่ 2 คือมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเทรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ โดยสัดส่วนเหล็กที่เติมลงในระบบเป็นปริมาณที่คาดว่าจะมากเกินไปสำหรับให้แบคทีเรียนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยการทดลองในช่วงนี้ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบฯ 51 วัน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างครบถ้วนหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ได้ผลดังตารางที่ 4.8

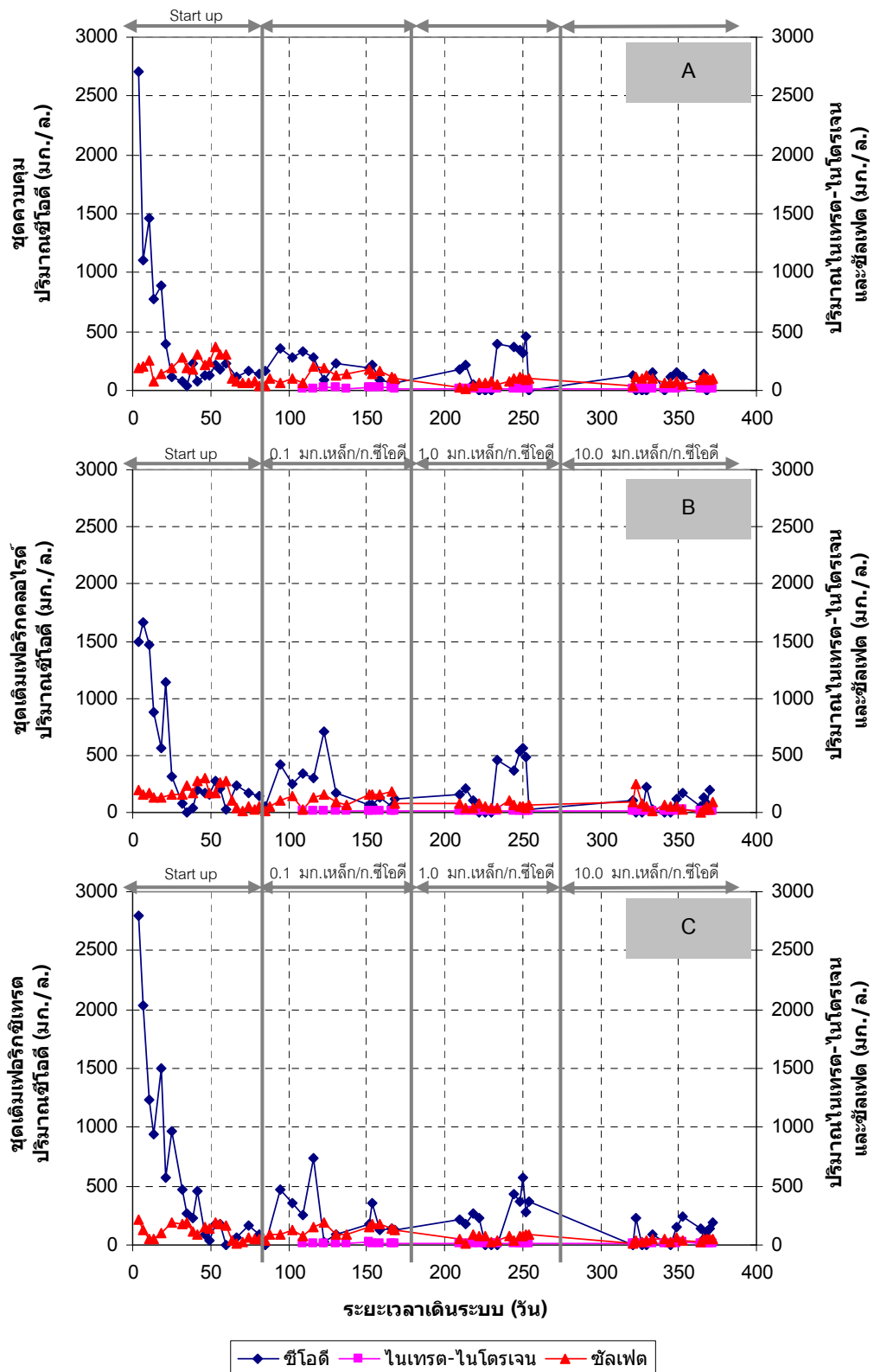
โดยเมื่อรวมระยะเวลาทั้งหมดในการเดินระบบของงานวิจัยนี้ ตั้งแต่การเริ่มต้นระบบผ่านการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 จนเข้าสู่ช่วงการทดลองที่ 3 นี้รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 372 วัน โดยผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการทดลองจากช่องที่ 4 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแทนของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ในทั้ง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม (A) ชุดที่เติมเฟอริกคลอไรด์ (B) และชุดที่เติมเฟอริกซิเทรต (C) ได้ผลดังภาพที่ 4.17 โดยชุดถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมเหล็กในปริมาณสูงทั้งสองถัง (B10 และ C10) ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ดีอยู่เมื่อเทียบกับในช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ผ่านมา สำหรับการกำจัดไนเทรตก็ยังคงมีประสิทธิภาพดีเท่ากันในทั้ง 3 ชุดการทดลอง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของชุด B10 และ C10 มีผลที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (A10) โดยน่าจะเกิดจากการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กจากในช่วงการทดลองที่ 1 ขึ้นอีก 100 เท่า แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่เติมเหล็กในรูปแบบเดียวกันแต่สัดส่วนแตกต่างกัน (B1 กับ B10 และ C1 กับ C10) ควบคู่กันไปก็จะพบว่า ทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า สัดส่วนการเติมเหล็ก 1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ที่เติมลงไปตั้งแต่ในช่วงการทดลองที่ 2 นั้น เป็นค่าปริมาณเหล็กที่เพียงพอแล้วต่อการกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ ควบคุม (A10) | COD (mg/l) | 3,512±122 | 1,429±61 | 621±121 | 132±56 | 77±53 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 300±3 | 18±3 | 18±2 | 15±1 | 13±3 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.16 | 0.09 | 0.02 | ND | ND |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 17±9 | 22±8 | 29±10 | 27±5 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 300 | 35 | 40 | 44 | 40 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 324±19 | 235±23 | 104±16 | 91±15 | 99±8 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 25±3 | 36±2 | 32±3 | 27±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 104 | 101 | 69 | 61 | 59 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.00 | 0.23 | 0.30 | 0.31 | 0.22 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.18 | 0.23 | 0.17 | 0.21 | 0.16 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B10) | COD (mg/l) | 3,423±141 | 1,391±163 | 143±49 | 148±98 | 126±57 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 299±8 | 16±1 | 18±2 | 16±3 | 14±2 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.18 | ND | 0.08 | 0.15 | 0.11 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | 83±38 | 118±14 | 115±28 | 122±24 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 299 | 99 | 136 | 131 | 136 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 322±17 | 9±12 | 8±14 | 27±20 | 40±32 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 31±9 | 37±4 | 34±4 | 28±2 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 103 | 34 | 40 | 43 | 41 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.20 | 0.51 | 0.35 | 0.15 | 0.19 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.09 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.47 | 0.49 | 0.22 | 0.17 | 0.28 |
| ถังปฏิกรณ์ เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C10) | COD (mg/l) | 3,567±179 | 1,583±187 | 857±90 | 209±213 | 126±50 |
| | Nitrate (mg NO ₃ -N/l) | 327±23 | 16±1 | 13±1 | 14±2 | 13±2 |
| | Nitrite (mg NO ₂ -N/l) | 0.10 | 7.11 | 0.13 | 0.02 | 0.11 |
| | Ammonia (mg NH ₄ ⁺ -N/l) | ND | ND | 47±20 | 65±16 | 62±8 |
| | Total Nitrogen (mg-N/l) | 327 | 23 | 60 | 79 | 75 |
| | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 294±24 | 125±5 | 8±6 | 26±10 | 43±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 18±2 | 25±2 | 22±3 | 21±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 94 | 58 | 28 | 30 | 35 |
| | Iron(II) (mg/l) | 5.41 | 1.01 | 0.63 | 0.30 | 0.21 |
| | Iron(III) (mg/l) | 14.24 | 3.02 | 0.36 | 0.16 | 0.15 |
| | Total Iron (mg/l) | 19.65 | 4.03 | 0.99 | 0.46 | 0.35 |

หมายเหตุ : เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์วันที่ 321 ถึงวันที่ 372 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล

ND. = Not Detectable



(A) ชูดควบคุม (B) ชูดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชูดเติมเฟอริกซัลเฟต

ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในน้ำทิ้งของถังเอป้าอาร์ 3 ชุดการทดลอง ตลอดช่วงระยะเวลาการวิจัยตั้งแต่การทดลองครั้งที่ 1-3

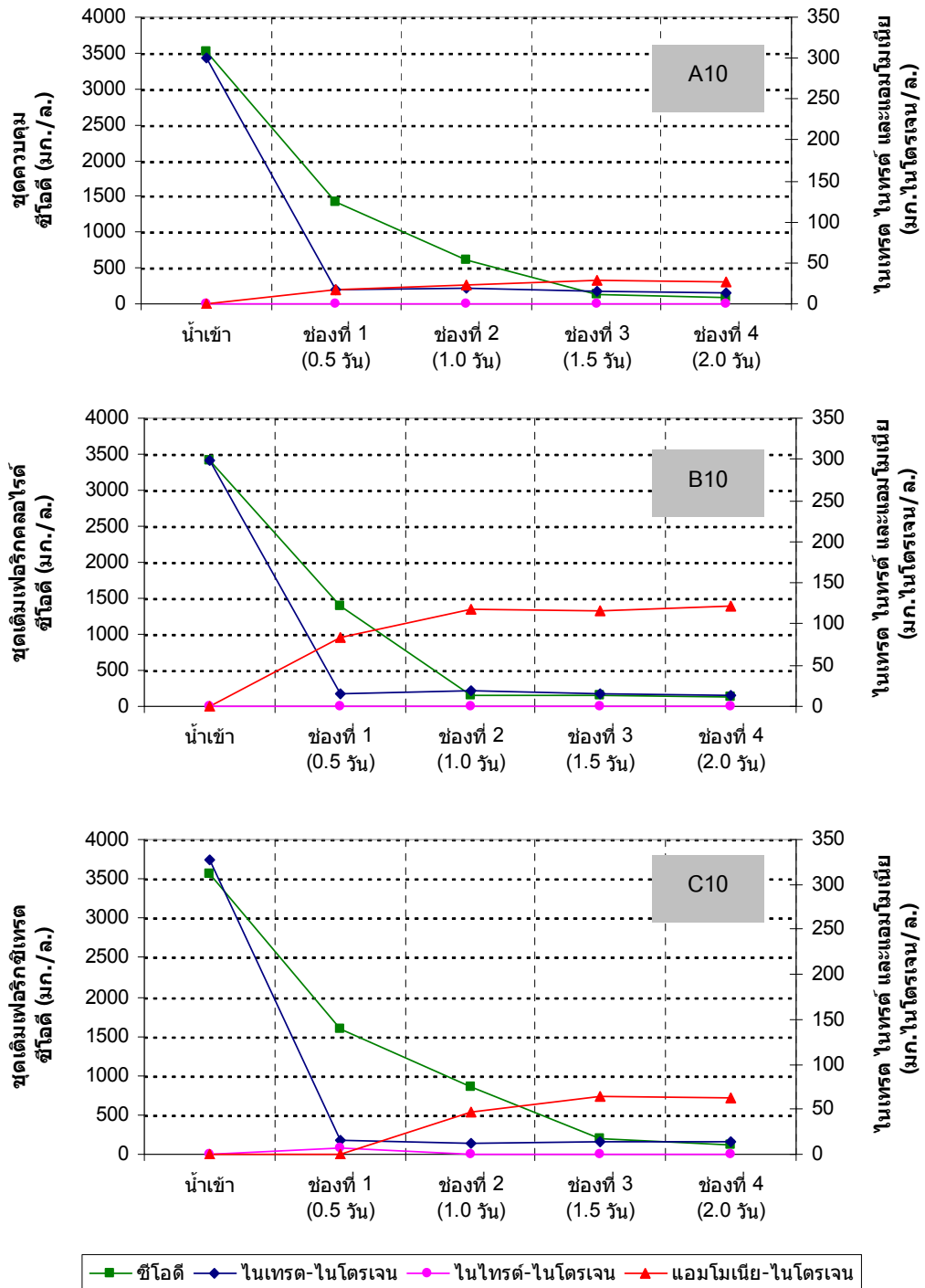
4.3.1 ผลต่อการกำจัดซีไอดี ในเทรต ซัลเฟต และการเกิดแอมโมเนีย

1) การเปลี่ยนแปลงซีไอดี

จากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีในการทดลองช่วงที่ 3 นี้พบว่าปริมาณซีไอดีจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์เหมือนกับในช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 เช่นกัน ซึ่งในถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมเหล็ก (B10 และ C10) ปริมาณซีไอดีจะลดลงจากน้ำเสียเข้าระบบมากกว่าร้อยละ 50 และมีปริมาณซีไอดีคงเหลือในช่วงสุดท้ายของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 126 ± 57 และ 126 ± 50 มก./ล. ตามลำดับ

2) การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจน ไนไตรต์ และแอมโมเนีย

ภายใต้สภาวะการเติมเหล็กต่อซีไอดี 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดีพบว่า ชุดการทดลองที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B10) และเพอริกซิเทรต (C10) มีปริมาณไนโตรเจนลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ และยังคงลดลงอีกเล็กน้อยในช่วงที่ 2 และ 3 ซึ่งมีผลเช่นเดียวกับในช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 โดยภายหลังเมื่อสิ้นสุดกระบวนการบำบัดแล้วพบว่า B10 และ C10 จะมีปริมาณไนโตรเจนสะสมคงเหลือในระบบฯ เท่ากับ 14 ± 2 และ 13 ± 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบการสะสมตัวของไนไตรต์ใน C10 เท่ากับ 7 มก.ไนโตรเจน/ล. แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณแอมโมเนียในระบบการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่เติมเพอริกคลอไรด์หรือชุด B10 มีปริมาณแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงแรกของถังปฏิกรณ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 83 ± 38 มก.ไนโตรเจน/ล. และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการบำบัดแล้วปริมาณแอมโมเนียในช่วงสุดท้ายของถังปฏิกรณ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเท่ากับ 122 ± 24 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากชุด B1 ส่วนในชุดการทดลองที่เติมเพอริกซิเทรตจะพบปริมาณแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นในถัง C10 ตั้งแต่ช่วงที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 47 ± 20 มก.ไนโตรเจน/ล. และเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการทั้งหมดแล้วจะพบปริมาณแอมโมเนียในช่วงสุดท้ายของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 62 ± 8 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นปริมาณที่ลดลงจาก C1 จึงอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า การเติมและเพิ่มสัดส่วนเพอริกคลอไรด์ลงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จะส่งผลให้เกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมเพอริกซิเทรตก็ส่งผลให้เกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเพอริกซิเทรตสูงขึ้นไปเป็น 10 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี กลับส่งผลให้กระบวนการดีเอ็นอาร์เอเกิดได้ลดลง

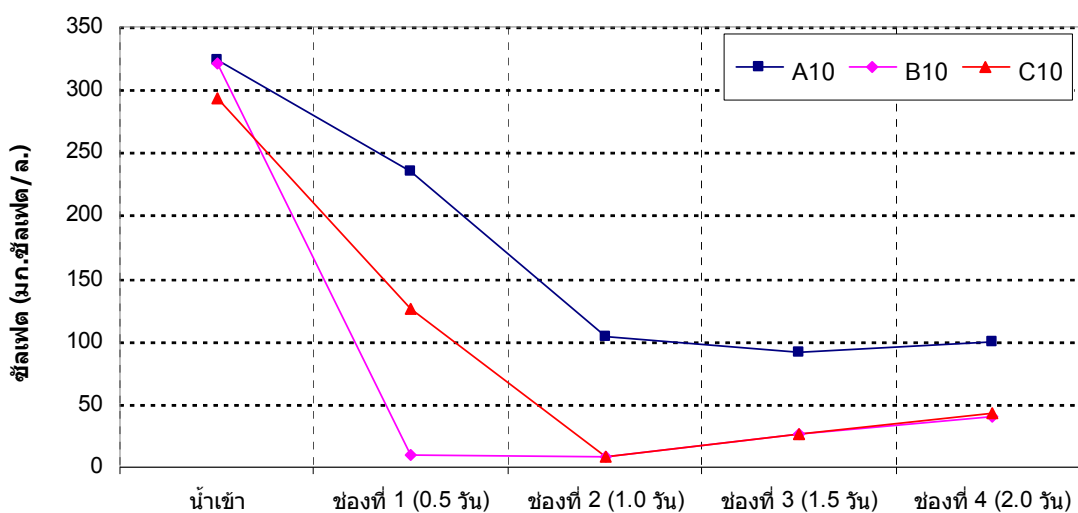


(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเพอริกคอลลอยด์ และ (C) ชุดเติมเพอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นชิโอดี ไนเทรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียของถังเอปี้อาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ชิโอดี)

3) การเปลี่ยนแปลงซัลเฟตและซัลไฟด์

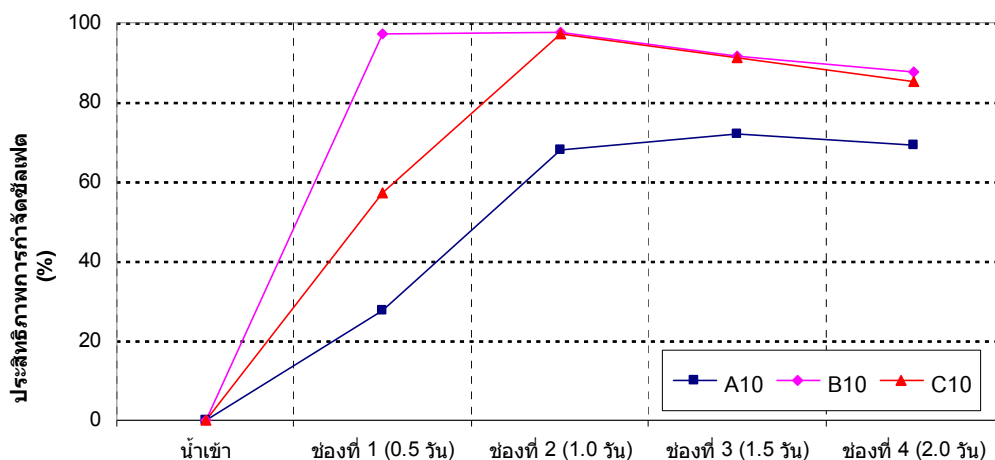
ภาพที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ พบว่า B10 และ C10 มีปริมาณซัลเฟตคงเหลือในระบบเท่ากับ 40 ± 32 และ 43 ± 11 มก.ซัลเฟต/ล. ตามลำดับ โดยเป็นปริมาณคงเหลือที่ลดลงจาก B0.1 และ C0.1 ซึ่งน่าจะเกิดจากการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กสูงขึ้นอีก 10 เท่า และจากการวิเคราะห์ผลในชุด B10 มีปริมาณซัลเฟตที่ลดลงมากตั้งแต่ช่องแรกของถังปฏิกรณ์ ส่วนชุด C10 จะลดลงมากในช่องที่ 2 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น 1 ช่องจากชุด B1 และ C1 หรือเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กสูงขึ้น 10 เท่า



