



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์
Iron Removal in Water with Calcium Hydroxyapatite

โดย

ธัญญะ พรหมศรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

2557

รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์
Iron Removal in Water with Calcium Hydroxyapatite

โดย

ธัญญะ พรหมศร

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

2557

ชื่อเรื่อง การกำจัดเหล็กในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

ผู้วิจัย นายธัญญะ พรหมศร

สถาบัน มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ปีที่พิมพ์ 2557

สถานที่พิมพ์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

จำนวนหน้างานวิจัย 50 หน้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

คำสำคัญ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ เหล็ก

บทคัดย่อ

จากการสำรวจหาปริมาณเหล็กในน้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาใช้ในตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี พบว่าน้ำจากโรงเรียนบ้านราษฎร์เจริญมีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} มากถึง $4.96 \pm 0.03 \text{ mg/L}$ ดังนั้นจึงเตรียมสารละลายเหล็ก Fe^{2+} ให้มีความเข้มข้น 4.96 mg/L เท่ากันเพื่อใช้ในการทดลอง ระบบกำจัดเหล็กประกอบด้วยคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 cm ความสูง 40 cm เชื่อมต่อทางด้านบนด้วยท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.1 cm ความสูง 40.5 cm บรรจุแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ 10 g ลงในคอลัมน์ ให้น้ำไหลเข้าทางด้านปลายของคอลัมน์และไหลย้อนขึ้นไปทางท่อพลาสติกที่อยู่ทางด้านบน อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเท่ากับ 0.4 mL/s แบ่งการทดลองออกเป็น 2 treatment คือ treatment ที่ 1 กำหนดให้น้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่องวันละ 5 L และ treatment ที่ 2 กำหนดให้น้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่องวันละ 20 L หยุดการทดลองเมื่อระบบมีประสิทธิภาพของระบบต่ำกว่าร้อยละ 50 จากการทดลองพบว่า Treatment ที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} สูงสุดได้ถึงร้อยละ 95.77 ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 42.74 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80.22 หยุดการทดลองเมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 55 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 21.88 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ Treatment ที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} สูงสุดได้ถึงร้อยละ 98.39 ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 46.98 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 85.18 หยุดการทดลองเมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 48 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 20.28 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} ของทั้ง 2 treatment ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และระบบการกำจัดเหล็กมีความสามารถในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Title : Iron Removal in Water with Calcium Hydroxyapatite

Researcher : Mr.Thanya Promsorn

Institution : Dhurakij Pundit University

Year of Publication : 2014

Publisher : Dhurakij Pundit University

Source : Dhurakij Pundit University

No. of page : 50 pages

Copyright : Dhurakij Pundit University

Key words : Calcium Hydroxyapatite Iron

Abstract

A survey to determine the amount of iron in groundwater that pumped up for daily use in Charoentharn sub-district, Wiharn-daeng district, Saraburi province. Fe^{2+} content was found up to 4.96 ± 0.03 mg / L in water from the Banratcharoen School. Therefore, the Fe^{2+} concentration of 4.96 mg/L was prepared for the experiments. Iron removal system is consisted of glass column (diameter of 1.75 cm, height of 40 cm) and connected with plastic tube (diameter of 6.1 cm, height of 40.5 cm) in vertical plane. The 10 g of calcium hydroxyapatite was filled into the glass column. The direction of water was moved from the tip of glass column and upflow to plastic tube on the top. The average flow rate of the water was 0.4 mL/s. The experiment was divided into two treatments. The first treatment was continuous flow of 5 L/day, and the second treatment was continuous flow of 20 L/day. The experiments were stopped when the system was performed below 50 percent removal. It was found that the maximum efficiency of the first treatment of Fe^{2+} removal up to 95.77 percent, the minimum efficiency was 42.74 percent, and the average efficiency was 80.22 percent. When the water volume flow of 55 L, the first treatment was stopped. The Fe^{2+} was removed at 21.88 mg/g of calcium hydroxyapatite. It was found that the maximum efficiency of the second treatment in Fe^{2+} removal up to 98.39 percent, the minimum efficiency was 46.98 percent, and the average efficiency was 85.18 percent. When the water volume flow of 48 L, the second treatment was stopped. The removal Fe^{2+} was found at 20.28 mg/g of calcium hydroxyapatite. The removal efficiency of both treatments did not differ statistically significant at the 0.01 level, and iron removal system had the ability to remove Fe^{2+} in the water efficiently.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัย ขอขอบคุณ รศ.ดร.สรชัย พิตาลบุตร ที่ให้คำแนะนำข้อเสนอโครงการวิจัยจนครบถ้วน สมบูรณ์ ขอขอบคุณ คุณฉลวย อินทร์ชัย นายกองค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านแหล่งเก็บข้อมูล และขอขอบคุณ อาจารย์ธรรมศักดิ์ สายแก้ว วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่ได้ช่วยนำทางในการเก็บข้อมูล ทำให้การเก็บข้อมูลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายขอขอบคุณ คุณจุฑาภรณ์ อยู่ทิม ผู้ช่วยจัดบันทึก และรวบรวมข้อมูล พร้อมทั้งให้กำลังใจในงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ธัญญา พรหมศรี

พฤษภาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ตัวแปรของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พื้นที่ศึกษา	3
2.2 ปัญหาของเหล็กในน้ำ	4
2.3 วิธีวิเคราะห์เหล็ก	4
2.4 แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์	6
2.5 หลักการดูดซับ	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	8
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	8
3.2 สารเคมี	8
3.3 วิธีวิเคราะห์เหล็ก	9
3.4 วิธีสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์	9
3.5 วิธีเตรียมสารละลายเหล็ก	9
3.6 ระบบกำจัดเหล็กและวิธีการทดลอง	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	12
4.1 การตรวจวัดสมบัติของน้ำ	12
4.2 การสังเคราะห์และวิเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	13
4.3 สารละลายเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	14
4.4 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	14
4.5 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	22
4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 2 treatments	28
4.7 การทำงานของระบบกำจัดเหล็ก	28
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุป และอภิปรายผล	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31
ภาคผนวก	32
ภาคผนวก ก	33
พื้นที่สำรวจปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล	
ภาคผนวก ข	36
การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล	
ภาคผนวก ค	37
การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	
ภาคผนวก ง	39
ผลการตรวจวัดปริมาณเหล็ก	
ภาคผนวก จ	40
ค่าสถิติวิเคราะห์	
ภาคผนวก ฉ	42
Hanna Iron Checker	
ภาคผนวก ช	45
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค	
ภาคผนวก ซ	46
ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ	47
ระบบประปาบาดาลของกรมทรัพยากรธรณี (เดิม)	
ภาคผนวก ช	48
แบบหอถังสูง	
ภาคผนวก ซ	49
แบบถังกรอง	
ประวัตินักวิจัย	50

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 complex ion ของ Fe^{2+} กับ phenanthroline	5
รูปที่ 3.1 ระบบกำจัดเหล็กแบบน้ำไหลย้อน	10
รูปที่ 4.1 แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อผ่านการเผาที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$	13
รูปที่ 4.2 FT-IR Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์	13
รูปที่ 4.3 XRD Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์	14
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	19
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	20
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	22
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	26
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	26
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	27

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 จำนวนครัวเรือนที่ใช้น้ำประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม	3
ตารางที่ 2.2 จำนวนแหล่งน้ำขององค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม	4
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจากการตรวจวัดสมบัติของน้ำ	12
ตารางที่ 4.2 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	15
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดิน ระบบต่อเนื่องวันละ 5 L	20
ตารางที่ 4.4 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	23
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับ ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดิน ระบบต่อเนื่องวันละ 20 L	27
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 2 treatments	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่พบในน้ำประปาที่มาจากน้ำบาดาล หรือ น้ำบาดาล คือ การที่น้ำมีสีเนื่องจากมีสารประกอบของเหล็กปนเปื้อนอยู่ เมื่อน้ำสัมผัสกับอากาศ ออกซิเจนไปออกซิไดส์ไอออนของเหล็ก Fe^{2+} ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้น้ำขุ่นและมีสี เกิดความไม่น่าดื่ม เหล็กยังทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับท่อน้ำเพราะทำให้การเจริญเติบโตของ iron bacteria เป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังทำให้น้ำมีรสและกลิ่นเกิดขึ้น มาตรฐานน้ำดื่มของ U.S. Public Health Service (USPHS) กำหนดให้มีเหล็กน้อยกว่า 0.3 mg/L น้ำประปาถูกนำมาใช้อุปโภคและบริโภคโดยตรงโดยไม่มีการตรวจวิเคราะห์และบำบัดเหล็กก่อนนำมาใช้ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย การนำความรู้ทางด้านเคมีอินทรีย์มาใช้ในการสังเคราะห์สาร เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ๆสำหรับใช้กำจัดเหล็กออกจากน้ำเป็นสิ่งที่ควรพัฒนาและให้การสนับสนุนในการผลิตขึ้นมาใช้เองภายในประเทศ

ปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ไปใช้ในศาสตร์สาขาต่าง ๆ กันอย่างกว้างขวาง แต่ความสนใจในการนำมาใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำยังมีน้อยมาก ดังนั้นการศึกษากำจัดเหล็กในน้ำประปาที่มาจากน้ำบาดาล หรือ น้ำบาดาลที่ถูกนำมาใช้โดยตรง ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ จึงเป็นสิ่งที่ควรศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์
- 2) เพื่อออกแบบระบบกำจัดเหล็กออกจากน้ำ
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กออกจากน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พื้นที่สำรวจหาปริมาณเหล็กในน้ำคือ ตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง สระบุรี
- 2) กำหนดจุดสำรวจน้ำจำนวน 5 แห่ง ตามคำแนะนำของนายกองค์การบริหารส่วนตำบล
- 3) เลือกค่าที่มีเหล็กมากที่สุด และมีค่าเกินมาตรฐาน มาใช้เป็นตัวแทนในการวิจัย
- 4) กำหนดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ใช้ในระบบกำจัดให้มีค่าคงที่
- 5) กำหนดปริมาณการเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกมาจากระบบกำจัดให้มีค่าคงที่
- 6) กำหนดอัตราการไหลของน้ำในระบบกำจัดให้มีค่าคงที่

7) หยุดการทดลองเมื่อระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กต่ำกว่าร้อยละ 50 เมื่อระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กที่จุดหนึ่งสูงสุดแล้ว

1.4 ตัวแปรของการวิจัย

- 1) ตัวแปรต้นคือ ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำ และค่า pH ของน้ำเริ่มแรกก่อนการทดลอง
- 2) ตัวแปรตามคือ ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำ และค่า pH ของน้ำที่ออกมาจากระบบกำจัดหลังการทดลอง
- 3) ตัวแปรควบคุมคือ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ ปริมาณการเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกมาจากระบบ และ อัตราการไหลของน้ำในระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ข้อมูลสำหรับการสังเคราะห์วัสดุเพื่อใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำ
- 2) ได้ข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบการกำจัดเหล็กออกจากน้ำ
- 3) ผลที่ได้จากการวิจัยเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับใช้แก้ปัญหาการผลิตน้ำประปาจากน้ำบาดาลที่มีปัญหาสนิมเหล็กในน้ำ
- 4) ผลที่ได้จากการวิจัยจะเป็นข้อมูลที่จะช่วยในการตัดสินใจสำหรับนายกองค์การบริหารส่วนตำบลในการวางแผนแก้ปัญหาการนำน้ำบาดาลที่มีสนิมเหล็กมาผลิตเป็นน้ำประปาเพื่อใช้ในเขตที่รับผิดชอบ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ศึกษา

ตำบลเจริญธรรมเป็นตำบลหนึ่งใน 6 ตำบล ของอำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี องค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม แบ่งพื้นที่การปกครองออกเป็น 8 หมู่บ้าน ลักษณะพื้นที่ขององค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม โดยทั่วไปเป็นที่ราบค่อนข้างราบเรียบถึงแบบลูกคลื่นลอนลาด ตอนบนสุดขององค์การบริหารส่วนตำบลจรดภูเขา แหล่งน้ำที่สำคัญ ได้แก่ คลองชุมเห็ด คลองเจริญธรรม คลองเรือ ซึ่งไหลจากทิศเหนือลงสู่ทิศใต้ของตำบล มีจำนวนประชากร 5,892 คน แบ่งเป็นชาย 2,875 คน หญิง 3,017 คน มีจำนวนครัวเรือน 1,652 ครัวเรือน จำนวนครัวเรือนที่ใช้น้ำประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลแสดงในตารางที่ 2.1 จำนวนแหล่งน้ำขององค์การบริหารส่วนตำบลแสดงในตารางที่ 2.2 (องค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม 2556)

