

การกำจัดเหล็กในน้ำเสียด้วยไพโรลูไซต์

IRON REMOVAL FROM WASTEWATER BY PYROLUSITE



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงปีการศึกษา 2562 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRON REMOVAL FROM WASTEWATER BY PYROLUSITE



NATSIMA SANPOKA
SUPHATTRA RODSAI




A COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2019
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การกำจัดเหล็กในน้ำเสียด้วยไพโรลูไซต์ IRON REMOVAL FROM WASTEWATER BY PYROLUSITE
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐศิมา สารโพคา รหัสนักศึกษา 59050556 นางสาวสุพัตรา รอดใส รหัสนักศึกษา 59050625
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
คุณกาญจนา จุลวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การกำจัดเหล็กในน้ำเสียด้วยไพโรลูไซต์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐศิมา สารโพคา รหัสนักศึกษา 59050556 นางสาวสุพัตรา รอดใส รหัสนักศึกษา 59050625
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไพโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย ในการทดลองได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของไพโรลูไซต์ ได้แก่ พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน, โครงสร้างของผลึก และองค์ประกอบของธาตุ ส่วนการทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กโดยใช้ไพโรลูไซต์แบ่งการศึกษาเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบแบตซ์ และแบบคอลัมน์ จากการทดลองแบบแบตซ์ศึกษาระยะเวลาสัมผัสของการกำจัดเหล็ก โดยใช้ไพโรลูไซต์จำนวน 1 g ต่อสารละลายเหล็ก 150 mL ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 1 mg/L นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm พบว่าที่เวลา 15 นาที ไพโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กได้สูงสุดถึง 84.78% ความเข้มข้นเหล็กที่เหลือ 0.112 mg/L การทดลองแบบคอลัมน์ ที่มีความสูงของไพโรลูไซต์ 50 cm เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ 1.90 cm อัตราการไหลของน้ำเสีย 99.0 mL/min ไหลต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดลองกับสารละลายเหล็ก พบว่าที่เวลา 30 นาที ไพโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กได้สูงสุดถึง 84.87% ความเข้มข้นเหล็กที่เหลือ 0.165 mg/L และทำการทดลองกับน้ำเสียจริง พบว่าที่เวลา 15 นาที ไพโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กได้ 28.25% ความเข้มข้นเหล็กที่เหลือ 0.682 mg/L

คำสำคัญ : ไพโรลูไซต์, เหล็ก, การกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	IRON REMOVAL FROM WASTEWATER BY PYROLUSITE
Students	Miss Natsima Sanpoka Student ID 59050556 Miss Suphattra Rodsai Student ID 59050625
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2562
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

Abstract

This study is aims to study the efficacy of pyrolusite in the removal of iron solutions in wastewater. In the experiment, the researchers study the basic properties of pyrolusite including surface area and porosity, crystal structure, and elements. The experiment for finding the efficiency of iron removal using pyrolusite is divided into 2 types which are Batch and Column type. From the Batch experiment, we have studied the contact time of the iron removal by using 1 gram of pyrolusite per 150 mL of synthetic wastewater at the initial concentration of iron 1 mg/L and shake in 200 rpm. It was found that at 15 minutes, pyrolusite could remove the iron up to 84.78% and the remaining iron concentration is 0.112 mg/L. From the Column experiment with a height of 50 cm pyrolusite and the diameter of the column is 1.90 cm. The wastewater flow rate is 99.0 mL/min, continuous flow for 24 hours. The experiment with iron solution was found that, at 30 minutes, pyrolusite could remove the iron up to 84.87%, the remaining iron concentration is 0.165 mg/L and when experimented with the actual wastewater at 15 min, pyrolusite was able to remove iron only 28.25% and the remaining iron concentration is 0.682 mg/L.

Keywords : Pyrolusite, Iron, Removal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการสหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำอย่างใกล้ชิด ทั้งในเชิงความรู้ทางวิชาการ การวางแผนงาน และข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการแก้ไขที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงมีการตรวจสอบข้อมูลและแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่ในทุกรายละเอียด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และคุณกาญจนา จุลวงษ์ จากบริษัทพีซีเคม โซลูชั่น จำกัด ประธานกรรมการและกรรมการผู้คุมสอบที่ได้เสียสละเวลาในการเข้าร่วมรับฟังโครงการสหกิจศึกษานี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขโครงการสหกิจศึกษาให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัทพีซีเคม โซลูชั่น จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และตัวอย่างน้ำเสียในการทำโครงการสหกิจศึกษาในครั้งนี้ รวมไปถึง คุณธิดารัตน์ ทองโรย และพี่ๆพนักงานในบริษัททุกคน ที่คอยดูแลช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี ทั้งในเรื่องความรู้ทางวิชาการ และทักษะการใช้ชีวิตในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ บริษัทเอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ไฟโรลูไฮด์เพื่อใช้ในการศึกษาทำโครงการสหกิจครั้งนี้ รวมไปถึงการให้ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไฟโรลูไฮด์

ขอขอบพระคุณ คุณชัชชัย ลัทธิลักษณ์ คุณสาคร สอนพงศ์ คุณณัฐพงษ์ ไกรธรรม และคุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการดำเนินการต่างๆ ทั้งการจัดหาอุปกรณ์ สารเคมี และการสอนใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำโครงการสหกิจในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เป็นส่วนหนึ่งของสถาบันการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและคอยเป็นแรงผลักดันในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึง รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่เป็นกำลังใจ ช่วยเหลือ และแนะนำ ในงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณัฐtima สารโพคา
สพตรา รอดใส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เหล็กในน้ำ.....	3
2.1.1 สถานะและรูปร่างของเหล็กในน้ำ.....	3
2.1.2 ปัญหาของเหล็กในน้ำ.....	5
2.2 การกำจัดเหล็กในน้ำ.....	7
2.2.1 การเติมอากาศหรือออกซิเจน.....	7
2.2.2 การเติมตัวออกซิไดซ์.....	9
2.2.3 การกำจัดเหล็กด้วยการกรองโดยตรง.....	10
2.3 การกรองน้ำ.....	11
2.3.1 ชนิดของการกรอง.....	11
2.3.2 ส่วนประกอบของระบบการกรอง.....	11
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรอง.....	13
2.4 ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite).....	14
2.4.1 การนำไปใช้ประโยชน์.....	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี..... 18
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	18
3.1.2 วัสดุและสารเคมี.....	19
3.2 สารกรองหลักที่ใช้ในการศึกษา.....	19
3.3 การศึกษาคุณลักษณะของไพโรลูไซต์.....	20
3.4 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง.....	20
3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์.....	21
3.5.1 การเตรียมไพโรลูไซต์.....	21
3.5.2 สารละลายหลักที่ใช้ทดสอบ.....	21
3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก.....	21
3.6 การศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์.....	22
3.6.1 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	22
3.6.2 การเตรียมคอลัมน์บรรจุไพโรลูไซต์.....	22
3.6.3 สารละลายหลักที่ใช้ทดสอบ.....	23
3.6.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก.....	24
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	25
4.1 คุณสมบัติของไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการศึกษา.....	25
4.1.1 การศึกษาหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของไพโรลูไซต์ด้วยเทคนิค BET.....	25
4.1.2 การศึกษาหาโครงสร้างผลึกของไพโรลูไซต์ด้วยเทคนิค XRD.....	26
4.1.3 การศึกษาหาองค์ประกอบธาตุของไพโรลูไซต์ด้วยเทคนิค XRF.....	27
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กแบบแบตช์.....	28
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กแบบคอลัมน์.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	43
ภาคผนวก ค.....	44
ภาคผนวก ง.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Maximum Iron and Manganese Concentrations for Industrial and Commercial Uses.....	5
3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไฟโรลูไซต์ที่ทำการวิเคราะห์.....	20
3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์ก่อนและหลัง.....	20
4.1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน.....	26
4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าประจุประจุ.....	27
4.3 สมบัติของสารละลายเหล็กที่ใช้ในการทดสอบแบบแบดซ์.....	28
4.4 สมบัติของสารละลายเหล็กหลังบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ที่เวลาต่างกัน.....	29
4.5 สมบัติของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแบบคอลัมน์.....	31
4.6 สมบัติของสารละลายเหล็กหลังบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ที่เวลาต่างกัน.....	33
4.7 สมบัติของน้ำเสียจากการทำกิจการเกี่ยวกับน้ำนมหลังบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ที่เวลาต่างกัน....	36
ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเทคนิคของไฟโรลูไซต์.....	42
ก.2 ข้อมูลน้ำเสียโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม.....	42
ค.1 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄).....	44
ค.2 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นของกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (EDTA).....	45
ง.1 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายแบบแบดซ์.....	48
ง.2 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบแบดซ์.....	48
ง.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบแบดซ์.....	49
ง.4 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบแบดซ์.....	49
ง.5 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบแบดซ์.....	50
ง.6 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบแบดซ์.....	50
ง.7 ความเข้มข้นเหล็กในสารละลายแบบคอลัมน์.....	51
ง.8 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบคอลัมน์.....	51
ง.9 ค่าความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบคอลัมน์.....	52
ง.10 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบคอลัมน์.....	52
ง.11 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบคอลัมน์.....	53
ง.12 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กแบบคอลัมน์.....	53
ง.13 ความเข้มข้นเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนมแบบคอลัมน์.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.14 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย
จากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนํ้านมแบบคอลัมน์ 54

ง.15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย
จากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนํ้านมแบบคอลัมน์ 55

ง.16 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย
จากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนํ้านมแบบคอลัมน์ 55

ง.17 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย
จากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนํ้านมแบบคอลัมน์ 56

ง.18 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย
จากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับนํ้านมแบบคอลัมน์ 56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สถานะต่างๆของเหล็กที่ปรากฏอยู่ในน้ำ	4
2.2 การเติมออกซิเจนโดยการสัมผัสอากาศ.....	7
2.3 วัสดุตัวกลาง (packing material).....	8
2.4 ระบบการกำจัดเหล็กโดยการเติมอากาศ.....	8
2.5 Diffused Aeration.....	9
2.6 ผังการไหลของระบบกำจัดเหล็กแบบเติมเคมี.....	10
2.7 ผังการไหลของระบบการกรองด้วยแมงกานีสซีโอไซด์	11
2.8 ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite)	14
3.1 เครื่องเขย่าในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์.....	22
3.2 คอลัมน์ที่บรรจุไพโรลูไซต์.....	23
3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของไพโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย	24
4.1 ไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการทดลอง (Pyrolusite)	25
4.2 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของไพโรลูไซต์ จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	26
4.3 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัด (ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน.....	28
4.4 สีของสารละลายเหล็กหลังจากเขย่าไพโรลูไซต์ในแต่ละเวลา	30
4.5 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัด (ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน.....	32
4.6 สีของสารละลายเหล็กก่อนและหลังจากไหลผ่านไพโรลูไซต์	34
4.7 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัด (ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน.....	35
4.8 สีของน้ำเสียตัวอย่างก่อนและหลังจากไหลผ่านไพโรลูไซต์.....	37
ข.1 กราฟมาตรฐานเหล็ก	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
BET	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer)
XRD	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)
XRF	เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry)
AAS	เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
g	กรัม
L	ลิตร
mL	มิลลิลิตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
rpm	รอบต่อนาที
min	นาที
%	เปอร์เซ็นต์
cm	เซนติเมตร
mm	มิลลิเมตร
hr	ชั่วโมง
mL/min	มิลลิลิตรต่อนาที
Fe ²⁺	เฟอร์รัสไอออน
Fe ³⁺	เฟอร์ริกไอออน
MnO ₂	แมงกานีสไดออกไซด์
KMnO ₄	โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
(Fe ₂ (SO ₄) ₃)•H ₂ O	เฟอร์ริกซัลเฟต โมโนไฮเดรต
lb/ft ³	ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต
gal/ft ²	แกลลอนต่อตารางฟุต
m ³ /m ²	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร
μL	ไมโครลิตร
g/mol	กรัมต่อโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ
 ไม่มีการรับประกันใดๆเกี่ยวกับความถูกต้องของข้อมูลหรือการแปลของเอกสารนี้

%R	เปอร์เซ็นต์การกำจัด
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
mL/g	มิลลิลิตรต่อกรัม
Å	อังสตรอม
θ	ทีตาหรือเทตา
μS/cm	ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
NTU	Nephelometric Turbidity Units
gpm/ft ²	แกลลอนต่อนาที่ต่อตารางฟุต
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต
N	นอร์มอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กจัดเป็นสารเจือปนที่พบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำ เหล็กในน้ำผิวดินหรือน้ำเสียที่สภาวะกรด จะอยู่ในรูปของไอออนของเหล็กได้แก่ เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ทำให้สามารถละลายน้ำได้ แต่ที่สภาวะเบส เหล็กจะละลายน้ำได้น้อย และเกิดการตกตะกอนเมื่อถูกออกซิไดซ์ในสภาวะที่มีออกซิเจนโมเลกุล จะเกิดเป็นออกไซด์ (Oxide) และ ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ของเหล็ก ได้แก่ Fe_2O_3 และ $Fe(OH)_3$ (ไพศาล, 2549) ซึ่งเป็นสาเหตุของสีและตะกอนที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำและระบบการบำบัดน้ำเสีย เช่น ทำให้เกิดการอุดตันของระบบการกรองโดยเยื่อกรองเมมเบรน เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันของเยื่อกรองเนื่องจากสารละลายเหล็ก ทางผู้ผลิตเมมเบรนจึงมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบการกรองต้องมีเหล็กไม่เกิน 0.05 mg/L (SUEZ Water Technologies & Solutions (Thailand) Co., Ltd., 2012)

กระบวนการกรองด้วยสารกรองแมงกานีสกรีนแซนด์ (Manganese Green Sand) จัดเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดเหล็กในน้ำ แมงกานีสกรีนแซนด์คือทรายธรรมชาติที่ผ่านการคัดขนาดและเคลือบผิวด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) จนมีสภาพอยู่ตัว เป็นสารกรองที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งสามารถกำจัดเหล็ก แมงกานีส และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่มีปริมาณน้อยๆ ในน้ำได้ (พรศักดิ์, 2548) เหล็กที่ละลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับแมงกานีสไดออกไซด์ เปลี่ยนเป็นรูปผลึกออกไซด์ของเหล็กและเกาะยึดกับผิวของแมงกานีสกรีนแซนด์ ข้อจำกัดของสารกรองชนิดนี้คืออายุการใช้งานสั้น เนื่องจากเป็นสารที่สังเคราะห์ด้วยการเคลือบที่ผิวเท่านั้น หากพื้นที่บริเวณที่เคลือบผิวเต็ม ประสิทธิภาพในการกำจัดก็จะลดลง เพราะไม่มีพื้นที่ผิวให้ยึดเกาะเหล็กได้

ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) จัดเป็นแร่แมงกานีสในรูปแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่พบในธรรมชาติ เมื่อนำมาบดให้มีขนาดเล็กแล้วจะสามารถใช้เป็นสารกรองในการกำจัดเหล็กในน้ำได้โดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีทางเคมีเพื่อเคลือบ MnO_2 ที่ผิว ดังในกรณีของแมงกานีสแซนด์ทำให้มีข้อดีของการใช้เป็นสารกรองกำจัดเหล็กคือมีอายุการใช้งานยาวนาน ลดปริมาณการใช้สารเคมีในการล้างย้อน (Backwash) ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัด อย่างไรก็ตามพบว่างานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้เป็นสารกรองเพื่อกำจัดเหล็กในน้ำและน้ำเสียยังมีอยู่อย่างจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับสารกรองชนิดอื่นที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สหกิจศึกษาครั้งนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ของไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) เพื่อเป็นสารกรองในการกำจัดเหล็กในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไฟโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำและน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ไฟโรลูไซต์ที่ใช้ในการวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชัน จำกัด
2. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของไฟโรลูไซต์ โดยสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน, โครงสร้างผลึก และ องค์ประกอบของธาตุ
3. ศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์
 - ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ สารละลายเฟอร์ริคซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 1 mg/L
 - ปัจจัยที่ศึกษา คือ ระยะเวลาสัมผัส (0, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที)
 - ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบในการเขย่า 200 rpm, ปริมาณไฟโรลูไซต์ 1 g และ ปริมาตรสารละลายเหล็ก 150 mL
 - ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลาย
4. ศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์
 - ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ สารละลายเฟอร์ริคซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 1mg/L และ น้ำเสียจากการทำกิจการเกี่ยวกับน้ำนมขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 cm ความสูง 70 cm
 - สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบ คือ ความสูงของไฟโรลูไซต์ 50 cm พีเอชประมาณ 7-8 อัตราการไหลเฉลี่ย 99.0 mL/min
 - ปัจจัยที่ศึกษา คือ ระยะเวลาสัมผัส (0, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที)
 - ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลาย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบประสิทธิภาพของไฟโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำ
2. ทราบความเป็นไปได้ในการใช้ไฟโรลูไซต์เพื่อเป็นสารกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กในน้ำ