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

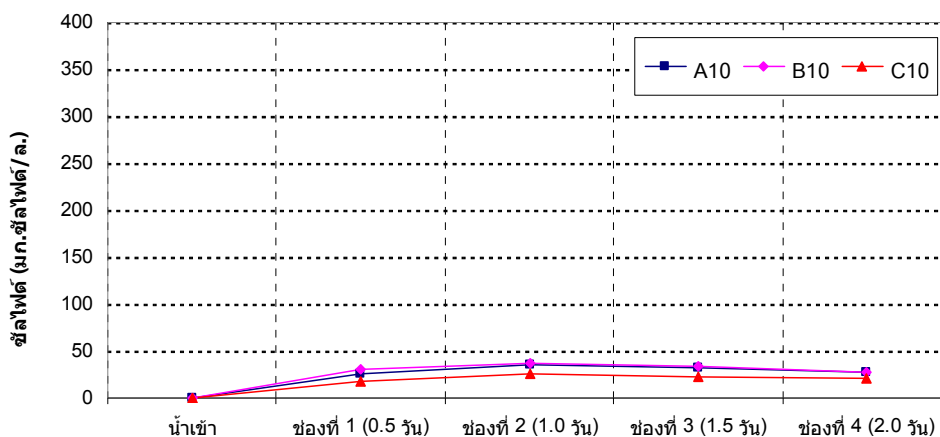
ภาพที่ 4.19 ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลองในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

โดยในการทดลองช่วงที่ 3 นี้พบว่าซัลเฟตเริ่มถูกกำจัดได้ในช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์เช่นเดียวกับช่วงการทดลองที่ 1 และ 2 แต่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ในชุด B10 และ C10 มีค่าร้อยละ 97 และ 57 ตามลำดับ (ดังภาพที่ 4.20) ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากช่วงการทดลองที่ 2



ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของ B1 กับ B10 และ C1 กับ C10 ก็พบว่า มีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดีเกินร้อยละ 80 ด้วยกันทั้ง 2 ช่วงการทดลอง และเป็นค่าที่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเติมและเพิ่มสัดส่วนเหล็กลงไปในระบบ ทั้งรูปเฟอร์ริคคลอไรด์และเฟอร์ริกซิเทรต สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการชะฟอสเฟตที่ติดชั้นให้ดีขึ้นได้ โดยผลจากการเกิดกระบวนการชะฟอสเฟตที่ติดชั้นจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นซิลไฟต์ ดังภาพที่ 4.21 แต่จากการวิเคราะห์ปริมาณซิลไฟต์ในชุดถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมเหล็กทั้งสองรูปฟอร์ม (B10 และ C10) ผลการวิเคราะห์ที่ได้กลับขัดแย้งกับทฤษฎีของการเกิดกระบวนการชะฟอสเฟตที่ติดชั้นที่ว่า หากกระบวนการชะฟอสเฟตที่ติดชั้นเกิดขึ้นได้ดีผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ ซิลไฟต์ก็น่าจะส่งผลให้มีปริมาณซิลไฟต์ในระบบเพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.21 พบปริมาณซิลไฟต์ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเฉลี่ยเพียงเท่ากับ 28 ± 2 และ 21 ± 3 มก.ซิลเฟอร/ล.ตามลำดับ โดยผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปฟอร์มของการเติมเหล็กต่อการเกิดซิลไฟต์ในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ของชุดการทดลองต่างๆ จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.4.4



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.21 ความเข้มข้นซัลไฟต์ในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

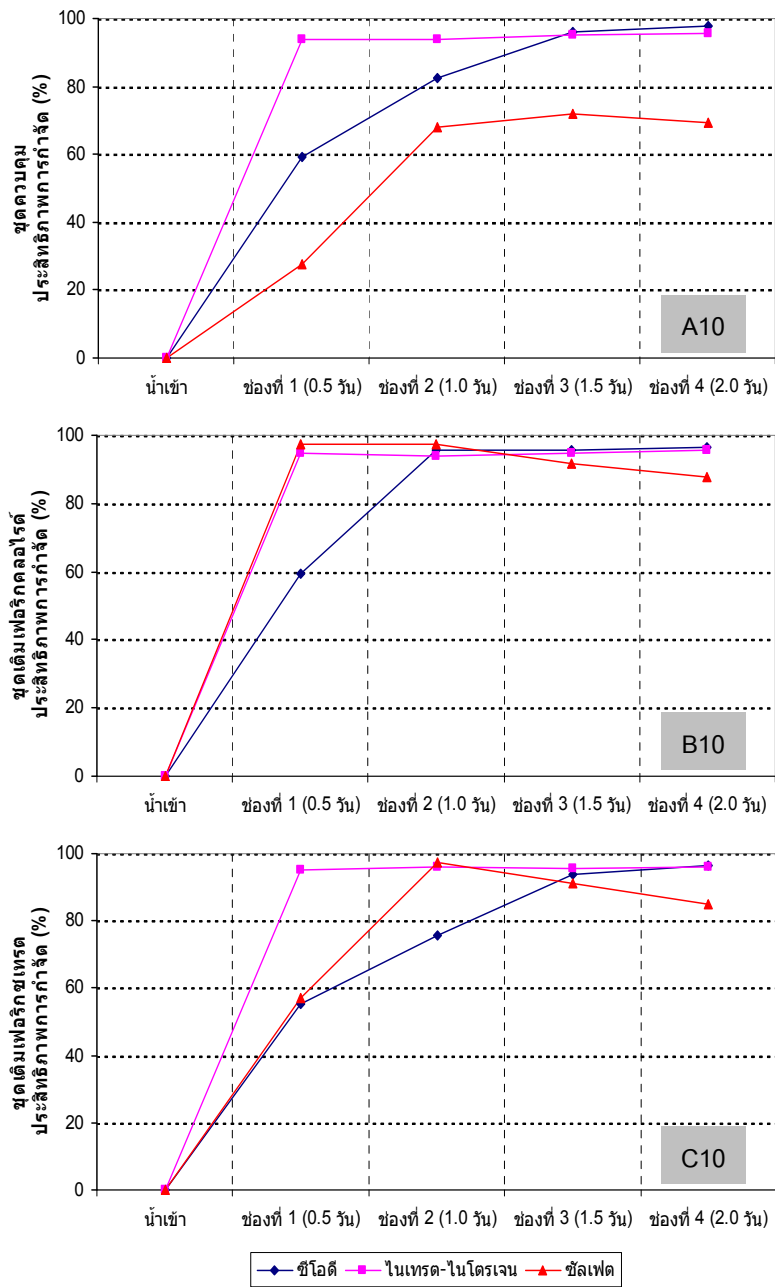
4) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟต

จากภาพที่ 4.22 และตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองควบคุม (A10) ชุดที่เติมเฟอริกคลอไรด์ (B10) และชุดที่เติมเฟอริกซิเทรต (C10) มีค่าเท่ากับร้อยละ 98 96 และ 97 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตเท่ากับร้อยละ 96 95 และ 96 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าเท่ากับร้อยละ 69 88 และ 85 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ จาก 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|-----------------------------------|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (A10) | COD | 0 | 59 | 82 | 96 | 98 |
| | Nitrate | 0 | 94 | 94 | 95 | 96 |
| | Sulfate | 0 | 27 | 68 | 72 | 69 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (B10) | COD | 0 | 59 | 96 | 96 | 96 |
| | Nitrate | 0 | 95 | 94 | 95 | 95 |
| | Sulfate | 0 | 97 | 98 | 92 | 88 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (C10) | COD | 0 | 55 | 70 | 98 | 97 |
| | Nitrate | 0 | 95 | 96 | 96 | 96 |
| | Sulfate | 0 | 57 | 97 | 91 | 85 |

หมายเหตุ : เป็นผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 321 ถึงวันที่ 372 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ไนเทรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

4.3.2 ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกำจัดซีโอติ ในเทรต และซัลเฟต

1) ค่าพีเอช สภาพต่าง และกรดไขมันระเหย

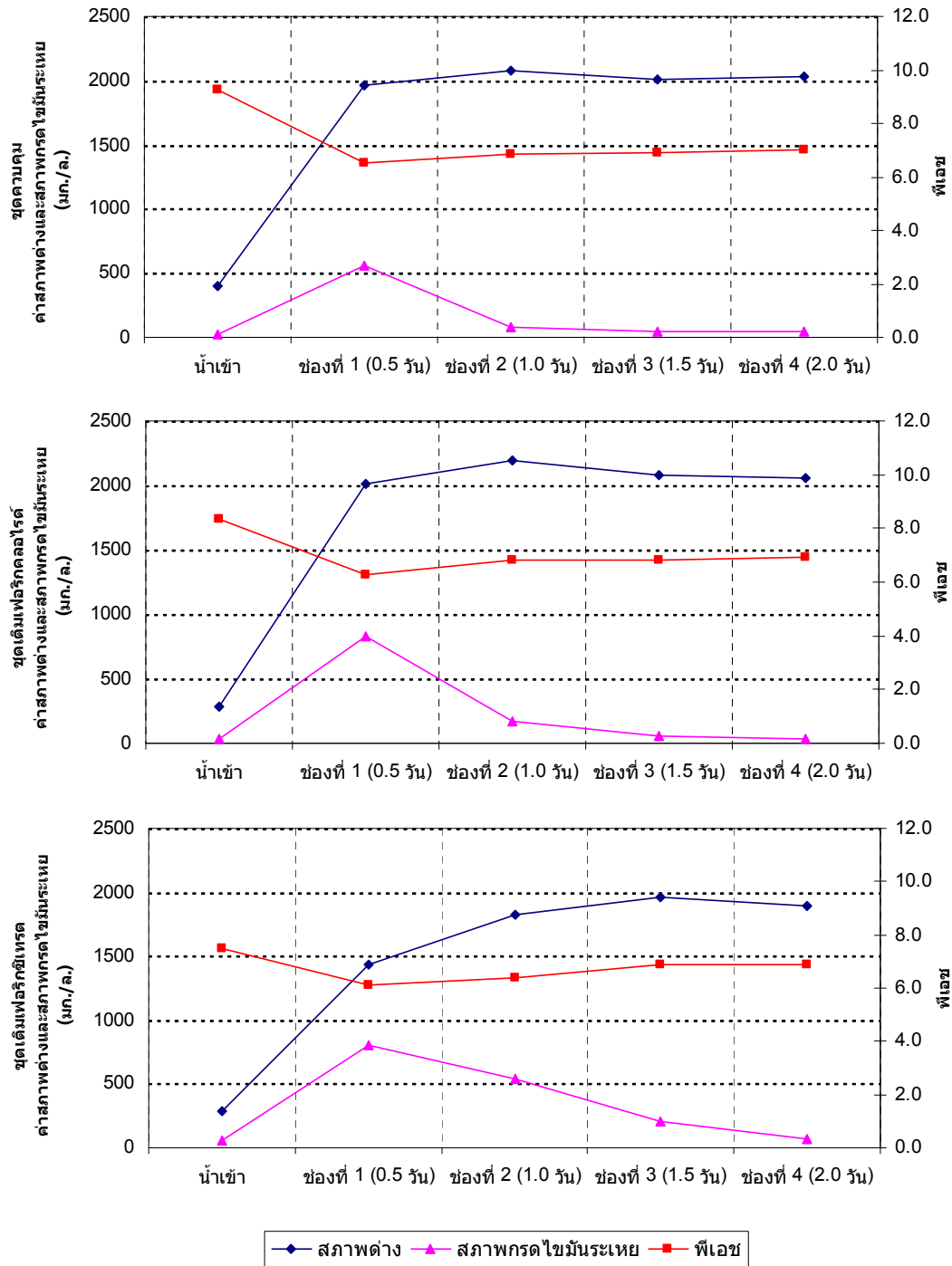
จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.23 และตารางที่ 4.10 พบว่าน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ชุด B10 และ C10 มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.1-6.9 ซึ่งพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเข้าระบบทั้งสองมีค่าเท่ากับ 8.3 และ 7.5 ตามลำดับ โดยเมื่อผ่านเข้าสู่ช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์น้ำเสียจะมีค่าพีเอชลดลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการสร้างกรดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ช่องแรก จากนั้นค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ช่องลำดับถัดไป ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าสภาพต่างของถัง A10 B10 และ C10 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2,030 \pm 76$ $2,053 \pm 133$ และ $1,898 \pm 43$ มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ และยังพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดในช่องแรกของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 563 ± 93 825 ± 56 และ 808 ± 64 มก.หินปูน/ล. ตามลำดับ

2) โออาร์พี (ORP)

การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีในถังปฏิกรณ์ของทั้ง 3 ชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.10 ผลการทดลองพบว่าค่าโออาร์พีของระบบในแต่ละช่องของถังปฏิกรณ์เป็นค่าที่แสดงถึงสภาวะไร้อากาศภายในถัง โดย A10 มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -259 ถึง -277 มิลลิโวลต์ B10 มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -251 ถึง -278 มิลลิโวลต์ และ C10 มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -182 ถึง -276 มิลลิโวลต์

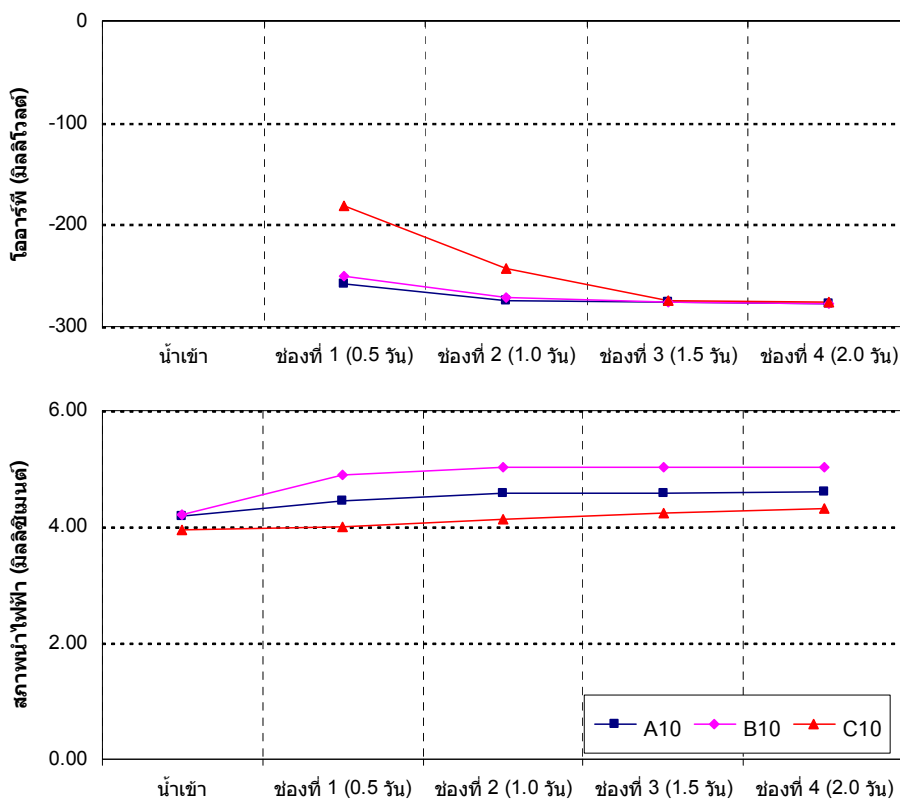
3) สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.10 พบว่าถังปฏิกรณ์ชุด B10 และ C10 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากน้ำเสียขาเข้าในช่องแรกของถังปฏิกรณ์ และยังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเกือบคงที่ในช่องที่ 3 และ 4 ของถังปฏิกรณ์ โดยในช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์มีค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.04 และ 4.31 มล.ซีเมนต์/ชม. ตามลำดับ



(A) ชูดควบคุม (B) ชูดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชูดเติมเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่าฟิโอส สภาพต่าง และกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีและค่าสภาพนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี)

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ไออาร์พี กรดไขมันระเหย สภาพต่าง และสภาพนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เอปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง ในช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วน 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
|--------------------------------------|--|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A10) | pH | 9.3 | 6.5 | 6.8 | 6.9 | 7.0 |
| | ORP (mV) | N/A | -259 | -275 | -276 | -277 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.18 | 4.46 | 4.58 | 4.57 | 4.60 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 395±19 | 1,963±58 | 2,080±21 | 2,013±50 | 2,030±76 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 28±6 | 563±93 | 75±18 | 45±11 | 43±14 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (B10) | pH | 8.3 | 6.3 | 6.8 | 6.8 | 6.9 |
| | ORP (mV) | N/A | -251 | -272 | -276 | -278 |
| | Conductivity (mS/cm) | 4.20 | 4.89 | 5.02 | 5.04 | 5.04 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 288±15 | 2,010±52 | 2,193±178 | 2,075±41 | 2,053±133 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 30±14 | 825±56 | 173±107 | 63±32 | 35±10 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (C10) | pH | 7.5 | 6.1 | 6.4 | 6.9 | 6.9 |
| | ORP (mV) | N/A | -182 | -242 | -275 | -276 |
| | Conductivity (mS/cm) | 3.95 | 4.00 | 4.14 | 4.25 | 4.31 |
| | Alkalinity (mg/l @ CaCO ₃) | 285±14 | 1,438±54 | 1,825±74 | 1,965±186 | 1,898±43 |
| | VFA (mg/l @ CH ₃ COOH) | 53±6 | 808±64 | 540±31 | 205±108 | 65±30 |

หมายเหตุ : เป็นค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากผลการวิเคราะห์ตั้งแต่วันที่ 321 ถึงวันที่ 372 ของการเดินระบบฯ รวม 5 ข้อมูล, N/A = Not Analysis