ตารางที่ 2.1 จำนวนครัวเรือนที่ใช้น้ำประปาขององค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม

หมู่ที่	จำนวนครัวเรือนทั้งหมด	จำนวนครัวเรือนที่ใช้น้ำประปา
1	437	105
2	110	101
3	120	104
4	185	196*
5	112	111
6	304	210
7	247	209
8	137	105
รวม 8 หมู่บ้าน	1652	1141

*บางครัวเรือนติดตั้งมาตรจำนวน 2 มาตร (ข้อมูล ณ เดือน มกราคม 2556)

ตารางที่ 2.2 จำนวนแหล่งน้ำขององค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม

รายการที่	ประเภทแหล่งน้ำ	จำนวน (แห่ง)
1	บ่อน้ำตื้น/สระน้ำ	42
2	บ่อบาดาล (บ่อโยก)	2
3	ฝาย/ทำนบ/ผนังกั้นน้ำ	27
4	ประปาหมู่บ้าน/ภูเขา/อื่นๆ	16
5	แหล่งน้ำธรรมชาติ (ห้วย หนอง คลอง บึง)	4

(ข้อมูล ณ เดือน พฤษภาคม 2556)

2.2 ปัญหาของเหล็กในน้ำ

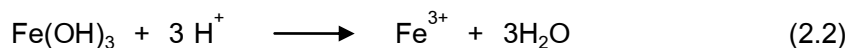
ปัญหาที่พบในน้ำประปาที่เป็นน้ำบาดาล คือ การที่น้ำมีสีเนื่องจากเหล็ก ปกติแล้วเหล็กในดินอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ แต่เนื่องจากในดินมีแบคทีเรียซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะให้กรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อน ดังนั้นเมื่อน้ำเหล่านี้ไหลผ่านดินที่มีเหล็ก ก็จะทำให้ปฏิกิริยากับธาตุเหล่านี้นำไปเปลี่ยนไปอยู่ในรูปละลายน้ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าในดินยังมีออกซิเจนอยู่ แต่ถ้าเมื่อใดที่เปลี่ยนไปเป็นสภาวะที่ขาดออกซิเจน (anaerobic condition) เหล็กซึ่งอยู่ในรูป Fe_2O_3 (ไม่ละลายน้ำ) FeCO_3 (ละลายน้ำได้น้อย) ก็จะถูกเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูป Fe^{2+} ซึ่งละลายน้ำได้ ดังสมการที่ 2.1



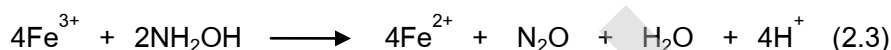
เหล็กก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับท่อน้ำเพราะทำให้การเจริญเติบโตของ iron bacteria เป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังทำให้น้ำมีรส (ความเข้มข้น 1-2 mg/L) ดังนั้นมาตรฐานน้ำดื่มของ U.S. Public Health Service (USPHS) จึงกำหนดให้มีเหล็กน้อยกว่า 0.3 mg/L (กรรณิการ์, 2525)

2.3 วิธีวิเคราะห์เหล็ก

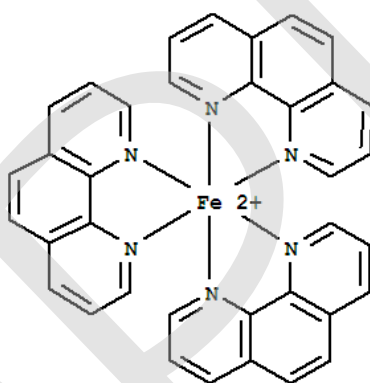
วิธี Phenanthroline Method วิธีนี้ใช้กันมากในปัจจุบัน อาศัยหลักที่ว่า 1,10-Phenanthroline จะรวมกับ Fe^{2+} ที่พีเอชประมาณ 3.2-3.3 เกิดเป็น complex ion ซึ่งมีสีแดงส้ม สีของสารละลายที่เกิดขึ้นเป็นไปตาม Beer's law ซึ่งกล่าวว่าความเข้มข้นของสีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาณของสารในสารละลายนั้น น้ำที่จะนำมาวิเคราะห์อาจสัมผัสกับอากาศและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe^{2+} กลายเป็น Fe^{3+} และเกิดตะกอนของ Fe(OH)_3 ได้ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนเหล็กให้ไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำให้หมด โดยการเติม HCl เพื่อละลาย Fe(OH)_3 ดังสมการที่ 2.2



เนื่องจาก 1,10-phenanthroline ใช้วัดได้เฉพาะ Fe^{+2} ดังนั้นเหล็กในรูป Fe^{+3} ต้องถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูป Fe^{+2} ให้หมดโดยใช้ hydroxylamine ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.3



ต้องทำพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 3.2-3.3 โดยการเติมสารละลาย ammonium acetate buffer ลงไป แล้วจึงตามด้วย 1,10-phenanthroline พบว่า 3 โมเลกุลของ phenanthroline จะจับกับ Fe^{2+} ได้ 1 ตัว เกิดเป็น complex ion ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 complex ion ของ Fe^{+2} กับ phenanthroline

ตัวขัดขวางสำหรับวิธีนี้ คือ ตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง ไฮยาไนด์ ไนไตรท์ และฟอสเฟต นอกจากนี้พวกโลหะหนัก เช่น โครเมียม สังกะสี (ถ้ามีมากเป็น 10 เท่าของเหล็ก) โคบอลต์และทองแดง (ถ้ามีมากกว่า 5 mg/L) นิเกิล (ถ้ามีมากกว่า 2 mg/L) บิสมัท แคดเมียม พรอทเงิน และโมลิบดีนัม จะตกตะกอน phenanthroline

การต้มกับกรดจะเปลี่ยน polyphosphate ให้เป็น orthophosphate และกำจัดไฮยาไนด์กับไนไตรท์ การเติม hydroxylamine จะกำจัดค่าผิดพลาดเนื่องจากพวกตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงที่มีอยู่เป็นจำนวนมากๆ ในกรณีที่มีโลหะหนักซึ่งเป็นตัวขัดขวาง มากต้องเติม phenanthroline ให้เกินพอเพื่อให้ไปแทนที่พวกที่ไปจับเป็น complex กับโลหะเหล่านั้น

วิธีนี้ใช้หาตัวอย่างซึ่งมีเหล็กอยู่ในช่วง 0.02-4.0 mg/L ได้โดยตรงแต่ถ้าความเข้มข้นมากกว่านี้ก็ให้ลดปริมาตรตัวอย่างลง (กรรณิการ์, 2525)

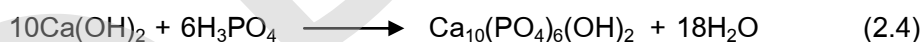
วิธี Adaptation of the EPA Phenanthroline Method 315 B สารที่เป็น reagent จะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} ในน้ำเกิดเป็น complex ion สีแดงส้ม และดูดกลืนแสงที่ 525 nm สามารถ

อ่านค่าเหล็กได้โดยตรงจากจอแสดงผล วิธีนี้ใช้หาตัวอย่างซึ่งมีเหล็กอยู่ในช่วง 0.00-5.0 mg/L ได้โดยตรง (ภาคผนวก จ) แต่ถ้าความเข้มข้นมากกว่านี้ก็ให้เจือจางปริมาตรของน้ำตัวอย่าง

2.4 แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- โครงสร้างของผลึกเป็นแบบ เฮกซะโกนอล (Hexagonal) นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และเสถียรต่อสารเคมี มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง และมีความเสถียรต่อรังสี จึงเหมาะที่นำมาใช้เป็นสารกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำ (Granados-Correa F. *et al.*, 2010) เช่น ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) (Takeuchi Y. and Arai H., 1990) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) (Corami A. *et al.*, 2007) และ โครเมียม (Cr) (Granados-Correa F. *et al.*, 2010)

การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่รู้จักกันมากที่สุดคือวิธีตกตะกอน (precipitation) โดยหยดกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) ที่ละลายลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) พร้อมกับคนที่อุณหภูมิห้อง แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.4



สาร Ca สำหรับวิธีนี้สามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ หรือ CaCl_2 เป็นต้น สาร PO_4 ก็สามารถเลือกใช้ได้หลายชนิดเช่นกัน เช่น H_3PO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ หรือ KH_2PO_4 เป็นต้น (Ibrahim D.M. *et al.*, 2000, Hafez I.T. *et al.*, 2010, Angelescu N. *et al.*, 2011)

2.5 หลักการการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดอันตรกิริยาที่พื้นที่ผิวสัมผัส (interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊ส ของแข็งและแก๊ส ของแข็งและของเหลว ของเหลวและของเหลว สารที่ผิวเกิดการดูดซับเรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) สามารถแบ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ 1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แวนเดอร์วาลส์ หรือพันธะไฮโดรเจน โดยพบว่าแรงนี้ไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยสามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวของวัสดุดูดซับได้ง่าย และอาจเกิดการดูดซับแบบเชิงซ้อนหลายๆชั้นได้ (multilayer) โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติและ

จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่โมเลกุลเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ทั้งนี้เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถของการดูดซับลดลง เนื่องมาจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง 2) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorptions) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับเกิดพันธะเคมีกับตัวดูดซับ เช่น การใช้วาล์วเล็กลิตรอนร่วมกันเป็นต้นซึ่งจะส่งผลให้ตัวถูกดูดซับเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม จากนั้นจะมีการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบใหม่โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากวัสดุดูดซับทำได้ยากหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) 3) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (exchange) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุตรงข้ามกันหรืออาจเกิดจากการแทนที่ของประจุที่ผิวของวัสดุดูดซับกับไอออนของตัวถูกดูดซับ 4) การดูดซับแบบเจาะจง (specific adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันแนลอยู่บนผิว แต่ตัวดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นๆ (รัตนและสุนันทา, 2542)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700
- 2) เครื่อง Hanna HI 721 Colorimeter for Iron
- 3) pH meter ยี่ห้อ Cyberscan รุ่น 510
- 4) pH meter ยี่ห้อ Hanna รุ่น 98127
- 5) เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert รุ่น Universal Oven WB 14
- 6) เตาเผาไฟฟ้า ยี่ห้อ Barnstead รุ่น 48000
- 7) เครื่องชั่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Ohaus รุ่น Adventure
- 8) เครื่องกวนสารละลาย ยี่ห้อ LMS รุ่น HTS-1003
- 9) คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 cm สูง 40 cm
- 10) ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.1 cm สูง 40.5 cm
- 11) Separating funnel ขนาด 250 mL
- 12) Ring stand
- 13) Clamp and clamp holder
- 14) Rubber tube
- 15) Laboratory glassware
- 16) Mortar and pestle
- 17) Test Sieve 70 mesh

3.2 สารเคมี

- 1) Calcium Hydroxide ACS reagent ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
- 2) Orthophosphoric acid Grade AR 85 % ยี่ห้อ QReC
- 3) น้ำกลั่น
- 4) Hanna HI 721 reagents powder ยี่ห้อ Hanna
- 5) conc. H_2SO_4 Analyzed reagent ยี่ห้อ Baker
- 6) $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ACS reagent 99% ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
- 7) KMnO_4 ACS reagent ยี่ห้อ Sigma-Aldrich

3.3 วิธีวิเคราะห์เหล็ก Fe^{2+}

วิเคราะห์เหล็กด้วยวิธี Adaptation of the EPA Phenanthroline Method 315 B

1) ดูดน้ำตัวอย่าง 10 mL ใส่ลงใน cuvette แล้วใส่ cuvette ลงในเครื่องวัด กดสวิทช์เพื่อปรับให้เป็น zero

2) นำ cuvette ออกมา แล้วใส่ reagent powder 1 ชอง ลงไปใน cuvette ปิดฝา เขย่าให้ reagent ละลายให้หมด (ประมาณ 2 นาที)

3) ใส่ cuvette กลับลงไปในเครื่องวัด กดสวิทช์ เครื่องจะนับเวลาถอยหลัง เมื่อครบ 3 นาที ค่าเหล็กที่วัดได้จะปรากฏที่จอแสดงผล อ่านค่าได้โดยตรง จดบันทึกผล (ภาคผนวก จ)