เหล็กในธรรมชาติ เกือบทั้งหมดที่พบในหินและดิน มักปรากฏรวมตัวกันอยู่กับธาตุอื่นๆ ในรูปสารประกอบของเหล็กออกไซด์ เหล็กซัลไฟด์ และเหล็กคาร์บอเนต ซึ่งเหล็กออกไซด์เกิดจากแร่ 3 ชนิด คือ แร่เฮมาไทต์สีแดง (Fe_2O_3) แร่แมกเนไทต์ (Fe_3O_4) แร่ลิโมนไนท์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ส่วนเหล็กซัลไฟด์เกิดจากแร่ไพไรต์ (FeS_2) และเหล็กคาร์บอเนตเกิดจากแร่siderite (Fe_2O_3) การเกิดเหล็กในน้ำมีสาเหตุมาจากในดินเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย กระบวนการนี้จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำจะได้กรดคาร์บอนิก เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นหินหรือชั้นดินที่มีแร่เหล็กอยู่ จะสามารถละลายเหล็กที่อยู่ในแร่เหล็กนั้นออกมา อยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์รัส ดังแสดงในสมการที่ (2.1)



ในสภาวะที่ขาดออกซิเจน แบคทีเรียที่อยู่ในชั้นดินที่มีสารอินทรีย์สามารถเปลี่ยนจากเหล็กเฟอร์ริกในแร่ธาตุเป็นเหล็กเฟอร์รัส ดังสมการที่ (2.2)



ต่อมาเหล็กเฟอร์รัส จะถูกละลายด้วยน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (2.3)



2.1.1 สถานะและรูปฟอร์มของเหล็กในน้ำ

1. ชนิดของเหล็กที่พบในน้ำ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1.1 เหล็กอินทรีย์

ส่วนใหญ่พบอยู่ในน้ำบาดาล มักพบในรูปสารประกอบเหล็กคาร์บอเนตมากที่สุด เช่น เฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) รองลงมาอยู่ในรูปของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และอาจพบอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กคลอไรด์ (FeCl_2) น้ำที่มีเหล็กอินทรีย์เมื่อสูบน้ำขึ้นมาใหม่ๆ จะมีลักษณะใส แต่เมื่อทิ้งให้สัมผัสกับอากาศ น้ำนั้นจะปรากฏความขุ่นให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

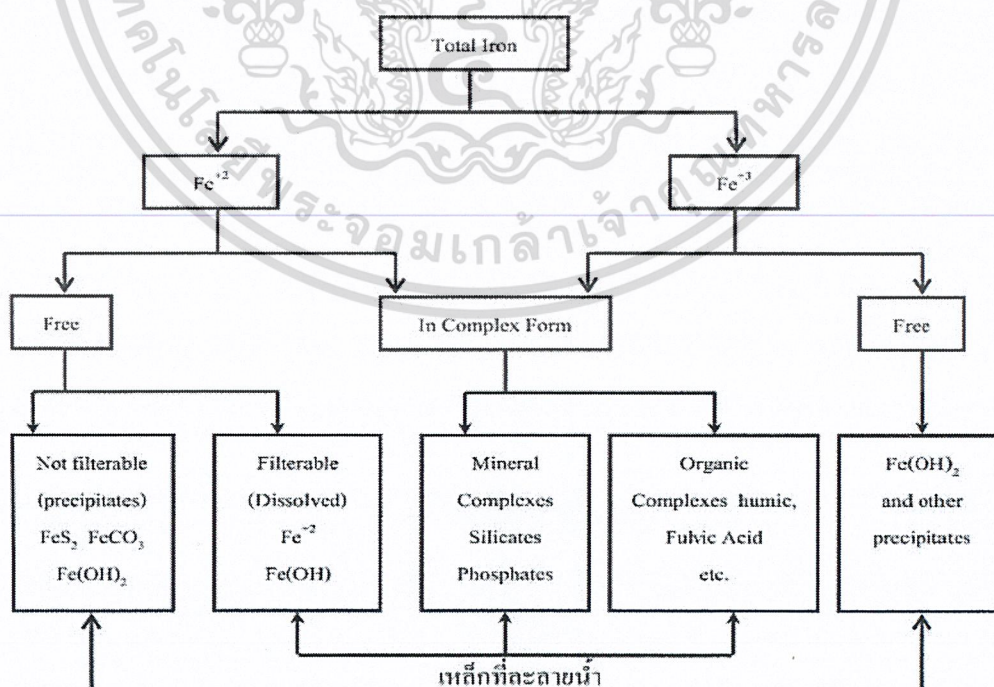
1.2 เหล็กอินทรีย์

เป็นเหล็กที่พบอยู่ในน้ำผิวดินเป็นส่วนใหญ่ การเกิดเหล็กอินทรีย์มีสาเหตุมาจากการระบายน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ลงไปใต้น้ำ หรือเมื่อฝนตกน้ำฝนจะละลายสารอินทรีย์บนผิวดินแล้วไหลไปรวมกันเหล็กในน้ำเกิดเป็นเหล็กอินทรีย์ ซึ่งมักพบอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic Complex Compounds) เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid) และกรดฟุลวิก (Fulvic Acid) เป็นต้น เหล็กในน้ำจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

- 1.) เหล็กในน้ำชนิดตกตะกอนได้ทันทีภายหลังการเติมอากาศ
- 2.) เหล็กในน้ำชนิดไม่ตกตะกอนภายหลังการเติมอากาศ เนื่องจากน้ำบาดาลมีสภาพเป็นกรด
- 3.) เหล็กในน้ำชนิดที่บางส่วนตกตะกอนได้ แต่บางส่วนไม่ยอมตกตะกอนภายหลังการเติมอากาศ เหล็กชนิดนี้จะพบมากที่สุด

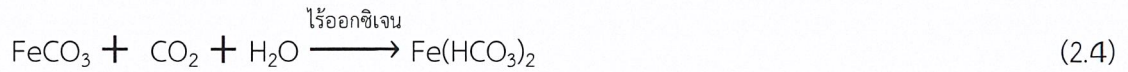
2. สถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ

สถานะต่างๆของเหล็กที่ปรากฏอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ สามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 อธิบายได้ว่าเหล็กทั้งหมดในน้ำ (Total Iron) แบ่งออกเป็น 2 รูป คือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ซึ่งเฟอร์รัสไอออนสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุอื่นธาตุเดียว เช่น FeS_2 (ไม่ละลายน้ำ) และ $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (ละลายน้ำได้) เป็นต้น ส่วนเฟอร์ริกไอออนสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุอื่นธาตุเดียว เช่น $\text{Fe}(\text{HO}_3)$ (ไม่ละลายน้ำ) ทั้งเฟอร์รัสและเฟอร์ริก สามารถรวมตัวกับธาตุอื่นมากกว่า 2 ธาตุ ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน (Complex form) ได้แก่ Mineral Complex และ Organic Complexes



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.1 สถานะต่างๆของเหล็กที่ปรากฏอยู่ในน้ำ (เทวารักษาและคณะ, 2552)

สาเหตุที่มีเหล็กละลายอยู่ในน้ำบาดาลมากกว่าน้ำผิวดิน ก็เพราะว่าน้ำบาดาลส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่ไร้อากาศ (Anaerobic) ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเหล็กที่อยู่ใต้ดินนั้นมักจะอยู่ในรูปสาร FeCO₃ (เกลือคาร์บอเนต) ซึ่งละลายน้ำได้ไม่มาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปเป็นเกลือไบคาร์บอเนต ก็จะสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



และเมื่อน้ำบาดาลถูกสูบขึ้นมาสู่บรรยากาศ ก็จะสัมผัสกับออกซิเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation ทำให้เกิดการตกตะกอนดังนี้



ซึ่ง Fe(OH)₃ และ Fe₂O₃ จะมีสีแดงแบบสนิมเหล็ก

2.1.2 ปัญหาของเหล็กในน้ำ

น้ำใช้โดยทั่วไปต้องมีความเข้มข้นเหล็ก ไม่เกิน 0.3 mg/L ถ้าหากในน้ำนั้นมีความเข้มข้นเหล็กเกินที่กำหนดไว้ จะทำให้เกิดปัญหาท่อส่งน้ำอุดตัน หรือมีลักษณะน้ำไม่น่าใช้ น้ำขุ่น มีสี และมีกลิ่น มีปัญหาในการซักผ้า สุขภัณฑ์ เกิดคราบสนิมเหล็ก นอกจากนี้ยังก่อปัญหาในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานอุตสาหกรรมนม และโรงงานสิ่งทอ เป็นต้น เพื่อป้องกันปัญหาของเหล็กต่อการนำไปใช้ความเข้มข้นสูงสุดของเหล็กที่ยอมให้มีในน้ำเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และพาณิชย์กรรม ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Maximum Iron and Manganese Concentrations for Industrial and Commercial Uses

Industrial and Commercial Uses	Maximum Concentration or Threshold Range (mg/L)	
	Fe	Fe + Mn
Air conditioning	-	0.5
Baking	0.2	0.2
Brewing	0.1-1.0	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Canning	-	0.2
Carbonated beverages	0.1-0.2	0.1-0.2
Cooling water	0.5	0.2-0.5
Confectionary	0.2	0.2
Dyeing	-	0.0
Electroplating	Trace	-
Food processing, general	0.2	0.2
Ice	-	0.2
Laundering	0.2-1.0	-
Milk industry	-	-
Oil well flooding	0.1	-
Photographic processing	0.1	0.0
Pulp and paper		
Ground wood	0.3	1.0
Kraft pulp	-	0.2
Soda pulp	0.1	0.1
Kraft pulp, unbleached	-	-
Kraft pulp, bleached	-	-
Fine paper pulp	0.1	0.1
High-grade paper pulp	-	0.1
Plastics (clear)	-	0.02
Rayon pulp	-	0.05
Rayon manufacturing	0.05	0.0
Sugar manufacturing	0.1	-
Tanning	0.1-2.0	0.2
Textiles, general	0.1-1.0	0.1-0.25
Textile dyeing	-	0.25
Textile bandages	-	0.2
Wool Scouring	-	1.0

(ไพศาล, 2549)

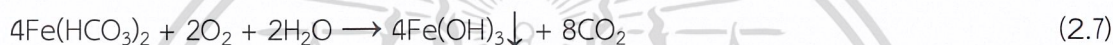
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การกำจัดเหล็กในน้ำ

วิธีการกำจัดเหล็กในน้ำสามารถทำได้หลายเทคนิค ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน และการกรองด้วยสารกรอง แต่ที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำพบอยู่ 3 วิธีหลัก (ไพศาล, 2549) คือ การเติมอากาศหรือออกซิเจน การเติมสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ และการกรองโดยตรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การเติมอากาศหรือออกซิเจน

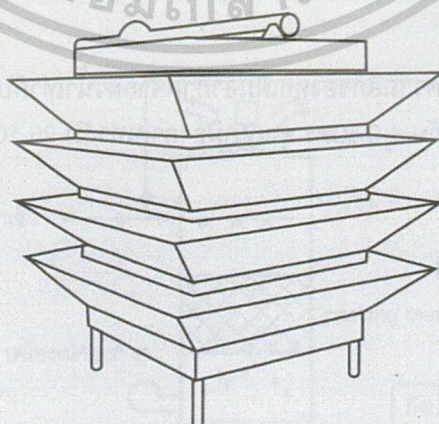
การเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปในน้ำเสีย เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย และราคาถูก ออกซิเจนโมเลกุลในอากาศที่พ่นลงในน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสามารถเปลี่ยนเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่พบทั่วไปในรูปเกลือไบคาร์บอเนต ไปเป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และเกิดการตกตะกอนในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2.7)



ซึ่งการเติมอากาศหรือออกซิเจน มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

1. การเติมออกซิเจนโดยมีการสัมผัสอากาศ (Natural Draft Aeration)

การเติมออกซิเจนเข้าสู่สูบน้ำวิธีนี้กระทำโดยการโปรยน้ำผ่านชั้น packing media หรือชั้นถาด (Tray) ที่มีถ่าน coke ขนาด 50–100 มิลลิเมตร ซึ่งถ่านโค้กจะเป็นตัวเร่งให้เหล็กตกตะกอนดียิ่งขึ้น เหล็กจะตกตะกอนเกาะติดกับถ่านโค้กช่วงห่างแต่ละชั้นประมาณ 0.1–0.15 เมตร น้ำสัมผัสกับอากาศโดยธรรมชาติ ความสูงของถังปฏิกิริยาจะอยู่ระหว่าง 1.20–1.90 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อัตราการระลอกศาสตร์ (Hydraulic Rate) จะอยู่ระหว่าง 24–48 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ ข้อจำกัดที่สำคัญคือ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำมาก ไม่สามารถจะควบคุมการถ่ายเทออกซิเจนเข้าสู่สูบน้ำได้อย่างแน่นอน



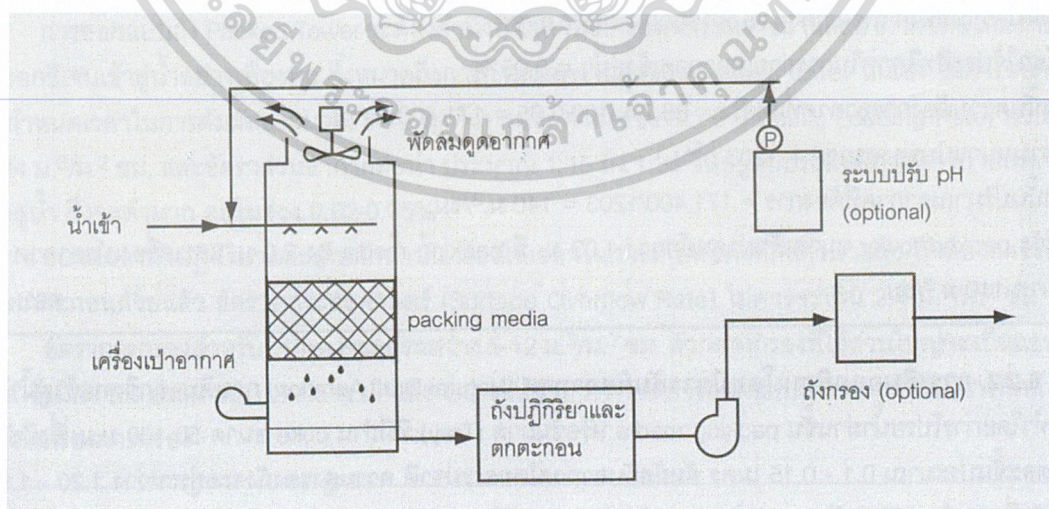
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.2 การเติมออกซิเจนโดยการสัมผัสอากาศ (ไพศาล, 2549)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเติมออกซิเจนโดยการเป่าอากาศ (Forced Air/Draft Aeration)

วิธีการนี้เป็นการเติมอากาศลงไปในถังปฏิกิริยาแบบ Packed Tower ที่บรรจุตัวกลาง (packing material) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรืออาจใช้แผ่นไม้ (Wood Slate) วางเรียงสลับกันก็ได้ การเติมอากาศทำได้ 2 ลักษณะ โดยใช้เครื่องเป่าอากาศเป่าเข้าด้านล่าง (Forced Air) สวนทางกับการไหลของน้ำ และใช้พัดลมดูดอากาศดูดออกทางด้านบน (Draft) วิธีนี้จำเป็นต้องมีช่องเปิดให้อากาศไหลเข้าถึงทางด้านล่างด้วย หลังจากการเติมอากาศแล้วจำเป็นต้องกักน้ำไว้ในระบบนานอย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้หน้าที่ผ่านการทำปฏิกิริยาเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ โดยอาจจะออกแบบให้ถังปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ขึ้นหรืออาจมีถังตกตะกอน และถังกรองเพิ่มเติมเพื่อกรองตะกอนโลหะ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 วัสดุตัวกลาง (packing material) (ไพศาล, 2549)

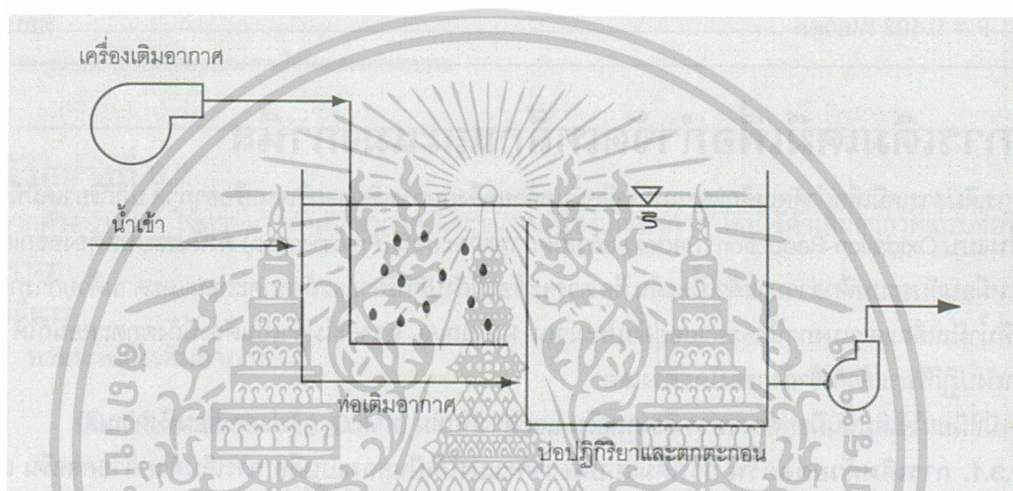


รูปที่ 2.4 ระบบการกำจัดเหล็กโดยการเติมอากาศ (ไพศาล, 2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเติมอากาศลงในน้ำ (Diffused Aeration)

การเติมอากาศแบบนี้ก็อาศัยหลักการเกี่ยวกับการเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) ประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศเข้าสู่ น้ำจะสูงกว่าการเติมอากาศทั้งสองแบบที่กล่าวถึงเบื้องต้น แต่จะต้องใช้พลังงานในการอัดอากาศลงสู่น้ำสูงกว่า ประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเติมฟองอากาศ (Diffuser) ถ้าตัวเติมฟองอากาศเป็นท่อพีวีซีเจาะรูธรรมดา ก็จะมีประสิทธิภาพประมาณ 1–2% ถ้าเป็นตัวเติมฟองอากาศแบบฟองอากาศละเอียด (Fine Bubble Diffuser) ประสิทธิภาพอาจจะสูงถึง 15% ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำด้วย (ประมาณ 1-3 เมตร)



รูปที่ 2.5 Diffused Aeration (ไพศาล, 2549)

2.2.2 การเติมตัวออกซิไดซ์

วิธีการนี้จะใช้การเติมสารเคมีที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญ คือ คลอรีน และด่างทับทิม แล้วเกิดการตกตะกอน (Precipitation) ระบบที่ใช้บำบัดประกอบด้วยถังปฏิกิริยาถังตกตะกอนและถังกรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในกรณีที่มีน้ำมีเหล็กละลายอยู่ต่ำประมาณ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจจะไม่จำเป็นต้องมีถังตกตะกอน (ไพศาล, 2549)

1. การเติมด้วยคลอรีน

รูปฟอร์มของคลอรีนที่เติมในน้ำมีอยู่ 2 แบบ คือ การเติมด้วยก๊าซคลอรีน (Cl_2) และการเติมด้วยคลอรีนน้ำ (NaOCl) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาตามสมการดังต่อไปนี้



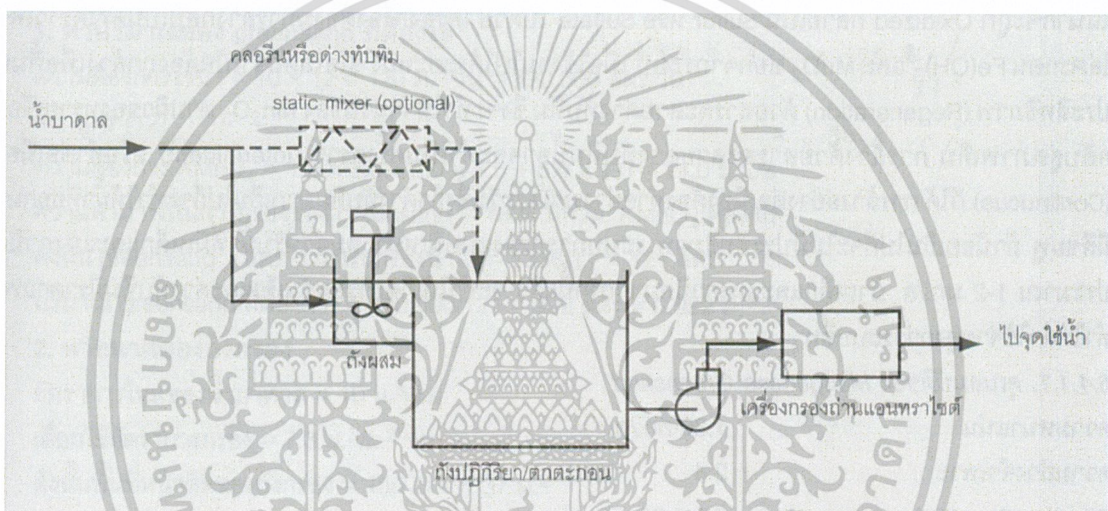
เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ทราบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ปฏิกิริยานี้ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH สูงกว่า 7.0 จากปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่ามี H^+ เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต่าง (Alkalinity) ในน้ำที่มีค่าสภาพต่างต่ำก็อาจจะทำให้ค่า pH ตกลงต่ำกว่า 7.0 ในปฏิกิริยาทุกๆ 1 mg/L ของเหล็กที่ถูกกำจัดค่าสภาพต่างจะถูกทำลายไป 2.7 mg/L

2. การเติมด้วยต่างหับทิม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH สูงกว่า 7.0 และจะสังเกตเห็นได้เช่นกันว่า จะมีการทำลายค่าสภาพต่าง (Alkalinity) ในน้ำเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.6 ผังการไหลของระบบกำจัดเหล็กแบบเติมเคมี (ไพศาล, 2549)

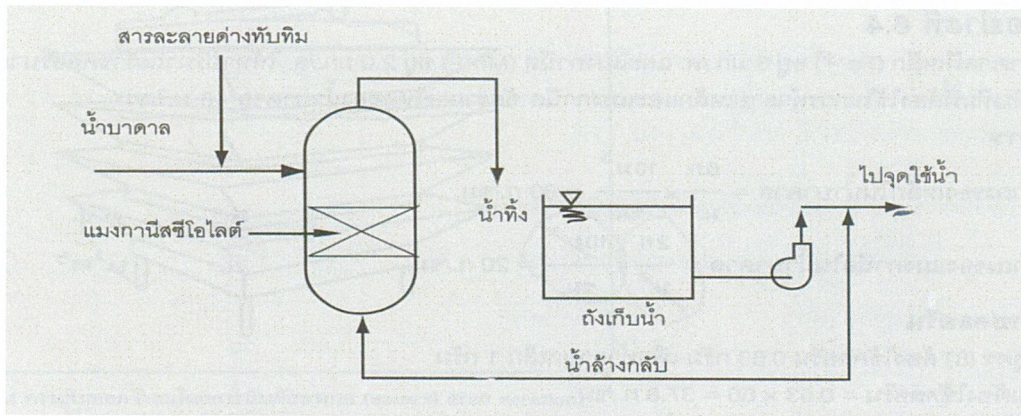
2.2.3 การกำจัดเหล็กด้วยการกรองโดยตรง

การกรองโดยตรงเพื่อกำจัดเหล็กสามารถทำได้อยู่ 2 วิธี ดังต่อไปนี้

1. การกรองด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์

แมงกานีสกรีนแซนด์ (Manganese Green sand) หมายถึง วัสดุที่นำมาเคลือบผิวด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) โดยวิธีทางเคมี แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามวัสดุที่ใช้ผลิตหรือตัวกลางกรองที่ใช้ คือวัสดุประเภทซีโอไลต์ (Zeolite) และวัสดุประเภททราย (Sand) ซึ่งเมื่อน้ำที่มีเหล็กเจือปนไหลผ่านก็จะดึงเอาออกซิเจนจากตัวกลางกรองไปทำปฏิกิริยา เปลี่ยนเหล็กเป็น $Fe(OH)_3$ และถูกกรองจับไว้ (ไพศาล, 2549) ทั้งนี้ผังการไหลของระบบการกรองด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์ เป็นดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ผังการไหลของระบบการกรองด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ (ไพศาล, 2549)

2. การกรองด้วยไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Ion Exchange Resin)

เรซิน เป็นสารกรองที่สามารถกำจัดไอออนต่างๆ ที่แตกตัวอยู่ในน้ำ โดยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนของเรซินกับไอออนต่างๆในน้ำ ในการกำจัดเหล็กจะใช้เรซินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน เนื่องจากเหล็กที่ละลายน้ำอยู่ในรูปเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) โดยเรซินจะทำการแลกเปลี่ยนเอาประจุ Fe^{2+} ออกไปแล้วแทนที่ด้วยประจุ Na^+ ดังสมการที่ (2.11)



2.3 การกรองน้ำ

การกรองน้ำ คือ กระบวนการกำจัดสารแขวนลอยและสารคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ ความสกปรกหลายประเภทที่อยู่ในน้ำจะถูกกำจัดออกไป เช่น ความขุ่น แบคทีเรีย สาหร่าย ไวรัส และจุลินทรีย์ สี เหล็กและเมงกานีสที่ถูกออกซิไดซ์แล้ว สารกัมมันตภาพ สารเคมีที่เติมก่อนหน้าการกรองน้ำ และสารอื่นๆ อีกหลายชนิด โดยการให้น้ำไหลผ่านตัวกลางกรอง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวกลางกรองจะถูกดักไว้บนผิวหน้าหรือภายในตัวกลาง ส่วนน้ำและอนุภาคที่เล็กกว่ารูพรุนของตัวกลางกรองจะไหลผ่านออกมา โดยอาศัย 2 กลไก คือ กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Transport Mechanism) และกลไกจับสารแขวนลอย (Attachment Mechanism)

2.3.1 ชนิดของการกรอง

การกรองโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันและอัตราเร็วในการกรอง สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่

1. การกรองที่ความดันคงที่ (Constant-pressure Filtration)

การกรองที่ความดันคงที่เป็นการกรองในระบบปิด โดยจะควบคุมความดันในระบบให้คงที่ อัตราเร็วในการกรองจะสูงในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากยังไม่มี การอุดตันในตัวกลางกรอง และอัตราการกรองจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของ บริษัทฯ และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การกรองที่อัตราการกรองคงที่ (Constant-rate Filtration)

การกรองที่อัตราการกรองคงที่เป็นการกรองในระบบปิด โดยจะควบคุมอัตราการกรองให้คงที่โดยการปรับความดัน ความดันที่ใช้ในช่วงแรกจะต่ำเนื่องจากยังไม่มือนุภาคอุดตันที่ตัวกลางกรอง และจะใช้ความดันเพิ่มเมื่อเวลาในการกรองผ่านไป

3. การกรองที่อัตราการกรองและความดันไม่คงที่ (Variable-rate and Variable-Pressure Filtration)

การกรองที่อัตราการกรองและความดันไม่คงที่ จะเป็นการกรองที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันและอัตราการกรองตลอดเวลา เช่น การกรองที่ใช้ปั๊มแบบเซนติฟิวส์ (Centrifugal Pump)

2.3.2 ส่วนประกอบของระบบการกรอง

ระบบการกรองน้ำจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่

1. ถังเก็บน้ำ (Water Storage Tank) ถังสำหรับเก็บน้ำ เช่น น้ำประปา น้ำบาดาล หรือน้ำบ่อ เพื่อเก็บสะสมน้ำสำหรับส่งเข้าระบบกรอง
2. ปั๊มน้ำ (Water Pump) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและความดันของน้ำส่งเข้าสู่ถังกรอง
3. ถังกรอง (Filter Tank) ประกอบด้วย
 - ถังกรอง (Filter Tank) ทำจากวัสดุต่างๆ เช่น เหล็ก ไฟเบอร์กลาส
 - ตัวกระจายน้ำด้านบน (Top water distributors) ทำหน้าที่กระจายน้ำที่เข้าถังกรองให้ไหลผ่านตัวกลางอย่างสม่ำเสมอ
 - หัวกรองด้านล่าง (bottom water distributors) ทำหน้าที่รับน้ำที่ผ่านการกรองและป้องกันไม่ให้สารกรองหลุดออกจากถังกรอง
 - สารกรอง (Filter media) ทำหน้าที่ในการกรองสิ่งปนเปื้อนในน้ำโดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารกรอง เช่น ทรายกรอง แอนทราไซต์ ใช้สำหรับกรองสารแขวนลอย สารกรองคาร์บอนใช้สำหรับการดูดกลิ่น สี คลอรีน และสารเคมีต่างๆ สารกรองเรซินทำหน้าที่ลดปริมาณหินปูน ช่วยให้น้ำไม่กระด้าง มีหลักการการทำงานคือใช้การเปลี่ยนประจุทำหน้าที่ดูดซับ แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น
4. ถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรอง (Filtered Water Storage Tank) ทำหน้าที่เก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อนำไปใช้งานต่อไป
5. ปั๊มน้ำที่ผ่านการกรอง (Filtered Water Pump) ปั๊มน้ำสำหรับส่งน้ำจากถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว เพื่อนำไปใช้งาน
6. ปั๊มน้ำสำหรับล้างย้อน (Backwash Water Pump) ทำหน้าที่ส่งน้ำเข้าสู่ถังกรองเพื่อทำความสะอาดสารกรอง โดยนิยมใช้น้ำที่ผ่านการกรองแล้วในการล้างย้อน เนื่องจากเป็นน้ำที่สะอาด ไม่มีสิ่งปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรอง

1. การเตรียมน้ำก่อนเข้ากรอง

การกรองน้ำที่มีความขุ่นโดยตรง ทำให้น้ำไม่ใสเท่าที่ควร แม้จะใช้อัตราการกรองต่ำก็ตาม ความขุ่นบางส่วนเท่านั้นที่ติดอยู่ในชั้นกรองและจะมีความขุ่นบางส่วนสามารถลอดผ่านชั้นกรองไปได้ การที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากข้อเท็จจริงที่ว่า สารแขวนลอย และสารกรองมักมีประจุลบทั้งคู่ จึงผลักซึ่งกันและกัน ทำให้โอกาสในการสัมผัส และการเกาะติดกันมีไม่มาก การทำโคแอกกูเลชัน เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมน้ำก่อนเข้ากรอง โดยการทำลายประจุของสารแขวนลอย และเปลี่ยนให้เป็นประจุบวก เกิดการจับตัวกันเป็นตะกอน ทำให้สามารถกรองออกได้ง่ายขึ้น

2. ความแปรปรวนของอัตราการกรอง

อัตราการกรองที่แปรปรวนอย่างกะทันหัน จะทำให้คุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองลดลง ดังนั้นจึงต้องรักษาระดับของอัตราการกรองให้คงที่อยู่ตลอดเวลา

3. ขนาดของสารกรอง

การใช้สารกรองขนาดเล็ก เช่น ทราย จะทำให้การกรองน้ำมีประสิทธิภาพสูง แต่จะทำให้สูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลมาก ทำให้อายุการใช้งานสั้น แต่ถ้าใช้สารกรองหยาบ เช่น แอนทราไซต์ จะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลต่ำ แต่น้ำที่ได้จากการกรองจะมีคุณภาพต่ำไปด้วย

4. อัตราการล้างย้อน

อัตราการล้างย้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการเลือกขนาดของสารกรองและกำหนดสมรรถนะของเครื่องกรองน้ำด้วย สารกรองขนาดใหญ่มีความถ่วงจำเพาะสูง ต้องการอัตราการล้างย้อนสูง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก เมื่ออัตราการล้างย้อนไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดการสะสมของสารแขวนลอย และสิ่งสกปรกอื่นๆ ทำให้ไม่สามารถกรองน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. คุณภาพน้ำ

น้ำที่เข้าเครื่องกรอง เป็นตัวกำหนดว่า ต้องทำความสะอาดหรือต้องเตรียมน้ำก่อนกรองหรือไม่ ถ้าน้ำมีความขุ่นไม่เกิน 20-25 หน่วย การกรองอาจเป็นแบบกรองโดยตรง (Direct Filtration) ไม่ต้องมีการลดความขุ่นก่อนเข้าถังกรอง สำหรับน้ำที่มีความขุ่นมากกว่านั้น ควรมีการกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอน

6. ความหนาของชั้นกรอง

ความหนาของชั้นกรองเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโอกาสสัมผัส ระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองซึ่งมีความสำคัญต่อสมรรถนะของการกรองน้ำ

7. อายุของถังกรองน้ำ

ถังกรองที่มีอายุการกรองน้ำสั้นจะต้องทำการล้างบ่อย ทำให้เสียเวลาและเสียน้ำในการล้าง ถังกรองที่มีอายุนานเกินไปก็ไม่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและชีวภาพ อาจเกิดขึ้นได้ในชั้นกรองหรือบนผิว

กรอง เช่น การตกผลึกของหินปูน และการเกิดสาหร่ายสีเขียว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองน้ำต่ำลงเรื่อยๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite)



รูปที่ 2.8 ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) (บริษัท เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด, 2560)

ไพโรลูไซต์ เป็นสินแร่แมงกานีสที่พบในธรรมชาติ มีสีดำ มีลักษณะอสังฐานส่วนใหญ่พบโครงสร้างเป็นเม็ด เส้นใย หรือเป็นแท่ง และในบางครั้งอาจรวมกันเป็นแผ่นรูปไต ความถ่วงจำเพาะ 4.75 มีแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) เป็นส่วนประกอบหลักในสัดส่วน 30-60% ได้จากการทำเหมืองสำหรับประเทศไทยพบมากที่สุดที่ อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ และในหลายๆ จังหวัด ได้แก่ ลำพูน เชียงราย ลำปาง แม่ฮ่องสอน แพร่ สุโขทัย ปราจีนบุรี เลย ชลบุรี ระยอง กาญจนบุรี นราธิวาส ยะลา และสงขลา

2.4.1 การนำไปใช้ประโยชน์

ไพโรลูไซต์ ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านที่สำคัญ คือ

1. นำมาใช้เป็นสารกรองในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ไพโรลูไซต์มีความสามารถในการกำจัดเหล็ก แมงกานีส และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยการออกซิไดซ์
2. ผสมกับเหล็กเป็นเหล็กกล้า ใช้ทำเครื่องมือเครื่องจักร โครงเหล็กสร้างสะพาน และรางรถไฟ
3. ผสมกับทองแดง สังกะสี อะลูมิเนียม ดีบุก และตะกั่ว ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) ในการผลิตคลอรีน โบรมีนและออกซิเจน
4. ใช้เป็นตัวฟอกสีในอุตสาหกรรมแก้ว
5. ใช้ทำแบตเตอรี่แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นันทวัน (2544) การวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยสารแมงกานีสกรีนแซนด์ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียของแมงกานีสกรีนแซนด์ 2 ชนิด โดยชนิดแรกผลิตจากหินภูเขาไฟนำมาผ่านขบวนการเคลือบด้วย KMnO_4 ชนิดที่ 2 ผลิตจากแร่แมงกานีสโดยไม่ได้เคลือบด้วย KMnO_4 ทำการศึกษาผลของค่าพีเอช ความเข้มข้นของแมงกานีส และผลของการเติมอากาศให้กับน้ำเสียก่อนกรองที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ควบคุมอัตราการกรองที่ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. กำหนดปริมาณแมงกานีสที่ยอมรับในน้ำที่ผ่านการกรองที่ คือ 5 มก./ล. การศึกษาผลของค่าพีเอช พบว่าสารแมงกานีสกรีนแซนด์ทั้ง 2 ชนิดมีอายุการใช้งานมากขึ้นเมื่อพีเอชของน้ำที่เข้าสู่ชั้นกรองมีค่าสูงขึ้นโดยที่สารแมงกานีสกรีนแซนด์ชนิดที่ 2 มีอายุการใช้งานนานกว่าชนิดแรก การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแมงกานีส พบว่าสารแมงกานีสกรีนแซนด์ชนิดที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้ดีกว่าชนิดที่ 1 การศึกษาผลของการเติมอากาศให้กับน้ำเสียก่อนกรอง พบว่าสารแมงกานีสกรีนแซนด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในสภาวะที่มีการเติมอากาศใกล้เคียงกับสภาวะที่ไม่เติมอากาศ

รัตนา และคณะ (2551) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยโคโตซานเมมเบรน ผลการศึกษาพบว่าโคโตซานเมมเบรนสามารถดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และที่ 40 องศาเซลเซียส ได้ดีที่พีเอช 2.5-7.0 (75.21-100.00 %) สำหรับสมมูลในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนกระทั่งชั่วโมงที่ 16 โดยสามารถดูดซับเหล็กได้ 72.33-97.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายเหล็กนั้น พบว่าโคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีจะอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าการดูดซับอยู่ในช่วง 69.20-96.61% ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าคงที่ K_f ในสมการฟรุนดลิช เท่ากับ 19.05 ซึ่งมีค่าสูง แสดงถึงความจุในการดูดซับของโคโตซานเมมเบรน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงด้วย

เอเซีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชัน (2559) งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียโดยใช้วัสดุกรองในท้องตลาด ได้แก่ แมงกานีสซีโอไลต์ และแมงกานีสกรีนแซนด์ เปรียบเทียบกับแร่ไพโรลูไซต์โดยวิธีการกรองภายใต้ความดัน (Pressure filter) และยังศึกษาอายุการใช้งานของสารกรองทั้ง 3 ชนิด ในกรณีที่ใช้ร่วมกับคลอรีนและไม่ใช้คลอรีน พบว่าสารกรองที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้ดีที่สุดในการกรองภายใต้แรงดันโดยไม่เติมคลอรีน คือ ไพโรลูไซต์ รองลงมาได้แก่ แมงกานีสซีโอไลต์ และแมงกานีสกรีนแซนด์ โดยสามารถคำนวณเป็นปริมาณแมงกานีสที่กำจัดได้ต่อหน่วยน้ำหนักสารกรอง (กรัมต่อกิโลกรัม) เท่ากับ 2.02 กรัมต่อกิโลกรัม 0.89 กรัมต่อกิโลกรัม และ 0.62 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการกรอง

เอกสารงานวิจัยทั้งสามสารกรองทั้ง 3 ชนิด หมดประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (breakthrough) ได้แก่มากกว่า 314,73 และ 73 ชั่วโมง สำหรับชุดการทดลองการกรองภายใต้แรงดันควบคู่กับการเติมคลอรีน

ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียของสารกรองทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี (90–99%) ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียจะมีแนวโน้มลดลง

Bernard, et al. (1997) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์โดยการดูดซับด้วยไฟโรลูไซต์ ทำการทดลองแบบแบตช์ แต่ละการทดลองใช้ไฟโรลูไซต์ 5 g/L ปริมาณสารละลายที่ใช้ในการทดลองดูดซับ 100 mL ความเร็วรอบในการกวน 90 rpm ทำการศึกษากำจัดกรดฮิวมิก การกำจัดกรดแทนนิกการกำจัดโมเลกุลที่มีประจุเป็นบวก ได้แก่ ซาฟรานิน คริสตัลไวโอเลต และเพอรูอิน และการกำจัดประจุลบและเป็นกลาง ได้แก่ กรดซาลิไซลิก กรดพทาสิก และกรดเมลลิติก จากการทดลองการกำจัดกรดฮิวมิกพบว่าไฟโรลูไซต์สามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้ 64% การศึกษาการกำจัดกรดแทนนิก พบว่าไฟโรลูไซต์สามารถกำจัดกรดแทนนิกได้น้อยหรือไม่สามารถกำจัดได้เลย และจากการศึกษาการกำจัดโมเลกุลที่มีประจุบวกไฟโรลูไซต์สามารถกำจัดซาฟรานิน คริสตัลไวโอเลต และเพอรูอิน ได้ 46%, 70% และ 36% ตามลำดับ และการกำจัดโมเลกุลประจุลบ และเป็นกลาง พบว่าไฟโรลูไซต์สามารถกำจัดกรดซาลิไซลิก กรดพทาสิก และกรดเมลลิติก ได้ 0%, 3% และ 12% ตามลำดับ

HE Xuwen, et al. (2010) ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับธาตุเหล็กและแอมโมเนียของสารกรอง 4 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียสแซนด์ ททรายควอต อนุภาคเซรามิค และพอร์ซเลนทรายสารกรองที่ผ่านการปรับพื้นผิว 6 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียสแซนด์ ททรายควอต อนุภาคเซรามิค และพอร์ซเลนทรายที่เคลือบด้วย 1% KMnO_4 แอมโมเนียสแซนด์ที่เคลือบด้วย 3% KMnO_4 และแอมโมเนียสแซนด์ที่เคลือบด้วย 5% KMnO_4 พบว่าแอมโมเนียสแซนด์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย 5% KMnO_4 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดเหล็กและแอมโมเนียออกจากน้ำ ความเข้มข้นของโลหะในน้ำทิ้งที่ผ่านการกรองอยู่ระหว่าง 0.01 และ 0.04 mg/L ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานสำหรับการรีไซเคิลน้ำ ตรวจสอบพื้นผิวของทรายแอมโมเนียสที่ความเข้มข้น 5% KMnO_4 พบว่าบนพื้นผิวถูกปกคลุมไปด้วยเหล็กและแอมโมเนียส

L. Fan, et al. (2013) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ไฟโรลูไซต์ และส่วนประกอบหลักของโลหะออกไซด์, MnO_2 และ Fe_2O_3 เพื่อปรับเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกวอลนัทโดยวิธีการผสมตามลำดับการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (desulfurization) การทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่บรรจุไฟโรลูไซต์ทำงานได้ดีที่สุดในการกำจัด SO_2 ด้วยปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่ง ความจุกำมะถันสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุโดยไฟโรลูไซต์, MnO_2 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 227.8, 157.8 และ 140.6 mg/g ซึ่งสูงกว่า 84.0, 27.5 และ 13.6% ตามลำดับ ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของตัวอย่างทั้งหมดโดยวิเคราะห์คุณสมบัติของ BET, XRD, XPS และ FTIR ผลการศึกษาพบว่าความจุกำมะถันที่สูงขึ้นของถ่านกัมมันต์ไฟโรลูไซต์ส่วนใหญ่เกิดจากการเสริมฤทธิ์ของโลหะผสม (แอมโมเนียสและเหล็ก) ในไฟโรลูไซต์ซึ่งเอื้อต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และการเร่งปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ สรุปได้ว่าการใช้ไฟโรลูไซต์ในการดัดแปลงถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการผสมนั้นเป็นวิธีที่ประหยัด

เอกสาร
ไม่ ต้นทุนในการปรับปรุงความสามารถของกำมะถันในถ่านกัมมันต์ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Demirkiran, *et al.* (2014) ทำการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ด้วยไฟโรลูไซต์ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ ค่าพีเอชและขนาดของอนุภาคต่อการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ (II) จากน้ำตัวอย่าง นอกจากนี้ยังทำการศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอร์ม พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น เท่ากับ 2.5 mmol/L ปริมาณตัวดูดซับ 6 g/L ค่าพีเอชเริ่มต้นตามธรรมชาติของสารละลาย และขนาดของอนุภาค 120 μm เหมาะสำหรับการดูดซับไอออนของคอปเปอร์ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงถึง 96.5% และจากการศึกษาไอโซเทอร์ม เป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และจลนศาสตร์เป็นไปตาม pseudo second order

Pietrelli, *et al.* (2019) งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการใช้เรดมัตและไฟโรลูไซต์ ในการกำจัดแมงกานีสและสารหนูในน้ำดื่ม ทำการทดสอบทั้งแบบแบตช์และแบบไดนามิก เพื่อศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นของ Mn และ As ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาผลของความเข้มข้นของ Mn และ As ที่ระยะเวลาสัมผัส 0, 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 350 และ 1440 นาที พบว่าทั้งเรดมัตมีประสิทธิภาพในการกำจัด Mn และ As ดีกว่าไฟโรลูไซต์ การศึกษาผลของพีเอช ทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8 พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 เหมาะสมสำหรับการกำจัด Mn และ As ด้วยเรดมัตและไฟโรลูไซต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200
2. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นพรุน (BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer) ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advandce
4. เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Rigaku ZSX Primus
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seven Compact S220
6. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seven Compact S230
7. เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100Q
8. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ WiseShake รุ่น SHO-1D
9. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น MS3002TS/00
10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML204/01
11. เตาเผา ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น Controller P 320
12. ครุซีเบล
13. เตาอบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น UN55
14. กระดาษกรอง เบอร์ 1 และ เบอร์ 42 ยี่ห้อ Whatman
15. ชุดกรองลดความดัน ยี่ห้อ Eyla รุ่น A-1000S
16. ไมโครปิเปต ขนาด 20-200 μL ยี่ห้อ Witeg Germany รุ่น Witopet Premium
17. ไมโครปิเปต ขนาด 100-1000 μL ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Pipet-Lite PL
18. เครื่องกวนและให้ความร้อน (Stir and Heat) ยี่ห้อ Stuart
19. ชุดอุปกรณ์สำหรับไทเทรต
20. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วัสดุและสารเคมี

1. แร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) บริษัทเอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) 65% AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents
3. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 65% AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% AR grade ยี่ห้อ LobaChemie
5. เพอร์ริคซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$) AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents
6. สารละลายมาตรฐานเหล็ก (Iron Standard Solution for AAS) AR grade เข้มข้น 1000 ppm ยี่ห้อ Applichem
7. กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (Ethylenediamineacetic acid, EDTA) AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba
8. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba
9. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba
10. สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4, 7, 9, 10 ยี่ห้อ Thermo Scientific
11. สารละลายมาตรฐานปรับเทียบค่าการนำไฟฟ้า 84, 1413 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ยี่ห้อ Thermo Scientific
12. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) AR grade ยี่ห้อ LobaChemie pvt.LTD, India
13. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba
14. แมกนีเซียมอีดีทีเอ (Mg EDTA) AR grade ยี่ห้อ Panreac Quimicsa, Espana
15. ฟีนอล์ฟทาเลอินอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein Indicator) AR grade ยี่ห้อ Fisher Scientific
16. บรอมฟีนอลบลูอินดิเคเตอร์ (Bromothymol blue Indicator) AR grade ยี่ห้อ SDFCL Sdfine-Chem Limited Mumbai
17. เอร์โอโครมแบลคที AR grade ยี่ห้อ Carlo Erba
18. โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) AR grade ยี่ห้อ Fisherchemical Belgium

3.2 สารกรองเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาค้างนี้ใช้ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) ขนาดประมาณ 0.8-1.2 mm ซึ่งเป็นแร่แมงกานีส ในรูปแมงกานีสออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารกรองและกำจัดเหล็กในน้ำ โดยได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัทเอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด

3.3 การศึกษาคุณลักษณะของไพโรลูไซต์

ไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการศึกษาจะถูกนำวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไพโรลูไซต์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer)
โครงสร้างผลึก	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
องค์ประกอบธาตุ	เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)

3.4 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาจะถูกนำวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์ก่อนและหลัง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ค่าพีเอช	เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
ค่าความขุ่น	เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity meter)
ค่าสภาพต่าง	Titration Method (AWWA, WEF, APHA, 1998)
ค่าความกระด้าง	EDTA Titrimetric Method (AWWA, WEF, APHA, 1998)
ความเข้มข้นเหล็ก	เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบแบดซ์

3.5.1 การเตรียมไพโรลูไซต์

ล้างไพโรลูไซต์ด้วยน้ำกลั่นจนกว่าสีของน้ำที่ล้างไพโรลูไซต์มีลักษณะใส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปใช้งานต่อไป

3.5.2 สารละลายเหล็กที่ใช้ทดสอบ

เตรียมสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) 1000 mg/L โดยชั่งเฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่มีมวลโมเลกุล 417.858 g/mol มา 3.741 g ละลายด้วยน้ำกลั่น คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL เก็บไว้ในขวดพลาสติก เต็มกรดไนตริกเข้มข้น 65% (HNO_3) แล้วแช่ตู้เย็นไว้ เพื่อรักษาสภาพตัวอย่าง เมื่อจะใช้งานค่อยปิเปตสารละลายสต็อกเหล็กและเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก

1. ปิเปตสารละลายเหล็กในข้อ 3.5.2 มา 1 mL ใส่ในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายให้ได้ 1000 mL จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 1 mg/L
2. ชั่งไพโรลูไซต์ในข้อ 3.5.1 มา 1 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วตวงสารละลายเหล็กจากข้อ 1 ลงไป 150 mL จากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยพาราฟิล์มให้สนิท
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 15 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองแยกส่วนของแข็งและของเหลวด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้ มาวัดค่าพีเอช (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ค่าความขุ่น (Turbidity) พร้อมกับวิเคราะห์ค่าความกระด้าง (Hardness), ค่าสภาพด่าง (Alkalinity) และความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer, AAS) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%Removal) โดยสมการที่ (3.1)

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ $\%R$ = ร้อยละการกำจัดเหล็ก

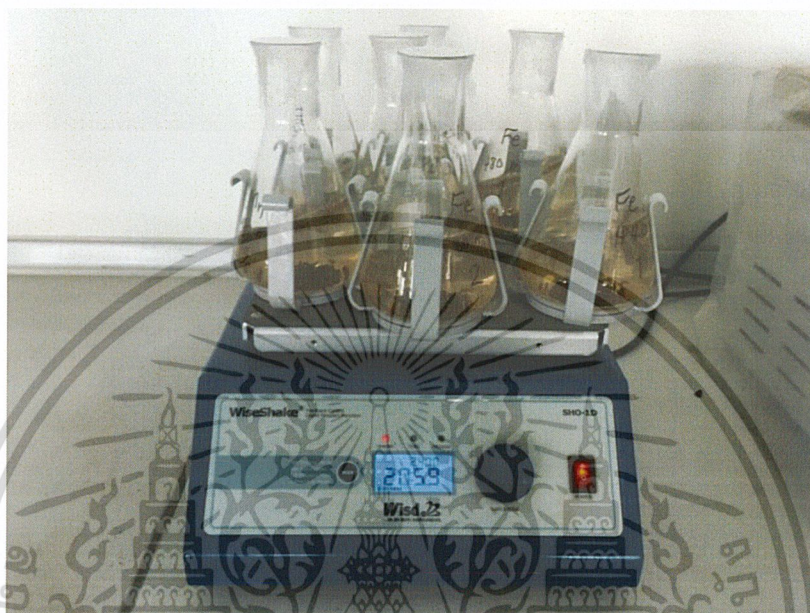
C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือของเหล็ก (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 5 แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าจาก 15 นาที เป็น 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที

6. ทำชุดควบคุมโดยดวงสารละลายเหล็กจากข้อ 1 จำนวน 150 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL จากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยพาราฟิล์มให้สนิท แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 1440 นาที



รูปที่ 3.1 เครื่องเขย่าในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

3.6 การศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์

3.6.1 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบ

คอลัมน์ที่ใช้ทำจากท่อพีวีซีใสด้านล่างของท่อต่อกับข้อต่อมวงอ มีตัวปรับอัตราการไหลและวาล์วเปิดก็อกกน้ำอยู่ ซึ่งทำจากทองเหลือง ส่วนตัวท่อคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 cm ความสูง 70 cm อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 99.0 mL/min

3.6.2 การเตรียมคอลัมน์บรรจุไฟโรลูไซด์

ล้างคอลัมน์จากข้อ 3.6.1 ด้วยกรดไนตริก 20% แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งจนกว่าคอลัมน์จะไม่มีสิ่งเจือปน จากนั้นล้างไฟโรลูไซด์ในข้อ 3.2 ด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ล้างจนกว่าสีของน้ำที่ล้างไฟโรลูไซด์มีลักษณะใส บรรจุลงในคอลัมน์ที่รองด้วยฟองน้ำ 1 cm กำหนดความสูงของไฟโรลูไซด์เป็น 50 cm ดังรูปที่ 3.2 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นต่อในคอลัมน์อีก 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 คอลัมน์ที่บรรจุไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

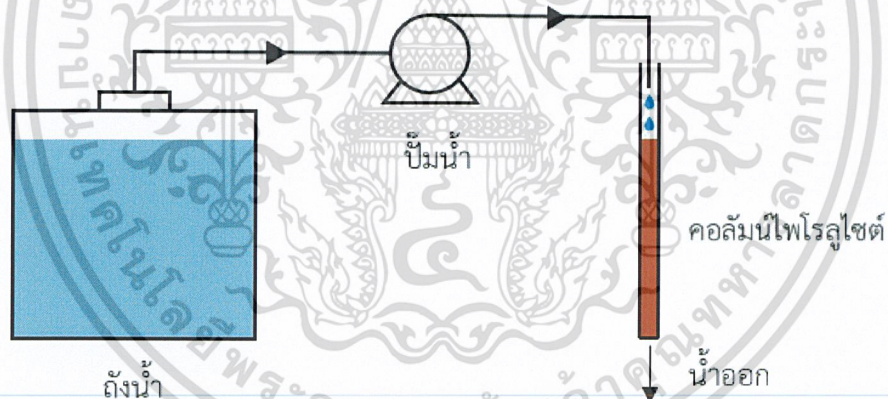
3.6.3 สารละลายเหล็กที่ใช้ทดสอบ

1. เตรียมสารละลายเหล็ก ความเข้มข้น 1 mg/L โดยเปิดสารละลายเหล็กจากข้อ 3.5.2 มา 1 mL ใส่ในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายให้ได้ 1000 mL แล้วปรับพีเอชให้อยู่ประมาณ 7-8
2. น้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนมโดยใช้วิธีการเก็บน้ำเสียด้วยการเก็บแบบจ้วงบริเวณคุระบายน้ำใส่ขวดพลาสติกขนาด 25 L จากนั้นรักษาสภาพน้ำเสียด้วยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 65% (HNO_3) ลงไปและควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าน้อยกว่า 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก

1. นำสารละลายเหล็กจากข้อ 3.6.3 ผ่านคอลัมน์ในข้อ 3.6.2 อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะถึงเวลาต่างๆ คือ 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที ดังรูปที่ 3.3
2. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ผ่านไพโรลูไซต์มาวัดค่าพีเอช (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ค่าความขุ่น (Turbidity) พร้อมกับวิเคราะห์ค่าความกระด้าง (Hardness), ค่าสภาพด่าง (Alkalinity) และ ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer, AAS) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%Removal) โดยสมการที่ (3.1)
3. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 2 แต่เปลี่ยนจากสารละลายเหล็กเป็นน้ำเสียในข้อ 3.6.3
4. ทำชุดควบคุมโดยการเริ่มตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 2 โดยที่เปลี่ยนสารละลายเหล็กในข้อ 1 เป็นน้ำกลั่นแทน



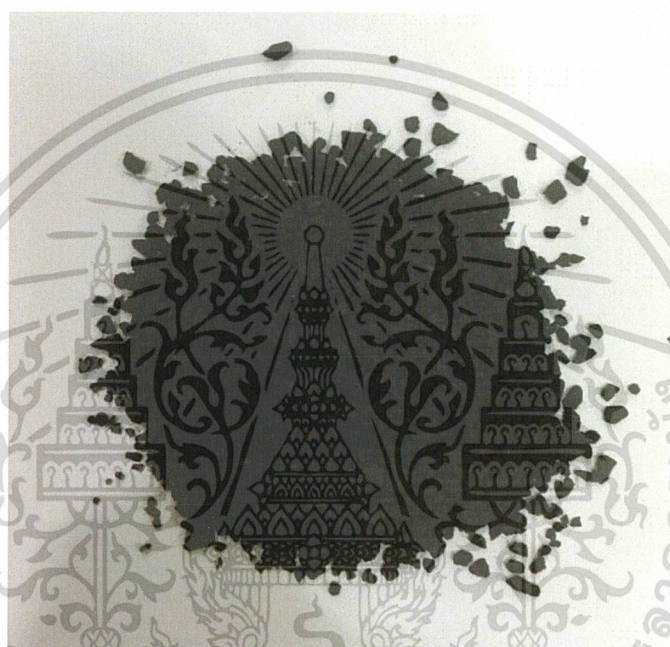
รูปที่ 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของไพโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

สหกิจศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของไพโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย โดยไพโรลูไซต์ที่นำมาศึกษาเป็นไพโรลูไซต์จากธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของแข็ง เม็ดสีดำ ดังรูปที่ 4.1 และใช้เป็นสารกรองในการกำจัดเหล็กในน้ำเสีย โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ 2 แบบ คือ แบบแบตช์ (Batch) และแบบคอลัมน์ (Column) โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 4.1 ไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการทดลอง (Pyrolusite)

4.1 คุณสมบัติของไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการศึกษา

4.1.1 การศึกษาหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของไพโรลูไซต์ด้วยเทคนิค BET

ผลการศึกษาหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET ในไพโรลูไซต์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไพโรลูไซต์ที่ใช้ในการศึกษามีพื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ $118.29 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.265 mL/g จัดเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ในทางการค้าชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) (กษิต, 2551) และขนาดรูพรุนเท่ากับ 88.23 \AA ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนทำให้ทราบว่าไพโรลูไซต์มีขนาดรูพรุนเป็นแบบมีโซพอร์ (Mesopore) เนื่องจากมีขนาดความกว้างอยู่ในช่วง 20 ถึง 500 \AA (ภัทรนถน, 2547)

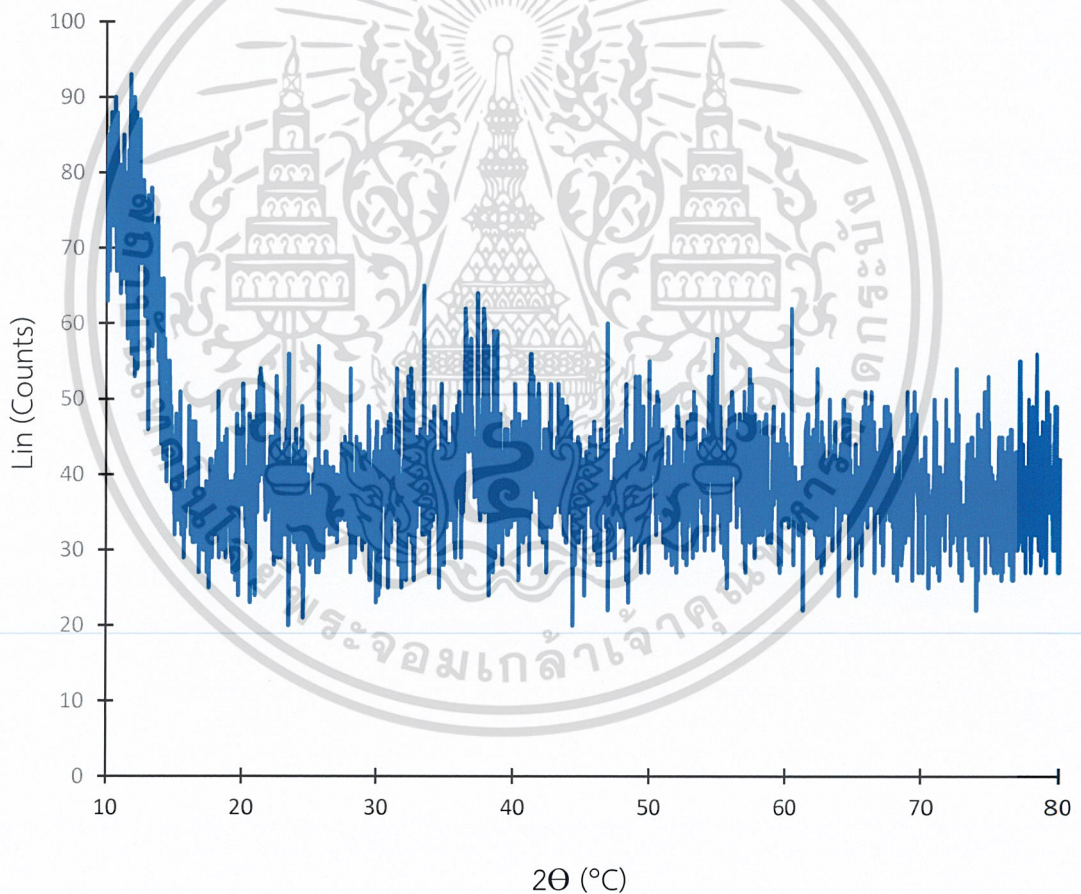
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
พื้นที่ผิว (Surface Area)	118.29 m ² /g
ปริมาณรูพรุน (Pore Volume)	0.265 mL/g
ขนาดรูพรุน (Pore Size)	88.23 Å

4.1.2 การศึกษาหาโครงสร้างผลึกของไพโรลูไซต์ด้วยเทคนิค XRD

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวอย่างไพโรลูไซต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometry, XRD) แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยพบว่าโครงสร้างของไพโรลูไซต์ไม่เกิดพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าไพโรลูไซต์ที่ซึ่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงลักษณะโครงสร้างของไพโรลูไซต์จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การศึกษาองค์ประกอบธาตุของไฟโรลูไซต์ด้วยเทคนิค XRF

ผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในไฟโรลูไซต์ ด้วยเทคนิค XRF (X-ray Fluorescence Spectrometry) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะพบว่าไฟโรลูไซต์มี แมงกานีส (Mn) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณ 41.0955% รองลงไปคือ เหล็ก (Fe) 21.5680%, อลูมิเนียม (Al) 5.1787%, ซิลิกา (Si) 1.9927%, ไทเทเนียม (Ti) 0.2994%, แบเรียม (Ba) 0.2972%, โพแทสเซียม (K) 0.2769%, ฟอสฟอรัส (P) 0.1610%, แคลเซียม (Ca) 0.1214%, สตรอนเชียม (Sr) 0.0581%, สารหนู (As) 0.0512%, แมงนีเซียม (Mg) 0.0331%, นิกเกิล (Ni) 0.0318%, สังกะสี (Zn) 0.0191%, กำมะถัน (S) 0.0138%, เซอร์โคเนียม (Zr) 0.0134% และอิตเทรียม (Y) 0.0046% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ

องค์ประกอบธาตุ	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (%)
Mg	0.0331
Al	5.1787
Si	1.9927
P	0.1610
S	0.0138
K	0.2769
Ca	0.1214
Ti	0.2994
Mn	41.0955
Fe	21.5680
Co	0.0246
Ni	0.0318
Zn	0.0191
As	0.0512
Sr	0.0581
Y	0.0046
Zr	0.0134
Ba	0.2972
Total	71.1893

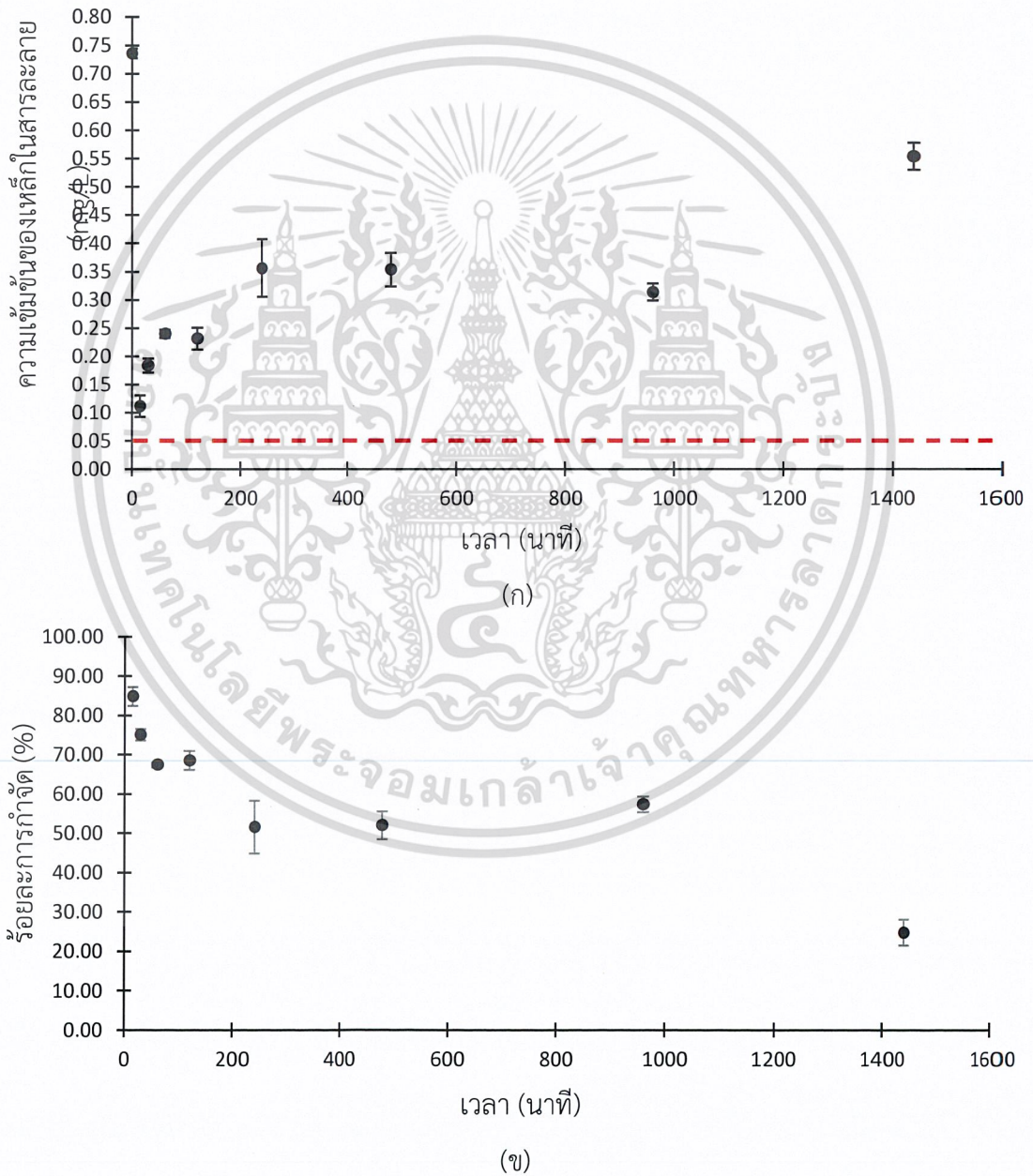
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กแบบแบดซ์

ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารละลายเหล็กก่อนการบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ เป็นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติของสารละลายเหล็กที่ใช้ในการทดสอบแบบแบดซ์

พีเอช	การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ความขุ่น (NTU)	สภาพต่าง (mg/L)	ความกระด้าง (mg/L)	[Fe] (mg/L)
6.79 \pm 0.05	0.22 \pm 0.03	1.50 \pm 0.23	8.92 \pm 0.00	1.74 \pm 0.43	0.736 \pm 0.01



รูปที่ 4.3 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านกรบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) พบว่าไฟโรลูโซต์สามารถกำจัดเหล็กในน้ำได้อย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที ความเข้มข้นเหล็กในสารละลายมีค่าลดลงจาก 0.736 ± 0.01 mg/L เป็น 0.112 ± 0.02 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ $84.79 \pm 2.41\%$ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.112 ± 0.02 mg/L ที่ระยะเวลา 15 นาที เป็น 0.356 ± 0.05 mg/L ที่ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที ประสิทธิภาพของไฟโรลูโซต์ในการกำจัดเหล็กมีแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเขย่านานขึ้นจาก 240 นาที เป็น 960 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นเป็น 1440 นาที ไฟโรลูโซต์สามารถกำจัดเหล็กได้เพียง $24.78 \pm 3.29\%$ ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงถึง 0.553 ± 0.02 mg/L ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลายในขวดหลังการเขย่า พบว่าสารละลายในขวดที่ระยะเวลาสัมผัส 1440 นาที มีสีเข้มกว่าเมื่อเทียบกับสีของสารละลายเหล็กในขวดอื่นๆ ที่มีระยะเวลาสัมผัสสั้นกว่า ทั้งนี้ความสามารถในการกำจัดเหล็กที่ลดลงของไฟโรลูโซต์อาจจะเป็นผลมาจากระยะเวลาเริ่มต้นของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมากทำให้อัตราการดูดซับมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (กนกรวรรณ, 2560)

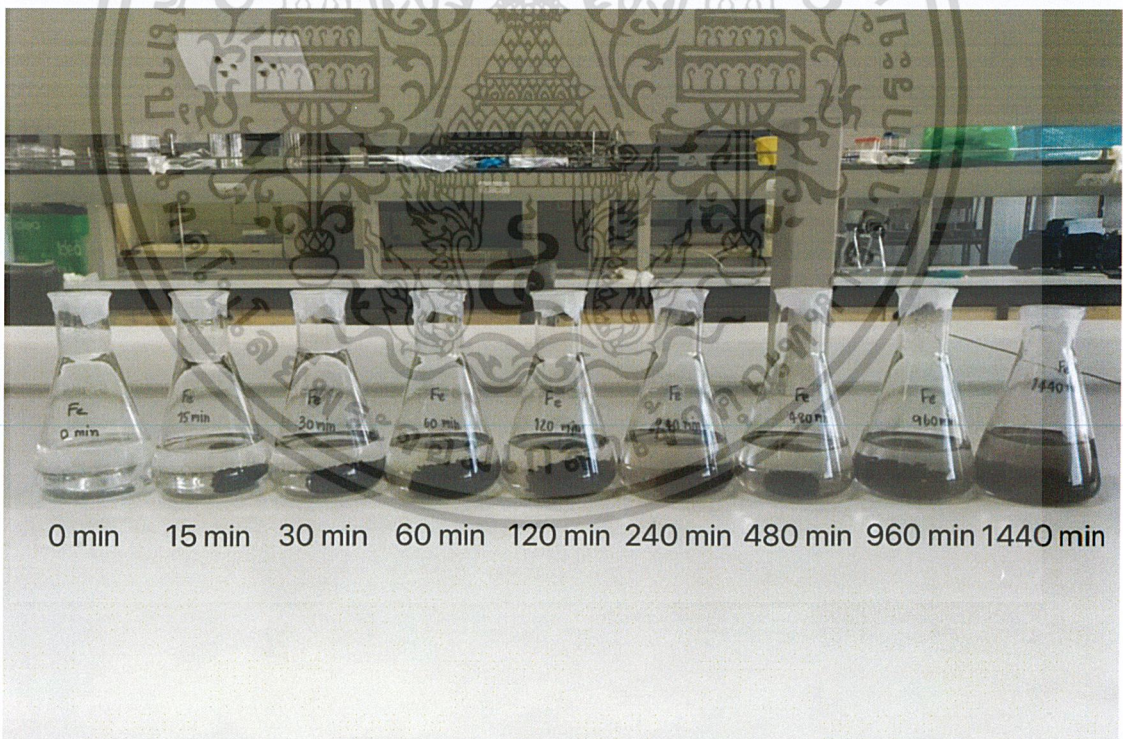
ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำหลังการบำบัดด้วยไฟโรลูโซต์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติของสารละลายเหล็กหลังบำบัดด้วยไฟโรลูโซต์ที่เวลาต่างกัน

เวลา (min)	พีเอช	การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ความขุ่น (NTU)	สภาพต่าง (mg/L)	ความกระด้าง (mg/L)
15	6.56 ± 0.12	0.23 ± 0.01	3.20 ± 0.70	8.92 ± 0.00	1.49 ± 0.00
30	7.47 ± 0.17	0.25 ± 0.03	6.30 ± 0.47	11.00 ± 0.51	1.49 ± 0.00
60	7.65 ± 0.16	0.25 ± 0.03	8.70 ± 0.81	11.89 ± 0.51	1.49 ± 0.00
120	7.95 ± 0.08	0.33 ± 0.04	4.60 ± 1.88	12.49 ± 0.00	2.73 ± 0.43
240	7.70 ± 0.11	0.26 ± 0.03	13.60 ± 3.26	12.19 ± 0.51	2.97 ± 1.97
480	6.66 ± 0.03	0.25 ± 0.06	12.20 ± 2.13	8.92 ± 0.00	1.49 ± 0.00
960	7.36 ± 0.27	0.44 ± 0.10	15.80 ± 1.10	10.70 ± 0.00	3.47 ± 0.86
1440	8.01 ± 0.54	0.33 ± 0.03	16.70 ± 1.68	12.49 ± 0.89	3.72 ± 1.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างน้ำหลังการบำบัด มีค่าการนำไฟฟ้า สภาพต่าง และความกระด้าง เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับตัวอย่างน้ำก่อนการบำบัด ในขณะที่พีเอช และค่าความขุ่น ของน้ำหลังการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ในตัวอย่างน้ำก่อนการบำบัด โดยพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 6.79 ± 0.05 เป็น 8.01 ± 0.54 เมื่อระยะเวลาสัมผัสระหว่างไฟโรลูไซด์กับสารละลายเหล็กนานขึ้นเป็น 1440 นาที สาเหตุที่พีเอชของสารละลายเหล็กนั้นเพิ่มขึ้นเพราะว่าสารละลายเหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับอากาศในขณะที่ทำการเขย่า จึงทำให้สารละลายเหล็กมีพีเอชเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ไอออนเหล็กก็จะไปจับกับไฮดรอกไซด์ของเบสที่เกิดขึ้นแทน จนเกิดตะกอนของสนิมเหล็ก (อารยาและปรีชา, 2559) แทนที่จะไปทำปฏิกิริยากับไฟโรลูไซด์จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กนั้นลดลง นอกจากนี้พบว่าความขุ่นของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.50 ± 0.23 NTU เป็น 13.60 ± 3.26 NTU เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 240 นาที จากนั้นที่เวลา 480 นาที มีแนวโน้มลดลงเหลือ 12.20 ± 2.13 NTU และเพิ่มขึ้นเป็น 16.70 ± 1.68 NTU เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 1440 นาที เป็นเพราะในขณะที่เขย่าสารละลายเหล็ก ไฟโรลูไซด์มีการแตกออกทำให้สารละลายมีสีน้ำตาลดำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเขย่านานขึ้น สีของสารละลายเหล็กก็จะยิ่งเข้มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สีของสารละลายเหล็กหลังจากเขย่าไฟโรลูไซด์ในแต่ละเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กแบบคอลัมน์

การศึกษาความสามารถของไฟโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กด้วยการทดสอบแบบคอลัมน์ ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำ 2 ชนิด คือ สารละลายเหล็กเข้มข้น 1.088 ± 0.07 mg/L และน้ำเสียจากการทำกิจการเกี่ยวกับน้ำนม เติลระบบโดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 cm ความสูง 70 cm ซึ่งบรรจุไฟโรลูไซต์ที่มีความสูง 50 cm อัตราการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์วัดด้วยการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่ 99.0 mL เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลา 0, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที และนำไปวิเคราะห์สมบัติของน้ำตัวอย่าง ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำตัวอย่างก่อนการบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ เป็นดังตารางที่ 4.5

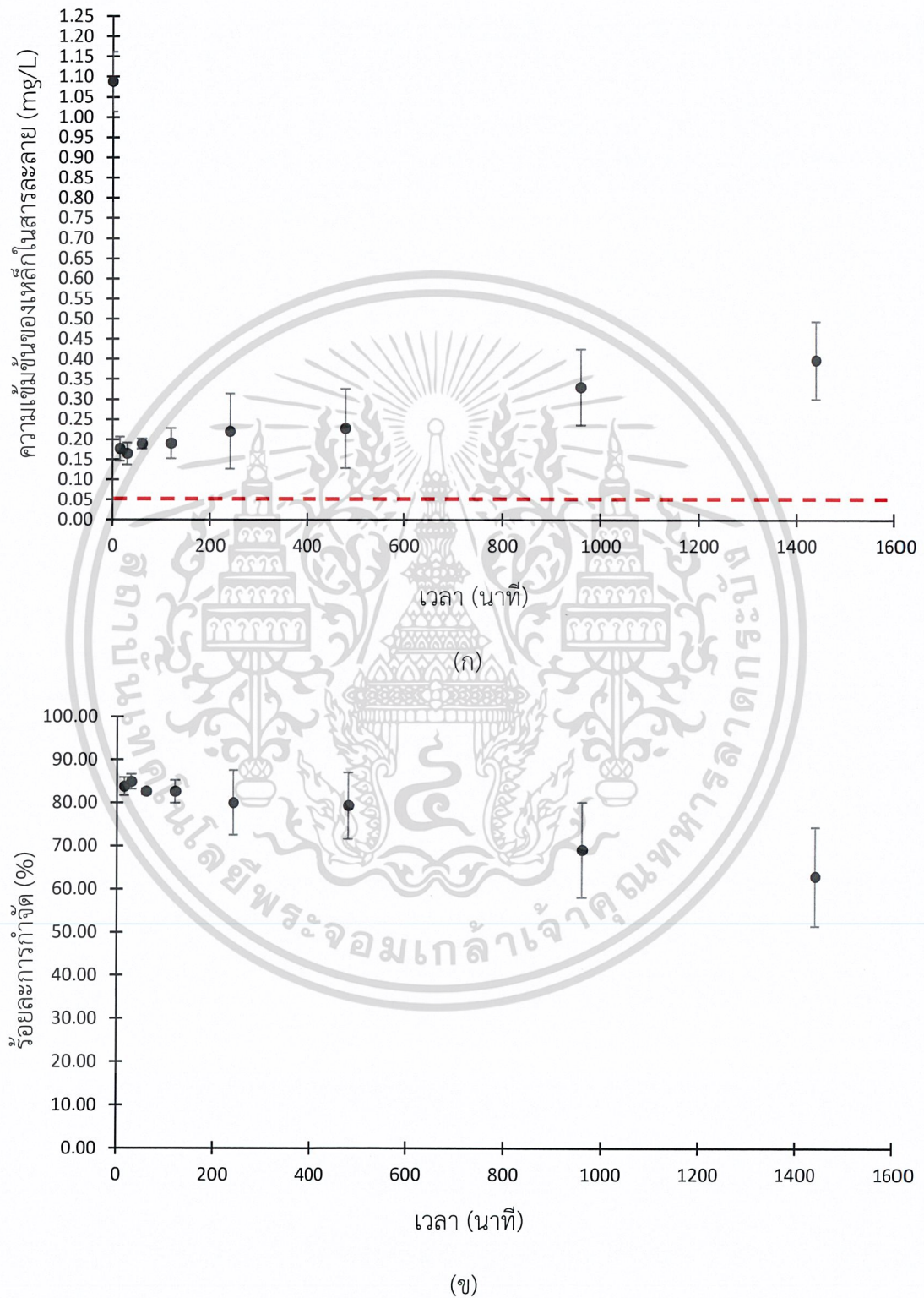
ตารางที่ 4.5 สมบัติของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	ชนิดตัวอย่าง	
	สารละลายเหล็ก	น้ำเสียจากการทำกิจการเกี่ยวกับน้ำนม
พีเอช	7.70 ± 0.01	7.57 ± 0.02
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	69.13 ± 5.76	$7,697 \pm 105$
ความขุ่น (NTU)	1.24 ± 0.32	94.5 ± 15.3
สภาพต่าง (mg/L)	13.68 ± 0.51	564.93 ± 34.22
ความกระด้าง (mg/L)	5.70 ± 0.43	78.58 ± 1.87
ความเข้มข้นเหล็ก (mg/L)	1.088 ± 0.07	0.950 ± 0.07

จากตารางที่ 4.5 พบว่าพีเอชและความเข้มข้นสารละลายเหล็กทั้งหมดในสารละลายเหล็กที่เตรียมขึ้นกับน้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่สมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่น สภาพต่าง และความกระด้าง ของน้ำเสียตัวอย่างมีค่าสูงกว่า ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียตัวอย่างมีค่าสูงกว่าสารละลายเหล็กตัวอย่างประมาณ 100 เท่า ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงจะบ่งบอกถึงปริมาณไอออนที่อยู่ในน้ำเสียว่ามีปริมาณไอออนในน้ำเป็นจำนวนมาก และน้ำเสียตัวอย่างจะมีความขุ่นสูงกว่า เนื่องจากตัวน้ำเสียมาจากบ่อดิน ในน้ำเสียจึงมีสารแขวนลอย สารอินทรีย์ และอนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำเสียตัวอย่างมีสภาพต่างสูง พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนที่จะนำไปผ่านการบำบัดเข้าสู่ขั้นตอนการบำบัดด้วยเยื่อกรองเมมเบรนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาความสามารถของไฟโรลูไซต์ในการกำจัดสารละลายเหล็กเข้มข้น 1.088 ± 0.07 mg/L ด้วยวิธีการทดสอบแบบคอลัมน์ ได้ผลดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) ไฟโรไลต์สามารถกำจัดเหล็กได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับที่พบในการทดสอบแบบแบตช์ ซึ่งสารละลายเหล็กจะมีเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1.088 ± 0.07 mg/L เมื่อไหลผ่านไฟโรไลต์ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สารละลายเหล็กมีความเข้มข้นของเหล็กลดลงเหลือ 0.165 ± 0.03 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $84.92 \pm 1.73\%$ ปริมาณเหล็กในสารละลายเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อไหลผ่านคอลัมน์ที่มีระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นจาก 30 นาที เป็น 1440 นาที ความเข้มข้นของเหล็กจะเป็น 0.398 ± 0.10 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กเท่ากับ $62.94 \pm 11.46\%$ อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าสูงกว่าระดับปริมาณของเหล็กที่ยอมให้มีในน้ำป้อนเข้าระบบกรองแบบเยื่อกรอง แสดงให้เห็นว่าสถานะที่ใช้ในการเดินระบบยังไม่เหมาะสมต่อการบำบัดขั้นต้นของน้ำป้อนเข้าระบบกรองแบบเยื่อกรองเมมเบรน

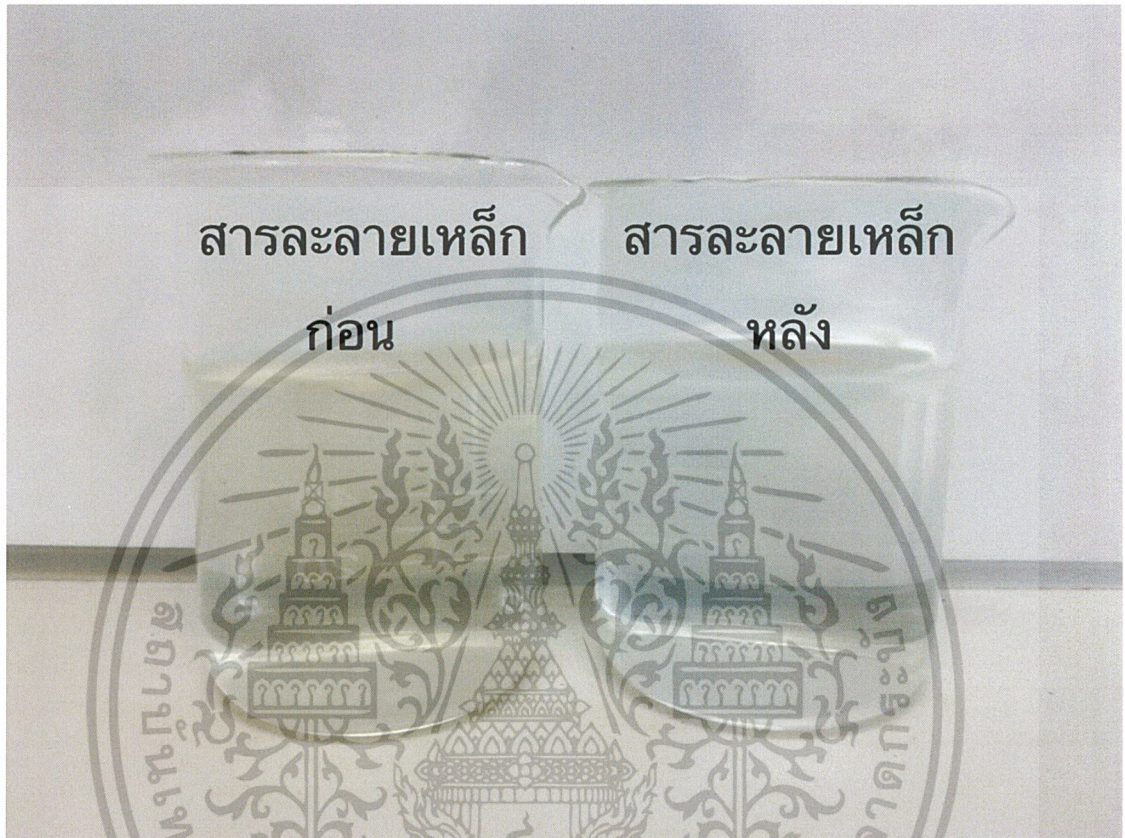
ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารละลายเหล็กหลังการบำบัดด้วยไฟโรไลต์ (ตารางที่ 4.6) พบว่าสารละลายเหล็กที่ผ่านการบำบัดมีสมบัติของน้ำที่วัดในแง่ของ พีเอช สภาพต่าง และความกระด้าง ที่ใกล้เคียงกับที่พบสารละลายเหล็กก่อนการบำบัด (ตารางที่ 4.5) อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการนำไฟฟ้าและค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลง เมื่อสารละลายไหลผ่านคอลัมน์นานขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่ออนุภาคเกิดการตกตะกอนที่ผิวหน้าของชั้นกรองและติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นกรอง ส่งผลให้ความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยมีค่าสูงขึ้น (ศุภนุช, 2553) น้ำที่ผ่านการกรองจึงมีค่าความขุ่นและค่าการนำไฟฟ้าลดลง

ตารางที่ 4.6 สมบัติของสารละลายเหล็กหลังบำบัดด้วยไฟโรไลต์ที่เวลาต่างกัน

เวลา (min)	พีเอช	การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ความขุ่น (NTU)	สภาพต่าง (mg/L)	ความกระด้าง (mg/L)
15	7.26 ± 0.02	67.57 ± 5.37	0.95 ± 0.03	10.41 ± 0.51	5.70 ± 0.43
30	7.24 ± 0.11	67.03 ± 6.26	0.93 ± 0.19	10.11 ± 0.51	5.45 ± 0.43
60	7.15 ± 0.13	67.20 ± 5.75	0.86 ± 0.06	9.81 ± 0.00	5.45 ± 0.43
120	7.47 ± 0.12	67.40 ± 5.36	0.91 ± 0.18	11.30 ± 0.51	5.45 ± 0.43
240	7.51 ± 0.07	65.67 ± 4.84	0.97 ± 0.08	11.60 ± 0.00	5.21 ± 0.00
480	7.49 ± 0.02	66.90 ± 3.64	0.97 ± 0.12	11.30 ± 0.51	5.21 ± 0.00
960	7.40 ± 0.04	61.83 ± 3.35	0.63 ± 0.12	10.70 ± 0.00	4.96 ± 0.43
1440	7.39 ± 0.12	60.13 ± 4.14	0.71 ± 0.17	11.30 ± 0.51	4.71 ± 0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

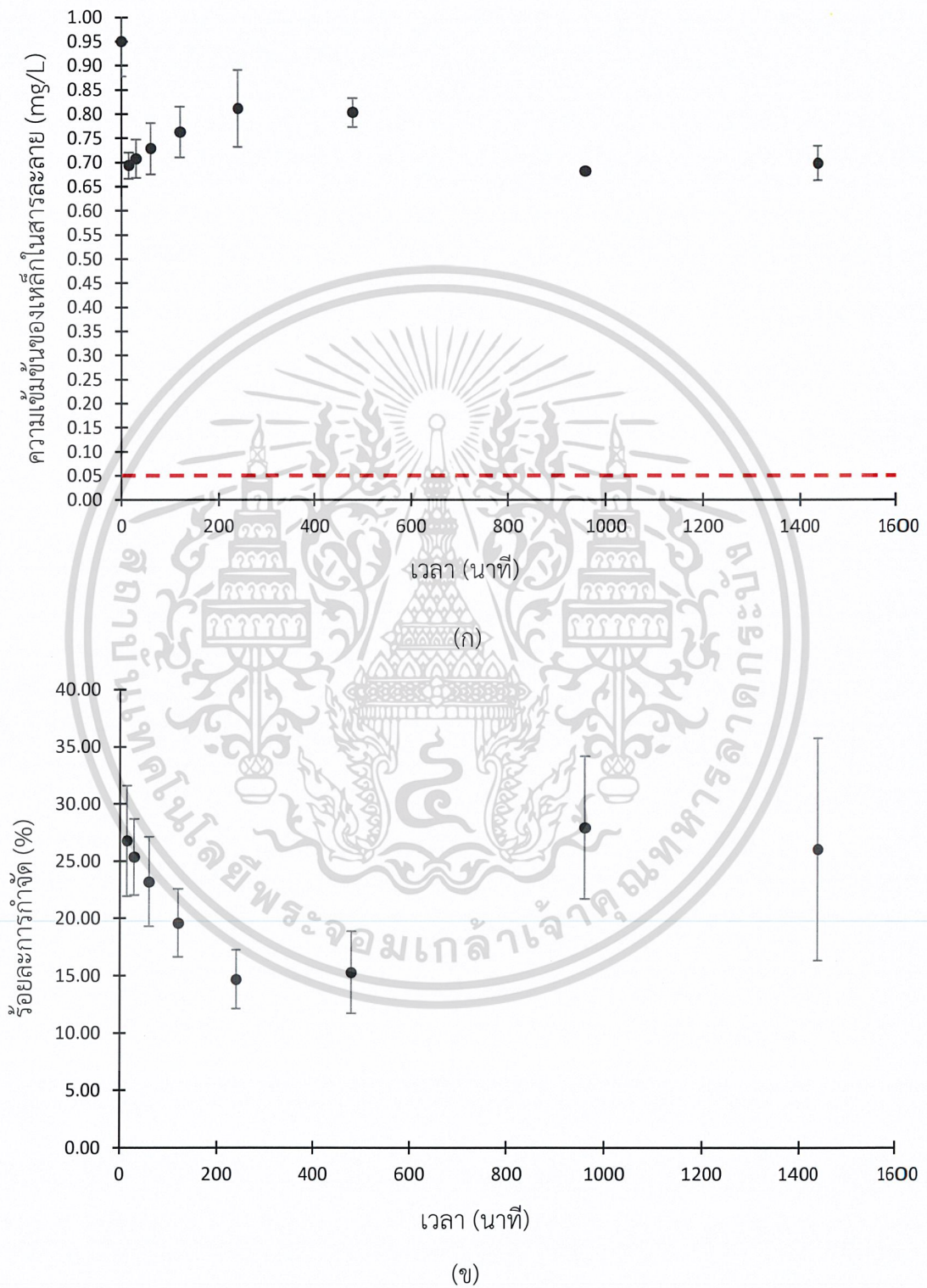
เมื่อพิจารณาสีของสารละลายเหล็กก่อนและหลังการบำบัดด้วยไฟโรลูไซต์ พบว่าสีก่อนการบำบัดเป็นสีเหลือง มีตะกอนเล็กน้อย เมื่อผ่านการบำบัดแล้วพบว่าสีเหลืองในสารละลายเหล็กลดลง และไม่มีตะกอน แสดงให้เห็นว่าไฟโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กได้



รูปที่ 4.6 สีของสารละลายเหล็กก่อนและหลังจากไหลผ่านไฟโรลูไซต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาความสามารถของไฟโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็กจากน้ำเสียจากการทำกิจการเกี่ยวกับ
น้ำมันเข้มข้น 0.950 ± 0.07 mg/L ด้วยวิธีการทดสอบแบบคอลัมน์ ได้ผลดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (ก) ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ข) ร้อยละการกำจัดเหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) ไฟโรลูโซต์สามารถกำจัดเหล็กในได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับที่พบในการทดสอบแบบแบดซ์และแบบคอลัมน์ของสารละลายเหล็ก น้ำเสียตัวอย่างจะมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.950 ± 0.07 mg/L เมื่อไหลผ่านไฟโรลูโซต์ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที น้ำเสียตัวอย่างจะมีความเข้มข้นของเหล็กลดลงเหลือ 0.694 ± 0.03 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $26.77 \pm 4.82\%$ ปริมาณเหล็กในสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อไหลผ่านคอลัมน์ที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 240 นาที ความเข้มข้นของเหล็กจะเป็น 0.811 ± 0.08 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $14.68 \pm 2.57\%$ และมีแนวโน้มลดลงอีกครั้งเมื่อไหลผ่านคอลัมน์ที่มีระยะเวลาสัมผัส 480 นาที เป็น 1440 นาที ความเข้มข้นของเหล็กลดลงเหลือ 0.698 ± 0.04 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $26.04 \pm 9.70\%$ อย่างไรก็ตามพบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าสูงกว่าระดับปริมาณของเหล็กที่ยอมให้มีในน้ำป้อนเข้าระบบการกรองแบบเยื่อกรอง แสดงให้เห็นว่าสถานะที่ใช้ในการเดินระบบยังไม่เหมาะสมต่อการบำบัดขั้นต้นของน้ำป้อนเข้าระบบกรองแบบเยื่อกรองเมมเบรน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียตัวอย่างหลังการบำบัดด้วยไฟโรลูโซต์ (ตารางที่ 4.7) พบว่าน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดมีสมบัติของน้ำที่วัดในแง่ของ พีเอช สภาพต่าง ค่าการนำไฟฟ้า และความกระด้าง ใกล้เคียงกับที่พบในน้ำเสียตัวอย่างก่อนการบำบัด (ตารางที่ 4.5) อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อสารละลายไหลผ่านคอลัมน์นานขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่ออนุภาคเกิดการตกตะกอนที่ผิวหน้าของชั้นกรองและติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นกรอง ส่งผลให้ความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง เช่นเดียวกับที่พบในการทดสอบการกำจัดเหล็กแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายเหล็ก

ตารางที่ 4.7 สมบัติของน้ำเสียจากการทำกิจกรรมเกี่ยวกับน้ำนมหลังบำบัดด้วยไฟโรลูโซต์ที่เวลาต่างกัน

เวลา (min)	พีเอช	การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ความขุ่น (NTU)	สภาพต่าง (mg/L)	ความกระด้าง (mg/L)
15	7.32 ± 0.12	$7,507 \pm 181$	45.90 ± 4.90	509.48 ± 22.46	68.17 ± 2.81
30	7.40 ± 0.13	$7,487 \pm 171$	49.20 ± 5.60	522.12 ± 21.23	65.20 ± 0.86
60	7.48 ± 0.14	$7,550 \pm 182$	52.30 ± 7.20	534.75 ± 27.43	69.59 ± 2.71
120	7.55 ± 0.12	$7,463 \pm 307$	53.70 ± 9.10	542.63 ± 26.80	67.67 ± 3.72
240	7.53 ± 0.05	$7,510 \pm 115$	58.50 ± 8.40	551.55 ± 26.88	65.44 ± 3.72
480	7.63 ± 0.07	$7,547 \pm 215$	60.00 ± 4.00	556.46 ± 37.91	66.56 ± 2.26
960	7.62 ± 0.02	$7,540 \pm 252$	34.90 ± 5.40	548.28 ± 36.62	65.20 ± 1.55
1440	7.57 ± 0.10	$7,500 \pm 338$	42.20 ± 5.50	521.52 ± 24.27	66.19 ± 7.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สีของน้ำเสียตัวอย่างก่อนและหลังจากไหลผ่านไฟโรลูไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษทำการทดสอบประสิทธิภาพของไพโรลูไซต์ในการกำจัดเหล็ก ด้วยวิธีการทดสอบแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาความสามารถในการกำจัดเหล็กด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์ พบว่าระยะเวลาที่ไพโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กได้สูงสุดคือที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก 84.78%

2. การศึกษาการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็กเข้มข้น 1 mg/L และน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำมัน ด้วยคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 cm ความสูง 70 cm บรรจุไพโรลูไซต์ที่ความสูง 50 cm เตินระบบที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 99.0 mL/min พบว่า ไพโรลูไซต์ลดความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายเหล็กและน้ำเสียตัวอย่างจาก 1.088 mg/L และ 0.950 mg/L เหลือ 0.165 mg/L และ 0.682 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก 84.87% และ 28.25% ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างน้ำไหลผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่องนาน 15 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการไหลผ่านของน้ำอย่างต่อเนื่อง ตารางที่ ก.2 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของไพโรลูไซต์ลดลง ดังนั้นไพโรลูไซต์สามารถกำจัดเหล็กได้ แต่เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของเหล็กที่สามารถทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรนนั้นยังไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 0.05 mg/L

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการกำจัดเหล็กแบบคอลัมน์ควรศึกษาความสูงของสารกรอง และอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านคอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก
2. ควรศึกษาการล้างย้อน (Back wash) เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กในครั้งต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ ศรีม่วง และกาญจนา ครอบธรรมชาติ. 2560. “ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมไหมโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบเพอร์ริกคลอไรด์.” *วารสารวิจัย มช.* 17(3) : 53-63
- กษิต แหลมทองมงคล. 2551. “การผลิตถ่านกัมมันต์อัดแท่งจากผงแอนทราไซต์ด้วยตัวประสานกากน้ำตาล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทวารักษา เครือคล้าย, ชลธร ปันเจริญ, เฉลิมศักดิ์ ทานเจริญ, สุฟ้า บัณฑุกุล, เกษริน เกียรติกุล ไพบูลย์, นริศรา นวกุล, พอลจิตต์ ชันทอง และเกรียงศักดิ์ บัวช่าง. 2552. *ภูมิปัญญาท้องถิ่นในการบริหารจัดการน้ำอุปโภคบริโภค*. กรุงเทพฯ : สำนักบริหารจัดการน้ำ.
- นันทวัน รมยศ. 2554. “การกำจัดแมงกานีสจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยสารแมงกานีสกรีนแซนด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. 2548. *การกำจัดเหล็กและแมงกานีสด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์*. [Online]. Available : https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=439.
- ไพศาล วีรกิจ. 2549. *การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนดีอี.
- ภัทรนถน บุขสาย. 2547. “ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของกระบวนการซักรีด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตน สนั่นเมือง, ยุทธพงษ์ อุดแน่น และวิภารัตน์ เชื้อชวด. 2551. “การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยโคโคซานเมมเบรน.” *วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร*. 5(2) : 200-209.
- ศุภนุช ยังทรัพย์. 2553. “การเปรียบเทียบกระบวนการกรองตรง ระหว่างการแยกอนุภาคความขุ่นและการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น. 2559. *การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสของแร่ไพไรไรต์เปรียบเทียบกับแมงกานีสกรีนแซนด์และแมงกานีสซีโอไลต์*. กรุงเทพฯ : เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น.
- อารยา ปานทั้ง และปรีชา ปัญญา. 2559. “การดูดซับโครเมียม (III) บนถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับปรุง” หน้า 400-409.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสืบเนื่อง การประชุมวิชาการระดับชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ครั้งที่ 3. กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่มีการนำไปใช้

- Asia Water System Solution. 2018. **Pyrolusite**. [Online]. Available :
<http://www.awss.co.th/pyrolusite/>.
- Xuwen, H. Huimin, Y. and Yong, H. 2010. “Treatment of mine water high in Fe and Mn by modified manganese sand.” *Mining Science and Technology*. 20 : 0571–0575.
- Pietrelli, L. Ippolito, N.M. Ferro, S. Dovi, V.G. and Vocciante, M. 2019. “Removal of Mn and As from drinking water by red mud and pyrolusite.” *Journal of Environmental Management*. 237 : 526-533.
- Fan, L. Chen, J. Guo, J. Jiang, X. and Jiang, W. 2013. “Influence of manganese, iron and pyrolusite blending on the physiochemical properties and desulfurization activities of activated carbon from walnut shell.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 104 : 353-360
- Demirkiran, N. 2015. “Copper adsorption by natural manganese dioxide.” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 25(2) : 647–653.
- Dashtban Kenari, S.L. Shabaniyan, J. Barbeau, B. 2019. “Dynamic Modeling of Manganese Removal in a Pyrolusite Fluidized Bed Contactor.” *Water Research*. 154 : 125-135
- Bernard, S. Chazal, Ph. and Mazet, M. 1996. “Removal of Organic Compounds by Adsorption on Pyrolusite (β -MnO₂).” *Wat. Res.* 31(5) : 1216-1222.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเทคนิคของไพโรลูไซต์

รูปแบบทางกายภาพ	เป็นเม็ด
ขนาดเฉลี่ย	0.8, 1.2, 3.0 mm
สี	น้ำตาลดำหรือสีดำ
ส่วนประกอบ	แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO ₂) 30-60%
อัตราการไหล	5-12 gpm/sq.ft.
อัตราไหลการล้างย้อน	25-30 gpm/sq.ft.
อัตราการเป่าอากาศ	1-2 บาร์ความดันอากาศ
ความสูงของสารกรอง	ไม่ต่ำกว่า 20 นิ้ว
ช่วง pH ที่เหมาะสม	6.5-9.0
ระยะเวลาการใช้งาน	5-10 ปี (ขั้นต่ำ 5 ปี)
อัตราการสึกกร่อน	2% ต่อปี

(บริษัท เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด, 2560)

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลน้ำเสียโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
ลักษณะ	-	สีเหลือง ขุ่น มีตะกอน
พีเอช	-	7.74
การนำไฟฟ้า	µS/cm	13,580
ความขุ่น	NTU	70.9
สภาพต่าง	mg/L as CaCO ₃	704
ความกระด้างทั้งหมด	mg/L as CaCO ₃	83.2
ความกระด้างเนื่องจากแคลเซียม	mg/L as CaCO ₃	40.8
อะลูมิเนียม	mg/L as Al ³⁺	0.010
เหล็กทั้งหมด	mg/L as Fe	0.67
ฟอสเฟต	mg/L as PO ₄ ³⁻	33.42
ซัลเฟต	mg/L as SO ₄ ²⁻	2.00
ซิลิกา	mg/L as SiO ₂	44.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

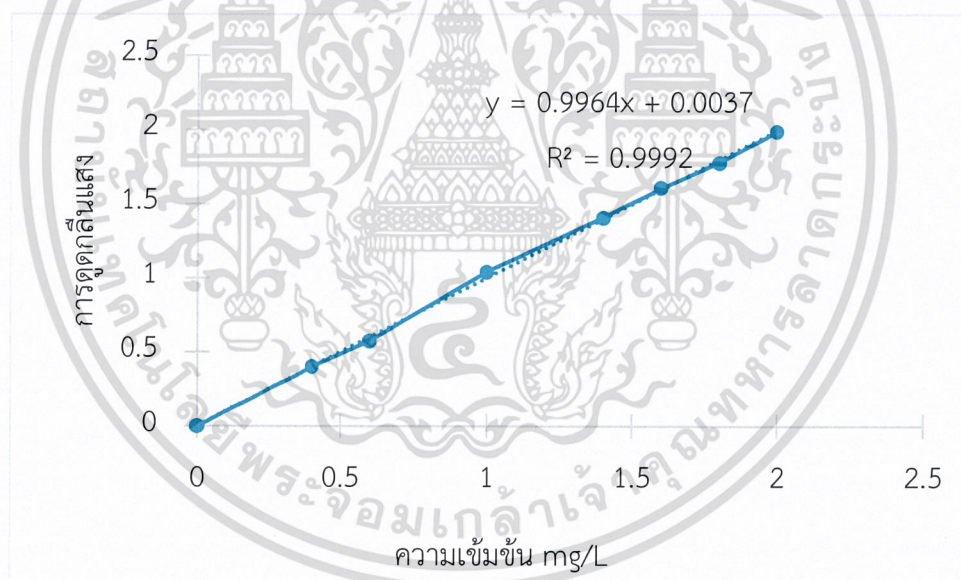
การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0 mg/L

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 1000 mg/L จำนวน 10 mL ใส่ขวดปริมาตร 100 mL แล้วปรับปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 100 mg/L

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 100 mg/L ด้วยไมโครปิเปต มา 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 และ 2000 μ L ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จะได้สารมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0 mg/L ตามลำดับ



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. การคำนวณหาสภาพต่าง (Alkalinity)

1.1 การเทียบมาตรฐานของสารละลาย

ตารางที่ ค.1 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

ครั้งที่	ปริมาณ Na_2CO_3 (g)	ปริมาตรที่ใช้ H_2SO_4 (mL)
1	0.0502	42.65
2	0.0503	42.60
3	0.0504	42.60
เฉลี่ย	0.0503	42.62

น้ำหนักสมมูลของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53 g/eq

$$Na_2CO_3 \text{ จำนวน } 0.0503 \text{ g} = \frac{0.0503 \text{ g}}{53 \text{ g/eq}} = 9.491 \times 10^{-4} \text{ eq}$$

จำนวนสมมูลของ Na_2CO_3 ซึ่งเท่ากับจำนวนสมมูลของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต

$$V_{total} = 42.62 \text{ mL}$$

สารละลายกรดซัลฟิวริก 42.62 mL มีกรด $9.491 \times 10^{-4} \text{ eq}$

$$\text{ใน } 1000 \text{ mL มีกรด} = \frac{(9.491 \times 10^{-4} \text{ eq}) \times 1000 \text{ mL}}{42.62 \text{ mL}}$$

$$= 2.226 \times 10^{-2} \text{ eq}$$

ดังนั้นกรดซัลฟิวริกเข้มข้น = 0.0223 N

$$= \left(\frac{0.0223 \text{ eq}}{L} \right) \times \left(\frac{50,000 \text{ mg as } CaCO_3}{\text{eq}} \right)$$

$$= 1,115 \text{ mg/L as } CaCO_3$$

1.1 การหาค่าสภาพต่าง

$$\text{ค่าสภาพต่าง} = \frac{\text{ปริมาตรกรดซัลฟิวริก (mL)} \times \text{ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (N)} \times 50,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

*หมายเหตุ ตัวเลข 50,000 คือน้ำหนักสมมูลของแคลเซียมคาร์บอเนตในหน่วย (mg/eq)

$$\text{ค่าสภาพต่าง} = \frac{13.54 \text{ mL} \times 0.0223 \text{ N} \times 50,000}{25 \text{ mL}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 604 mg/L as $CaCO_3$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณหาความกระด้าง (Hardness)

2.1 การเทียบมาตรฐานของสารละลาย

ตารางที่ ค.2 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นของกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (EDTA)

ครั้งที่	ปริมาตร CaCO_3 (mL)	ปริมาตรที่ใช้ EDTA (mL)
1	25.00	2.80
2	25.00	2.70
3	25.00	2.80
เฉลี่ย	25.00	2.77

$$[\text{CaCO}_3] = N_1 = \frac{0.0103 \times 10^3 \text{ mg}}{100 \text{ mL}} \times \frac{1,000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}$$

$$= 103 \text{ mg/L as CaCO}_3$$

$$[\text{EDTA}] = \frac{A \times B}{C}$$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/L as CaCO_3)

B คือ ปริมาตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mL)

C คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต (mL)

$$[\text{EDTA}] = \frac{103 \text{ mg/L as CaCO}_3 \times 25 \text{ mL}}{2.77 \text{ mL}}$$

$$= 930 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ as CaCO}_3$$

2.2 การหาค่าความกระด้าง

$$\text{ความกระด้าง} = \frac{T \times B}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

เมื่อ T คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ไทเทรต (mL)

B คือ ความเข้มข้นของสารละลาย EDTA (mg/L as CaCO_3)

$$\text{ความกระด้าง} = \frac{2.12 \text{ mL} \times 929.60 \text{ mg/L}}{25.00 \text{ mL}}$$

$$= 78.8 \text{ mg/L as CaCO}_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมสารละลายสต็อกเหล็ก ที่ความเข้มข้น 1000 ppm

เตรียมจาก $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

คำนวณจาก

มวลโมเลกุลของ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O} = 417.858 \text{ g/mol}$

น้ำหนักอะตอม $2(\text{Fe}^{3+}) = 2 \times 55.845 \text{ g/mol}$

$= 111.69 \text{ g}$

$$\begin{aligned} \text{ต้องการความเข้มข้นเหล็กในสต็อก } 1000 \text{ ppm} &= \frac{1,000 \text{ mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ g}}{1,000 \text{ mg}} \\ &= 1 \text{ g/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } \text{Fe}^{3+} \text{ } 111.69 \text{ g} \text{ ใช้ } \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O} &= 417.858 \text{ g} \\ \text{Fe}^{3+} \text{ } 1 \text{ g} \text{ ใช้ } \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O} &= \frac{417.858 \text{ g} \times 1 \text{ g}}{111.69 \text{ g}} \\ &= 3.741 \text{ g} \end{aligned}$$

4. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก

$$\text{การกำจัด (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ทั้งหมด (mg/L)

$$\begin{aligned} \text{การกำจัด (\%)} &= \left(\frac{1.088 - 0.177}{1.088} \right) \times 100 \\ &= 83.76 \% \end{aligned}$$

5. การคำนวณอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านคอลัมน์

อัตราการไหลที่แนะนำจากผู้จำหน่าย ได้ทำการศึกษาพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสม เท่ากับ

8.5 gpm/ft²

คำนวณความเร็ว

$$\begin{aligned} &= \frac{8.5 \text{ gpm}}{\text{ft}^2} \times \frac{1.9295 \text{ m}^3/\text{hr}}{\text{ft}^2} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{0.0929 \text{ m}^2} \\ &= \frac{20.77 \text{ m}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \\ &= 35 \text{ cm/min} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณอัตราการไหล

$$Q = VA$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (cm^3/min)

V คือ ความเร็ว (cm/hr)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (cm^2)

$$\begin{aligned} Q &= v \times \frac{\pi(D^2)}{4} \\ &= \frac{35 \text{ cm}}{\text{min}} \times \frac{\pi(1.9 \text{ cm})^2}{4} \\ &= \frac{99.2351 \text{ cm}^3}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ mL}}{1 \text{ cm}^3} \\ &= 99.2 \text{ mL}/\text{min} \end{aligned}$$

ทำการวัดอัตราการไหลโดยการแทนที่น้ำในกระบอกตวง วัด 3 ครั้ง ที่อัตราการไหล เท่ากับ $99.0 \text{ mL}/\text{min}$

$$\begin{aligned} &= \frac{99.0 + 99.0 + 99.0}{3} \\ &= 99.0 \text{ mL}/\text{min} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของเหล็ก (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.727	0.736	0.744
15	0.093	0.112	0.131
30	0.175	0.178	0.198
60	0.232	0.243	0.245
120	0.227	0.215	0.253
240	0.307	0.409	0.353
480	0.319	0.368	0.373
960	0.317	0.297	0.327
1440	0.564	0.526	0.570

ตารางที่ ง.2 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.25	0.20	0.20
15	0.22	0.24	0.22
30	0.23	0.28	0.25
60	0.28	0.23	0.24
120	0.35	0.35	0.28
240	0.30	0.24	0.25
480	0.22	0.21	0.32
960	0.55	0.42	0.36
1440	0.33	0.30	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	6.83	6.81	6.74
15	6.64	6.63	6.42
30	7.67	7.37	7.37
60	7.66	7.81	7.49
120	7.99	7.86	7.99
240	7.81	7.68	7.60
480	6.69	6.64	6.64
960	7.20	7.22	7.67
1440	8.57	7.95	7.50

ตารางที่ ง.4 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (NTU)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	1.60	1.60	1.20
15	2.90	2.70	4.00
30	6.70	5.80	6.50
60	9.30	9.10	7.80
120	4.20	2.90	6.60
240	10.00	14.60	16.30
480	9.90	12.60	14.10
960	14.70	15.90	16.90
1440	17.80	14.80	17.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ค่าสภาพต่าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	8.92	8.92	8.92
15	8.92	8.92	8.92
30	11.60	10.70	10.70
60	11.60	12.49	11.60
120	12.49	12.49	12.49
240	12.49	11.60	12.49
480	8.92	8.92	8.92
960	10.70	10.70	10.70
1440	13.38	11.60	12.49

ตารางที่ ง.6 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบแบตช์

เวลา (นาที)	ค่าความกระด้าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	1.49	1.49	2.23
15	1.49	1.49	1.49
30	1.49	1.49	1.49
60	1.49	1.49	1.49
120	2.97	2.97	2.23
240	2.23	1.49	5.21
480	1.49	1.49	1.49
960	4.46	2.97	2.97
1440	2.97	2.97	5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ความเข้มข้นเหล็กในสารละลาย แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเหล็ก (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	1.006	1.150	1.108
15	0.145	0.180	0.205
30	0.134	0.174	0.186
60	0.176	0.192	0.200
120	0.149	0.199	0.223
240	0.114	0.288	0.260
480	0.141	0.335	0.208
960	0.433	0.247	0.312
1440	0.491	0.298	0.404

ตารางที่ ง.8 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	73.50	62.60	71.30
15	71.20	61.40	70.10
30	71.60	59.90	69.60
60	71.10	60.60	69.90
120	71.70	61.40	69.10
240	68.90	60.10	68.00
480	68.90	62.70	69.10
960	58.50	61.80	65.20
1440	55.40	61.90	63.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 ค่าความเป็นกรด-ต่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความเป็นกรด-ต่าง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	7.70	7.71	7.70
15	7.28	7.24	7.25
30	7.12	7.33	7.27
60	7.03	7.28	7.14
120	7.59	7.45	7.36
240	7.47	7.59	7.48
480	7.47	7.49	7.50
960	7.37	7.44	7.39
1440	7.26	7.50	7.42

ตารางที่ ง.10 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (NTU)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.93	1.56	1.24
15	0.96	0.92	0.98
30	1.14	0.79	0.86
60	0.83	0.82	0.92
120	0.75	1.10	0.88
240	1.06	0.93	0.92
480	1.06	0.83	1.02
960	0.74	0.51	0.63
1440	0.90	0.63	0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าสภาพต่าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	13.38	14.27	13.38
15	10.70	9.81	10.70
30	9.81	9.81	9.81
60	9.810	9.81	10.70
120	11.6	11.60	11.60
240	11.60	11.60	11.60
480	11.60	10.70	11.60
960	10.70	10.70	10.70
1440	10.70	11.60	11.60

ตารางที่ ง.12 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในสารละลายเหล็ก แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความกระด้าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	5.95	5.21	5.95
15	5.95	5.21	5.95
30	5.95	5.21	5.21
60	5.95	5.21	5.21
120	5.95	5.21	5.21
240	5.21	5.21	5.21
480	5.21	5.21	5.21
960	4.46	5.21	5.21
1440	3.72	5.21	5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.13 ความเข้มข้นเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม แบบคอลัมน์

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นเหล็ก (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.867	0.985	0.998
15	0.679	0.677	0.725
30	0.673	0.700	0.751
60	0.686	0.712	0.788
120	0.713	0.758	0.818
240	0.725	0.828	0.881
480	0.770	0.810	0.829
960	0.687	0.680	0.678
1440	0.737	0.690	0.667

ตารางที่ ง.14 ค่าการนำไฟฟ้าของการกำจัดเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม แบบคอลัมน์

เวลา (นาทีก)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	7,590	7,800	7,700
15	7,300	7,640	7,580
30	7,290	7,600	7,570
60	7,340	7,660	7,650
120	7,110	7,670	7,610
240	7,390	7,620	7,520
480	7,310	7,730	7,600
960	7,250	7,710	7,660
1440	7,290	7,890	7,320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.15 ค่าความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับ
น้ำนม แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	7.58	7.57	7.55
15	7.45	7.27	7.23
30	7.55	7.34	7.31
60	7.63	7.37	7.43
120	7.68	7.53	7.44
240	7.58	7.52	7.48
480	7.71	7.60	7.57
960	7.64	7.61	7.60
1440	7.50	7.52	7.68

ตารางที่ ง.16 ค่าความขุ่นของการกำจัดเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม
แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความขุ่น (NTU)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	77.50	99.20	107.00
15	48.40	40.30	49.00
30	47.60	44.60	55.40
60	51.00	45.80	60.10
120	47.70	49.20	64.20
240	52.20	55.30	68.00
480	57.40	57.90	64.60
960	39.50	36.30	28.90
1440	48.60	39.60	38.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.17 ค่าสภาพต่างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำนม
แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าสภาพต่าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	551.26	603.88	539.66
15	493.72	535.20	499.52
30	503.09	545.01	518.25
60	518.70	566.42	519.14
120	528.06	573.56	526.28
240	526.28	579.80	548.58
480	524.94	598.53	545.90
960	517.36	588.72	538.77
1440	549.47	505.76	509.33

ตารางที่ ง.18 ค่าความกระด้างของการกำจัดเหล็กในน้ำเสียจากโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับ
น้ำนม แบบคอลัมน์

เวลา (นาที)	ค่าความกระด้าง (mg/L as CaCO ₃)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	80.32	78.83	76.60
15	66.19	66.93	71.39
30	64.70	64.70	66.19
60	68.42	72.69	67.67
120	63.96	71.39	67.67
240	69.16	61.73	65.44
480	68.05	67.67	63.96
960	64.70	66.93	63.96
1440	71.39	69.16	58.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้