4.4 ผลของการเติมเหล็กต่อประสิทธิภาพของระบบเอปียาร์

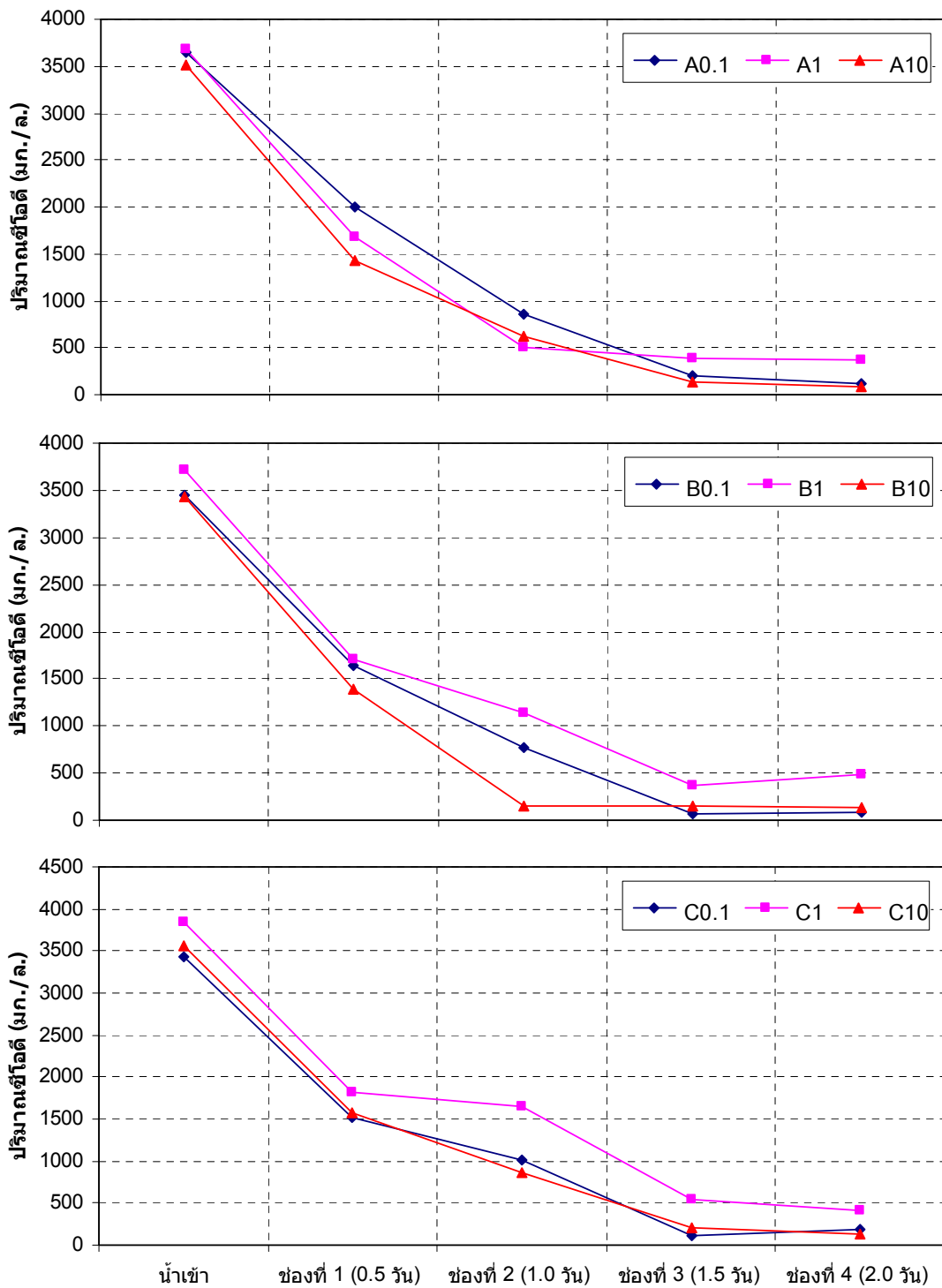
4.4.1 ผลต่อการกำจัดซีโอดี

ผลจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีพบว่าตลอดระยะเวลาการทดลองถึงปฏิกรณ์เอปียาร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ มีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 85-95 และยังสามารถกำจัดซีโอดีได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ในทุกๆ สภาวะ ดังภาพที่ 4.26 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Manariotis และ Grigoropoulos (2002) ที่ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีในอยู่ในช่วง 300-400 มก./ล. ด้วยถังปฏิกรณ์เอปียาร์แบบ 3 ช่องย่อย ผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 24 ชม. ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 โดยในช่วงที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุดในแต่ละถังปฏิกรณ์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีที่คงเหลือในน้ำทิ้งจากระบบฯ ของชุดการทดลองที่มีการเติมเหล็กจากช่วงการทดลองที่ 1 พบว่าจะมีปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วและมากกว่าในช่วงการทดลองที่ 2 และ 3 โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปฟอร์มของเหล็กที่แตกต่างกันที่เติมลงในถังปฏิกรณ์ จะพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งพิจารณาได้จากค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.25

ตารางที่ 4.11 ปริมาณซีโอดีในทุกสภาวะการทดลองเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปียาร์

| ชุดถังปฏิกรณ์ และสัดส่วนการเติมเหล็ก (มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) | ปริมาณซีโอดี (มก./ล.) | | | | |
|--|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
| A0.1 | 3,655±336 | 2,004±287 | 860±348 | 199±73 | 120±74 |
| A1 | 3,688±134 | 1,685±244 | 512±116 | 393±187 | 376±55 |
| A10 | 3,512±122 | 1,429±61 | 621±121 | 132±56 | 77±53 |
| B0.1 | 3,451±139 | 1,641±161 | 770±141 | 75±58 | 86±35 |
| B1 | 3,722±207 | 1,702±185 | 1,133±101 | 376±89 | 484±78 |
| B10 | 3,423±141 | 1,391±163 | 143±49 | 148±98 | 126±57 |
| C0.1 | 3,439±215 | 1,527±91 | 1,020±135 | 112±30 | 187±96 |
| C1 | 3,836±105 | 1,816±126 | 1,656±216 | 541±85 | 404±105 |
| C10 | 3,567±179 | 1,583±187 | 857±90 | 209±213 | 126±50 |

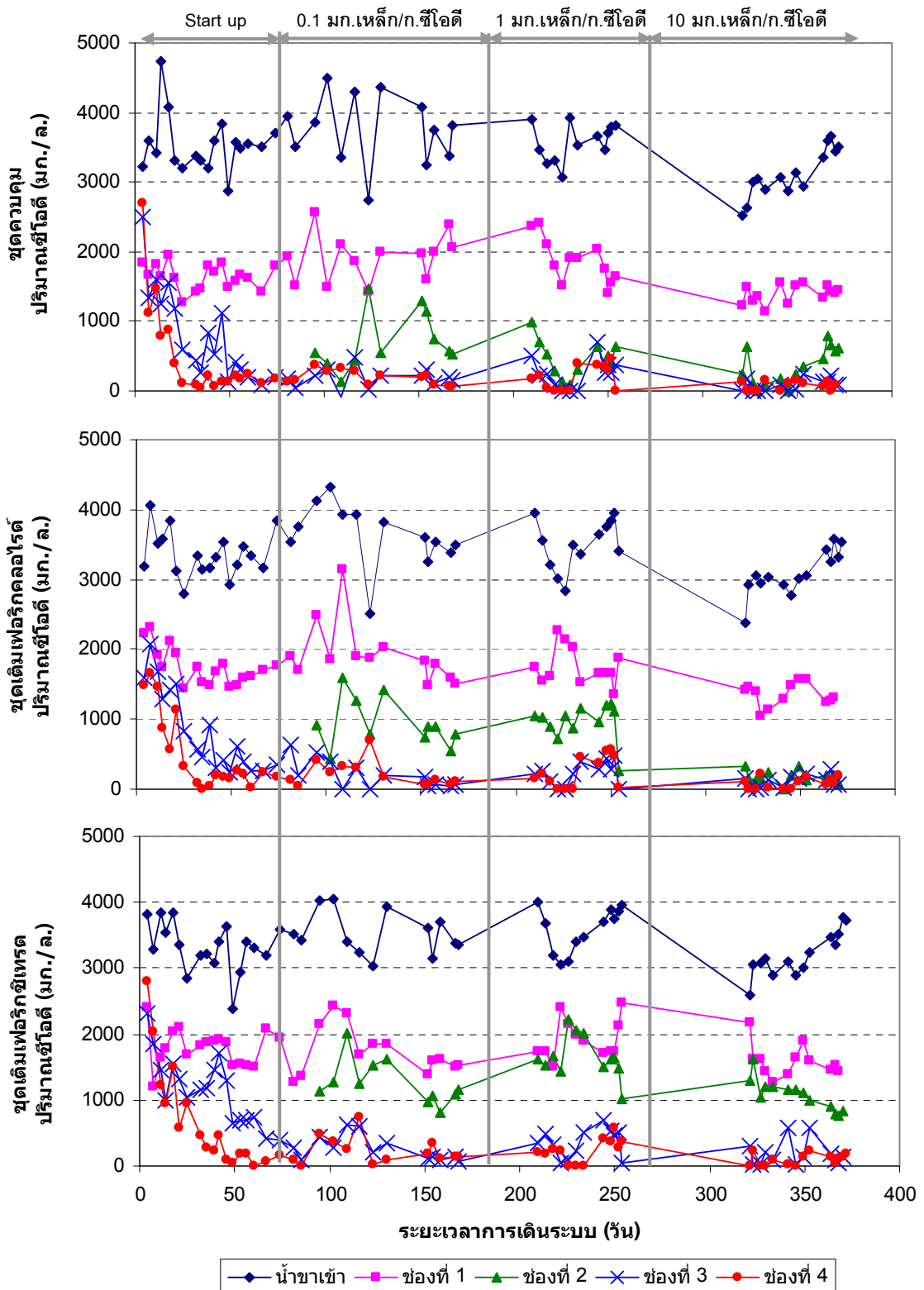
หมายเหตุ : A = ชุดควบคุม, B = ชุดเติมเฟอร์ริกคลอไรด์, C = ชุดเติมเฟอร์ริกซิเทรต



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเต็มเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเต็มเฟอริกซีเทรต

ภาพที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีไอต์เมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.26 ปริมาณความเข้มข้นซีโอดี ในน้ำขาเข้าและในแต่ละช่องย่อยของถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ตลอดช่วงระยะเวลาการวิจัยตั้งแต่การทดลองครั้งที่ 1-3

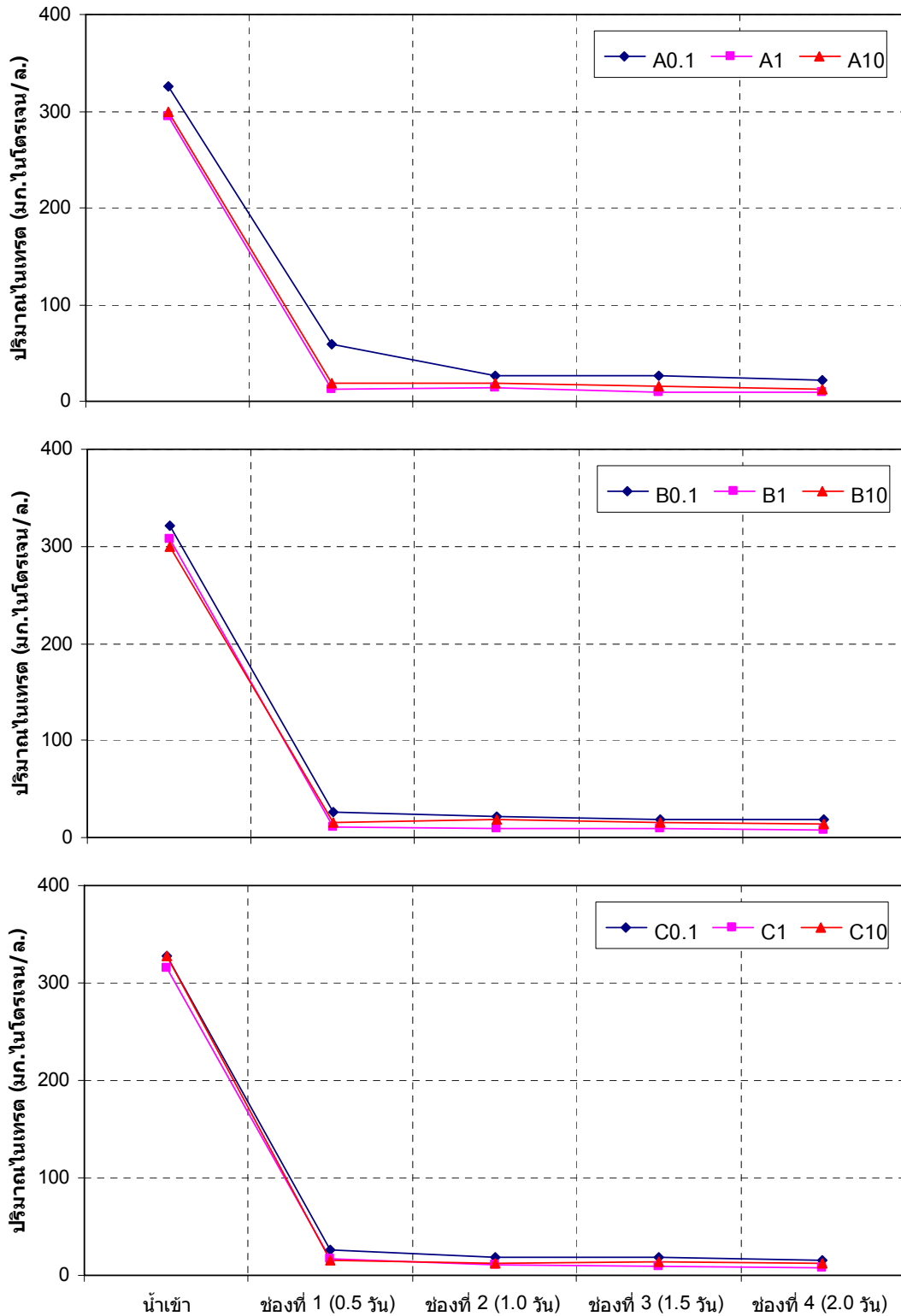
4.4.2 ผลต่อการกำจัดไนเตรต และการเกิดแอมโมเนีย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตและประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตตลอดระยะเวลาการทดลองพบว่า ไนเตรตถูกกำจัดได้ดีในถังปฏิกรณ์เอปียอร์ นั่นคือ มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตอยู่ในช่วงร้อยละ 94-97 โดยที่ไนเตรตจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barber (2000) ที่ศึกษาการกำจัดไนเตรตเข้มข้นสูงด้วยถังปฏิกรณ์ชนิดเอปียอร์แล้วพบว่าไนเตรตจะถูกกำจัดได้มากที่สุดในช่วงที่ 1 และ 2 ของถังปฏิกรณ์ จึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณซีโอไลท์ที่เติมเข้าไปในระบบเอปียอร์ของการทดลองนี้ เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการกำจัดทั้งไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันน่าจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกรณ์จากทุกชุดการทดลอง ดังแสดงด้วยข้อมูลผลการทดลองในตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.27

ตารางที่ 4.12 ปริมาณไนเตรตในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปียอร์

| ชุดถังปฏิกรณ์ และสัดส่วนการเติมเหล็ก (มก.เหล็ก/ก.ซีโอไลท์) | ปริมาณไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
| A0.1 | 326±37 | 59±27 | 27±4 | 26±4 | 21±4 |
| A1 | 295±14 | 12±1 | 14±1 | 10±3 | 9±1 |
| A10 | 300±3 | 18±3 | 18±2 | 15±1 | 13±3 |
| B0.1 | 321±39 | 27±7 | 22±3 | 19±2 | 18±2 |
| B1 | 307±12 | 11±3 | 9±2 | 9±1 | 8±1 |
| B10 | 299±8 | 16±1 | 18±2 | 16±3 | 14±2 |
| C0.1 | 328±35 | 26±6 | 18±3 | 18±3 | 16±4 |
| C1 | 315±15 | 17±7 | 11±5 | 9±1 | 8±1 |
| C10 | 327±23 | 16±1 | 13±1 | 14±2 | 13±2 |

หมายเหตุ : A = ชุดควบคุม, B = ชุดเติมเพอริกคลอไรด์, C = ชุดเติมเพอริกซิเทรต



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริกซิเทรต

ภาพที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรดเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง

แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ เอปปีอาร์จากทุกชุดการทดลอง ผลการทดลองดังตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.28 ทำให้สามารถ จำแนกลักษณะการเกิดแอมโมเนียของแต่ละชุดถังปฏิกรณ์จาก 3 ช่วงการทดลองได้ดังนี้

ช่วงการทดลองที่ 1 (สัดส่วนเหล็ก 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

พบการเกิดแอมโมเนียตั้งแต่ช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ในชุด A0.1 และมีปริมาณ แอมโมเนียในช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ประมาณ 30 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนในชุด B0.1 และ C0.1 มีปริมาณแอมโมเนียสูงสุดในช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 10 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมเหล็กจะสามารถสนับสนุนให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ดีกว่า กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) ซึ่งศึกษาผลของ ปริมาณเฟอร์ริกไอออนที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงในถัง ปฏิกรณ์เอปปีอาร์ ผลการทดลองพบว่าที่สภาวะการเติมเฟอร์ริกไอออนต่ำจะก่อให้เกิดกระบวนการ สร้างแอมโมเนียหรือดีเอ็นอาร์เอมากกว่าภายใต้สภาวะการเติมเฟอร์ริกไอออนสูง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็น ผลจากการยับยั้งกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเนื่องจากการขาดธาตุเหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ สำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

ช่วงการทดลองที่ 2 (สัดส่วนเหล็ก 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กให้สูงขึ้น 10 เท่าจะพบการเกิดแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ในถังปฏิกรณ์ชุด B1 และ C1 จนมีค่าเท่ากับ 35 และ 106 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยเป็น ปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองช่วงที่ 1 มาก ซึ่งขัดแย้งกับข้อมูลที่ว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติม เหล็กลงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์จะทำให้เกิดการสนับสนุนกระบวนการดีไนทริฟิเคชันมากกว่า กระบวนการดีเอ็นอาร์เอ นอกจากนี้ในทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้ยังตรวจพบไนไตรต์ในช่องที่ 1 ของถัง ปฏิกรณ์ในปริมาณไม่เกิน 5 มก.ไนโตรเจน/ล.