3.4 วิธีสังเคราะห์และวิเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

สังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธี wet chemical precipitation

1) หยด 0.6 M H_3PO_4 ปริมาตร 1 L ลงใน 1 M $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปริมาตร 1 L พร้อมกับคนตลอดเวลาด้วยอัตราการหยด 500 mL/h ที่อุณหภูมิห้อง

2) นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 h

3) นำสารที่อบแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 3 h

4) บดสารที่เผาแล้วให้เป็นผงละเอียด

5) คัดขนาดด้วย sieve ขนาด 70 mesh และนำไปใช้ทดลอง

6) วิเคราะห์สารที่ได้ด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer

7) นำ spectrum ที่ได้ไปเทียบกับ spectrum อ้างอิงของ Merck

3.5 วิธีเตรียมสารละลายเหล็ก Fe^{2+}

1) เติม conc. H_2SO_4 10 mL ลงในน้ำกลั่น 25 mL

2) ชั่ง $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 3.511 g แล้วละลายด้วยสารในข้อ 1

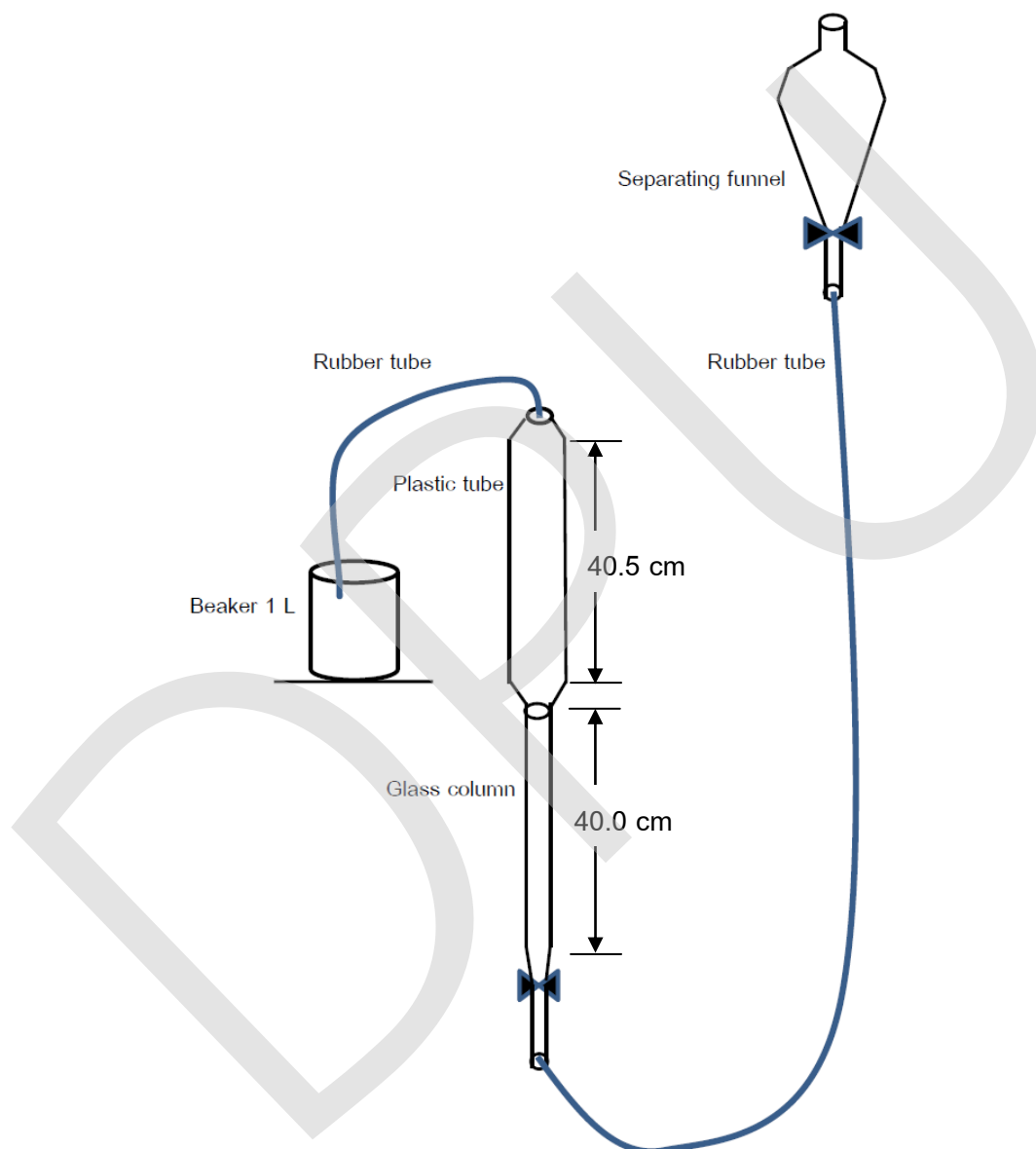
3) เติม 0.1M KMnO_4 ลงไปที่ละลายจนได้เป็นสีแดง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 500 mL ได้สารละลาย stock เหล็ก Fe^{2+} เข้มข้น 1000 mg/L

4) เปิดสารในข้อ 3 มา 5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 L เตรียมใหม่ทุกครั้งให้ครบตามปริมาตรที่ใช้ในการทดลอง ได้สารละลายเหล็ก Fe^{2+} เข้มข้น 5 mg/L

5) วัดค่า pH และตรวจวัดปริมาณเหล็กของน้ำในข้อ 4 ทุกครั้งก่อนนำไปทดลอง

3.6 ระบบกำจัดเหล็กและวิธีการทดลอง

1) สร้างระบบกำจัดเหล็ก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบกำจัดเหล็กแบบน้ำไหลย้อน

- 2) บรรจุแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 10 g ลงใน glass column
- 3) ใส่น้ำกลั่นลงใน separating funnel แล้วปล่อยให้น้ำไหลย้อนผ่าน column ด้วยอัตราเร็ว 0.35-0.45 mL/s ใช้น้ำทั้งหมด 5 L เพื่อล้างระบบ

4) ใส่น้ำที่มีเหล็ก Fe^{2+} ลงไปใน separating funnel แล้วปล่อยให้ น้ำไหลผ่าน column ออกมาด้วยอัตราเร็ว 0.35-0.45 mL/s ใช้ปั๊มเกอร์เก็บน้ำที่ละ 1 L โดยเก็บน้ำแบบต่อเนื่องวันละ 5 L (treatment 1)

5) นำน้ำที่เก็บได้ทุกๆ 1 L ไปวัดค่า pH และวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก Fe^{2+}

6) หยุดการทดลองเมื่อระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กต่ำกว่าร้อยละ 50

7) ทำซ้ำเหมือนข้างต้น แต่เก็บน้ำแบบต่อเนื่องวันละ 20 L (treatment 2)

8) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กก่อนและหลังการทดลอง โดยใช้สูตร
ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก =
$$\frac{(\text{เหล็กก่อนการถูกกำจัด} - \text{เหล็กหลังการถูกกำจัด}) \times 100}{\text{เหล็กก่อนการถูกกำจัด}}$$

9) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กของทั้ง 2 treatments โดยใช้สถิติ t-test

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การตรวจวัดสมบัติของน้ำ

ผลจากการตรวจวัดสมบัติของน้ำแสดงดังในตารางที่ 4.1

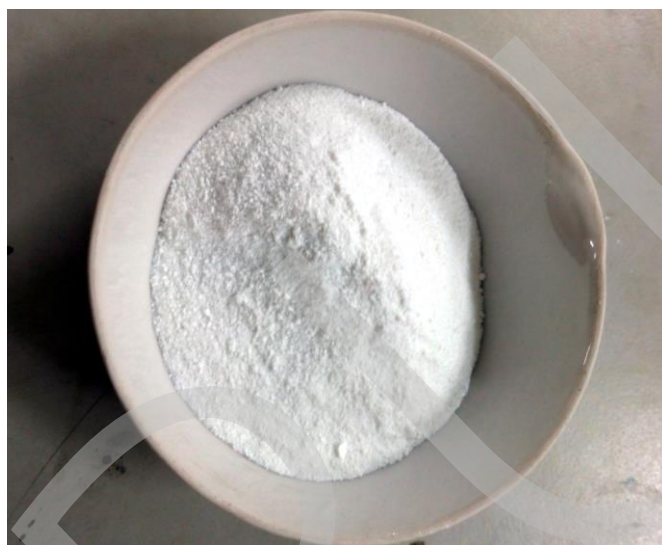
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจากการตรวจวัดสมบัติของน้ำ

ชื่อสถานที่	วันที่/เวลา	ปริมาณเหล็ก $\pm$ SD (mg/L)	pH/อุณหภูมิ
อบต.เจริญธรรม	10 เม.ย.57/11.00 น.	0.16 ± 0.02	7.1/30.6 °C
วัดเขาน้อย	10 เม.ย.57/12.00 น.	0.18 ± 0.02	7.3/30.0 °C
หมู่ 6 สามแยก บ้านราษฎร์เจริญ	10 เม.ย.57/13.00 น.	0.27 ± 0.02	7.3/33.0 °C
ร.ร.บ้านราษฎร์ เจริญ	16 เม.ย.57/14.00 น.	4.96 ± 0.03	6.5/30.5 °C
หมู่ 3 บ้านราษฎร์ เจริญ	16 เม.ย.57/15.30 น.	0.28 ± 0.02	7.2/29.7 °C

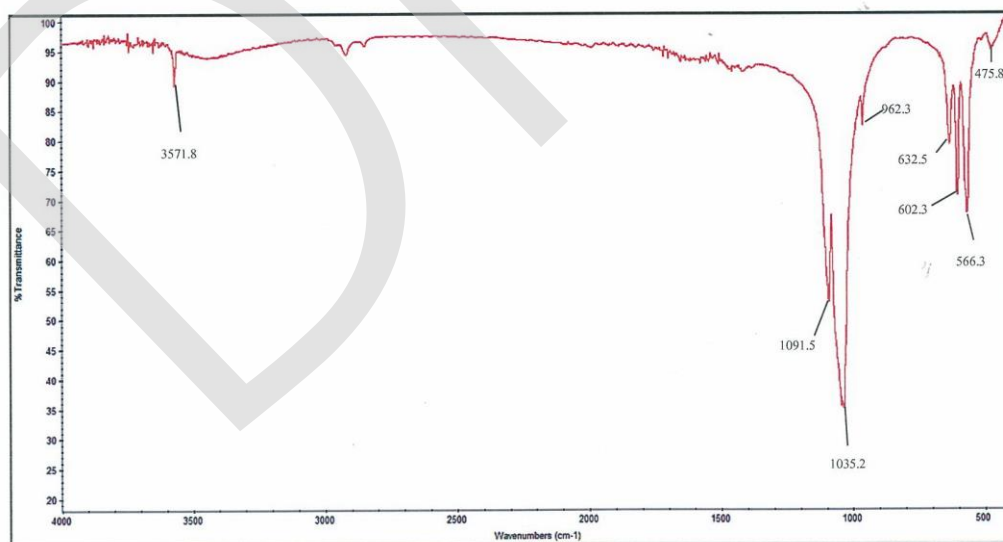
จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำส่วนใหญ่มีปริมาณเหล็กไม่เกินค่ามาตรฐาน แต่มีอยู่
หนึ่งแห่งคือที่โรงเรียนบ้านราษฎร์เจริญ พบว่าน้ำมีปริมาณเหล็กเกินค่ามาตรฐานและมีเหล็ก
อยู่มากที่สุด จึงเลือกค่า 4.96 mg/L มาใช้เป็นตัวแทนในการวิจัย

