

การหมุนเวียนสร้างตะกอนฟอสฟอริกไฮดรอกไซด์ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย  
แบบไร้อากาศและเติมอากาศ

นางสาวภัทรา ธรรมาพิมล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

REGENERATION OF FERRIC HYDROXIDE FLOC THROUGH ANAEROBIC AND  
AEROBIC WASTEWATER TREATMENT PROCESS

Miss Pattra Thammapiamol

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

การหมุนเวียนสร้างตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์ผ่านระบบ  
บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

โดย

นางสาวภัทรา ธรรมาพิมล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิธีรัมย์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปธาน บรรจงปรี)

ภัทรา ธรรมาพิมล : การหมุนเวียนสร้างตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. (REGENERATION OF FERRIC HYDROXIDE FLOC THROUGH ANAEROBIC AND AEROBIC WASTEWATER TREATMENT PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการลดสารช่วยตกตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์ที่นิยมใช้ร่วมกับระบบเอเอสทางชีวภาพ โดยการเพิ่มถังไร้อากาศเพื่อสลายตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์และสร้างขึ้นใหม่ในถังเติมอากาศ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำน้ำทิ้งมาวิเคราะห์ด้วยวิธีจาร์เทสเพื่อหาปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสม โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ 200 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นได้ร้อยละ 78 และ 98 ตามลำดับ เมื่อนำเฟอร์ริกคลอไรด์เติมในถังเติมอากาศและควบคุมให้มีเหล็กในถังเติมอากาศ 200 มก./ล. พบว่า เฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. หรือคิดเป็น 75 มก./วัน สามารถควบคุมให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเฉลี่ย 260.76 มก./ล. เฟอร์รัสไอออนเฉลี่ย 6.14 มก./ล. และเฟอร์ริกไอออนเฉลี่ย 254.62 มก./ล. เมื่อนำน้ำเสียและตะกอนจากถังตกตะกอนผ่านเข้าถังไร้อากาศโดยแปรผันขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมง พบว่า ถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ลงได้จากเดิม 75 มก./วัน เป็น 22.5 มก./วัน และเพิ่มปริมาณขึ้นเป็น 45 และ 49.5 มก./วัน ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ และไม่ต้องเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง ถูกนำมาใช้เพื่อเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ พบว่า มีปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศเฉลี่ย 379.12 มก./ล. เฟอร์รัสไอออนเฉลี่ย 0.29 มก./ล. และเฟอร์ริกไอออนเฉลี่ย 378.83 มก./ล. และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออนเป็นเฟอร์รัสไอออนในถังไร้อากาศแบบแบตช์โดยเติมและไม่เติมเมอร์คิวริกคลอไรด์ พบว่าไม่แตกต่างกัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนั้นจึงไม่น่าจะเป็นกระบวนการทางชีวภาพ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา ..วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา .....2554.....

# # 5170418721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ACTIVATED SLUDGE WASTEWATER TREATMENT / FERRIC CHLORIDE / ENHANCED SEDIMENTATION / DEFLOCCULATION AND REFLOCCULATION

PATTRA THAMMAPIMOL : REGENERATION OF FERRIC HYDROXIDE FLOC THROUGH ANAEROBIC AND AEROBIC WASTEWATER TREATMENT PROCESS.  
ADVISOR : ASST.PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 127 pp.

This research studied a biological method to reuse ferric chloride, a common coagulant using with activated sludge process, by an addition of anaerobic tank to dissolve ferric hydroxide floc, which will be reformed in aeration tank. Results showed that by using jar test method, the appropriate pH was 8, and the best efficiency was found with ferric chloride concentration of 200 mg/L, achieving COD and turbidity removals of 78 and 98 percent, respectively. When ferric chloride was added into the aeration tank and total iron was controlled at 200 mg/L, the result found that ferric chloride concentration of 50 mg/L or 75 mg/day can control total iron in the aeration tank at 260.76 mg/L, which were 6.14 mg/L ferrous ion and 254.62 mg/L ferric ion. When wastewater influent and returned sludge were passed through a 48, 24, 12, 6, 3 and 1-hr retention time anaerobic tank prior to aeration tank, results showed that a 48-hr retention time anaerobic tank reduced ferric chloride addition from 75 to 22.5 mg/day and increased the dosages to 45 and 49.5 mg/day in 24 and 12-hr retention time anaerobic tank, respectively. While ferric chloride was not required in 6, 3 and 1-hr retention time anaerobic tank. Anaerobic tank of 6-hr retention time was selected and effluent from anaerobic digester was discharged into the aeration tank, results showed that total iron in the aeration tank was 379.12 mg/L, which were 0.29 mg/L ferrous ion and 378.83 mg/L ferric ion. Similar transformation of ferric ion to ferrous ion was found in batch reactors with and without  $HgCl_2$ , indicating that this reaction should not be biological process.

Department : .....Environmental Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Environmental Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล กรรมการและ ดร.ปธาน บรรจงปรุ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเสมอมา

ขอขอบพระคุณโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัว ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

และสุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการและทฤษฎีของระบบเอเอส.....	4
2.1.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบเอเอส .....	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ .....	5
2.1.3 วิธีการควบคุมการทำงานของระบบเอเอส .....	8
2.1.4 การออกแบบระบบเอเอส .....	10
2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอเอส .....	21
2.2 กระบวนการตกตะกอน .....	21
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน.....	24
2.2.2 สารช่วยตกตะกอน (Coagulant).....	25
2.3 เหล็ก .....	27
2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์.....	28
2.4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (Reduction potential).....	29
2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta G^0$ และ $\Delta E^0$ .....	31

	หน้า
2.4.3 ปฏิกริยารีดอกซ์ของเหล็กในน้ำ.....	32
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.6 สรุปพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	37
<b>บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>38</b>
3.1 แผนการทดลอง.....	38
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี .....	40
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	40
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	42
3.2.3 สารเคมี .....	43
3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	44
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง .....	44
3.3.2 ลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มต้นระบบ.....	44
3.3.3 การเริ่มเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์.....	45
3.3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง .....	45
<b>การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติม</b> <b>เฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ.....</b>	<b>45</b>
<b>การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลาย</b> <b>ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ .....</b>	<b>49</b>
<b>การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษาผลจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศ</b> <b>กลับเข้าถังเติมอากาศ .....</b>	<b>51</b>
<b>การทดลองช่วงที่ 4 การเปลี่ยนรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์เป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์</b> <b>แบบแบตช์ .....</b>	<b>55</b>
3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ .....	56
<b>บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>57</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ	
<b>จนเข้าสู่สภาวะคงตัว .....</b>	<b>57</b>



4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเพอริกคลอไรด์	
ในถังเติมอากาศ.....	60
4.2.1 ผลการหาปริมาณเพอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส .....	60
4.2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติม	
เพอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ.....	61
4.2.2.1 ผลของเหล็กที่อยู่ในระบบ .....	61
4.2.2.2 ประสิทธิภาพของระบบหลังเติมเพอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ .....	64
4.3 ผลการศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอน	
เพอริกไฮดรอกไซด์ .....	67
4.3.1 ผลของเหล็กในระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ .....	67
4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ.....	71
4.4 ผลการศึกษาจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศ	
กลับเข้าถังเติมอากาศ.....	74
4.4.1 ผลของเหล็กที่อยู่ในระบบ .....	74
4.4.2 ประสิทธิภาพของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง.....	78
4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเพอริกไฮดรอกไซด์เป็นเพอร์สไฮดรอกไซด์.....	86
4.5.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเพอร์สและเพอริกไฮดรอกไซด์	
โดยไม่เขย่า และเขย่า .....	87
4.5.2 ผลการทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์	
โดยไม่เขย่า และเขย่า .....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก .....	100
ภาคผนวก ข.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	127

## สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของระบบเอเอสสำหรับจลนทรีย์ กลุ่มเฮเทโรโทรฟที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	14
2.2	ค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบเอเอส.....	15
2.3	ค่าที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สองสำหรับระบบเอเอส.....	16
2.4	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	30
2.5	สรุปพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	37
3.1	ลักษณะสมบัติของตะกอนจลนทรีย์ที่ใช้เริ่มเดินระบบ.....	44
3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1.....	46
3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.....	49
3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3.....	52
3.5	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 4.....	55
3.6	พารามิเตอร์ และตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 1.....	56
3.7	พารามิเตอร์ และตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3.....	56
4.1	ผลการหาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส.....	60
4.2	การเปรียบเทียบตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งและความขุ่นก่อนและหลังเติม เฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ.....	65
4.3	สรุปปริมาณหลักต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ.....	82
4.4	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ.....	83
4.5	ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของเฟอร์รัสและเฟอริกไอออน โดยไม่เขย่าและเขย่า.....	87
4.6	ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์การทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ โดยไม่เขย่าและเขย่า.....	90

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส .....	4
2.2	ผลของการเติมไออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์ .....	23
2.3	ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์.....	25
2.4	ปฏิกิริยารีดอกซ์ของวัฏจักรเหล็ก.....	33
3.1	ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย .....	39
3.2	เครื่องสูบน้ำ .....	40
3.3	เครื่องเติมอากาศ.....	41
3.4	ขนาดทางด้านบนของถังปฏิกริยา.....	42
3.5	ขนาดทางด้านข้างของถังปฏิกริยา.....	42
3.6	ขนาดทางด้านหน้าของถังปฏิกริยา.....	42
3.7	ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มเดินระบบ .....	45
3.8	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 1 .....	47
3.9	แผนการทดลองช่วงที่ 1 .....	48
3.10	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 2 .....	50
3.11	แผนการทดลองช่วงที่ 2.....	51
3.12	แผนการทดลองช่วงที่ 3.....	53
3.13	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 3 .....	54
3.14	แผนการทดลองช่วงที่ 4.....	55
4.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว.....	59
4.2	ปริมาณเฟอริกคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและความขุ่น.....	60
4.3	ปริมาณเหล็กในถังเติมอากาศหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ .....	62
4.4	ปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ.....	63
4.5	ตะกอนสีดำที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอน .....	65
4.6	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ.....	66
4.7	ผลของเหล็กในถังเติมอากาศ.....	69
4.8	ผลของเหล็กในน้ำทิ้ง .....	70
4.9	ผลของเหล็กในถังไร้อากาศ .....	71
4.10	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ .....	72

ภาพที่	หน้า
4.11 ผลของเหล็กในถังเติมอากาศที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ.....	75
4.12 ผลของเหล็กในน้ำทิ้งที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ.....	76
4.13 ผลของเหล็กในถังหมักตะกอนไร้อากาศที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ.....	77
4.14 ผลของเหล็กในถังไร้อากาศที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ.....	78
4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ.....	80
4.16 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง .....	81
4.17 ผลการเปลี่ยนรูปของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออนในแบบแบตเตอรี่ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า .....	88
4.18 ผลของพีเอชและไออาร์พีแบบแบตเตอรี่ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า .....	89
4.19 ผลการวิเคราะห์การทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์แบบแบตเตอรี่ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า.....	91
4.20 ผลของพีเอชและไออาร์พีในการทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ แบบแบตเตอรี่ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า.....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้นมีขั้นตอนและเทคนิคที่แตกต่างกันขึ้นกับลักษณะน้ำเสียแต่ละประเภท โดยระบบเอเอส (Activated sludge) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในกรณีที่น้ำทิ้งยังมีความขุ่นอยู่ มักใช้เฟอริกคลอไรด์เพื่อลดความขุ่นของน้ำ และช่วยตกตะกอนในน้ำทิ้งที่ได้จากการบำบัด แต่ปัญหาที่ตามมาคือ ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการลดความขุ่น และตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และยังมีขั้นตอนในการบำบัดหลายขั้นตอน โดยต้องเพิ่มระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีอีกหนึ่งระบบ

ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ที่เกิดขึ้นในระบบเอเอสจากการใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นสารช่วยตกตะกอนนั้นจะตกตะกอนร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อมีการเวียนตะกอนกลับเข้าสู่ถังไร้อากาศภายใต้สภาวะที่ขาดออกซิเจนนี้ เฟอริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) สามารถใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอนทำให้ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ถูกรีดิวซ์เป็นเฟอรัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี เมื่อเฟอรัสไอออนไหลเข้าสู่ถังเติมอากาศ ซึ่งมีออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าเฟอรัสไอออนจะถูกออกซิไดส์เป็นเฟอริกไอออน และตกตะกอนในรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์ ทำให้สามารถจับกับสารแขวนลอยที่เป็นสาเหตุของความขุ่นได้ ส่งผลให้น้ำทิ้งมีสภาพดีขึ้น และค่าซีโอดีลดลง

การเปลี่ยนรูปของเฟอริกไอออนเป็นเฟอรัสไอออน หรือเฟอรัสไอออนเป็นเฟอริกไอออนนี้เกี่ยวข้องกับความสามารถในการรับให้อิเล็กตรอนซึ่งสามารถทราบได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน ( $E^0$ ) สารที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีนั้นจะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานมากกว่า 0 เช่น ออกซิเจน ไนเตรต เฟอริกไอออน ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเท่ากับ +1.27 +1.24 +0.77 +0.34 และ +0.17 โวลต์ ตามลำดับ เฟอริกไอออนจะอยู่ระหว่างออกซิเจน ไนเตรตและซัลเฟต ซึ่งในสภาวะที่มีอากาศ ออกซิเจนให้พลังงานมากที่สุดจึงถูกใช้ก่อน รองลงมาคือไนเตรต แต่เมื่ออยู่ในสภาวะไร้อากาศ เฟอริกไอออนจะถูกใช้เป็นที่รับอิเล็กตรอนก่อนซัลเฟต ฉะนั้นเฟอริกไอออนสามารถรีดิวซ์เป็นเฟอรัสไอออนได้ในสภาวะไร้อากาศ

ดังนั้นถ้ามีการนำตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์หุมนเวียนกลับมาใช้ในระบบเอเอสใหม่อีกครั้งจะสามารถลดปริมาณการใช้เพอริกคลอไรด์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการลดการใช้สารช่วยตกตะกอนโดยการเพิ่มหน่วยบำบัดซึ่งเป็นถังไร้อากาศเพิ่มเติมจากระบบเอเอสโดยตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์จะถูกสลายในถังไร้อากาศ และสร้างขึ้นใหม่ในถังเดิมอากาศเพื่อลดปริมาณการใช้เพอริกคลอไรด์ และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณตะกอนส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัด เนื่องจากตะกอนเหล่านี้จะมีเพอริกไฮดรอกไซด์รวมอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยถังหมักตะกอนไร้อากาศ น้ำที่ได้จากการบำบัดนั้นจะมีเพอร์สไดออกไซด์ละลายอยู่ และจะถูกเวียนกลับเข้าระบบเอเอสอีกครั้งทำให้ไม่ต้องเติมเพอริกคลอไรด์เพิ่มขึ้นอีกในระบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเพอริกคลอไรด์ในถังเดิมอากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาขนาดของถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเดิมอากาศ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของเพอริกไดออกไซด์เป็นเพอร์สไดออกไซด์แบบแบตช์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยในการศึกษาวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

- 1.3.1 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำประปา โดยมีนมจืด ยีห้อโฟร์โมสต์เป็นแหล่งคาร์บอน มีค่าซีโอดีเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
- 1.3.2 ใช้หัวเชื้อ (Seed) จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง
- 1.3.3 งานวิจัยนี้ใช้ถึงปฏิกิริยาที่มีการเดินระบบต่อเนื่องแบบไร้อากาศ-เดิมอากาศเอเอส โดยมีปริมาตรรวมทั้งหมด 110 ลิตร
- 1.3.4 วิเคราะห์หาปริมาณสารช่วยตกตะกอน (เพอริกคลอไรด์) ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบเอเอส ด้วยวิธีจาร์เทส

1.3.5 แปรผันขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 1 3 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์

1.3.6 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ความขุ่น พีเอช (pH) ซีโอดี (COD) ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ตะกอนหนัก (SS) ของแข็งคงตัว (FS) ของแข็งระเหย (VS) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) และปริมาณของเฟอริกไอออน/เฟอรัสไอออน ( $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ ) โดยทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for Examination of Water and Wastewater (1998)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของเฟอริกคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพของถังเดิมอากาศ

1.4.2 ทราบขนาดของถังไร้อากาศที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนรูปของเฟอริกไอออน เป็นเฟอรัสไอออน

1.4.3 สามารถลดค่าใช้จ่ายและปริมาณเฟอริกคลอไรด์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และเป็นแนวทางที่อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในอนาคต

## บทที่ 2

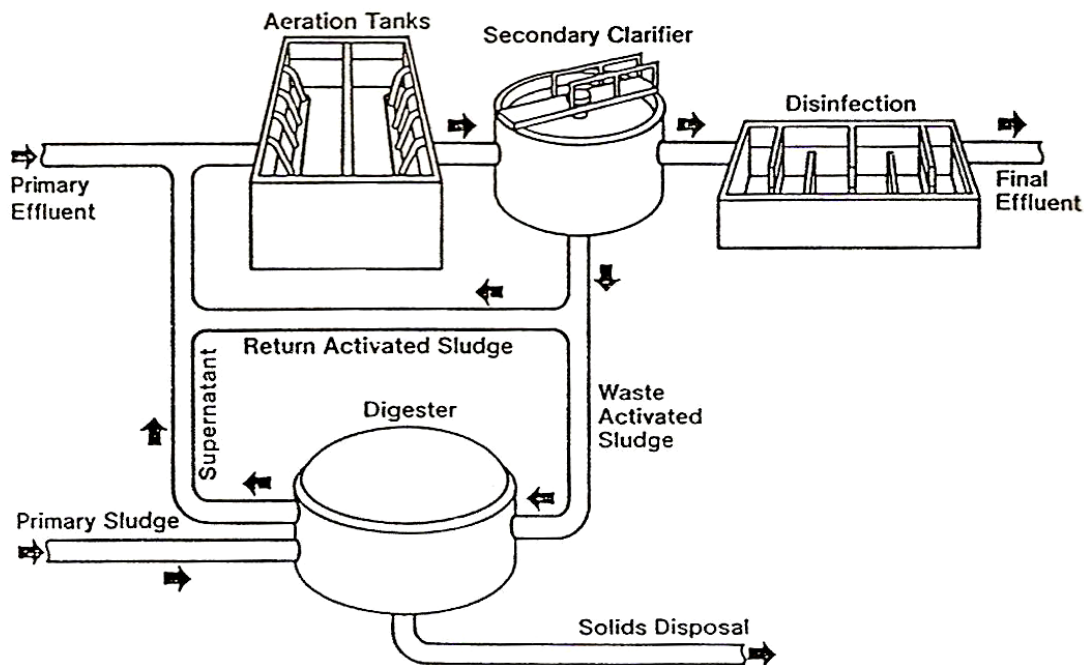
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการและทฤษฎีของระบบเอเอส (Activated sludge)

ระบบเอเอส เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยสิ่งมีชีวิต ได้แก่ พวกจุลินทรีย์ทั้งหลายในการกิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียให้มีความสกปรกน้อยลง โดยอาศัยออกซิเจนในการสันดาป ในการควบคุมการทำงานจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อนและละเอียดอ่อน ต้องเข้าใจความต้องการของจุลินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่างๆ ที่เหมาะสมในการเจริญเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ดีที่สุด

##### 2.1.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบเอเอส

ส่วนประกอบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสประกอบด้วยกระบวนการย่อยที่สำคัญหลายกระบวนการมารวมกัน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (ธีระ เกรอด, 2539)



น้ำเสียเมื่อผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นซึ่งเป็นการบำบัดทางกายภาพเพื่อขจัดของขนาดใหญ่ เช่น เศษผ้า กระดาษ กรวด ทราวย เป็นต้น แล้วก็จะไหลเข้าถังเติมอากาศ (Aeration tank) ซึ่งถังเติมอากาศถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของระบบนี้ โดยในถังเติมอากาศจะมีเครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้แก่ น้ำเสีย และผสมน้ำเสียน้ำกับจุลินทรีย์ให้ทำปฏิกิริยาด้านชีวเคมีในการกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำเสีย ทำให้ระบบสามารถกำจัดสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำเสียได้ประมาณร้อยละ 90 ซึ่งส่วนที่ถูกกำจัดไปส่วนใหญ่ ได้แก่ พวกรวมสารอินทรีย์

น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอน (Secondary clarifier) เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำใส ส่วนที่สำคัญของถังตกตะกอน คือ การขจัดของแข็งตกตะกอนได้ หรือแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสีย ทั้งนี้เพื่อให้ น้ำที่ผ่านถังตกตะกอนออกไปแล้วมีคุณภาพที่ดี เช่น มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยต่ำ มีค่าบีโอดีต่ำ เป็นต้น และหลังแยกตะกอนจุลินทรีย์โดยการตกตะกอนออกจากน้ำทิ้งแล้วตะกอนที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังบางส่วนจะถูกสูบกลับ (Return sludge) ไปเข้ายังถังเติมอากาศเพื่อลดมลสารที่เข้ามาใหม่ และเพื่อรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ซึ่งจะมีผลทำให้การทำงานของระบบขึ้นอยู่กับการหมุนเวียนจุลินทรีย์กลับสู่ระบบอย่างเพียงพอ ตะกอนจุลินทรีย์อีกส่วนหนึ่งจะเป็นตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินที่เป็นผลจากการเจริญเติบโตซึ่งจะต้องนำไปบำบัด สำหรับน้ำใสส่วนบนจะเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วทิ้งออกจากระบบได้

ส่วนการนำตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน (Excess sludge) ที่เกิดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ออกจากระบบเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำสม่ำเสมอเพื่อรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าพอเหมาะ ซึ่งเป็นหลักสำคัญในการควบคุมการทำงานของระบบเอเอสให้มีอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) ที่สมดุล อันจะยังผลให้อาหารหรือมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียสามารถกำจัดให้หมดไปหรือมีค่าเหลืออยู่น้อย เพื่อให้อาหารเป็นตัวจำกัดในการเจริญเติบโต (Food limiting factor)

### 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ (สุรพล สายพานิช, 2538)

การควบคุมระบบต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบ เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจัยดังกล่าวได้แก่

#### 1. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในระบบเอเอส ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดย

อาจจะทำให้มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์สูง (มีอาหารมาก) ทำให้จำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีลักษณะการเติบโตกระจายอยู่ทั่วไป (Dispersed growth) แทนที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ดี (Floc) เป็นผลให้ตกตะกอนได้ไม่ดี น้ำออกขุ่น และมีค่าสารอินทรีย์หรือบีโอดีเหลืออยู่สูง หรืออาจจะเกิดขึ้นในทำนองตรงกันข้ามคือ มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ต่ำ (มีอาหารน้อย) จนทำให้จำนวนจุลินทรีย์เจริญเติบโตลดน้อยลง ซึ่งถึงแม้ตะกอนจุลินทรีย์จะตกตะกอนได้เร็วแต่ก็ไม่สามารถจับตะกอนเล็กๆ ตกลงมาได้หมด ทำให้น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนขุ่น

## 2. อาหารเสริม (Nutrients)

จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก การขาดอาหารเสริมที่สำคัญเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก (Floc) เติบโตได้ไม่ดีจนทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใย (Filamentous) เจริญเติบโตได้มากกว่า ซึ่งจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนได้ยาก และเกิดเป็นชั้นตะกอนอัดขึ้นมาสูงในถังตกตะกอน และอาจล้นไหลออกมากับน้ำทิ้งจนระบบไม่สามารถทำงานต่อไปอีกได้ นอกจากนั้นการที่จุลินทรีย์หลายชนิดเจริญเติบโตได้ไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานต่างๆ ของระบบต่ำลงอีกด้วย ปกติจะควบคุมให้ บีโอดี 100 กิโลกรัม ต้องมีไนโตรเจน 5 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส 1 กิโลกรัม และเหล็ก 0.5 กิโลกรัม การเติมไนโตรเจนมักจะใส่ลงไปในรูปแบบของแอมโมเนียหรือยูเรีย สำหรับฟอสฟอรัสจะใส่ลงไปในรูปแบบของกรดฟอสฟอริก และใส่เหล็กในรูปแบบของเฟอร์ริกคลอไรด์

## 3. ออกซิเจนละลายน้ำ

ในถังเติมอากาศจะต้องมีค่าออกซิเจนละลายน้ำระหว่าง 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณของอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้รักษาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำนี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูง จุลินทรีย์สามารถทำงานได้มากก็ต้องการออกซิเจนมาก นอกจากนั้นที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนจะมีค่าการละลายน้ำอิ่มตัว (Saturation value) ต่ำ จึงทำให้ต้องให้ออกซิเจนมากเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังเติมอากาศสูง ในทำนองกลับกันหากอุณหภูมิน้ำต่ำก็ทำให้มีความต้องการเติมอากาศน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงในการที่จะรักษาระดับความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำที่ค่าเท่ากัน

## 4. ระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในถังเติมอากาศ จะต้องมีพอเพียงที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่างๆ หากมีระยะเวลาต่ำเกินไปสารที่ย่อยยากๆ จะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้าย ทำให้ค่าบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก สำหรับระยะเวลาในถังตกตะกอนขั้นที่สองก็เช่นเดียวกัน หากมีน้อยเกินไปก็จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนได้ไม่ดี แต่ถ้านานเกินไปก็จะทำให้ตะกอนเร่งขาดออกซิเจน และเน่าได้

## 5. ค่าพีเอช (pH)

เป็นค่าแสดงความเป็นกรด-ด่าง แเบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชระหว่าง 6.5-8.5 ถ้าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6.5 ว่าจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง และตกตะกอนได้ไม่ดี ส่วนที่ค่าพีเอชสูงจะทำให้ฟอสฟอรัสแยกตัวออกมาจากน้ำ (Precipitate) และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ระบบทำงานได้ไม่ดีเช่นกัน แต่ถ้าพีเอชมีค่าต่ำมากหรือสูงมากจุลินทรีย์จะตายหมด ไม่สามารถดำรงชีพต่อไปได้

## 6. สารพิษ

สารพิษแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกคือ แบบพิษเฉียบพลัน (Acute toxicity) สามารถสังเกตได้ง่ายเนื่องจากมีผลเกิดขึ้นรวดเร็ว จุลินทรีย์จะตายหมดภายในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง สารพิษจำพวกนี้ได้แก่ ไฮยาโนด์ อาร์เซนิก เป็นต้น และแบบพิษออกฤทธิ์ช้า (Chronic toxicity) ซึ่งใช้เวลานาน และค่อยๆ ตาย สำหรับสารพิษออกฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดง และโลหะหนักต่างๆ จุลินทรีย์จะสะสมเอาไว้ภายในเซลล์จนเกิดเป็นพิษ และตายในที่สุด

นอกจากนั้นอาจเกิดจากสารอินทรีย์ก็ได้ เช่น แอมโมเนียซึ่งมีค่าความเข้มข้นสูงเกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น

## 7. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงาน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบเอเอส โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว จนถึงอุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นอุณหภูมิจะร้อนเกินไปจนจุลินทรีย์เจริญเติบโตน้อยลงอย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมียังมีผลต่อการทำงานในถังตกตะกอนชั้นที่สอง โดยพบว่าหากอุณหภูมิต่ำตกตะกอนจะตกได้ดีกว่าอุณหภูมิสูง และถ้าอุณหภูมิในถังตกตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันเกิน 2 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำ เนื่องจากมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่า การไหลเนื่องจากความหนาแน่น (Density current)

## 8. การกวน

การกวนภายในถังเติมอากาศจะต้องมีการกวนอย่างทั่วถึง เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอน และเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้ามาบำบัดโดยใช้เป็นอาหาร และลดมลสารต่างๆ รวมทั้งจะได้จับตัวกันเป็นฟล็อกที่ดี การกวนที่ถูกต้องจะป้องกันไม่ให้น้ำเสียไหลลัดวงจร และทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารสูง การกวนที่สมบูรณ์ในถังเติมอากาศแบบกวนสมบูรณ์ จะต้องมีความเข้มข้นของน้ำตะกอน และค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำสม่ำเสมอกันทั่วทั้งถัง

## 9. อัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ส่งมาเข้าระบบบำบัดมีผลโดยตรงต่อการทำงานของกระบวนการทางชีววิทยาและในถังตกตะกอน หากน้ำเสียมีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นจนทำให้มีระยะเวลาในการบำบัดน้อยลง มีค่าสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น และระยะเวลาในถังตกตะกอนชั้นที่สองลดลงด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง ส่วนอัตราการไหลที่น้อยเกินไปก็มีผลเสียเช่นเดียวกัน ดังนั้นควรมีการควบคุมให้มีการส่งน้ำเสียเข้ามามอบตัวอย่างสม่ำเสมอในอัตราที่ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ เช่น อาจจะทำเป็นบ่อพักเก็บกัก (Equalizing tank) เป็นต้น

### 2.1.3 วิธีการควบคุมการทำงานของระบบเอเอส

การควบคุมการทำงานของระบบเอเอสทำเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถบำบัดได้อย่างต่อเนื่อง และคุณภาพของน้ำที่บำบัดแล้วมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามกฎหมาย ซึ่งการควบคุมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

#### 1. วิธีควบคุมค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานจะต้องมีปริมาณอาหารที่พอเหมาะ ซึ่งควบคุมได้โดยการรักษาอัตราส่วนของน้ำหนักของสารอินทรีย์ที่ส่งเข้ามาบำบัดต่อน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของตะกอนแขวนลอย (MLSS) หรือตะกอนแขวนลอยระเหย (MLVSS) ให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ และเรียกค่าที่ใช้ควบคุมนี้ว่า ค่าอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to microorganism ratio, F/M) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{F}{M} = \frac{QBOD_5}{VMLSS} \quad (2.1)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)

BOD<sub>5</sub> = บีโอดี ของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (มก./ล.)

V = ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลบ.ม.)

MLSS = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ (มก./ล.)

ในการควบคุมการทำงานของระบบโดยใช้ค่า F/M จะเห็นได้ว่า ค่าอาหาร (F) หรือค่า บีโอดีในน้ำเข้านั้นไม่สามารถควบคุมหรือควบคุมได้น้อย ดังนั้นจึงต้องรักษาค่า F/M โดยการ

เปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) ซึ่งวัดในรูปของ MLSS หรือ MLVSS โดยการเพิ่มหรือลด การนำตะกอนส่วนเกินไปทิ้ง เช่น ถ้า F/M มีค่าสูง แสดงว่า M มีค่าน้อย จะต้องลดการนำตะกอน จุลินทรีย์ไปทิ้งเพื่อให้ M มีค่าสูงขึ้น และในทำนองกลับกันถ้า F/M มีค่าต่ำ ก็จะต้องเพิ่มการนำ ตะกอนจุลินทรีย์ไปทิ้งเพื่อลดค่า M ให้ต่ำลง

## 2. วิธีควบคุมค่าอายุตะกอน ( $\theta_c$ )

อายุตะกอน หมายถึง ระยะเวลาเฉลี่ยที่ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนอยู่ในระบบ (Mean cell residence time) เป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมการทำงาน ทั้งนี้เพราะอายุตะกอนมี ความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเอเอสทุกตัวเช่น MLSS ประสิทธิภาพในการบำบัด น้ำเสีย อัตราการระบายตะกอนทิ้ง อัตราหมุนเวียนตะกอน เป็นต้น การควบคุมค่าอายุตะกอนให้มี ค่าคงที่จะทำให้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ หรือค่าการระบรทุกสารอินทรีย์มีค่าคงที่ตามไปด้วย ซึ่งค่าที่ควบคุมเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของน้ำทิ้ง การควบคุมจะต้องทดลองหาค่าอายุ ตะกอนที่เหมาะสมโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุตะกอนกับคุณภาพของน้ำเสีย เช่น บีโอดี ซีโอดี และตะกอนแขวนลอย แล้วเลือกค่าที่เห็นว่าดีที่สุด

จากคำจำกัดความของอายุตะกอนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\theta_c = \frac{XV}{X_r Q_w + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $\theta_c$  = อายุตะกอน, วัน  
 $Q_w$  = อัตราการทิ้งตะกอน, ลบ.ม./วัน  
 $Q$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน  
 $V$  = ปริมาตรถังเติมอากาศ, ลบ.ม.  
 $X$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศที่ต้องการ, มก./ล.  
 MLSS  
 $X_r$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ที่ไหลกลับเข้าถังเติมอากาศ, มก./ล.  
 MLSS  
 $X_e$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ล้นออกจากถังตกตะกอน,  
 มก./ล.

วิธีควบคุมการทำงานโดยใช้ค่าอายุตะกอนนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุด เพราะเป็นการควบคุมค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไปในตัว และสามารถคำนวณค่าของตะกอนที่นำไปทิ้งได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งวิธีการควบคุมก็ง่าย และไม่ต้องใช้การวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก

การควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงค่าอายุตะกอนทำได้โดยการปรับอัตราการนำตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินไปทิ้ง หากนำไปทิ้งมากค่าอายุตะกอนก็จะลดลง และหากนำไปทิ้งน้อยลงค่าอายุตะกอนก็จะเพิ่มมากขึ้น ในการปรับค่าอายุตะกอนแต่ละครั้งจะต้องใช้เวลาประมาณ 1-3 เท่าของค่าอายุตะกอนเพื่อให้ระบบปรับตัวให้อยู่ในสภาวะที่คงที่ และจะต้องติดตามคำนวณค่าน้ำหนักของ MLVSS ที่ใช้บำบัดน้ำเสียและปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องนำไปทิ้งทุกวันจนกว่าจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

#### 2.1.4 การออกแบบระบบเอเอส

##### 1. การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ

ปริมาณน้ำตะกอนจุลินทรีย์ได้มีการเพิ่มขึ้นในระบบเอเอส คือ มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งจะแสดงในรูปของสมการคณิตศาสตร์ คือ

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\mu$  = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์ (มก./มก.วัน)

$\mu_m$  = อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์ (มก./มก.วัน)

S = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในระบบ (มก./ล.)

$K_s$  = ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ ณ จุด 0.5  $\mu_m$  (มก./ล.)

##### 2. ค่าอายุตะกอน

ค่าอายุตะกอนภายในระบบเอเอสสามารถเขียนในรูปสมการที่ 2.2 และ 2.4 ถึง 2.6 คือ เป็นระยะเวลาที่นำตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในระบบเอเอส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการทำงานที่ตะกอนออกจากระบบ โดยอาจทิ้งตะกอนจากถังตกตะกอน หรือจากถังเติมอากาศ แล้วแต่ความเหมาะสมของระบบ

สมการหาค่า  $\theta_c$  จากการทิ้งตะกอนออกจากถังตกตะกอน

$$\theta_c = \frac{XV}{X_r Q_w + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.2)$$

ในกรณีที่ระบบเอเอสทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า  $X_e$  จะต่ำมาก เมื่อเทียบกับ  $X$  หรือ  $X_r$  ดังนั้น เทอม  $(Q - Q_w) X_e$  จะมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ สมการที่ 2.2 จะกลายเป็น

$$\theta_c = \frac{XV}{X_r Q_w} \quad (2.4)$$

สมการหาค่า  $\theta_c$  จากการทิ้งตะกอนออกจากถังเติมอากาศ

$$\theta_c = \frac{XV}{X Q_w + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อ  $X_e$  มีค่าน้อยมาก จะได้

$$\theta_c = \frac{XV}{X Q_w} = \frac{V}{Q_w} \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $\theta_c$  = อายุตะกอน, วัน  
 $Q_w$  = อัตราการทิ้งตะกอน, ลบ.ม./วัน  
 $Q$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน  
 $V$  = ปริมาตรถังเติมอากาศ, ลบ.ม.  
 $X$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศที่ต้องการ, มก./ล.  
 MLSS  
 $X_r$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ที่ไหลกลับเข้าถังเติมอากาศ, มก./ล.  
 MLSS  
 $X_e$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ล้นออกจากถังตกตะกอน, มก./ล.

สำหรับค่าอายุตะกอนต่ำสุดที่ระบบบำบัดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะแทนด้วยค่า  $\theta_c^m$  ซึ่งถ้ามีค่าอายุตะกอนต่ำกว่า  $\theta_c^m$  แสดงว่าจุลินทรีย์ถูกถ่ายเททิ้งออกเร็วเกินไปโดย จุลินทรีย์ อาจจะไม่ทันที่ได้ย่อยสลายอินทรีย์ย่อย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบเอสตกต่ำลงอย่างมากได้

สำหรับค่า  $\theta_c$  ที่นิยมเลือกใช้ในการออกแบบคือ  $\theta_c^d$  ซึ่งจะมีค่ามากกว่าค่าของ  $\theta_c^m$  โดยปกติค่า  $\theta_c^d$  ควรจะมีค่ามากกว่าค่า  $\theta_c^m$  อย่างน้อยประมาณ 4 เท่า ซึ่งบางครั้งอาจมีค่าถึง 20 เท่า หรือมากกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสียนั้นๆ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของระบบสามารถเขียนในรูปสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$X = \frac{Q\theta_c Y(S_0 - S)}{V(1 + k_d \theta_c)} \quad (2.7)$$

หรือ

$$X = \frac{\theta_c Y(S_0 - S)}{\tau(1 + k_d \theta_c)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $X$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ที่ควบคุมไว้ในระบบ, มก./ล.  
MLVSS

$Y$  = อัตราส่วนระหว่างจำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย, มก.MLVSS/มก.บีโอดี

$Q$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน

$V$  = ปริมาตรถังเติมอากาศ, ลบ.ม.

$\theta_c$  = อายุตะกอน, วัน

$S_0$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบ, มก./ล.

$S$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบหรือน้ำทิ้ง, มก./ล.