ช่วงการทดลองที่ 3 (สัดส่วนเหล็ก 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี)

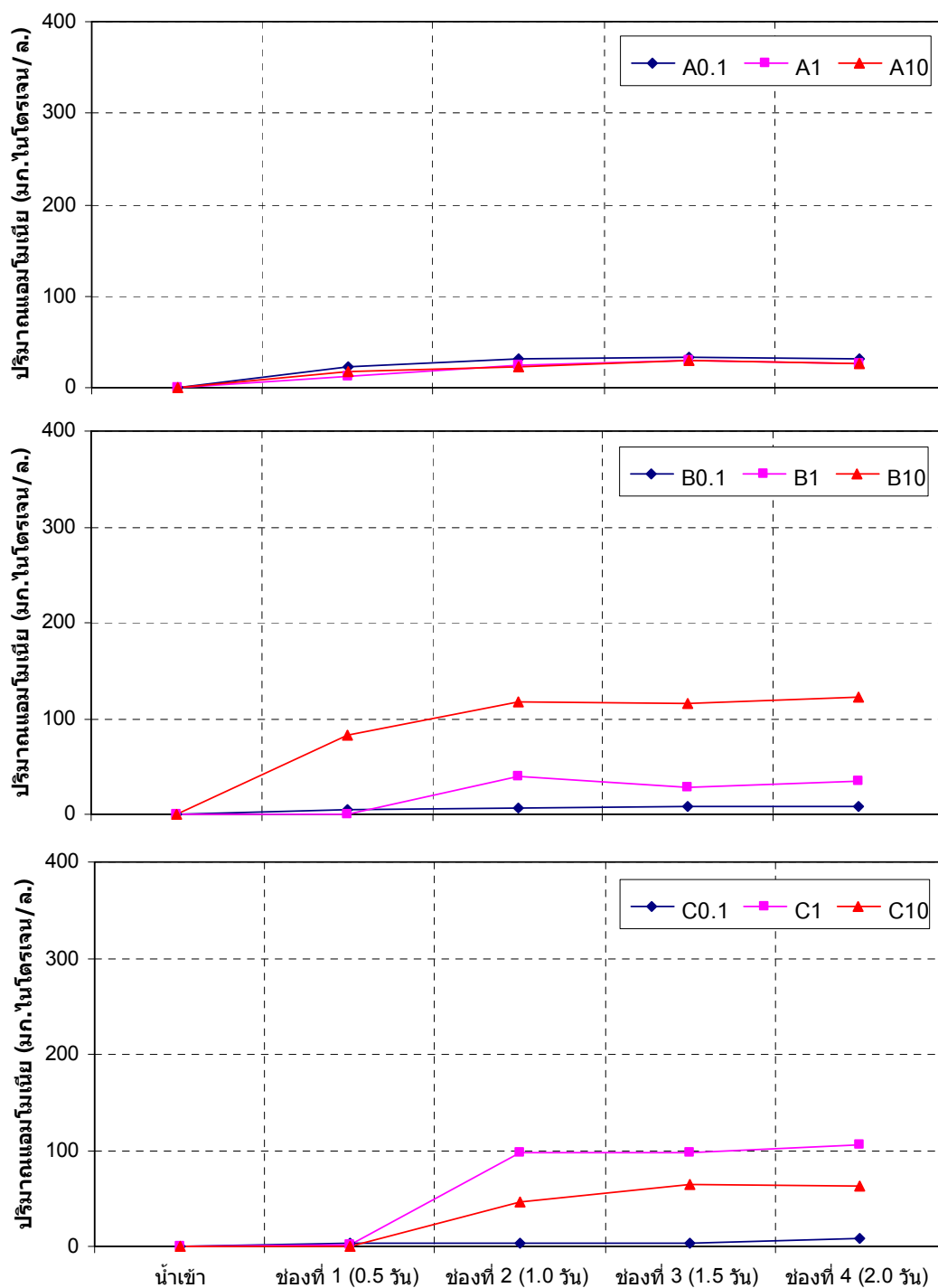
ในชุดถังปฏิกรณ์ B10 และ C10 พบปริมาณแอมโมเนียเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 122 และ 32 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอเช่นเดียวกับช่วงการทดลองที่ 2 และ ตรวจพบไนไตรต์ในช่องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ชุด C10 โดยมีค่าเท่ากับ 7 มก.ไนโตรเจน/ล.

จึงอาจสรุปได้ว่าการเติมเหล็กในสัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี เป็นค่าที่สามารถสนับสนุนการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ดีกว่ากระบวนการดีเอ็นอาร์เอ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กเป็น 1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ส่งผลให้เกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอได้ดีกว่ากระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแอมโมเนียในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

| ชุดถังปฏิกรณ์ และสัดส่วนการเติมเหล็ก (มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | | | |
|--|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
| A0.1 | ND | 22±11 | 31±6 | 34±6 | 32±6 |
| A1 | ND | 13±11 | 24±10 | 29±10 | 27±7 |
| A10 | ND | 17±9 | 22±8 | 29±10 | 27±5 |
| B0.1 | ND | 5±8 | 6±6 | 8±5 | 9±5 |
| B1 | ND | ND | 40±35 | 28±22 | 35±17 |
| B10 | ND | 83±38 | 118±14 | 115±28 | 122±24 |
| C0.1 | ND | 3±3 | 4±3 | 4±3 | 8±6 |
| C1 | ND | 2±4 | 97±19 | 98±15 | 106±12 |
| C10 | ND | ND | 47±20 | 65±16 | 62±8 |

หมายเหตุ : A = ชุดควบคุม, B = ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์, C = ชุดเติมเฟอริกซิเทรต



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมฟอสเฟตคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมฟอสเฟตซีเทรต

ภาพที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง

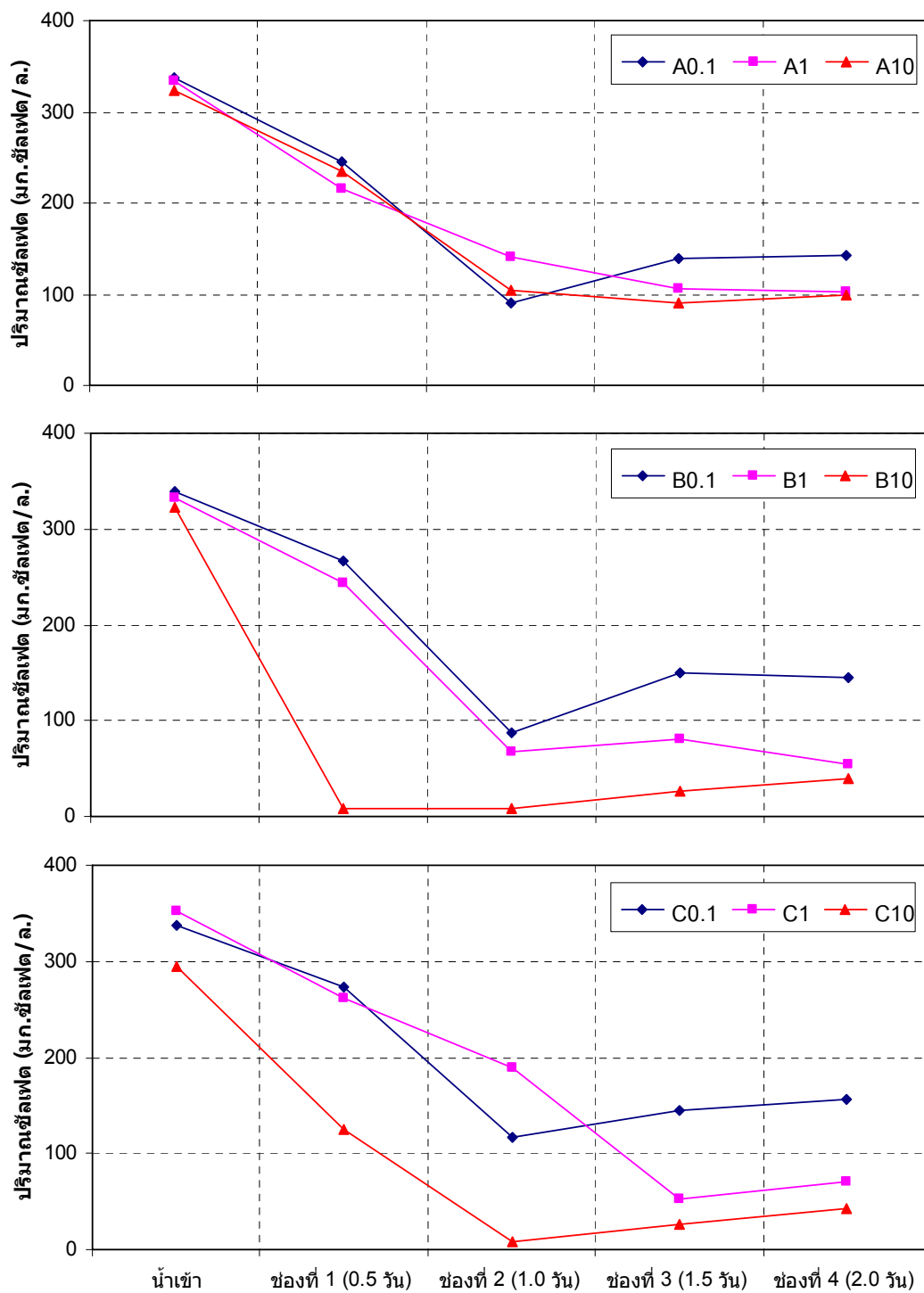
4.4.3 ผลต่อการกำจัดซัลเฟต

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์พบว่า ในชุดการทดลองควบคุมที่ไม่เติมเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเกิดขึ้นได้เพียงร้อยละ 50 โดยเมื่อทำการเติมเหล็กในสัดส่วน 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ไม่ว่าจะป็นรูปฟอร์มใดจะช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 69 และเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กขึ้นอีก 10 เท่าในช่วงการทดลองที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ว่าหากในระบบฯ มีปริมาณไอออนของเหล็กต่ำก็มีโอกาสที่จะส่งผลให้แบคทีเรียไม่สามารถดึงเหล็กมาใช้ได้ และนอกจากนี้เหล็กยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Barton และ Fauque, 2009) ส่วนในช่วงการทดลองที่ 3 เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กให้สูงขึ้นจากช่วงการทดลองที่ 2 อีก 10 เท่า จนมีค่าเป็น 10 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี กลับพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง โดยยังคงมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 80 จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมเหล็กและเพิ่มสัดส่วนเหล็กในระบบฯ ในทั้ง 2 รูปฟอร์ม จะช่วยส่งเสริมให้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นได้ดีในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ ซึ่งสัดส่วนปริมาณเหล็กต่อซีโอดีเท่ากับ 1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี เป็นปริมาณที่คาดว่าเพียงพอแล้วสำหรับกระบวนการซัลเฟตรีดักชันในสภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ และเมื่อพิจารณาในแง่ของรูปฟอร์มของการเติมเหล็ก ซึ่งงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าหากทำการเติมเหล็กรูปคีเลตลงในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ แบคทีเรียจะนำเหล็กมาใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญและกระบวนการเมตาบอลิซึมได้ดีกว่าการเติมเหล็กในรูปไอออน ซึ่งสามารถสูญเสียไปได้จากการตกตะกอนเป็นเหล็กซัลไฟด์ แต่ผลการทดลองกลับมีเป็นเช่นนั้น โดยพบว่าการเติมเหล็กทั้งสองรูปฟอร์มไม่ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตที่แตกต่างกัน ดังข้อมูลในตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.29

ตารางที่ 4.14 ปริมาณซัลเฟตในทุกสภาวะการทดลองแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์

| ชุดถังปฏิกรณ์ และสัดส่วนการเติมเหล็ก (มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) | ปริมาณซัลเฟต (มก.ซัลเฟต/ล.) | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
| A0.1 | 337±25 | 246±42 | 90±18 | 140±21 | 142±29 |
| A1 | 334±9 | 216±9 | 141±23 | 106±51 | 103±11 |
| A10 | 324±19 | 235±23 | 104±16 | 91±15 | 99±8 |
| B0.1 | 339±14 | 267±23 | 88±23 | 150±17 | 145±41 |
| B1 | 333±7 | 243±19 | 68±16 | 81±49 | 55±11 |
| B10 | 322±17 | 9±12 | 8±14 | 27±20 | 40±32 |
| C0.1 | 338±12 | 274±12 | 117±47 | 145±65 | 157±25 |
| C1 | 353±27 | 262±15 | 190±10 | 53±28 | 70±21 |
| C10 | 294±24 | 125±5 | 8±6 | 26±10 | 43±11 |

หมายเหตุ : A = ชุดควบคุม, B = ชุดเติมเฟอริกคลอไรด์, C = ชุดเติมเฟอริกซิเทรต



(A) ชุดควบคุม (B) ชุดเติมเฟอริคคลอไรด์ และ (C) ชุดเติมเฟอริคซัลเฟต

ภาพที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟตเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ 3 ชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทุกสภาวะการทดลอง

4.4.4 ผลต่อการเกิดซัลไฟด์

- ชุดการทดลองควบคุม

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดควบคุมที่ไม่เติมเหล็กทั้ง 3 ชุดการทดลอง (A0.1, A1 และ A10) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเกิดขึ้นได้เพียงร้อยละ 50 และจากผลที่แสดงดังตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.30 จะพบการเกิดซัลไฟด์ขึ้นในระบบไม่เกิน 40 มก.ซัลเฟอร์/ล. และตรวจพบเหล็กปริมาณเพียงเล็กน้อยในน้ำตัวอย่างจากชุดการทดลองควบคุมนี้ ซึ่งหากพิจารณาจากสมมูลของซัลเฟอร์แล้วจะเห็นว่าปริมาณซัลเฟตที่ลดลงสอดคล้องกับปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น และปริมาณเหล็กที่วัดได้คาดว่าจะปริมาณที่เจือปนอยู่ในน้ำประปา และบางส่วนอาจมาจากการเติมธาตุอาหารรองลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กที่ตรวจพบนี้ไม่ส่งผลต่อการกำจัดซัลเฟตและการเกิดซัลไฟด์ในระบบ

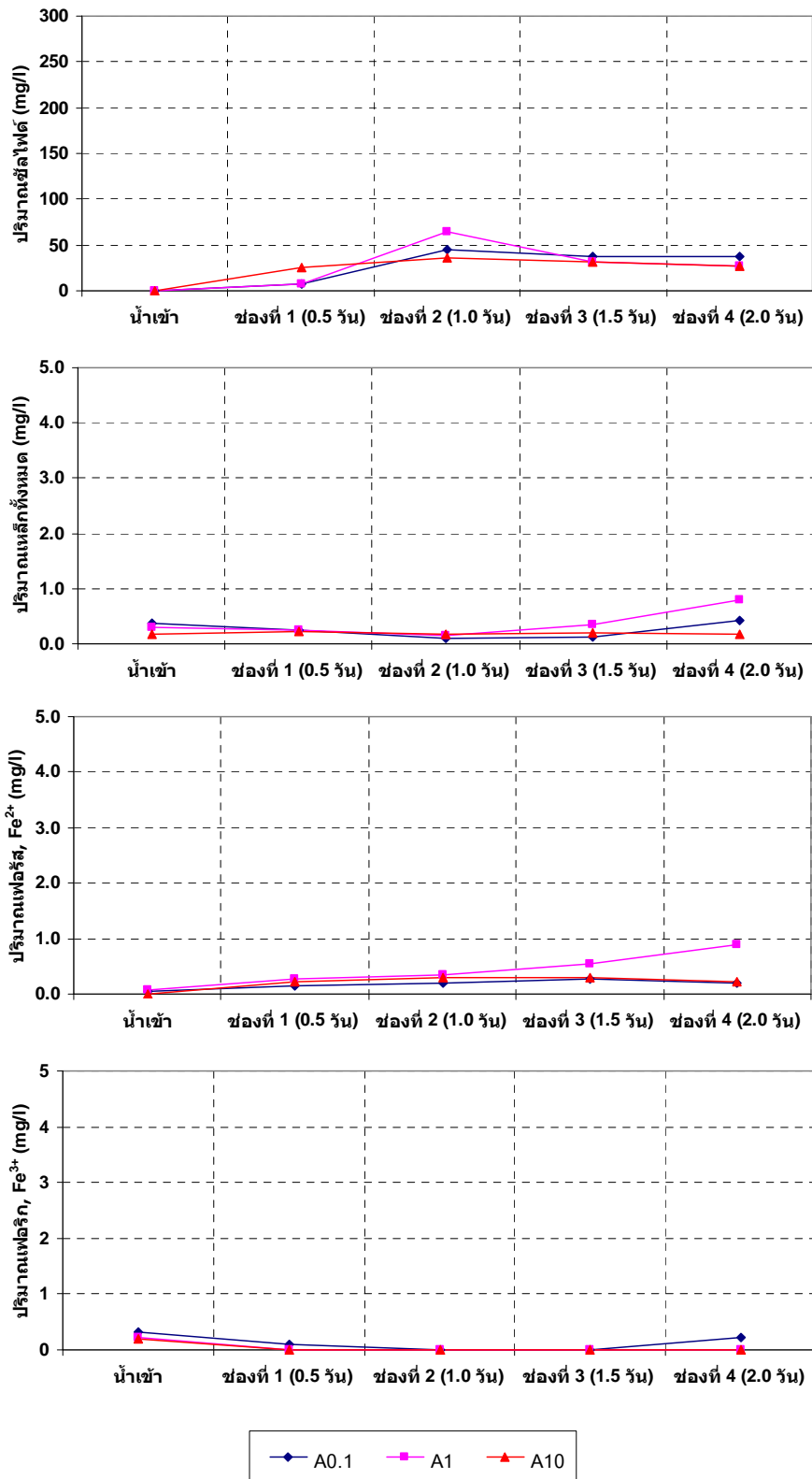
- ชุดการทดลองที่เติมเฟอร์ริกคลอไรด์

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในชุด B0.1 พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 69 โดยตรวจพบปริมาณการเกิดซัลไฟด์มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันใน 3 ช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ คือ เท่ากับ 64 ± 16 51 ± 15 และ 50 ± 16 มก.ซัลเฟอร์/ล. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมเล็กน้อย สอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน และเมื่อพิจารณาในชุดการทดลอง B1 ซึ่งเป็นการทดลองช่วงที่ 2 ที่มีการเพิ่มสัดส่วนการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ขึ้น 10 เท่าจากการทดลองช่วงที่ 1 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 และพบปริมาณการเกิดซัลไฟด์ขึ้นใน 3 ช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 63 ± 9 102 ± 23 และ 143 ± 19 มก.ซัลเฟอร์/ล. ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มสูงขึ้นจากชุด B0.1 มากเช่นกัน ส่วนในชุดการทดลองสุดท้าย (B10) ซึ่งเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กขึ้นอีก 10 เท่าจากในชุด B1 ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากชุด B1 คือยังคงเท่ากับประมาณร้อยละ 80 โดยระบบสามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีตั้งแต่ช่องแรกของถังปฏิกรณ์ แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นกลับพบว่าไม่สอดคล้องกัน ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในชุด B10 กลับลดลงกว่าชุดการทดลอง B1 โดยมีค่าเท่ากับ 31 ± 9 37 ± 4 34 ± 4 และ 28 ± 2 มก.ซัลเฟอร์/ล. ในช่องย่อยที่ 1 2 3 และ 4 ของถังปฏิกรณ์ ตามลำดับ โดยผู้วิจัยคาดว่าปริมาณการเติมเหล็กในชุด B10 น่าจะมากจนส่งผลยับยั้งการเกิดซัลไฟด์ โดยเหล็กเฟอร์ริกจะถูกรีดิวซ์ไปกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสและจับกับซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบจนตกตะกอนเป็นเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งผลการทดลองจากตารางที่ 4.16 และ 4.31

แสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กในน้ำที่ตรวจพบเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับในชุดควบคุม ฉะนั้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ว่าเหล็กที่เติมลงไปในระบบอาจจับกับซัลไฟด์และตกตะกอนได้