4.2 การสังเคราะห์และวิเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

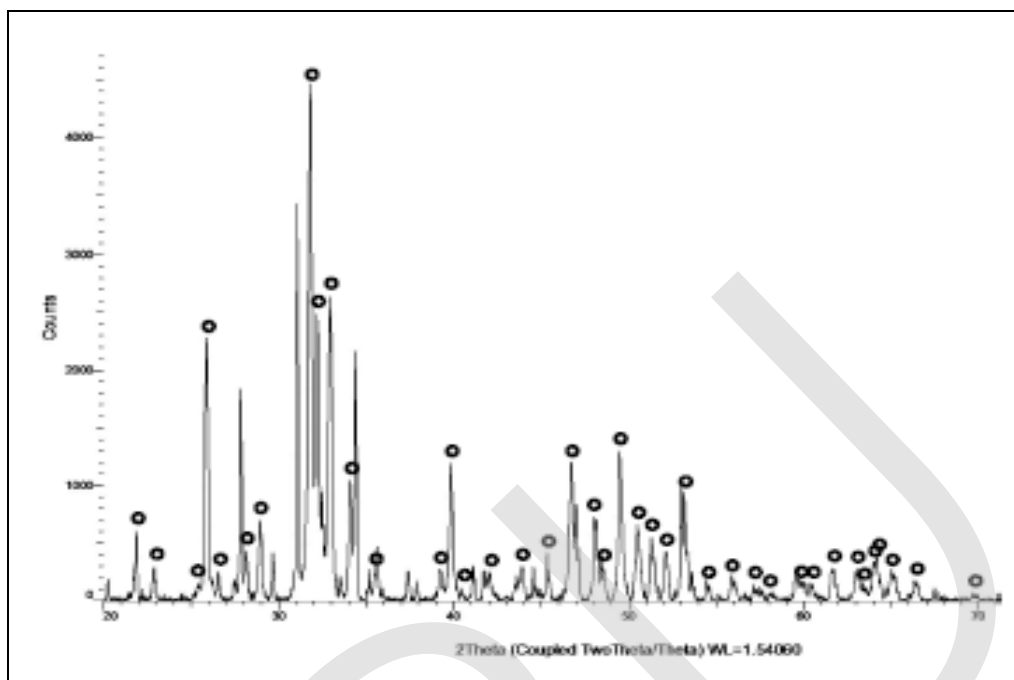
แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังในรูปที่ 4.1 FT-IR Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ แสดงดังในรูปที่ 4.2 และ XRD Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงดังในรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อผ่านการเผา (Calcination) ที่ 800 °C



รูปที่ 4.2 FT-IR Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.3 XRD Spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 4.2 พบสเปกตรัมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังนี้ ที่ประมาณ 3571 cm^{-1} พบพีคของ O-H stretching ที่ประมาณ $1035\text{-}1091\text{ cm}^{-1}$ พบพีคของ P-O asymmetric stretching ที่ประมาณ 962 cm^{-1} พบพีคของ P-O symmetric stretching และที่ประมาณ $566\text{-}632\text{ cm}^{-1}$ พบพีคของ P-O bending

จากรูปที่ 4.3 บันทึกลับ spectrum ด้วยมุม 2θ จากมุม 20 องศาไปจนถึง 70 องศา เมื่อนำไปเทียบกับ JCPDS card 9-432 HAP พบว่ามี pattern ตรงกัน และพบ pattern ของ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตปนอยู่ด้วย เนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิ calcination สูงถึง $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์บางส่วนสลายตัวเป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต

4.3 สารละลายเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

วัดค่า pH ของสารละลายเหล็ก Fe^{2+} ทุกครั้งที่ใช้ในการทดลองได้ 2.7 วัดความเข้มข้นของเหล็ก 3 ครั้งได้เท่ากับ 4.94 4.98 และ 4.96 mg/L คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ $4.96 \pm 0.02\text{ mg/L}$

4.4 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L

ค่า pH ของระบบก่อนการทดลองเท่ากับ 7.5 ค่า pH ของน้ำไหลเข้าระบบเท่ากับ 2.7 และปริมาณเหล็กของน้ำไหลเข้าระบบเท่ากับ 4.96 mg/L ผลการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L แสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L

วันที่	ปริมาณเหล็กที่ ตรวจพบ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหล ผ่านระบบ (L)	pH ของ น้ำไหล ออก
1	0.69 0.66 0.65	0.67 ± 0.02	86.49	1	5.7
	0.76 0.76 0.72	0.75 ± 0.02	84.88	2	5.4
	0.68 0.76 0.70	0.71 ± 0.04	85.68	3	5.0
	0.70 0.72 0.74	0.72 ± 0.02	85.48	4	4.8
	0.74 0.72 0.72	0.73 ± 0.01	85.28	5	4.7
	พักระบบ 21 ชม.		เฉลี่ย 85.56		
2	0.28 0.30 0.30	0.29 ± 0.01	94.15	6	4.8
	0.56 0.56 0.56	0.56 ± 0.00	88.71	7	4.8
	0.60 0.60 0.60	0.60 ± 0.00	87.90	8	4.7
	0.78 0.74 0.76	0.76 ± 0.02	84.68	9	4.6
	0.76 0.78 0.78	0.77 ± 0.01	84.48	10	4.6
	พักระบบ 21 ชม.		เฉลี่ย 87.98		
3	0.28 0.24 0.24	0.25 ± 0.02	94.96	11	4.8
	0.54 0.50 0.52	0.52 ± 0.02	89.52	12	4.7
	0.72 0.72 0.72	0.72 ± 0.00	85.48	13	4.5
	0.74 0.76 0.72	0.74 ± 0.02	85.08	14	4.5
	0.78 0.80 0.80	0.79 ± 0.01	84.07	15	4.3
	พักระบบ 21 ชม.		เฉลี่ย 87.82		
4	0.26 0.24 0.24	0.25 ± 0.01	94.96	16	4.4
	0.46 0.50 0.54	0.50 ± 0.04	89.92	17	4.3
	0.94 0.92 0.92	0.93 ± 0.01	81.25	18	4.1
	0.82 0.82 0.82	0.82 ± 0.00	83.47	19	3.9
	1.00 1.02 1.02	1.01 ± 0.01	79.64	20	3.8
	พักระบบ 21 ชม.		เฉลี่ย 85.85		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณเหล็กที่ ตรวจพบ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหล ผ่านระบบ (L)	pH ของ น้ำไหล ออก
5	0.48 0.48 0.48	0.48 $\pm$.00	90.32	21	4.4
	0.88 0.84 0.88	0.87 $\pm$.02	82.46	22	4.2
	1.06 1.04 1.04	1.05 $\pm$.01	78.83	23	4.1
	1.18 1.16 1.16	1.17 $\pm$.01	76.41	24	4.0
	1.36 1.40 1.40	1.39 $\pm$.02	71.97	25	3.9
	พักระบบ 21 ช.ม.		เฉลี่ย 80.00		
6	0.22 0.22 0.20	0.21 $\pm$.01	95.77	26	4.2
	1.16 1.14 1.12	1.14 $\pm$.02	77.02	27	3.9
	1.82 1.84 1.86	1.84 $\pm$.02	62.90	28	3.8
	2.30 2.24 2.28	2.27 $\pm$.03	54.23	29	3.7
	2.26 2.30 2.28	2.28 $\pm$.02	54.03	30	3.6
	พักระบบ 21 ช.ม.		เฉลี่ย 68.79		
7	0.32 0.34 0.36	0.34 $\pm$.02	93.15	31	3.8
	1.42 1.42 1.44	1.43 $\pm$.01	71.17	32	3.5
	1.60 1.62 1.58	1.60 $\pm$.02	67.74	33	3.4
	1.80 1.80 1.78	1.79 $\pm$.01	63.91	34	3.4
	1.92 1.92 1.96	1.93 $\pm$.02	61.09	35	3.3
	พักระบบ 21 ช.ม.		เฉลี่ย 71.41		
8	0.30 0.36 0.32	0.33 $\pm$.03	93.35	36	3.5
	0.94 0.98 0.96	0.96 $\pm$.02	80.65	37	3.2
	1.34 1.34 1.34	1.34 $\pm$.00	72.98	38	3.1
	1.70 1.66 1.66	1.67 $\pm$.02	66.33	39	3.0
	1.44 1.42 1.38	1.41 $\pm$.03	71.57	40	3.0
	พักระบบ 21 ช.ม.		เฉลี่ย 76.98		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ครั้งที่	ปริมาณเหล็กที่ตรวจพบ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%) 4	ปริมาณน้ำไหลผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำไหลออก
9	0.32 0.30 0.32	0.31 $\pm$.01	93.75	41	3.2
	0.82 0.80 0.82	0.81 $\pm$.01	83.67	42	3.0
	1.02 0.94 1.02	0.99 $\pm$.04	80.04	43	2.9
	1.12 1.14 1.12	1.13 $\pm$.01	77.22	44	2.9
	1.18 1.18 1.18	1.18 $\pm$.00	76.21	45	2.8
	พักระบบ 21 ช. ม.		เฉลี่ย 82.18		
10	0.40 0.32 0.34	0.35 $\pm$.04	92.94	46	2.9
	0.60 0.64 0.66	0.63 $\pm$.03	87.30	47	2.8
	0.66 0.70 0.72	0.69 $\pm$.03	86.09	48	2.8
	0.98 0.92 0.98	0.96 $\pm$.03	80.65	49	2.8
	1.26 1.32 1.32	1.30 $\pm$.03	73.79	50	2.7
	พักระบบ 21 ช. ม.		เฉลี่ย 84.15		
11	0.44 0.50 0.44	0.46 $\pm$.03	90.73	51	2.8
	0.80 0.76 0.80	0.79 $\pm$.02	84.07	52	2.7
	1.14 1.14 1.16	1.15 $\pm$.01	76.81	53	2.7
	1.78 1.76 1.78	1.77 $\pm$.01	64.31	54	2.7
	2.96 2.74 2.82	2.84 $\pm$.11	42.74	55	2.7
	หยุดการทดลอง		เฉลี่ย 71.73		

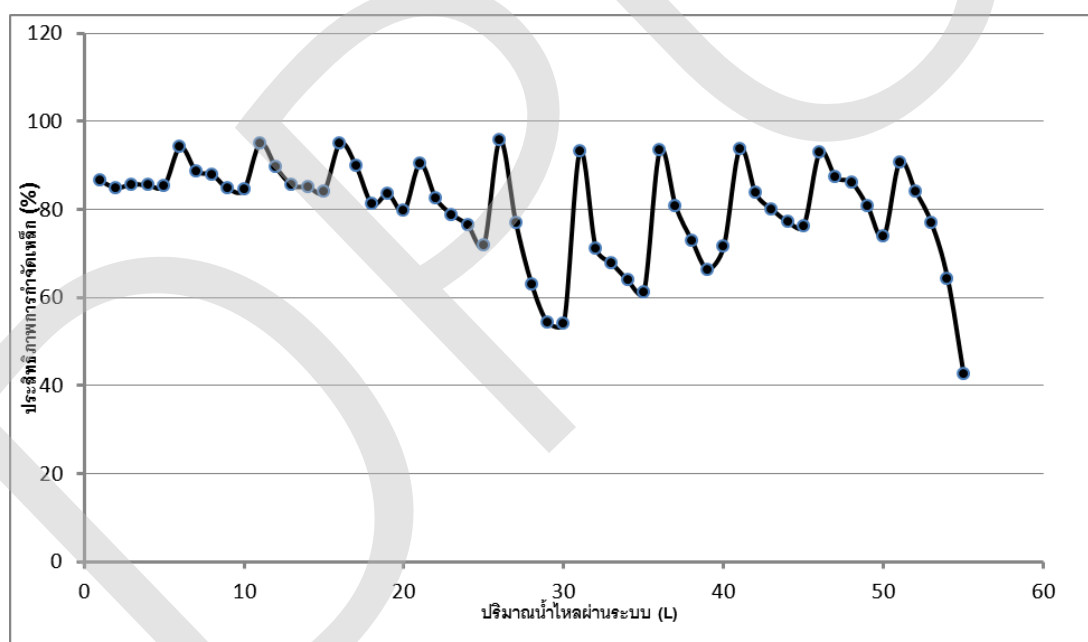
จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่าในวันแรกระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 86.49 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 1 L ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 84.88 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 2 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 85.56 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 5 L

หลังจากพักระบบ 21 ชั่วโมงแล้วเริ่มทดลองต่อในวันที่ 2 พบว่าในวันที่ 2 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 94.15 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 1 L ระบบมี