$k_d$  = ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของจุลินทรีย์, มก./มก.วัน

$\tau$  = เวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังเติมอากาศ ( $V/Q$ ), วัน



#### 4. อัตราการหมุนเวียนตะกอน ( $Q_r/Q$ )

เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของตะกอนหมุนเวียน ( $Q_r$ ) กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ ( $Q$ ) โดยสามารถหาได้สมการ 2.9 ถ้า  $Q_r/Q$  สูง เช่น 1.5 หมายความว่าขณะที่น้ำเสียไหลเข้าระบบสมมติ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สุกตะกอนหมุนเวียน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จึงมีน้ำเข้าถังตกตะกอนถึง 250 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังนั้นอัตราการหมุนเวียนตะกอนจะมีผลต่อถังตกตะกอนมาก ถ้าหมุนเวียนมากเกินไปการตกตะกอนอาจไม่สมบูรณ์เพราะมีน้ำเข้าถังมาก แต่ถ้าหมุนเวียนน้อยเกินไป ตะกอนอาจตกค้างก้นถังตะกอนนานจนเกิดสภาพไร้อากาศ จุลินทรีย์อาจไม่แข็งแรงได้

$$\frac{Q_r}{Q} = \alpha \quad ; \quad \alpha = \frac{1 - \left(\frac{\tau}{\theta_c}\right)}{\left(\frac{X_r}{X}\right) - 1} \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $Q_r$  = อัตราการไหลของตะกอนหมุนเวียน, ลบ.ม./วัน  
 $Q$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน  
 $\alpha$  = อัตราการหมุนเวียนตะกอน  
 $X$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศที่ต้องการ, มก./ล.  
 MLVSS  
 $X_r$  = ความเข้มข้นของน้ำตะกอนจุลินทรีย์ที่ไหลกลับเข้าถังเติมอากาศ, มก./ล.  
 MLVSS  
 $\theta_c$  = อายุตะกอน, วัน  
 $\tau$  = เวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังเติมอากาศ ( $V/Q$ ), วัน

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณออกแบบระบบเอเอสได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของระบบเอเอส แสดงดังตารางที่ 2.1 ค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบเอเอสแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 และ ค่าที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สองสำหรับระบบเอเอส แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของระบบเอเอสสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทโรโทรฟที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Metcalf และ Eddy, 2003)

ค่าสัมประสิทธิ์	หน่วย	ขอบเขต	ค่าทั่วไป
$\mu_m$	ก. VSS/ก. VSS.วัน	3.0-13.2	6.0
$K_s$	ก. bCOD/ลบ.ม.	5.0-40.0	20.0
Y	ก. VSS/ก. bCOD	0.30-0.50	0.40
$k_d$	ก. VSS/ก. VSS.วัน	0.06-0.20	0.12
$f_d$	-	0.08-0.20	0.15
$\theta$ value			
$\mu_m$	-	1.03-1.08	1.07
$k_d$	-	1.03-1.08	1.04
$K_s$	-	1.00	1.00

ตารางที่ 2.2 ค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบเอเอส (Metcalf และ Eddy, 2003)

กระบวนการ	ชนิดของถัง ปฏิกริยา	อายุตะกอน, วัน	F/M กก.บีโอดี/กก. MLVSS.วัน	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์		ตะกอน แขวนลอย (MLSS), มก./ล.	Total $\tau$ , ชั่วโมง	อัตราการเวียน ตะกอน,% ของ น้ำขาเข้า
				ปอนด์บีโอดี/1000 ลบ.ฟุต.วัน	กก.บีโอดี/ลบ.ม.วัน			
แบบ High-rate aeration	Plug flow	0.5-2	1.5-2.0	75-150	1.2-2.4	200-1000	1.5-3	100-150
แบบปรับเสถียรสัมผัส	Plug flow	5-10	0.2-0.6	60-75	1.0-1.3	1000-3000 <sup>(1)</sup>	0.5-1 <sup>(1)</sup>	50-150
						6000-10000 <sup>(2)</sup>	2-4 <sup>(2)</sup>	
แบบใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	Plug flow	1-4	0.5-1.0	80-200	1.3-3.2	2000-5000	1-3	25-50
แบบไหลตามยาว	Plug flow	3-15	0.2-0.4	20-40	0.3-0.7	1000-3000	4-8	25-75
แบบเติมน้ำเสียเป็นชั้น	Plug flow	3-15	0.2-0.4	40-60	0.7-1.0	1500-4000	3-5	25-75
แบบกวนผสมรูป	CMAS	3-15	0.2-0.6	20-100	0.3-1.6	1500-4000	3-5	25-100
แบบย่อยตัวเอง	Plug flow	20-40	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000	20-30	50-150
แบบคลองวนเวียน	Plug flow	15-30	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	3000-5000	15-30	75-150
แบบ Batch decant	Batch	12-25	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000	20-40	NA
แบบเติมและถ่ายออก	Batch	10-30	0.04-0.10	5-15	0.1-0.3	2000-5000	15-40	NA
แบบเติมอากาศแบบทวน กระแส	Plug flow	10-30	0.04-0.10	5-10	0.1-0.3	2000-4000	15-40	25-75

<sup>(1)</sup> ถังสัมผัส (Contact tank)

<sup>(2)</sup> ถังปรับเสถียร (Stabilization tank)

NA ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 2.3 ค่าที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สองสำหรับระบบเอเอส (Metcalf และ Eddy, 2003)

ชนิดของการบำบัด	อัตราการล้น (Overflow rate)				อัตราภาระของแข็ง (Solid loading)				ลึก, ม <sup>(1)</sup>
	แกลลอน/ตร.ฟุต.วัน		ลบ.ม./ตร.ม.วัน		ปอนด์/ตร.ฟุต.ชั่วโมง		กก./ตร.ม.ชั่วโมง		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	
ตกตะกอนตามด้วยระบบเอเอสแบบเติมอากาศ (ยกเว้น ระบบเอเอสแบบย่อยตัวเอง)	400-700	1000-1600	16-28	40-64	0.8-1.2	1.6	4-6	8	3.5-6
ถังคัดพันธุ์สำหรับกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ	400-700	1000-1600	16-28	40-64	1.0-1.5	1.8	5-8	9	3.5-6
ตกตะกอนตามด้วยระบบเอเอสแบบให้ ออกซิเจน	400-700	1000-1600	16-28	40-64	1.0-1.4	1.8	5-7	9	3.5-6
ตกตะกอนตามด้วยระบบเอเอสแบบย่อยตัวเอง	200-400	600-800	8-16	24-32	0.2-1.0	1.4	1.0-5	7	3.5-6
ตกตะกอนสำหรับกำจัดฟอสฟอรัส; ความ เข้มข้นในน้ำทิ้ง, มก./ล.									3.5-6
Total P = 2	600-800		24-32						
Total P = 1	400-600		16-24						
Total P = 0.2-0.5	300-500		12-20						

<sup>(1)</sup> ม x 3.2808 = ฟุต

**ตัวอย่างการคำนวณ** ระบบเอเอส ดังตกตะกอนชั้นที่สอง ถังไร้อากาศ และถังหมักตะกอนไร้อากาศ

<u>กำหนดให้</u>	อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย (Q)	0.5 L/h
	ซีโอดี (COD)	5,000 mg/L
	อุณหภูมิ (T)	30 °C
	อายุตะกอน ( $\theta_c$ )	10 d

ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของระบบเอเอส ใช้ข้อมูลในตารางที่ 2.1

ค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบเอเอสแบบต่างๆ ใช้ข้อมูลในตารางที่ 2.2

ค่าที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สอง ใช้ข้อมูลในตารางที่ 2.3

วิธีทำ จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 เลือกค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของระบบเอเอส ดังนี้

เลือก	$\mu_m$	=	6	gVSS/gVSS.d
	$k_d$	=	0.12	gVSS/gVSS.d
	$\theta_{\mu_m}$	=	1.07	
	$\theta_{k_d}$	=	1.04	
	$K_s$	=	40	mg/L
	Y	=	0.5	gVSS/gbCOD

คิดที่อุณหภูมิ 30 °C จากสมการของ Phelps;  $K_T = K_{20} \theta^{(T-20)}$

$$\begin{aligned} \mu_m &= 6 \times 1.07^{(30-20)} = 12 \quad 1/d \\ k_d \text{ หรือ } b &= 0.12 \times 1.04^{(30-20)} = 0.2 \quad 1/d \end{aligned}$$

ถังเติมอากาศ

อายุตะกอน ( $\theta_c$ ) 10 d

1. หา  $\mu$

$$\mu = (1/\theta_c) + b$$

แทนค่า

$$= (1/10) + 0.2$$

$$= 0.3 \quad 1/d$$

2. หา S

สมการที่ 2.3

$$\mu = \mu_m S / (K_s + S)$$

$$S = \mu K_s / (\mu_m - \mu)$$

แทนค่า

$$= (0.3 \times 40) / (12 - 0.3)$$

$$= 1 \quad \text{mgCOD/L}$$

3. หา  $\tau$ 

$$\text{สมการที่ 2.8} \quad X = \theta_c Y (S_0 - S) / [\tau (1 + b \theta_c)]$$

จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 เลือกระบบเอเอสแบบกวนผสมหมุน โดยให้  $X = 1,500-4,000$  mgMLSS/L (1,200-3,200 mgMLVSS/L)

$$\text{เลือก } X = 3,000 \text{ mgMLVSS/L}$$

$$\text{แทนค่า} \quad \tau = 10 \times 0.5 (5,000 - 1) / 3,000 [1 + 0.2 (10)]$$

$$= 2.78 \quad \text{d} \quad (\approx 70 \text{ h})$$

$$\text{ดังนั้นได้ } X \text{ จากการคำนวณ} = 10 \times 0.5 (5,000 - 1) / 2.78 [1 + 0.2 (10)]$$

$$= 2,997 \quad \text{mgMLVSS/L}$$

4. หา  $V$ 

$$V = \tau Q$$

$$= 70 \times 0.5$$

$$= 35 \quad \text{L}$$

5. อัตราการทิ้งตะกอนที่เติมอากาศ ( $Q_w$ )

$$\text{สมการที่ 2.6} \quad \theta_c = V / Q_w$$

$$Q_w = 35 / 10$$

$$= 3.5 \quad \text{L/d}$$

$$= 0.15 \quad \text{L/h}$$

$$= 0.0035 \quad \text{m}^3/\text{d}$$

6. อัตราการสูบตะกอนเวียนกลับ ( $Q_r$ )

$$X_r = 7,000-10,000 \text{ mgVSS/L} \quad \text{เลือก } 8,000 \text{ mgVSS/L}$$

$$\text{สมการที่ 2.9} \quad \alpha = 1 - (\tau / \theta_c) / [(X_r / X) - 1]$$

$$= 1 - (2.78 / 10) / [(8,000 / 3,000) - 1]$$

$$= 0.43$$

$$Q_r = \alpha Q$$

$$\text{แทนค่า} \quad = 0.43 \times 0.5$$

$$= 0.22 \quad \text{L/h}$$

### ถังตกตะกอนชั้นที่สอง

#### 1. อัตราการไหลเข้าถังตกตะกอน

$$\begin{aligned}
 Q + Q_r &= 0.5 + 0.22 && \text{L/h} \\
 &= 0.72 && \text{L/h} \\
 &= 17.2 && \text{L/d} \\
 &= 0.0172 && \text{m}^3/\text{d}
 \end{aligned}$$

#### 2. Organic loading rate

$$\begin{aligned}
 X &= (0.72 \times 3,000 \times 1) / (0.8 \times 1,000) \\
 &= 2.7 && \text{gMLSS/h}
 \end{aligned}$$

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 เลือกใช้ค่าในการออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สองแบบตกตะกอนตามด้วยระบบเอเอสแบบเติมอากาศ (ยกเว้น ระบบเอเอสแบบย่อยตัวเอง)

#### 3. Solid loading rate

$$\begin{aligned}
 \text{จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 เลือกใช้ } 4 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h} &= 4,000 \text{ g/m}^2\cdot\text{h} \\
 &= 2.7 / 4,000 \\
 &= 0.000672 && \text{m}^2 \\
 \text{Surface area req.} &= 6.72 && \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

#### 4. Overflow rate

$$\begin{aligned}
 \text{จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 เลือกใช้ } 16 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d} \\
 Q &= 0.012 && \text{m}^3/\text{d} \\
 \text{area req.} &= 0.012 / 16 \\
 &= 0.00075 && \text{m}^2 \\
 &= 7.5 && \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

#### 5. Retention time

$$\begin{aligned}
 \text{เลือก Retention time} &= 4 \text{ h} \\
 \text{ดังนั้น} & \quad V = \tau Q
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4 \times 0.5 \\
 &= 2 \quad \text{L} \\
 &= 0.002 \quad \text{m}^3 \\
 \\
 6. \text{ Weir loading rate} &= 248 \text{ m}^3/\text{m.d} \\
 \text{ความยาว Weir} &= Q / \text{Weir loading rate} \\
 &= 0.012 / 248 \\
 &= 4.8 \times 10^{-5} \quad \text{m}
 \end{aligned}$$

### ถังไร้อากาศ

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad V &= \tau Q \quad ; \quad Q = 0.5 \quad \text{L/h} \\
 \text{กำหนดให้ ถังไร้อากาศมี } \tau &= 1 \quad 3 \quad 6 \quad 12 \quad 24 \quad \text{และ} \quad 48 \quad \text{h} \\
 \text{ดังนั้น จะได้} \quad V &= 1 \times 0.5 = 0.5 \quad \text{L} \\
 &= 3 \times 0.5 = 1.5 \quad \text{L} \\
 &= 6 \times 0.5 = 3 \quad \text{L} \\
 &= 12 \times 0.5 = 6 \quad \text{L} \\
 &= 24 \times 0.5 = 12 \quad \text{L} \\
 &= 48 \times 0.5 = 24 \quad \text{L}
 \end{aligned}$$

### ถังหมักตะกอนไร้อากาศ

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad V &= \tau Q_w \quad ; \quad Q_w = 3.5 \quad \text{L/d} \\
 \text{กำหนดให้ ถังหมักตะกอนไร้อากาศมี} & \quad \tau = 14 \quad \text{d} \\
 \text{ดังนั้น จะได้} \quad V &= 14 \times 3.5 \\
 &= 49 \quad \text{L}
 \end{aligned}$$



### 2.1.5 ข้อดี และข้อเสียของระบบเอเอส (ธีระ เกรอต, 2539)

#### ข้อดีทั่วไป

1. ข้อดีที่สำคัญของระบบเอเอส คือ น้ำทิ้งที่ออกมีคุณภาพสูง เมื่อเทียบกับแบบบ่อเติมอากาศ สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายในปริมาณเท่ากัน โดยใช้ถึงปริมาณที่มีปริมาตรเล็กกว่ามาก ขณะที่ผลิตน้ำทิ้งที่เกือบไม่มีของแข็งแขวนลอย
2. การทำงานสามารถควบคุมได้ โดยปรับปริมาณการทิ้งของตะกอนก็สามารถปรับค่าอายุตะกอน เพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
3. ระบบเอเอสค่อนข้างมีความต้านทานต่อภาระเฉียบพลัน และสามารถผลิตน้ำทิ้งที่ยอมรับได้ เมื่อกระแสเข้าแบบพลวัต (Dynamic) แต่ถ้าอยู่ภายใต้สภาพคงตัวจะทำงานได้ดีกว่า
4. เนื่องจากมีปริมาตรน้อยกว่าบ่อเติมอากาศ ระบบเอเอสจะได้รับอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศน้อยกว่า จึงมีอุณหภูมิสม่ำเสมอกว่า แต่ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงก็อาจชดเชยด้วยการปรับค่าอายุตะกอน

#### ข้อเสียทั่วไป

1. ข้อเสียที่สำคัญเกี่ยวกับการควบคุม ความซับซ้อนของระบบทำให้ยุ่งยากต่อการควบคุมคุณภาพของน้ำทิ้งให้ได้ตามต้องการ
2. การสนองตอบต่อการเปลี่ยนแปลงกะทันหันค่อนข้างช้า จึงจำกัดการใช้วิธีการควบคุมอัตโนมัติบางแบบ
3. ค่าลงทุนและดำเนินการสูง

## 2.2 กระบวนการตกตะกอน

การตกตะกอน เป็นกระบวนการที่เกิดจากการเติมสารเคมีลงในน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์ และสารแขวนลอย รวมตัวกันเข้ายึดเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น

อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด  $10^{-6}$ - $10^{-3}$  มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองในเวลาจำกัด การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่ตกตะกอน จึงเรียกว่าเป็นคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง คอลลอยด์สามารถจำแนกได้ตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค และสารตัวกลางเป็น 2 ชนิด คือ พวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับสารตัวกลางในที่นี้คือน้ำที่มีกำลังแรง เช่น โปรตีน สบู่ ผงซักฟอก ดังนั้นจึงแยกออกจากน้ำได้ยาก ต้องใช้แรงมากในการทำให้อนุภาคต่างๆ นั้นมาจับเป็น

กลุ่มเป็นก้อน เพราะมีโมเลกุลน้ำห่อหุ้มอยู่ ส่วนอีกชนิดหนึ่งคือ พวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) พวกนี้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำที่มีกำลังอ่อน เช่น ดินเหนียว เป็นอนุภาคที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย เพราะไม่มีโมเลกุลของน้ำเป็นสิ่งที่กีดขวาง (Eckenfelder, 1989)

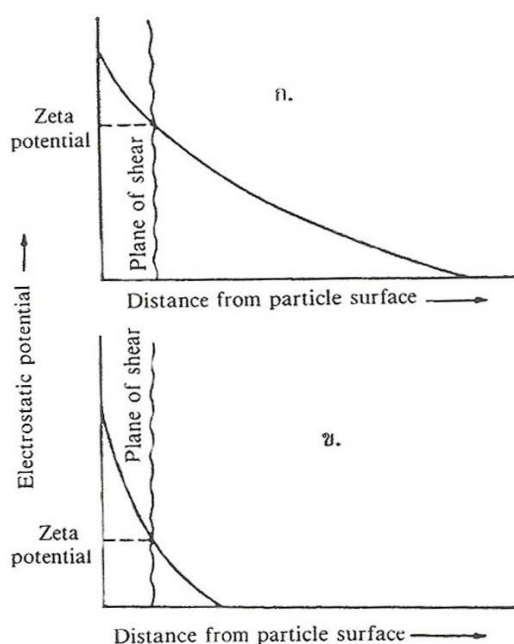
มันสิน ตันฑุลเวศม์ (2542) ได้กล่าวถึงเสถียรภาพของคอลลอยด์ และการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ไว้ว่า การที่อนุภาคคอลลอยด์ สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ซึ่งอาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเรียกว่าฟล็อก ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ในน้ำอนุภาคคอลลอยด์จะมีแรงกระทำซึ่งกันและกันอยู่ 2 ชนิด คือ แรงดูตระหว่างอนุภาค (Van der waals force) เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนอีกแรงคือ แรงผลักทางไฟฟ้า (Electrical repulsive force) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ผิวของอนุภาคมีประจุชนิดเดียวกัน จึงเกิดการผลักกัน บทบาทของแรงทั้งสองมีผลต่อเสถียรภาพของคอลลอยด์ แรงผลักจะต้องสูงกว่าแรงดูต จึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูตมากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อน หรือที่เรียกว่าฟล็อกได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้ง 2 ชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ แต่ถ้าหากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าสูง หรือมีชั้นกระจาย (Diffuse layer) หนาจะทำให้แรงผลักสูงกว่าแรงดูต

การให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นฟล็อก ควรมี 2 ขั้นตอน คือ

1. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย ทำโดยการเพิ่มจำนวนประจุตรงข้าม (Counter ion) ในชั้นกระจาย ประจุตรงข้ามจะไปปกกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มากขึ้น ทำให้อำนาจของประจุของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ผลที่เกิดขึ้น คือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วยแสดงดังรูปที่ 2.2 อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันได้มากขึ้นจนแรงดูตมีค่ามากกว่าแรงผลักทำให้อนุภาคเกาะกันได้

1.2 การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization) เป็นการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ และสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์



รูปที่ 2.2 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์  
 ก) ก่อนเติมไอออน ข) หลังเติมไอออน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

1.3 ห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep coagulation) เป็นการเติมสารประกอบเกลือโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอให้มีการตกผลึกเกิดขึ้น โดยอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกหรืออาจจับตัวรวมกับผลึกก็ได้ เป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้อนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ ปริมาณสารที่ใช้จะแปรผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ เนื่องจากความเข้มข้นของคอลลอยด์ต่ำทำให้มีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย แม้ว่าจะทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้ว แต่การตกตะกอนอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้สารในปริมาณสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้อนุภาคคอลลอยด์

1.4 การใช้สารโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) โดยใช้สารโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาก โมเลกุลของโพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง เป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ปลายอิสระของโพลิเมอร์จะเกาะกับอนุภาคอื่นทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอน

2. ต้องทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ที่หมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัส และเกาะจับกันเป็นกลุ่มเป็นก้อนจึงจะถือว่าเกิดฟล็อกคูเลชัน (Flocculation)

**2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน** (ธีรวิโรจน์จันทร์ชนะ, 2542; กุลลดา บันลือวงศ์, 2544)

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้

1. ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ ดังนั้น ถ้าหากทราบชนิดของคอลลอยด์ จะได้เลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม

2. ชนิดของสารที่ใช้ตกตะกอน สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์ต่างชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำ ลักษณะของฟล็อก ความเร็วในการตกตะกอน ราคา ความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์ และสารที่ใช้ในการตกตะกอน

3. พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเพียงพีเอชหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดไม่อยู่ในช่วงพีเอชนี้ ผลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นไม่ดี จึงต้องปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการของสารเคมี

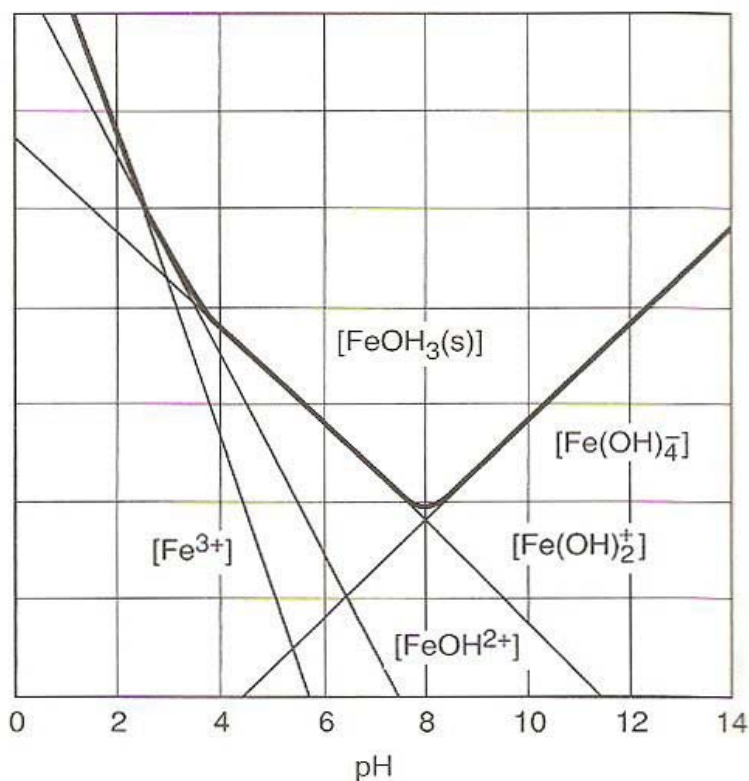
4. ปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน มีความสำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการตกตะกอน เพราะธรรมชาติของสารใดก็ตามถ้าค่าผลคูณไอออนโปรดัก (Ion product) ไม่เกินค่า  $K_{sp}$  (ค่าคงที่ในการละลาย) ของสารนั้นแล้ว สารนั้นจะไม่ตกผลึกตะกอนออกมาในน้ำ แต่ถ้าเกินค่า  $K_{sp}$  มักจะตกตะกอนผลึกทันที ดังนั้น ปริมาณสารที่ช่วยในการตกตะกอนจะต้องเหมาะสมต่อการตกตะกอนในแต่ละครั้ง ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคคอลลอยด์กลับมีเสถียรภาพใหม่ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

5. เวลาและความแข็งแรงของการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัว การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรวดเร็วด้วยเวลาอันสั้น เพื่อสารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยได้ทั่วถึงและยังเป็นการช่วยประหยัดเวลาอีกด้วย เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาศัยเวลาน้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนั้น ถ้าการใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอน จำเป็นต้องใช้การกวนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ตะกอน

แต่ถ้าจะใช้เวลานานขึ้นเพื่อเปิดโอกาสให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสลอยมาสัมผัสซึ่งกันและกัน ได้มากที่สุด

### 2.2.2 สารช่วยตกตะกอน (Coagulant)

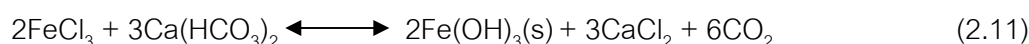
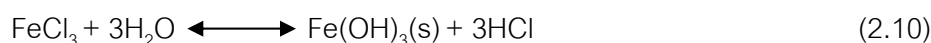
เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride) เป็นสารช่วยตกตะกอนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{FeCl}_3$  anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และมีรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง สามารถตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอชกว้าง 4-11 แสดงดังรูปที่ 2.3 ปกติจะละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำดิบในรูปของสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรด และกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) โดยตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์จะมีน้ำหนักช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน และยังสามารถลดขนาดถังตกตะกอนได้ (Ebeling และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์

(Metcalf และ Eddy, 2003)

เฟอริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้น จะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตในน้ำตะกอน และเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับไบคาร์บอเนต (มันลิน ตันกุลเวศม์, 2542) ดังนี้



ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารเคมีชนิดนี้ คือ สามารถสร้างตะกอนกับน้ำที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ได้ดี

Mohammad และ Shaban (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบเอเอสของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษโดยใช้เฟอริกคลอไรด์พบว่า ที่ช่วงพีเอช 3.8-6.2 ความเข้มข้น 600-700 พีพีเอ็ม มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 95

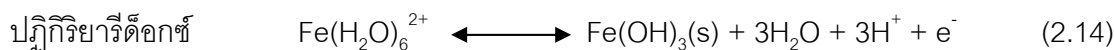
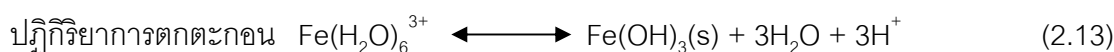
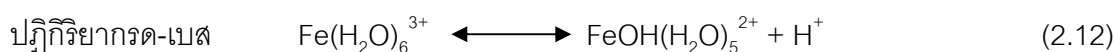
Amuda และ Amoo (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มด้วยเฟอริกคลอไรด์พบว่า ที่พีเอช 9 ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้ร้อยละ 91 99 และ 97 ตามลำดับ

Andrianisa และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารหนู ( $\text{As}$ ) โดยใช้คลองวนเวียน (Oxidation ditch) พบว่า  $\text{As}^{3+}$  (Arsenite) จะถูกออกซิไดส์เป็น  $\text{As}^{5+}$  (Arsenate) หลังจากที่มีการให้ออกซิเจน และ  $\text{As}^{5+}$  จะถูกรีดิวซ์เป็น  $\text{As}^{3+}$  ในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน และภายในท่อเวียนตะกอน ส่วนน้ำทิ้งที่มี  $\text{As}^{5+}$  ตกค้างอยู่ จะทำการตกตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์แล้วพบว่า เฟอริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูมากกว่าร้อยละ 95

จะเห็นได้ว่าเฟอริกคลอไรด์นั้นเป็นสารช่วยตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ความขุ่น ฟอสฟอรัส และสารพิษพวกโลหะหนัก เป็นต้น และสามารถตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอช กว้าง

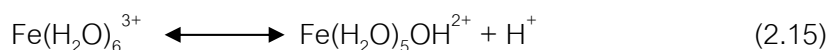
### 2.3 เหล็ก

เหล็กในธรรมชาติจะปรากฏตัวได้หลายรูปแบบที่เรียกว่า ไอออนเหล็กอิสระ (Free ionic species) เช่น เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เป็นรูปแบบที่ไม่เสถียร การเพิ่มความเสถียรให้กับตัวเองนั้น ไอออนเหล็กเหล่านี้จะใช้โอเล็กตรอนวงนอกสุดสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลชนิดอื่นเช่น โมเลกุลของน้ำที่แสดงคุณสมบัติของความเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนได้รุนแรงกว่า เพราะเหตุนี้ไอออนของเหล็กในน้ำจึงมักปรากฏตัวในรูปของไฮเดรตไอออน (Hydrates ion) คือ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_x^{n+}$  และอาจทำให้ตัวเองมีความเสถียรมากขึ้นด้วยการเกิดปฏิกิริยาในหลายรูปแบบเช่น

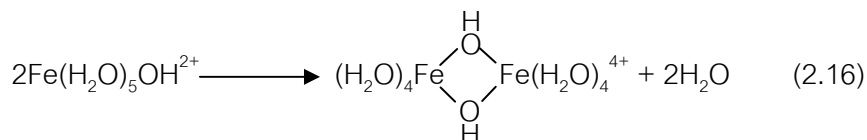


ปฏิกิริยาเหล่านี้ คือ กระบวนการที่ทำให้ไอออนของเหล็กในน้ำเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบที่เสถียรมากกว่าเดิม แต่จะเกิดปฏิกิริยาแบบไหนขึ้นอยู่กับว่าเหล็กปรากฏตัวอยู่ในรูปแบบ (Species) ใด ตามปกติแล้วนอกจากจะอยู่ในรูปของไฮเดรตไอออนเช่น  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  หรือไฮดรอกซีสปีชีส์ (Hydroxy species) เช่น  $\text{FeOH}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$  แล้วยังอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้กับไอออนลบของสารอนินทรีย์หรือกับสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (Organometallic) ได้อีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วเหล็กในรูปแบบของไฮเดรตไอออนที่มีประจุ +3 มีแนวโน้มที่จะเสียโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) ออกจากโมเลกุลของน้ำที่อยู่ล้อมรอบ หรือแสดงความเป็นกรดออกมา ดังสมการ



กลุ่มไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) ที่เกาะอยู่กับไอออนของเหล็ก อาจทำหน้าที่เชื่อมโมเลกุลของเหล็กเข้าด้วยกันอีกดังสมการ



สารประกอบเหล็กที่เกิดขึ้นอาจเป็นโพลีเมอร์ได้ จากสมการตัวอย่างนี้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อได้อีก กล่าวคือ โมเลกุลของน้ำในไดเมอร์อาจเสียโปรตอนออกมาทำให้เกิดไฮดรอกซิลสปีซีขึ้นในไดเมอร์ หรืออีกนัยหนึ่งคือ เพิ่มความสามารถในการสร้างพันธะกับไอออนของเหล็กจนเกิดเป็นโพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมขึ้น ถ้าขบวนการดังกล่าวยังดำเนินต่อไปอีกก็จะเกิดเป็นสารประกอบคอลลอยด์ (Colloidal hydroxyl polymer) ซึ่งมีขนาดใหญ่จนเกิดการตกตะกอน สิ่งที่ตกตะกอนออกมา คือ สารประกอบไฮเดรตเฟอริกออกไซด์ (Hydrated iron(III) oxide) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x(\text{H}_2\text{O})$  สารประกอบนี้มีชื่อทั่วไปว่า เฟอริกไฮดรอกไซด์เหมือนกับสารประกอบที่มีสูตร  $\text{Fe}(\text{OH})_3$

## 2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนค่าเลขออกซิเดชัน (Oxidation number) หรือเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชัน หรือมีการให้อิเล็กตรอนเรียกว่าเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) เมื่อมีการลดเลขออกซิเดชัน หรือมีการรับอิเล็กตรอนเรียกว่าเกิดรีดักชัน (Reduction) ทั้งสองปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันเมื่อมีการออกซิเดชันต้องมีรีดักชันปฏิกิริยาจึงจะสมบูรณ์ สารที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยา คือ สารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นสารอินทรีย์ ส่วนสารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมักเป็นสารอื่นๆที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน ไนเตรต หรือซัลเฟต เป็นต้น การถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะได้พลังงานเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง พลังงานที่เกิดขึ้นนี้ส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน อีกส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้การดำรงชีวิต และสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นสารอินทรีย์จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงาน และแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ แต่สารรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียมีหลายชนิด ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ต่างกันไปตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอน เช่น ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Aerobic oxidation ถ้าสารรับอิเล็กตรอนเป็นไนเตรตก็จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้น เป็นต้น สามารถแบ่งชนิดของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของแบคทีเรียออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามสารรับอิเล็กตรอน (มันสัน ตันจุลเวศม์, 2546) คือ



1. การหมัก (Fermentation) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่ไม่มีสารรับอิเล็กตรอนภายนอก

2. การหายใจ (Respiration) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีสารรับอิเล็กตรอนภายนอกเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ซึ่งสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก 2 ประเภท

2.1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration) เป็นการหายใจที่มีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย

2.2 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) เป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย สารรับอิเล็กตรอน ได้แก่ ไนเตรต ซัลเฟต หรือคาร์บอนไดออกไซด์

#### 2.4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (Reduction potential)

การถ่ายเทพลังงานในสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง สารแต่ละชนิดจึงมี 2 รูป คือ รูปออกซิไดส์ (Oxidized form) และรูปรีดิวซ์ (Reduced form) ดังสมการ



สมการข้างต้นเรียกว่า ครึ่งปฏิกิริยา (Half-reaction) เพราะแสดงถึงเฉพาะปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน โดยสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารเรียกว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (Reduction potential) ถ้าวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เรียกว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Reduction potential,  $E^0$ ) ส่วนที่สภาวะอื่นสามารถคำนวณ  $E$  ได้จากสมการเนิร์นสต์ (Nernst equation) (Lagrega, 2001; Benjamin, 2002) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 2.4

$$E = E^0 - \frac{2.303RT}{nF} \log \frac{[\text{oxidized form}]}{[\text{reduced form}]} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $E$  = ความต่างศักย์ครึ่งปฏิกิริยาใดๆ (โวลต์)

$E^0$  = ความต่างศักย์ครึ่งปฏิกิริยามาตรฐาน (โวลต์)

- n = จำนวนอิเล็กตรอนอิกิวาเลนต์ต่อโมล
- F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 23.061 กิโลแคลอรีต่ออิกิวาเลนต์โวลต์
- R = ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ  $1.987 \times 10^{-3}$  กิโลแคลอรีต่อโมลเคลวิน
- T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

ตารางที่ 2.4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ดัดแปลงจาก Lagrega, 2001)

Reaction	$E^0$ , volts
$O_2(aq) + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.27
$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^- \longrightarrow N_2(g) + 6H_2O$	+1.24
$Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$	+0.77
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \longrightarrow H_2S(g) + 4H_2O$	+0.34
$CO_2(g) + 8H^+ + 8e^- \longrightarrow CH_4(g) + 2H_2O$	+0.17

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่างๆ กัน สารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานน้อยหรือมีค่าเป็นลบจะมีแนวโน้มที่จะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับสารที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสูงกว่าหรือมีค่าเป็นบวก สารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานน้อยหรือเป็นลบจึงทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน หรือตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ในขณะที่สารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานมากหรือเป็นบวกจึงทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน หรือ ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent)

จากตารางที่ 2.4 เมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานมาเรียงตามลำดับพบว่า ออกซิเจนจะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานมากที่สุด คือ +1.27 โวลต์ ส่วนไนเตรต เฟอร์ริกไอออน ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ +1.24 +0.77 +0.34 และ +0.17 ตามลำดับ ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นสารรับอิเล็กตรอนที่ดีที่สุด จุลินทรีย์จึงเลือกใช้ออกซิเจนก่อน เพราะการใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนจะได้พลังงานสูงกว่า ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มอื่น เช่น กลุ่มที่ใช้ไนเตรตหรือซัลเฟตไม่สามารถเจริญเติบโตและแย่งใช้สารอินทรีย์ในน้ำได้ แม้ว่าน้ำในบริเวณนั้นจะมีไนเตรตหรือซัลเฟตอยู่ก็ตาม ส่วนในสภาวะไร้อากาศลำดับการเป็นสารรับ

อิเล็กตรอนตัวสุดท้ายนั้นจะลดลงตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (Boyd, 1995) เมื่อออกซิเจนในน้ำลดลงเนื่องจากออกซิเจนจากอากาศแพร่ลงไปได้น้อยลงและจากการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์กลุ่มอื่นจะเจริญเติบโตขึ้นมาแทนที่ โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ในเตรตเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะเป็นกลุ่มต่อไปที่เจริญเติบโตขึ้นมา เนื่องจากการใช้ในเตรตเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายได้พลังงานรองลงมาจากออกซิเจน เช่นเดียวกันในบริเวณที่ในเตรตเริ่มหมดไป จุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้เฟอริกไฮดรอกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะเป็นกลุ่มต่อไปที่เจริญเติบโตขึ้นมา เนื่องจากเฟอริกไฮดรอกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายที่ได้พลังงานรองจากออกซิเจน และในเตรต และในบริเวณที่เฟอริกไฮดรอกไซด์เริ่มหมดไป จุลินทรีย์กลุ่มอื่น ได้แก่ พวกที่ใช้ซัลเฟต คาร์บอนไดออกไซด์ และสารอินทรีย์เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะเจริญเติบโตขึ้นมาแทน (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2546)

#### 2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta G^0$ และ $\Delta E^0$

สารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่างกันจะสามารถถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้แก่กันได้ รูปรีดิวซ์ของสารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานน้อยจะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับรูปออกซิไดส์ของสารที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสูงกว่า ปฏิกริยาคู่ควบ (Coupled reaction) ระหว่างครึ่งปฏิกิริยาจะให้ความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานดังสมการ

$$\Delta E^0 = E^0 (\text{Acceptor}) - E^0 (\text{Donor}) \quad (2.19)$$

ผลต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน ( $\Delta E^0$ ) สามารถนำไปคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยา (Benjamin, 2002) ได้ดังสมการ

$$\Delta G^0 = -nF \Delta E^0 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\Delta G^0$  = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (กิโลแคลอรีต่อโมล)

$\Delta E^0$  = ผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของสารให้อิเล็กตรอน และสารรับอิเล็กตรอน (โวลต์)

n = จำนวนอิเล็กตรอนอิกิวาเลนต์ต่อโมล

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 23.061 กิโลแคลอรีต่ออิกิวาเลนต์  
โวลต์

ความหมายของค่า  $\Delta G$  (Dolfing และคณะ, 2006)

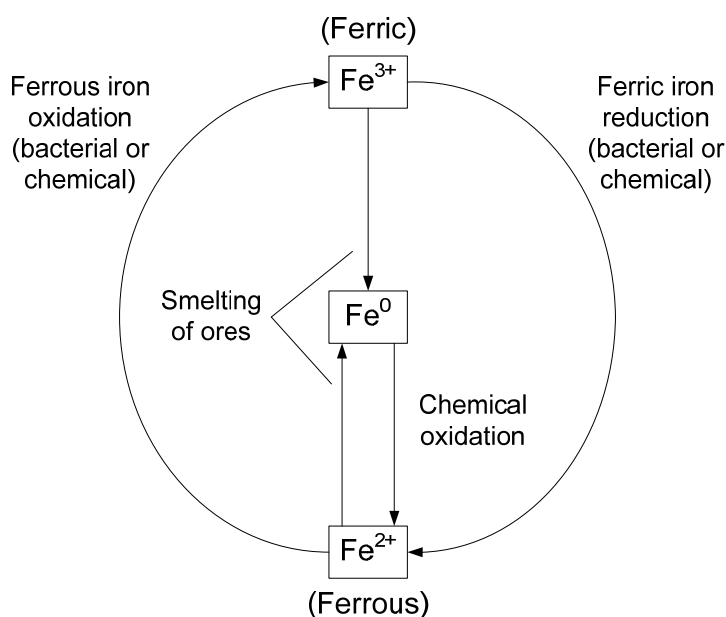
ค่า  $\Delta G$  ไม่สามารถนำมาใช้ในการบอกความเร็วของการเกิดปฏิกิริยา แต่สามารถบอก  
ลักษณะของปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ 3 แบบ คือ

1. เมื่อ  $\Delta G = 0$  แสดงว่าปฏิกิริยาอยู่ที่สมดุล
2. เมื่อ  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบ ( $\Delta G < 0$ ) แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน  
(Exergonic reaction) ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้ด้วยตนเอง ไม่ต้องอาศัยพลังงานจาก  
ภายนอกหรือจากสิ่งแวดล้อม และสามารถปล่อยพลังงานออกมาให้ใช้ได้
3. เมื่อ  $\Delta G$  มีค่าเป็นบวก ( $\Delta G > 0$ ) แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานเป็น  
(Endergonic reaction) ปฏิกิริยาไม่สามารถดำเนินไปได้ด้วยตนเอง จะเกิดได้ต้องอาศัยพลังงาน  
จากภายนอก หรือจากสิ่งแวดล้อม หรือจะต้องเกิดคู่กับปฏิกิริยาคายพลังงาน เพื่อให้ผลรวม  
ของ  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบ

จากสมการจะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาที่มีค่า  $\Delta E^0$  ที่เป็นบวก จะให้ค่า  $\Delta G^0$  เป็นลบซึ่ง  
จะเป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน สามารถที่จะเกิดได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก แต่  
ปฏิกิริยาที่มีค่า  $\Delta E^0$  เป็นลบ จะให้ค่า  $\Delta G^0$  เป็นบวกซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน ปฏิกิริยาไม่  
สามารถเกิดขึ้นได้จะต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก

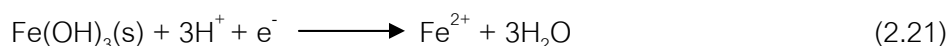
### 2.4.3 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของเหล็กในน้ำ

ปฏิกิริยารีดอกซ์มีความสำคัญมากทั้งกับน้ำธรรมชาติและน้ำเสีย โดยปฏิกิริยารีดักชัน  
ของเฟอร์ริกไอออนสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยาเคมีและในกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้  
ออกซิเจน และปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออนสามารถเกิดขึ้นทั้งในปฏิกิริยาเคมี และ  
เคโมลิโทโทรฟิคเมแทบอลิซึมเช่นเดียวกัน ส่วน  $Fe^0$  เป็นเพียงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกิจกรรมของ  
มนุษย์จากการถลุงสินแร่เหล็ก (Smelting of iron ores) (Canfield และคณะ, 2005; Madigan  
และ Matinko, 2006) โดยปฏิกิริยารีดอกซ์ของเหล็กแสดงดังรูปที่ 2.4

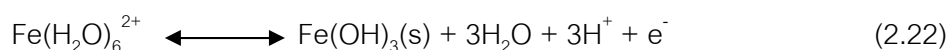


รูปที่ 2.4 ปฏิกริยารีดอกซ์ของวัฏจักรเหล็ก (Madigan และ Matinko, 2006)

ปฏิกริยารีดอกซ์นี้ทำให้เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนรูปไปเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้ ดังสมการ



โดยทั่วไปแล้วการเกิดปฏิกริยารีดอกซ์มักเกิดร่วมกับการแลกเปลี่ยนโปรตอน เช่น ถ้าเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 7 ก็จะมีการเสียโปรตอนด้วย และเกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ขึ้น ดังสมการ



ช่วงพีเอชที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติที่ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 5-9 แสดงว่า เหล็กที่พบอาจอยู่ในรูปแบบของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ หรือเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ก็ได้ และในน้ำธรรมชาติมักมีออกซิเจนละลายอยู่มาก เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จึงเป็นเหล็กเพียงรูปแบบเดียวที่พบในน้ำทำให้น้ำนั้นมีปริมาณเหล็กที่แขวนลอยอยู่สูง ส่วนเหล็กที่อยู่ในรูปของสารละลายถ้ามีอยู่มักจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ในน้ำที่มีออกซิเจนต่ำมาก (High anaerobic) เช่น ในน้ำบาดาลอาจมี

ปริมาณเฟอร์รัสไอออนอยู่มาก เมื่อน้ำชนิดนี้สัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศก็จะเกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์

นอกจากนี้ ปฏิกริยารีดอกซ์สามารถเกิดจากปฏิกิริยาทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญ คือ แบคทีเรียเหล็ก (Iron bacteria) (Canfield และคณะ, 2005) สามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม ดังนี้

#### 1. Iron-oxidizing bacteria

การเกิดออกซิเดชันในสภาวะที่มีอากาศของเหล็กจากเฟอร์รัสไอออนเป็นเฟอร์ริกไอออนเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยโปรคาริโอตได้รับพลังงานน้อย ดังนั้น Iron-oxidizing bacteria จึงต้องออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนจำนวนมากในการเจริญเติบโต ซึ่งเฟอร์ริกไอออนจะถูกสร้างจากตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ในน้ำ และที่พีเอชเป็นกลางภายใต้สภาวะที่มีอากาศเฟอร์รัสไอออนจะถูกออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกไอออนอย่างรวดเร็วโดยปฏิกิริยาทางเคมี และจะใช้เวลานานกว่าในปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Loveley, 2000)

ตัวอย่างแบคทีเรียที่ออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนที่อยู่ในรูปละลายน้ำให้เป็นเฟอร์ริกไอออนที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ โดยใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอน ได้แก่ *Gallionella* sp. *Leptothrix* sp. และ *Sphaerotilus* sp. เป็นต้น

#### 2. Iron-reducing bacteria

ในธรรมชาติมีจุลินทรีย์จำนวนมากที่สามารถใช้เฟอร์ริกไอออนเป็นสารรับอิเล็กตรอนได้ การรีดักชันของเฟอร์ริกไอออนนี้จะเกิดขึ้นทั่วไปในบริเวณที่ไม่มีอากาศเช่น ดินที่เต็มไปด้วยน้ำ ปลักตม เป็นต้น การเคลื่อนที่ของเหล็กจากบริเวณที่ไม่มีอากาศมายังบริเวณที่มีอากาศนี้จะเกิดเฟอร์รัสไอออนขึ้นเป็นจำนวนมาก และเฟอร์รัสไอออนจะถูกออกซิไดส์โดยปฏิกิริยาทางเคมีหรือโดยแบคทีเรียเหล็กเกิดเป็นตะกอนของสารประกอบเหล็กที่มีสีน้ำตาลดังสมการ



ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ Nonbiological substance เช่น ฮิวมิก (Humic) ได้ในการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนกลับมาเป็นเฟอร์รัสไอออน และจะกลับมาอยู่ในรูปที่ละลายน้ำอีกครั้งโดย Iron-reducing bacteria จะใช้เฟอร์ริกไอออนเป็นสารรับอิเล็กตรอน

ตัวอย่างแบคทีเรียที่รีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำให้เป็นเฟอร์รัสไอออนที่อยู่ในรูปละลายน้ำได้ในสภาวะที่ไม่มีอากาศ โดยใช้เฟอร์ริกไอออนเป็นสารรับอิเล็กตรอน ได้แก่ *Shewanella* sp. และ *Geobacter* sp. เป็นต้น

## 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ikemoto และคณะ (2002) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของเหล็กโดยใช้ Activated sludge จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนมาทดลองภายใต้สภาวะไร้อากาศ-มีอากาศแบบแบตช์ (Batch) พบว่า ในสภาวะที่มีอากาศเฟอร์รัสไอออนจะออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกไอออนทันที โดยอัตราการเกิดออกซิเดชันของเหล็กเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเหล็กเริ่มต้น ส่วนในสภาวะไร้อากาศเฟอร์ริกไอออนจะถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์รัสไอออน ซึ่งอัตราการเกิดรีดักชันของเหล็กนั้นเป็นไปตามสมการโมโนด (Monod equation)

Wilén และคณะ (2004) ทำการศึกษาถึงความสำคัญของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศต่อการเกิดกระบวนการรีฟลอคคูเลชัน (Reflocculation) และผลของสับสเตรทที่ใส่เข้าไปเพื่อความสามารถในการเกิดรีฟลอคคูเลชัน ในการทดลองจะใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียทดลองแบบแบตช์ (Batch) ในสภาวะที่มีอากาศ 1 ชั่วโมง ไร้อากาศ 2-3 ชั่วโมง และเติมอากาศและสับสเตรท 1-2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ตะกอนจุลินทรีย์จะเกิดดีฟลอคคูเลชัน (Deflocculation) ภายใต้สภาวะไร้อากาศ และจะเกิดการรีฟลอคคูเลชันหลังจากที่มีการเติมอากาศ 1-2 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อใส่ Azide หรือ Chloramphenicol ลงไปพบว่า จุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศถูกยับยั้ง ทำให้รีฟลอคคูเลชันเกิดลดลง แต่ดีฟลอคคูเลชันสามารถเกิดได้ดี ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศจึงมีความสำคัญต่อการเกิดรีฟลอคคูเลชัน นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อการเกิดรีฟลอคคูเลชัน พบว่า ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส รีฟลอคคูเลชันจะเกิดลดลงเนื่องจากกิจกรรมทางชีวภาพถูกยับยั้ง

การเกิดรีฟลอคคูเลชันสามารถเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออนเป็นเฟอร์ริกไอออน โดยเฟอร์รัสไอออนจะเกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศในเวลา 2 ชั่วโมง และจะถูกออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกไอออนในเวลา 2-3 ชั่วโมง หลังเติมอากาศ

เมื่อเติมสับสเตรทที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ กลูโคส เอทานอล อะซิเตต และแลคเตต ลงไประหว่างการเกิดรีฟลอคคูเลชัน เพื่อกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศ พบว่า กลูโคส

และเอทานอล มีส่วนช่วยให้รีฟล็อกคูเลชันเกิดขึ้น แต่อะซิเตต และแลคเตตทำให้รีฟล็อกคูเลชันเกิดลดลง เนื่องจากการตอบสนองของกลุ่มจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันในตะกอน

Liang และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดี และสีจากน้ำเสียจากน้ำตาลที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ-เติมอากาศโดยใช้เพอริคลอไรด์ พบว่า ที่พีเอชมากกว่า 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี และสีมากที่สุด เช่น พีเอช 8 ปริมาณเพอริคลอไรด์ 3.5 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีไอดี และสีได้ร้อยละ 86 และร้อยละ 96 ตามลำดับ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความขุ่น และความเข้มข้นของเพอริคลอไรด์ที่คงค้างในน้ำที่ได้จากการทำโคแอกกูเลชัน พบว่า สามารถลดความขุ่นให้เหลือในน้ำได้น้อยกว่า 5 เอ็นทียู และไม่พบความเข้มข้นของเพอริคลอไรด์คงค้างในน้ำ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากไอออนของโลหะสามารถจับกับความขุ่นแล้วรวมตัวกันเป็นฟล็อกตกตะกอนหมด

Xu และคณะ (2009) ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำกลับสารส้ม (Alum) จากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันน้ำประปา และการนำกลับมาใช้ซ้ำในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นทางเคมี ด้วยวิธีทำให้เป็นกรด โดยทำการทดลองกับตะกอนจากการทำน้ำประปา และตะกอนจากน้ำเสีย พบว่า เมื่อนำสารส้มที่ได้จากการนำกลับจากน้ำประปามาใช้ร่วมกับสารส้มที่ถูกนำกลับจากการบำบัดน้ำเสีย สารส้มที่นำกลับนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ฟอสฟอรัสทั้งหมด และซีไอดีได้เท่ากับร้อยละ 96 94 และ 53 ตามลำดับ ดังนั้นการนำกลับสารส้มสามารถนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยวิธีทางเคมีได้ และประสิทธิภาพของสารส้มที่ถูกนำกลับนี้ยังสามารถที่จะกำจัดมลสารต่างๆ ได้เทียบเท่ากับสารส้มที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้ซ้ำ



## 2.6 สรุปพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2.5 สรุปพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	งานวิจัย
ขนาดถังไร้อากาศ	- Wilén และคณะ (2004) ใช้เวลาในการเปลี่ยนเฟอริกไอออนเป็นเฟอร์สไอออน 2 ชั่วโมง ในสภาวะไร้อากาศ	- ทำการเปลี่ยนระยะเวลาเก็บน้ำในถังไร้อากาศ 1 3 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง
การนำกลับสารช่วยตกตะกอน	- Xu และคณะ (2009) นำกลับสารส้มด้วยวิธีทำให้เป็นกรด	- ทำการนำกลับเฟอริกคลอไรด์ด้วยถังไร้อากาศ

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

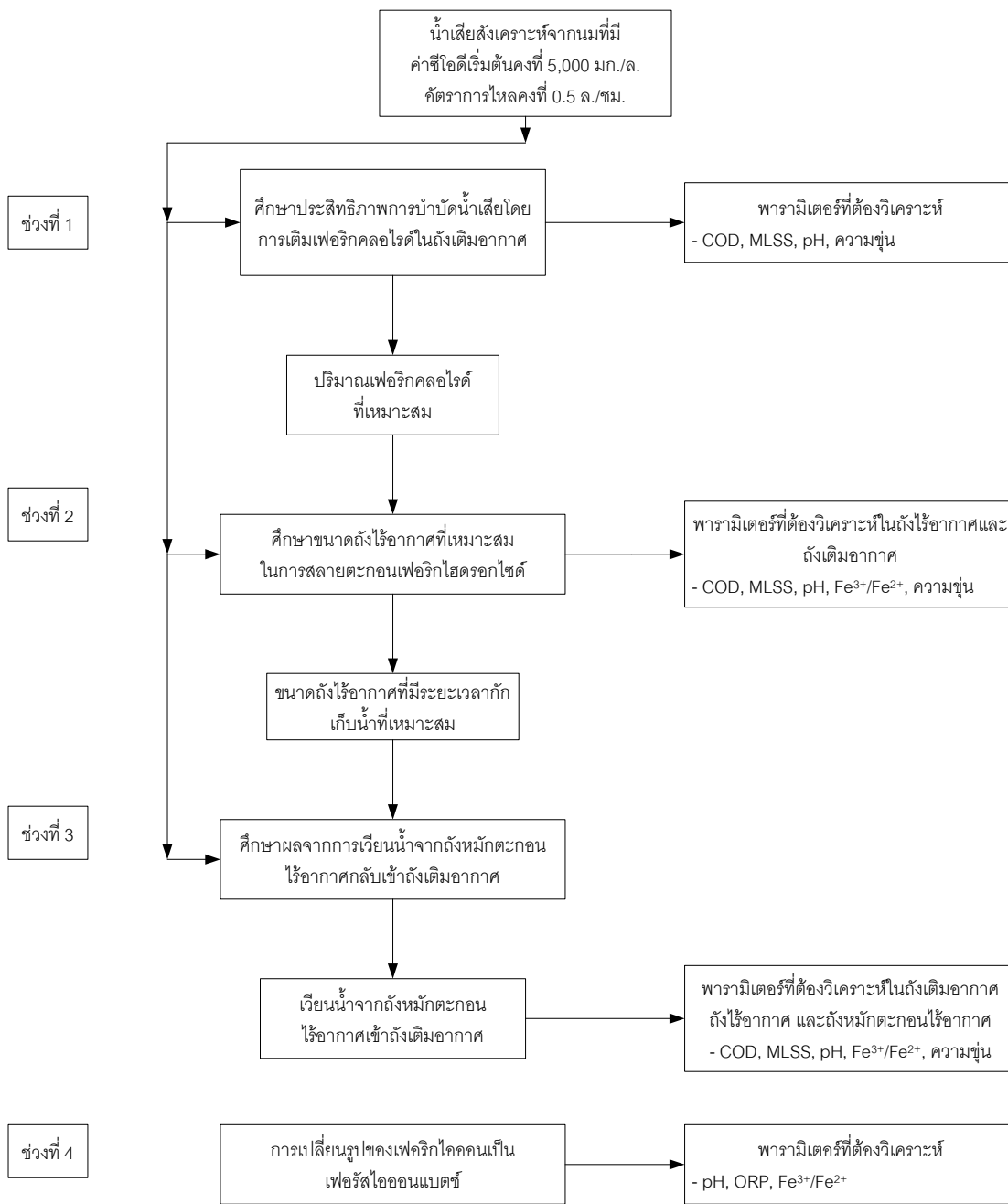
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางลดการใช้สารช่วยตกตะกอนเฟอริกคลอไรด์โดยการเพิ่มหน่วยบำบัดซึ่งเป็นถังไร้อากาศเพิ่มเติมจากระบบเอเอสโดยตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์จะถูกสลายในถังไร้อากาศ และสร้างขึ้นใหม่ในถังเติมอากาศ การศึกษานี้ครอบคลุมถึงการหาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ผลจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ ตลอดจนการเปลี่ยนรูปของเฟอริกไอออนเป็นเฟอร์รัสไอออนในถังหมักตะกอนไร้อากาศแบบแบตช์ เพื่อลดปริมาณการใช้เฟอริกคลอไรด์ และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งขั้นตอนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ช่วง แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

#### การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

การทดลองช่วงนี้จะทำการเริ่มต้นเดินระบบเอเอส (รายละเอียดอยู่ในขั้นตอนการทดลอง) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว นำน้ำทิ้งที่ได้จากระบบไปวิเคราะห์หาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ และนำมาเติมลงในถังเติมอากาศใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด

#### การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสม ในการสลายตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์

น้ำเสียและตะกอนจากถังตกตะกอนจะถูกเวียนกลับมาเข้าถังไร้อากาศขนาดต่างๆ กัน (1-48 ชั่วโมง) โดยเฟอริกคลอไรด์จะถูกเติมเข้าถังไร้อากาศนี้ เพื่อศึกษาการสลายตัวของตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ถังเติมอากาศ โดยที่ถังตะกอนส่วนเกินไปในถังหมักตะกอนไร้อากาศ และศึกษาการเปลี่ยนรูปของเฟอริกไอออน/เฟอร์รัสไอออนในถังไร้อากาศ เพื่อหาขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาสมดุลของ เฟอริกไอออน/เฟอร์รัสไอออนในระบบ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัย

### การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษาผลจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

เมื่อได้ขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ เพื่อนำเฟอร์รัสไอออนกลับเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น และลดปริมาณการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ในระบบ

### การทดลองช่วงที่ 4 การเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออนเป็นเฟอร์รัสไอออนแบบแบตช์

การทดลองช่วงนี้จะนำน้ำตะกอนจากถังเติมอากาศที่เป็นส่วนประกอบของตะกอนจุลินทรีย์ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มาศึกษาการเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออนเป็นเฟอร์รัสไอออนในถังไร้อากาศแบบแบตช์เทียบกับเวลา เพื่อเป็นแนวทางในการหาขนาดของถังหมักตะกอนไร้อากาศที่เหมาะสม และทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อเพื่อติดตามการเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออน/เฟอร์รัสไอออนทางชีวภาพ

## 3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. ถังพักน้ำเสีย

ถังพักน้ำเสียที่ใช้เป็นถังพลาสติกที่มีปริมาตรความจุประมาณ 30 ลิตร สำหรับเก็บน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

#### 2. เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบและเครื่องสูบตะกอนกลับ

เครื่องสูบน้ำเสียที่ใช้เป็นแบบไดอะแฟรม (Diaphragm pump) โดยมีอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้เครื่องสูบแบบปริดสาย (Peristaltic pump) เพื่อสูบตะกอนกลับเข้าระบบ โดยปรับอัตราการไหลเวียนกลับของตะกอนเท่ากับ 0.22 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องสูบน้ำ (ก) แบบไดอะแฟรม (ข) แบบปริดสาย

3. ถังปฏิกริยา ขนาดของถังปฏิกริยาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.4-3.6 ซึ่งประกอบด้วย

### 3.1 ถังไร้อากาศ (Anaerobic tank)

ถังไร้อากาศที่ใช้เป็นถังระจก มีขนาดความกว้าง 0.2 เมตร ความยาว 0.182 เมตร ความลึก 0.659 เมตร และระยะพื้นน้ำ 0.131 เมตร มีปริมาตร 24 ลิตร คิดเป็นระยะเวลากักเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง และทำการลดขนาดโดยการกั้นภายในให้มีปริมาตร 12 6 3 1.5 และ 0.5 ลิตร คิดเป็นระยะเวลากักเก็บน้ำ 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ

### 3.2 ถังเติมอากาศ (Aerobic tank)

ถังเติมอากาศที่ใช้เป็นถังระจกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีปริมาตรความจุ 35 ลิตร มีขนาดความกว้าง 0.2 เมตร ความยาว 0.35 เมตร ความลึก 0.54 เมตร และระยะพื้นน้ำ 0.25 เมตร

### 3.3 ถังตกตะกอน (Secondary clarifier)

ถังตกตะกอนที่ใช้เป็นถังระจกมีปริมาตรความจุ 2 ลิตร ทรงบริเวณก้นถังเป็นรูปสามเหลี่ยมเพื่อให้ตะกอนจุนทรีย์ตกตะกอนได้ดี มีขนาดความกว้าง 0.152 เมตร ความยาว 0.1 เมตร ความลึก 0.19 เมตร และระยะพื้นน้ำ 0.25 เมตร

### 3.4 ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (Anaerobic digester)

ถังหมักตะกอนไร้อากาศที่ใช้เป็นถังระจกมีปริมาตรความจุ 49 ลิตร มีขนาดความกว้าง 0.152 เมตร ความยาว 0.432 เมตร ความลึก 0.746 เมตร และระยะพื้นน้ำ 0.044 เมตร

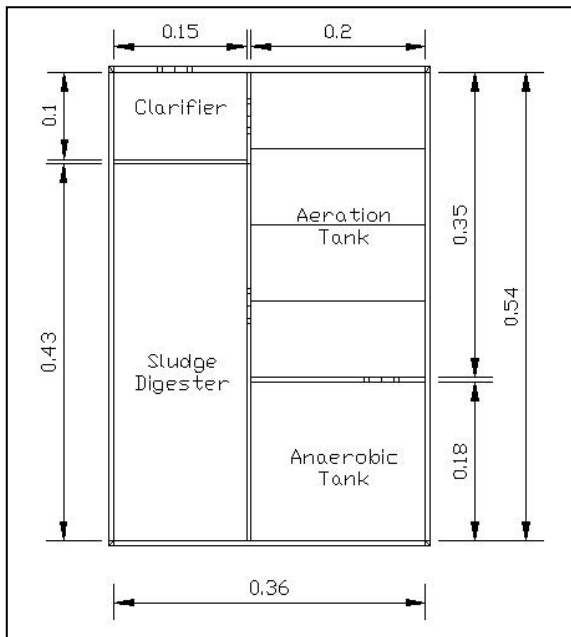
## 4. ถังรับน้ำทิ้งจากถังตกตะกอน

ถังรับน้ำทิ้งจากถังตกตะกอนที่ใช้เป็นถังพลาสติกมีปริมาตรความจุ 30 ลิตร

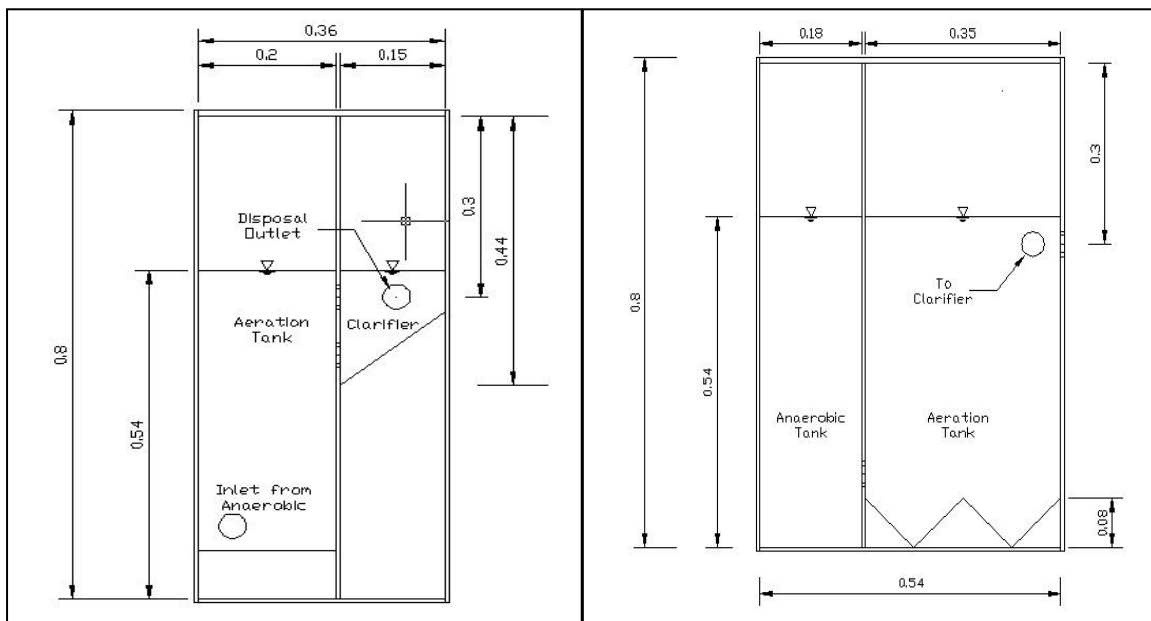
## 5. หัวพ่นอากาศและเครื่องเติมอากาศ ดังรูปที่ 3.3 โดยทำการเติมอากาศตลอดเวลา



รูปที่ 3.3 เครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 3.4 ขนาดทางด้านบนของถังปฏิบัติการ



รูปที่ 3.5 ขนาดทางด้านข้างของถังปฏิบัติการ

รูปที่ 3.6 ขนาดทางด้านหน้าของถังปฏิบัติการ

### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

1. ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying oven)
2. กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

4. เครื่องวัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter)
5. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
6. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter)
7. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
8. เครื่องเขย่า (Shaker)
9. ชุดปั๊มสุญญากาศ
10. เทอร์โมมิเตอร์แบบแท่ง (Thermometer)
11. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
12. หลอดเนสเลอร์ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
13. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปิเปต ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ

### 3.2.3 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ )
2. สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ )
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)
5. เมอร์คิวริกซัลเฟต ( $HgSO_4$ )
6. เมอร์คิวริกคลอไรด์ ( $HgCl_2$ )
7. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
8. กรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) ชนิด Glacial
9. สารละลายไฮดรอกซีลามีเนอ ( $NH_2OH.HCl$ )
10. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ( $NH_4C_2H_3O_2$ )
11. สารละลายฟีนานโทโรลีน ( $C_{12}H_8N_2.H_2O$ )
12. สารละลายสต็อกเหล็ก (Stock Iron Solution)
13. สารละลายมาตรฐานเหล็ก (Standard Iron Solution)
14. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ )
15. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ )

### 3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากนมรสจืด ยี่ห้อโฟร์โมสต์ ซึ่งกำหนดให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ใช้นมประมาณ 360 มิลลิตรต่อน้ำ 15 ลิตร ต่อการเตรียมแต่ละครั้ง จากนั้นจึงนำมาเติมไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ ) เพื่อปรับให้ค่าพีเอชประมาณ 8 โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นนี้จะทำการเปลี่ยนถ่ายทุกๆ วัน และล้างถังพักน้ำเสีย เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นภายในถัง ทำให้พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง

หมายเหตุ: ปริมาณนมที่ใช้แต่ละครั้งอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากนมแต่ละขวดที่ใช้มีค่าซีโอดีไม่เท่ากัน

#### 3.3.2 ลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มเดินระบบ

ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้เริ่มต้นเดินระบบเอเอสนี้ เป็นตะกอนจากก้นถังตกตะกอน โดยได้รับความอนุเคราะห์จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง กรุงเทพมหานคร ลักษณะตะกอนจะมีสีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.7 โดยผลการวิเคราะห์พบว่ามีความลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าเป็นสองเท่าของค่าของแข็งระเหยง่าย เนื่องจากอาจมีตะกอนอื่นที่ไม่ใช่ตะกอนอินทรีย์อยู่สูง

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มเดินระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์ <sup>(1)</sup>
ของแข็งแขวนลอย (MLSS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	35,355±616
ของแข็งระเหยง่าย (MLVSS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	17,865±337

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 4 ครั้ง





รูปที่ 3.7 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มเดินระบบ

### 3.3.3 การเริ่มเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ใช้อากาศจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงแบบต่อเนื่องโดยจะใส่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ทราบปริมาณของแข็งระเหยง่ายแล้วประมาณ 5 ลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากนมประมาณ 30 ลิตร ลงในถังเติมอากาศที่มีขนาด 35 ลิตร ทำการเติมอากาศตลอดเวลา จากนั้นทำการป้อนน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับด้วยไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแล้วอย่างต่อเนื่องเข้าถังเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่า sCOD จนกว่า sCOD จะลดลงจนคงที่

### 3.3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

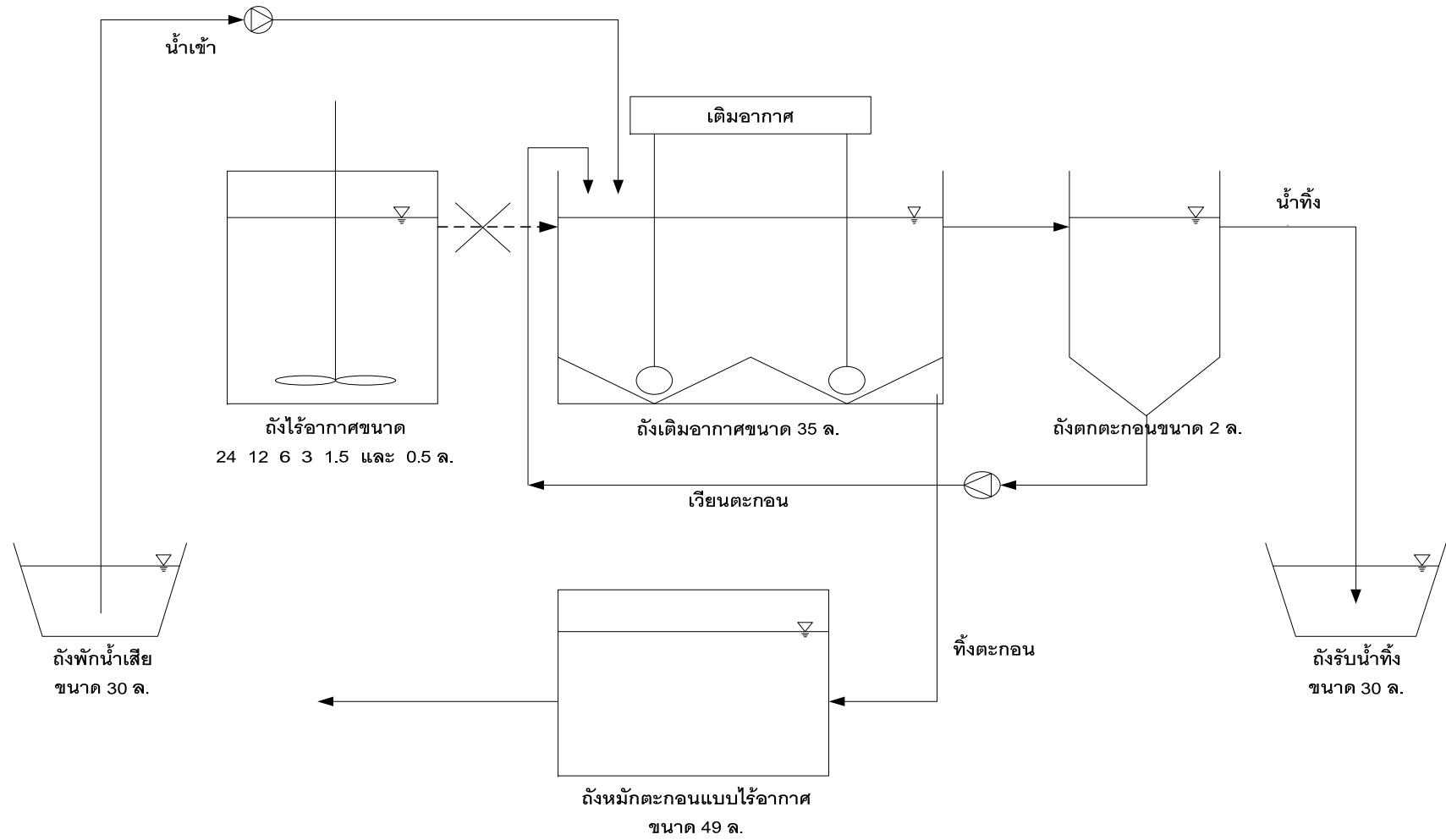
**การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ**

การทดลองช่วงที่ 1 นี้ยังไม่มีถังไร้อากาศ โดยจะสูบน้ำเสียสังเคราะห์จากถังพักน้ำเสียอย่างต่อเนื่องเข้าถังเติมอากาศขนาด 35 ลิตร ด้วยอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง (เวลากักเก็บน้ำ 70 ชั่วโมง) ควบคุมพีเอชในถังเติมอากาศให้มีค่าประมาณ 8 ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 1,500-4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอายุตะกอน 10 วัน ซึ่งควบคุมโดยระบายน้ำตะกอนทิ้งจากถังเติมอากาศด้วยอัตราการทิ้งตะกอน 3.5 ลิตรต่อวัน ลงในถังหมักตะกอนไร้อากาศที่มีขนาด 49 ลิตร น้ำในถังเติมอากาศจะไหลเข้าถังตกตะกอนขนาด 2 ลิตร (เวลากักเก็บน้ำ 4 ชั่วโมง) และเวียนตะกอนกลับเข้าถังเติมอากาศใหม่ด้วยอัตราการเวียนตะกอนประมาณ 0.22 ลิตรต่อ

ชั่วโมง ส่วนน้ำที่บำบัดแล้วจะไหลเข้าถังรับน้ำทิ้ง ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำน้ำทิ้งมาวิเคราะห์หาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นด้วยวิธีจาร์เทสต์ และนำปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่ได้นี้มาเติมลงในถังเติมอากาศ แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากถังเติมอากาศ และน้ำทิ้งจากถังตกตะกอน เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยการเติมเฟอริกคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.2 และแผนภูมิแสดงแผนการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.9

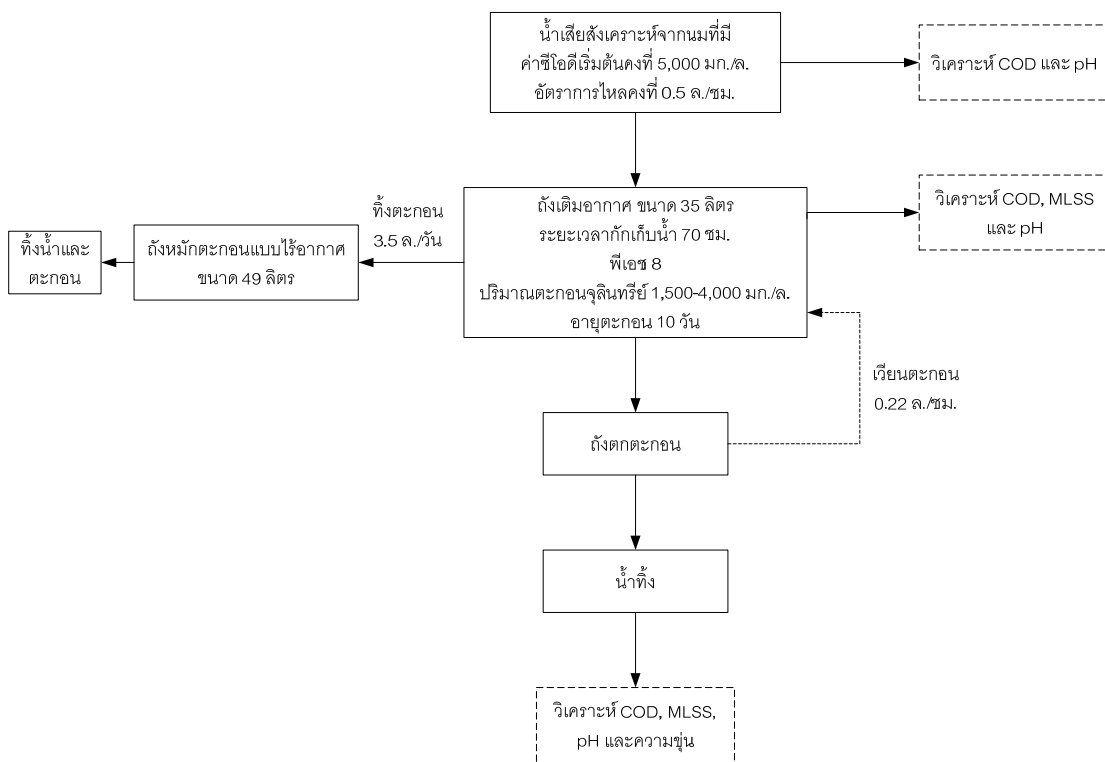
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณเฟอริกคลอไรด์	- ค่าที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทสต์
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ	- 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
2. ระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังเติมอากาศ	- 70 ชั่วโมง
3. น้ำเสียสังเคราะห์	- เตรียมจากนม
4. ซีไอดีเริ่มต้นของน้ำเสีย	- 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์	- 1,500-4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. อายุตะกอน	- 10 วัน
7. พีเอช	- 8
8. อัตราการสูบตะกอนเวียนกลับ	- 0.22 ลิตรต่อชั่วโมง
9. อัตราการทิ้งตะกอน	- 3.5 ลิตรต่อวัน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ซีไอดี	- Close Reflux Method
2. ตะกอนแขวนลอย (MLSS)	- GF/C Filter
3. พีเอช	- Electrometric Method
4. ความขุ่น	- Turbidimeter
5. เฟอริกไอออน/เฟอรัสไอออน	- Phenanthroline Method

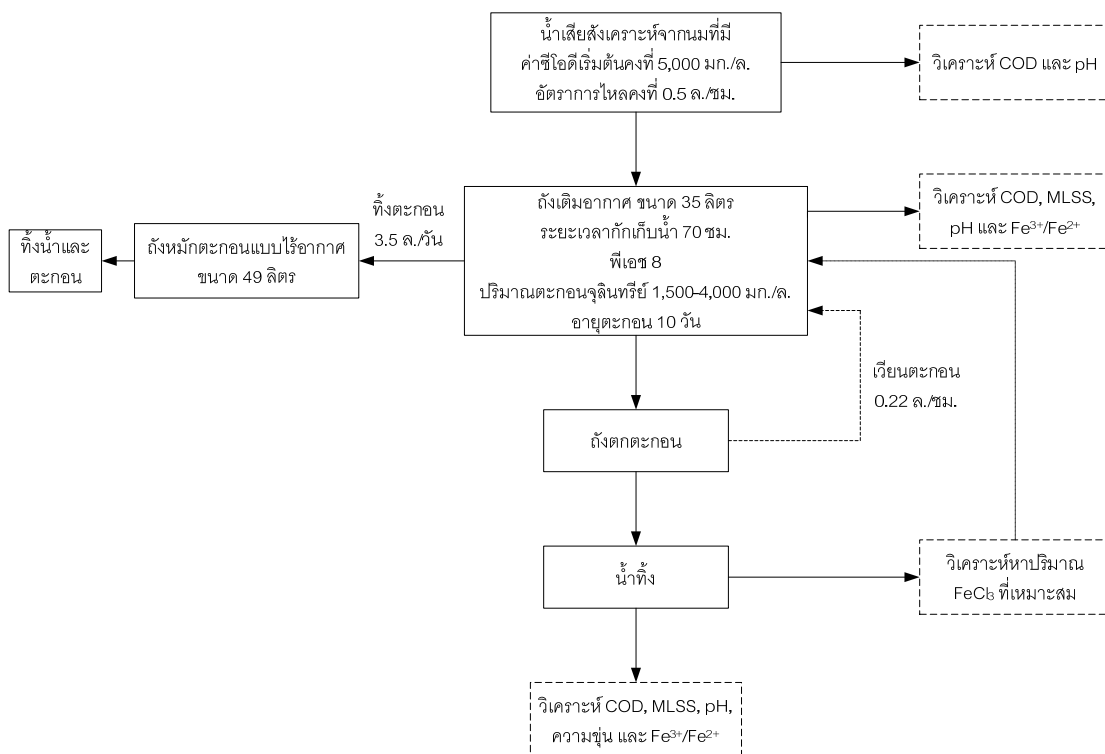


รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 1

ก) ก่อนเติมเฟอริกคลอไรด์



ข) หลังเติมเฟอริกคลอไรด์

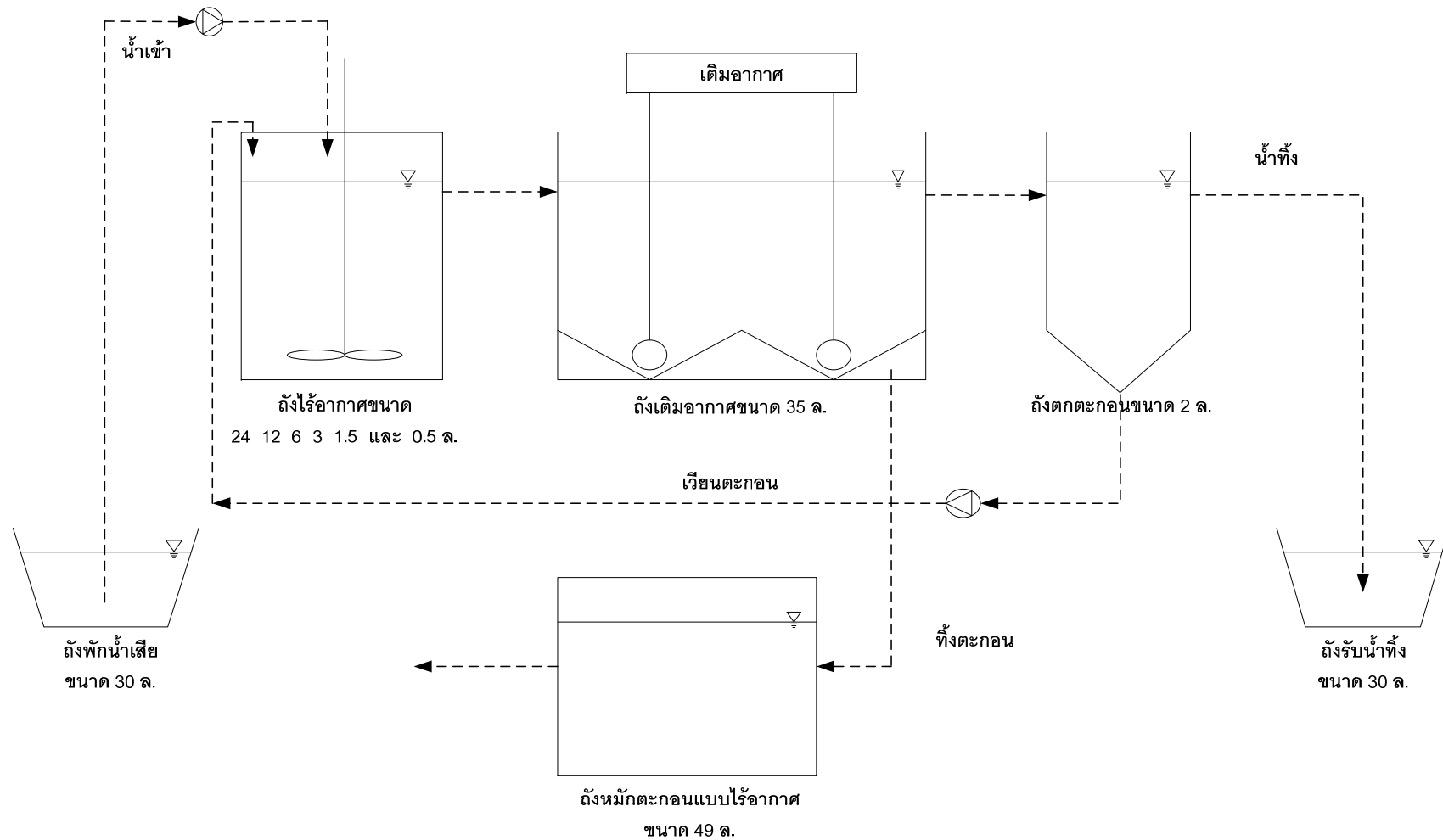


รูปที่ 3.9 แผนการทดลองช่วงที่ 1

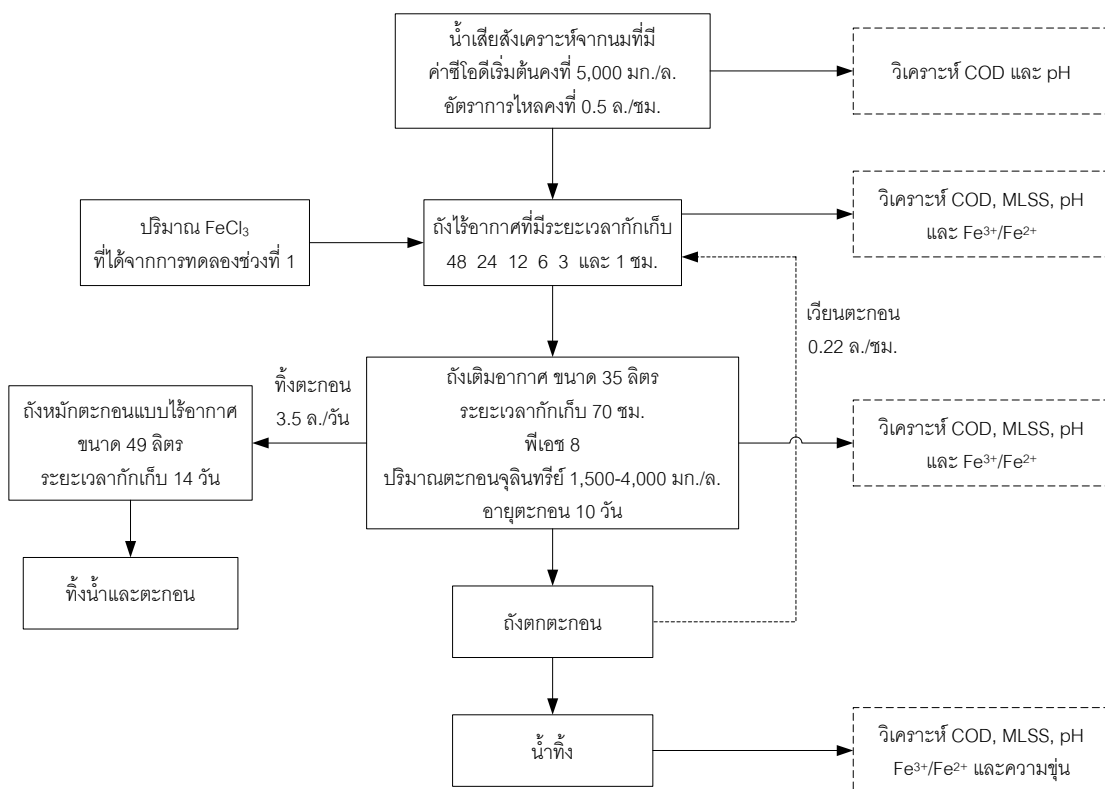
## การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์

การทดลองช่วงที่ 2 นี้จะเติมเพอริกคลอไรด์ที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 ลงในถังไร้อากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ โดยทำการเปลี่ยนขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำจากถังไร้อากาศจะไหลเข้าถังเติมอากาศ แล้วเดินระบบเช่นเดียวกับการทดลองในช่วงที่ 1 และตะกอนจากถังตกตะกอนจะถูกเวียนกลับเข้าถังไร้อากาศด้วยอัตราการเวียนตะกอนประมาณ 0.22 ลิตรต่อชั่วโมง การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.10 แล้วเก็บตัวอย่างน้ำในถังไร้อากาศ ถังเติมอากาศ และน้ำทิ้งมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาสมดุลของเพอริกไฮดรอกไซด์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.3 แผนภูมิแสดงแผนการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.11 ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาเก็บน้ำของถังไร้อากาศ	- 1 3 6 12 24 และ 48 ชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ	- 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
2. ระยะเวลาเก็บน้ำในถังเติมอากาศ	- 70 ชั่วโมง
3. น้ำเสียสังเคราะห์	- เตรียมจากนม
4. ซีโอดีเริ่มต้นของน้ำเสีย	- 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์	- 1,500-4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. อายุตะกอน	- 10 วัน
7. พีเอช	- 8
8. อัตราการสูบตะกอนเวียนกลับ	- 0.22 ลิตรต่อชั่วโมง
9. อัตราการทิ้งตะกอน	- 3.5 ลิตรต่อวัน
10. ปริมาณเพอริกคลอไรด์	- จากการทดลองช่วงที่ 1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ซีโอดี	- Close Reflux Method
2. ตะกอนแขวนลอย (MLSS)	- GF/C Filter
3. พีเอช	- Electrometric Method
4. ความขุ่น	- Turbidimeter
5. เพอริกไฮดรอกไซด์/เพอร์สไฮดรอกไซด์	- Phenanthroline Method



รูปที่ 3.10 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.11 แผนการทดลองช่วงที่ 2

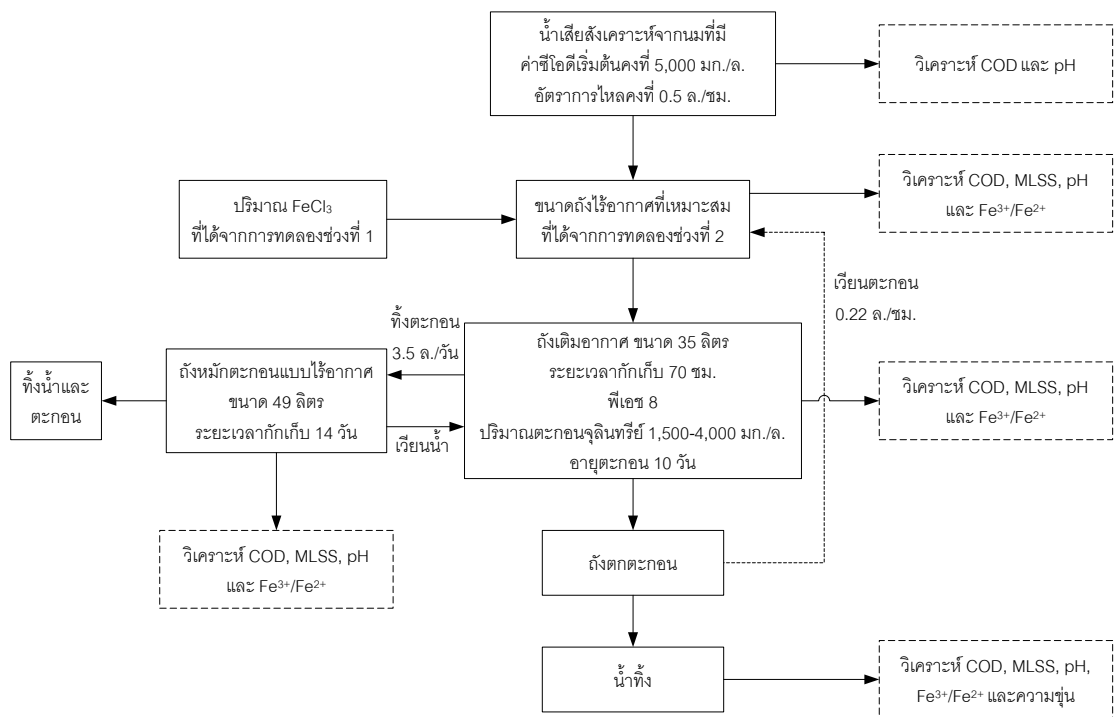
**การทดลองช่วงที่ 3 ศึกษาผลจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับ  
เข้าถังเติมอากาศ**

เมื่อได้ขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสม แล้วทำการเดินระบบเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 2 แต่การทดลองในช่วงนี้จะเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศเข้าถังเติมอากาศ ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.13 แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังไร้อากาศ ถังเติมอากาศ น้ำทิ้ง และถังหมักตะกอนไร้อากาศมาวิเคราะห์ เพื่อนำเฟอรัสไอออนกลับเข้าสู่ระบบและลดปริมาณการใช้เฟอริกคลอไรด์ในระบบ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4 และแผนภูมิแสดงแผนการทดลองช่วงที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.12

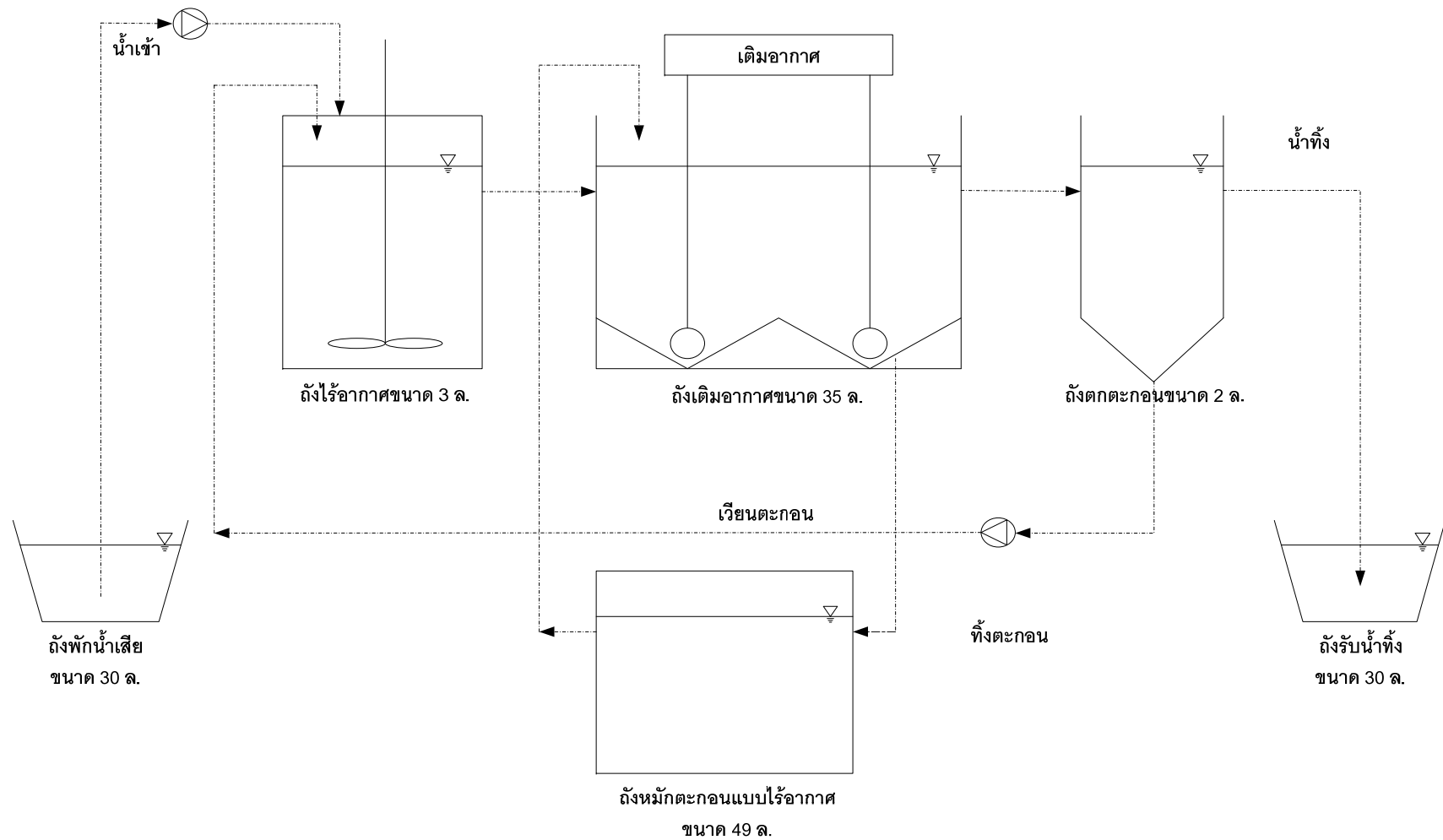
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. การเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศ กลับเข้าถังเติมอากาศ	- 3.5 ลิตรต่อวัน
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ	- 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
2. ระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังเติมอากาศ	- 70 ชั่วโมง
3. น้ำเสียสังเคราะห์	- เตรียมจากนม
4. ซีโอดีเริ่มต้นของน้ำเสีย	- 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์	- 1,500-4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. อายุตะกอน	- 10 วัน
7. พีเอช	- 8
8. อัตราการสูบตะกอนเวียนกลับ	- 0.22 ลิตรต่อชั่วโมง
9. อัตราการทิ้งตะกอน	- 3.5 ลิตรต่อวัน
10. ปริมาณเฟอริกคลอไรด์	- จากการทดลองช่วงที่ 1
11. ขนาดถังไร้อากาศ	- จากการทดลองช่วงที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ซีโอดี	- Close Reflux Method
2. ตะกอนแขวนลอย (MLSS)	- GF/C Filter
3. พีเอช	- Electrometric Method
4. ความขุ่น	- Turbidimeter
5. เฟอริกไอออน/เฟอรัสไอออน	- Phenanthroline Method





รูปที่ 3.12 แผนการทดลองช่วงที่ 3



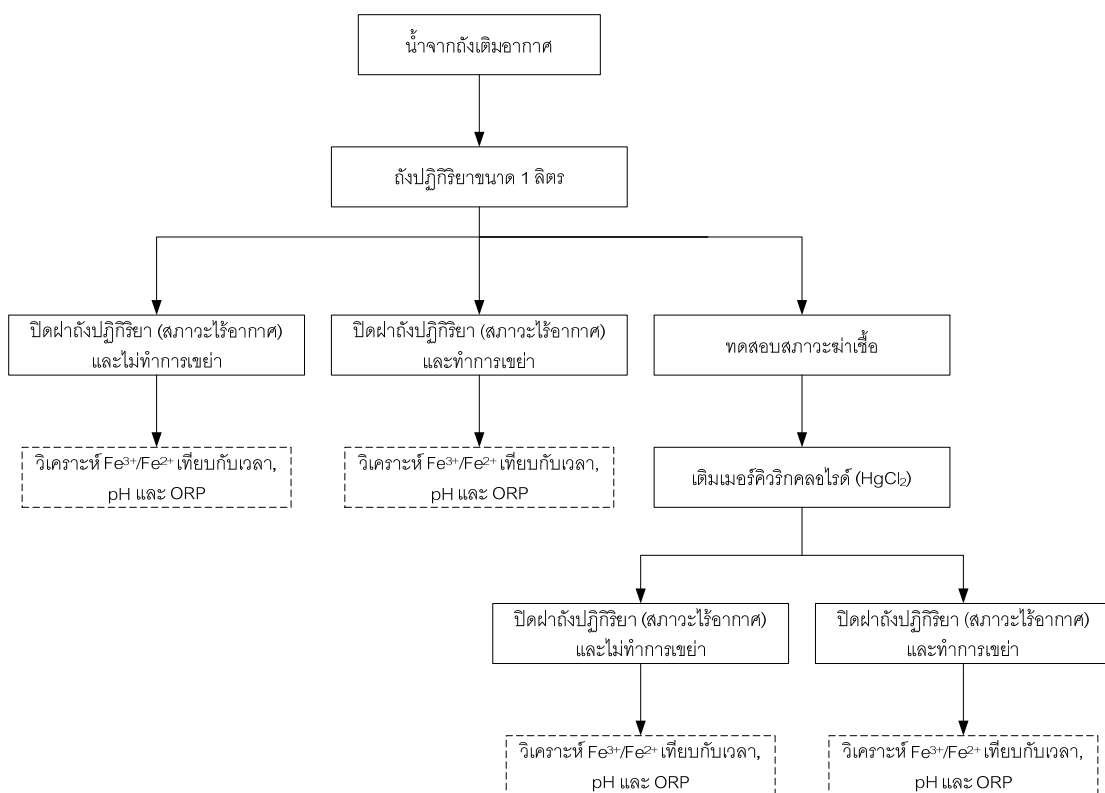
รูปที่ 3.13 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 3

**การทดลองช่วงที่ 4 การเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออนเป็นเฟอร์รัสไอออนแบบเบดซ์**

การทดลองในช่วงนี้จะนำน้ำจากถังเติมอากาศใส่ในถังปฏิกิริยาขนาด 1 ลิตร ที่ปิดฝาสนิท เพื่อให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ แล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนตลอดการทดลอง และไม่ต้องทำการเขย่า นอกจากนี้ยังทำการเติมเมอร์คิวริกคลอไรด์ (HgCl<sub>2</sub>) ลงไปเพื่อทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อ แล้วทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ริกไอออน/เฟอร์รัสไอออนเทียบกับเวลา จนกว่าเฟอร์ริกไอออนจะเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัสไอออนหมดหรือมีค่าคงที่ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.5 และแผนภูมิแสดงแผนการทดลองช่วงที่ 4 แสดงดังรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 4

ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. พีเอช	- Electrometric Method
2. ความขุ่น	- Turbidimeter
3. เฟอร์ริกไอออน/เฟอร์รัสไอออน	- Phenanthroline Method
4. ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	- ORP Meter



รูปที่ 3.14 แผนการทดลองช่วงที่ 4

### 3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในแต่ละช่วงการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำอย่างน้อยอาทิตย์ละ 2 ครั้ง โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ และตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 1

พารามิเตอร์	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง				
	ถังพักน้ำเสีย	ถังไร้อากาศ	ถังเติมอากาศ	น้ำทิ้ง	ถังหมักตะกอนไร้อากาศ
ซีไอดี	✓	-	✓	✓	-
ตะกอนแขวนลอย (MLSS)	-	-	✓	✓	-
พีเอช	✓	-	✓	✓	-
ความขุ่น	-	-	-	✓	-
ปริมาณเฟอริกคลอไรด์	-	-	-	✓	-
เฟอริกไอออน/เฟอร์รัสไอออน	-	-	✓	✓	-

หมายเหตุ: เฟอริกไอออน/เฟอร์รัสไอออนจะทำการวิเคราะห์หลังจากนำเฟอริกคลอไรด์เติมในถังเติมอากาศ

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ และตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3

พารามิเตอร์	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง				
	ถังพักน้ำเสีย	ถังไร้อากาศ	ถังเติมอากาศ	น้ำทิ้ง	ถังหมักตะกอนไร้อากาศ
ซีไอดี	✓	✓	✓	✓	✓
ตะกอนแขวนลอย (MLSS)	-	✓	✓	✓	-
พีเอช	✓	✓	✓	✓	✓
ความขุ่น	-	-	-	✓	-
เฟอริกไอออน/เฟอร์รัสไอออน	-	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ: ถังหมักตะกอนไร้อากาศจะถูกนำมาวิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 3

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการหมุนเวียนสร้างตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและเติมอากาศ โดยใช้ระบบเอเอสขนาดทดลองที่มีปริมาตรโดยรวม 110 ลิตร ซึ่งประกอบไปด้วยถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน ถังไร้อากาศ และถังหมักตะกอนไร้อากาศ ในการทดลองแต่ละช่วงการทดลองนั้นรวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 422 วัน โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

4.3 ผลการศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์

4.4 ผลการศึกษาจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์เป็นเฟอริสไฮดรอกไซด์แบบแบคทีเรีย

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

พารามิเตอร์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงเดินระบบ ได้แก่ ซีโอดี พีเอช ตะกอนแขวนลอย และความขุ่น ดังรูปที่ 4.1 โดยจะแบ่งช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวดังนี้

**ระยะที่ 1** เมื่อเริ่มต้นเดินระบบตั้งแต่วันที่ 0-14 จะมีค่าซีโอดีค่อนข้างสูงเนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ต้องปรับตัว โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 86 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 3,680 และ 354 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่วันที่ 15-49 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 92 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,216 และ 175 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยช่วงท้ายของระยะที่ 1 พีเอชและตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศมีแนวโน้มที่จะลดลง

**ระยะที่ 2** เกิดปัญหาการบวมระบบ โดยสามารถแบ่งได้ 4 ปัญหา ดังนี้

1. ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศมีค่าลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ซึ่งทำการแก้ไขโดยในระยะแรกจะเวียนตะกอนกลับเข้าถังเติมอากาศให้มากขึ้น แต่

พบว่าไม่ช่วยเพิ่มตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศได้ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงทำการปิดระบบเปลี่ยนจากที่เดินระบบอย่างต่อเนื่องมาเป็นเดินระบบแบบทีละเท (Batch) แทน วิธีการ คือ หยุดป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ แล้วถ่ายน้ำจากถังเติมอากาศออก 1 ลิตร และใส่เมล็ดอย่างเดียวก 1 ลิตร ลงไปในถังเติมอากาศ จากนั้นเติมอากาศตลอดเวลา ส่งผลให้ผลการทดลองในระยะที่ 2 นี้ทำให้มีค่าซีไอดีและค่าตะกอนแขวนลอยแปรปรวนค่อนข้างมาก

2. พีเอชในระบบสูง เกิดจากปริมาณต่างที่มีเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายของน้ำเสียสังเคราะห์จากนมซึ่งมีส่วนประกอบของโปรตีน สามารถแก้ไขโดยลดการเติมต่าง (ไดโพลเทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต) ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และปิดเครื่องเติมอากาศบ้างครั้งคราว เพื่อให้ระบบเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

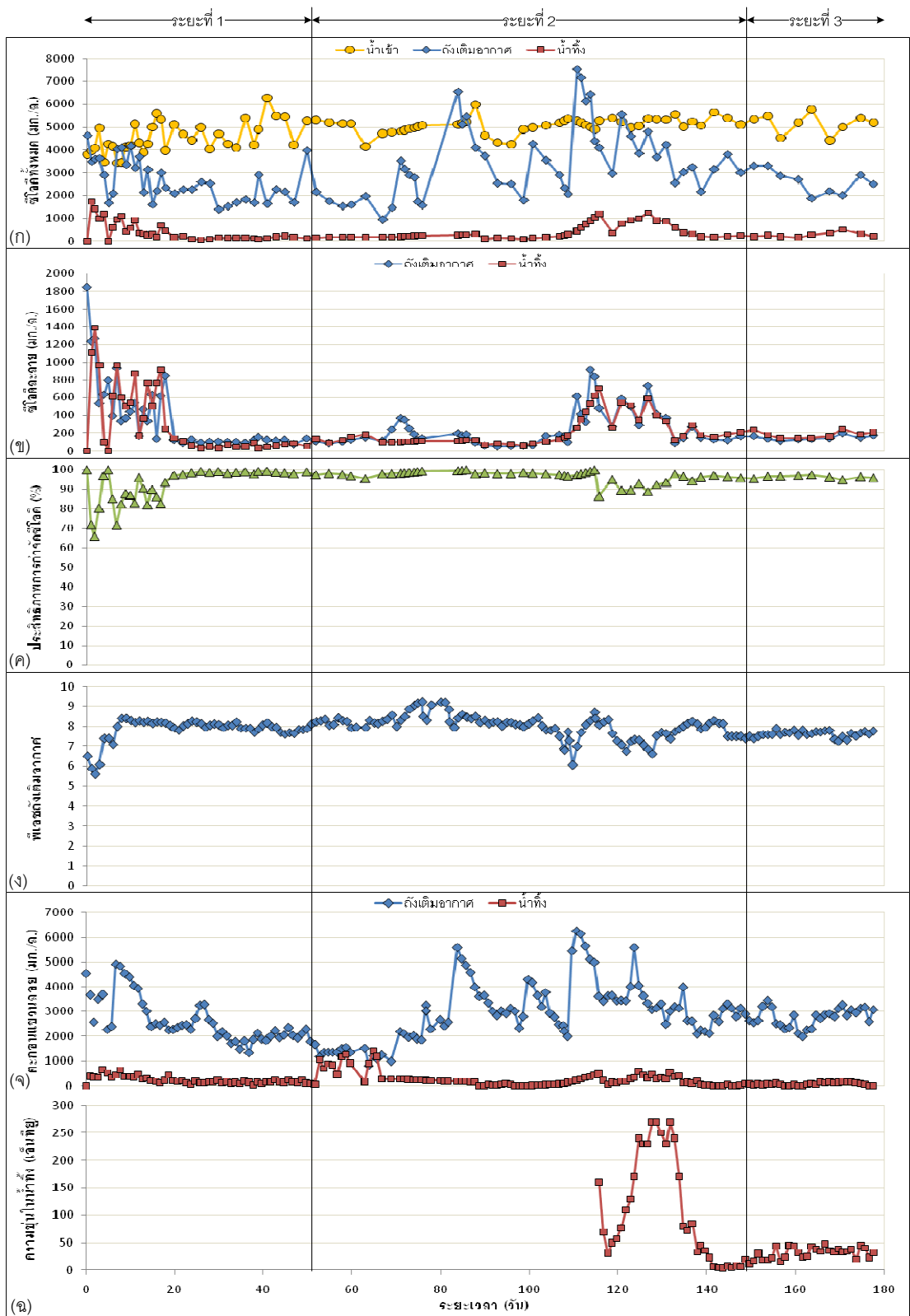
3. ฟองในถังเติมอากาศ ฟองที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ ฟองสีขาว จะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มเดินระบบ (มันลิน ตันจูลเวศม์, 2542) แต่ในระยะนี้เกิดฟองสีขาวปริมาณมากหลายครั้งตลอดระยะที่ 2 ทำการแก้ไขโดยลดการเติมอากาศลง และฟองสีน้ำตาล มีลักษณะเหนียว ชัน ทำการแก้ไขโดยเพิ่มอัตราการทิ้งตะกอนเพื่อลดอายุตะกอน

4. น้ำในถังตกตะกอนขุ่น ตะกอนในถังตกตะกอนมีปริมาณมาก และตกตะกอนได้ไม่ดีทำให้ในช่วงต้นของระยะที่ 2 น้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยหลุดออกจากกระบอก ส่งผลให้ค่าตะกอนแขวนลอยมาก และมีความขุ่นสูง ทำการแก้ไขโดยเวียนตะกอนให้มากขึ้น และลดการเติมอากาศซึ่งอาจรุนแรงไปทำให้ฟล็อกแตกได้

ในระยะนี้เมื่อควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบให้คงที่ได้แล้วจึงเปลี่ยนการเดินระบบจากทีละเทมาเป็นแบบต่อเนื่อง แล้วป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง

**ระยะที่ 3** หลังจากที่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระยะที่ 2 ได้แล้ว ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยผลการทดลองพบว่า ระยะนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 97 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,784 และ 92 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และทำการวิเคราะห์หาความขุ่นในน้ำทิ้งเพื่อทำจาร์เทส โดยมีความขุ่นเฉลี่ย 33 เอ็นทียู

เนื่องจากเกิดปัญหาระหว่างการเดินระบบทำให้ใช้ระยะเวลาในช่วงนี้นานถึง 180 วัน



รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว  
 (ก) ซีไอดีทั้งหมด (ข) ซีไอดีละลาย (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (ง) พีเอชถังเติมอากาศ  
 (จ) ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศและน้ำทิ้ง (ฉ) ความขุ่นในน้ำทิ้ง

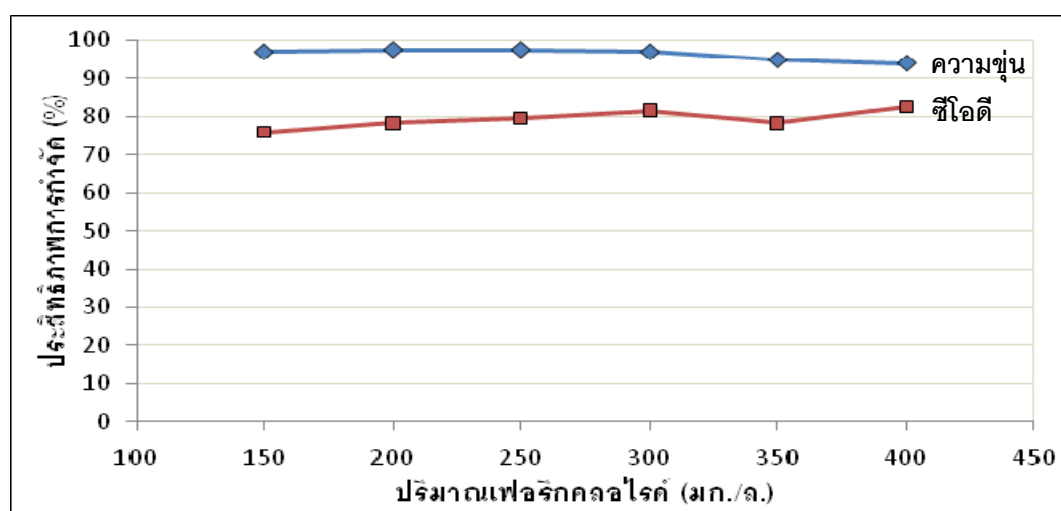
## 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

### 4.2.1 ผลการหาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว นำน้ำทิ้งจากระบบเอเอสมาหาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส โดยกำหนดช่วงความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์เท่ากับ 150 - 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้นและสุดท้ายเท่ากับ 8 พบว่า ที่ความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่นได้ร้อยละ 78 และ 98 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการหาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส

ก่อนวิเคราะห์			เฟอริกคลอไรด์ (มก./ล.)	หลังวิเคราะห์			ประสิทธิภาพการกำจัด(%)	
พีเอช	ความขุ่น (เอ็นทียู)	ซีโอดี (มก./ล.)		พีเอช	ความขุ่น (เอ็นทียู)	ซีโอดี (มก./ล.)	ความขุ่น	ซีโอดี
8.02	33	217	150	8.1	1	52	97	76
			200	8.27	0.8	47	98	78
			250	7.91	0.8	44	98	80
			300	8.04	1	40	97	82
			350	8.16	1.7	47	95	78
			400	7.99	2	38	94	82



รูปที่ 4.2 ปริมาณเฟอริกคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและความขุ่น

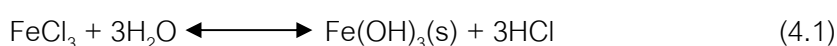


## 4.2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว และนำน้ำทิ้งจากระบบเอเอสมาหาปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส แล้วนำเฟอริกคลอไรด์ที่ได้คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมนลงในถังเติมอากาศ ด้วยอัตราการใช้ 0.0625 ลิตรต่อชั่วโมง โดยตั้งเครื่องสูบบubble aeration แบบเดิน 15 นาที หยุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 15 นาที และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะอธิบายผลการทดลองเป็นช่วงดังนี้

### 4.2.2.1 ผลของเหล็กที่อยู่ในระบบ

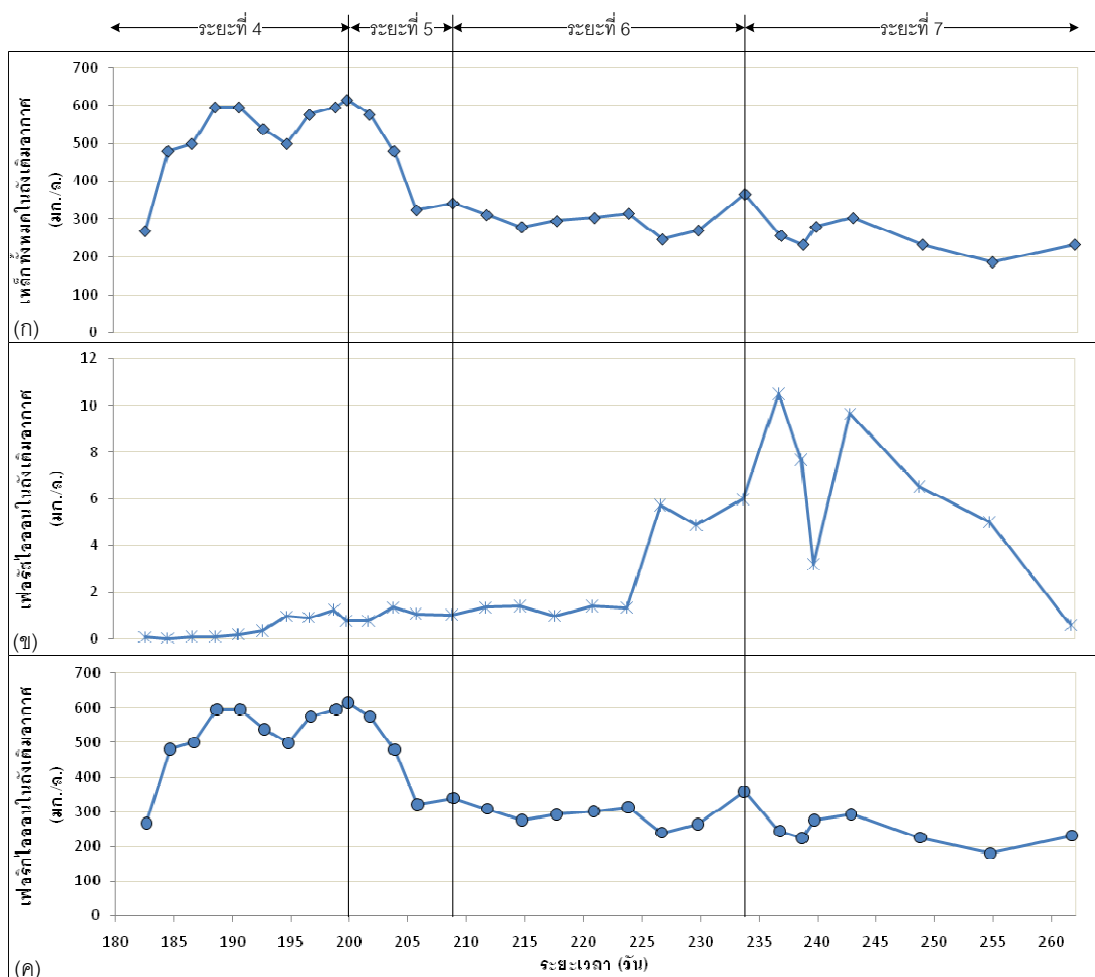
**ระยะที่ 4** หลังจากเติมเฟอริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเตรียม 3 ลิตร สำหรับใช้ทุกๆ 2 วัน ตลอดการทดลอง จากการวิเคราะห์เหล็กพบว่า ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเฉลี่ย 526.79 มิลลิกรัมต่อลิตร จนเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ได้นั้นมีปริมาณมากกว่าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมตัวของเหล็ก จากการที่ป้อนเฟอริกคลอไรด์เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง และมีการนำตะกอนซึ่งมีตะกอนของเฟอริกไฮดรอกไซด์อยู่เวียนตะกอนกลับเข้าถังเติมอากาศตลอดเวลา มีบางส่วนหลุดไปกับน้ำทิ้ง และบางส่วนถูกทิ้งลงถังหมักตะกอนไร้อากาศเพื่อควบคุมอายุตะกอน มีปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) เฉลี่ย 0.47 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) เฉลี่ย 526.32 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าในถังเติมอากาศมีเฟอริกไอออนสูงกว่าเฟอร์รัสไอออนเนื่องจากเฟอริกคลอไรด์สามารถแตกตัวในน้ำเป็นเฟอริกไอออนและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์จากการแตกตัวของน้ำทำให้เกิดตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 4.1



ส่วนในน้ำทิ้งของระยะที่ 4 มีเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 3.08 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออนเฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนเฉลี่ย 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4

**ระยะที่ 5** หลังจากเติมเฟอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศเป็นเวลา 20 วัน แล้วจึงเพิ่มถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง เข้ามาในระบบ โดยน้ำเสียส่งเคราะห์และ

เฟอริกคลอไรด์จะถูกป้อนเข้าสู่ถังไร้อากาศนี้ พบว่า ปริมาณเหล็กในถังเต็มอากาศนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง

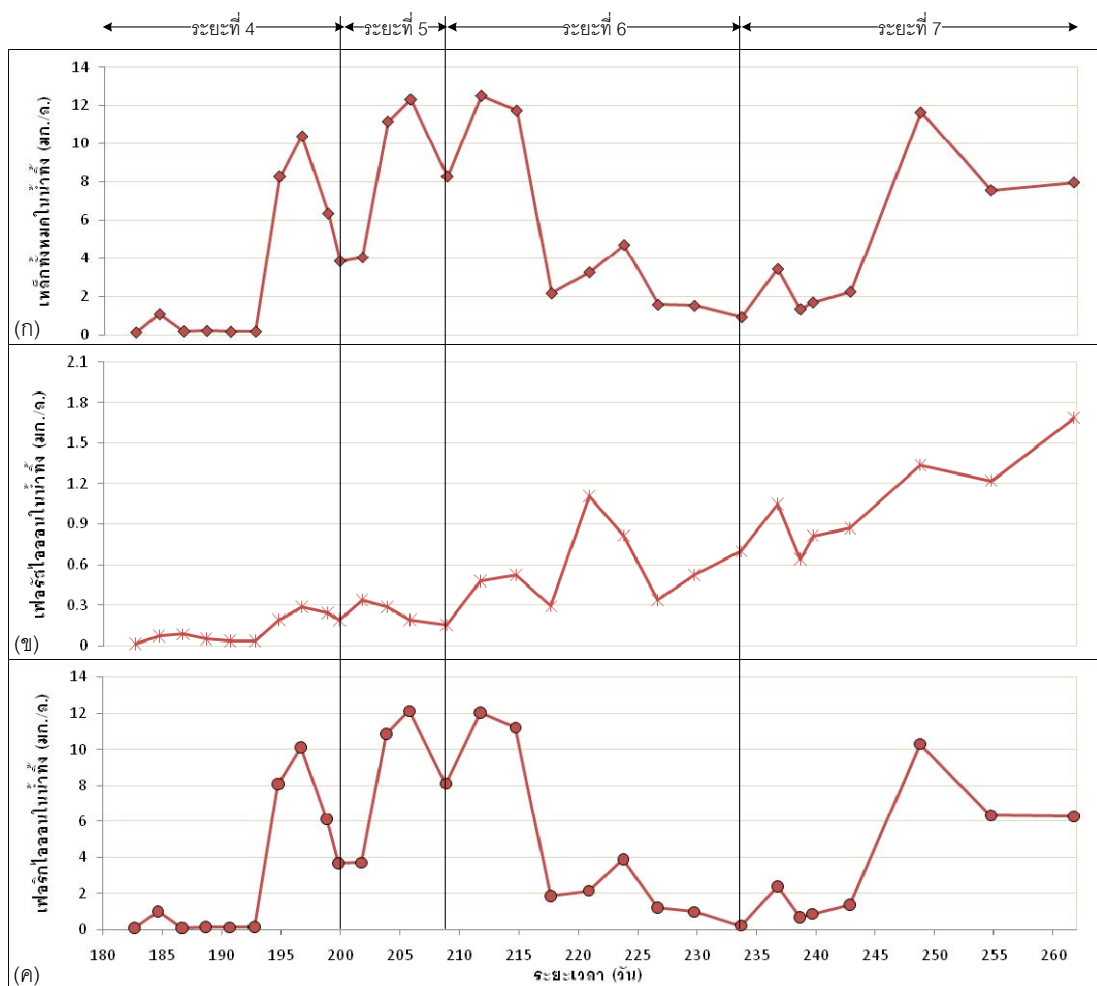


รูปที่ 4.3 ปริมาณเหล็กในถังเต็มอากาศหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเต็มอากาศ

(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอรัสไอออน (ค) เฟอริกไอออน

**ระยะที่ 6** ในระยะก่อนหน้านี้นี้พบปัญหาเกี่ยวกับความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และการควบคุมปริมาณเหล็กในถังเต็มอากาศจึงดำเนินการหยุดป้อนเฟอริกคลอไรด์ และปิดถังไร้อากาศ และเปลี่ยนจากที่ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์และเฟอริกคลอไรด์เข้าสู่ถังไร้อากาศ มาเป็นป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังเต็มอากาศเพียงอย่างเดียวแทน โดยไม่มีการป้อนเฟอริกคลอไรด์อีก เพื่อให้ปริมาณเหล็กในถังเต็มอากาศลดลงจนคงที่ แล้วค่อยทำการป้อนเฟอริกคลอไรด์เข้าสู่ระบบใหม่ ซึ่งปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเต็มอากาศระยะนี้มีค่าลดลงจนคงที่เฉลี่ย

287.85 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์สไอออนเฉลี่ย 2.44 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนเฉลี่ย 285.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของน้ำทิ้งจากระบบมีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 5.35 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์สไอออนเฉลี่ย 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนเฉลี่ย 4.77 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4 ปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ  
(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอร์สไอออน (ค) เฟอริกไอออน

**ระยะที่ 7** เมื่อปริมาณเหล็กในถังเติมอากาศลดลงจนคงที่แล้วจึงทำการป้อนเฟอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศใหม่อีกครั้ง เพื่อควบคุมให้มีเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เฟอริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 75 มิลลิกรัมต่อวัน จะถูกป้อนเข้าถังเติมอากาศ 2 วันแรกของระยะที่ 7 สามารถควบคุมให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเฉลี่ย 260.76 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์สไอออนเฉลี่ย 6.14

มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนเฉลี่ย 254.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของน้ำทิ้งมีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 4.60 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์สไอออนเฉลี่ย 1.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนเฉลี่ย 3.56 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.2.2.2 ประสิทธิภาพของระบบหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

ประสิทธิภาพของระบบหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งจะอธิบายผลการทดลองเป็นช่วงดังนี้

**ระยะที่ 4** ในช่วงแรกของการเติมเฟอริกคลอไรด์ลงในระบบ ถังเติมอากาศมีซีไอดีค่อนข้างสูงและลดลงจนคงที่ โดยระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 97 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 3,095 และ 151 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีความขุ่นเฉลี่ย 63 เอ็นทียู

**ระยะที่ 5** เป็นระยะที่มีการเพิ่มถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 97 พีเอชในถังเติมอากาศ 7.7-8.8 มีค่า แก๊ซโดยลดการปรับด้วยต่างในขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอชในถังไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.3-7 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,473 และ 434 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีความขุ่นเฉลี่ย 162 เอ็นทียู

**ระยะที่ 6** เป็นระยะที่ปิดระบบไร้อากาศ และไม่มีการบ้อนเฟอริกคลอไรด์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 96 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,918 และ 382 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความขุ่นเฉลี่ย 135 เอ็นทียู

**ระยะที่ 7** เป็นระยะที่มีการบ้อนเฟอริกคลอไรด์เข้าสู่ถังเติมอากาศ พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 93 พีเอชในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 7.7-8 ถังเติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,513 และ 619 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความขุ่นโดยเฉลี่ย 196 เอ็นทียู

จากการทดลองจะพบว่า ตลอดระยะเวลาที่ทำการเติมเฟอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศ เพิ่มถังไร้อากาศ ปิดระบบไร้อากาศ และไม่มีการบ้อนเฟอริกคลอไรด์ จนถึงทำการบ้อนเฟอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศใหม่อีกครั้ง พบว่า ค่าตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งและความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนเติมเฟอริกคลอไรด์ ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากตะกอนบางส่วนใน

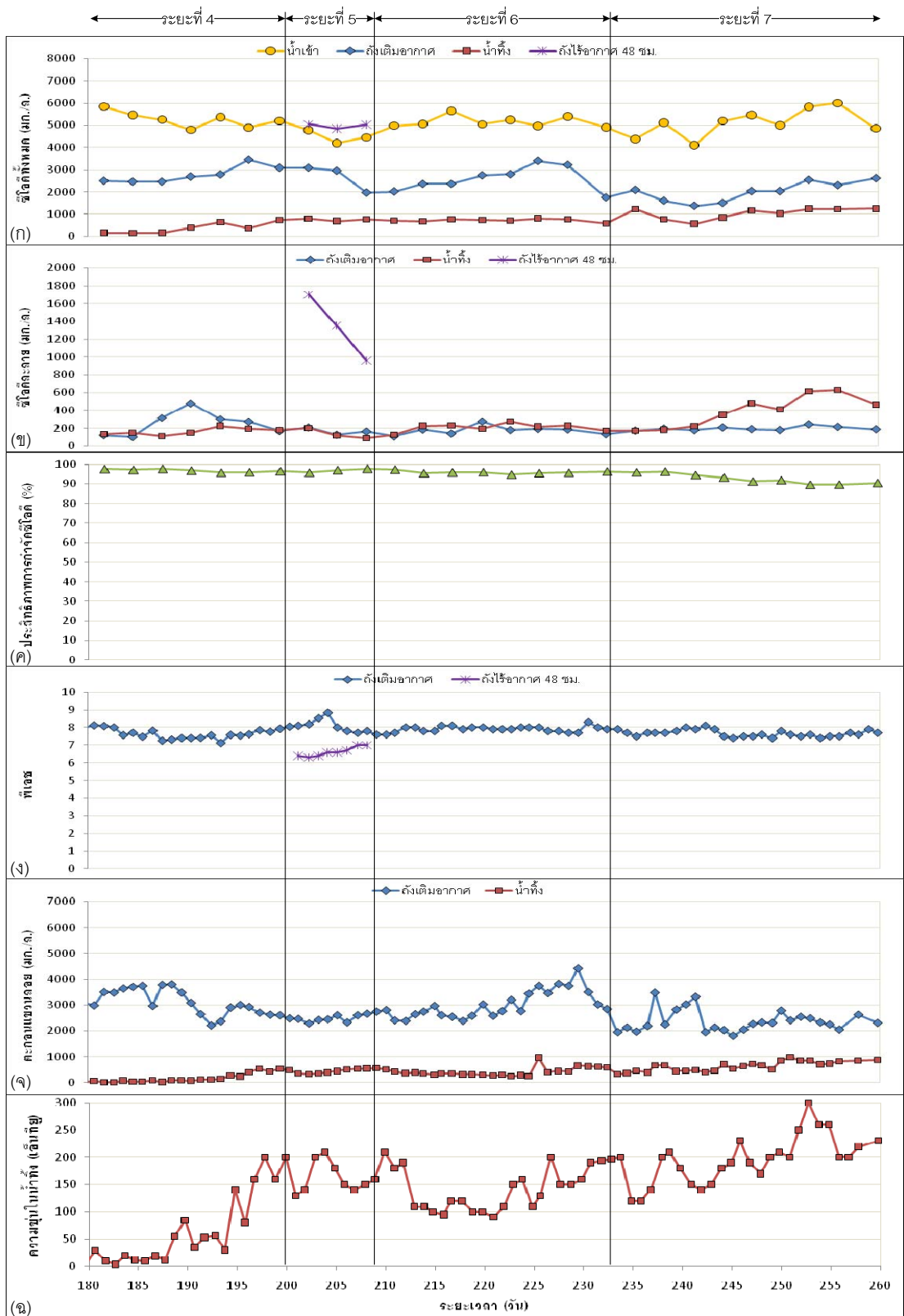
ถังตกตะกอนมีลักษณะเป็นสีดำซึ่งเกิดจากเฟอริกไฮดรอกไซด์เป็นเฟอรัสไฮดรอกไซด์ในสภาวะไร้อากาศ ตะกอนที่สะสมตัวอยู่เป็นเวลานานจะทำให้เกิดก๊าซและดันตะกอนให้ลอยขึ้นส่งผลให้น้ำที่ที่มีความขุ่น แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งและความขุ่นก่อนและหลังเติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ

ช่วงที่วิเคราะห์	ตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้ง (มก./ล.)	ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู)
สภาวะคงตัว	92	33
เติมเฟอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศ		
- ระยะที่ 4	151	63
- ระยะที่ 5	434	162
- ระยะที่ 6	382	135
- ระยะที่ 7	619	196



รูปที่ 4.5 ตะกอนสีดำที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอน



รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบหลังเติมเพอริคลอไรต์ในถังเติมอากาศ

(ก) ซีไอทั้งหมด (ข) ซีไอละลาย (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอ (ง) พีเอชในถังเติมอากาศ และถังไร้อากาศ 48 ชม. (ฉ) ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศและน้ำทิ้ง (จ) ความขุ่นในน้ำทิ้ง

### 4.3 ผลการศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์

หลังจากทำการทดลองโดยเติมเฟอริกคลอไรด์อีกครั้งลงถังเติมอากาศแล้ว ถังไร้อากาศจึงถูกเพิ่มเข้ามาในระบบ จากนั้นน้ำเสียสังเคราะห์และเฟอริกคลอไรด์ (ใช้เครื่องสูบลมแบบไดอะแฟรมเดิน 15 นาที หยุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 15 นาที) จะถูกป้อนเข้าสู่ถังไร้อากาศนี้ ด้วยอัตราการไหล 0.5 และ 0.0625 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ควบคุมให้มีเหล็กในถังเติมอากาศ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตะกอนจากถังตกตะกอนจะถูกเวียนกลับเข้าสู่ถังไร้อากาศตลอดการทดลอง ในระหว่างการทดลองได้มีการเติมก๊าซไนโตรเจน 99.999% ลงในถังไร้อากาศเพื่อทำหน้าที่หมุนเวียนตะกอนภายในถังไร้อากาศ ให้สามารถไหลเข้าสู่ถังเติมอากาศได้

#### 4.3.1 ผลของเหล็กในระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ

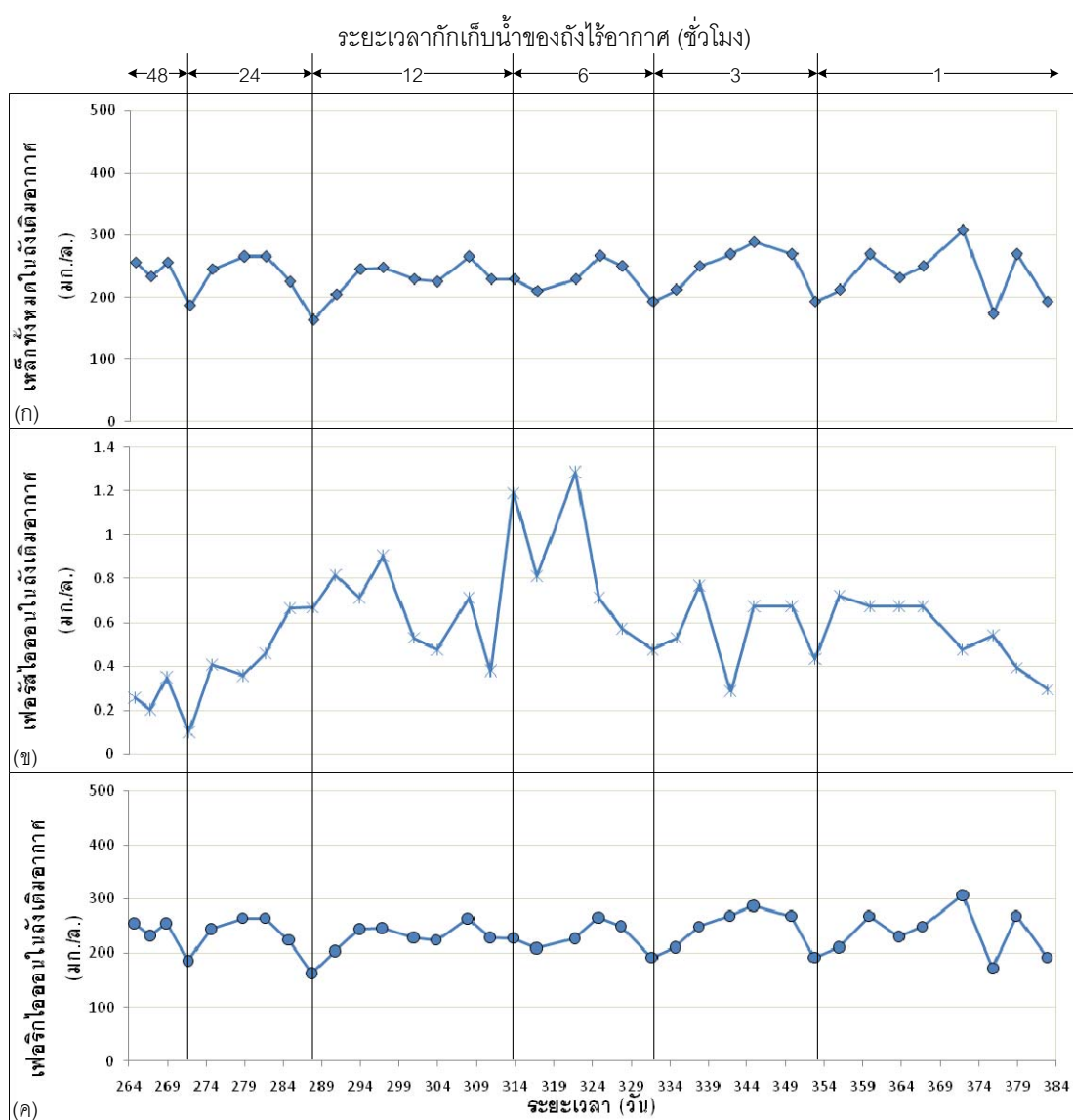
เมื่อเพิ่มถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง เข้ามาในระบบ และลดขนาดถังด้วยการใช้ฟิมกันเป็นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 24 และ 12 ชั่วโมง พบว่า เติมเฟอริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 15 30 และ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ลงในถังไร้อากาศ 2 วันแรกของการทดลอง ส่วนในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 3 และ 1 ชั่วโมง พบว่า ไม่ต้องเติมเฟอริกคลอไรด์ จากปริมาณการเติมเฟอริกคลอไรด์ข้างต้นทำให้สามารถควบคุมเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศได้ประมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอรัสไอออนมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนมีค่าประมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผลของเหล็กที่อยู่ในระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.7-4.9 จะเห็นได้ว่าเหล็กเกือบทั้งหมดอยู่ในเฟอริกไอออน และมีเฟอรัสไอออนอยู่น้อยมาก เนื่องจากเฟอรัสไอออนจากถังไร้อากาศจะสัมผัสกับออกซิเจนในถังเติมอากาศ ทำให้เฟอรัสไอออนนี้ถูกออกซิไดส์เป็นเฟอริกไอออน ดังนั้นจึงพบเฟอริกไอออนในถังเติมอากาศมากกว่าเฟอรัสไอออน

จากการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำทิ้ง พบว่า ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 3 และ 1 ชั่วโมง มีเหล็กทั้งหมดอยู่ในช่วง 3-8 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอรัสไอออนน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนอยู่ในช่วง 3-8 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในถังไร้อากาศ 12 และ 6 ชั่วโมง มีเหล็กทั้งหมดในน้ำทิ้ง 10-12 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอรัสไอออนน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีเฟอริกไอออน 10-12 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าในถังไร้อากาศ 2 ถังนี้มีเหล็กมากกว่าในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 3 และ 1 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงที่มีปัญหาของตะกอน

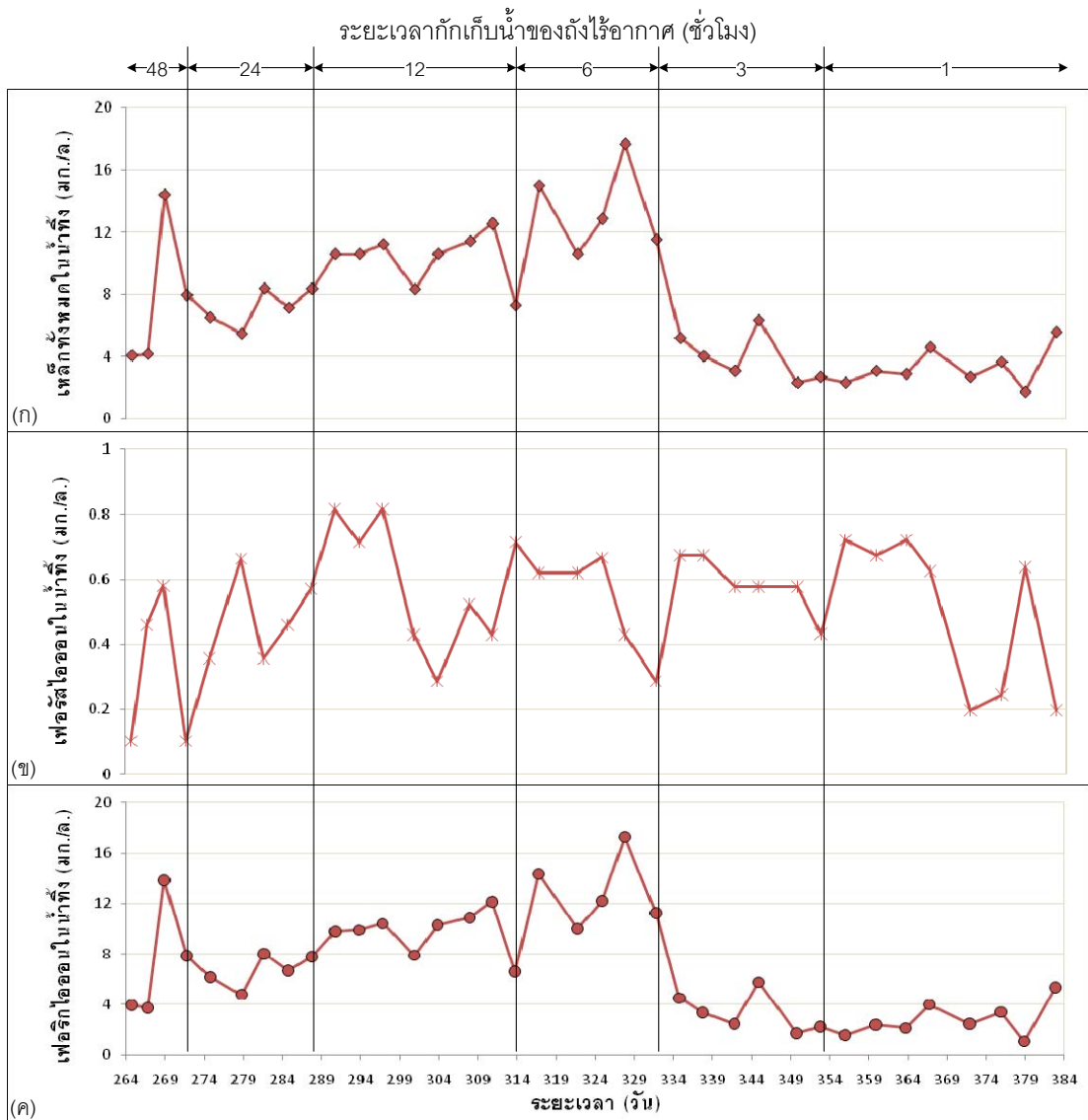
ในถังตกตะกอนปริมาณมาก ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ทำให้พบเฟอริกไอออนในน้ำทิ้งมากกว่าถังไร้อากาศอื่น

ส่วนผลการวิเคราะห์เหล็กในถังไร้อากาศ พบว่า ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 48 24 และ 1 ชั่วโมง มีเหล็กทั้งหมดอยู่ในช่วง 300-400 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอรัสไอออนน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีเฟอริกไอออนอยู่ในช่วง 300-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กทั้งหมด ส่วนในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 12 6 และ 3 ชั่วโมง มีเหล็กทั้งหมดประมาณ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอรัสไอออนประมาณ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกไอออนประมาณ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าในถังไร้อากาศนี้มีเหล็กทั้งหมดมากกว่าถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 48 24 และ 1 ชั่วโมง เนื่องจากปัญหาเรื่องตะกอนในถังตกตะกอนมีปริมาณมากทำให้ต้องเพิ่มอัตราการเวียนตะกอนกลับเข้าถังไร้อากาศมากขึ้น ส่งผลให้มีเหล็กในถังไร้อากาศเพิ่มขึ้นไปด้วย

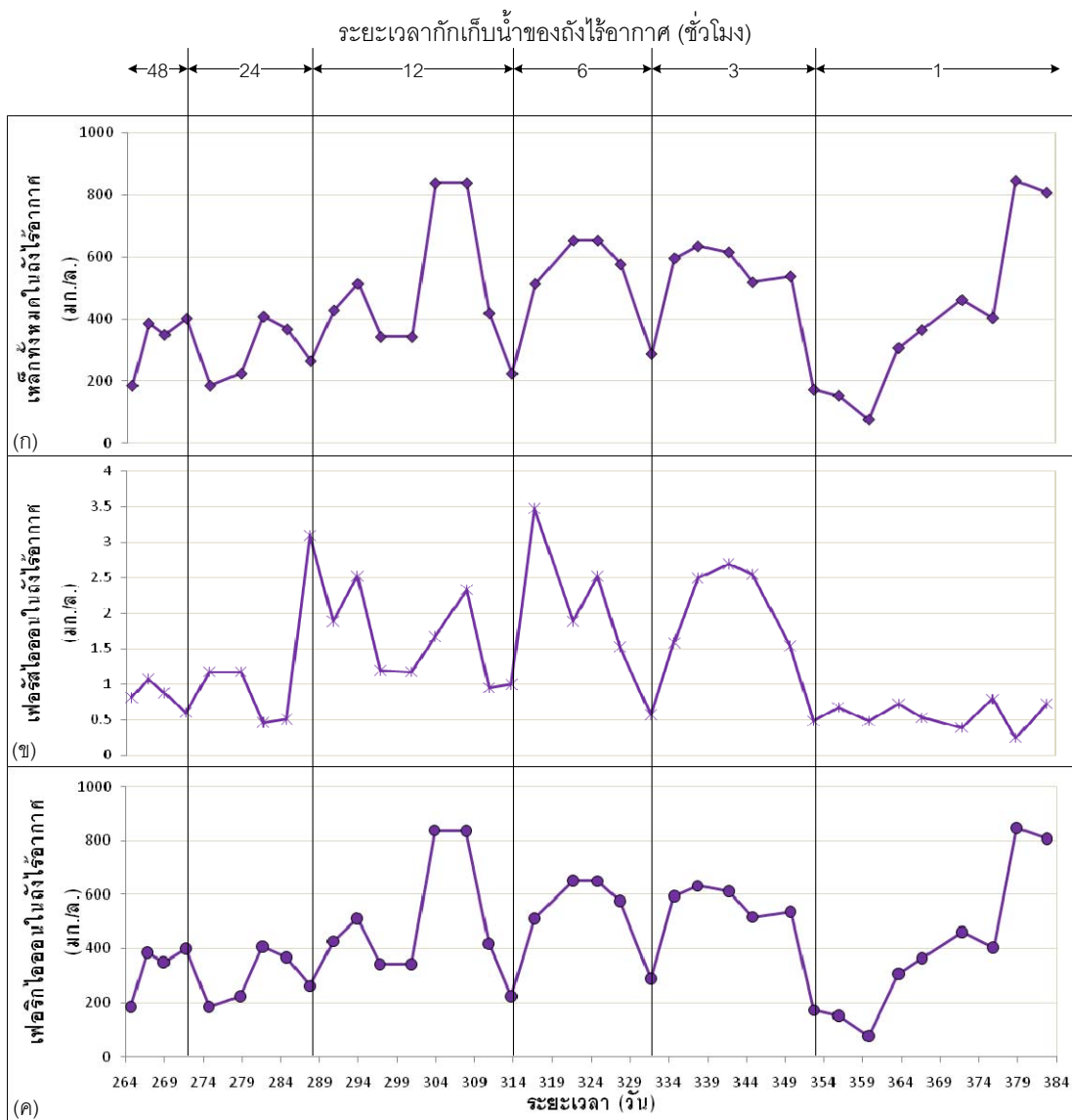




รูปที่ 4.7 ผลของเหล็กในถังเดิมอากาศ  
(ก) เพลี้ยทั้งหมด (ข) เพลอร์สไอออน (ค) เพลอริกไอออน



รูปที่ 4.8 ผลของเหล็กในน้ำทิ้ง  
(ก) เกล็ดทั้งหมด (ข) เฟอร์รัสไอออน (ค) เฟอริกไอออน

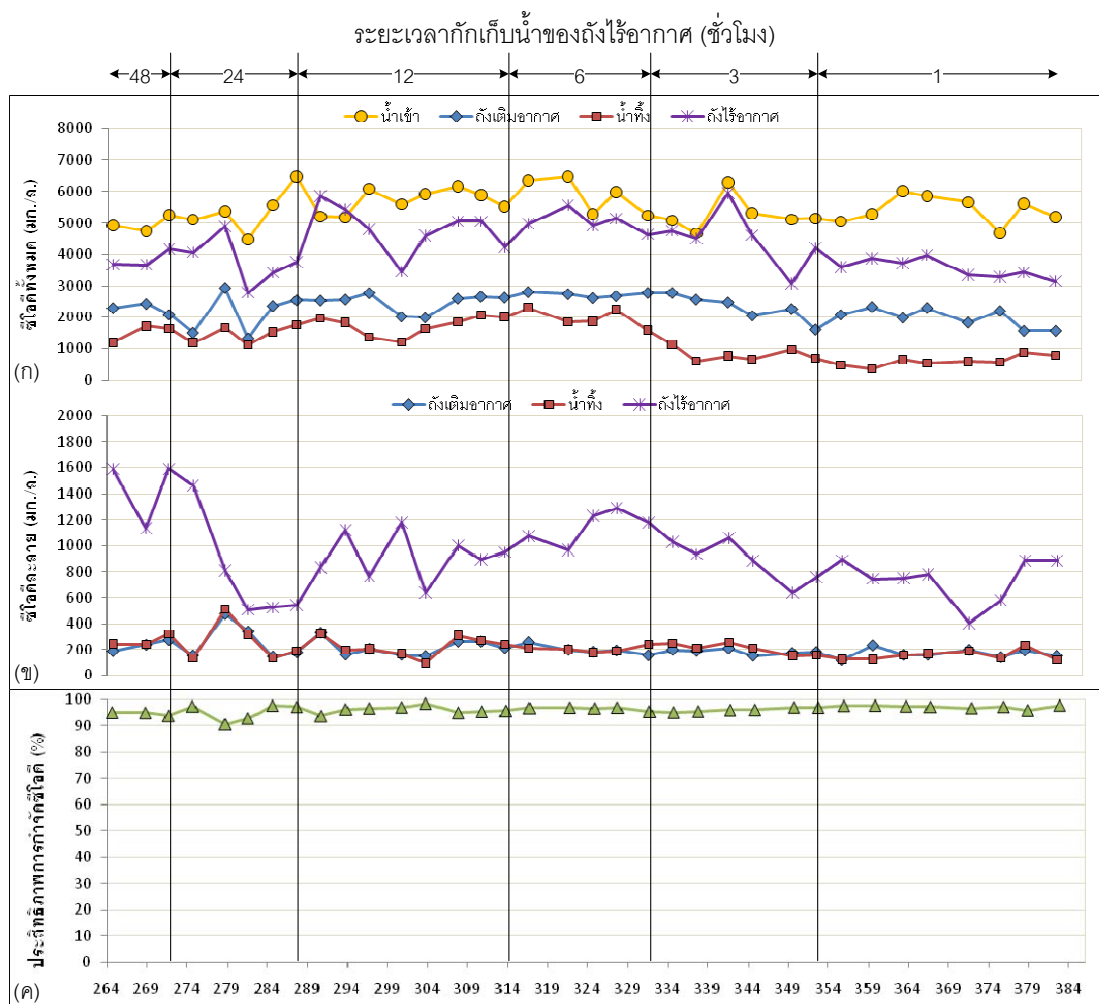


รูปที่ 4.9 ผลของเหล็กในถังไร้อากาศ  
(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอร์รัสไอออน (ค) เฟอริกไอออน

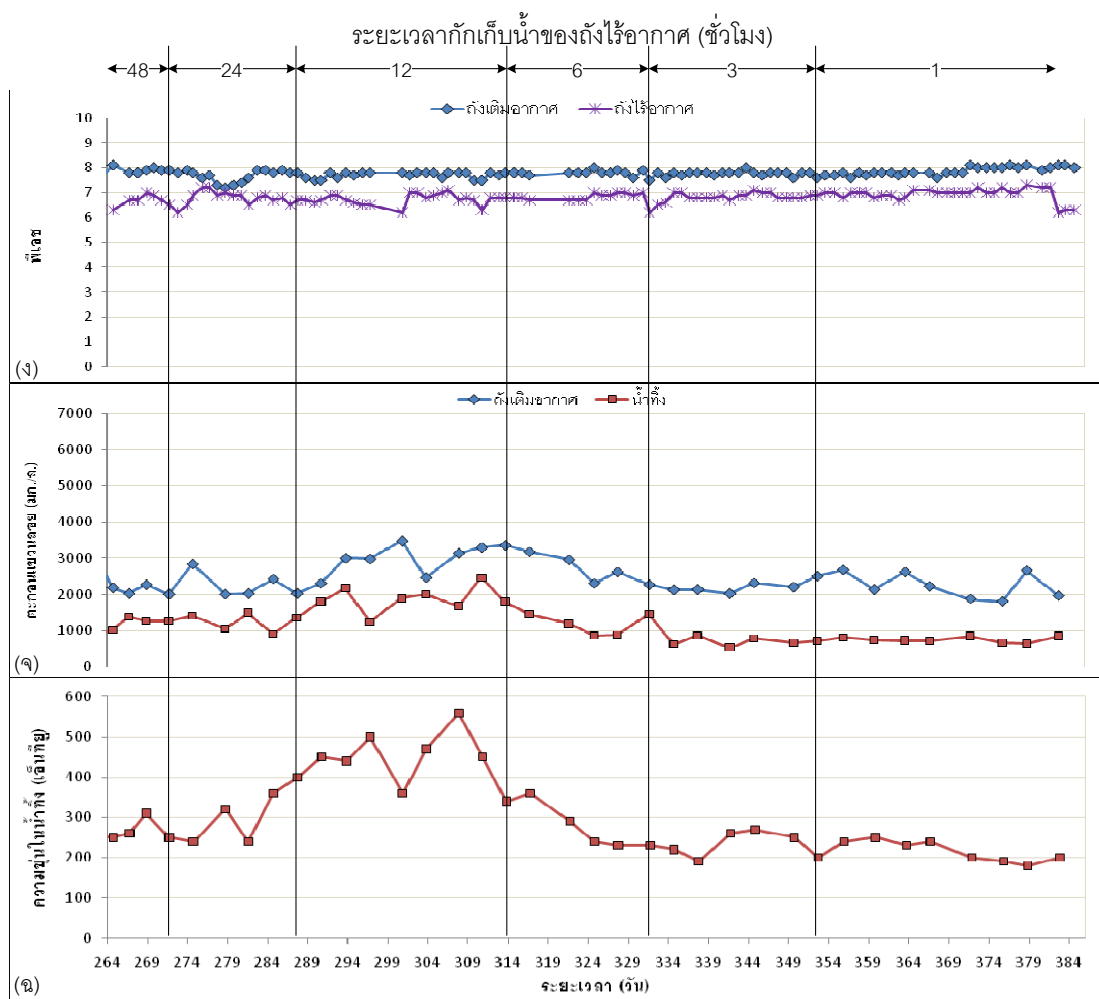
### 4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ

ประสิทธิภาพของระบบหลังจากมีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง และลดขนาดเป็นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 ในทุกชุดการทดลอง โดยพีเอชในถังเติมอากาศและถังไร้อากาศอยู่ในช่วง 7.5-8.1 และ 6.3-7.2 ตามลำดับ ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศอยู่ในช่วง 2,200-2,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในถัง

ไร่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 และ 6 ชั่วโมง มีตะกอนแขวนลอย ประมาณ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งมีความขุ่นอยู่ในช่วง 260-290 เอ็นทียู และจะเพิ่มขึ้นเป็น 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 450 เอ็นทียู ตามลำดับ ในถังไร่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 12 ชั่วโมง ซึ่งตะกอนแขวนลอยและความขุ่นที่เกิดขึ้นในระยะนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีปัญหาเรื่องตะกอนดำอยู่ และตะกอนที่ดังตกตะกอนมีปริมาณมาก จากนั้นค่าเหล่านี้จะลดลงในถังไร่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยตะกอนแขวนลอย และความขุ่นในน้ำทิ้งที่วิเคราะห์ได้ จะอยู่ในช่วงประมาณ 700-800 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 220-240 เอ็นทียู ซึ่งประสิทธิภาพของระบบ ที่มีถังไร่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ  
 (ก) ซีไอดีทั้งหมด (ข) ซีไอดีละลาย (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (ง) พีเอชในถังเติมอากาศ  
 และถังไร่อากาศ (จ) ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศและน้ำทิ้ง (ฉ) ความขุ่นในน้ำทิ้ง



รูปที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ (ต่อ) (ก) ซีโอดีทั้งหมด (ข) ซีโอดีละลาย (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ง) พีเอชในถังเดิมอากาศ และถังไร้อากาศ (จ) ตะกอนแขวนลอยในถังเดิมอากาศและน้ำทิ้ง (ฉ) ความขุ่นในน้ำทิ้ง

จากผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ตะกอนแขวนลอย และความขุ่นในน้ำทิ้ง ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำอื่นๆ ดังนั้นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง จึงถูกเลือกนำมาใช้เพื่อดำเนินงานวิจัยขั้นต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่ง่ายต่อการดูแลรักษาระบบ

#### 4.4 ผลการศึกษาจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

ถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง เป็นขนาดที่ถูกเลือกมาใช้ โดยทำการเพิ่มขนาดจากถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 1 ชั่วโมง ในการทดลองนี้จะดำเนินการทดลองเหมือนกับการศึกษาหาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสม แต่จะเพิ่มการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศเข้าสู่ถังเติมอากาศ ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 4.4.1 ผลของเหล็กที่อยู่ในระบบ

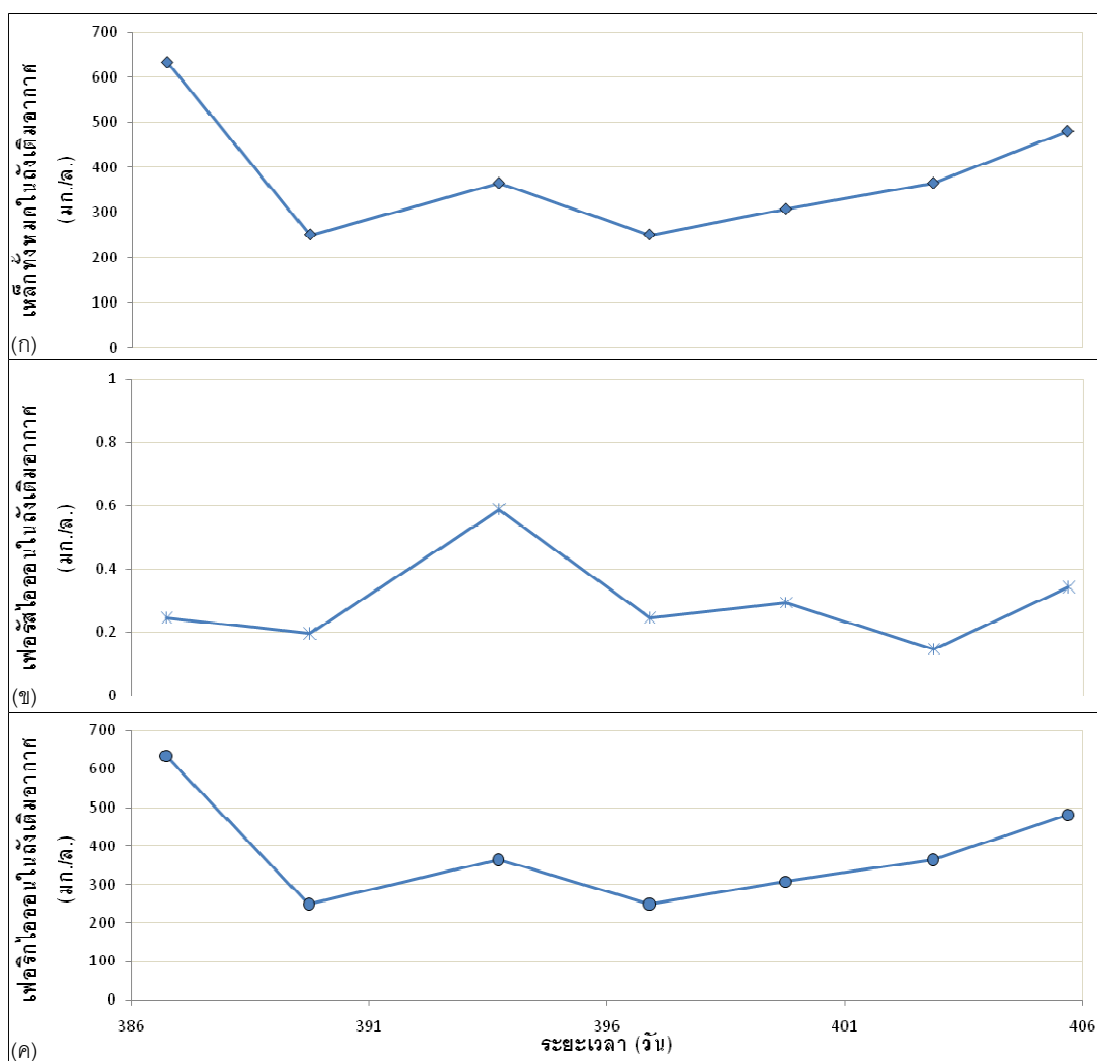
เมื่อทำการเพิ่มขนาดเป็นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และไม่ได้ทำการเติมเพอริกคลอไรด์ลงในถังไร้อากาศ แต่มีการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศเข้าสู่ถังเติมอากาศ ผลจากการวิเคราะห์เหล็กพบว่า มีปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเฉลี่ย 379.12 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์สไอออนเฉลี่ย 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกไอออนเฉลี่ย 378.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.14

น้ำทิ้งมีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 4.29 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์สไอออนเฉลี่ย 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกไอออนเฉลี่ย 3.98 มิลลิกรัมต่อลิตร

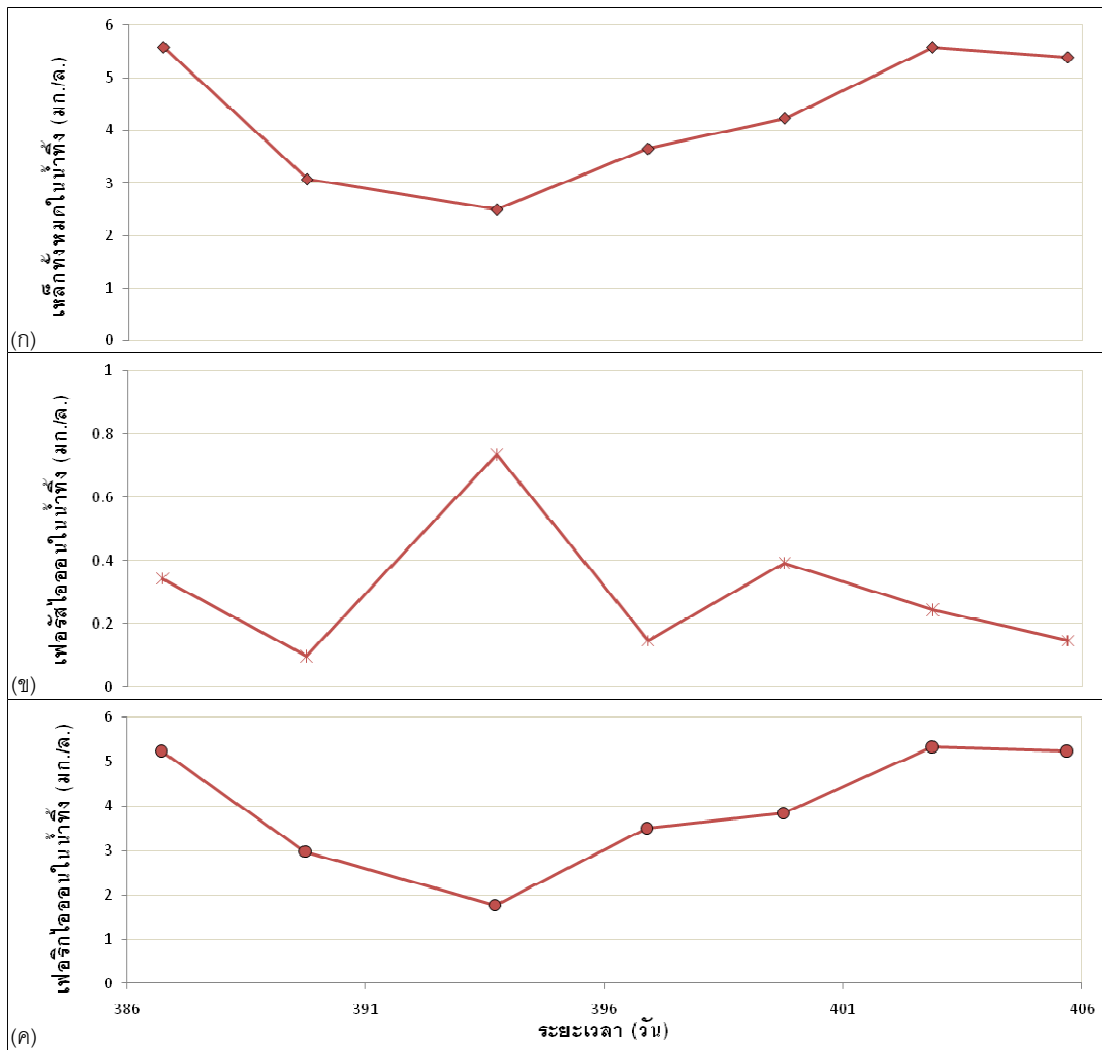
ถังหมักตะกอนไร้อากาศมีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 3.49 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์สไอออนเฉลี่ย 1.79 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกไอออนเฉลี่ย 1.70 มิลลิกรัมต่อลิตร

และในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง มีปริมาณเหล็กทั้งหมดเฉลี่ย 450.55 มิลลิกรัมต่อลิตร เพอร์สไอออนเฉลี่ย 0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกไอออนเฉลี่ย 450.11 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการทดลองนี้ถังหมักตะกอนไร้อากาศเข้ามามีส่วนร่วมในระบบบำบัด ซึ่งมีหน้าที่เป็นถังรับตะกอนส่วนเกินจากถังเติมอากาศ เพื่อควบคุมอายุตะกอน โดยในการทดลองก่อนหน้าจะทำการถ่ายน้ำในถังหมักตะกอนไร้อากาศทิ้งเป็นระยะๆ เพื่อไม่ให้ในถังนั้นมีมากเกินไป ทำให้ปริมาณเหล็กที่ถูกสะสมเป็นเวลานานจากการทิ้งตะกอนลดลงไปด้วย เมื่อน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศถูกเวียนกลับเข้าถังเติมอากาศมีผลทำให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

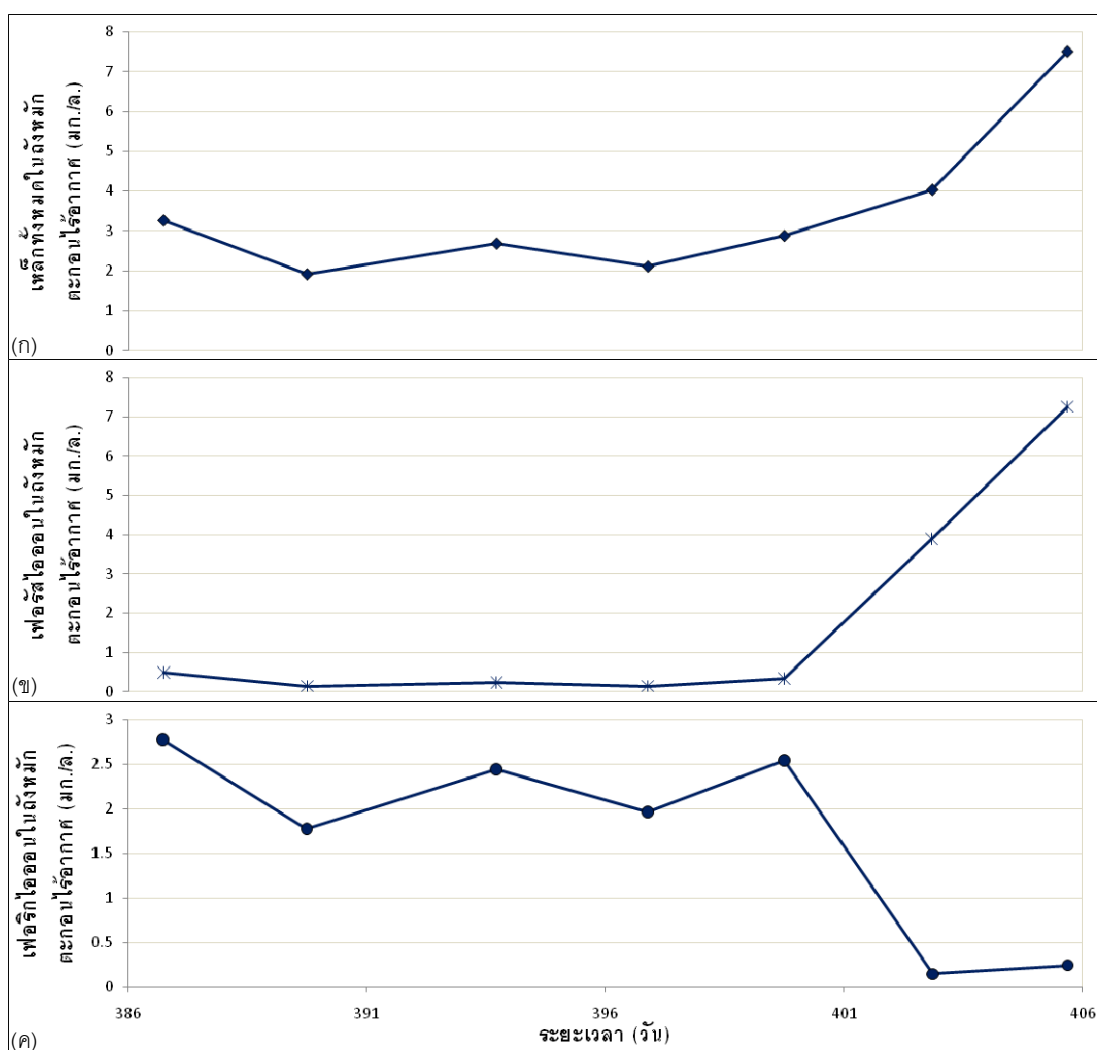


รูปที่ 4.11 ผลของเหล็กในถังเติมอากาศที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาที่เก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ  
(ก) เกล็ดทั้งหมด (ข) เพอร์ซไดออกไซด์ (ค) เฟอร์ริกไดออกไซด์

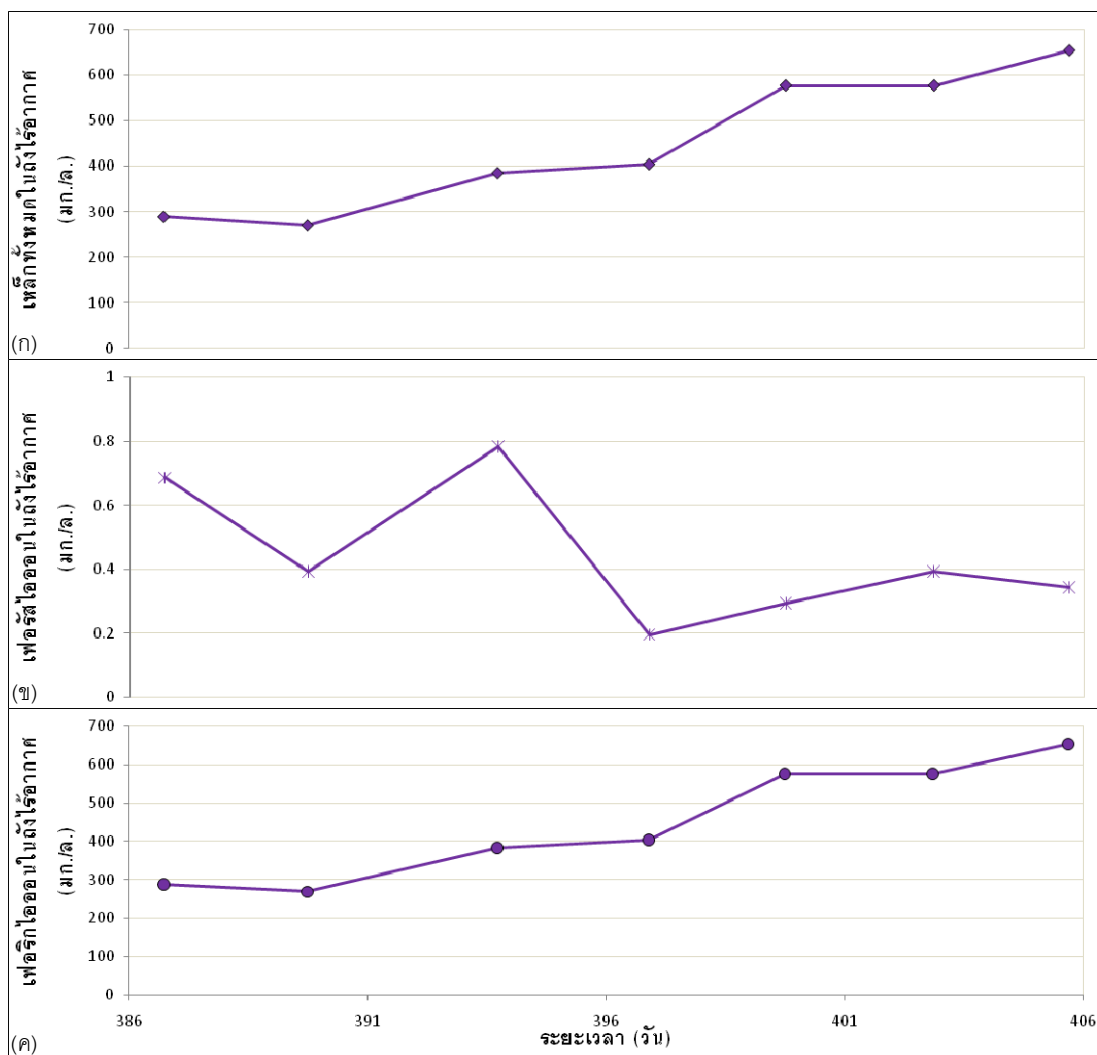


รูปที่ 4.12 ผลของเหล็กในน้ำทิ้งที่มีถึงไร่อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียน้ำจากถังหมักตะกอนไร่อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ  
(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอร์สไอออน (ค) เฟอร์ริกไอออน





รูปที่ 4.13 ผลของเหล็กในถังหมักตะกอนไร้อากาศที่มีถึงไร้อากาศระยะเวลาที่เก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเดิมอากาศ  
(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอร์รัสไอออน (ค) เฟอร์ริกไอออน



รูปที่ 4.14 ผลของเหล็กในถังไร้อากาศที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ  
(ก) เหลือทั้งหมด (ข) เฟอรัสไอออน (ค) เฟอริกไอออน

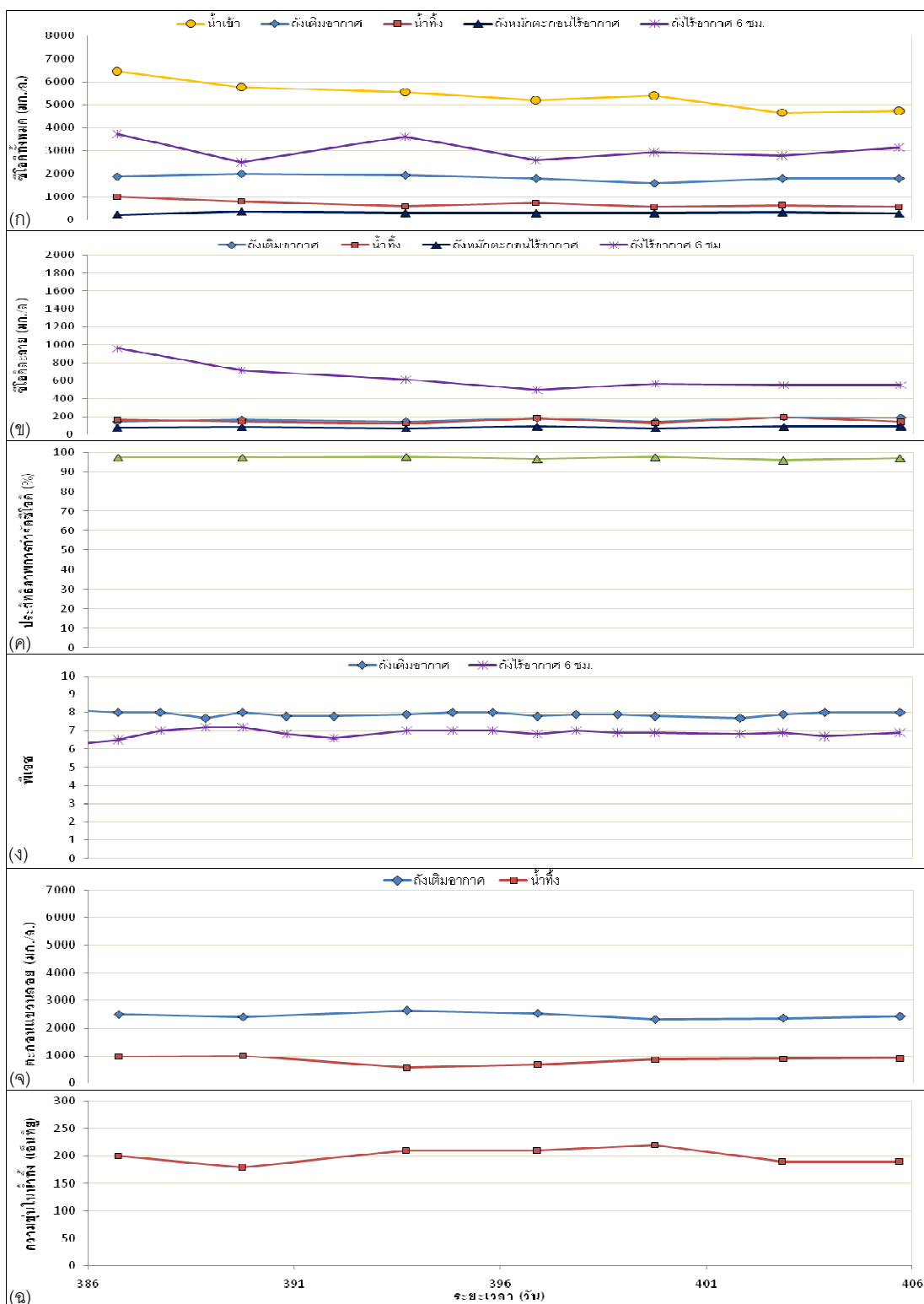
#### 4.4.2 ประสิทธิภาพของระบบที่มีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง

ประสิทธิภาพของระบบเมื่อเปลี่ยนขนาดมาเป็นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ แสดงในรูปที่ 4.15 จากการทดลองพบว่า ระบบเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 97 พีเอชในถังเติมอากาศ และถังไร้อากาศอยู่ในช่วง 7.7-8.1 และ 6.7-7.2 ตามลำดับ ถึง

เติมอากาศและน้ำทิ้งมีตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย 2,446 และ 837 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และน้ำทิ้งมีความขุ่นเฉลี่ย 200 เอ็นทียู

เมื่อเปรียบเทียบค่าตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งและความขุ่นกับถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง โดยไม่ได้ทำการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศเข้าถังเติมอากาศ พบว่ามีค่าลดลง เนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องตะกอนสีดำ และเวียนตะกอนเพียงพอ

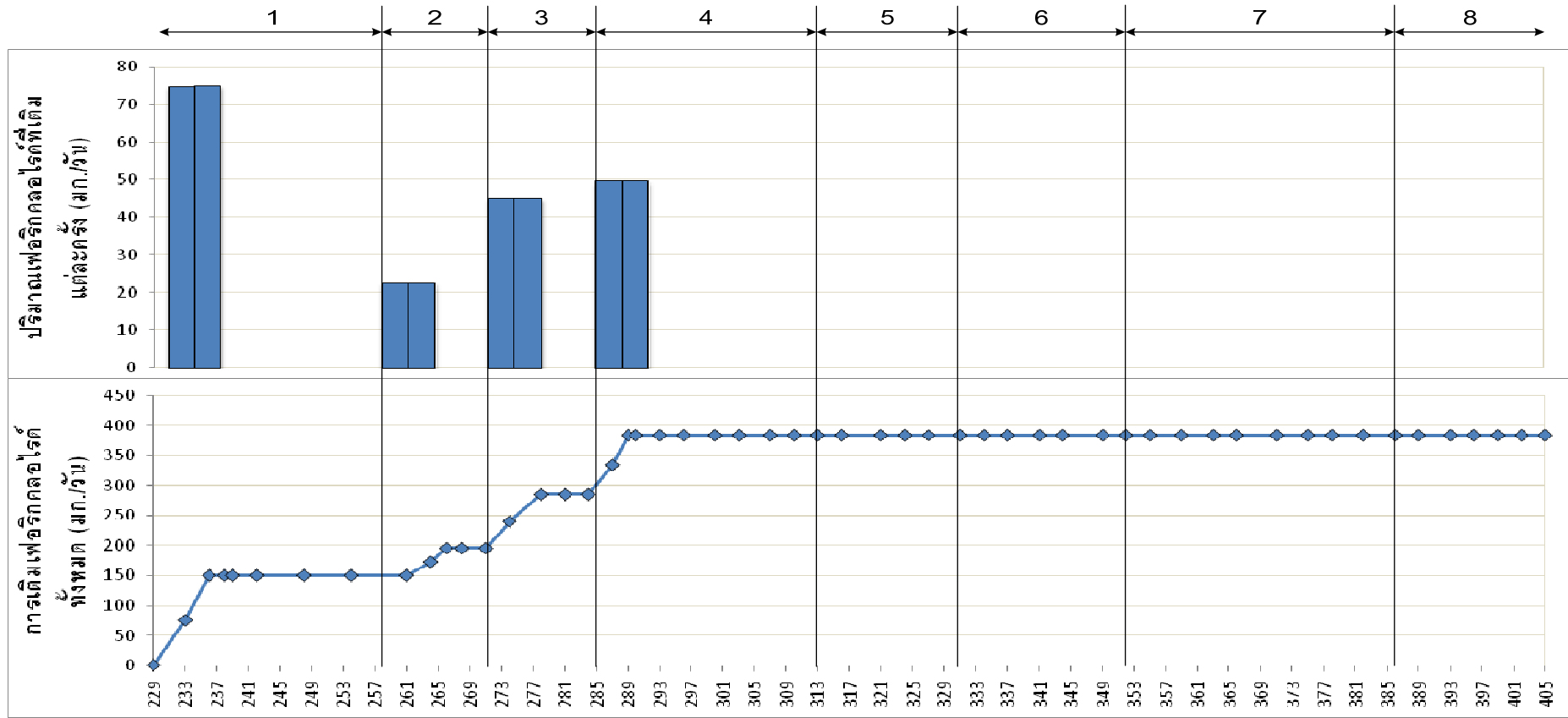
จากการผลทดลองข้างต้นสามารถสรุปผลของปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 4.16 สรุปปริมาณเหล็กต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ แสดงดังตารางที่ 4.3 และสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งหมดของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีถังไร้อากาศระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง

และเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

(ก) ชีโอดีทั้งหมด (ข) ชีโอดีละลาย (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี (ง) พีเอชในถังเติมอากาศ และถังไร้อากาศ 6 ชม. (ฉ) ตะกอนแขวนลอยในถังเติมอากาศและน้ำทิ้ง (ช) ความเข้มข้นในน้ำทิ้ง



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ปริมาณเฟอริกคลอไรด์ทั้งหมดที่เติมแต่ละครั้ง (ข) การเติมเฟอริกคลอไรด์ทั้งหมด

หมายเหตุ: 1 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์

4 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 12 ชม.

7 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 1 ชม.

2 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 48 ชม.

5 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 6 ชม.

8 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 6 ชม. และ

3 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 24 ชม.

6 ถึงเติมอากาศ+เฟอริกคลอไรด์+ถังไร้อากาศ 3 ชม.

เวียนนำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

ตารางที่ 4.3 สรุปปริมาณเหล็กต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ

ช่วงของการทดลอง	เฟอริกคลอไรด์ (มก./วัน)	ถังเติมอากาศ			น้ำทิ้ง			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ			ถังไร้อากาศ		
		เหล็กทั้งหมด (มก./ล.)	เฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	เฟอริกไอออน (มก./ล.)	เหล็กทั้งหมด (มก./ล.)	เฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	เฟอริกไอออน (มก./ล.)	เหล็กทั้งหมด (มก./ล.)	เฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	เฟอริกไอออน (มก./ล.)	เหล็กทั้งหมด (มก./ล.)	เฟอร์รัสไอออน (มก./ล.)	เฟอริกไอออน (มก./ล.)
เติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ													
- ระยะเวลาที่ 4	-	526.79	0.47	526.32	3.08	0.12	2.96	-	-	-	-	-	-
- ระยะเวลาที่ 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- ระยะเวลาที่ 6	-	287.85	2.44	285.41	5.35	0.58	4.77	-	-	-	-	-	-
- ระยะเวลาที่ 7	75	260.76	6.14	254.62	4.60	1.04	3.56	-	-	-	-	-	-
ถังไร้อากาศ 48 ชม.	22.5	232.56	0.23	232.33	7.66	0.31	7.35	-	-	-	331.01	0.84	330.17
ถังไร้อากาศ 24 ชม.	45	250	0.47	249.53	6.88	0.46	6.42	-	-	-	296.51	0.83	295.68
ถังไร้อากาศ 12 ชม.	49.5	225.85	0.65	225.20	10.47	0.57	9.90	-	-	-	498.64	1.85	496.79
ถังไร้อากาศ 6 ชม.	-	236.67	0.91	235.75	12.70	0.61	12.09	-	-	-	524.36	2.08	522.28
ถังไร้อากาศ 3 ชม.	-	246.79	0.57	246.23	5.42	0.56	4.86	-	-	-	532.05	1.91	530.15
ถังไร้อากาศ 1 ชม.	-	232.91	0.54	232.36	3.25	0.49	2.75	-	-	-	399.57	0.56	399.01
ถังไร้อากาศ 6 ชม. <sup>(1)</sup>	-	379.12	0.29	378.83	4.29	0.30	3.98	3.49	1.79	1.70	450.55	0.44	450.11

<sup>(1)</sup> ถังไร้อากาศ 6 ชม. ที่มีการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ

ช่วงของการทดลอง	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (%)	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
		ถึงเติมอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเติมอากาศ	น้ำทิ้ง	
เริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว						
- ระยะที่ 1	92	7.7-8	-	2,216	175	-
- ระยะที่ 2	-	-	-	-	-	-
- ระยะที่ 3	97	7.7-8	-	2,784	92	33
เติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ						
- ระยะที่ 4	97	7.7-8	-	3,095	151	63
- ระยะที่ 5	97	7.7-8.8	6.3-7	2,473	434	162
- ระยะที่ 6	96	7.7-8	-	2,918	382	135
- ระยะที่ 7	93	7.7-8	-	2,513	619	196
ถังไร้อากาศ 48 ชม.	95	7.7-8	6.3-6.9	2,208	1,178	264
ถังไร้อากาศ 24 ชม.	95	7.7-7.9	6.5-7	2,320	1,213	290
ถังไร้อากาศ 12 ชม.	96	7.5-7.9	6.2-7.1	2,835	1,828	454
ถังไร้อากาศ 6 ชม.	97	7.7-8	6.2-7.1	2,884	1,236	292
ถังไร้อากาศ 3 ชม.	96	7.6-8	6.2-7.1	2,173	817	236
ถังไร้อากาศ 1 ชม.	97	7.6-8.1	6.1-7.2	2,271	740	214
ถังไร้อากาศ 6 ชม. <sup>(1)</sup>	97	7.7-8.1	6.7-7.2	2,446	837	200

<sup>(1)</sup> ถังไร้อากาศ 6 ชม. ที่มีการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

จากรูปที่ 4.16 แสดงปริมาณเพอริกคลอไรด์ที่ถูกเติมลงในระบบ ซึ่งในการทดลองทำการเตรียมเพอริกคลอไรด์ 3 ลิตร สำหรับใช้ 2 วัน ตลอดการทดลอง โดยเพอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกเติมลงถังเติมอากาศโดยตรง (ยังไม่มีถังไร้อากาศ) หรือคิดเป็น 75 มิลลิกรัมต่อวัน เมื่อเพิ่มถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง เข้ามาในระบบ เพอริกคลอไรด์จะถูกเติมลงในถังไร้อากาศ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 22.5 มิลลิกรัมต่อวัน ที่ถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 24 ชั่วโมง เพอริกคลอไรด์ถูกเติมลงในถังไร้อากาศ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 45 มิลลิกรัมต่อวัน และถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 12 ชั่วโมง เพอริกคลอไรด์ถูกเติมลงในถังไร้อากาศ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 49.5 มิลลิกรัมต่อวัน ส่วนถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 3 และ 1 ชั่วโมง และถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง ที่เวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศ ไม่ได้เติมเพอริกคลอไรด์

ปริมาณเพอริกคลอไรด์ที่ถูกเติมลงในระบบเมื่อมีถังไร้อากาศนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำมากที่สุด คือ 48 ชั่วโมง และไม่มีการเติมเพอริกคลอไรด์อีกในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำตั้งแต่ 6 ชั่วโมง เป็นต้นไป ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากช่วงแรกๆ เริ่มมีการเติมเพอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศโดยตรง และมีถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง ปริมาณที่ใส่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกๆ วัน ทำให้มีเหล็กสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อเกิดปัญหาในการควบคุมปริมาณเหล็กในถังเติมอากาศทำให้ต้องปิดระบบไร้อากาศ และไม่เติมเพอริกคลอไรด์ เมื่อสามารถควบคุมปริมาณเหล็กในถังเติมอากาศได้แล้ว จึงเติมเพอริกคลอไรด์ลงในถังเติมอากาศใหม่แต่เป็นการเติมแบบที่เดียวเนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณเหล็กในถังเติมอากาศได้ง่ายกว่าที่จะเติมเพอริกคลอไรด์แบบต่อเนื่องในระบบ

ผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณเหล็กต่างๆ ของระบบเอเอสแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ พบว่า ถังไร้อากาศสามารถช่วยลดการเติมเพอริกคลอไรด์ลงในระบบได้ เมื่อเทียบกับการเติมลงในถังเติมอากาศโดยตรง คือ สามารถลดการเติมจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 15 30 และ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ แต่เมื่อลดขนาดเป็นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 3 และ 1 ชั่วโมง พบว่าไม่ต้องเติมเพอริกคลอไรด์ลงในระบบ ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากปริมาณเหล็กที่มีอยู่ในระบบมากเกินไปจนไม่ต้องเติมเพอริกคลอไรด์ในระบบอีก

ในทางทฤษฎีเมื่อเวียนตะกอนที่มีทั้งตะกอนจุลินทรีย์และเพอริกไฮดรอกไซด์จากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังไร้อากาศ ภายใต้สภาวะที่ขาดออกซิเจนนี้ เพอริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe^{3+}$ ) สามารถใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอนทำให้ตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์ถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe^{2+}$ ) ที่มี



ความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ดังนั้น ในถังไร้อากาศนี้จะพบปริมาณเฟอรัสไอออนสูง เมื่อเฟอรัสไอออนไหลเข้าสู่ถังเติมอากาศ ซึ่งมีออกซิเจนเป็นสารรีดิวซ์ที่ต่ำกว่าเฟอรัสไอออนจะถูกออกซิไดส์เป็นเฟอริกไอออน โดยจะพบเหล็กในรูปของเฟอริกไอออนสูง และจะตกตะกอนในรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์ แต่จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่า ในทุกชุดการทดลอง ทั้งในถังเติมอากาศ น้ำทิ้ง และถังไร้อากาศ เหล็กเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของเฟอริกไอออน โดยมีเฟอรัสไอออนอยู่ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งผลการทดลองของถังไร้อากาศนี้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะภายในถังไร้อากาศอาจมีออกซิเจนละลายในน้ำอยู่เล็กน้อย ประกอบกับมีไนเตรตที่เกิดจากการออกซิไดส์ของแอมโมเนียในถังเติมอากาศ ซึ่งไนเตรตที่เกิดขึ้นมาจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ถูกระดมขึ้นจากนม และมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเกิดการย่อยสลายสารพวกโปรตีนนี้ก็จะได้แอมโมเนียซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียไอออน ดังสมการ



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นถ้าพีเอชสูงชันก็จะมีแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้น (มันดิน ตันฑุลเวศม์, 2546) ซึ่งในการทดลองนี้จะควบคุมพีเอชในถังเติมอากาศประมาณ 7.7-8

น้ำเสียสังเคราะห์จะถูกย่อยสลายจนได้แอมโมเนียแล้ว แอมโมเนียจะใช้ออกซิเจนในถังเติมอากาศเป็นตัวรีดิวซ์ และออกซิไดส์เป็นไนเตรต หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยในสภาวะที่มีไนเตรตนี้เหมาะกับจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ไนเตรตเป็นตัวรีดิวซ์มากกว่า หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้เฟอริกไอออนไม่ถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์และรีดิวซ์เป็นเฟอรัสไอออนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nielsen และ Nielsen (1998b) ที่พบว่า เฟอรัสไอออนในระบบทำให้อัตราการกำจัดไนเตรตเพิ่มขึ้น โดยไนเตรตจะถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอรัสไอออนเป็นเฟอริกไอออน (Philips และคณะ, 2002)

การวิเคราะห์เหล็กในถังหมักตะกอนไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 14 วัน ในช่วงที่ทำการทดลองเวียน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าสู่เติมอากาศ โดยไม่มีการกวนภายในถัง และทำการเก็บตัวอย่างน้ำช่วงกลางถึงมาวิเคราะห์ ซึ่งตามทฤษฎี ตะกอนที่อยู่ด้านล่างของถังน่าจะพบเหล็กในรูปเฟอริกไอออน ส่วนตัวอย่างน้ำที่เก็บมาวิเคราะห์น่าจะพบเหล็กในรูปเฟอรัสไอออน แต่จากการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่า มีเฟอริกไอออนเกิดขึ้น 1.70 มิลลิกรัมต่อลิตรเกิดขึ้น หรือประมาณร้อยละ 50 ของเหล็กทั้งหมดในถังหมักตะกอนไร้อากาศ และมีเฟอรัสไอออน

1.79 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในถังเต็มอากาศมีเฟอรัสไอออนเพียง 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น และไม่มีเฟอรัสไอออนในถังใดที่มีค่ามากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ในถังหมักตะกอนไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 14 วัน ดังนั้นถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ (48 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมง) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปของเหล็ก

จากตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ของระบบ พบว่า ระบบเฮเอสแบบไร้อากาศ-เต็มอากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Philips และคณะ (2002) และ Oikonomidis และคณะ (2010) และเมื่อเทียบกับตารางที่ 4.3 พบว่า ปริมาณเฟอริกคลอไรด์ที่เติมลงในระบบนั้นไม่มีผลกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (Clark และคณะ, 2000) แต่มีปัญหาเรื่องความขุ่นของน้ำทิ้งเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใยทำให้ตกตะกอนไม่ดี การเติมอากาศที่รุนแรงเกินไปทำให้ฟล็อกแตก การเติมเฟอริกคลอไรด์ในระบบมากเกินไป ทำให้ประจุที่ผิวหน้าคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้าม ทำให้อนุภาคคอลลอยด์จะแขวนลอยในระบบใหม่ได้อีกครั้ง (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) และมีตะกอนสีดำในถังตกตะกอนซึ่งเกิดจากเฟอริกไอออนถูกรีดิวซ์เป็นเฟอรัสไอออนในสภาวะไร้อากาศ ตะกอนที่สะสมตัวอยู่เป็นเวลานานจะทำให้เกิดก๊าซและดันตะกอนให้ลอยขึ้น ส่งผลให้น้ำทิ้งมีความขุ่นได้ Eikelboom และ Grovenstein (1998) พบว่า การใส่เหล็กเป็นสารช่วยตกตะกอนนั้นจะทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม ก็ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าการใส่เหล็กโดยตรงจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใย (Clark และคณะ, 2000)

#### 4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเฟอริกไอออนเป็นเฟอรัสไอออนแบบแบดซ์

ในการทดลองนี้จะนำน้ำจากถังเต็มอากาศมาใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร ปริมาณ 500 มิลลิลิตร และปิดด้วยจุกยางเพื่อให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ นอกจากนี้ยังเติมก๊าซไนโตรเจน 99.999% ลงไปด้วย เพื่อลดระยะเวลาในการเปลี่ยนสภาวะจากมีอากาศเป็นไร้อากาศให้เร็วขึ้น โดยจะทำการทดสอบการเปลี่ยนรูปของเฟอรัสและเฟอริกไอออน และทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อ ซึ่งสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

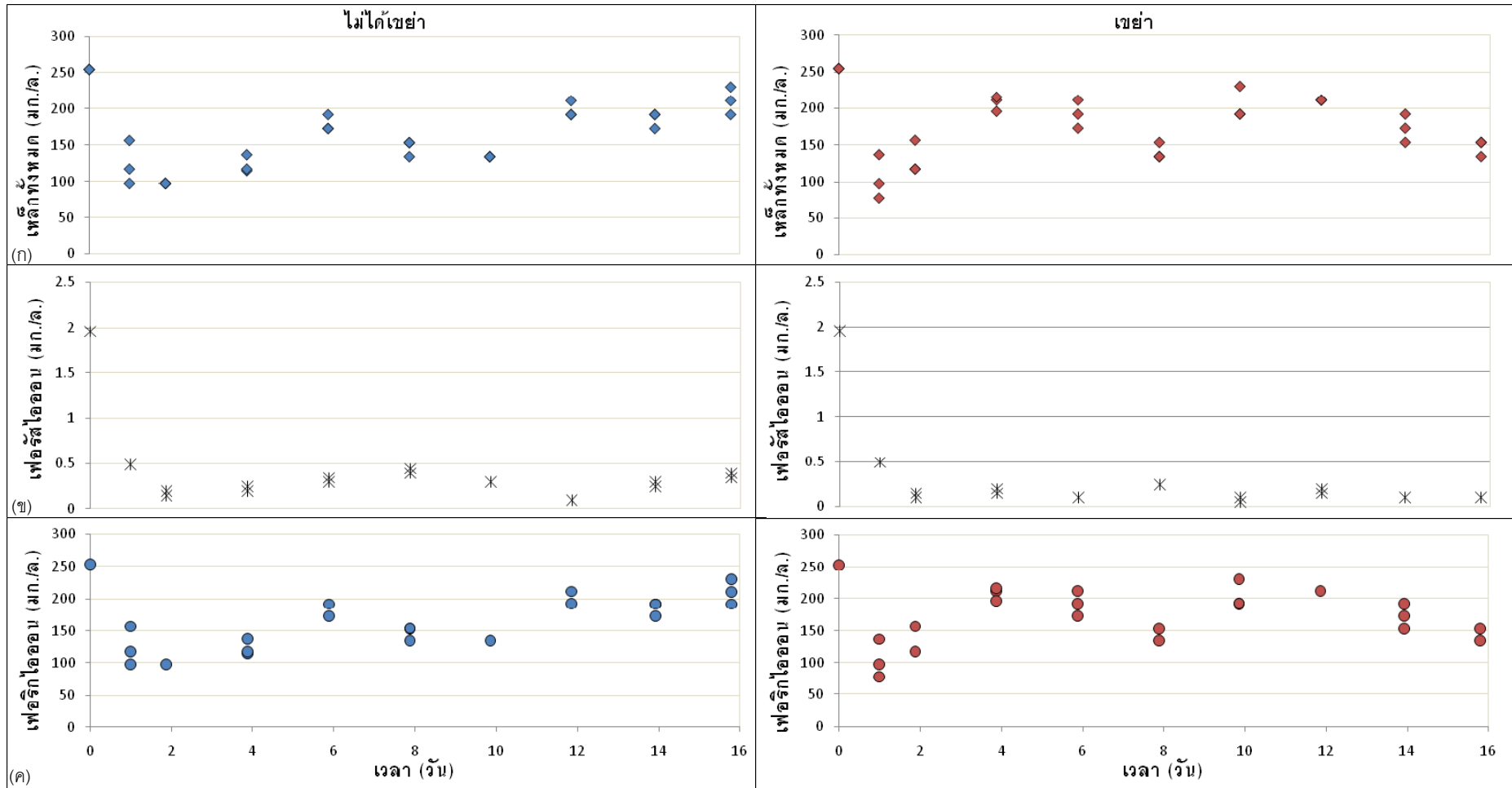
#### 4.5.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน โดยไม่เขย่า และเขย่า

ผลการทดลองการเปลี่ยนรูปของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.17 - 4.18

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของเฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน โดยไม่เขย่า และเขย่า

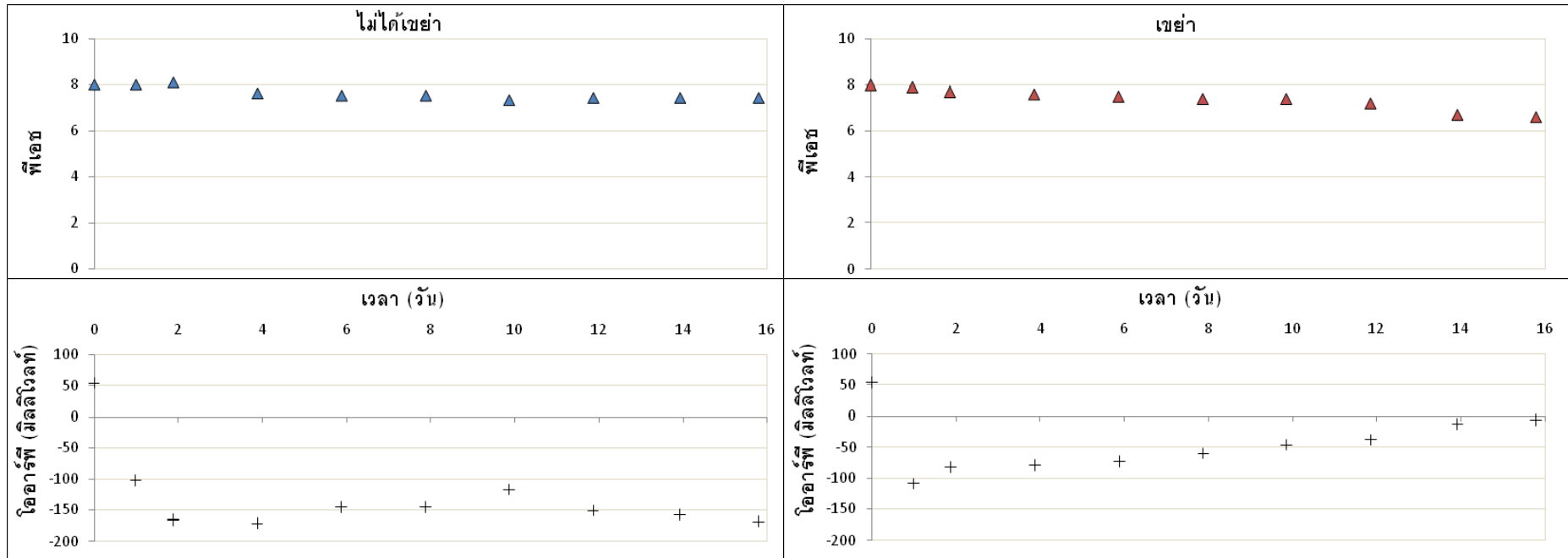
พารามิเตอร์	หน่วย	ขบวนการที่มิได้เขย่า	ขบวนการที่เขย่า
เหล็กทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	165.83	176.85
เฟอร์รัสไอออน	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.46	0.35
เฟอร์ริกไอออน	มิลลิกรัมต่อลิตร	165.36	176.49
พีเอช	-	7.6	7.3
โออาร์พี	มิลลิโวลต์	-147	-56

ปริมาณเหล็กทั้งหมดและเฟอร์ริกไอออนของขบวนการที่เขย่า และมิได้เขย่ามีแนวโน้มคงที่ โดยเฟอร์รัสไอออนมีแนวโน้มลดลงจนคงที่ แสดงในรูปที่ 4.17 พีเอชของขบวนการที่มิได้เขย่าค่อนข้างคงที่ ส่วนที่ทำการเขย่า พีเอชมีแนวโน้มลดลง ค่าโออาร์พีของขบวนการที่มิได้เขย่าค่อนข้างคงที่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง -150 มิลลิโวลต์ แต่ขบวนการที่ทำการเขย่าค่าโออาร์พีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ 0 มิลลิโวลต์ แสดงในรูปที่ 4.18 ทั้งนี้เนื่องจากการเขย่าอาจทำให้มีอากาศจากภายนอกเข้าไปได้



รูปที่ 4.17 ผลการเปลี่ยนแปลงของเฟอริสและเฟอริกไอออนแบบแบตช์ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า

(ก) เหล็กทั้งหมด (ข) เฟอริสไอออน (ค) เฟอริกไอออน



รูปที่ 4.18 ผลของพีไอซ์และไออาร์พีแบบแบตเตอรี่ โดยไม่ได้เขย่า และเขย่า

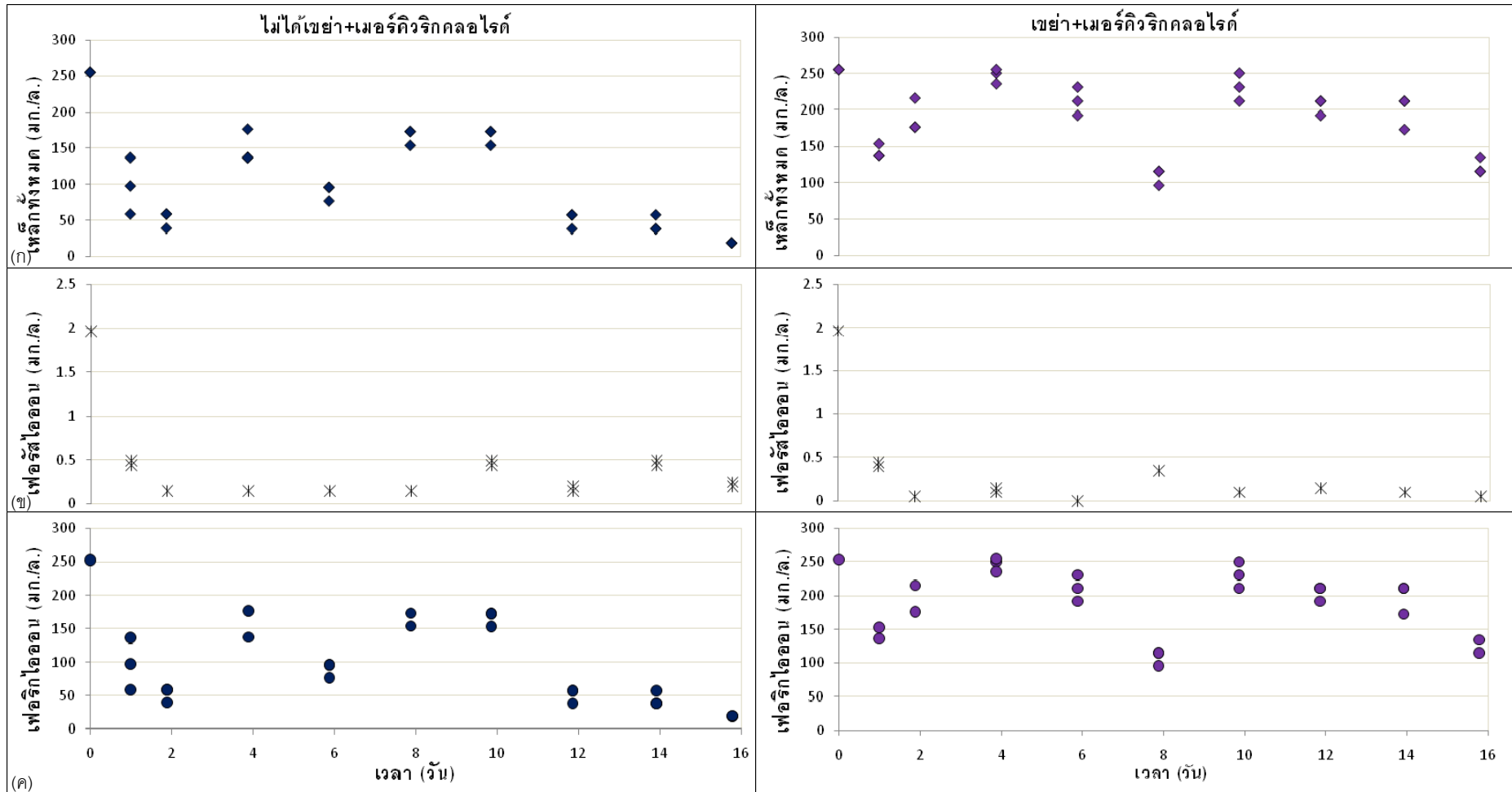
#### 4.5.2 ผลการทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ โดยไม่เขย่า และเขย่า

การทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ โดยไม่เขย่า และเขย่า ซึ่งในขวดรูปชมพู่แต่ละขวดนั้นจะใส่เมอร์คิวริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ลงไปด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.19 - 4.20

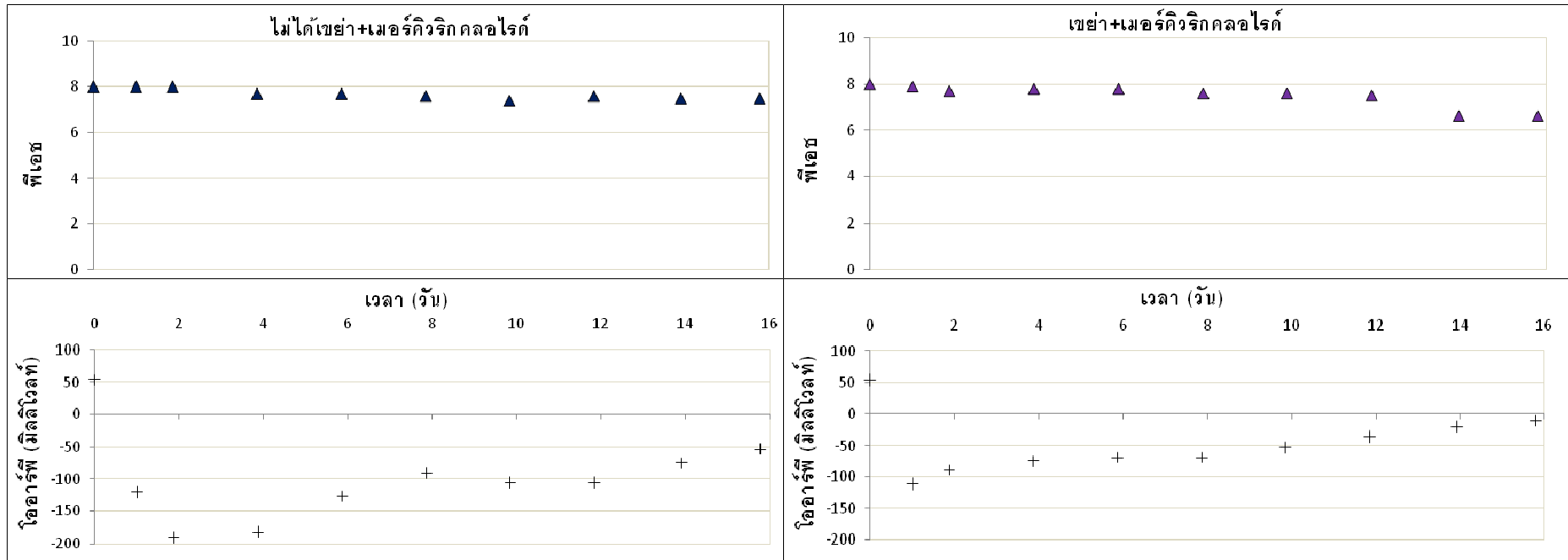
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์การทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ โดยไม่เขย่า และเขย่า

พารามิเตอร์	หน่วย	ขวดรูปชมพู่ที่ไม่ได้เขย่า	ขวดรูปชมพู่ที่เขย่า
เหล็กทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	109.40	176.85
เฟอร์รัสไอออน	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.43	0.35
เฟอริกไอออน	มิลลิกรัมต่อลิตร	108.97	176.49
พีเอช	-	7.7	7.5
โออาร์พี	มิลลิโวลต์	-117	-59

ปริมาณเหล็กทั้งหมดและเฟอริกไอออนของขวดรูปชมพู่ที่เขย่า และไม่ได้เขย่ามีแนวโน้มคงที่ แสดงในรูปที่ 4.19 โดยเฟอร์รัสไอออนมีแนวโน้มที่ลดลงจนคงที่ พีเอชของขวดรูปชมพู่ที่ไม่ได้เขย่าค่อนข้างคงที่ ส่วนที่ทำการเขย่า พีเอชมีแนวโน้มลดลง ค่าโออาร์พีของขวดรูปชมพู่ที่ไม่ได้เขย่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง -150 มิลลิโวลต์ แต่ขวดรูปชมพู่ที่ทำการเขย่าค่าโออาร์พีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.20 ทั้งนี้เนื่องจากการเขย่าอาจทำให้มีอากาศจากภายนอกเข้าไปได้



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์การทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์แบบแบตช์ โดยไม่เขย่า และเขย่า  
 (ก) เกล็ดทั้งหมด (ข) เฟอร์ริสไออน (ค) เฟอร์ริกไออน



รูปที่ 4.20 ผลของพีเอชและไออาร์พีในการทดสอบสถานะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์แบบแบตช์ โดยไม่เขย่า และเขย่า



ผลการทดลองการศึกษาการเปลี่ยนรูปของเพอร์สและเพอริกไฮออน และการทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเหล็กนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งในทางทฤษฎี สภาวะที่ไร้อากาศเพอริกไฮออนจะถูกรีดิวซ์เป็นเพอร์สไฮออน แต่ผลการทดลองที่ได้ ปริมาณเพอร์สไฮออนมีปริมาณลดลงและไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคาดว่าน้ำจากถังเติมอากาศที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีไนเตรตอยู่จึงถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์ก่อนเพอริกไฮออน ทำให้เพอริกไฮออนไม่ถูกใช้เป็นตัวรีดิวซ์ และไม่ถูกรีดิวซ์เป็นเพอร์สไฮออนในขบวนการหมักที่ทำให้มีสภาวะเป็นถึงไร้อากาศ ซึ่งสอดคล้องกับค่าไออาร์พีที่วัดได้ และอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในน้ำไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปของเหล็กและทดสอบสภาวะฆ่าเชื้อด้วยเมอร์คิวริกคลอไรด์เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางชีวภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสภาวะที่เติมและไม่เติมเมอร์คิวริกคลอไรด์ พบว่า ผลของการวิเคราะห์เหล็กนั้นมีความไม่แตกต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจึงไม่น่าจะเป็นกระบวนการทางชีวภาพ

ไฮออนของเหล็กนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งทางเคมีและชีวภาพ โดยจะอยู่ในรูปของตะกอน ซึ่งสามารถถูกเวียนกลับเข้ามาในระบบใหม่ได้ ในปฏิกิริยาทางชีวภาพ เพอร์สไฮออนสามารถถูกออกซิไดส์เป็นเพอริกไฮออนได้ด้วยไนเตรตหรือไนไตรต์ที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่ลดออกซิเดชันของออกซิเจน นอกจากนี้ในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน เพอร์สไฮออนสามารถถูกออกซิไดส์โดยแมงกานีสออกไซด์ได้อีกด้วย (Nielsen และ Nielsen, 1998b) จากงานวิจัยของ Straub และคณะ (1996) พบว่า กระบวนการออกซิเดชันของเพอร์สไฮออนด้วยไนเตรตนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางชีวภาพที่ทดสอบใน Enrichment culture และ Pure culture เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มดีไนตริฟายเออร์ (Denitrifier bacteria) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nielsen และ Nielsen (1998a) ที่ทำการทดลองในระบบเอเอส และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ แม้ว่ายังไม่สามารถระบุจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องได้ก็ตาม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมเพอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ พบว่า น้ำน้ำทิ้งจากระบบเอเอสมาหาปริมาณเพอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทส โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของเพอริกคลอไรด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและความขุ่นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 78 และ 98 ตามลำดับ และเมื่อนำเพอริกคลอไรด์เติมในถังเติมอากาศเพื่อควบคุมให้มีเหล็กในถังเติมอากาศ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เพอริกคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 75 มิลลิกรัมต่อวัน สามารถควบคุมให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเฉลี่ย 260.76 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์สไอออนเฉลี่ย 6.14 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกไอออนเฉลี่ย 254.62 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. จากการศึกษาขนาดถังไร้อากาศที่เหมาะสมในการสลายตะกอนเพอริกไฮดรอกไซด์ โดยแปรผันขนาดของถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 24 12 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการเติมเพอริกคลอไรด์ในถังไร้อากาศ พบว่า ถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 48 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณเพอริกคลอไรด์ลงได้จากเดิม 75 มิลลิกรัมต่อวัน เป็น 22.5 มิลลิกรัมต่อวัน และเพิ่มปริมาณขึ้นเป็น 45 และ 49.5 มิลลิกรัมต่อวัน ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ และไม่ต้องเติมเพอริกคลอไรด์ในถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 3 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ

3. จากผลการศึกษาจากการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ พบว่า ถังไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำ 6 ชั่วโมง ถูกลำมาใช้ เมื่อน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศถูกเวียนกลับเข้าถังเติมอากาศมีผลทำให้ปริมาณเหล็กทั้งหมดในถังเติมอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

4. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของเพอริกไอออนเป็นเฟอร์สไอออนในถังไร้อากาศแบบแบตช์ พบว่า ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 16 วัน เพอริกไอออนและเฟอร์สไอออนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกการทดลอง ซึ่งคาดว่าในน้ำจากถังเติมอากาศที่นำมาใช้ในการทดลองนั้น มีไนเตรตอยู่จึงถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนก่อนเพอริกไอออน ทำให้เพอริกไอออนไม่ได้ถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และไม่ถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์สไอออนในขบวนการหมัก และอาจมีสาเหตุมาจาก

ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในน้ำไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสภาวะที่เติมและไม่เติมเมอร์คิวริกคลอไรด์ พบว่า ผลของการวิเคราะห์เหล็กนั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจึงไม่น่าจะเป็นกระบวนการทางชีวภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการปรับเครื่องสูบน้ำเพื่อให้สามารถเติมเพอริกคลอไรด์อย่างต่อเนื่องได้ตลอดเวลา
2. ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพิ่มเติม เช่น ไนเตรต ออกซิเจนละลาย เป็นต้น เพื่อที่ควบคุมและแก้ไขปัญหาได้ทันที่
3. อาจต้องใช้ถังใส่อากาศที่มีระยะเวลาเก็บน้ำมากกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้
4. การศึกษาการเปลี่ยนรูปของเหล็กนั้น อาจต้องทำการศึกษาเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งด้านปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ควบคู่ไปกับการหาค่าทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic) เพิ่มเติม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กุลลดา บันลือวงศ์. 2544. การกำจัดเหล็กในน้ำสำหรับเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบปิดด้วยวิธีออกซิเดชันร่วมกับการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีระ เกรอต. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย: การบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรวิทย์ จันทร์ชนะ. 2542. การบำบัดค่าซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยวิธีออกซิเดชันและการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพล สายพานิช. 2538. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Amuda, O.S. and Amoo, I.A. 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. Journal of Hazardous Material 141: 778-783.
- Andrianisa, H.A., Ito, A., Sasaki, A., Aizawa, J. and Umita, T. 2008. Biotransformation of arsenic species by activated sludge and removal of bio-oxidised arsenate from wastewater by coagulation with ferric chloride. Water Research 42: 4809-4817.
- APHA, 1998. American Public Health Association Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20<sup>th</sup> ed. Washington, DC: APHA and American Water Works Association and Water Environmental Federation.
- Benjamin, M.M. 2002. Water chemistry. 1<sup>st</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Boyd, C.E. 1995. Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture. 1<sup>st</sup> ed. United States of

- America: Chapman and Hall.
- Canfield, D.E., Kristensen, E. and Thamdrup, B. 2005. The Iron and Manganese Cycle. Advances in Marine Biology 48: 269-312.
- Clark, T., Burgess, J.E., Stephenson, T. and Arnold-Smith, A.K. 2000. The Influence of Iron-Based Co-Precipitants on Activated Sludge Biomass. Process Safety and Environmental Protection 78: 405-410.
- Dolfing, J., Eekert, M.V. and Mueller, J. 2006. Thermodynamics of Low Eh Reactions. Battelle's Fifth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. May 22-26, Monterey California.
- Ebeling, J.M., Sibrell, P.L., Ogden, S.R. and Summerfelt, S.T. 2003. Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. Aquacultural Engineering 29: 23-42.
- Eckenfelder, W.W. 1989. Industrial water pollution control. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Eikelboom, D.H. and Grovenstein, J. 1998. Control of bulking in a full scale plant by addition of talc (PE 8418). Water Science and Technology 37: 297-301.
- Ikemoto, R.Y., Komori, T. and Matsui, S. 2002. Biological iron oxidation-reduction and effects on sulfur oxidation-reduction, Denitrification and poly-P accumulation in anaerobic-oxic activated sludge. Water Science and Technology 46: 55-60.
- Lagrega, M.D., Buckingham, P.L. and Evans, J.C. 2001. Hazardous waste management. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Liang, Z., Wang, Y., Zhou, Y. and Liu, H. 2009. Coagulation removal melanoidins from biologically treated molasses wastewater using ferric chloride. Chemical Engineering Journal 152: 88-94.
- Loveley, D.R. 2000. Environmental microbe-metal interactions. 1<sup>st</sup> ed. United States of America: ASM Press.
- Madigan, M.T. and Matinko, J.M. 2006. Biology of Microorganisms. 11<sup>th</sup> ed. United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Metcalf and Eddy, Inc. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.

- Mohammad, C.A. and Shaban, G. 2002. Effect of metal salt coagulants on treatment of activated sludge effluent in sulfite mill pulp and paper plant. Iran. J. & Chem. Eng 21: 110-117.
- Nielsen, J.L. and Nielsen, P.H. 1998a. Microbial Fe(II)-oxidation by nitrate in activated sludge. Water Science and Technology 37: 403-406.
- Nielsen, J.L. and Nielsen, P.H. 1998b. Microbial Nitrate-Dependent Oxidation of Ferrous Iron in Activated Sludge. Environmental Science and Technology 32: 3556-3561.
- Oikonomidis, I., Burrows, L.J. and Carliell-Marquet, C.M. 2010. Mode of action of ferric and ferrous iron salts in activated sludge. Chemical Technology and Biotechnology 85: 1067-1076.
- Philips, S., Rabaey, K. and Verstraete, W. 2002. Impact of iron salts on activated sludge and interaction with nitrite or nitrate. Bioresource Technology 88: 229-239.
- Straub, K.L., Benz, M., Schink, B. and Widdel, F. 1996. Anaerobic, Nitrate-Dependent Microbial Oxidation of Ferrous Iron. Applied and Environmental Microbiology 62: 1458-1460.
- Wilén, B.M., Keiding, K. and Nielsen, P.H. 2004. Flocculation of activated sludge flocs by stimulation of the aerobic biological activity. Water Research 38: 3909-3919.
- Xu, G.R., Yan, Z.C., Wang, Y.C. and Wang, N. 2009. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. Journal of Hazardous Material 161: 663-669.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์หลัก



## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์เหล็กด้วยวิธีฟีนแอนโทรลีน (Phenanthroline)(APHA, 1998)

#### สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น
2. สารละลายไฮดรอกซีลามีน (Hydroxylamine Solution) ละลายไฮดรอกซีลามีน ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (Ammonium Acetate Buffer Solution) ละลายแอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ) 250 กรัม ในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติมกรดอะซิติก ชนิด Glacial 700 มิลลิลิตร ถึงแม้จะใช้แอมโมเนียมอะซิเตตเกรดดีแต่ก็ยังมีเหล็กเจือปนอยู่ ดังนั้น ควรจะทำกราฟมาตรฐานใหม่ทุกครั้งเมื่อเตรียมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ใหม่
4. สารละลายฟีนแอนโทรลีน (Phenanthroline) ละลาย 1,10 ฟีนแอนโทรลีนโมโนไฮเดรต ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 หยด
5. สารละลายสต็อกเหล็ก (Stock Iron Solution) เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ แล้วนำไปละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต จำนวน 1.404 กรัม และเติมน้ำกลั่นจนได้ 1,000 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน
6. สารละลายมาตรฐานเหล็ก (Standard Iron Solution) ปิเปตสารละลายสต็อกเหล็ก 50 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนครบปริมาตร

หมายเหตุ: สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร เท่ากับ เหล็ก 10 ไมโครกรัม

#### การวิเคราะห์เหล็กทั้งหมด (Total Iron)

1. เขย่าตัวอย่างให้เข้ากัน ตวงตัวอย่างปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในปิเปตอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (ถ้าตัวอย่างมีเหล็กมากกว่า 200 ไมโครกรัม ต้องใช้ปริมาณตัวอย่างให้น้อยลงแล้วเติมน้ำให้เป็น 50 มิลลิลิตร)
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮดรอกซีลามีน 1 มิลลิลิตร ใส่ลูกแก้ว 3-4 เม็ด นำไปต้มบนเตาแผ่นให้เดือดเพื่อให้แน่ใจว่าเหล็กในน้ำละลายหมดแล้วต้มต่อไปจนกระทั่งปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 15-20 มิลลิลิตร ยกลงทำให้เย็นลงจนเท่าอุณหภูมิห้อง
3. เทใส่หลอดเนสเลอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร และสารละลายฟีนแอนโทรลีน 4 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10-15 นาที เพื่อให้เกิดสีเข้มสุด

4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็นเบลงค์แทนตัวอย่างน้ำ แล้วทำขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนตัวอย่าง (ข้อ 1-3) แล้วอ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน

5. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมของสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 10 ไมโครกรัม มา 1 2 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเนสเลอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตรเทใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 2-4 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเหล็กเป็นไมโครกรัมกับค่าการดูดกลืนแสง

$$6. \text{การคำนวณ เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านจากกราฟ}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

#### การวิเคราะห์เหล็กเฟอร์รัส (Ferrous Iron)

1. กรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน ลงในขวดสุญญากาศ

2. ดูดตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเนสเลอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนานโทรีน 20 มิลลิลิตร และสารละลายแอมโมเนียอะซิเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3. ตั้งทิ้งไว้ไม่ให้ถูกแสง วัดการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นภายใน 5-10 นาที ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร อ่านค่าจากกราฟ ใช้น้ำกลั่น

4. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมมาตรฐานให้มีความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 10 ไมโครกรัม มา 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเนสเลอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำให้ครบปริมาตร แล้วทำตามข้อ 2-3 พล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นเป็นไมโครกรัม

5. สามารถหาเหล็กเฟอร์ริก (Ferric Iron) ได้โดยนำเหล็กเฟอร์รัสมาลบออกจากเหล็กทั้งหมด ดังนี้

$$\text{เหล็กเฟอร์ริก (Fe}^{3+}\text{)} = \text{เหล็กทั้งหมด (Total Iron) - เหล็กเฟอร์รัส (Fe}^{2+}\text{)}$$

**ภาคผนวก ข**

**ผลการทดลอง**

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 แสดงช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ช่วงการทดลอง
เริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัว	
- ระยะที่ 1	28/5/2553 – 18/7/2553
- ระยะที่ 2	19/7/2553 – 28/10/2553
- ระยะที่ 3	29/10/2553 – 25/11/2553
เติมเฟอริกคลอไรด์ในถังเติมอากาศ	
- ระยะที่ 4	26/11/2553 – 16/12/2553
- ระยะที่ 5	17/12/2553 – 25/12/2553
- ระยะที่ 6	26/12/2553 – 16/1/2554
- ระยะที่ 7	17/1/2554 – 16/2/2554
ถึงไร้อากาศ 48 ชั่วโมง	17/2/2554 – 26/2/2554
ถึงไร้อากาศ 24 ชั่วโมง	27/2/2554 – 11/3/2554
ถึงไร้อากาศ 12 ชั่วโมง	12/3/2554 – 6/4/2554
ถึงไร้อากาศ 6 ชั่วโมง	7/4/2554 – 24/4/2554
ถึงไร้อากาศ 3 ชั่วโมง	25/4/2554 – 15/5/2554
ถึงไร้อากาศ 1 ชั่วโมง	16/5/2554 – 18/6/2554
ถึงไร้อากาศ 6 ชั่วโมง <sup>(1)</sup>	19/6/2554 – 8/7/2554

<sup>(1)</sup> ถึงไร้อากาศ 6 ชั่วโมง ที่มีการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเติมอากาศ

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
28/5/2553	3809	0	100	6.5	-	4540	0	-
29/5/2553	3962	1110	72	5.9	-	3680	380	-
30/5/2553	4085	1386	66	5.6	-	2720	350	-
31/5/2553	4967	967	81	6.1	-	3500	340	-
1/6/2553	3467	100	97	7.4	-	3700	700	-
2/6/2553	4267	0	100	7.4	-	2280	0	-
3/6/2553	4166	614	85	7.1	-	2400	330	-
4/6/2553	3430	966	72	8	-	4920	420	-
5/6/2553	3450	600	83	8.4	-	4840	630	-
6/6/2553	4133	500	88	8.4	-	4540	370	-
7/6/2553	4190	540	87	8.3	-	4400	360	-
8/6/2553	5140	873	83	8.2	-	4060	350	-
9/6/2553	4300	167	96	8.28	-	3940	440	-
10/6/2553	3900	367	91	8.21	-	3320	290	-
11/6/2553	4267	767	82	8.26	-	3020	310	-
12/6/2553	5000	500	90	8.15	-	2400	230	-
13/6/2553	5600	767	86	8.23	-	2520	190	-
14/6/2553	5350	917	83	8.21	-	2460	140	-
15/6/2553	3973	249	94	8.17	-	2580	240	-
16/6/2553	-	-	-	8.05	-	2260	430	-
17/6/2553	5107	140	97	7.9	-	2280	230	-
18/6/2553	-	-	-	7.8	-	2360	190	-
19/6/2553	4698	1110	98	8.03	-	2460	230	-
20/6/2553	-	-	-	8.13	-	2480	130	-
21/6/2553	4426	62	99	8.27	-	2280	70	-
22/6/2553	-	-	-	8.22	-	2720	210	-
23/6/2553	4992	36	99	8.13	-	3260	140	-
24/6/2553	-	-	-	7.95	-	3300	140	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
25/6/2553	4032	49	99	8.06	-	2680	160	-
26/6/2553	-	-	-	8.12	-	2540	160	-
27/6/2553	4710	36	99	8.08	-	2000	240	-
28/6/2553	-	-	-	7.93	-	2200	130	-
29/6/2553	4260	73	98	8.06	-	2020	180	-
30/6/2553	-	-	-	8.05	-	1720	120	-
1/7/2553	4093	45	99	8.33	-	1800	150	-
2/7/2553	-	-	-	7.9	-	1480	110	-
3/7/2553	5410	50	99	7.9	-	1820	210	-
4/7/2553	-	-	-	7.9	-	1340	150	-
5/7/2553	4224	86	98	7.7	-	1880	50	-
6/7/2553	4907	35	99	7.86	-	2140	160	-
7/7/2553	-	-	-	8.07	-	1900	100	-
8/7/2553	6273	45	99	8.17	-	1840	160	-
9/7/2553	-	-	-	7.98	-	2020	170	-
10/7/2553	5490	61	99	7.95	-	2240	260	-
11/7/2553	-	-	-	7.7	-	1960	180	-
12/7/2553	5460	77	99	7.62	-	2060	150	-
13/7/2553	-	-	-	7.69	-	2360	250	-
14/7/2553	4227	84	98	7.65	-	2040	160	-
15/7/2553	-	-	-	7.84	-	1940	150	-
16/7/2553	-	-	-	7.83	-	2120	260	-
17/7/2553	5286	51	99	7.88	-	2300	120	-
18/7/2553	-	-	-	8.12	-	1800	0	-
19/7/2553	5318	136	97	8.24	-	1600	70	-
20/7/2553	-	-	-	8.28	-	1180	1050	-
21/7/2553	-	-	-	8.36	-	1360	690	-
22/7/2553	5198	90	98	8.06	-	1360	870	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
23/7/2553	-	-	-	8.09	-	1360	830	-
24/7/2553	-	-	-	8.42	-	1360	450	-
25/7/2553	5152	121	98	8.29	-	1500	1170	-
26/7/2553	-	-	-	8.25	-	1560	1270	-
27/7/2553	5152	158	97	7.92	-	1360	920	-
28/7/2553	-	-	-	7.96	-	-	-	-
29/7/2553	-	-	-	-	-	-	-	-
30/7/2553	4146	183	96	7.94	-	1520	180	-
31/7/2553	-	-	-	8.3	-	820	910	-
1/8/2553	-	-	-	8.18	-	1220	1410	-
2/8/2553	-	-	-	8.14	-	1100	1190	-
3/8/2553	4729	98	98	8.26	-	1260	290	-
4/8/2553	-	-	-	8.35	-	-	0	-
5/8/2553	Batch	-	0	8.57	-	1000	0	-
6/8/2553	-	-	-	8	-	-	0	-
7/8/2553	Batch	-	0	8.31	-	2200	0	-
8/8/2553	Batch	-	0	8.49	-	2120	0	-
9/8/2553	Batch	-	0	8.87	-	1980	0	-
10/8/2553	Batch	-	0	9.06	-	2040	0	-
11/8/2553	Batch	-	0	9.16	-	1900	0	-
12/8/2553	Batch	-	0	9.23	-	1860	0	-
13/8/2553	-	-	-	8.5	-	3260	0	-
14/8/2553	-	-	-	8.3	-	2300	0	-
15/8/2553	-	-	-	9.07	-	-	0	-
5/8/2553	Batch	-	0	8.57	-	1000	0	-
6/8/2553	-	-	-	8	-	-	0	-
7/8/2553	Batch	-	0	8.31	-	2200	0	-
8/8/2553	Batch	-	0	8.49	-	2120	0	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถังเติม อากาศ	ถังไร้อากาศ	ถังเติม อากาศ	น้ำทิ้ง	
9/8/2553	Batch	-	0	8.87	-	1980	0	-
10/8/2553	Batch	-	0	9.06	-	2040	0	-
11/8/2553	Batch	-	0	9.16	-	1900	0	-
12/8/2553	Batch	-	0	9.23	-	1860	0	-
13/8/2553	-	-	-	8.5	-	3260	0	-
14/8/2553	-	-	-	8.3	-	2300	0	-
15/8/2553	-	-	-	9.07	-	-	0	-
16/8/2553	-	-	-	9.21	-	2680	0	-
17/8/2553	-	-	-	9.2	-	2420	0	-
18/8/2553	-	-	-	8.23	-	2580	0	-
19/8/2553	-	-	-	7.95	-	-	0	-
20/8/2553	Batch	-	0	8.42	-	5600	0	-
21/8/2553	Batch	-	0	8.6	-	5140	0	-
22/8/2553	5216	0	100	8.45	-	4880	0	-
23/8/2553	-	-	-	8.38	-	4580	0	-
24/8/2553	5984	121	98	8.5	-	4000	170	-
25/8/2553	-	-	-	8.2	-	3620	10	-
26/8/2553	4625	67	99	8.31	-	3660	10	-
27/8/2553	-	-	-	8.13	-	3360	70	-
28/8/2553	-	-	-	8.22	-	3020	40	-
29/8/2553	4318	81	98	8.23	-	2840	50	-
30/8/2553	-	-	-	8.03	-	3040	0	-
31/8/2553	-	-	-	8.21	-	2920	100	-
1/9/2553	4240	77	98	8.2	-	3140	80	-
2/9/2553	-	-	-	8.1	-	3020	10	-
3/9/2553	-	-	-	8.08	-	2340	10	-
4/9/2553	4890	62	99	7.98	-	2800	10	-
5/9/2553	-	-	-	-	-	4300	0	-



ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
6/9/2553	Batch	-	0	-	-	4180	0	-
7/9/2553	-	-	-	8.43	-	3660	0	-
8/9/2553	-	-	-	8.03	-	3200	0	-
9/9/2553	Batch	-	0	7.81	-	3780	0	-
10/9/2553	-	-	-	7.8	-	2940	0	-
11/9/2553	-	-	-	7.9	-	2780	0	-
12/9/2553	Batch	-	0	7.5	-	2480	0	-
13/9/2553	Batch	-	0	6.89	-	2440	100	-
14/9/2553	5373	172	97	7.73	-	2000	0	-
15/9/2553	-	-	-	6.08	-	5460	0	-
16/9/2553	Batch	-	0	7.01	-	6260	0	-
17/9/2553	Batch	-	0	7.7	-	6140	0	-
18/9/2553	Batch	-	0	8.08	-	5660	0	-
19/9/2553	Batch	-	0	8.29	-	5120	0	-
20/9/2553	4907	-	100	8.71	-	5000	0	-
21/9/2553	5275	708	87	8.08	-	3620	470	160
22/9/2553	-	-	-	8.23	-	3420	240	70
23/9/2553	-	-	-	8.34	-	3640	70	31
24/9/2553	5393	260	95	7.64	-	3660	150	50
25/9/2553	-	-	-	7.28	-	3440	130	58
26/9/2553	5232	544	90	7.08	-	3460	190	77
27/9/2553	-	-	-	6.75	-	3440	200	110
28/9/2553	4992	512	90	7.25	-	4020	300	130
29/9/2553	-	-	-	7.35	-	5600	340	170
30/9/2553	5040	344	93	7.32	-	4060	570	240
1/10/2553	-	-	-	7.07	-	3640	420	230
2/10/2553	5376	592	89	6.85	-	3340	320	230

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
3/10/2553	-	-	-	6.61	-	3080	460	270
4/10/2553	5336	399	93	7.53	-	3140	300	270
5/10/2553	-	-	-	7.71	-	3320	330	250
6/10/2553	5328	336	94	7.65	-	2500	300	230
7/10/2553	-	-	-	7.38	-	3020	530	270
8/10/2553	5564	121	98	7.74	-	3200	370	240
9/10/2553	-	-	-	7.85	-	3140	390	170
10/10/2553	5022	162	97	8.01	-	4000	130	80
11/10/2553	-	-	-	8.14	-	2640	150	73
12/10/2553	5238	288	95	8.25	-	2620	120	85
13/10/2553	-	-	-	8.12	-	2100	220	33
14/10/2553	5060	181	96	7.86	-	2260	80	45
15/10/2553	-	-	-	7.94	-	2200	50	36
16/10/2553	-	-	-	8.17	-	2120	40	23
17/10/2553	5650	158	97	8.29	-	2840	20	5.9
18/10/2553	-	-	-	8.16	-	2600	20	4.7
19/10/2553	-	-	-	8.14	-	3120	10	4.1
20/10/2553	5400	186	97	7.5	-	3320	70	7
21/10/2553	-	-	-	7.5	-	3140	20	4.9
22/10/2553	-	-	-	7.5	-	2800	10	8.1
23/10/2553	5100	207	96	7.5	-	3140	40	6
24/10/2553	-	-	-	7.4	-	2900	100	20
25/10/2553	-	-	-	7.5	-	2640	90	12
26/10/2553	5350	237	96	7.4	-	2560	40	17
27/10/2553	-	-	-	7.5	-	2640	90	30
28/10/2553	-	-	-	7.6	-	3220	60	18
29/10/2553	5500	179	97	7.6	-	3460	90	18

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
30/10/2553	-	-	-	7.6	-	3200	70	22
31/10/2553	-	-	-	7.9	-	2520	120	44
1/11/2553	4524	146	97	7.6	-	2480	70	16
2/11/2553	-	-	-	7.71	-	2300	10	24
3/11/2553	-	-	-	7.68	-	2360	20	45
4/11/2553	-	-	-	7.82	-	2860	60	44
5/11/2553	5200	146	97	7.55	-	2120	10	32
6/11/2553	-	-	-	7.82	-	2000	20	24
7/11/2553	-	-	-	7.6	-	2260	70	25
8/11/2553	5772	147	97	7.65	-	2300	110	43
9/11/2553	-	-	-	7.74	-	2860	80	38
10/11/2553	-	-	-	7.72	-	2720	160	35
11/11/2553	-	-	-	7.78	-	2880	130	48
12/11/2553	4420	161	96	7.8	-	2920	160	36
13/11/2553	-	-	-	7.36	-	2800	140	34
14/11/2553	-	-	-	7.26	-	3120	150	39
15/11/2553	5000	246	95	7.48	-	3280	180	34
16/11/2553	-	-	-	7.32	-	2840	170	35
17/11/2553	-	-	-	7.66	-	3080	170	38
18/11/2553	-	-	-	7.53	-	2960	130	20
19/11/2553	5400	187	97	7.68	-	3140	110	45
15/11/2553	5000	246	95	7.48	-	3280	180	34
16/11/2553	-	-	-	7.32	-	2840	170	35
17/11/2553	-	-	-	7.66	-	3080	170	38
18/11/2553	-	-	-	7.53	-	2960	130	20
19/11/2553	5400	187	97	7.68	-	3140	110	45
20/11/2553	-	-	-	7.75	-	3180	80	40

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีโอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็มอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเต็มอากาศ	น้ำทิ้ง	
21/11/2553	-	-	-	7.63	-	2600	20	23
22/11/2553	5200	211	96	7.77	-	3080	10	32
23/11/2553	-	-	-	7.83	-	2940	10	5
24/11/2553	-	-	-	7.98	-	3060	20	5
25/11/2553	-	-	-	8.12	-	2980	60	29
26/11/2553	5850	135	98	8.08	-	3500	10	10
27/11/2553	-	-	-	8	-	3480	10	4
28/11/2553	-	-	-	7.57	-	3640	70	20
29/11/2553	5460	149	97	7.7	-	3700	30	12
30/11/2553	-	-	-	7.48	-	3740	40	10
1/12/2553	-	-	-	7.82	-	2960	80	19
2/12/2553	5260	116	98	7.25	-	3780	20	12
3/12/2553	-	-	-	7.31	-	3800	80	55
4/12/2553	-	-	-	7.4	-	3480	90	85
5/12/2553	4800	150	97	7.4	-	3080	70	35
6/12/2553	-	-	-	7.41	-	2640	110	53
7/12/2553	-	-	-	7.56	-	2200	120	56
8/12/2553	5376	226	96	7.12	-	2360	130	30
9/12/2553	-	-	-	7.58	-	2900	270	140
10/12/2553	-	-	-	7.54	-	3000	230	80
11/12/2553	4896	192	96	7.62	-	2920	400	160
12/12/2553	-	-	-	7.85	-	2700	530	200
13/12/2553	-	-	-	7.76	-	2620	420	160
14/12/2553	5207	178	97	7.93	-	2600	530	200
15/12/2553	-	-	-	8.05	-	2480	480	130
16/12/2553	-	-	-	8.1	6.4	2460	340	140
17/12/2553	4793	201	96	8.18	6.3	2280	330	200

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีไอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถังเติมอากาศ	ถังไร้อากาศ	ถังเติมอากาศ	น้ำทิ้ง	
18/12/2553	-	-	-	8.53	6.4	2420	350	210
19/12/2553	-	-	-	8.84	6.6	2440	390	180
20/12/2553	4202	120	97	8	6.6	2600	440	150
21/12/2553	-	-	-	7.8	6.7	2320	510	140
22/12/2553	-	-	-	7.7	7	2600	530	150
23/12/2553	4462	94	98	7.8	7	2660	540	160
24/12/2553	-	-	-	7.6	-	2740	560	210
25/12/2553	-	-	-	7.6	-	2800	500	180
26/12/2553	4982	128	97	7.7	-	2400	420	190
27/12/2553	-	-	-	8	-	2380	360	110
28/12/2553	-	-	-	8	-	2640	390	110
29/12/2553	5060	225	96	7.8	-	2740	340	100
30/12/2553	-	-	-	7.8	-	2960	290	95
31/12/2553	-	-	-	8.1	-	2600	350	120
1/1/2554	5660	231	96	8.1	-	2540	350	120
2/1/2554	-	-	-	7.9	-	2380	310	100
3/1/2554	-	-	-	8	-	2580	310	100
4/1/2554	5050	196	96	8	-	3020	290	90
5/1/2554	-	-	-	7.9	-	2580	270	110
6/1/2554	-	-	-	7.9	-	2760	300	150
7/1/2554	5242	271	95	7.9	-	3200	240	160
8/1/2554	-	-	-	8	-	2760	280	110
9/1/2554	-	-	-	8	-	3440	240	130
10/1/2554	4968	218	96	8	-	3740	960	200
11/1/2554	-	-	-	7.8	-	3460	400	150
12/1/2554	-	-	-	7.8	-	3820	440	150
13/1/2554	5397	226	96	7.7	-	3740	430	160

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
14/1/2554	-	-	-	7.7	-	4420	650	190
15/1/2554	-	-	-	8.3	-	3500	-	-
16/1/2554	-	-	-	8	-	3020	-	-
17/1/2554	4900	173	96	7.9	-	2840	580	200
18/1/2554	-	-	-	7.9	-	1940	320	120
19/1/2554	-	-	-	7.7	-	2120	360	120
20/1/2554	4373	173	96	7.5	-	1960	460	140
21/1/2554	-	-	-	7.7	-	2180	390	200
22/1/2554	-	-	-	7.7	-	3480	660	210
23/1/2554	5120	182	96	7.7	-	2240	670	180
24/1/2554	-	-	-	7.8	-	2820	440	150
25/1/2554	-	-	-	8	-	3020	450	140
26/1/2554	4100	222	95	7.9	-	3320	480	150
27/1/2554	-	-	-	8.1	-	1940	400	180
28/1/2554	-	-	-	7.9	-	2120	460	190
29/1/2554	5200	350	93	7.5	-	2020	700	230
30/1/2554	-	-	-	7.4	-	1800	530	190
31/1/2554	-	-	-	7.5	-	2040	630	170
1/2/2554	5467	478	91	7.5	-	2260	720	200
2/2/2554	-	-	-	7.6	-	2320	670	210
3/2/2554	-	-	-	7.4	-	2300	500	200
4/2/2554	5000	408	92	7.8	-	2780	840	250
5/2/2554	-	-	-	7.6	-	2400	970	300
6/2/2554	-	-	-	7.5	-	2540	840	260
7/2/2554	5827	613	89	7.6	-	2480	850	260
8/2/2554	-	-	-	7.4	-	2320	700	200
9/2/2554	-	-	-	7.5	-	2240	730	200

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
10/2/2554	6011	627	90	7.5	-	2040	820	220
11/2/2554	-	-	-	7.7	-	-	-	-
12/2/2554	-	-	-	7.6	-	2620	-	-
13/2/2554	-	-	-	7.9	-	-	-	-
14/2/2554	4858	465	90	7.7	-	2300	880	240
15/2/2554	-	-	-	7.6	-	-	-	-
16/2/2554	-	-	-	7.8	-	2580	960	250
17/2/2554	4922	243	95	8.1	6.3	2180	1030	250
18/2/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
19/2/2554	-	-	-	7.8	6.7	2020	1380	260
20/2/2554	-	-	-	7.8	6.7	-	-	-
21/2/2554	4733	240	95	7.9	7	2260	1260	310
22/2/2554	-	-	-	8	6.9	-	-	-
23/2/2554	-	-	-	7.9	6.7	-	-	-
24/2/2554	5248	325	94	7.9	6.5	2000	1260	250
25/2/2554	-	-	-	7.8	6.2	-	-	-
26/2/2554	-	-	-	7.9	6.5	-	-	-
27/2/2554	5114	136	97	7.8	6.9	2840	1410	240
28/2/2554	-	-	-	7.6	7.2	-	-	-
1/3/2554	-	-	-	7.7	7.2	-	-	-
2/3/2554	-	-	-	7.3	6.9	-	-	-
3/3/2554	5376	510	91	7.2	7	2000	1050	320
4/3/2554	-	-	-	7.3	6.9	-	-	-
5/3/2554	-	-	-	7.4	6.9	-	-	-
6/3/2554	4477	320	93	7.6	6.5	2020	1490	240
7/3/2554	-	-	-	7.9	6.8	-	-	-
8/3/2554	-	-	-	7.9	6.9	-	-	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละ ของการ กำจัดซีไอ ดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่น ในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็ม อากาศ	ถึงไร้ อากาศ	ถึงเต็ม อากาศ	น้ำทิ้ง	
9/3/2554	5568	133	98	7.8	6.7	2420	900	360
10/3/2554	-	-	-	7.9	6.8	-	-	-
11/3/2554	-	-	-	7.8	6.5	-	-	-
12/3/2554	6458	185	97	7.8	6.7	2020	1360	400
13/3/2554	-	-	-	7.6	6.7	-	-	-
14/3/2554	-	-	-	7.5	6.6	-	-	-
15/3/2554	5213	327	94	7.5	6.7	2300	1800	450
16/3/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
17/3/2554	-	-	-	7.6	6.9	-	-	-
18/3/2554	5183	196	96	7.8	6.7	3000	2180	440
19/3/2554	-	-	-	7.7	6.6	-	-	-
20/3/2554	-	-	-	7.8	6.5	-	-	-
21/3/2554	6080	206	97	7.8	6.5	2980	1240	500
22/3/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
23/3/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
24/3/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
25/3/2554	5600	168	97	7.8	6.2	3480	1900	360
26/3/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
27/3/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
28/3/2554	5913	95	98	7.8	6.8	2460	2000	470
29/3/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
30/3/2554	-	-	-	7.6	7	-	-	-
31/3/2554	-	-	-	7.8	7.1	-	-	-
1/4/2554	6164	331	95	7.8	6.7	3140	1680	560
2/4/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
3/4/2554	-	-	-	7.5	6.7	-	-	-
4/4/2554	5888	270	95	7.5	6.3	3300	2460	450



ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีไอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็มอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเต็มอากาศ	น้ำทิ้ง	
5/4/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
6/4/2554	-	-	-	7.7	6.8	-	-	-
7/4/2554	5520	239	96	7.8	6.8	3360	1800	340
8/4/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
9/4/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
10/4/2554	6336	208	97	7.7	6.7	3180	1460	360
11/4/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
12/4/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
13/4/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
14/4/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
15/4/2554	6464	200	97	7.8	6.7	2960	1180	290
16/4/2554	-	-	-	7.8	6.7	-	-	-
17/4/2554	-	-	-	7.8	6.7	-	-	-
18/4/2554	5280	178	97	8	7	2300	860	240
19/4/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
20/4/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
21/4/2554	5984	186	97	7.9	7	2620	880	230
22/4/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
23/4/2554	-	-	-	7.6	6.9	-	-	-
24/4/2554	-	-	-	7.9	7	-	-	-
25/4/2554	5244	239	95	7.5	6.2	2260	1460	230
26/4/2554	-	-	-	7.8	6.5	-	-	-
27/4/2554	-	-	-	7.6	6.6	-	-	-
28/4/2554	5091	248	95	7.8	7	2120	620	220
29/4/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
30/4/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
1/5/2554	4661	212	95	7.8	6.8	2130	850	190

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีไอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็มอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเต็มอากาศ	น้ำทิ้ง	
2/5/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
3/5/2554	-	-	-	7.7	6.8	-	-	-
4/5/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
5/5/2554	6287	253	96	7.8	6.7	2020	530	260
6/5/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
7/5/2554	-	-	-	8	6.9	-	-	-
8/5/2554	5312	210	96	7.8	7.1	2310	780	270
9/5/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
10/5/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
11/5/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
12/5/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
13/5/2554	5120	154	97	7.6	6.8	2200	660	250
14/5/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
15/5/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
16/5/2554	5152	158	97	7.6	6.9	2500	710	200
17/5/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
18/5/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
19/5/2554	5056	125	98	7.8	6.8	2680	810	240
20/5/2554	-	-	-	7.6	7	-	-	-
21/5/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
22/5/2554	-	-	-	7.7	7	-	-	-
23/5/2554	5280	125	98	7.8	6.8	2130	740	250
24/5/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
25/5/2554	-	-	-	7.8	6.9	-	-	-
26/5/2554	-	-	-	7.7	6.7	-	-	-
27/5/2554	6016	158	97	7.8	6.8	2620	720	230
28/5/2554	-	-	-	7.8	7.1	-	-	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีไอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีไอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็มอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเต็มอากาศ	น้ำทิ้ง	
29/5/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
30/5/2554	5856	168	97	7.8	7.1	2220	710	240
31/5/2554	-	-	-	7.6	7	-	-	-
1/6/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
2/6/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
3/6/2554	-	-	-	7.8	7	-	-	-
4/6/2554	5664	189	97	8.1	7	1870	840	200
5/6/2554	-	-	-	8	7.2	-	-	-
6/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
7/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
8/6/2554	4672	134	97	8	7.2	1800	660	190
9/6/2554	-	-	-	8.1	7	-	-	-
10/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
11/6/2554	5616	231	96	8.1	7.3	2660	630	180
12/6/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
13/6/2554	-	-	-	7.9	7.2	-	-	-
14/6/2554	-	-	-	8	7.2	-	-	-
15/6/2554	5200	120	98	8.1	6.2	1960	840	200
16/6/2554	-	-	-	8.1	6.3	-	-	-
17/6/2554	-	-	-	8	6.3	-	-	-
18/6/2554	-	-	-	8.1	6.3	-	-	-
19/6/2554	6448	166	97	8	6.5	2490	970	200
20/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
21/6/2554	-	-	-	7.7	7.2	-	-	-
22/6/2554	5765	146	97	8	7.2	2390	1000	180
23/6/2554	-	-	-	7.8	6.8	-	-	-
24/6/2554	-	-	-	7.8	6.6	-	-	-

ตารางที่ ข-2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดี (มก./ล.)		ร้อยละของการกำจัดซีโอดี	พีเอช		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)		ความขุ่นในน้ำทิ้ง (เอ็นทียู)
	น้ำเข้า	น้ำทิ้ง		ถึงเต็มอากาศ	ถึงไร้อากาศ	ถึงเต็มอากาศ	น้ำทิ้ง	
25/6/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
26/6/2554	5551	121	98	7.9	7	2640	560	210
27/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
28/6/2554	-	-	-	8	7	-	-	-
29/6/2554	5200	180	97	7.8	6.8	2530	680	210
30/6/2554	-	-	-	7.9	7	-	-	-
1/7/2554	-	-	-	7.9	6.9	-	-	-
2/7/2554	5400	127	98	7.8	6.9	2300	860	220
3/7/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
4/7/2554	-	-	-	7.7	6.8	-	-	-
5/7/2554	4667	190	96	7.9	6.9	2350	890	190
6/7/2554	-	-	-	8	6.7	-	-	-
7/7/2554	-	-	-	-	-	-	-	-
8/7/2554	4733	140	97	8	6.9	2420	900	190

ตารางที่ ข-3 แสดงช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นวิเคราะห์เหล็กจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง	ช่วงการทดลอง
เต็มเฟอริกคอลลอยด์ในถังเต็มอากาศ	
- ระยะที่ 4	26/11/2553 – 16/12/2553
- ระยะที่ 5	17/12/2553 – 25/12/2553
- ระยะที่ 6	26/12/2553 – 16/1/2554
- ระยะที่ 7	17/1/2554 – 16/2/2554
ถังไร้อากาศ 48 ชั่วโมง	17/2/2554 – 26/2/2554
ถังไร้อากาศ 24 ชั่วโมง	27/2/2554 – 11/3/2554
ถังไร้อากาศ 12 ชั่วโมง	12/3/2554 – 6/4/2554
ถังไร้อากาศ 6 ชั่วโมง	7/4/2554 – 24/4/2554
ถังไร้อากาศ 3 ชั่วโมง	25/4/2554 – 15/5/2554
ถังไร้อากาศ 1 ชั่วโมง	16/5/2554 – 18/6/2554
ถังไร้อากาศ 6 ชั่วโมง <sup>(1)</sup>	19/6/2554 – 8/7/2554

<sup>(1)</sup> ถังไร้อากาศ 6 ชั่วโมง ที่มีการเวียนน้ำจากถังหมักตะกอนไร้อากาศกลับเข้าถังเต็มอากาศ

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์เหล็ก

วันที่ทำการ ทดลอง	ถังเต็มอากาศ (มก./ล.)			น้ำทิ้ง (มก./ล.)			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (มก./ล.)			ถังไร้อากาศ (มก./ล.)		
	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน
27/11/2010	267.86	0.07	267.79	0.13	0.01	0.12	-	-	-	-	-	-
29/11/2010	480.77	0.02	480.75	1.08	0.07	1.01	-	-	-	-	-	-
1/12/2010	500.00	0.10	499.90	0.19	0.08	0.11	-	-	-	-	-	-
3/12/2010	596.15	0.10	596.06	0.22	0.05	0.17	-	-	-	-	-	-
5/12/2010	596.15	0.19	595.96	0.17	0.04	0.13	-	-	-	-	-	-
7/12/2010	538.46	0.34	538.13	0.18	0.04	0.14	-	-	-	-	-	-
9/12/2010	500.00	0.96	499.04	8.27	0.19	8.08	-	-	-	-	-	-
11/12/2010	576.92	0.91	576.01	10.38	0.29	10.10	-	-	-	-	-	-
13/12/2010	596.15	1.25	594.90	6.35	0.24	6.11	-	-	-	-	-	-
14/12/2010	615.38	0.77	614.62	3.85	0.19	3.65	-	-	-	-	-	-
16/12/2010	576.93	0.77	576.16	4.04	0.34	3.70	-	-	-	-	-	-
18/12/2010	480.77	1.35	479.42	11.15	0.29	10.87	-	-	-	-	-	-
20/12/2010	323.33	1.06	322.27	12.31	0.19	12.12	-	-	-	-	-	-
23/12/2010	341.14	1.01	340.13	8.27	0.16	8.11	-	-	-	-	-	-
26/12/2010	310.22	1.35	308.87	12.50	0.48	12.02	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ถังเต็มอากาศ (มก./ล.)			น้ำทิ้ง (มก./ล.)			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (มก./ล.)			ถังไร้อากาศ (มก./ล.)		
	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน
29/12/2010	278.26	1.40	276.87	11.73	0.52	11.21	-	-	-	-	-	-
1/1/2011	294.35	0.99	293.36	2.16	0.29	1.87	-	-	-	-	-	-
4/1/2011	302.33	1.40	300.93	3.26	1.10	2.15	-	-	-	-	-	-
7/1/2011	314.12	1.34	312.79	4.71	0.81	3.90	-	-	-	-	-	-
10/1/2011	246.16	5.71	240.44	1.57	0.34	1.23	-	-	-	-	-	-
13/1/2011	269.52	4.88	264.63	1.51	0.52	0.99	-	-	-	-	-	-
17/1/2011	365.12	5.98	359.14	0.93	0.70	0.23	-	-	-	1093.02	22.76	1070.26
20/1/2011	255.81	10.50	245.31	3.43	1.05	2.38	-	-	-	1116.28	19.85	1096.43
22/1/2011	232.56	7.69	224.87	1.34	0.64	0.70	-	-	-	1465.12	36.13	1428.99
23/1/2011	279.07	3.20	275.87	1.69	0.81	0.87	-	-	-	1767.44	46.63	1720.81
26/1/2011	302.33	9.65	292.68	2.24	0.87	1.37	-	-	-	653.06	31.76	621.30
1/2/2011	232.56	6.53	226.03	11.63	1.34	10.30	-	-	-	-	-	-
7/2/2011	186.05	5.00	181.05	7.55	1.22	6.33	-	-	-	-	-	-
14/2/2011	232.56	0.58	231.98	7.96	1.69	6.27	-	-	-	-	-	-
17/2/2011	255.81	0.26	255.56	4.08	0.10	3.98	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ถังเต็มอากาศ (มก./ล.)			น้ำทิ้ง (มก./ล.)			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (มก./ล.)			ถังไร้อากาศ (มก./ล.)		
	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน
19/2/2011	232.56	0.20	232.35	4.19	0.46	3.73	-	-	-	386.00	1.07	384.93
21/2/2011	255.81	0.35	255.47	14.42	0.58	13.84	-	-	-	350.00	0.87	349.13
24/2/2011	186.05	0.10	185.94	7.96	0.10	7.86	-	-	-	402.00	0.60	401.40
27/2/2011	244.90	0.41	244.49	6.53	0.36	6.17	-	-	-	186.05	1.17	184.87
3/3/2011	265.31	0.36	264.95	5.47	0.66	4.81	-	-	-	224.49	1.17	223.32
6/3/2011	265.31	0.46	264.85	8.39	0.36	8.03	-	-	-	408.16	0.46	407.70
9/3/2011	224.49	0.66	223.83	7.14	0.46	6.68	-	-	-	367.35	0.51	366.84
12/3/2011	163.27	0.67	162.60	8.37	0.57	7.80	-	-	-	265.31	3.10	262.21
15/3/2011	204.08	0.82	203.27	10.61	0.82	9.80	-	-	-	428.57	1.89	426.68
18/3/2011	244.90	0.71	244.18	10.61	0.71	9.90	-	-	-	514.29	2.52	511.76
21/3/2011	247.62	0.90	246.71	11.24	0.82	10.42	-	-	-	342.86	1.19	341.67
25/3/2011	228.57	0.53	228.04	8.33	0.43	7.90	-	-	-	342.86	1.17	341.68
28/3/2011	224.49	0.48	224.01	10.61	0.29	10.33	-	-	-	838.10	1.67	836.43
1/4/2011	265.31	0.71	264.59	11.43	0.52	10.90	-	-	-	838.10	2.33	835.76
4/4/2011	228.57	0.38	228.19	12.57	0.43	12.14	-	-	-	419.05	0.95	418.10



ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ถังเต็มอากาศ (มก./ล.)			น้ำทิ้ง (มก./ล.)			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (มก./ล.)			ถังไร้อากาศ (มก./ล.)		
	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน
7/4/2011	228.57	1.19	227.38	7.31	0.71	6.59	-	-	-	224.49	1.00	223.49
10/4/2011	209.52	0.81	208.71	15.00	0.62	14.38	-	-	-	514.29	3.48	510.81
15/4/2011	228.57	1.29	227.29	10.61	0.62	9.99	-	-	-	653.06	1.89	651.17
18/4/2011	266.67	0.71	265.95	12.88	0.67	12.22	-	-	-	653.06	2.52	650.54
21/4/2011	250.00	0.57	249.43	17.69	0.43	17.26	-	-	-	576.92	1.52	575.40
25/4/2011	192.31	0.48	191.83	11.54	0.29	11.25	-	-	-	288.46	0.57	287.89
28/4/2011	211.54	0.53	211.01	5.19	0.67	4.52	-	-	-	596.15	1.59	594.57
1/5/2011	250.00	0.77	249.23	4.04	0.67	3.37	-	-	-	634.62	2.50	632.12
5/5/2011	269.23	0.29	268.94	3.08	0.58	2.50	-	-	-	615.38	2.69	612.69
8/5/2011	288.46	0.67	287.79	6.35	0.58	5.77	-	-	-	519.23	2.55	516.68
13/5/2011	269.23	0.67	268.56	2.31	0.58	1.73	-	-	-	538.46	1.54	536.92
16/5/2011	192.31	0.43	191.88	2.69	0.43	2.26	-	-	-	173.08	0.48	172.60
19/5/2011	211.54	0.72	210.82	2.31	0.72	1.59	-	-	-	153.85	0.67	153.17
23/5/2011	269.23	0.67	268.56	3.08	0.67	2.40	-	-	-	76.92	0.48	76.44
27/5/2011	230.77	0.67	230.10	2.88	0.72	2.16	-	-	-	307.69	0.72	306.97

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (ต่อ)

วันที่ทำการ ทดลอง	ถังเต็มอากาศ (มก./ล.)			น้ำทิ้ง (มก./ล.)			ถังหมักตะกอนไร้อากาศ (มก./ล.)			ถังไร้อากาศ (มก./ล.)		
	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน	เหล็ก ทั้งหมด	เฟอร์รัส ไอออน	เฟอริก ไอออน
30/5/2011	250.00	0.67	249.33	4.62	0.63	3.99	-	-	-	365.38	0.53	364.86
4/6/2011	307.69	0.48	307.22	2.69	0.20	2.50	-	-	-	461.54	0.39	461.15
8/6/2011	173.08	0.54	172.54	3.65	0.25	3.41	-	-	-	403.85	0.78	403.06
11/6/2011	269.23	0.39	268.84	1.73	0.64	1.09	-	-	-	846.15	0.25	845.91
15/6/2011	192.31	0.29	192.01	5.58	0.20	5.38	-	-	-	807.69	0.72	806.97
19/6/2011	634.62	0.25	634.37	5.58	0.34	5.23	3.27	0.49	2.78	288.46	0.69	287.78
22/6/2011	250.00	0.20	249.80	3.08	0.10	2.98	1.92	0.15	1.78	269.23	0.39	268.84
26/6/2011	365.38	0.59	364.80	2.50	0.74	1.76	2.69	0.25	2.45	384.62	0.78	383.83
29/6/2011	250.00	0.25	249.75	3.65	0.15	3.51	2.12	0.15	1.97	403.85	0.20	403.65
2/7/2011	307.69	0.29	307.40	4.23	0.39	3.84	2.88	0.34	2.54	576.92	0.29	576.63
5/7/2011	365.38	0.15	365.24	5.58	0.25	5.33	4.04	3.89	0.15	576.92	0.39	576.53
8/7/2011	480.77	0.34	480.43	5.38	0.15	5.24	7.50	7.25	0.25	653.85	0.34	653.50

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรา ธรรมาพิมล เกิดเมื่อวันที่ 11 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2527 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

ภัทรา ธรรมาพิมล และศรัณย์ เตชะเสน. 2554. การหมุนเวียนสร้างตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 10** วันที่ 23-25 มีนาคม 2554 ณ โรงแรมบีพี สมิหลา บีช แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)