- ชุดการทดลองที่เติมเพอริกซิเทรต

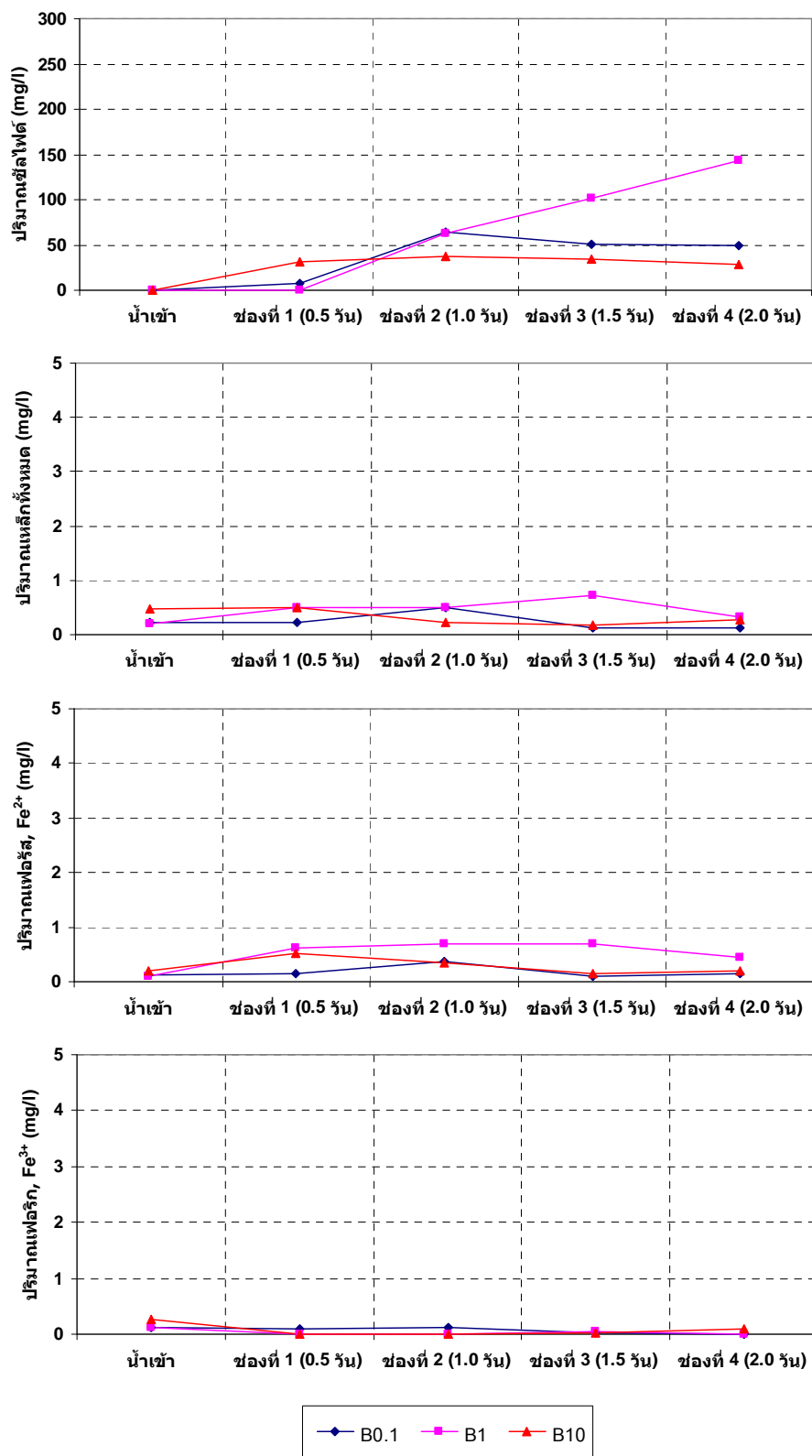
จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตและการเกิดซัลไฟด์ของถัง ปฏิกรณ์เอปปีอาร์ที่เติมเพอริกซิเทรตในทั้ง 3 ชุดการทดลอง (C0.1, C1 และ C10) จะพบว่าไม่มีผลไปในทางเดียวกันกับถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ที่เติมเพอริกคลอไรด์ (B0.1, B1 และ B10) ซึ่งสมมติฐานเบื้องต้นที่เลือกใช้เพอริกซิเทรตในงานวิจัยนี้เนื่องจากคาดว่าเพอริกซิเทรตซึ่งเป็นเหล็กในรูปคีเลต จะสามารถละลายน้ำอยู่ได้โดยที่ไม่เปลี่ยนรูป และจะไม่สามารถจับกับซัลไฟด์จนตกตะกอนเป็นเหล็กซัลไฟด์ แต่ผลการทดลองจากตารางที่ 4.17 และ 4.32 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ในน้ำเสียเข้าระบบฯ จะตรวจวิเคราะห์พบปริมาณเหล็กละลายในน้ำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเติมเหล็กให้กับระบบฯ แต่เมื่อเหล็กถูกดึงเข้าไปใช้ในกระบวนการบำบัดแล้วกลับพบว่า ในน้ำทิ้งมีเหล็กละลายน้ำอยู่ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เติมลงไป จึงแสดงให้เห็นว่าเหล็กที่เติมให้กับระบบในรูปเพอริกคีเลตสามารถถูกเปลี่ยนรูปไปและเกิดการตกตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carey (2005) ที่ศึกษาบทบาทของเหล็กเพอริกซึ่งอยู่ในรูปละลายน้ำ (เพอริกซิเทรต) ต่อวัฏจักรของเหล็กและซัลเฟอร์ในตะกอนทะเลชายฝั่ง โดยผลการทดลองพบว่าเหล็กเพอริกที่ละลายน้ำ (เพอริกซิเทรต) สามารถถูกรีดิวซ์อย่างรวดเร็วกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสและตกตะกอนเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) หรือเกิดเป็นแร่ไพไรต์ (FeS₂) ได้



ภาพที่ 4.30 การเกิดคลอไรด์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของ
 ถึงปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดควบคุมในทั้ง 3 ช่วงการทดลอง

ตารางที่ 4.15 ปริมาณการเปลี่ยนแปลง ซัลเฟต ซัลไฟด์ และเหล็กชนิดต่างๆ แบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดควบคุม

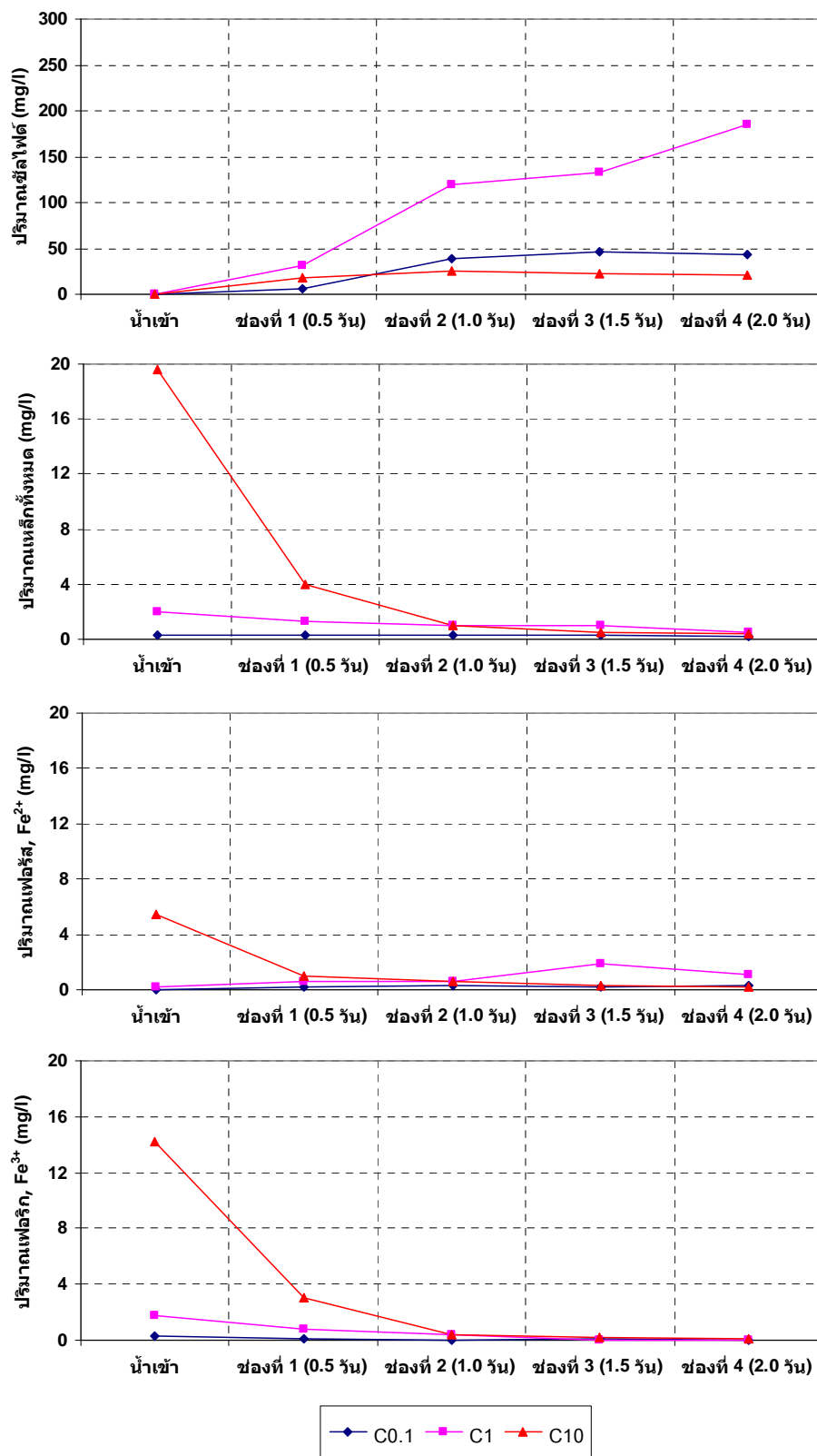
| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
|----------------------------|---------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A0.1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 337±25 | 246±42 | 90±18 | 140±21 | 142±29 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 7±8 | 45±8 | 37±13 | 37±14 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 86 | 73.8 | 82 | 82 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.05 | 0.15 | 0.21 | 0.28 | 0.20 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.33 | 0.09 | ND | ND | 0.22 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.38 | 0.24 | 0.11 | 0.13 | 0.43 |
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 334±9 | 216±9 | 141±23 | 106±51 | 103±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 8±7 | 64±12 | 32±7 | 27±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 107 | 77 | 109 | 66 | 60 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.06 | 0.28 | 0.35 | 0.54 | 0.88 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.23 | ND | ND | ND | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.30 | 0.26 | 0.14 | 0.35 | 0.80 |
| ถังปฏิกรณ์ควบคุม (A10) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 324±19 | 235±23 | 104±16 | 91±15 | 99±8 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 25±3 | 36±2 | 32±3 | 27±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 104 | 101 | 69 | 61 | 59 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.00 | 0.23 | 0.30 | 0.31 | 0.22 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.18 | 0.23 | 0.17 | 0.21 | 0.16 |



ภาพที่ 4.31 การเกิดซัลไฟด์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของ
ถังปฏิกรณ์โอปปีอาร์ชุดเดิมเฟอริกคลอไรด์ในทั้ง 3 ช่วงการทดลอง

ตารางที่ 4.16 ปริมาณการเปลี่ยนแปลง ซัลเฟต ซัลไฟด์ และเหล็กชนิดต่างๆ แบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
|---|---------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B0.1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 339±14 | 267±23 | 88±23 | 150±17 | 145±41 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 7±10 | 64±16 | 51±15 | 50±16 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 92 | 92 | 99 | 96 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.11 | 0.14 | 0.37 | 0.10 | 0.14 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.11 | 0.09 | 0.12 | 0.02 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.23 | 0.23 | 0.50 | 0.12 | 0.13 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 333±7 | 243±19 | 68±16 | 81±49 | 55±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 0.48±0.42 | 63±9 | 102±23 | 143±19 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 107 | 78 | 85 | 128 | 161 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.10 | 0.62 | 0.69 | 0.68 | 0.45 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.11 | ND | ND | 0.05 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.21 | 0.50 | 0.49 | 0.73 | 0.32 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (B10) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 322±17 | 9±12 | 8±14 | 27±20 | 40±32 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 31±9 | 37±4 | 34±4 | 28±2 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 103 | 34 | 40 | 43 | 41 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.20 | 0.51 | 0.35 | 0.15 | 0.19 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.09 |
| | Total Iron (mg/l) | 0.47 | 0.49 | 0.22 | 0.17 | 0.28 |



ภาพที่ 4.32 การเกิดซัลไฟด์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเมื่อแบ่งตามช่องย่อยของ
ถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชูดเติมเฟอร์ริกซิเทรตในทั้ง 3 ช่วงการทดลอง

ตารางที่ 4.17 ปริมาณการเปลี่ยนแปลง ซัลเฟต ซัลไฟด์ และเหล็กชนิดต่างๆ แบ่งตามช่องย่อยของถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์ชุดเติมเฟอร์ริกซิเทรต

| ชุดถังปฏิกรณ์ | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 (0.5 วัน) | ช่องที่ 2 (1.0 วัน) | ช่องที่ 3 (1.5 วัน) | ช่องที่ 4 (2.0 วัน) |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C0.1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 338±12 | 274±12 | 117±47 | 145±65 | 157±25 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 6±9 | 39±3 | 47±13 | 44±10 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 108 | 94 | 76 | 93 | 94 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.03 | 0.20 | 0.34 | 0.19 | 0.26 |
| | Iron(III) (mg/l) | 0.25 | 0.12 | ND | 0.09 | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 0.28 | 0.32 | 0.26 | 0.29 | 0.18 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C1) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 353±27 | 262±15 | 190±10 | 53±28 | 70±21 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 32±9 | 119±15 | 133±18 | 185±6 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 113 | 116 | 180 | 150 | 207 |
| | Iron(II) (mg/l) | 0.19 | 0.60 | 0.63 | 1.85 | 1.06 |
| | Iron(III) (mg/l) | 1.75 | 0.74 | 0.38 | ND | ND |
| | Total Iron (mg/l) | 1.95 | 1.34 | 1.01 | 1.02 | 0.53 |
| ถังปฏิกรณ์เติมเฟอร์ริกซิเทรต (C10) | Sulfate (mg-SO ₄ /l) | 294±24 | 125±5 | 8±6 | 26±10 | 43±11 |
| | Sulfide (mg-S/l) | ND | 18±2 | 25±2 | 22±3 | 21±3 |
| | Total Sulfur (mg-S/l) | 94 | 58 | 28 | 30 | 35 |
| | Iron(II) (mg/l) | 5.41 | 1.01 | 0.63 | 0.30 | 0.21 |
| | Iron(III) (mg/l) | 14.24 | 3.02 | 0.36 | 0.16 | 0.15 |
| | Total Iron (mg/l) | 19.65 | 4.03 | 0.99 | 0.46 | 0.35 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมตลอดจนประสิทธิภาพของระบบเอเปีอาร์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตสูง ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้น 3,600 มก./ล. ไนเตรต-ไนโตรเจน 300 มก./ล. และซัลเฟต 300 มก./ล. รวมทั้งศึกษาลำดับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาและผลของสัดส่วนเหล็กต่อซีโอดีในรูปแบบของเหล็กที่ต่างกัน ที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอเปีอาร์ ภายใต้สภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินพอ โดยทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์เอเปีอาร์ชนิดฝาเปิด ซึ่งมีปริมาตรในส่วนใช้งาน 16 ลิตร แบ่งออกเป็น 4 ช่องย่อยที่มีปริมาตรเท่ากันช่องละ 4 ลิตร จำนวน 3 ถัง มีระยะเวลาพักเก็บ 2 วัน และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.8 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ (1) ชุดถังปฏิกรณ์ควบคุม (2) ชุดถังปฏิกรณ์ที่เติมเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (ในรูปแบบเฟอร์ริกคลอไรด์) และ (3) ชุดถังปฏิกรณ์ที่เติมเฟอร์ริกคีเลต (ในรูปแบบเฟอร์ริกซิเตรต) และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วงที่แปรค่าสัดส่วนการเติมเหล็กต่อซีโอดี (Fe^{3+} : COD) ต่างกัน 3 ระดับ คือ ช่วงการทดลองที่ 1 เติมเหล็กในอัตราส่วนเหล็กต่อซีโอดีเท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่เคยทำการทดลองโดยมนต์ชัย พุ่มแก้ว (2553) แล้วพบว่าระบบฯ สามารถกำจัดไนเตรตและซัลเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังคงมีปริมาณซีโอดีเหลืออยู่มาก ส่วนในช่วงการทดลองที่ 2 ทำการเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กขึ้น 10 เท่า เป็น 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการสโตยซิโอมेटริก โดยเป็นปริมาณที่คาดว่าจะเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศ และช่วงการทดลองที่ 3 เติมเหล็กต่อซีโอดีในสัดส่วนเท่ากับ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ซึ่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นอีก 10 เท่าจากค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยคาดว่าจะมากเกินไปต่อแบคทีเรียไร้อากาศในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและซัลเฟตรีดักชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเดินระบบบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบทั้งไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูง ด้วยถังปฏิกรณ์เอเปีอาร์ในสภาวะที่มีค่าซีโอดีในระบบที่มากเกินพอ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 มีประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตมากกว่าร้อยละ 95 และมีประสิทธิภาพ

ในการกำจัดซัลเฟตประมาณร้อยละ 50 โดยการกำจัดซัลเฟตจะเกิดขึ้นหลังจากไนเตรตถูกกำจัดจนเกือบหมด แต่เมื่อทำการเติมเหล็กทั้ง 2 รูปฟอร์มลงในถังปฏิกริยา ได้แก่ เฟอริกไฮดรอกไซด์และเฟอริกซิเทรตในสัดส่วนที่สูงขึ้น ผลการทดลองพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตให้สูงขึ้นได้ถึงร้อยละ 80 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและไนเตรต ซึ่งยังคงมีประสิทธิภาพสูงอยู่ที่ร้อยละ 90 และ 97 ตามลำดับ

2. การเติมเหล็กทั้งในรูปฟอร์มของเฟอริกไฮดรอกไซด์และเฟอริกซิเทรตลงในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ ในสัดส่วนที่น้อย (0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) จะมีปริมาณแอมโมเนียสูงสุดในช่องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์ไม่เกิน 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งเกิดการสะสมแอมโมเนียเท่ากับ 30 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมเหล็กในสัดส่วนนี้จะสามารถสนับสนุนให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ดีกว่ากระบวนการดีเอ็นอาร์เอ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเหล็กให้สูงขึ้น (1.0 และ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี) กลับส่งผลทำให้ระบบเกิดการสะสมแอมโมเนียสูงขึ้น

3. สัดส่วนการเติมเหล็ก 1.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี ทั้งในรูปฟอร์มของเหล็กไฮดรอกไซด์และเหล็กซิเทรตเป็นค่าที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการทำให้ปฏิกริยาการกำจัดซัลเฟตเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนสัดส่วนการเติมเหล็กที่ 10.0 มก.เหล็ก/ก.ซีโอดี เป็นปริมาณที่แสดงให้เห็นว่าเหล็กนอกจากจะมีผลทำให้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันเกิดขึ้นแล้ว ยังส่งผลลดปริมาณการเกิดซัลไฟด์ได้อีกด้วย