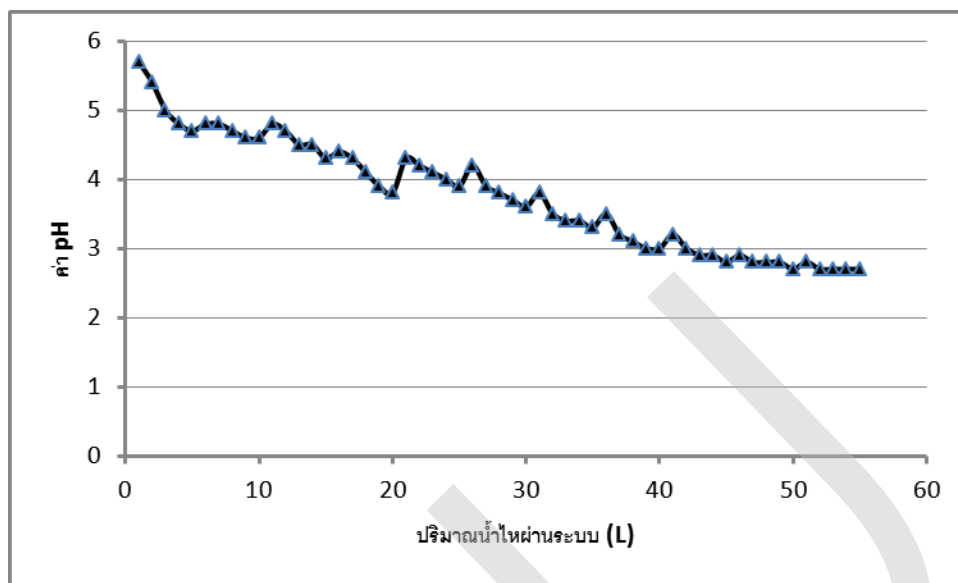
ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 73.79 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 5 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.15 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 5 L

หลังจากพักระบบ 21 ชั่วโมงแล้วเริ่มทดลองต่อในวันที่ 11 พบว่าในวันที่ 11 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 90.73 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 1 L ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 42.74 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 5 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 71.73 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 5 L

เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 55 L ระบบจะมีประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80.22 และค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบจะลดลงจาก 5.7 ไปเป็น 2.7 ภาพรวมของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L แสดงดังในรูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบแสดงดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L

ผลของการพักระบบทั้ง 10 ครั้งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L แรกของวันถัดไปมีค่ามากกว่า 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้า การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแสดงดังในตารางที่ 4.3

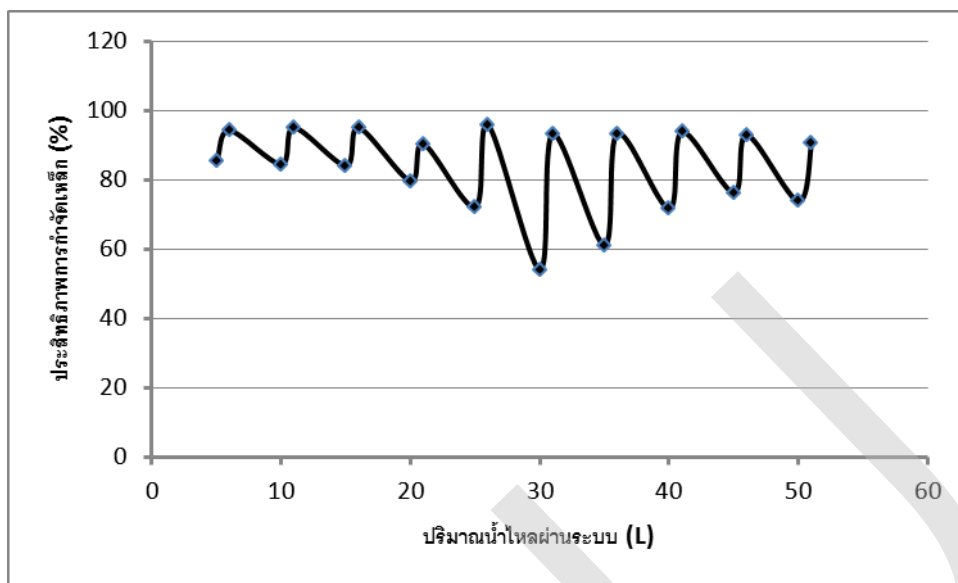
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L

วันที่	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหลผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำไหลออก
1	85.28	5	4.7
2	94.15	6	4.8
	84.48	10	4.6
3	94.96	11	4.8
	84.07	15	4.3
4	94.96	16	4.4
	79.64	20	3.8

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

วันที่	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหล ผ่านระบบ (L)	pH ของ น้ำไหล ออก
5	90.32	21	4.4
	71.97	25	3.9
6	95.77	26	4.2
	54.03	30	3.6
7	93.15	31	3.8
	61.09	35	3.3
8	93.35	36	3.5
	71.57	40	3.0
9	93.75	41	3.2
	76.21	45	2.8
10	92.94	46	2.9
	73.79	50	2.7
11	90.73	51	2.8

ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L

เมื่อน้ำไหลเข้าระบบรวม 55 L จะมีปริมาณเหล็กไหลเข้าระบบเท่ากับ 272.80 mg และจากการตรวจวัดปริมาณเหล็กที่ไหลออกจากระบบพบว่ามีปริมาณเหล็กไหลออกจากระบบทั้งหมดเท่ากับ 53.95 mg คิดเป็นปริมาณเหล็กที่ระบบดูดซับไว้ได้เท่ากับ 218.85 mg เมื่อคำนวณเป็นต่อกรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์จะดูดซับเหล็กได้เท่ากับ 21.88 mg

4.5 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L

ค่า pH ของระบบก่อนการทดลองเท่ากับ 7.6 ค่า pH ของน้ำไหลเข้าระบบเท่ากับ 2.7 และปริมาณเหล็กของน้ำไหลเข้าระบบเท่ากับ 4.96 mg/L ผลการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L แสดงดังในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L

วันที่	ปริมาณเหล็กที่วัด ได้ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหล ผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำ ไหลออก
1	0.60 0.60 0.62	0.61 $\pm$.01	87.70	1	5.8
	0.68 0.70 0.72	0.70 $\pm$.02	85.89	2	5.5
	0.60 0.58 0.58	0.59 $\pm$.01	88.10	3	5.1
	0.72 0.72 0.70	0.71 $\pm$.01	85.69	4	4.9
	0.48 0.48 0.52	0.49 $\pm$.02	90.12	5	4.8
	0.54 0.52 0.54	0.53 $\pm$.01	89.31	6	4.8
	0.42 0.42 0.40	0.41 $\pm$.01	91.73	7	4.7
	0.36 0.36 0.32	0.35 $\pm$.02	92.94	8	4.7
	0.28 0.36 0.30	0.31 $\pm$.04	93.75	9	4.6
	0.36 0.38 0.36	0.37 $\pm$.01	92.54	10	4.6
	0.40 0.42 0.42	0.41 $\pm$.01	91.73	11	4.6
	0.50 0.52 0.52	0.51 $\pm$.01	89.72	12	4.5
	0.38 0.32 0.36	0.35 $\pm$.03	92.94	13	4.5
	0.18 0.18 0.18	0.18 $\pm$.00	96.37	14	4.5
	0.16 0.20 0.18	0.18 $\pm$.02	96.37	15	4.4
	0.16 0.14 0.18	0.16 $\pm$.02	96.77	16	4.4
	0.18 0.20 0.18	0.19 $\pm$.01	96.17	17	4.3
	0.18 0.20 0.20	0.19 $\pm$.01	96.17	18	4.1
	0.18 0.20 0.22	0.20 $\pm$.02	95.97	19	4.1
	0.22 0.18 0.20	0.20 $\pm$.02	95.97	20	4.0
	พักระบบ 12 ชม.		เฉลี่ย 92.30		

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

วันที่	ปริมาณเหล็กที่วัด ได้ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพ การจัด (%)	ปริมาณน้ำไหล ผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำ ไหลออก
2	0.06 0.08 0.09	0.08 $\pm$.01	98.39	21	4.1
	0.40 0.42 0.40	0.41 $\pm$.01	91.73	22	4.0
	0.47 0.45 0.44	0.45 $\pm$.01	90.93	23	4.0
	0.65 0.66 0.69	0.67 $\pm$.02	86.49	24	4.0
	0.39 0.36 0.40	0.38 $\pm$.02	92.34	25	3.9
	0.44 0.42 0.43	0.43 $\pm$.01	91.33	26	3.9
	0.41 0.49 0.50	0.47 $\pm$.05	90.52	27	3.8
	0.84 0.81 0.82	0.82 $\pm$.01	83.47	28	3.8
	1.55 1.57 1.55	1.56 $\pm$.01	68.55	29	3.7
	1.55 1.58 1.55	1.56 $\pm$.02	68.55	30	3.6
	1.41 1.38 1.39	1.39 $\pm$.01	71.98	31	3.6
	1.36 1.36 1.38	1.37 $\pm$.01	72.38	32	3.5
	1.30 1.28 1.26	1.28 $\pm$.02	74.19	33	3.4
	1.06 1.08 1.10	1.08 $\pm$.02	78.23	34	3.4
	0.86 0.90 0.88	0.88 $\pm$.02	82.26	35	3.3
	0.92 0.90 0.90	0.91 $\pm$.01	81.65	36	3.2
	0.78 0.80 0.76	0.78 $\pm$.02	84.27	37	3.2
	0.65 0.62 0.60	0.62 $\pm$.02	87.50	38	3.1
	0.54 0.60 0.58	0.57 $\pm$.03	88.51	39	3.0
	0.72 0.70 0.72	0.71 $\pm$.01	85.69	40	3.0
	พักระบบ 12 ชม.		เฉลี่ย 83.45		

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

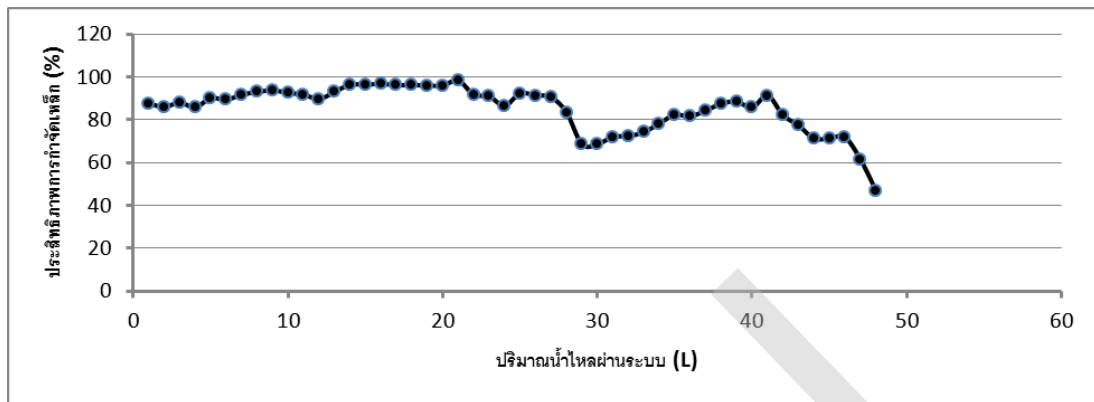
วันที่	ปริมาณเหล็กที่วัดได้ (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหลผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำไหลออก
3	0.42 0.46 0.40	0.43 $\pm$.03	91.33	41	2.9
	0.86 0.90 0.90	0.89 $\pm$.02	82.06	42	2.9
	1.10 1.12 1.14	1.12 $\pm$.02	77.42	43	2.9
	1.36 1.46 1.48	1.43 $\pm$.06	71.17	44	2.8
	1.42 1.44 1.40	1.42 $\pm$.02	71.37	45	2.8
	1.38 1.42 1.40	1.40 $\pm$.02	71.77	46	2.8
	1.86 1.92 1.96	1.91 $\pm$.05	61.49	47	2.7
	2.64 2.64 2.61	2.63 $\pm$.02	46.98	48	2.7
	หยุดการทดลอง		เฉลี่ย 71.70		

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 พบว่าในวันแรกระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 96.77 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 16 L ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 85.69 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 4 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 92.30 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 20 L

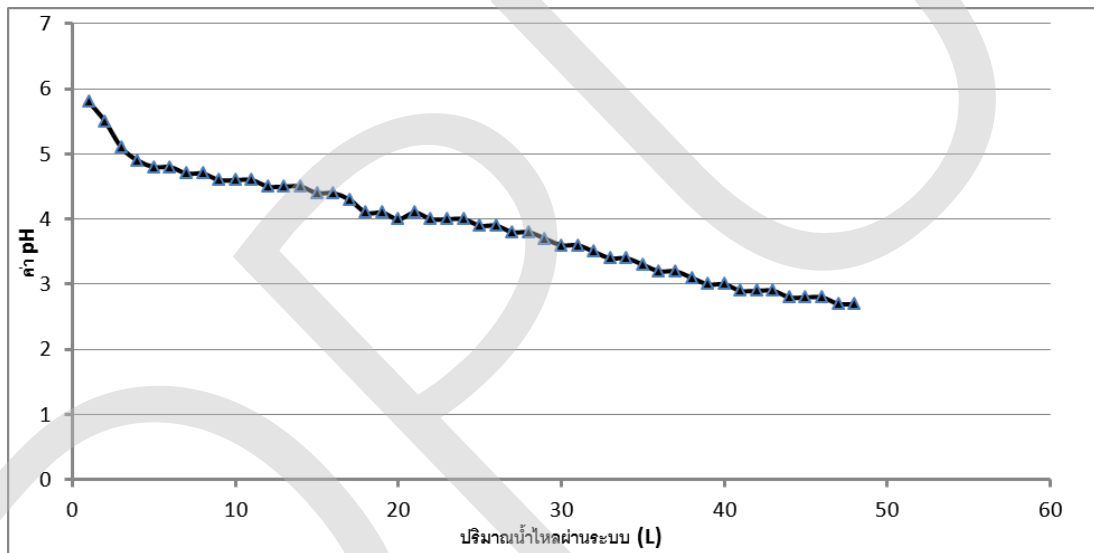
หลังจากพักระบบ 12 ชั่วโมงแล้วเริ่มทดลองต่อในวันที่ 2 พบว่าในวันที่ 2 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 98.39 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 1 L ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 68.55 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 19 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 83.45 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 20 L

หลังจากพักระบบ 12 ชั่วโมงแล้วเริ่มทดลองต่อในวันที่ 3 พบว่าในวันที่ 3 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กสูงสุดได้ร้อยละ 91.33 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 1 L ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กต่ำสุดได้ร้อยละ 46.98 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 8 L และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 71.70 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบรวม 8 L

เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 48 L ระบบจะมีประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 85.18 และค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบจะลดลงจาก 5.8 ไปเป็น 2.7 ภาพรวมของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L แสดงดังในรูปที่ 4.7 และการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบแสดงดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L



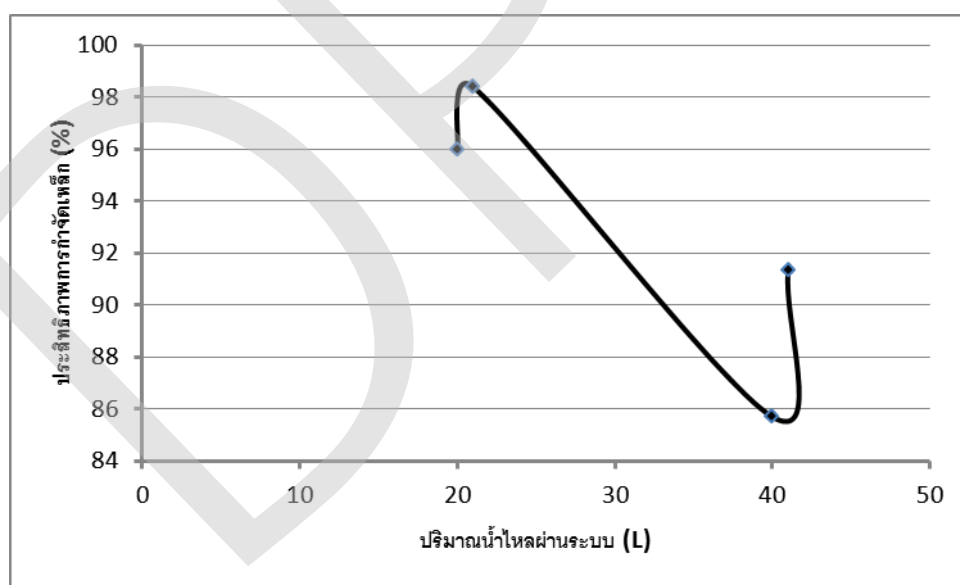
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ไหลออกจากระบบเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L

ผลของการพักระบบทั้ง 2 ครั้งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L แรกของวันถัดไปมีค่ามากกว่า 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้า การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแสดงดังในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L

วันที่	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหลผ่านระบบ (L)	pH ของน้ำไหลออก
1	95.97	20	4.0
2	98.39	21	4.1
	85.69	40	3.0
3	91.33	41	2.9

ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L แสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของ 1 L แรกของวันถัดไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของน้ำ 1 L สุดท้ายของวันก่อนหน้าเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L

เมื่อน้ำไหลเข้าระบบรวม 48 L จะมีปริมาณเหล็กไหลเข้าระบบเท่ากับ 238.08 mg และจากการตรวจวัดปริมาณเหล็กที่ไหลออกจากระบบพบว่ามีปริมาณเหล็กไหลออกจากระบบทั้งหมดเท่ากับ 35.29 mg คิดเป็นปริมาณเหล็กที่ระบบดูดซับไว้ได้เท่ากับ 202.79 mg เมื่อคำนวณเป็นต่อกรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์จะดูดซับเหล็กได้เท่ากับ 20.28 mg

4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 2 treatments

Treatment ที่ 1 คือ การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L Treatment ที่ 2 คือ การกำจัดเหล็กเมื่อกำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L ผลการเปรียบเทียบแสดงดังในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 2 treatments

Treatment ที่	ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับต่อกรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ปริมาณน้ำไหลผ่านระบบ (L)	ค่าเฉลี่ย pH ของน้ำไหลออก
1	21.88	80.22	55	3.78
2	20.28	85.18	48	3.89

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของทั้ง 2 Treatment พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของทั้ง 2 Treatment ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (ภาคผนวก จ)

4.7 การทำงานของระบบกำจัดเหล็ก

ใส่น้ำที่มีเหล็กลงไปใน separating funnel แล้วปรับปริมาณของน้ำด้วย stopcock ให้น้ำไหลเข้าทางด้านล่างของ glass column แล้วไหลออกไปทางท่อพลาสติกด้านบน วัดอัตราการไหลได้ 0.35-0.45 mL/s คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.40 mL/s ในขณะที่ระบบทำงาน วัดความเร็วของน้ำที่ไหลอยู่ใน column ได้ 0.21-0.29 cm/s คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 cm/s ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์อยู่ในสภาพของไหล (fluidized) อยู่ภายใน glass column และไม่หลุดออกไปจากระบบ ในขณะที่พักระบบแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์แพ็คตัวลงมามีความสูงประมาณ 8-9 cm

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษากำจัดเหล็ก Fe^{2+} ในน้ำด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์เริ่มจากการสำรวจแหล่งผลิตน้ำประปาจากน้ำบาดาล ในตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี แล้วนำค่าเหล็กที่วัดได้มาออกแบบระบบกำจัดเหล็ก ผลสรุปเป็นดังนี้

5.1 สรุป และอภิปรายผล

ผลการสำรวจแหล่งผลิตน้ำประปาจากน้ำบาดาลจำนวน 5 แห่งพบว่ามี 1 แห่งที่มีค่าเหล็ก Fe^{2+} เกินมาตรฐานคือที่ร.ร.บ้านราษฎร์เจริญ มีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมากถึง $4.96 \pm 0.03 \text{ mg/L}$ ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 6.5 ที่หมู่ 6 และ หมู่ 3 มีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ปนเปื้อนอยู่ในน้ำใกล้เคียงกันและเกือบถึงค่ามาตรฐานคือ 0.27 และ $0.28 \pm 0.02 \text{ mg/L}$ ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7.1 และ 7.3 ตามลำดับ ที่ทำการองค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม และ วัดเขาน้อย มีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ปนเปื้อนอยู่ในน้ำใกล้เคียงกันคือ 0.16 และ $0.18 \pm 0.02 \text{ mg/L}$ ค่า pH ของน้ำเท่ากับ 7.3 และ 7.2 ตามลำดับ เห็นได้ว่าน้ำที่ร.ร.บ้านราษฎร์มีความเป็นกรดเล็กน้อย นอกนั้น pH ของน้ำค่อนข้างเป็นกลาง

เลือกน้ำจาก ร.ร.บ้านราษฎร์เจริญซึ่งเป็นจุดที่มีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} มากที่สุด และมีค่าเกินมาตรฐาน มาใช้เป็นตัวแทนในการกำจัดเหล็กด้วยระบบกำจัดแบบให้น้ำไหลย้อนขึ้นด้วยอัตราการไหลเฉลี่ย 0.4 mL/s และใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ 10 g โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 Treatment คือ Treatment ที่ 1 กำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 5 L treatment ที่ 2 กำหนดให้เดินระบบต่อเนื่องวันละ 20 L หยุดการทดลองเมื่อระบบมีประสิทธิภาพต่ำกว่าร้อยละ 50 พบว่า Treatment ที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} เท่ากับร้อยละ 80.22 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 55 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 218.85 mg ต่อ 10 g หรือคิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 21.88 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ Treatment ที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} เท่ากับร้อยละ 85.18 เมื่อน้ำไหลผ่านระบบได้ 48 L คิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 202.79 mg ต่อ 10 g หรือคิดเป็นปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 20.28 mg ต่อ 1 g ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} ของทั้ง 2 Treatment พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} ของทั้ง 2 Treatment ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

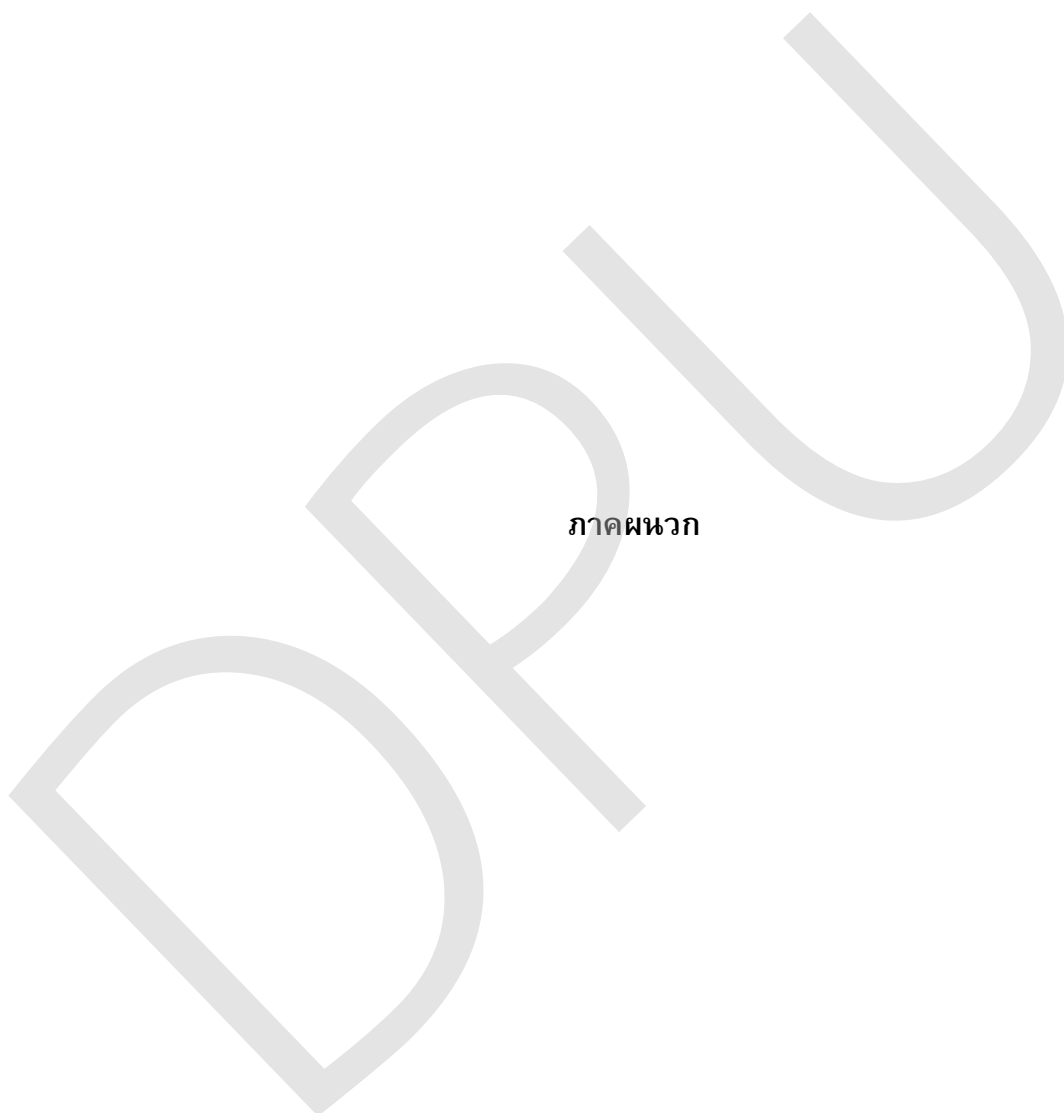
จากทั้ง 2 Treatment ที่กำหนดให้มีการเดินระบบที่แตกต่างกัน พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ และระบบการกำจัดเหล็กแบบน้ำไหลย้อน มีความสามารถกำจัดเหล็ก Fe^{2+} ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปแก้ปัญหาในชุมชนที่มีการนำน้ำบาดาลที่มีเหล็ก Fe^{2+} ปนเปื้อนมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษา Adsorption isotherm ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์กับสารละลายเหล็ก Fe^{2+} ศึกษาอายุการใช้งานโดยเพิ่มเวลาของการทดลองให้นานขึ้น และหยุดการทดลองเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์หมดประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กกับน้ำที่มีปริมาณเหล็ก Fe^{2+} ละลายอยู่น้อย ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก Fe^{2+} เมื่อกำหนดเวลาของการพักระบบให้นานมากขึ้น ขยายสเกลของระบบให้ใหญ่ขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับกำจัดน้ำที่มีเหล็กปนเปื้อนที่โรงเรียนบ้านราษฎร์เจริญ วิเคราะห์เหล็ก Fe^{2+} ในแหล่งผลิตน้ำประปาทุกแห่งในตำบลเจริญธรรม อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับแจ้งเตือนการนำน้ำไปใช้ในการบริโภค

บรรณานุกรม

- กรรณิการ์ สิริสิงห. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และ การวิเคราะห์. บริษัท ประยูรวงศ์ จำกัด กรุงเทพมหานคร. 2525.
- รัตนา มหาชัย และสุนันทา เสงี่ยมิ. การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของโลหะหนักบางตัวบนวัสดุดูดซับถ้ำกลบ. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2542.
- องค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม. แผนพัฒนา 3 ปี ประจำปี พ.ศ. 2557-2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.jaroentum.go.th/node/47>. 2556.
- Angelescu N. Ungureanu D.N. and Anghelina F.V. 2011. Synthesis and characterization of hydroxyapatite obtained in different experimental conditions. **The Scientific Bulletin of VALAHIA University-MATERIALS and MECHANICS**. 9(6).
- Corami A., Mignardi S. and Ferrini V. 2007. Copper and zinc decontamination from single and binary metal solutions using hydroxyapatite. **Journal of Hazardous Materials**. 146:164:170.
- Granados-Correa F., Bonofacio-Martinez J. and Serrno-Gomez J. 2010. Synthesis and characterization of calcium phosphate and its relation to Cr(VI) adsorption properties. **Rev. Int. Contam. Ambient**. 26 (2):129-134.
- Hafez I.T., Paraskeva C.A., Klepetsanis P.G. and Koutsoukos P.G. 2010. Study of polyacrylic acid adsorption on the interface of hydroxyapatite-electrolyte solutions. **Global NEST Journal**. 12(3):270-278.
- Ibrahim D.M., Hegazy W.H., Mahgoub A.E. and ABO-Elmaged H. 2000. Preparation and characterization of calcium hydroxyapatite. **Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series B**. 46:33-46.
- Takeuchi Y. and Arai H. 1990. Removal of coexisting Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} ions from water by addition of hydroxyapatite powder, 3. pH and sample conditioning effects. **J. Chem. Eng. Jpn**. 23:75–80.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก พื้นที่สำรวจปริมาณเหล็กในน้ำบาดาล



ภาพ ก1 องค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม (เก็บตัวอย่างน้ำจากก๊อกในห้องน้ำ)



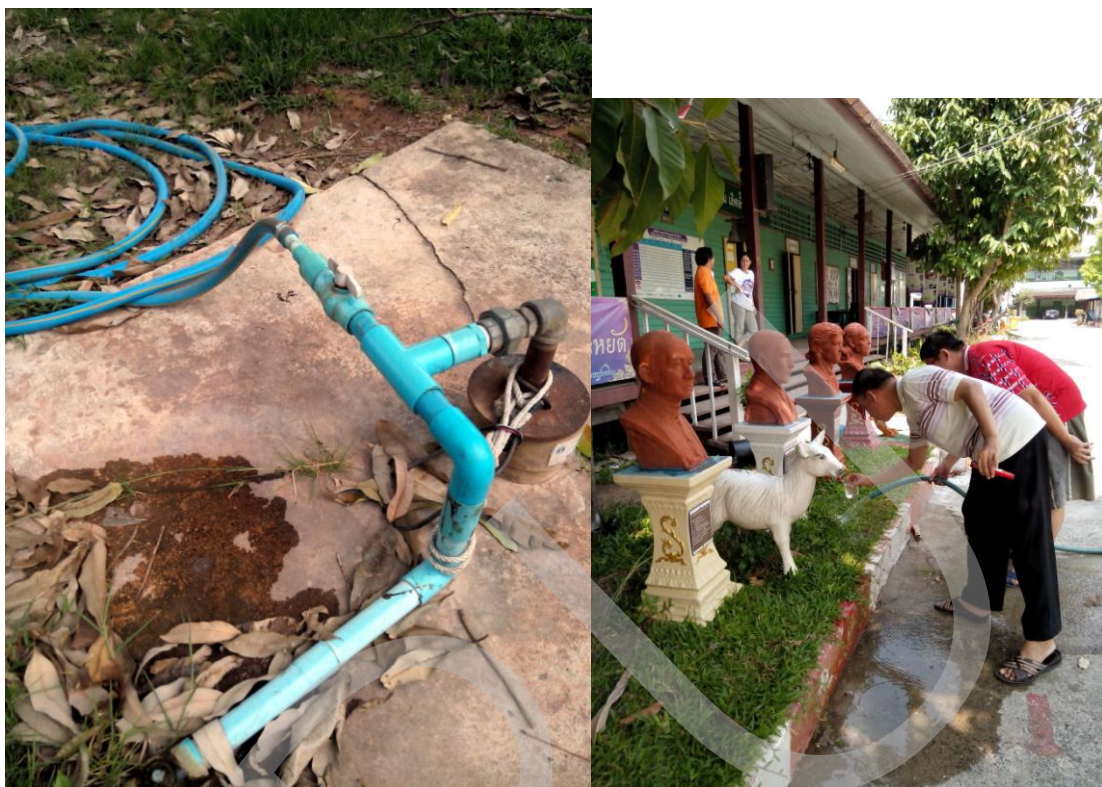
ภาพ ก2 ถังเก็บน้ำองค์การบริหารส่วนตำบลเจริญธรรม



ภาพ ก3 หอถังสูงวัดเขาน้อย (เก็บตัวอย่างน้ำจากก๊อกในวัด)



ภาพ ก4 หอถังสูงหมู่ 6 สามแยกบ้านราษฎร์เจริญ (เก็บตัวอย่างน้ำจากบ้านใกล้เคียง)

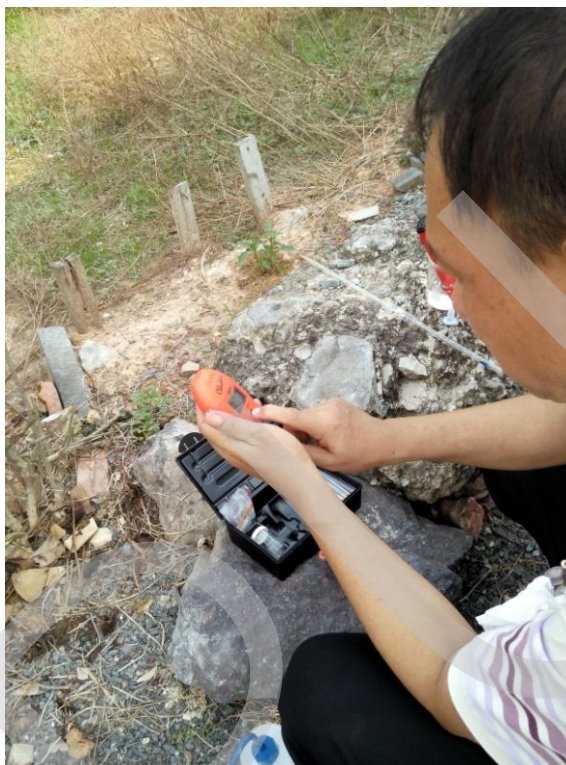


ภาพ ก5 จุดเจาะน้ำบาดาล ร.ร.บ้านราษฎร์เจริญ (เก็บตัวอย่างน้ำจากปลายสายยาง)



ภาพ ก6 หอถังสูงหมู่ 3 บ้านราษฎร์เจริญ (เก็บตัวอย่างน้ำจากบ้านใกล้เคียง)

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล



ภาพ ข1 การวิเคราะห์เหล็กโดยใช้เครื่อง Hanna HI 721



ภาพ ข2 การวัด pH และ อุณหภูมิของน้ำ

ภาคผนวก ค การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์



ภาพ ค1 การสังเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์



ภาพ ค2 แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ผ่านการอบ 100°C 24 hr.



ภาพ ค3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ผ่านการเผา 800 °C 3 hr.



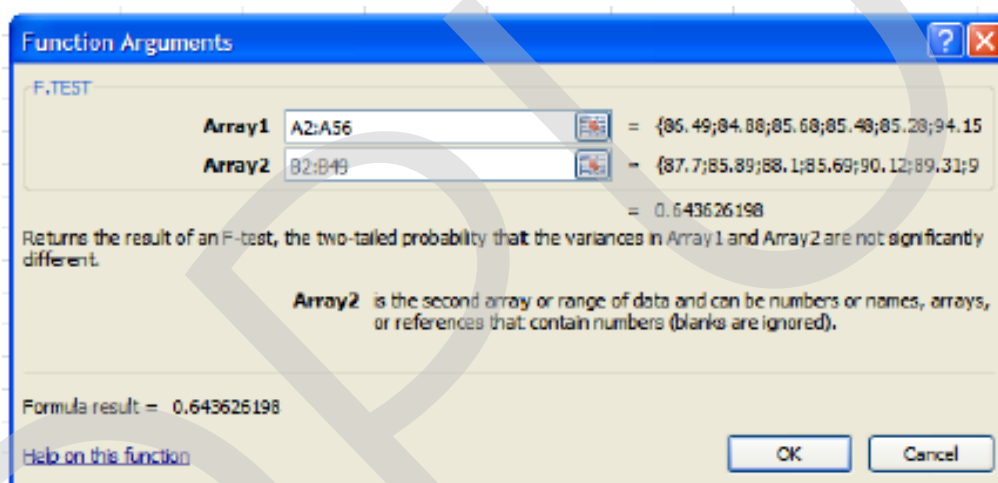
ภาพ ค4 แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์บดละเอียด

ภาคผนวก ง ผลการตรวจวัดปริมาณเหล็ก

ชื่อสถานที่	วันที่/เวลา	ปริมาณเหล็ก (mg/L)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD
อบต.เจริญธรรม	10 เม.ย.57/11.00 น.	0.16 0.14 0.18	0.16 ± 0.02
วัดเขาน้อย	10 เม.ย.57/12.00 น.	0.18 0.20 0.16	0.18 ± 0.02
หมู่ 6 สามแยก บ้านราษฎร์เจริญ	10 เม.ย.57/13.00 น.	0.27 0.29 0.25	0.27 ± 0.02
ร.ร.บ้านราษฎร์ เจริญ	16 เม.ย.57/14.00 น.	4.96 4.99 4.94	4.96 ± 0.03
หมู่ 3 บ้านราษฎร์ เจริญ	16 เม.ย.57/15.30 น.	0.28 0.26 0.30	0.28 ± 0.02

ภาคผนวก จ ค่าสถิติวิเคราะห์

จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวนของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ของ Treatment 1 และ 2 โดยใช้โปรแกรม Excel ได้ผลเป็น 132.18 และ 115.69 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของทั้ง 2 Treatment พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน (not significantly different) ดังรูป จ1



รูป จ1 ผล F-Test ของ treatment 1 และ 2 (โปรแกรม Excel)

จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ของ Treatment 1 และ 2 โดยใช้โปรแกรม Excel ได้ผลเป็นร้อยละ 80.22 และ 85.18 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของทั้ง 2 Treatment พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของทั้ง 2 Treatment ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (not significant) ดังรูป จ2

Significance Level:

☒ 0.01
☐ 0.05
☐ 0.10

One-tailed or two-tailed hypothesis?:

☐ One-tailed
☒ Two-tailed

The T-value is 2.247648. The P-Value is 0.026773. The result is *not* significant at $p < 0.01$.

รูป จ2 ผล T-Test ของ treatment 1 และ 2 (โปรแกรม Social Science Statistics)

<http://www.socscistatistics.com/tests/studentttest/Default2.aspx>

ภาคผนวก จ Hanna Iron Checker



Checker^{HC} handheld colorimeter

Easier to use and more accurate than chemical test kits

Phenanthroline method
 $\pm 0.04 \text{ ppm} \pm 2\%$ of reading accuracy
 0.01 ppm (mg/L) resolution (500 points)
 Large, easy to read digits
 Auto shut off

Dedicated to a single parameter

Designed to work with HANNA's powder reagents
 Uses 1.0 mL glass cuvettes

Small size, big convenience

Weighing a mere 64 g (2.25 oz.), the Checker^{HC} easily fits into the palm of your hand or pocket. Use for quick and accurate on the spot analysis. One button operation: zero and measure. Operated by a single AAA battery.

Ideal for:

Industrial, ground and treated waters, mining leachate monitoring and agricultural irrigation water



ACCURATE AND AFFORDABLE IRON MEASUREMENT

About 6.3% of the earth's crust is made of iron, of which 43% is in soils. The analysis of iron is often performed to monitor ground water and irrigation waters as a gauge of corrosion from industrial setting, and as an indication of the effectiveness of treatment from mining leachate.

The HANNA HI 721 Checker^{HC} bridges the gap between simple chemical test kits and professional instrumentation. Chemical test kits are not very accurate and only give 5 to 10 points resolution while professional instrumentation can cost hundreds of dollars and can be time consuming to calibrate and maintain. The HANNA HI 721 Checker^{HC} is accurate and affordable with immediate results.

The new HI 721 Checker^{HC} portable handheld colorimeter features a resolution of 0.01 ppm (500 points) and $\pm 0.04 \text{ ppm} \pm 2\%$ of reading accuracy. The HI 721 Checker^{HC} uses an adaptation of Standard Method 315 B.

The contoured style of this Checker^{HC} fits in your palm and pocket perfectly and the large LCD is easy to read. The auto shut-off feature assures the battery life will not be drained if you forget to turn it off.

The HI 721 Checker^{HC} is extremely simple to use. First, zero the instrument with your water sample. Next, add the reagent. Last, place the vial into the HI 721 Checker^{HC}, press the button and read the results. It's that easy.

WE DESIGN, MANUFACTURE, SUPPLY AND SUPPORT ALL OF OUR PRODUCTS.

THAT'S 360° VALUE

Over the past 30 years, HANNA has never failed to design fresh and innovative products. The new Checker^{HC}s are no exception. We are excited to introduce such high accuracy and ease of use in a small, modern design that fits in the palm of your hand.

HANNA is the largest family-owned manufacturer of analytical instrumentation in the world. The new series of Checker^{HC}s are manufactured in our European state-of-the-art ISO 9001:2000 production facility. Each Checker^{HC} is CE compliant to EN 61326-1 and EN 61010-1 standards.

When you buy a HANNA product, you're not only buying the best value for your money, but you're also adding the benefit of HANNA's unsurpassed customer service and post-sale technical support.



IT'S EASY TO MEASURE SAMPLES WITH THE CHECKER^{HC}



"Zero" the Checker^{HC} with your unreacted water sample



Add reagent to your water sample



Place the cuvette into your Checker^{HC}



Press the button and read the results. It's that easy!

Checker^{HC}
handheld colorimeter

SPECIFICATIONS	HI 721 (Iron)
Range	0.00 to 5.00 ppm (mg/L)
Resolution	0.01 ppm (mg/L)
Accuracy @ 25°C/77°F	±0.04 ppm ±2% of reading
Light Source	LED @ 525 nm
Light Detector	silicon photocell
Environment	0 to 50°C (32 to 122°F); RH max 95% non-condensing
Battery Type	1.5V AAA
Auto-off	after three minutes of non-use and ten seconds after reading
Dimensions	81.5 x 61 x 37.5 mm (3.2 x 2.4 x 1.5")
Weight	64 g (2.25 oz.)
Method	adaptation of the EPA Phenanthroline method 315 B, for natural and treated waters

ORDERING INFORMATION

HI 721 Checker^{HC} is supplied with sample cuvettes with caps (2), powder reagents for iron (6), battery and instructions.

REAGENTS AND STANDARDS

HI 721-25 Reagents for 25 tests (iron)
HI 721-11 Calibration checking set
0.00 and 1.00 ppm (iron)

ACCESSORIES

HI 731318 Cuvette cleaning cloth (4)
HI 731321 Glass cuvettes (4)
HI 731225 Caps for cuvettes (4)
HI 93703-50 Cuvette cleaning solution, 230 mL



SHOWN ACTUAL SIZE

HANNA[®]
instruments
With Great Products, Come Great Results[™]

P/L CHECKER^{HC} HI 721 INC. U.S. PRINTED IN USA

See our full line of HANNA Checker^{HC}'s at:

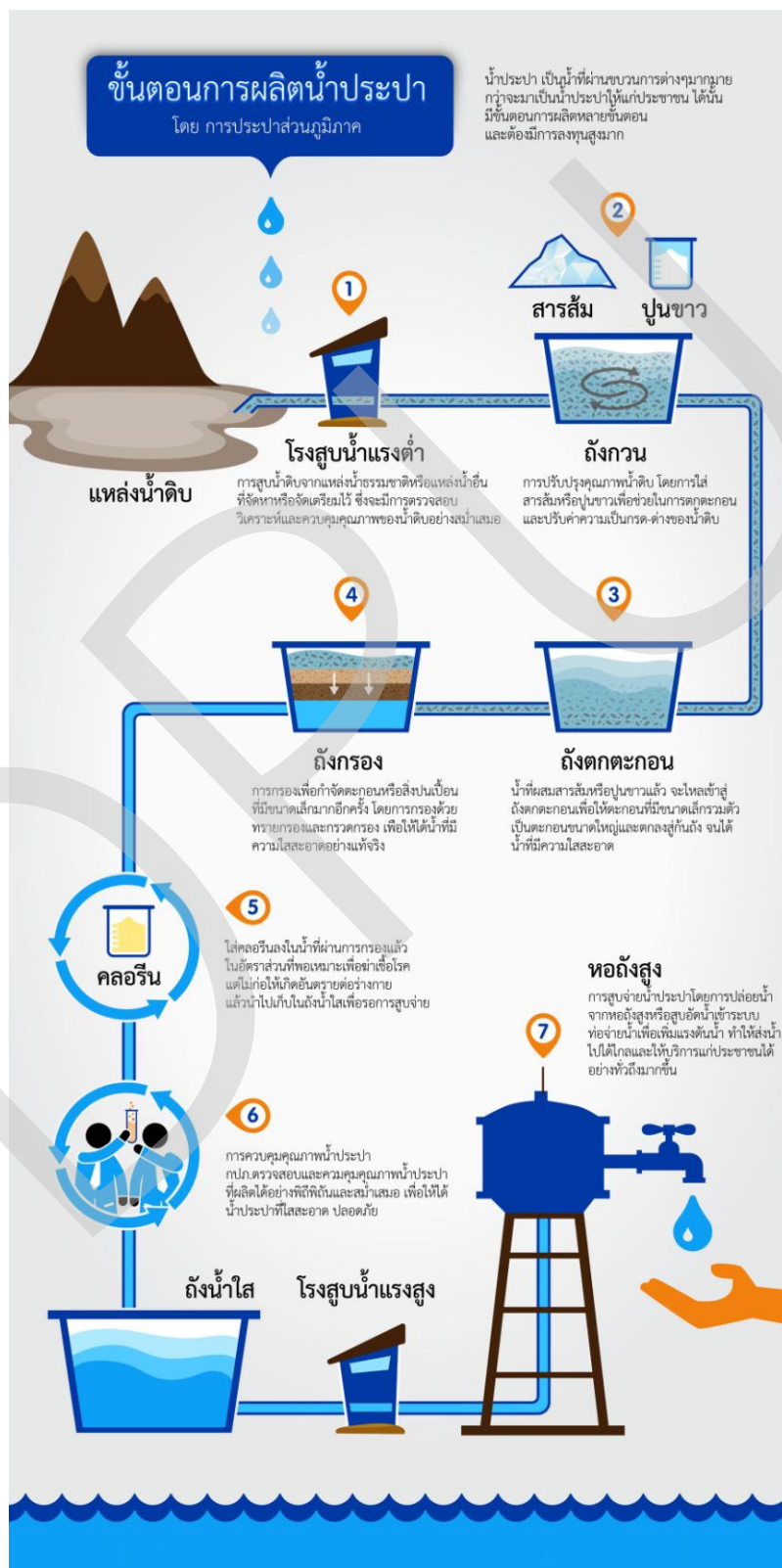
WWW.HANNACHECKER.COM

ภาคผนวก ข มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค

รายการ	มาตรฐานน้ำประปา
1. คุณสมบัติทางกายภาพ	
สี (colour), Pt-Co unit	15
รส (taste)	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
กลิ่น (odour)	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
ความขุ่น (turbidity), NTU	5
ความเป็นกรด-ด่าง (pH range)	6.5-8.5
2. คุณสมบัติทางเคมี (mg/l)	
ปริมาณสารที่ละลายทั้งหมด (total dissolved solids)	600
เหล็ก (Fe)	0.3
แมงกานีส (Mn)	0.4
ทองแดง (Cu)	2.0
สังกะสี (Zn)	3.0
ความกระด้างทั้งหมด (total hardness) as CaCO_3	300
ซัลเฟต (SO_4)	250
คลอไรด์ (Cl)	250
ฟลูออไรด์ (F)	1.0
ไนเตรต (NO_3) as NO_3	50
3. คุณสมบัติทางเคมีที่เป็นพิษ - โลหะหนัก (mg/l)	
ปรอท (Hg)	0.001
ตะกั่ว (Pb)	0.01
สารหนู (As)	0.01
ซีลีเนียม (Se)	0.01
โครเมียม (Cr)	0.05
ไซยาไนด์ (CN)	0.07
แคดเมียม (Cd)	0.003
แบเรียม (Ba)	0.7
4. คุณสมบัติทางจุลชีววิทยา (ต่อ 100 ml)	
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total Coliform Bacteria)	ไม่พบ
อี โคไล (<i>E. coli</i>)	ไม่พบ
สเตรปโตค็อกคัส ออเรียส (<i>Streptococcus aureus</i>)	ไม่พบ
แซลโมเนลลา (<i>Salmonella</i>)	ไม่พบ
คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเกนส์ (<i>Clostridium perfringens</i>)	ไม่พบ

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามพื้นที่รอบ เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2550 ที่สถานีเก็บน้ำดิบของ กอน. ที่ พ.ท. 35702-2/238 เมื่อวันที่ 11 กรกฎาคม 2550

ภาคผนวก ข ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา



ประวัตินักวิจัย

ชื่อผู้วิจัย : นายธัญญะ พรหมศร

การศึกษา : วท.บ. (ชีววิทยา)
: วท.ม. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)
: วท.ม. (เคมีชีวภาพ)

ผลงานทางวิชาการ : บทความ

มังคุด...ยาสมุนไพรตัวใหม่ สุทธิปริทัศน์ 2544

องุ่น...ผลไม้ป้องกันโรค สุทธิปริทัศน์ 2545

: เอกสารคำสอน

ปฏิบัติการเคมี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 2555

: เอกสารประกอบการสอน

ชีวเคมี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 2555

หลักเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 2556

ผลงานวิจัย :

ร่วมวิจัยเรื่อง Sequencing Batch Reaction (SBR) : Domestic Wastewater Treatment by Thermotolerant Bacteria. University Colleagues : Srinakharinwirot University, Dhurakitpundit University, Hiroshima University, and North Bangkok College. 2004.

แบบจำลองความลึกเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับคำนวณการไหลเวียนของน้ำ
ในทะเลสาบสงขลา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์. 2556.

ผลงานวิจัยที่พิมพ์ออกเผยแพร่ :

Watanapokasin Y., Seumak N., Sirisopana S., Promsorn T., Kakizono T., and Sarangbin S. Sequencing Batch Reaction (SBR) : Domestic Wastewater Treatment by Thermotolerant Bacteria. The 4th JSPS-NRCT Joint Seminar on Development of Thermotolerant Microbial Resources and Their Applications. Kyushu University, Fukuoka, Japan. 2004.

ตำแหน่ง : อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 2557.

e-mail : thanya991@gmail.com