4. รูปฟอร์มที่ต่างกันของเหล็กไฮดรอกไซด์และเหล็กซิเทรตไม่ได้มีผลทำให้เกิดความแตกต่างกันในแง่ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ไนเตรต และซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ โดยรูปแบบการบำบัดและแนวโน้มประสิทธิภาพของระบบต่างๆ เป็นไปในทางเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความซับซ้อนของกลไกที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เอปียาร์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบทั้งไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยมีปัจจัยต่างๆ มากมายที่สามารถส่งผลกระทบต่อทั้งการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียแต่ละกลุ่มที่อยู่ร่วมกันในระบบฯ แต่อย่างไรก็ตามด้วยขอบเขตของงานวิจัยและข้อจำกัดด้านเวลาในการทำการทดลอง ทำให้ยังมีข้อสงสัยอีกหลายประเด็นที่ยังไม่สามารถหาคำตอบได้ เช่น หากทำการเดินระบบบำบัดด้วยการใช้น้ำเสียจริงจากภาคอุตสาหกรรมจะให้ผลที่แตกต่างกับงานวิจัยนี้หรือไม่อย่างไร หรือประเด็นปัญหาที่ว่ายังมีปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่ส่งผลต่อ

กระบวนการบำบัดอีกหรือไม่ เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยมีความเห็นว่าประเด็นปัญหาเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีความน่าสนใจในการทำการศึกษาต่อเนื่อง เพื่อเป็นการพัฒนาทั้งองค์ความรู้เชิงในวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและ/หรือความรู้เชิงวิทยาศาสตร์ โดยตัวอย่างประเด็นที่ควรศึกษาประกอบไปด้วย

1. การศึกษาการเดินระบบบำบัดแบบเอปียาร์กับน้ำเสียจริงจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมี ซึ่งล้วนแล้วแต่มีองค์ประกอบของไนเตรตและซัลเฟตเข้มข้นสูงในน้ำเสีย และนอกจากนี้เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียจริงเหล่านั้นมักประกอบไปด้วยสารอื่นๆ อีกมากมาย เช่น โลหะหนักต่างๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียหรือประสิทธิภาพของระบบฯ ดังนั้นการศึกษาดูผลของน้ำเสียจริงย่อมทำให้สามารถออกแบบระบบฯ ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2. การศึกษากลุ่มประชากรแบคทีเรียในช่วงเวลาต่างๆ และในช่องต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากกลุ่มของแบคทีเรียชนิดต่างกันย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบที่แตกต่างกัน การเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรของแบคทีเรียในสภาวะต่างๆ ย่อมทำให้การควบคุมระบบทำได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3. การศึกษาผลของการเติมเหล็กต่อการเกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอในสภาวะต่างๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถตอบได้ว่าเหตุใดการเติมเหล็กในระบบบำบัดน้ำเสียจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ให้เกิดกระบวนการดีเอ็นอาร์เอที่เพิ่มสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- มนต์ชัย พุ่มแก้ว. 2553. พฤติกรรมของระบบเอปียารีนในการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่มที่ 1, 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2547. เคมีของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Akunna, J.C., Bizeau, C. and Moletta, R. (1992). Denitrification in anaerobic digesters : Possibilities and influence of wastewater COD/N-NO_x ratio. Environmental Technology. 13 (9) : 825-836.
- Balboa, C.G., Cautivo, D., Blazquez, M.L., Gonzalez, F., Munoz, J.A. and Ballester, A. (2009). Successive ferric and sulfate reduction using dissimilatory bacterial cultures. Water Air Soil Pollut. 207 : 213-226.
- Barber, W.P. and Stuckey, D.C. (1999). The use of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for wastewater treatment : A Review. Wat. Res. 33 (7) : 1559-1578.
- Barber, W.P. and Stuckey, D.C. (2000). Nitrogen removal in a modified Anaerobic Baffled Reactor (ABR) :1. Denitrification. Wat. Res. 33 (9) : 2413-2422.
- Barton, L.L., and Fauque, G.D. (2009). Biochemistry Physiology and Biotechnology of Sulfate Reducing Bacteria. Advances in Applied Microbiology. Else vier Inc.: 41-98.

- Bitton, G. (2005). Wastewater Microbiology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Haandel, A.C.V., Monroy, O., Celis, B., Rustrian, E. and Cervantes, F.J. (2006). Chapter 3 Principles of process design for industrial wastewater treatment systems. Advanced Biological Treatment Process for Industrial Wastewaters : principles and applications. F.J. Cervantes, S.G. Pavlostathis, and A.C.V. Haandel, eds., IWA, Netherlands : 47-140.
- Li, Y.L., Vali, H., Yang, L., Phelps, T.J. and Zang, C.L. (2006). Reduction of iron oxides enhanced by a sulfate-reducing bacterium and biogenic H₂S. Geomicrobiology Journal. 23: 103-117.
- Medigan, M.T., and Martinko, J.M. (2006). Brock Biology of Microorganisms. Pearson Education, Inc., United States of America.
- Patidar, S.K. and Tare, V. (2006). Effect of nutrients on biomass activity in degradation of sulfate laden organics. Process Biochemistry. 41 : 489-495.
- Percheron, G., Bernet, N. and Moletta, R. (1999). Interactions between methanogenic and nitrate reducing bacteria during the anaerobic digestion of an industrial sulfate rich wastewater. FEMS Microbiology Ecology. 29 : 341-350
- Ruiz, G., Jeison, D. and Chemy, R. (2006). Development of denitrifying and methanogenic activities in UASB reactors for the treatment of wastewater: Effect of COD/N ratio. Process Biochemistry. 41 : 1338-1342.
- Schroder, I., Johnson, E. and Vries, S. (2003). Microbial ferric iron reductase. FEMS Microbiology Reviews. 27 : 427-447.
- Speece, R.E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Archae Press Nashville, Tennessee 37215.
- Strohm, T.O., Griffin, B., Zomft, W.G., and Schink, B. (2007). Growth Yields in Bacterial Denitrification and Nitrate Ammonification. Applied and Environmental Microbiology. 73(5): 1420-1424.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D. (2002). Wastewater Engineering-Treatment: Disposal and Reuse. Metcalf and Eddy Inc., New York.

- Tiedje, J.M. (1998). Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. Biology of Anaerobic Microorganisms. A.J.B. Zehnder, ed., John Wiley & Sons, United States of America : 179-244.
- Vossoughi, M., Shakeri, M. and Alemzadeh, I. (2003). Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄ ratios. Chemical Engineering and Processing. 42 : 811-816.
- Wang, Z. and Charle, J. (2006). Anaerobic digestion of a sulfate-rich high-strength landfill leachate : the effect of differential dosing with FeCl₃. Waste Management & Research. 24 : 289-293.
- Zumft, W.G. (1997). Cell Biology and Molecular Basis of Denitrification. Microbiology and Molecular Biology Reviews. 61 (4) : 533-616.

ภาคผนวก

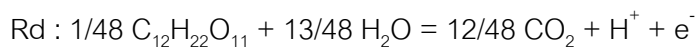
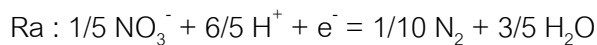
ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. ความต้องการธาตุเหล็กของแบคทีเรียในสภาวะ Denitrification Sulfate reduction และ Anaerobic Digestion

1.1 Denitrification

$$\text{Yield (Y)} = 0.4 \text{ g-VSS/g-COD} \quad (\text{Metcalf, 2004})$$

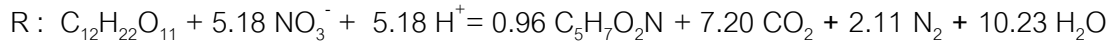


$$f_s = 1.4Y = 1.4 \times 0.4 = 0.56$$

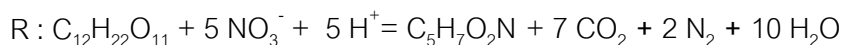
$$f_e = 1 - f_s = 1 - 0.56 = 0.44$$

$$\text{R} : \text{Rd} + 0.44\text{Ra} + 0.56\text{Rc}$$

ดังนั้น



Approximately



จากสมการ

$$\text{NO}_3^- \text{-N } 70 \text{ g} \equiv \text{Sucrose (C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 342 \times 1 = 342 \text{ g-Sucrose}$$

$$1 \text{ g-Sucrose (C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) \approx 1 \text{ g-COD}$$

$$1 \text{ g NO}_3^- \text{-N} \equiv 4.89 \text{ g-COD} \rightarrow \text{NO}_3^- \text{-N } 300 \text{ mg/l} \equiv 1467 \text{ mg-COD/l}$$

$$1 \text{ g NO}_3^- \text{-N} \equiv 1.61 \text{ g-VSS} \equiv 1.61 \times 1.42 = 2.28 \text{ g-VSS (Metcalf, 2004)}$$

$$\text{Nutrient requirement (iron)} = 2 \text{ mg-Fe/g-VSS} \quad (\text{Grady, 1999})$$

$$\text{ดังนั้น Iron requirement} = 2 \times 2.28 = 4.57 \text{ mg-Fe/g NO}_3^- \text{-N}$$

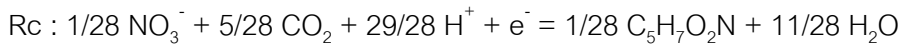
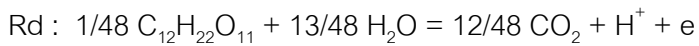
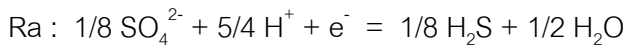
$$= 1.37 \text{ mg-Fe per Nitrate } 300 \text{ mg-N}$$

$$= 0.93 \text{ mg-Fe/g-COD removed}$$

$$= 3.35 \text{ mg-Fe/l per COD } 3600 \text{ mg/l}$$

1.2 Sulfate Reduction

Yield (Y) = 0.065 g-VSS/g-COD (Middleton and Lawrence, 1997)

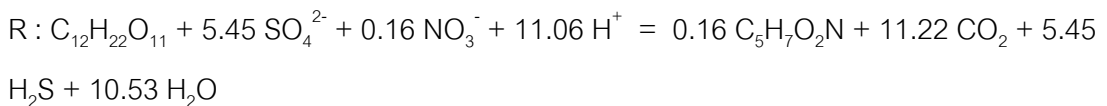


$$f_s = 1.4Y = 1.4 \times 0.065 = 0.091$$

$$f_e = 1 - f_s = 1 - 0.091 = 0.909$$

$$R = R_d - 0.909R_a + 0.091R_c$$

ดังนั้น



$$\text{SO}_4^{2-} 96 \times 5.45 = 523.2 \text{ g} \equiv \text{Sucrose (C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 342 \times 1 = 342 \text{ g-Sucrose}$$

$$1 \text{ g-Sucrose (C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) \approx 1 \text{ g-COD}$$

$$1 \text{ g SO}_4^{2-} \equiv 0.65 \text{ g-COD} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} 300 \text{ mg/l} \equiv 195 \text{ mg-COD/l}$$

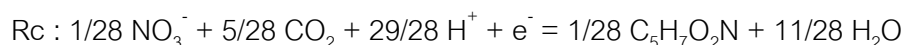
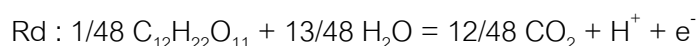
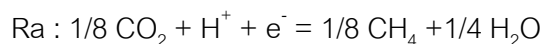
$$1 \text{ g-SO}_4^{2-} \equiv 0.03 \text{ g-VSS} \equiv 0.03 \times 1.42 = 0.04 \text{ g-VSS} \quad (\text{Metcalf, 2004})$$

$$\text{Nutrient requirement (iron)} = 2 \text{ mg-Fe/g-VSS} \quad (\text{Grady, 1999})$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Iron requirement} &= 2 \times 0.04 = 0.08 \text{ mg-Fe/g-SO}_4^{2-} \\ &= 0.024 \text{ mg-Fe per Sulfate } 300 \text{ mg-SO}_4^{2-} \\ &= 0.12 \text{ mg-Fe/g-COD removed} \\ &= 0.43 \text{ mg-Fe/l per COD } 3600 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

1.3 Anaerobic Digestion

$$\text{Yield (Y)} = 0.08 \text{ g-VSS/g-COD} \quad (\text{Metcalf, 2004})$$

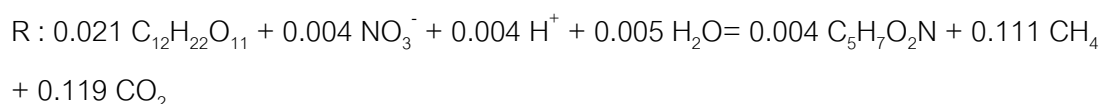


$$f_s = 1.4Y = 1.4 \times 0.08 = 0.112$$

$$f_e = 1 - f_s = 1 - 0.112 = 0.888$$

$$R = \text{Rd} + 0.888\text{Ra} + 0.112\text{Rc}$$

ดังนั้น



$$\text{M.W. (C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 342 \text{ g/mol} \times 1/48 \text{ mol} = 7.125 \text{ g} \rightarrow \text{ให้ } 1 \text{ e}^- = 8 \text{ g COD}$$

$$8 \text{ g COD เกิด cell } 0.004 \text{ mol} \times 113 \text{ g-VSS/mol} = 0.452 \text{ g-VSS}$$

เพราะฉะนั้น COD 3600 mg/l เกิด Anaerobic cell = 203.4 mg-VSS/l

$$\begin{aligned} \text{Nutrient requirement (iron)} &= 2 \text{ mg-Fe/g-VSS} \quad (\text{Grady, 1999}) \\ &= 2 \text{ mg-Fe/g-VSS} \times 0.203 \text{ g-VSS/l} \\ &= 0.41 \text{ mg - Fe/l} \end{aligned}$$

$$\text{ถ้าใช้ COD} = 3600 - (1467 + 195) = 1938 \text{ mg/l}$$

$$\text{ดังนั้น Iron requirement} = (1938 \times 0.41) / 3600$$

$$= 0.22 \text{ mg-Fe/l per COD } 3600 \text{ mg/l}$$

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าสัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี

| กระบวนการ | สัดส่วนความต้องการเหล็กตามทฤษฎี (mg-Fe/l) | ความต้องการ COD (mg/l) |
|-------------------|---|------------------------|
| Denitrification | 3.35 | 1467 |
| Sulfate reduction | 0.43 | 195 |
| Anaerobic | 0.22 | 1938 |
| | $\Sigma = 4.0$ | $\Sigma = 3600$ |

ตารางที่ ก-2 แสดงค่าสัดส่วนเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

| | | | |
|---|------|-----|------|
| สัดส่วนเหล็กที่ใช้ในการทดลอง (mg-Fe/g-COD) | 0.1 | 1.0 | 10.0 |
| จากการทดลองให้ COD = 3600 mg/l คิดเป็นธาตุเหล็กที่เติมในการทดลอง (mg-Fe/l) | 0.36 | 3.6 | 36 |

2. วิธีการคำนวณปริมาณการเติมเหล็ก

ปริมาณการเติมเฟอริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

ถ้าสัดส่วนเหล็กต่อซีไอดีที่เติมในระบบฯ เท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี
ในระบบมี

$$\text{COD} = 3600 \text{ มก./ล.} = 3.6 \text{ กรัม/ล.}$$

$$\text{ต้องการ } \text{Fe}^{3+}:\text{COD} = 0.1 \text{ มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณเหล็กที่ต้องการ} &= 3.6 \text{ กรัม/ล.} \times 0.1 \text{ มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี} \\ &= 0.36 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 270.3$$

$$\text{โดยมีเหล็กอยู่} = 20.6 \%$$

$$\text{เพราะฉะนั้นต้องเติมเหล็ก} = 0.36/0.21 = 1.71 \text{ มก./ล.}$$

$$\text{ถ้า } \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ ที่ใช้บริสุทธิ์ } 96 \%$$

$$\text{เพราะฉะนั้นต้องเติมเหล็ก } \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ } 96 \% = 1.71/0.96 = 1.78 \text{ มก./ล.}$$

2.2 ปริมาณการเติมเฟอริกซิเทรต ($\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$)

ถ้าสัดส่วนเหล็กต่อซีไอดีที่เติมในระบบฯ เท่ากับ 0.1 มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี
ในระบบมี

$$\text{COD} = 3600 \text{ มก./ล.} = 3.6 \text{ กรัม/ล.}$$

$$\text{ต้องการ } \text{Fe}^{3+}:\text{COD} = 0.1 \text{ มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ปริมาณเหล็กที่ต้องการ} &= 3.6 \text{ กรัม/ล.} \times 0.1 \text{ มก.เหล็ก/ก.ซีไอดี} \\ &= 0.36 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7 = 244.8$$

$$\text{โดยมีเหล็กอยู่} = 22.8 \%$$

$$\text{เพราะฉะนั้นต้องเติมเหล็ก} = 0.36/0.23 = 1.57 \text{ มก./ล.}$$

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 3232 | 1833 | N/A | 2509 | 2702 |
| 13/01/54 | 7 | 3600 | 1662 | N/A | 1338 | 1108 |
| 17/01/54 | 11 | 3429 | 1829 | N/A | 1600 | 1463 |
| 20/01/54 | 14 | 4731 | 1654 | N/A | 1240 | 781 |
| 24/01/54 | 18 | 4070 | 1947 | N/A | 1548 | 885 |
| 27/01/54 | 21 | 3303 | 1629 | N/A | 1189 | 396 |
| 31/01/54 | 25 | 3200 | 1280 | N/A | 600 | 120 |
| 07/02/54 | 32 | 3386 | 1434 | N/A | 438 | 80 |
| 10/02/54 | 35 | 3302 | 1459 | N/A | 269 | 38 |
| 14/02/54 | 39 | 3200 | 1790 | N/A | 838 | 229 |
| 17/02/54 | 42 | 3595 | 1721 | N/A | 535 | 76 |
| 21/02/54 | 46 | 3840 | 1837 | N/A | 1127 | 125 |
| 24/02/54 | 49 | 2876 | 1499 | N/A | 122 | 122 |
| 28/02/54 | 53 | 3570 | 1573 | N/A | 424 | 212 |
| 03/03/54 | 56 | 3479 | 1664 | N/A | 303 | 182 |
| 07/03/54 | 60 | 3556 | 1616 | N/A | 206 | 235 |
| 14/03/54 | 67 | 3513 | 1423 | N/A | 87 | 116 |
| 21/03/54 | 74 | 3699 | 1807 | N/A | 198 | 169 |
| 28/03/54 | 81 | 3940 | 1928 | N/A | 170 | 142 |
| 01/04/54 | 85 | 3505 | 1522 | N/A | 54 | 163 |
| 11/04/54 | 95 | 3867 | 2571 | 552 | 229 | 362 |
| 18/04/54 | 102 | 4486 | 1495 | 388 | 305 | 277 |
| 25/04/54 | 109 | 3354 | 2096 | 126 | -84 | 335 |
| 02/05/54 | 116 | 4289 | 1869 | 429 | 490 | 276 |
| 09/05/54 | 123 | 2744 | 1416 | 1478 | 30 | 89 |
| 16/05/54 | 130 | 4354 | 1992 | 541 | 228 | 228 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 7/6/1954 | 152 | 4072 | 1977 | 1298 | 230 | 190 |
| 9/6/1954 | 154 | 3246 | 1593 | 1151 | 300 | 210 |
| 13/06/54 | 158 | 3759 | 1995 | 752 | 116 | 87 |
| 21/06/54 | 166 | 3383 | 2400 | 578 | 202 | 58 |
| 23/06/54 | 168 | 3817 | 2053 | 520 | 145 | 58 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 3909 | 2366 | 977 | 514 | 1131 |
| 08/08/54 | 214 | 3456 | 2409 | 707 | 209 | 183 |
| 12/08/54 | 218 | 3270 | 2110 | 527 | 237 | 211 |
| 16/08/54 | 222 | 3303 | 1806 | 284 | 77 | 52 |
| 20/08/54 | 226 | 3071 | 1523 | 129 | 0 | 0 |
| 24/08/54 | 230 | 3915 | 1916 | 82 | 0 | 0 |
| 28/08/54 | 234 | 3538 | 1918 | 299 | 0 | 0 |
| 07/09/54 | 244 | 3671 | 2049 | 626 | 711 | 398 |
| 11/09/54 | 248 | 3472 | 1764 | 370 | 256 | 370 |
| 13/09/54 | 250 | 3700 | 1394 | 512 | 370 | 342 |
| 15/09/54 | 252 | 3785 | 1565 | 427 | 256 | 313 |
| 17/09/54 | 254 | 3813 | 1651 | 626 | 370 | 455 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 2511 | 1226 | 231 | 0 | 0 |
| 25/11/54 | 323 | 2632 | 1497 | 645 | 181 | 129 |
| 29/11/54 | 327 | 3015 | 1300 | 104 | 0 | 0 |
| 01/12/54 | 329 | 3045 | 1368 | 0 | 0 | 0 |
| 05/12/54 | 333 | 2886 | 1148 | 93 | 0 | 0 |
| 13/12/54 | 341 | 3072 | 1552 | 186 | 93 | 155 |
| 17/12/54 | 345 | 2868 | 1251 | 0 | 0 | 0 |
| 21/12/54 | 349 | 3128 | 1505 | 236 | 30 | 118 |
| 25/12/54 | 353 | 2945 | 1547 | 357 | 238 | 149 |
| 05/01/55 | 364 | 3353 | 1347 | 467 | 137 | 110 |
| 07/01/55 | 366 | 3600 | 1511 | 797 | 137 | 55 |
| 09/01/55 | 368 | 3655 | 1429 | 660 | 220 | 137 |
| 11/01/55 | 370 | 3435 | 1402 | 577 | 82 | 0 |
| 13/01/55 | 372 | 3518 | 1456 | 605 | 82 | 82 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 3184 | 2219 | N/A | 1592 | 1495 |
| 13/01/54 | 7 | 4062 | 2308 | N/A | 2077 | 1662 |
| 17/01/54 | 11 | 3520 | 1920 | N/A | 1691 | 1463 |
| 20/01/54 | 14 | 3583 | 1745 | N/A | 1286 | 873 |
| 24/01/54 | 18 | 3849 | 2124 | N/A | 1416 | 557 |
| 27/01/54 | 21 | 3127 | 1938 | N/A | 1497 | 1145 |
| 31/01/54 | 25 | 2800 | 1440 | N/A | 840 | 320 |
| 07/02/54 | 32 | 3346 | 1753 | N/A | 558 | 78 |
| 10/02/54 | 35 | 3149 | 1536 | N/A | 461 | 0 |
| 14/02/54 | 39 | 3162 | 1486 | N/A | 914 | 38 |
| 17/02/54 | 42 | 3327 | 1683 | N/A | 306 | 191 |
| 21/02/54 | 46 | 3548 | 1795 | N/A | 417 | 167 |
| 24/02/54 | 49 | 2916 | 1458 | N/A | 243 | 162 |
| 28/02/54 | 53 | 3207 | 1482 | N/A | 605 | 272 |
| 03/03/54 | 56 | 3479 | 1603 | N/A | 393 | 212 |
| 07/03/54 | 60 | 3350 | 1616 | N/A | 264 | 29 |
| 14/03/54 | 67 | 3165 | 1713 | N/A | 261 | 232 |
| 21/03/54 | 74 | 3840 | 1779 | N/A | 339 | 169 |
| 28/03/54 | 81 | 3543 | 1899 | N/A | 624 | 142 |
| 01/04/54 | 85 | 3749 | 1712 | N/A | 190 | 54 |
| 11/04/54 | 95 | 4133 | 2495 | 914 | 533 | 419 |
| 18/04/54 | 102 | 4320 | 1855 | 443 | 388 | 249 |
| 25/04/54 | 109 | 3941 | 3144 | 1593 | 0 | 335 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 2/5/1954 | 116 | 3922 | 1900 | 1256 | 306 | 306 |
| 9/5/1954 | 123 | 2508 | 1889 | 797 | 0 | 708 |
| 16/05/54 | 130 | 3813 | 2021 | 1423 | 199 | 171 |
| 7/6/1954 | 152 | 3600 | 1830 | 738 | 177 | 59 |
| 9/6/1954 | 154 | 3246 | 1475 | 885 | 42 | 68 |
| 13/06/54 | 158 | 3528 | 1793 | 896 | 61 | 130 |
| 21/06/54 | 166 | 3383 | 1590 | 549 | 38 | 55 |
| 23/06/54 | 168 | 3499 | 1516 | 781 | 58 | 116 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 3960 | 3369 | 2237 | 2006 | 1491 |
| 08/08/54 | 214 | 3561 | 2801 | 1047 | 209 | 157 |
| 12/08/54 | 218 | 3218 | 1741 | 1029 | 264 | 211 |
| 16/08/54 | 222 | 3019 | 1548 | 903 | 103 | 103 |
| 20/08/54 | 226 | 2839 | 1626 | 723 | 0 | 0 |
| 24/08/54 | 230 | 3504 | 2272 | 1040 | 0 | 0 |
| 28/08/54 | 234 | 3363 | 2143 | 872 | 224 | 0 |
| 07/09/54 | 244 | 3643 | 2021 | 1167 | 398 | 455 |
| 11/09/54 | 248 | 3757 | 1537 | 968 | 285 | 370 |
| 13/09/54 | 250 | 3842 | 1651 | 1195 | 427 | 541 |
| 15/09/54 | 252 | 3956 | 1651 | 1224 | 285 | 569 |
| 17/09/54 | 254 | 3415 | 1651 | 1110 | 484 | 484 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 2383 | 1358 | 256 | 0 | 26 |
| 25/11/54 | 323 | 2916 | 1868 | 335 | 155 | 103 |
| 29/11/54 | 327 | 3067 | 1430 | 156 | 0 | 0 |
| 01/12/54 | 329 | 2942 | 1471 | 129 | 0 | 0 |
| 05/12/54 | 333 | 3041 | 1397 | 155 | 31 | 217 |
| 13/12/54 | 341 | 2917 | 1055 | 248 | 124 | 31 |
| 17/12/54 | 345 | 2776 | 1129 | 0 | 31 | 0 |
| 21/12/54 | 349 | 3010 | 1298 | 207 | 177 | 0 |
| 25/12/54 | 353 | 3064 | 1488 | 327 | 149 | 119 |
| 05/01/55 | 364 | 3430 | 1566 | 137 | 220 | 165 |
| 07/01/55 | 366 | 3243 | 1566 | 192 | 137 | 55 |
| 09/01/55 | 368 | 3573 | 1237 | 110 | 275 | 137 |
| 11/01/55 | 370 | 3325 | 1264 | 192 | 55 | 82 |
| 13/01/55 | 372 | 3545 | 1319 | 82 | 55 | 192 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 3811 | 2412 | N/A | 2316 | 2798 |
| 13/01/54 | 7 | 3277 | 1200 | N/A | 1846 | 2031 |
| 17/01/54 | 11 | 3840 | 1646 | N/A | 1463 | 1234 |
| 20/01/54 | 14 | 3537 | 1791 | N/A | 992 | 946 |
| 24/01/54 | 18 | 3849 | 2035 | N/A | 1548 | 1504 |
| 27/01/54 | 21 | 3347 | 2114 | N/A | 1321 | 572 |
| 31/01/54 | 25 | 2840 | 1680 | N/A | 1040 | 960 |
| 07/02/54 | 32 | 3187 | 1827 | N/A | 1166 | 466 |
| 10/02/54 | 35 | 3226 | 1882 | N/A | 1190 | 269 |
| 14/02/54 | 39 | 3086 | 1905 | N/A | 1448 | 229 |
| 17/02/54 | 42 | 3404 | 1914 | N/A | 1719 | 454 |
| 21/02/54 | 46 | 3631 | 1878 | N/A | 1294 | 83 |
| 24/02/54 | 49 | 2390 | 1539 | N/A | 648 | 41 |
| 28/02/54 | 53 | 2934 | 1543 | N/A | 696 | 182 |
| 03/03/54 | 56 | 3409 | 1528 | N/A | 705 | 176 |
| 07/03/54 | 60 | 3321 | 1499 | N/A | 735 | 0 |
| 14/03/54 | 67 | 3194 | 2090 | N/A | 406 | 58 |
| 21/03/54 | 74 | 3589 | 1948 | N/A | 395 | 169 |
| 28/03/54 | 81 | 3515 | 1283 | N/A | 283 | 85 |
| 01/04/54 | 85 | 3423 | 1358 | N/A | 82 | 0 |
| 11/04/54 | 95 | 4038 | 2152 | 1124 | 438 | 476 |
| 18/04/54 | 102 | 4043 | 2437 | 1274 | 277 | 360 |
| 25/04/54 | 109 | 3396 | 2306 | 2012 | 629 | 252 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเตรต (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 2/5/1954 | 116 | 3248 | 1685 | 1256 | 613 | 735 |
| 9/5/1954 | 123 | 3039 | 1859 | 1534 | 207 | 30 |
| 16/05/54 | 130 | 3927 | 1850 | 1622 | 342 | 85 |
| 7/6/1954 | 152 | 3600 | 1387 | 974 | 118 | 177 |
| 9/6/1954 | 154 | 3157 | 1593 | 1062 | 148 | 354 |
| 13/06/54 | 158 | 3701 | 1619 | 810 | 87 | 127 |
| 21/06/54 | 166 | 3383 | 1504 | 1099 | 132 | 145 |
| 23/06/54 | 168 | 3354 | 1533 | 1157 | 76 | 130 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเตรต (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 4011 | 3317 | 2957 | 1980 | 211 |
| 08/08/54 | 214 | 3692 | 2644 | 1623 | 340 | 183 |
| 12/08/54 | 218 | 3191 | 1741 | 1530 | 475 | 264 |
| 16/08/54 | 222 | 3045 | 1729 | 1677 | 335 | 232 |
| 20/08/54 | 226 | 3097 | 1497 | 1445 | 52 | 0 |
| 24/08/54 | 230 | 3395 | 2409 | 2217 | 82 | 0 |
| 28/08/54 | 234 | 3463 | 2143 | 2068 | 224 | 0 |
| 07/09/54 | 244 | 3700 | 1992 | 2021 | 512 | 427 |
| 11/09/54 | 248 | 3899 | 1907 | 1508 | 683 | 370 |
| 13/09/54 | 250 | 3757 | 1708 | 1622 | 541 | 569 |
| 15/09/54 | 252 | 3870 | 1736 | 1651 | 455 | 285 |
| 17/09/54 | 254 | 3956 | 1736 | 1480 | 512 | 370 |

ตารางที่ ข-1 ค่าซีไอดีในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซัลเฟต (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 2588 | 2127 | 1025 | 51 | 0 |
| 25/11/54 | 323 | 3045 | 2477 | 1290 | 310 | 232 |
| 29/11/54 | 327 | 3067 | 2183 | 1612 | 26 | 0 |
| 01/12/54 | 329 | 3148 | 1626 | 1032 | 26 | 0 |
| 05/12/54 | 333 | 2886 | 1614 | 1210 | 217 | 93 |
| 13/12/54 | 341 | 3103 | 1428 | 1210 | 93 | 31 |
| 17/12/54 | 345 | 2898 | 1281 | 1159 | 580 | 0 |
| 21/12/54 | 349 | 3010 | 1387 | 1151 | 30 | 148 |
| 25/12/54 | 353 | 3243 | 1636 | 1101 | 149 | 238 |
| 05/01/55 | 364 | 3463 | 1896 | 989 | 577 | 137 |
| 07/01/55 | 366 | 3353 | 1594 | 907 | 192 | 55 |
| 09/01/55 | 368 | 3518 | 1456 | 797 | 82 | 110 |
| 11/01/55 | 370 | 3765 | 1539 | 769 | 55 | 137 |
| 13/01/55 | 372 | 3737 | 1429 | 824 | 137 | 192 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 25/04/54 | 109 | 353 | 40 | 19 | 17 | 15 |
| 02/05/54 | 116 | 430 | 18 | 13 | 15 | 17 |
| 09/05/54 | 123 | 279 | 44 | 25 | 19 | 20 |
| 16/05/54 | 130 | 349 | 31 | 31 | 24 | 21 |
| 23/05/54 | 137 | 347 | 40 | 25 | 20 | 18 |
| 07/06/54 | 152 | 329 | 60 | 31 | 29 | 22 |
| 09/06/54 | 154 | 343 | 46 | 24 | 24 | 19 |
| 13/06/54 | 158 | 336 | 33 | 27 | 26 | 21 |
| 21/06/54 | 166 | 359 | 104 | 32 | 29 | 25 |
| 23/06/54 | 168 | 262 | 52 | 23 | 20 | 15 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 287 | 52 | 14 | 15 | 12 |
| 08/08/54 | 214 | 287 | 117 | 14 | 9 | 11 |
| 12/08/54 | 218 | 336 | 23 | 14 | 12 | 11 |
| 16/08/54 | 222 | 307 | 16 | 11 | 13 | 10 |
| 20/08/54 | 226 | 293 | 12 | 14 | 13 | 11 |
| 24/08/54 | 230 | 345 | 16 | 11 | 12 | 11 |
| 28/08/54 | 234 | 288 | 11 | 13 | 13 | 11 |
| 07/09/54 | 244 | 316 | 12 | 16 | 12 | 10 |
| 11/09/54 | 248 | 300 | 14 | 14 | 12 | 11 |
| 13/09/54 | 250 | 283 | 13 | 14 | 11 | 8 |
| 15/09/54 | 252 | 281 | 11 | 12 | 8 | 10 |
| 17/09/54 | 254 | 297 | 10 | 12 | 7 | 8 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 289 | 8 | 10 | 12 | 12 |
| 25/11/54 | 323 | 292 | 7 | 13 | 11 | 10 |
| 29/11/54 | 327 | 302 | 15 | 18 | 17 | 15 |
| 01/12/54 | 329 | 283 | 15 | 16 | 15 | 16 |
| 05/12/54 | 333 | 289 | 16 | 19 | 16 | 16 |
| 13/12/54 | 341 | 309 | 16 | 20 | 19 | 17 |
| 17/12/54 | 345 | 318 | 19 | 22 | 18 | 19 |
| 21/12/54 | 349 | 307 | 17 | 20 | 19 | 16 |
| 25/12/54 | 353 | 331 | 20 | 23 | 20 | 22 |
| 05/01/55 | 364 | 298 | 18 | 18 | 14 | 9 |
| 07/01/55 | 366 | 295 | 20 | 19 | 16 | 14 |
| 09/01/55 | 368 | 302 | 15 | 16 | 14 | 12 |
| 11/01/55 | 370 | 303 | 16 | 18 | 14 | 13 |
| 13/01/55 | 372 | 301 | 21 | 20 | 17 | 17 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 25/04/54 | 109 | 329 | 142 | 46 | 15 | 14 |
| 02/05/54 | 116 | 325 | 12 | 10 | 14 | 14 |
| 09/05/54 | 123 | 205 | 55 | 18 | 15 | 11 |
| 16/05/54 | 130 | 360 | 17 | 20 | 18 | 18 |
| 23/05/54 | 137 | 194 | 21 | 23 | 17 | 18 |
| 07/06/54 | 152 | 332 | 33 | 27 | 19 | 19 |
| 09/06/54 | 154 | 329 | 30 | 21 | 20 | 18 |
| 13/06/54 | 158 | 335 | 21 | 23 | 21 | 18 |
| 21/06/54 | 166 | 357 | 32 | 20 | 20 | 18 |
| 23/06/54 | 168 | 253 | 18 | 17 | 16 | 14 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 300 | 11 | 14 | 11 | 11 |
| 08/08/54 | 214 | 301 | 78 | 18 | 9 | 8 |
| 12/08/54 | 218 | 330 | 11 | 12 | 12 | 11 |
| 16/08/54 | 222 | 315 | 11 | 14 | 12 | 9 |
| 20/08/54 | 226 | 303 | 12 | 12 | 13 | 13 |
| 24/08/54 | 230 | 316 | 18 | 11 | 11 | 11 |
| 28/08/54 | 234 | 333 | 16 | 13 | 12 | 12 |
| 07/09/54 | 244 | 316 | 10 | 11 | 11 | 9 |
| 11/09/54 | 248 | 310 | 10 | 10 | 8 | 9 |
| 13/09/54 | 250 | 312 | 13 | 8 | 8 | 8 |
| 15/09/54 | 252 | 313 | 15 | 9 | 9 | 9 |
| 17/09/54 | 254 | 287 | 7 | 7 | 7 | 7 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 301 | 10 | 13 | 12 | 11 |
| 25/11/54 | 323 | 315 | 8 | 14 | 14 | 14 |
| 29/11/54 | 327 | 339 | 11 | 17 | 14 | 15 |
| 01/12/54 | 329 | 331 | 12 | 20 | 17 | 13 |
| 05/12/54 | 333 | 323 | 14 | 18 | 18 | 16 |
| 13/12/54 | 341 | 339 | 14 | 21 | 17 | 18 |
| 17/12/54 | 345 | 347 | 18 | 20 | 19 | 18 |
| 21/12/54 | 349 | 353 | 17 | 19 | 18 | 18 |
| 25/12/54 | 353 | 360 | 19 | 22 | 20 | 21 |
| 05/01/55 | 364 | 292 | 15 | 19 | 19 | 13 |
| 07/01/55 | 366 | 295 | 15 | 17 | 17 | 13 |
| 09/01/55 | 368 | 293 | 14 | 16 | 11 | 13 |
| 11/01/55 | 370 | 306 | 16 | 19 | 14 | 12 |
| 13/01/55 | 372 | 309 | 17 | 21 | 19 | 17 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 25/04/54 | 109 | 270 | 84 | 35 | 17 | 15 |
| 02/05/54 | 116 | 379 | 14 | 16 | 15 | 16 |
| 09/05/54 | 123 | 268 | 75 | 72 | 18 | 17 |
| 16/05/54 | 130 | 355 | 16 | 15 | 15 | 15 |
| 23/05/54 | 137 | 235 | 22 | 19 | 20 | 19 |
| 07/06/54 | 152 | 344 | 32 | 21 | 22 | 19 |
| 09/06/54 | 154 | 331 | 29 | 19 | 17 | 18 |
| 13/06/54 | 158 | 336 | 21 | 19 | 20 | 13 |
| 21/06/54 | 166 | 359 | 30 | 19 | 18 | 18 |
| 23/06/54 | 168 | 269 | 18 | 13 | 13 | 11 |

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 303 | 40 | 14 | 12 | 11 |
| 08/08/54 | 214 | 315 | 60 | 31 | 12 | 9 |
| 12/08/54 | 218 | 320 | 11 | 10 | 11 | 12 |
| 16/08/54 | 222 | 339 | 10 | 10 | 12 | 12 |
| 20/08/54 | 226 | 308 | 12 | 9 | 12 | 12 |
| 24/08/54 | 230 | 331 | 37 | 36 | 14 | 11 |
| 28/08/54 | 234 | 339 | 18 | 25 | 11 | 10 |
| 07/09/54 | 244 | 326 | 9 | 7 | 10 | 8 |
| 11/09/54 | 248 | 319 | 14 | 7 | 8 | 8 |
| 13/09/54 | 250 | 322 | 27 | 19 | 9 | 10 |
| 15/09/54 | 252 | 319 | 23 | 14 | 10 | 8 |
| 17/09/54 | 254 | 289 | 13 | 7 | 7 | 7 |

ตารางที่ ข-2 ค่าไนเตรตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเตรต (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 340 | 51 | 12 | 12 | 10 |
| 25/11/54 | 323 | 356 | 90 | 15 | 16 | 10 |
| 29/11/54 | 327 | 309 | 41 | 15 | 16 | 15 |
| 01/12/54 | 329 | 306 | 14 | 13 | 12 | 12 |
| 05/12/54 | 333 | 321 | 13 | 13 | 15 | 14 |
| 13/12/54 | 341 | 378 | 15 | 12 | 16 | 18 |
| 17/12/54 | 345 | 358 | 15 | 12 | 17 | 14 |
| 21/12/54 | 349 | 366 | 16 | 10 | 17 | 15 |
| 25/12/54 | 353 | 379 | 18 | 15 | 18 | 21 |
| 05/01/55 | 364 | 326 | 14 | 12 | 14 | 14 |
| 07/01/55 | 366 | 333 | 15 | 13 | 12 | 12 |
| 09/01/55 | 368 | 297 | 15 | 11 | 15 | 13 |
| 11/01/55 | 370 | 320 | 17 | 13 | 12 | 12 |
| 13/01/55 | 372 | 360 | 17 | 13 | 17 | 16 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 310 | 263 | N/A | 199 | 195 |
| 13/01/54 | 7 | 360 | 301 | N/A | 194 | 206 |
| 17/01/54 | 11 | 416 | 377 | N/A | 167 | 260 |
| 20/01/54 | 14 | 338 | 273 | N/A | -9 | 75 |
| 24/01/54 | 18 | 361 | 314 | N/A | 33 | 134 |
| 31/01/54 | 25 | 337 | 285 | N/A | -11 | 190 |
| 07/02/54 | 32 | 341 | 163 | N/A | 31 | 278 |
| 10/02/54 | 35 | 345 | 251 | N/A | 13 | 191 |
| 14/02/54 | 39 | 373 | 318 | N/A | 75 | 175 |
| 17/02/54 | 42 | 379 | 217 | N/A | 60 | 300 |
| 21/02/54 | 46 | 405 | 234 | N/A | 54 | 222 |
| 24/02/54 | 49 | 367 | 228 | N/A | 93 | 235 |
| 28/02/54 | 53 | 384 | 278 | N/A | 42 | 367 |
| 03/03/54 | 56 | 387 | 152 | N/A | 136 | 311 |
| 07/03/54 | 60 | 386 | 198 | N/A | 108 | 301 |
| 11/03/54 | 64 | 341 | 21 | N/A | 102 | 97 |
| 14/03/54 | 67 | 372 | 240 | N/A | 79 | 76 |
| 18/03/54 | 71 | 383 | 282 | N/A | 65 | 68 |
| 21/03/54 | 74 | 374 | 177 | N/A | 81 | 66 |
| 25/03/54 | 78 | 344 | 95 | N/A | 69 | 74 |
| 28/03/54 | 81 | 342 | 257 | N/A | 52 | 33 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|-----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 1/4/1954 | 85 | 335 | 228 | N/A | 54 | 40 |
| 4/4/1954 | 88 | 364 | 189 | N/A | 65 | 106 |
| 11/4/1954 | 95 | 323 | 243 | 68 | 61 | 58 |
| 18/04/54 | 102 | 344 | 26 | 19 | 175 | 101 |
| 25/04/54 | 109 | 329 | 245 | 92 | 68 | 60 |
| 2/5/1954 | 116 | 346 | 147 | 123 | 197 | 200 |
| 9/5/1954 | 123 | 358 | 223 | 164 | 168 | 195 |
| 16/05/54 | 130 | 357 | 200 | -7 | 134 | 124 |
| 23/05/54 | 137 | 349 | 218 | 57 | 97 | 134 |
| 7/6/1954 | 152 | 344 | 226 | 108 | 148 | 175 |
| 9/6/1954 | 154 | 361 | 222 | 105 | 142 | 145 |
| 13/06/54 | 158 | 323 | 236 | 94 | 145 | 164 |
| 21/06/54 | 166 | 302 | 227 | 74 | 161 | 118 |
| 23/06/54 | 168 | 357 | 320 | 67 | 104 | 108 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 346 | 254 | 11 | 34 | 23 |
| 08/08/54 | 214 | 318 | 258 | 6 | 24 | 11 |
| 12/08/54 | 218 | 348 | 277 | 3 | 82 | 43 |
| 16/08/54 | 222 | 320 | 241 | -2 | 79 | 61 |
| 20/08/54 | 226 | 322 | 228 | -5 | 77 | 67 |
| 24/08/54 | 230 | 339 | 213 | -3 | 100 | 73 |
| 28/08/54 | 234 | 340 | 229 | -1 | 75 | 55 |
| 05/09/54 | 242 | 349 | 167 | 9 | 73 | 78 |
| 07/09/54 | 244 | 346 | 201 | 151 | 76 | 106 |
| 11/09/54 | 248 | 332 | 219 | 176 | 191 | 117 |
| 13/09/54 | 250 | 331 | 216 | 132 | 116 | 95 |
| 15/09/54 | 252 | 322 | 219 | 128 | 68 | 88 |
| 17/09/54 | 254 | 340 | 224 | 118 | 81 | 108 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวน วัน | ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|--------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 349 | 277 | 92 | 56 | 39 |
| 25/11/54 | 323 | 333 | 236 | 2 | 80 | 110 |
| 29/11/54 | 327 | 328 | 160 | 18 | 59 | 99 |
| 01/12/54 | 329 | 337 | 190 | 18 | 67 | 126 |
| 05/12/54 | 333 | 339 | 87 | 1 | 73 | 104 |
| 13/12/54 | 341 | 326 | 107 | 9 | 41 | 63 |
| 17/12/54 | 345 | 344 | 153 | -1 | 41 | 61 |
| 21/12/54 | 349 | 332 | 121 | 2 | 61 | 79 |
| 25/12/54 | 353 | 340 | 107 | -2 | 73 | 52 |
| 05/01/55 | 364 | 355 | 262 | 106 | 110 | 89 |
| 07/01/55 | 366 | 318 | 199 | 80 | 78 | 111 |
| 09/01/55 | 368 | 318 | 239 | 122 | 99 | 101 |
| 11/01/55 | 370 | 323 | 238 | 115 | 75 | 95 |
| 13/01/55 | 372 | 306 | 238 | 97 | 93 | 101 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 254 | 233 | N/A | 199 | 197 |
| 13/01/54 | 7 | 342 | 303 | N/A | 208 | 153 |
| 17/01/54 | 11 | 404 | 350 | N/A | 162 | 173 |
| 20/01/54 | 14 | 332 | 256 | N/A | 107 | 126 |
| 24/01/54 | 18 | 355 | 277 | N/A | 47 | 134 |
| 31/01/54 | 25 | 341 | 314 | N/A | 51 | 153 |
| 07/02/54 | 32 | 343 | 189 | N/A | 50 | 159 |
| 10/02/54 | 35 | 345 | 241 | N/A | 109 | 231 |
| 14/02/54 | 39 | 350 | 261 | N/A | 81 | 174 |
| 17/02/54 | 42 | 358 | 88 | N/A | 109 | 273 |
| 21/02/54 | 46 | 374 | 212 | N/A | 170 | 298 |
| 24/02/54 | 49 | 363 | 257 | N/A | 108 | 170 |
| 28/02/54 | 53 | 385 | 235 | N/A | 0 | 168 |
| 03/03/54 | 56 | 393 | 94 | N/A | 120 | 260 |
| 07/03/54 | 60 | 376 | -6 | N/A | 114 | 272 |
| 11/03/54 | 64 | 343 | 21 | N/A | 124 | 103 |
| 14/03/54 | 67 | 357 | 151 | N/A | 84 | 41 |
| 18/03/54 | 71 | 371 | 202 | N/A | 37 | 12 |
| 21/03/54 | 74 | 371 | -5 | N/A | -1 | 48 |
| 25/03/54 | 78 | 340 | 119 | N/A | 29 | 26 |
| 28/03/54 | 81 | 342 | 191 | N/A | 51 | 47 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 01/04/54 | 85 | 357 | 220 | N/A | 38 | 18 |
| 04/04/54 | 88 | 360 | 239 | N/A | 79 | 49 |
| 11/04/54 | 95 | 335 | 225 | 35 | 138 | 111 |
| 18/04/54 | 102 | 352 | 147 | -5 | 182 | 146 |
| 25/04/54 | 109 | 312 | 269 | 127 | 34 | 31 |
| 02/05/54 | 116 | 333 | 251 | 74 | 143 | 128 |
| 09/05/54 | 123 | 322 | 257 | 121 | 173 | 161 |
| 16/05/54 | 130 | 354 | 256 | 54 | 102 | 88 |
| 23/05/54 | 137 | 355 | 249 | 40 | 109 | 72 |
| 07/06/54 | 152 | 344 | 285 | 88 | 143 | 161 |
| 09/06/54 | 154 | 347 | 296 | 122 | 142 | 156 |
| 13/06/54 | 158 | 330 | 262 | 98 | 153 | 155 |
| 21/06/54 | 166 | 320 | 240 | 69 | 178 | 179 |
| 23/06/54 | 168 | 354 | 253 | 65 | 136 | 73 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวน วัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|--------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 358 | 268 | 1 | 106 | 73 |
| 08/08/54 | 214 | 341 | 290 | 86 | 95 | 45 |
| 12/08/54 | 218 | 343 | 261 | 148 | 95 | 36 |
| 16/08/54 | 222 | 333 | 248 | 23 | 66 | 73 |
| 20/08/54 | 226 | 330 | 213 | 25 | 134 | 48 |
| 24/08/54 | 230 | 332 | 268 | 42 | 39 | 33 |
| 28/08/54 | 234 | 343 | 277 | 34 | 60 | 39 |
| 05/09/54 | 242 | 335 | 280 | 108 | 108 | 99 |
| 07/09/54 | 244 | 344 | 272 | 82 | 35 | 67 |
| 11/09/54 | 248 | 337 | 238 | 76 | 128 | 51 |
| 13/09/54 | 250 | 333 | 220 | 54 | 61 | 47 |
| 15/09/54 | 252 | 325 | 236 | 81 | 41 | 43 |
| 17/09/54 | 254 | 328 | 246 | 47 | 139 | 66 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกคลอไรด์ (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 348 | 319 | 29 | 58 | 85 |
| 25/11/54 | 323 | 398 | 267 | 33 | 154 | 243 |
| 29/11/54 | 327 | 394 | 184 | -2 | 87 | 72 |
| 01/12/54 | 329 | 260 | 172 | 1 | 70 | 48 |
| 05/12/54 | 333 | 354 | 103 | -3 | 32 | 19 |
| 13/12/54 | 341 | 343 | 37 | 1 | 50 | 60 |
| 17/12/54 | 345 | 365 | 19 | -2 | -1 | 55 |
| 21/12/54 | 349 | 355 | 70 | -2 | 22 | 51 |
| 25/12/54 | 353 | 372 | 70 | -1 | -3 | 26 |
| 05/01/55 | 364 | 292 | -6 | 2 | 14 | 6 |
| 07/01/55 | 366 | 335 | 6 | -1 | 1 | 20 |
| 09/01/55 | 368 | 325 | 25 | 31 | 52 | 57 |
| 11/01/55 | 370 | 327 | 17 | 8 | 33 | 31 |
| 13/01/55 | 372 | 328 | 5 | -2 | 34 | 87 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 10/01/54 | 4 | 300 | 277 | N/A | 217 | 218 |
| 13/01/54 | 7 | 329 | 319 | N/A | 121 | 121 |
| 17/01/54 | 11 | 408 | 337 | N/A | 37 | 45 |
| 20/01/54 | 14 | 354 | 261 | N/A | -5 | 52 |
| 24/01/54 | 18 | 342 | 252 | N/A | 3 | 95 |
| 31/01/54 | 25 | 370 | 329 | N/A | 80 | 189 |
| 07/02/54 | 32 | 340 | 299 | N/A | 97 | 177 |
| 10/02/54 | 35 | 350 | 290 | N/A | 18 | 189 |
| 14/02/54 | 39 | 381 | 332 | N/A | 93 | 115 |
| 17/02/54 | 42 | 373 | 316 | N/A | -4 | 89 |
| 21/02/54 | 46 | 376 | 259 | N/A | 48 | 155 |
| 24/02/54 | 49 | 344 | 308 | N/A | 51 | 139 |
| 28/02/54 | 53 | 385 | 167 | N/A | -8 | 186 |
| 03/03/54 | 56 | 385 | 6 | N/A | 24 | 177 |
| 07/03/54 | 60 | 352 | -2 | N/A | 26 | 170 |
| 11/03/54 | 64 | 326 | 79 | N/A | 32 | 40 |
| 14/03/54 | 67 | 335 | 218 | N/A | 35 | 14 |
| 18/03/54 | 71 | 372 | 288 | N/A | 82 | 27 |
| 21/03/54 | 74 | 369 | 114 | N/A | -6 | 57 |
| 25/03/54 | 78 | 330 | 50 | N/A | 49 | 56 |
| 28/03/54 | 81 | 326 | 204 | N/A | 63 | 46 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซิเทรต (ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงการทดลองที่ 1) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 01/04/54 | 85 | 330 | 184 | N/A | 54 | 35 |
| 04/04/54 | 88 | 350 | 93 | N/A | 107 | 84 |
| 11/04/54 | 95 | 346 | 188 | 44 | 116 | 94 |
| 18/04/54 | 102 | 351 | 158 | 44 | 198 | 122 |
| 25/04/54 | 109 | 332 | 242 | 104 | 88 | 73 |
| 02/05/54 | 116 | 345 | 244 | 98 | 161 | 147 |
| 09/05/54 | 123 | 331 | 261 | 212 | 139 | 189 |
| 16/05/54 | 130 | 354 | 254 | 229 | 59 | 87 |
| 23/05/54 | 137 | 351 | 258 | 151 | 121 | 89 |
| 07/06/54 | 152 | 353 | 259 | 191 | 177 | 152 |
| 09/06/54 | 154 | 338 | 275 | 134 | 184 | 181 |
| 13/06/54 | 158 | 337 | 272 | 87 | 184 | 182 |
| 21/06/54 | 166 | 342 | 270 | 73 | 145 | 139 |
| 23/06/54 | 168 | 321 | 292 | 101 | 33 | 128 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวนวัน | ถังปฏิกรณ์เติมเฟอริกซัลเฟต (ช่วงการทดลองที่ 2) | | | | |
|----------|----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 04/08/54 | 210 | 336 | 325 | 190 | 53 | 55 |
| 08/08/54 | 214 | 329 | 304 | 213 | 27 | 14 |
| 12/08/54 | 218 | 348 | 225 | 282 | 189 | 87 |
| 16/08/54 | 222 | 381 | 291 | 274 | 119 | 73 |
| 20/08/54 | 226 | 342 | 263 | 250 | 88 | 77 |
| 24/08/54 | 230 | 343 | 303 | 287 | 15 | 24 |
| 28/08/54 | 234 | 343 | 299 | 283 | 54 | 40 |
| 05/09/54 | 242 | 365 | 246 | 190 | 78 | 72 |
| 07/09/54 | 244 | 400 | 287 | 203 | 27 | 35 |
| 11/09/54 | 248 | 336 | 257 | 179 | 97 | 72 |
| 13/09/54 | 250 | 350 | 263 | 192 | 45 | 71 |
| 15/09/54 | 252 | 344 | 254 | 182 | 62 | 83 |
| 17/09/54 | 254 | 335 | 250 | 195 | 33 | 90 |

ตารางที่ ข-3 ค่าซัลเฟตในน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียจากแต่ละช่องย่อยจำแนกตามถังปฏิกรณ์ (ต่อ)

| วันที่ | จำนวน วัน | ถังปฏิกรณ์เติมเพอริกซิเทรต (ช่วงการทดลองที่ 3) | | | | |
|----------|--------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | น้ำเข้า | ช่องที่ 1 | ช่องที่ 2 | ช่องที่ 3 | ช่องที่ 4 |
| 23/11/54 | 321 | 335 | 349 | 320 | 78 | 11 |
| 25/11/54 | 323 | 347 | 323 | 279 | 80 | 42 |
| 29/11/54 | 327 | 345 | 322 | 179 | 13 | 20 |
| 01/12/54 | 329 | 343 | 310 | 266 | 71 | 42 |
| 05/12/54 | 333 | 340 | 298 | 170 | 71 | 51 |
| 13/12/54 | 341 | 336 | 222 | 132 | 49 | 52 |
| 17/12/54 | 345 | 369 | 223 | 215 | -5 | 25 |
| 21/12/54 | 349 | 362 | 215 | 121 | 42 | 65 |
| 25/12/54 | 353 | 359 | 225 | 152 | 40 | 36 |
| 05/01/55 | 364 | 332 | 126 | 0 | 10 | 24 |
| 07/01/55 | 366 | 299 | 121 | 14 | 28 | 48 |
| 09/01/55 | 368 | 288 | 122 | 6 | 35 | 50 |
| 11/01/55 | 370 | 272 | 133 | 15 | 35 | 45 |
| 13/01/55 | 372 | 279 | 126 | 4 | 21 | 49 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปณิดา พุกษ์ไพโรจน์กุล เกิดเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม 2529 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2552

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

- [1] ปณิดา พุกษ์ไพโรจน์กุล และ วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัศมี “ผลของธาตุเหล็กต่อการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์” เอกสารประกอบการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22 วันที่ 6-7 ตุลาคม 2554 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน จัดโดย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] ปณิดา พุกษ์ไพโรจน์กุล, มั่นสิน ตันจตุลเวศม์ และ วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัศมี “สัดส่วนและรูปฟอร์มของเหล็กต่อการกำจัดไนเตรตและซัลเฟตในถังปฏิกรณ์เอปปีอาร์” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 11 วันที่ 21-23 มีนาคม 2555 ณ โฟร์วิลล รีซอร์ท แอนด์ สปา จังหวัด เชียงราย จัดโดย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย