

การกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก



นางสาวศมน แดงฤทธิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ARSENIC REMOVAL FROM SYNTHETIC GROUNDWATER BY IRON AMENDED BIOSAND
FILTER

Miss Samon Dangrit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก
โดย	นางสาวศมน แดงฤทธิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พีรพงษ์ พรวงค์ทอง)

ศมน แดงฤทธิ์ : การกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก (ARSENIC REMOVAL FROM SYNTHETIC GROUNDWATER BY IRON AMENDED BIOSAND FILTER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ, 178 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการกำจัดสารหนูด้วยเหล็ก หาปริมาณเหล็กที่เหมาะสมต่อน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนสารหนู 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณเหล็ก 2, 4, 6, 8, 16, 32, 40 และ 80 กรัมต่อลิตร รวมไปถึงศึกษาผลของความกระด้างแคลเซียมหรือแมกนีเซียมในการกำจัดสารหนูด้วยเหล็ก ที่ความเข้มข้นความกระด้าง 50, 100, 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต ผลการทดลองพบว่าในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้างใช้เหล็กน้อยที่สุด 16 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดสารหนูให้ไม่เกินมาตรฐานน้ำดื่ม (ไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร) สามารถกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 3.09 ไมโครกรัมต่อลิตร ในน้ำที่มีความกระด้างแคลเซียมตั้งแต่ 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ควรใช้ปริมาณเหล็กออกไซด์อย่างน้อย 8 กรัมต่อลิตร และในน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียมตั้งแต่ 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ควรใช้ปริมาณเหล็กอย่างน้อย 4 กรัมต่อลิตร และทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของถังกรองทรายชีวภาพ ถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก และถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก พบว่าถังกรองทรายชีวภาพสามารถกำจัดสารหนูให้ไม่เกินมาตรฐานน้ำดื่มได้เพียงประมาณ 1 สัปดาห์ แต่ในถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กและถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กสามารถกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 2 - 6 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีอายุการใช้งานได้ 4 เดือน เนื่องจากปัญหาการอุดตันของถังที่ทำให้อัตราการไหลของน้ำออกจากถังลดลงจึงต้องหยุดใช้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770467021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: IRON OXIDE / ARSENATE / ADSORPTION / BIOSAND-FILTER

SAMON DANGRIT: ARSENIC REMOVAL FROM SYNTHETIC GROUNDWATER BY IRON AMENDED BIOSAND FILTER. ADVISOR: DAO SUWANSANG JANJAROEN, Ph.D., 178 pp.

This study investigated the ability of arsenic removal by iron oxide. Determination of suitable iron oxide content for synthetic groundwater with arsenic which contained of 1 mg/L. Iron oxide concentration used in the experiment 2, 4, 6, 8, 16, 32, 40 and 80 g/L of synthetic groundwater. Calcium or magnesium hardness concentration were set at 50, 100, 150 and 300 mg/L as CaCO₃. The results showed that in non-hardened synthetic groundwater, 16 g/L of iron oxide was able to remove arsenate to 3.09 µg/L, which do not exceed the WHO Guidelines for Drinking-water Quality (≤ 10 µg/L). In synthetic groundwater containing calcium and magnesium hardness from 50 to 300 mg/L as CaCO₃, iron oxide content should be at least 8 g/L and 4 g/L for calcium and magnesium, consequently. Three different filter tank including biosand-filter, iron amended biosand-filter and iron amended sand filter were compared the efficiency of arsenic removal. It has been found that biosand-filter could remove arsenic below WHO Guidelines for Drinking-water Quality for about a week, but iron amended biosand-filter and iron amended sand filter could remove arsenic in water to 2- 6 µg/L for 4 months. Due to the blockage of the filter tank, iron precipitates blocked the filter, and reduced the flow of water from the filter tank. Once the flow was too slow, the filter had to be stopped operating.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหน่วยงานหลายหน่วยงานและบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และช่วยชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย รวมถึงช่วยแก้ไขสิ่งบกพร่องตลอดเวลาในการทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเชียร และอาจารย์ ดร.พิรพงษ์ พรวงค์ทอง เป็นอย่างสูงที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขต่างๆ เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (STREC) ที่ช่วยให้คำแนะนำในระหว่างการทำโครงการทดลอง พร้อมทั้งช่วยอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์สารเคมีในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการทุนอุดหนุนการศึกษาเพื่อทำหน้าที่ผู้ช่วยวิจัย (รหัสทุน GCUGE 17) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ให้กำลังใจ และดูแลตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัยเป็นอย่างสูง ที่คอยให้การสนับสนุนช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การกรอง (Filtration).....	4
2.1.1 กลไกการกรอง (Filtration Mechanism).....	5
2.1.2 ความพรุนของชั้นกรอง (Porosity, ϵ)	7
2.2 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand Filter, BSF)	8
2.2.1 ฟิล์มชีวภาพ (Biofilms)	10
2.3 ประเภทของการกรองทรายชีวภาพ (Types of Biosand Filter).....	11
2.3.1 การกรองแบบธรรมดา (Conventional Filters).....	11
2.3.2 การปรับปรุงถังกรอง (Amended Filters).....	13
2.4 การดูดซับ (Adsorption).....	15
2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ	15

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	17
2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	20
2.5 สารหนู (Arsenic, As).....	22
2.5.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสารหนู.....	22
2.5.2 ความเสถียรของสปีชีส์สารหนู (Stability of Species)	22
2.5.3 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมของสารหนู.....	23
2.5.4 ความเป็นพิษของสารหนู (Arsenic Toxicity).....	24
2.5.5 สารหนูในน้ำบาดาล (Arsenic in Ground Water).....	27
2.6 เหล็ก (Iron).....	28
2.6.1 การเกิดสนิมเหล็ก (Rust).....	29
2.6.2 ชนิดของเหล็กที่พบในน้ำ.....	29
2.6.3 สถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ.....	30
2.6.4 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก	31
2.7 ไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Hydrous Metal Oxide)	34
2.7.1 ไฮดรอกไซด์ออกไซด์ของเหล็ก (Hydrous Iron Oxide).....	34
2.7.2 การดูดซับไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์ออกไซด์.....	35
2.8 ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness).....	36
2.8.1 ชนิดของความกระด้าง	37
2.9 เทคโนโลยีการกำจัดสารหนูในสถานะของเหลว.....	38
2.9.1 กระบวนการตกตะกอน (Precipitation Processes).....	38
2.9.2 การดูดซับการดูดซึมและการแลกเปลี่ยนไอออน (Sorptions and Ion Exchange)....	39
2.9.3 การแยกโดยการกรองด้วยเยื่อกรอง (Membrane) และการแยกโดยใช้แม่เหล็ก.....	40
2.9.4 เทคนิคกำแพงประติษฐาน (Permeable Reactive Barriers, PRBs).....	41

2.9.5 วิธีทางชีวภาพ.....	42
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
2.10 ความเป็นมาและประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ.....	43
2.11 การพัฒนาถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก	44
2.12 ประโยชน์ของเหล็กต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ	45
2.13 ผลขององค์ประกอบของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัด	46
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	47
3.1 แผนการทดลอง	47
3.2 ตัวแปรในการทดลอง	49
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	53
3.3.3 เครื่องมือทดสอบและวิเคราะห์	54
3.4 การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกรอง.....	54
3.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุกรอง	54
3.4.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุกรอง	55
3.5 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อ การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์.....	56
3.5.1 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	56
3.5.2 วิธีการทดลองแบบที่ละเท	60
3.6 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในถัง IOBSF กับถัง BSF และ ศึกษาอิทธิพลในการกำจัดสารหนูของฟิล์มชีวภาพโดยเปรียบเทียบกับ BSF กับถัง IOSF.....	61
3.6.1 การเตรียมวัสดุกรอง.....	61
3.6.2 การเตรียมถังกรองคอนกรีต	62

3.6.3	วิธีบรรจุตัวกรองลงในถังกรองคอนกรีต.....	64
3.6.4	วิธีทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน (Tracer test)	65
3.6.5	การเตรียมน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	65
3.6.6	วิธีการใช้งานถังกรองทราย.....	69
3.7	การทดลองที่ 4 ศึกษาการชะละลายในตัวกรองทรายและเหล็กที่หมดสภาพการใช้งาน ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP (U.S. EPA)	69
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	70
4.1	การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกรองก่อนผ่านการใช้งาน.....	70
4.1.1	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์ (Size Distribution).....	70
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุกรองด้วยเครื่อง SEM	72
4.1.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุกรอง ด้วยเครื่อง XRF	74
4.2	การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูในน้ำด้วยเหล็กออกไซด์.....	75
4.2.1	การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetics)	75
4.2.2	ผลการศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์และความกระด้างที่เหมาะสมในการดูดซับ สารหนูในน้ำ	78
4.2.3	ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวเหล็กออกไซด์.....	86
4.3	ผลการศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำของถังกรองทราย.....	92
4.3.1	ผลการทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน (Tracer test)	92
4.3.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพ.....	93
4.3.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของถังกรองทราย	94
4.3.4	ผลการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่ออกมากับน้ำหลังผ่านการกรอง	99
4.4	ผลของการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ต่อพีเอชน้ำ.....	100
4.5	การศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากชั้นกรองที่หมดอายุการใช้งาน.....	103
4.5.1	การชะละลายหลังใช้งานด้วยน้ำ.....	103

4.5.2 การชะละลายชั้นกรองด้วยวิธี TCLP.....	104
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	106
5.1 สรุปผลวิจัย	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	108
5.3 ความสำคัญของงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	114
ภาคผนวก ก	115
ภาคผนวก ข	119
ภาคผนวก ค	125
ภาคผนวก ง.....	128
ภาคผนวก จ	145
ภาคผนวก ฉ	156
ภาคผนวก ช	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	178



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2 - 1 การพัฒนาของถังกรองทรายชีวภาพ.....	11
ตารางที่ 2 - 2 เปรียบเทียบสมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	16
ตารางที่ 2 - 3 ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่างๆ.....	24
ตารางที่ 2 - 4 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบเหล็ก.....	33
ตารางที่ 2 - 5 ตารางแสดงระดับความกระด้างของน้ำ.....	36
ตารางที่ 2 - 6 แสดงประเภทและเงื่อนไขในการใช้เยื่อกรองกรองด้วยความดัน.....	41
ตารางที่ 3 - 1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อการดูดซับที่เกิดขึ้นในการกำจัดสารหนูและสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับ.....	49
ตารางที่ 3 - 2 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์และถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม.....	50
ตารางที่ 3 - 3 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาการชะละลายของสารหนูในตัวกรองทรายและเหล็กที่หมดสภาพ.....	51
ตารางที่ 4 - 1 ผลการทดลองการกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง.....	71
ตารางที่ 4 - 2 องค์ประกอบทางเคมีของตัวกรอง ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF.....	74
ตารางที่ 4 - 3 ค่าความสามารถและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็ก.....	76
ตารางที่ 4 - 4 ความเข้มข้นสารหนูหลังกวนกับเหล็กที่ปริมาณต่างๆ.....	80
ตารางที่ 4 - 5 แสดงสมการการดูดซับสารหนูของเหล็กออกไซด์แบบแลงเมียร์และฟรุนดิชกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียมหรือความกระด้างแมกนีเซียม.....	86
ตารางที่ 4 - 6 ระดับการสร้างฟิล์มชีวภาพบนผืนทราย.....	93
ตารางที่ 4 - 7 ความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาจากถังกรองทรายทั้ง 3 ชนิดด้วยน้ำ.....	103

ตารางที่ 4 - 8 ความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาจากชั้นกรองของถังกรองทราย ทั้ง 3 ชนิดด้วยวิธี TCLP.....	105
--	-----



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงกลไกที่เกิดขึ้นในการกรองทราย.....	4
รูปที่ 2.2 กลไกการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำเข้าหาตัวกรองโดย.....	5
รูปที่ 2.3 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand Filter).....	9
รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการสร้างฟิล์มชีวภาพ.....	10
รูปที่ 2.5 แสดงมิติและการออกแบบของถัง BSF รุ่นที่ 10.....	12
รูปที่ 2.6 แสดงการติดตั้ง 3-Kalshi เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.7 รูปแบบของ KAF TM	14
รูปที่ 2.8 สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	18
รูปที่ 2.9 สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช.....	20
รูปที่ 2.10 การกระจายของอาร์เซนิต์และอาร์เซนตกับค่าพีเอชในแหล่งน้ำ.....	23
รูปที่ 2.11 อาการหงหันาด้านเป็นตุ่มแข็งขึ้นที่ฝ่ามือและฝ่าเท้าเนื่องจากได้รับสารหนู.....	26
รูปที่ 2.12 แสดงสถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ.....	30
รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่าง pE และ pH กับสถานะของเหล็กในน้ำ.....	32
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการทดลอง.....	48
รูปที่ 3.2 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง.....	56
รูปที่ 3.3 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม.....	57
รูปที่ 3.4 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม.....	58
รูปที่ 3.5 วัสดุกรองทรายละเอียด.....	61
รูปที่ 3.6 วัสดุกรองกรวด.....	61
รูปที่ 3.7 วัสดุกรองหิน.....	61
รูปที่ 3.8 วัสดุกรองเหล็กขึ้นสนิม.....	62
รูปที่ 3.9 ขนาดถังกรองคอนกรีต.....	63

รูปที่ 3.10 การบรรจุตัวกรองถ่วงกรงทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม	66
รูปที่ 3.11 การบรรจุตัวกรองถ่วงกรงทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก	67
รูปที่ 3.12 การบรรจุตัวกรองถ่วงกรงทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก (ไม่มีฟิล์มชีวภาพ)	68
รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคเหล็กออกไซด์	71
รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของทราย เหล็ก และเหล็กชั้นสนิมที่กำลังขยาย 500 และ 5000 เท่า	73
รูปที่ 4.3 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสารหนูที่ปริมาณเหล็กต่างๆ	75
รูปที่ 4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 8 กรัมต่อลิตร	77
รูปที่ 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 16 กรัมต่อลิตร	77
รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 32 กรัมต่อลิตร	77
รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 40 กรัมต่อลิตร	78
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 80 กรัมต่อลิตร วิเคราะห์โดย ปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง	78
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสารหนูในน้ำกับปริมาณเหล็กที่ใช้ดูดซับ	81
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสารหนูกับความกระด้างแคลเซียมที่มีในน้ำ	82
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของสารหนูกับความกระด้างแมกนีเซียมที่มีในน้ำ	83
รูปที่ 4.12 การเชื่อมโยงของ Hydroxy Complex	84
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นแคลเซียมที่เหลือในน้ำกับปริมาณเหล็ก	85
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นแมกนีเซียมที่เหลือในน้ำกับปริมาณเหล็ก	85
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์	88
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มี ความกระด้างแคลเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต	88
รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มี ความกระด้างแคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต	88
รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มี ความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต	89

รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มี ความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต.....	89
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	89
รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	90
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	90
รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	90
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง BSF.....	92
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง IOBSF.....	92
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง IOSF.....	93
รูปที่ 4.27 ความเข้มข้นสารหนูในน้ำหลังผ่านการกรอง.....	97
รูปที่ 4.28 ค่าออกซิเจนละลายในน้ำหลังออกจากถังกรองกรอง.....	98
รูปที่ 4.29 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังผ่านการกรอง.....	99
รูปที่ 4.30 พีเอชของน้ำที่ปริมาณเหล็กต่างๆเปรียบเทียบกับพีเอชน้ำเริ่มต้น.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในทุกๆ ปีหน้าแล้งของประเทศไทย ประชาชนจะได้รับความเดือดร้อนเนื่องจากแหล่งน้ำผิวดินมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการผลิตน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค รวมถึงประชาชนที่อยู่อาศัยตามชนบทซึ่งน้ำประปาไม่สามารถเข้าถึงและอยู่ห่างไกลจากแหล่งน้ำผิวดิน ประชาชนจึงมองหาแหล่งน้ำทางเลือกอย่างน้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำอุปโภคบริโภค น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำจืดที่อยู่ในสถานะของเหลวที่มีปริมาณมาก เนื่องจากน้ำบาดาลอยู่ใต้ชั้นดิน อาจมีโลหะหนักจากแร่ธาตุในชั้นดินชั้นดินปนเปื้อนน้ำบาดาล เช่น สารหนู (Arsenic, As) ซึ่งตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (WHO) ในปี 2011 ระบุว่า น้ำดื่มต้องมีสารหนูไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (อรุณศักดิ์ โสภณธรรม ภาณ, 2551) สารหนูพบได้ในธรรมชาติ เป็นองค์ประกอบของดิน หิน และแร่ต่างๆ พบมากในสายแร่ทองแดง แมงกานีส ตะกั่ว ดีบุก และเงิน บริเวณแหล่งน้ำใต้ดินที่ใกล้สายแร่จึงมีการปนเปื้อนสารหนูสูงกว่าแหล่งน้ำอื่นๆ ซึ่งถือเป็นการปนเปื้อนโดยธรรมชาติ ส่วนการปนเปื้อนโดยการกระทำของมนุษย์ เช่น การปนเปื้อนจากบริเวณท่าเหมืองแร่ที่มีการจัดการไม่เหมาะสมแล้วมีการปล่อยน้ำทิ้ง การทำการเกษตรที่มีการใช้ยากำจัดศัตรูพืช ทำให้สารพิษซึมไปใต้ดินปนเปื้อนกับน้ำบาดาล ในประเทศไทยพื้นที่บริเวณอำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และอำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นพื้นที่ที่ทรัพยากรแร่ทองคำ ซึ่งมีการดำเนินการท่าเหมืองแร่ พบว่าคุณภาพน้ำบาดาลของพื้นที่ดังกล่าวมีปริมาณของสารหนูเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคได้ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2554) ซึ่งสารหนูธรรมชาติพบได้ในแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ เช่น แร่อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS)

วิธีการในการบำบัดสารหนูในน้ำโดยทั่วไปมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทำให้ตกตะกอน (Precipitation processes) เช่น การใช้สารส้ม (Alum), เหล็ก (Iron), ปูนขาวอ่อน (Lime softening), การรวมตัวกับเหล็ก (และแมงกานีส) (Combined with iron (and manganese)) กระบวนการเมมเบรน (Membrane processes) เช่น Reverse osmosis, electrodialysis และกระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เช่น อะลูมินาแกมมันต์

(Activated alumina), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซึ่งวิธีบำบัดสารหนูในน้ำโดยทั่วไปนั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูง ยุ่งยากสำหรับการนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตของประชาชน และนอกจากนั้นการผลิตน้ำที่โรงผลิตน้ำเป็นการผลิตที่ศูนย์กลางแล้วแจกจ่าย ซึ่งจะเพิ่มโอกาสการปนเปื้อนมากขึ้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาวิธีการกำจัดสารหนูออกจากน้ำบาดาลด้วยวิธีการกรอง โดยศึกษาองค์ประกอบของน้ำบาดาลเช่น แคลเซียม แมกนีเซียมที่มีผลต่อการลดปริมาณสารหนูในน้ำ เพื่อให้ประชาชนได้บริโภคน้ำดื่มที่สะอาดปลอดภัยในปริมาณที่เพียงพอกับการบริโภคในครัวเรือน และเป็นวิธีที่มีกระบวนการการบำบัดน้ำไม่ซับซ้อน สะดวก ประหยัด มีต้นทุนการผลิตถังกรองประมาณ 400 – 1,800 บาท (USD 12 - 50) (CAWST, 2009) เหมาะสมกับการใช้งานในชนบท และสามารถใช้กับน้ำบาดาลซึ่งเป็นแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคของประชาชนในชนบทได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของถัง BSF อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถกำจัดได้ทั้งสารหนูและจุลินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเพิ่มเหล็กลงในชั้นกรองสามารถลดปริมาณสารหนูในน้ำได้ แต่ยังไม่มียงานวิจัยใดที่พัฒนาถัง BSF ให้มีความเสถียร (เช่น ไม่เกิดการสูญเสียสัมประสิทธิ์ของการซึม ไม่เกิดการอุดตันเร็ว เป็นต้น) และความสามารถกำจัดสารหนูให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยตามมาตรฐานน้ำดื่ม นอกเหนือจากการเพิ่มเหล็กลงในชั้นกรองแล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมมีส่วนช่วยการกำจัดสารหนู ผู้วิจัยจึงสนใจปรับปรุงและพัฒนาถัง BSF เพื่อเพิ่มความเสถียรและความสามารถในการกำจัดสารหนูให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยตามมาตรฐานน้ำดื่มและผู้วิจัยยังสนใจศึกษาผลกระทบของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูด้วยถัง BSF นอกจากนี้ตัวกรองที่หมดประสิทธิภาพแล้วก็มีความสำคัญ การกำจัดที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมอีกครั้ง ผู้วิจัยจะทดสอบการชะละลายของสารหนูจากตัวกรอง เพื่อหาแนวทางการกำจัดตัวกรองที่หมดประสิทธิภาพที่ถูกต้องและเหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูโดยใช้ถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของเหล็ก และความกระด้างของน้ำ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ต่อการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองขั้นห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษากลไกเบื้องต้นและประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู (V) ในน้ำบาดาลสังเคราะห์โดยผ่านชั้นกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

1.3.2 น้ำบาดาลสังเคราะห์เตรียมขึ้นจากสารประกอบโซเดียมอาร์เซเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำกลั่น (18 M Ω) พร้อมมีการปรับค่าความกระด้างด้วยแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่พีเอช 8

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อการกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลให้ลดลงหรือหมดไปด้วยถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

1.4.2 ทราบผลกระทบของแคลเซียมและแมกนีเซียมต่อการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพ

1.4.3 เป็นการพัฒนากลังกรองทรายชีวภาพให้สามารถกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลได้นอกเหนือจากการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และความขุ่น

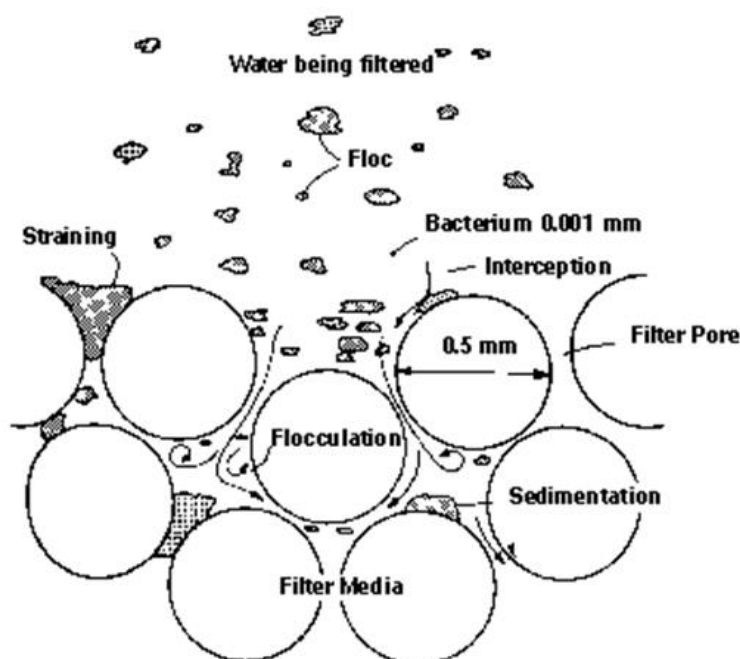
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกรอง (Filtration)

เป็นกระบวนการแยกอนุภาคน้ำแขวนลอยออกจากสารละลาย มีชั้นกรองเป็นตัวดักอนุภาคของแข็งที่ไม่ละลายออกจากสารละลาย โดยการให้สารละลายไหลผ่านไปตามช่องว่างของตัวกลางพรุน (Porous Media) เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นกรอง อนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของชั้นกรองจะติดที่ชั้นกรอง ดังรูปที่ 2.1 ส่วนที่ผ่านชั้นกรองออกมาได้นั้นเรียกว่า ฟิลเตรต (Filtrate)

การใช้ทรายเป็นวัสดุกรองนั้นสามารถกำจัดตะกอนแขวนลอย คอลลอยด์ แบคทีเรีย ไวรัส สี และสารอื่นๆ ถึงแม้บางอนุภาคที่ปนเปื้อนจะมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของเม็ดทรายก็สามารถถูกกำจัดได้ เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองไม่ใช่แค่การตกค้างหรือดักสิ่งปนเปื้อนบนทราย แต่มีกลไกอื่นเกิดขึ้นด้วย ได้แก่ กลไกการเคลื่อนที่ กลไกการเกาะติดตัวกลาง (ทวิศกดิ์ วังไพศาล, 2557)



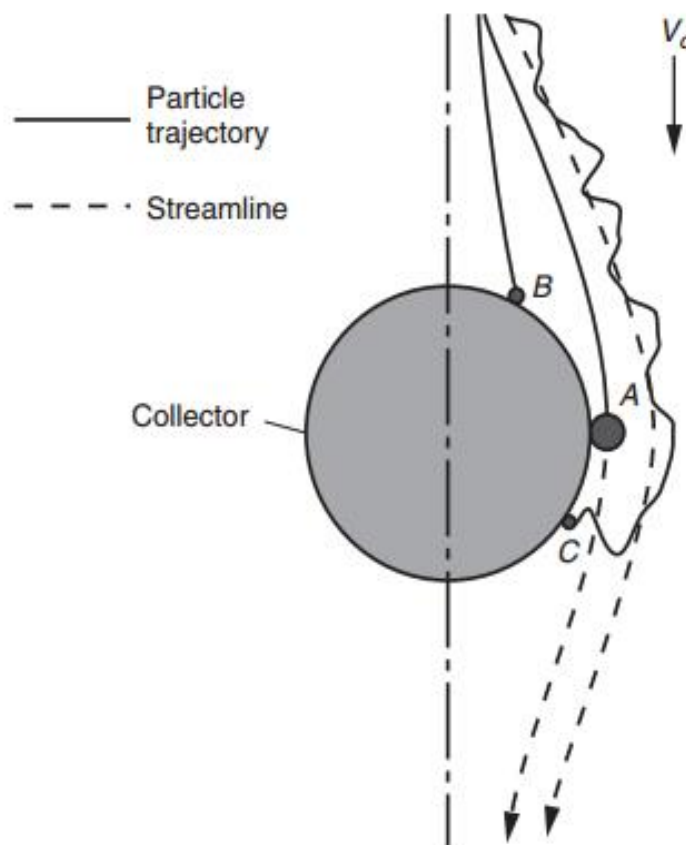
รูปที่ 2.1 แสดงกลไกที่เกิดขึ้นในการกรองทราย

ที่มา: (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

2.1.1 กลไกการกรอง (Filtration Mechanism)

กลไกการกรองที่เกิดขึ้นในถังกรองเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในสารละลายไปอยู่ที่ชั้นกรอง ซึ่งการกรองจะเกิดขึ้นได้จะต้องประกอบด้วย ตัวกลาง (ตัวกรอง) สารละลายหรือน้ำที่ผ่านช่องว่างชั้นกรอง และสารปนเปื้อนแขวนลอยในน้ำ ซึ่งกลไกที่เกี่ยวข้องกับการกรองประกอบด้วย

(1) กลไกการเคลื่อนที่ (Transport Mechanism) เป็นการเคลื่อนที่ของสารแขวนลอยเข้าหาตัวกรองซึ่งจะนำไปสู่กลไกการเกาะติดผิวของสารแขวนลอยกับตัวกรอง สารแขวนลอยจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวกรอง 3 ลักษณะด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำเข้าหาตัวกรองโดย

(A) Interception, (B) Sedimentation, (C) Diffusion

ที่มา: (Crittenden และคณะ, 2012)

(1.1) การเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัส (Interception) เกิดจากตัวกรองขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคสารแขวนลอยที่เคลื่อนที่ตามเส้นการไหล (Streamline) อนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนวิ่งเบียดสัมผัสกับตัวกรองและเกิดการเกาะติดผิวในขณะที่ผ่านช่องว่าง

(1.2) การตกหรือติดค้าง (Sedimentation) เกิดจากอนุภาคสารแขวนลอยที่มีความหนาแน่นหรือน้ำหนักมาก เกิดการเบี่ยงทิศทางของอนุภาคสารแขวนลอยออกจากเส้นการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกทำให้เกิดการตกหรือติดค้างบนตัวกรอง

(1.3) การเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของอนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุล มีการเคลื่อนที่แบบแพร่กระจายหรือ Brownian Motion ซึ่งเคลื่อนที่ไร้ทิศทางทำให้อนุภาคสารแขวนลอยชนและสัมผัสกับตัวกรองและติดบนตัวกรอง

ขนาดและการกระจายขนาด (Size Distribution) ของอนุภาคสารแขวนลอยสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนที่ ขนาดของอนุภาคสารแขวนลอยที่เล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่แบบ Diffusion จะแปรผกผันกับขนาดอนุภาค อนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากก็จะมีโอกาสเข้าหาตัวกรองได้มากกว่าขนาดใหญ่ แต่อนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ขนาดและน้ำหนักของอนุภาคสารแขวนลอยจะสำคัญในกลไก Interception และ Sedimentation อนุภาคที่มีน้ำหนักหรือปริมาตรมากจะ Interception หรือ Sedimentation ได้ง่าย ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่จึงแปรผันตรงกับขนาดของอนุภาค จะเห็นได้ว่าอนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอนจะกรองออกยากกว่าขนาดอื่น (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2538)

(2) กลไกการเกาะติดตัวกลาง (Attachment Mechanism) เป็นกลไกการเกาะติดบนตัวกลาง เกิดได้ทั้งกลไกทางกายภาพและเคมี โดยแรงที่เกี่ยวข้องได้แก่ แรงดูดติดผิวดิน (เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือการสะเทินประจุ) และแรงทางกายภาพ (เช่น การเกาะกันเป็นก้อน หรือการเบียด)

(2.1) การดูดติดผิว (Adsorption) การดูดติดผิวเป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคเกาะติดบนตัวกรองซึ่งเป็นการดูดซับชั้นเดียว (Langmuir Isotherm) หรือ ผิวของอนุภาคอื่นที่จับอยู่บนตัวกรองอยู่ก่อนซึ่งเป็นการดูดซับหลายชั้น (Freundlich Isotherm) โดยขึ้นอยู่กับ

1) แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสารแขวนลอยหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นกลไกหลักทำให้การกรองด้วยทรายสามารถกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ทวิศักดิ์ วังไพศาล, 2557)

2) การสะเทินประจุ (Charge Neutralization) ทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคสารแขวนลอยให้เป็นกลาง

2.1.2 ความพรุนของชั้นกรอง (Porosity, ϵ)

ความพรุน คือ สัดส่วนของปริมาตรช่องว่างในวัสดุรูพรุน (Pore Space) ต่อปริมาตรรวม (Bulk Volume) ของวัสดุรูพรุน (Material) ความพรุนเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญของวัสดุรูพรุน มีความสัมพันธ์กับปริมาตรรวมและความหนาแน่นรวม (Bulk Density) (อภิรัฐ จันทลักษณ์, วัชรพล ชยประเสริฐ และเอนก สุขเจริญ, 2555)

สมการความสัมพันธ์ของความพรุนกับปริมาตรรวม ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_b} \quad (2.1)$$

$$V_p = V_b - V_s \quad (2.2)$$

โดย ϵ = ความพรุน (Porosity)
 V_p = ช่องว่างในเนื้อวัสดุรูพรุน (Pore Space)
 V_b = ปริมาตรรวม (Bulk Volume)
 V_s = ปริมาตรเนื้อของแข็ง (Solid Volume)

สมการความสัมพันธ์ของความพรุนกับความหนาแน่นรวม ดังสมการที่ 2.3

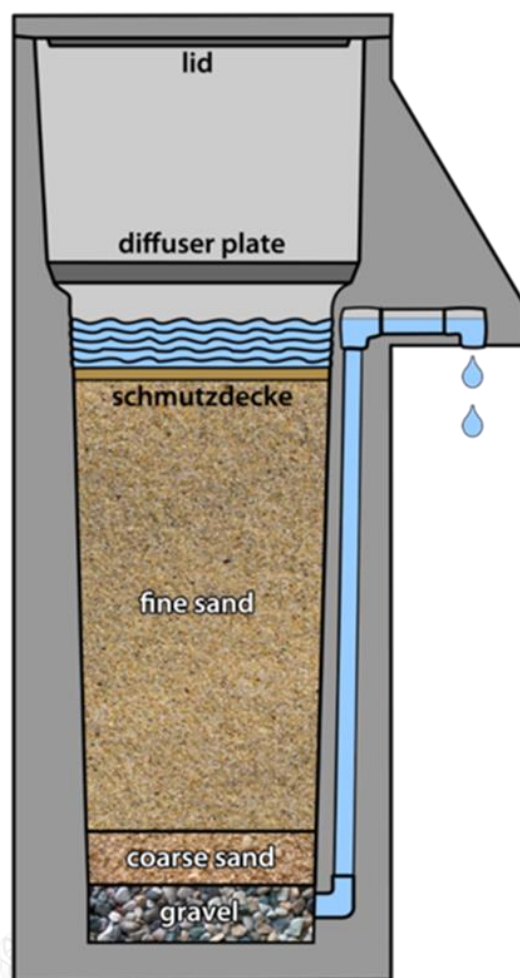
$$\epsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \quad (2.3)$$

โดย ρ_b = ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)
 ρ_t = ความหนาแน่นจริง (True Density, Solid Density)

2.2 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand Filter, BSF)

เป็นเครื่องกรองชนิดกรองทรายช้า (Slow Sand Filter) โดยน้ำจะไหลผ่านชั้นกรองที่มาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กรวด ทราย เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นทรายไปได้ช้าน้ำจะท่วมชั้นทราย ซึ่งในน้ำมีจุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะดักจับความสกปรกในน้ำเพื่อการเจริญเติบโตทำให้เกิดเมือกชีวภาพ (Schmutdecke) หรือเรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำ เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกลในชนบทที่ขาดผู้ควบคุมระบบที่มีทักษะและความเชี่ยวชาญ

ถังกรองทรายชีวภาพ (BSF) ได้รับการพัฒนาครั้งแรกในปี 1990 โดย Dr. David Manz ที่มหาวิทยาลัย Calgary (CAWST, 2009) เพื่อใช้ผลิตน้ำดื่มที่สะอาดปลอดภัย มีต้นทุนในการผลิตน้ำดื่มต่ำ ราคาถูก ประหยัด ช่วยลดอัตราการเกิดโรคท้องร่วง โดย BSF อาศัยหลักการการกรองทรายช้า น้ำจะไหลผ่านชั้นกรองที่มาจากวัสดุธรรมชาติ กรวด ทราย เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นทรายไปได้ช้าน้ำจึงท่วมชั้นทราย ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในน้ำมีจุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะดักจับความสกปรกในน้ำเพื่อการเจริญเติบโตทำให้เกิดเมือกชีวภาพ หรือเรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ ช่วยกำจัดจุลินทรีย์ปนเปื้อน (Ahammed และ Meera, 2010) จึงเรียกรองแบบนี้ว่าถังกรองทรายชีวภาพ ซึ่งความแตกต่างของ BSF จากกรองทั่วไป คือ มีความสามารถในการทำงานหลายหน้าที่ในหนึ่งหน่วยคือทำหน้าที่ Settlement, Straining และ Filtration (Noubactep, Temgoua และ Rahman, 2012) BSF เหมาะสำหรับใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำ มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในประเทศกำลังพัฒนาและพื้นที่ห่างไกลในชนบท



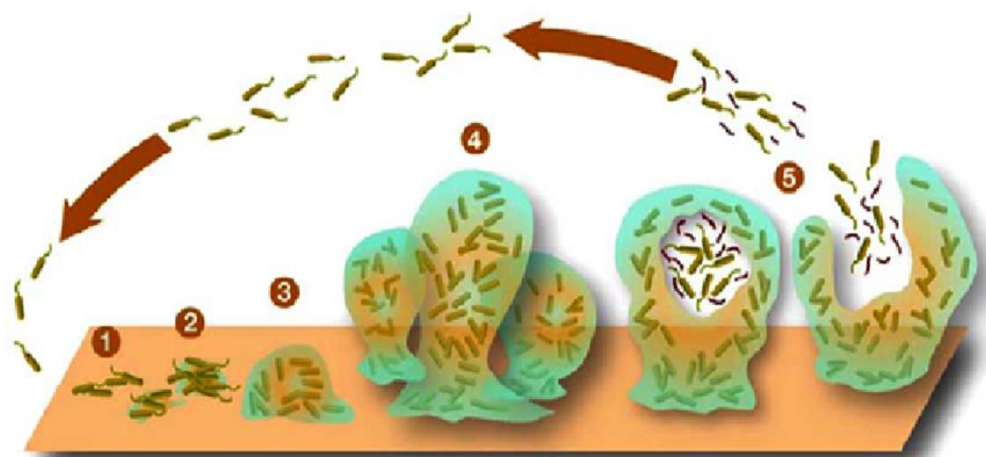
รูปที่ 2.3 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand Filter)

ที่มา: (CAWST, 2009)

BSF มีประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนทางเคมี (เช่น เหล็ก, แมกนีเซียม และซัลเฟต) การปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค (เช่น แบคทีเรีย, ไวรัส) และกำจัดความขุ่นในน้ำที่ไม่ขุ่นมากนัก (การกำจัดทางกายภาพ) และ BSF ได้รับคัดเลือกเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำในประเทศกำลังพัฒนา ในปี 2009 BSF มากกว่า 200,000 ถังถูกนำมาใช้ในมากกว่า 70 ประเทศซึ่งอย่างน้อย 500,000 คนใช้ BSF ในการจัดหาน้ำดื่มที่สะอาดและปลอดภัย (Noubactep, Temgoua และ Rahman, 2012) ซึ่ง BSF เป็นการผลิตน้ำดื่มสะอาดที่จุดของการใช้น้ำ (POU : Point - of - use) ช่วยลดการปนเปื้อนในขั้นตอนการขนส่ง

2.2.1 फिल्मชีวภาพ (Biofilms)

ฟิล์มชีวภาพเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ร่วมกันเกาะติดกับพื้นผิวที่เปียกชื้น ซึ่งเกิดขึ้นเองจากจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ (Planktonic cells) ที่อาศัยอยู่ในน้ำ เมื่อจุลินทรีย์เกาะติดกับพื้นผิวของวัตถุแล้วจะสร้างฟิล์มบางๆ ที่มีลักษณะอื่นๆ เพื่อเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์หลายชนิด ในถังกรองทรายฟิล์มชีวภาพจะเจริญเติบโตขึ้นบริเวณผิวทรายด้านบนที่ความหนาชั้นทรายประมาณ 0.5 - 2.0 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นจุลินทรีย์จำพวกที่ต้องใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต ซึ่งจุลินทรีย์ใช้เวลาในการเจริญเติบโตประมาณ 20 - 30 วัน ฟิล์มชีวภาพทำหน้าที่เสมือนชั้นกรองช่วยในการกรองความขุ่น แบคทีเรีย และไวรัสที่อยู่ในน้ำออกไปได้บางส่วน



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการสร้างฟิล์มชีวภาพ (วันที่สืบค้นข้อมูล: 12 กุมภาพันธ์ 2559)

(ที่มา: <http://www.gestaltreality.com/2013/09/16/how-to-eliminate-candida-biofilms/>)

กระบวนการสร้างฟิล์มชีวภาพ ดังรูปที่ 2.4 มีขั้นตอนดังนี้

1. จุลินทรีย์ที่อยู่อิสระตามธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมมายึดเกาะบนผิววัตถุ
2. การยึดเกาะก็จะเริ่มแข็งแรงขึ้น สามารถเจริญเติบโตและขยายเซลล์ต่อไปได้
3. มีจุลินทรีย์กลุ่มใหม่มาเกาะกับจุลินทรีย์กลุ่มแรก ซึ่งจุลินทรีย์จะเริ่มแบ่งตัวและสร้างฟิล์มขึ้นแล้วปล่อยออกนอกเซลล์ (Extracellular Polymeric Substances , EPS) เพื่อปกป้องจุลินทรีย์ภายใน รวมทั้งสร้างสภาวะการเจริญเติบโตที่เหมาะสม
4. จุลินทรีย์เจริญเติบโตเต็มที่ เกิดขึ้นฟิล์มชีวภาพที่มีรูปร่างต่างกันไปตามสภาวะและปัจจัยต่างๆ
5. จุลินทรีย์สร้างสารทำลายเมือก เกิดการแตกหรือหลุด เซลล์จะหลุดออกไปเกิดโคโลนีในที่ใหม่ที่มีสภาวะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เป็นวัฏจักรการสร้างฟิล์มชีวภาพ

2.3 ประเภทของการกรองทรายชีวภาพ (Types of Biosand Filter)

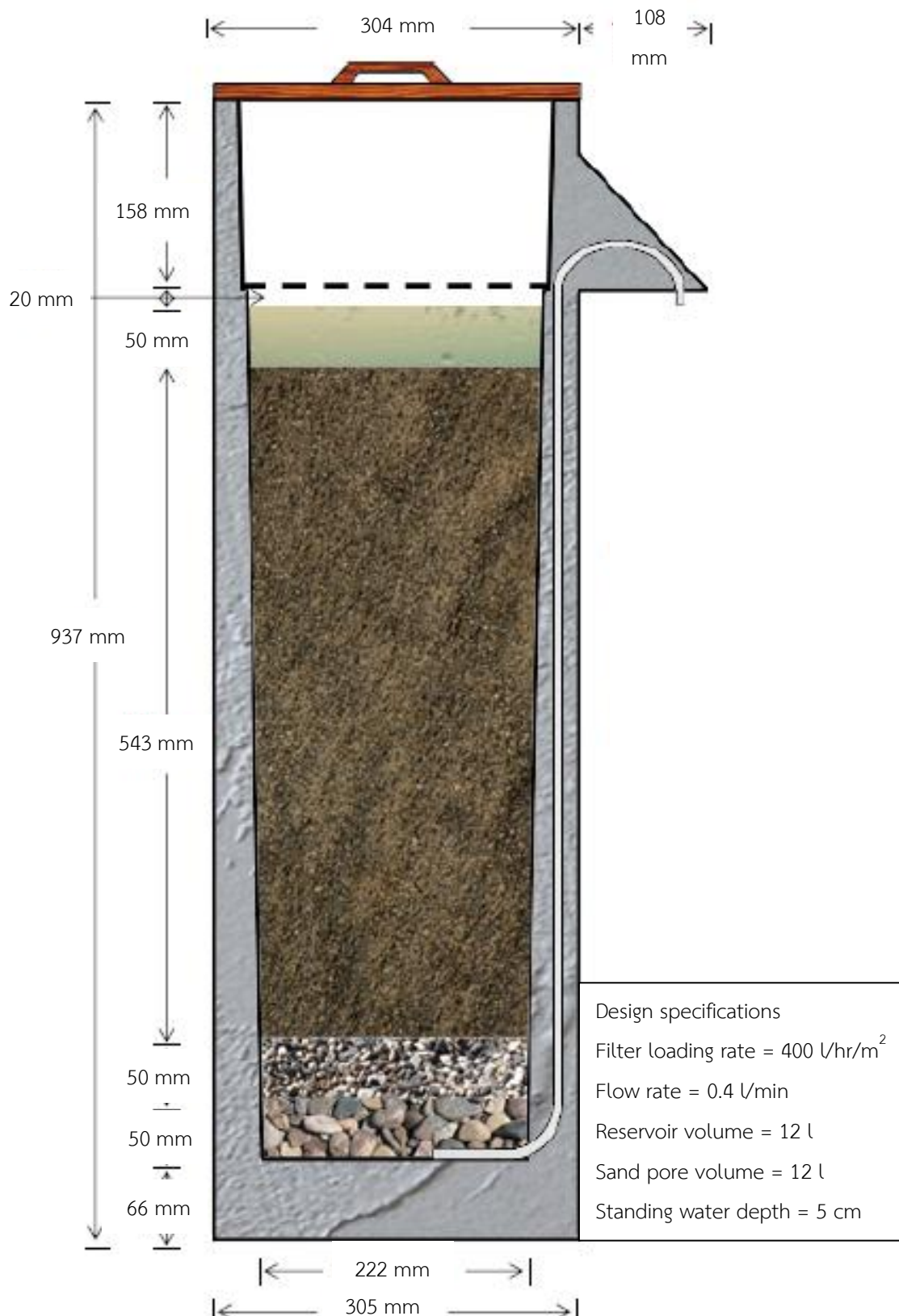
2.3.1 การกรองแบบธรรมดา (Conventional Filters)

ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand filter; BSF) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ผลิตน้ำดื่มที่สะอาดปลอดภัยในราคาประหยัด ช่วยลดความเสี่ยงการเกิดโรค เช่น โรคท้องร่วงในประเทศกำลังพัฒนา (CAWST, 2009) หลักการทำงานของ BSF ใช้การกรองทรายเข้ามาเป็นองค์ประกอบและมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้ถังกรองเหมาะสมกับการใช้งานในครัวเรือน ตัวถังของ BSF เป็นคอนกรีตหรือพลาสติกกลวง ข้างในประกอบไปด้วยชั้นทรายกรองและชั้นล่างเป็นกรวดเพื่อเป็นชั้นระบายน้ำของการกรอง โดยด้านบนของชั้นทรายกรอง 5 เซนติเมตร จะมีการติดตั้งแผ่นกระจายน้ำ เพื่อป้องกันผิวหน้าของทรายกรองไม่ให้ถูกรบกวนในระหว่างการเติมน้ำ (CAWST, 2009) BSF เป็นการนำกรองทรายเข้ามาแก้ไข โดยน้ำจะถูกเทลงถังกรองทุกๆ 16 - 32 ชั่วโมง และถูกกรองผ่านวัสดุกรองทรายโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เมื่อมีการเติมน้ำใหม่ลงมา น้ำที่เติมลงมาใหม่จะไปดันน้ำที่ค้างในชั้นกรองออก

นอกจากนี้ BSF ได้รับการออกแบบให้ระดับน้ำท่วมเหนือพื้นผิวทรายกรอง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมทางชีวภาพ (Schmutzdecke หรือ Biolayer) เจริญเติบโตสมบูรณ์ มีการรายงานไว้ว่า Biolayer นี้จะช่วยให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไวรัสในน้ำ (Wang และคณะ, 2014) ซึ่งในปัจจุบัน BSF มีทั้งหมด 10 รุ่น ออกแบบโดย CAWST และรุ่นที่ 10 เป็นรุ่นล่าสุด (รูปที่ 2.5) รุ่นที่ 10 ต่างจากรุ่นที่ 9 คือ รุ่นที่ 10 มีชั้นกรองสูง 55 เซนติเมตร แต่รุ่นที่ 9 มีชั้นกรองสูงเพียง 45 เซนติเมตร และปริมาตรบรรจุน้ำในถังกรองรุ่นที่ 9 คือ 20 ลิตร แต่รุ่นที่ 10 เป็น 12 ลิตร ซึ่งการเพิ่มความสูงของชั้นกรองและลดปริมาตรบรรจุน้ำในรุ่นที่ 10 ช่วยเพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำกับชั้นกรอง

ตารางที่ 2 - 1 การพัฒนาของถังกรองทรายชีวภาพ

Conventional filter	Amended filter
BSF	3 - Kalshi filter
	Kanchan arsenic filter
	Iron - amended filter

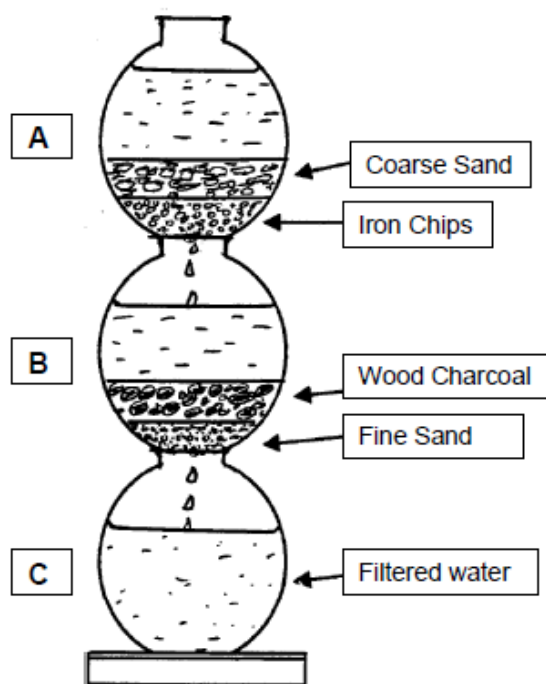


รูปที่ 2.5 แสดงมิติและการออกแบบของถัง BSF รุ่นที่ 10

ที่มา : (CAWST, 2009)

2.3.2 การปรับปรุงถังกรอง (Amended Filters)

จุดเริ่มต้นในการใช้เหล็กปรับปรุงใน BSF มาจากกรอง 3-Kalshi (รูปที่ 2.6) (Khan และคณะ , 2000) ได้นำถังกรอง 3-Kalshi มาเป็นต้นแบบในการปรับปรุง BSF โดยเพิ่มเหล็กลงไปในถังกรองเพื่อกำจัดสารหนู ซึ่งให้ผลที่ดีแต่เกิดปัญหาการสูญเสียสัมประสิทธิ์ของการซึม จึงเกิดแนวคิดนำเหล็กที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนุมารวมกับแนวคิดของ BSF ที่ประสบความสำเร็จในการกำจัดเชื้อโรค เพื่อให้ BSF สามารถกำจัดได้ทั้งการปนเปื้อนทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งปัจจุบัน BSF ที่มีการปรับปรุงมีทั้งหมด 2 ประเภท คือ Kanchan Arsenic Filter (KAF) และ Iron-Amended filter

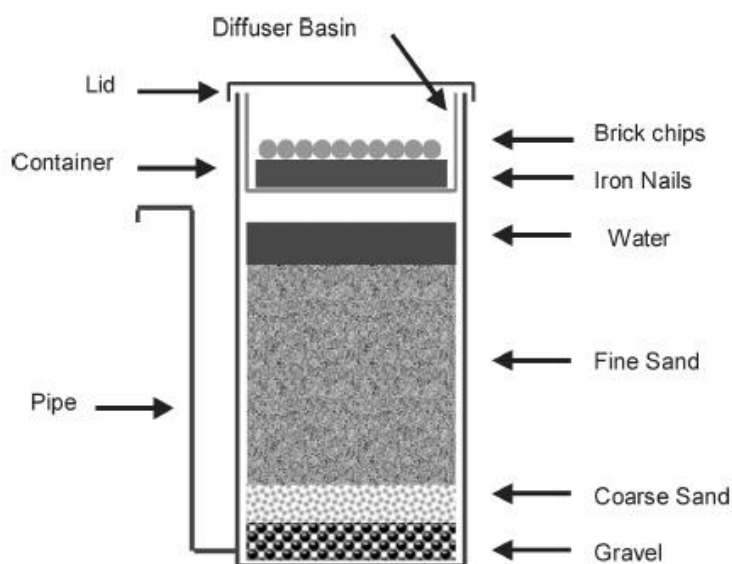


รูปที่ 2.6 แสดงการติดตั้ง 3-Kalshi เพื่อให้ให้น้ำบริสุทธิ์

ที่มา: (Khan และคณะ, 2000)

Kanchan Arsenic Filter (KAFTM) ถูกออกแบบโดยกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์จาก Massachusetts Institute of Technology (MIT), Environment & Public Health Organization (ENPHO) และ CAWST ซึ่งกลุ่มของนักวิจัยเป็นนักวิทยาศาสตร์, นักวิจัย, นักเศรษฐศาสตร์ และนักสังคมสงเคราะห์ จากประเทศสหรัฐอเมริกา เนปาล และแคนาดา KAFTM

เป็นการปรับเปลี่ยน BSF เพื่อกำจัดการปนเปื้อนสารหนูในน้ำดื่ม ในประเทศบังคลาเทศและเนปาล (Ngai และคณะ, 2007) ซึ่งกรอง KAFTM นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนล่างเป็นเหมือน BSF ทั่วไป แต่ส่วนบนเป็นส่วนที่ปรับปรุงเพิ่มเข้ามาด้วยอ่างตะปู 5 กิโลกรัม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบของ KAFTM

ที่มา: (Ngai และคณะ, 2007)

โดยตะปูที่ใช้ไม่มีการชุบสังกะสี เพื่อจะได้เกิดสนิมและสร้าง ferric hydroxide ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารหนูในน้ำ และบางส่วนเกิดการตกตะกอนของเหล็กกับสารหนู ตะกอนจะถูกดักด้วยชั้นกรองทราย แต่วิธีนี้ได้เกิดปัญหาขึ้น (Chiew และคณะ, 2009) คือการเพิ่มตะปูเหล็กชั้นบนทำให้ไม่มีออกซิเจนลงไปถึงพื้นผิวชั้นทรายได้ ซึ่งจำเป็นในการสร้าง Schutzdecke จึงไม่เกิดชั้น Schutzdecke ที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ ดังนั้น BSF ที่มีการปรับปรุงแก้ไขรุ่นต่อไปจึงมีการเสนอการแก้ปัญหาต่อไป

Iron-Amended Filter จากปัญหาที่เกิดขึ้นใน KAFTM ถูกนำมาแก้ไขใน BSF ประเภทนี้ คือมีการนำเหล็กผสมกับวัสดุเฉื่อย เช่น ทราย โดยชั้นปฏิกริยานี้จะอยู่ระหว่าง ชั้นทรายชั้นบนสุดของชั้นกรองจะเป็นชั้นทรายละเอียดสูง 5 เซนติเมตรเพื่อให้ฟิล์มชีวภาพสามารถเจริญเติบโตได้ ถัดมาจึงเป็นชั้นปฏิกริยาที่มีการผสมเหล็กกับทรายสูง 20 เซนติเมตร และสุดท้ายชั้นทรายกรองที่สูง 20 เซนติเมตร โดยวัสดุเหล็กที่ใช้ปรับปรุงนอกจากตะปูเหล็กแล้วยังมี อนุภาคเหล็ก zerovalent และฝอยเหล็กละเอียด และกรองนี้จะมีการเก็บน้ำครั้งละ 20 ลิตร ทุกๆ 24 ชั่วโมง (Wang และคณะ,

2014) ซึ่ง Biolayer ต้องการน้ำในการรักษาการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพไว้ BSF ที่มีการปรับปรุงประเภทนี้สามารถกำจัด MS2 และ Rotavirus ได้ถึง log 4 (Bradley และคณะ, 2011) เนื่องจากการดูดซับของไวรัสลงบนเหล็กออกไซด์และ Biolayer ที่เจริญเติบโต

อย่างไรก็ตามการวิจัยเพิ่มเติมมีความจำเป็นเพื่อตรวจสอบผลของปริมาณและคุณสมบัติของเหล็กที่เพิ่มลงในถังกรอง, คุณสมบัติของน้ำดิบ, และการแข่งขันของสารปนเปื้อนอื่นๆ ต่อการดูดซับสารหนูลงบนเหล็ก

2.4 การดูดซับ (Adsorption) (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ หมายถึง การที่สารดูดซับ (Adsorbent) สัมผัสโดยตรงกับสารถูกดูดซับ (Adsorbate) แล้วทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไป โดยสารที่ถูกดูดซับได้นั้นเป็นสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface Free Energy) ต่ำ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ การเกิดกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อสารดูดซับกับสารถูกดูดซับสัมผัสกันโดยตรง ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น พื้นที่ผิวตัวดูดซับ ธรรมชาติของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ (อาทิ อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น พลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับ) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดูดซับทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลงด้วย

การดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) โดยมีวิวัฒนาการหนึ่งเป็นของแข็งเสมอและเป็นวิวัฒนาการคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเกาะบนผิวหน้าของสารดูดซับของแข็ง ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของสารดูดซับที่มีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารถูกดูดซับ การดูดซับบนผิวสารดูดซับของแข็งแบ่งตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption, Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพจะอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับของเหลวมีน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับ ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวติดที่สารดูดซับแทน ซึ่งการดูดซับทางกายภาพจะไม่มีแรงกระตุ้น (Activation Energy)

มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่าย และการดูดซับเกิดขึ้นซ้อนได้หลายชั้น (Multilayer) แต่ละชั้นจะซ้อนอยู่เหนือชั้นที่เกิดก่อนโดยจำนวนชั้นกับความเข้มข้นสารจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกันและเกิดได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption, Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีจะเกิดเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิมแล้วจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีการเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยากเนื่องจากการความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2 - 2 เปรียบเทียบสมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

หัวข้อ	การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ (kJ/mol)	50 – 400	~ 20 หรือน้อยกว่า
อุณหภูมิที่เกิด	สูง	ต่ำ
ชั้นของการดูดซับ	ไม่เกิดการผันกลับ	ผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกี่ยวข้องกับพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ	มี	ไม่มี
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ	แรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

ที่มา : (รววิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

นอกจากการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี ยังมีการแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange Adsorption) เป็นการดูดซับโดยอาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงข้าม และมีการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (Specific Adsorption) จะเกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ มีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยให้ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอนและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับในน้ำเพื่อเปรียบเทียบชนิดสารดูดซับที่ดีที่สุด

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

มีลักษณะของไอโซเทอม คือ เป็นการดูดซับขั้นเดียว เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงถึงพื้นผิวของสารดูดซับมีสารถูกดูดซับมากขึ้นจนถึงจุดที่สารดูดซับอิ่มตัวไม่เกิดการดูดซับใดๆ ได้ กราฟไอโซเทอมแบบแลงเมียร์สามารถสร้างได้จากการแปลงสมการของแลงเมียร์ แสดงในสมการที่ 2.4 และ 2.5

สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

$$C_s = \frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \quad (2.4)$$

โดยที่ C_s = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ

(ไมโครกรัมต่อไมโครกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล

(ไมโครกรัมต่อลิตร)

a = ค่าคงที่

b = สัมประสิทธิ์อิ่มตัว (ลิตรต่อไมโครกรัม)

m = มวลของของแข็งตัวดูดซับ (ไมโครกรัม)

x = มวลของสารปนเปื้อนถูกดูดซับบนผิวของแข็งตัวดูดซับ

สามารถเขียนสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

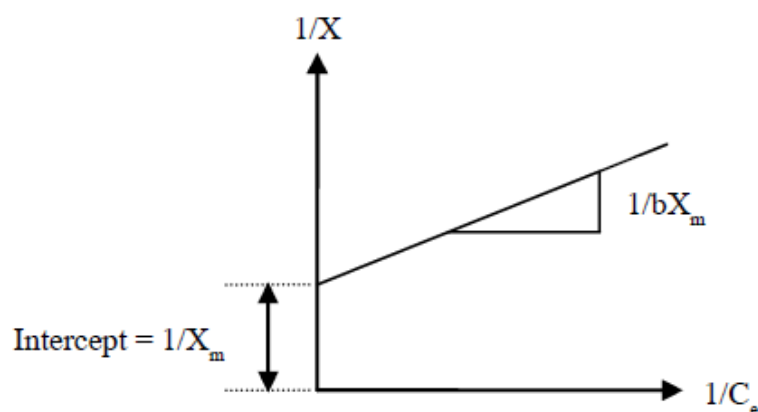
$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a} \quad (2.5)$$

เมื่อพล็อตกราฟด้วย แกน y คือ $\frac{C_e}{C_s}$ แกน x คือ C_e จะได้ $\frac{1}{a}$ เป็นค่าความชันของกราฟ

และ $\frac{1}{ab}$ เป็นค่าจุดตัดแกน y ดังรูปที่ 2.8

และสามารถแปลงสมการที่ 2.5 ได้เป็น

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{ab} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.8 สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)

2) ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช

มีลักษณะของไอโซเทอมคือ เป็นการดูดซับหลายชั้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารดูดซับ กราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดิชสามารถสร้างได้จากการแปลงสมการของฟรุนดิช แสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

สมการไอโซเทอมแบบฟรุนดิช

$$C_s = \frac{x}{m} = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.7)$$

โดยที่ C_s = มวลของสารบนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ
(ไมโครกรัมต่อไมโครกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารบนเปื้อนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล
(ไมโครกรัมต่อลิตร)

m = มวลของของแข็งตัวดูดซับ (ไมโครกรัม)

x = มวลของสารบนเปื้อนถูกดูดซับบนผิวของแข็งตัวดูดซับ

K_F = สัมประสิทธิ์การดูดซับของฟรุนดิช

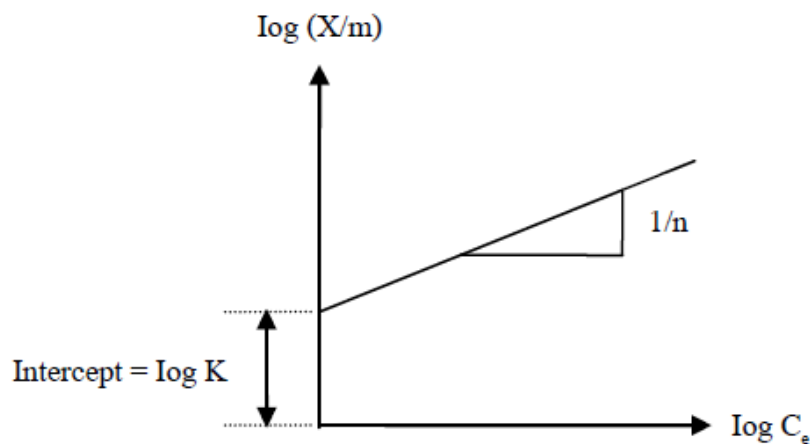
n = ค่าสัมประสิทธิ์ของการทดลอง

สามารถเขียนในรูปลอการิทึม ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log C_s = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.8)$$

เมื่อพล็อตกราฟด้วยแกน y คือ $\log C_s$ แกน x คือ $\log C_e$ จะได้ $\frac{1}{n}$ เป็นค่าความชันของกราฟ

และ $\log K_F$ เป็นค่าจุดตัดแกน y ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)

2.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1) ปฏิกริยาเทียมอันดับหนึ่ง

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.9)$$

$$\ln(q_e - q_t) - \ln q_e = -kt$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - kt \quad (2.10)$$

- เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)
 q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

จากผลการทดลองเมื่อพล็อตกราฟด้วย แกน y คือ $q_e - q_t$ แกน x คือ t จะได้ k เป็นค่าความชันของสมการเส้นตรง และ $\ln q_e$ เป็นจุดตัดแกน y ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหา $q_{e, cal}$ ได้

2) ปฏิกริยาเทียมอันดับสอง

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.12)$$

- เมื่อ k_2 = ค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับสอง (โมลกรัมต่อลิตร⁻¹) (นาที⁻¹)
 q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

จากผลการทดลองเมื่อพล็อตกราฟด้วย แกน y คือ $q_e - q_t$ แกน x คือ t จะได้ $\frac{1}{q_e}$ เป็นค่า

ความชันของสมการเส้นตรง สามารถนำมาคำนวณหา $q_{e, cal}$ ได้ และ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$ เป็นจุดตัดแกน y สามารถคำนวณค่า k_2 ได้ โดยการแทนค่า $q_{e, cal}$

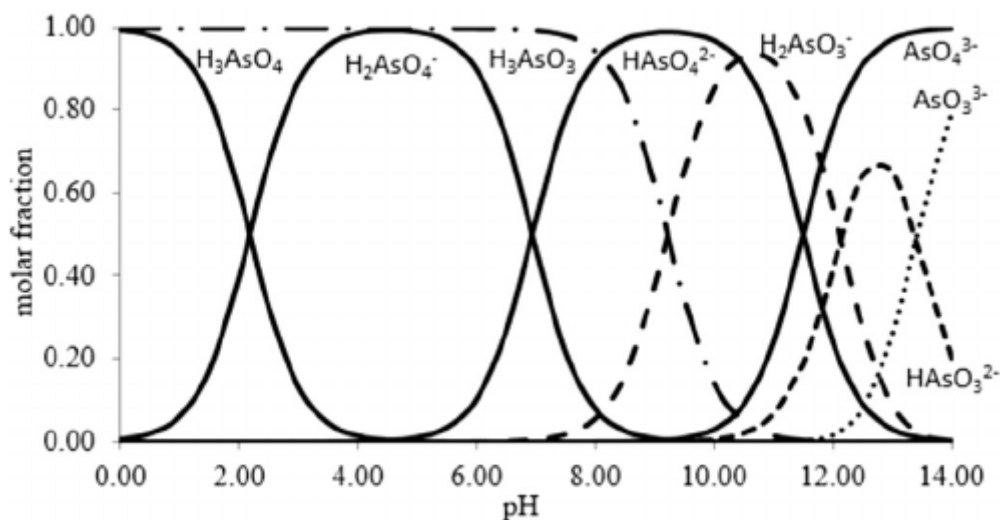
2.5 สารหนู (Arsenic, As)

2.5.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสารหนู

สารหนูหรืออาร์เซนิกเป็นธาตุกึ่งโลหะที่ประกอบด้วยเลขออกซิเดชัน -3 , 0 , $+3$ และ $+5$ โดยในธรรมชาติจะพบเฉพาะเลขออกซิเดชัน $+3$ และ $+5$ สารหนูอิสระจะพบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในส่วนประกอบของแร่ในรูป arsenide ของโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น และพบในรูปสารประกอบซัลไฟด์ (arsinosulfide) ได้แก่ Realgar (As_4S_4) และ Orpiment (As_2S_3) หรืออาจพบในรูปออกไซด์ (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530) สารประกอบสารหนูแบ่งออกเป็นสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ (Inorganic arsenic) และสารประกอบสารหนูอินทรีย์ (Organic arsenic) โดยสารหนูอินทรีย์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารหนูอนินทรีย์ นอกจากนี้สารหนูยังมีการก่อให้เกิดแก๊สพิษอาร์ซีน (AsH_3) ซึ่งเป็นแก๊สไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายกระเทียม (garlic odour) ที่ทำให้อาจเสียชีวิตได้ (สุนทร ศุภพงษ์, 2542) อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วสารหนูที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นพวกสารประกอบอนินทรีย์ในรูปอาร์เซไนต์ (Arsenite, AsO_3^{-3}) ซึ่งเป็น Arsenic (III) จะเสถียรในภาวะที่ไม่มีอากาศ (Reduction) และอาร์เซเนต (Arsenate, AsO_4^{-3}) ซึ่งเป็น Arsenic (V) จะเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจน (Oxidation) (ดลภพ ศรีบุตดา, 2557)

2.5.2 ความเสถียรของสปีชีส์สารหนู (Stability of Species)

สารหนูมีอยู่หลายรูป ขึ้นอยู่กับสภาวะต่างๆ ส่วนใหญ่ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะพบสารหนูในรูปอาร์เซไนต์หรืออาร์เซเนต อาร์เซไนต์ส่วนใหญ่พบในน้ำใต้ดินที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ แต่อาร์เซเนตจะพบในแหล่งน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่อย่างน้ำผิวดิน



รูปที่ 2.10 การกระจายของอาร์เซนไนต์และอาร์เซนเตกับค่าพีเอชในแหล่งน้ำ
ที่มา: (Ungureanu และคณะ, 2015)

การกระจายของสปีชีส์อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเตขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.10 อาร์เซนไนต์เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ต่ำ ที่พีเอชไม่เกิน 9 จะพบ H_3AsO_3 ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ ที่พีเอชสูงขึ้นไป 10 – 12 จะพบสปีชีส์ $H_2AsO_3^-$ ส่วนอาร์เซนเตจะปรากฏในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี ที่ค่าพีเอช 7 – 11 จึงพบ $HAsO_4^{2-}$ ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ และที่พีเอชต่ำกว่า 7 ส่วนมากจะพบ $H_2AsO_4^-$ (นันทนา ชูฉัตร, 2008)

2.5.3 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมของสารหนู (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2541)

(1) แหล่งธรรมชาติ (Naturel Source) สารหนูจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจากการสึกกร่อนของพื้นผิวเปลือกโลก หรือแก๊สจากภูเขาไฟ คาดว่ามีสารหนูจากแหล่งธรรมชาติในรูปของ Arsenious Oxide ที่เกิดจากการสึกกร่อนของพื้นผิวโลกประมาณ 72,000 ตันต่อปี

(2) การใช้สารเคมีทางการเกษตร การใช้สารจำพวกยาฆ่าแมลง ในการทำสวนผลไม้ไม่มีการใช้ lead arsenate มาก และสารประกอบสารหนูชนิดอื่นๆเป็นองค์ประกอบ และในปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (Super Phosphate) จะมีสารหนูเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 0.1% ซึ่งการใช้สารเคมีพวกนี้ในการเกษตรทำให้สารหนูเข้าไปปนเปื้อนในดิน บางส่วนถูกพืชดูดซับไป บางส่วนปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน และสัตว์ที่อยู่อาศัยบริเวณที่มีการปนเปื้อนก็ได้รับสารหนูเข้าไป

(3) กิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมที่ทำให้สารหนูแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเผาถ่านหิน โรงงานถลุงโลหะ เป็นต้น ในตารางที่ 2 - 3 แสดงถึงปริมาณสารหนูที่ออกสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 2 - 3 ปริมาณความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่จากกิจกรรมประเภทต่างๆ

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำที่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1-0.8
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22
โรงงานโลหะผสมทั้งสแตน-โมลิบดีนัม	0.9
โรงงานนิเกิล	0.04-1.4
เหมืองทั้งสแตน	0.2-1.35
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06
โรงงานตีบุก	0.5

ที่มา: (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2541)

2.5.4 ความเป็นพิษของสารหนู (Arsenic Toxicity)

สารหนูเป็นธาตุที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางด้วยกัน คือ การหายใจ การกิน (การดูดซึมของลำไส้) และการดูดซึมที่ผิวหนัง (การสัมผัส) ซึ่งการได้รับสารหนูที่เกิดพิษรุนแรงและมีโอกาสเกิดง่ายคือผ่านการกิน โดยอาการความเป็นพิษของสารหนุนั้นจะขึ้นกับรูปแบบการได้รับและปริมาณสารหนู สารหนูในรูปสารละลายนั้นจะมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูที่ไม่ละลาย อาจเนื่องมาจากสารหนูในสารละลายสามารถดูดซึมได้ดีกว่าสารหนูที่ไม่ละลาย โดยอาการของการได้รับพิษสารหนู (โรคพิษสารหนู) มีทั้งพิษเฉียบพลันและเรื้อรัง (สุนทร ศุภพงษ์, 2542)

(1) อาการพิษเฉียบพลัน อาการที่ชัดเจนในระยะต้นเป็นอาการทางระบบทางเดินอาหาร

- อาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น ปวดท้องรุนแรง คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วงอย่างรุนแรง อุจจาระเป็นสีคล้ายน้ำข้าวหรือถ่ายเป็นเลือด ทำให้เสียน้ำ เกือบหมดและเลือดอย่างรุนแรงจนเสียชีวิตได้

- อาการทางระบบประสาท มักมีอาการกับระบบประสาทส่วนกลางคือ ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ เพื่อ คลั่ง ชัก และหมดสติได้

- อาการทางระบบปัสสาวะ มักมีปัสสาวะออกมาน้อย เป็นเลือด มีไขขาวในปัสสาวะ

- อาการทางระบบโลหิต อาจมีภาวะโลหิตจาง เม็ดเลือดขาวและเกล็ดเลือดต่ำ

- อาการทางผิวหนัง จะเกิดหลังจากเกิดพิษเฉียบพลันหลายเดือนคือ เล็บมีเส้นขาวจางๆ อยู่ตามขวางของตัวเล็บ

(2) อาการพิษเรื้อรัง

- อาการทางระบบผิวหนัง มีสีผิวเข้มขึ้นและจางลงเป็นหย่อมๆ ผิวดำสลับขาวตามตัว ฝ่ามือฝ่าเท้าอาจมีตุ่มแข็ง (รูปที่ 2.11)

- อาการเสื่อมของระบบประสาทส่วนรอบ ทำให้ผู้ป่วยมีอาการชาและเจ็บตามปลายมือปลายเท้า และอาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงร่วม

- อาการผิดปกติทางระบบโลหิต มักพบภาวะเลือดจาง เม็ดเลือดขาว เกล็ดเลือด หรือเม็ดเลือดทุกชนิดต่ำ อาจพบเยื่อจมูกอักเสบจนถึงผนังก้นจมูกทะลุได้

- การก่อมะเร็ง อาจก่อให้เกิดมะเร็งปอด ตับ ไต ไชกระดูก หรือ ภาวะพิษปัสสาวะได้

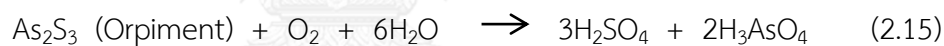
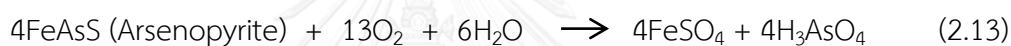


รูปที่ 2.11 อาการหนังหนาตัวเป็นตุ่มแข็งขึ้นที่ฝ่ามือและฝ่าเท้าเนื่องจากได้รับสารหนู
ที่มา: (Ahmad และ Khan, 2015)

ปกติแล้วสารหนูส่วนใหญ่ถูกขับออกมากับปัสสาวะ บางส่วนออกมากับเส้นผม เล็บ อุจจาระ มีน้อยมากที่จะถูกขับออกมากับลมหายใจ ซึ่งอัตราการขับสารหนูออกจากร่างกายค่อนข้างช้า ถ้ามีการรับสารหนูเข้าไปแบบฉับพลันจะใช้เวลาขับสารหนูประมาณ 10 วัน แต่ถ้ารับสารหนูติดต่อกันต้องใช้เวลาคขับสารหนูนานมากกว่า 1 ปี โดยทั่วไปแล้วสารหนูในปัสสาวะสะสมได้ประมาณ 10 - 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ในเลือด 1.5 - 2.5 ไมโครกรัมต่อลิตร และในเส้นผมจะต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สุมลทา วาจาบัณฑิต, 2549) องค์การอนามัยโลก แนะนำค่าปริมาณสารหนูในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Organization, 2011) การดื่มน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนเกินกว่าค่าที่องค์การอนามัยโลกแนะนำเป็นระยะเวลานานเป็นสาเหตุให้เกิดโรคพิษสารหนูเรื้อรังหรืออาร์ซีนิกโคซิส (Arsenicosis)

2.5.5 สารหนูในน้ำบาดาล (Arsenic in Ground Water)

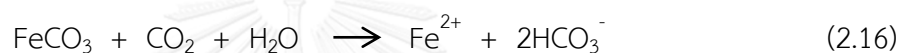
สารหนูในน้ำบาดาลเกิดจากธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ในธรรมชาติสารหนูอยู่ในรูปของสารประกอบหินและแร่ต่างๆ ซึ่งสารประกอบสารหนูที่พบบ่อยคือ แร่อาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite, FeAsS) โดยน้ำบาดาลจะเป็นส่วนของน้ำที่ถูกขังอยู่เต็มช่องว่างของดินและหิน ทำให้น้ำสัมผัสกับแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบและมีการชะละลายสารหนูจากแร่สู่น้ำบาดาล นอกจากนี้กิจกรรมของมนุษย์ เช่น การถลุงเหมืองโลหะ การทำเหมืองแร่ การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงในการทำการเกษตร ยังเป็นสาเหตุที่ทำให้สารหนูปนเปื้อนสู่น้ำบาดาลอีกด้วย แร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ เช่น Arsenopyrite, Realgar, Orpiment ซึ่งเป็นแร่ซัลไฟด์ เมื่อมีการผุพังหรือมีการขุดแร่พวกนี้ขึ้นมา (เช่น กิจกรรมการทำเหมือง) ทำให้สารหนูสัมผัสกับอากาศและน้ำ เกิดการออกซิเดชัน เปลี่ยนสารหนูให้อยู่ในรูปสารประกอบอาร์ซีเนต (Boyle และ Jonasson, 1973) ดังสมการที่ 2.13 – 2.15



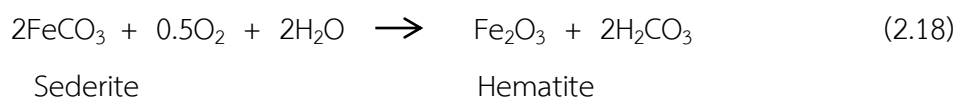
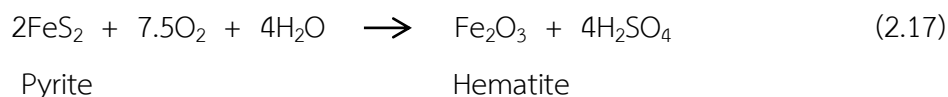
เมื่อฝนตกทำให้มีการชะล้างสารหนูจากแร่ สารหนูจึงแพร่กระจายออกมาสู่แหล่งน้ำและดิน และเกิดการซึมลงไปยังใต้ดิน ทำให้น้ำบาดาลได้รับการปนเปื้อนสารหนู ปริมาณสารหนูที่พบในน้ำบาดาลยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่น้ำบาดาลสัมผัสกับสารหนู ซึ่งน้ำบาดาลที่มีการเคลื่อนที่น้อย ไหลช้าหรืออยู่กับที่มักจะมีปริมาณสารหนูสูงกว่า

2.6 เหล็ก (Iron)

เหล็กเป็นโลหะสีเงินขาวหรือเทาเป็นเงา ที่มีอยู่บนผิวโลกมาก เหล็กมีความต้านทานแรงดึงสูงมากและสามารถนำไฟฟ้า นำความร้อน สามารถหล่อขึ้นรูปใหม่ได้ ตามธรรมชาติพบได้ทั้งในน้ำและบนดิน อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) ในดินมักพบในรูปเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) และเหล็กซัลไฟด์หรือสินแร่ไพไรต์ (Pyrite, FeS_2) เป็นแร่ที่ไม่เสถียรเมื่ออากาศชื้น ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554) แต่บางพื้นที่อาจพบสินแร่ซีเดอร์ไรต์ (Siderite, FeCO_2) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย แต่ถ้ามีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำปริมาณสูง เฟอร์รัสคาร์บอเนต (FeCO_3) ก็จะสามารถละลายเป็นเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ได้ดังสมการที่ 2.16 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)



เหล็กออกไซด์คือสารประกอบของเหล็กกับออกซิเจน มีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ สารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งขึ้นกับออกซิเจนที่มาเกาะกับเหล็ก โดยสารประกอบเฟอร์รัสจะมีสีขาว เทา หรือน้ำเงิน แต่สารประกอบเฟอร์ริกจะมีสีเหลืองแดงหรือสีน้ำตาล ส่วนใหญ่สารประกอบเฟอร์ริกในดินอยู่ในสินแร่ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) และเกอร์ไทต์ (Goethite, FeOOH) ซึ่งมีสีส้ม เกิดจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบจำพวกสารประกอบเฟอร์รัส ได้แก่ ไพไรต์ และ ซีเดอร์ไรต์ โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในธรรมชาติดังสมการ 2.17 – 2.18 (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)



จากนั้น Hematite จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็น Goethite ได้



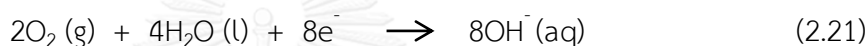
2.6.1 การเกิดสนิมเหล็ก (Rust) (จิราภรณ์ ปกรณ์, 2558)

สนิมเหล็กเป็นออกไซด์ของเหล็กที่ทำให้เกิดการผุกร่อน โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เกิดจากอะตอมของเหล็กถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ การเกิดสนิมเหล็กนั้นซับซ้อนมากต้องมีความชื้นและอากาศมาเกี่ยวข้อง ซึ่งมีปฏิกิริยาการเกิดสนิมดังต่อไปนี้

อะตอมของเหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อสัมผัสกับอากาศและความชื้น ดังสมการที่ 2.20



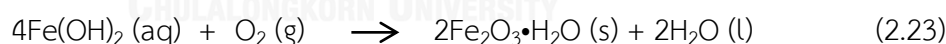
น้ำและออกซิเจนรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็นไฮดรอกไซด์ (OH^{-}) ดังสมการที่ 2.21



เหล็ก(II) (Fe^{2+}) รวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^{-}) ได้เหล็ก(II) ไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)_2) ซึ่งไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2.22



เหล็ก(II) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe(OH)}_2 \text{ (aq)}$) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอีกครั้งได้สนิมเหล็ก ดังสมการที่ 2.23



2.6.2 ชนิดของเหล็กที่พบในน้ำ

เหล็กในน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

(1) เหล็กอินทรีย์ เป็นเหล็กที่พบส่วนใหญ่ในน้ำผิวดิน มักอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic Complex Compounds) เช่น Humic Acid, Fulvic Acid หรือ Tannic Acid เป็นต้น

(2) เหล็กอนินทรีย์ เป็นเหล็กที่ส่วนใหญ่พบในน้ำบาดาล เมื่อสูบขึ้นมาแรกๆจะพบว่าน้ำมีลักษณะใสแต่เมื่อน้ำสัมผัสกับอากาศผ่านไปได้สักพักน้ำจะขุ่นแดง มักพบเหล็กคาร์บอนเนตมากที่สุด

เช่น เฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) รองลงมาเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และอาจอยู่ในรูปสารประกอบเหล็กคลอไรด์ (FeCl_2) อยู่บ้าง

เหล็กในน้ำบาดาลจะมี 3 ลักษณะด้วยกัน

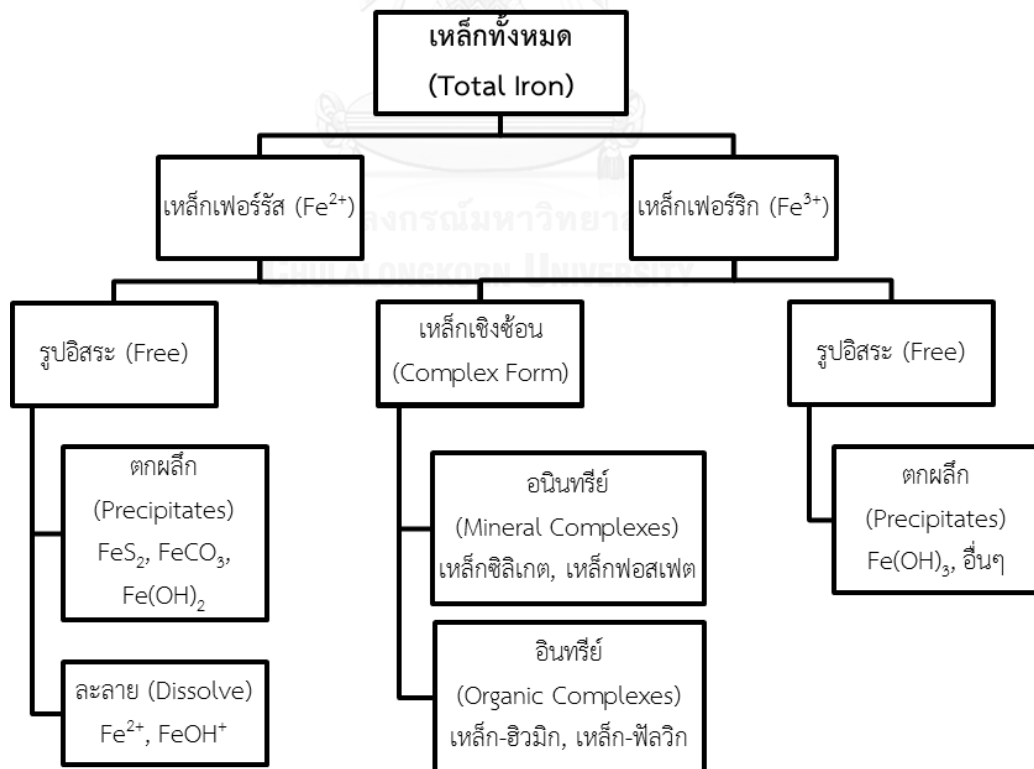
- เหล็กสามารถตกตะกอนได้ทันทีหลังจากได้รับการเติมอากาศในน้ำ
- เหล็กไม่สามารถตกตะกอนได้ง่ายๆหลังจากได้รับการเติมอากาศในน้ำ เนื่องจากน้ำบาดาล

ในสภาพเป็นกรด

- เหล็กสามารถตกตะกอนได้เพียงบางส่วนหลังจากได้รับการเติมอากาศในน้ำ ซึ่งจะพบเหล็กลักษณะนี้มากในน้ำบาดาล

2.6.3 สถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ

เหล็กที่อยู่ในน้ำแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เหล็กเฟอร์ริกและเหล็กเฟอร์รัส ซึ่งมีสถานะอื่นๆ แยกย่อยลงมาอีกหลายรูปแบบ แสดงรูปที่ 2.12 (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2545)



รูปที่ 2.12 แสดงสถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ

ที่มา: (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2545)

เหล็กในรูป Fe^{2+} อาจรวมตัวกับธาตุอื่นที่เป็นสารประกอบธาตุเดี่ยว เช่น FeS_2 ที่ไม่ละลายน้ำ และ $Fe(HCO_3)_2$ ที่ละลายน้ำ เป็นต้น หรือที่เป็นสารประกอบหลายธาตุซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (Complex form) Mineral Complex และ/หรือ Organic Complex เป็นต้น ส่วนเหล็ก Fe^{3+} อาจรวมตัวกับธาตุอื่นที่เป็นสารประกอบธาตุเดี่ยว เช่น $Fe(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำ เป็นต้น หรือที่เป็นสารประกอบหลายธาตุซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (Complex form) Mineral Complex และ/หรือ Organic Complex เป็นต้น

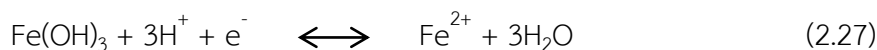
Fe^{2+} และ Fe^{3+} เป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ในน้ำได้และอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (Hydrate ion, $Fe(H_2O)_x^{n+}$) โดยเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับว่าเหล็กนั้นอยู่ในรูปใด ดังสมการที่ 2.24 – 2.26 (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)



และยังอาจเกิดปฏิกิริยากับไอออนลบของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Metal Complex) หรือสารประกอบเชิงซ้อนจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (Organic Metallic Compound) ได้ด้วย (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)

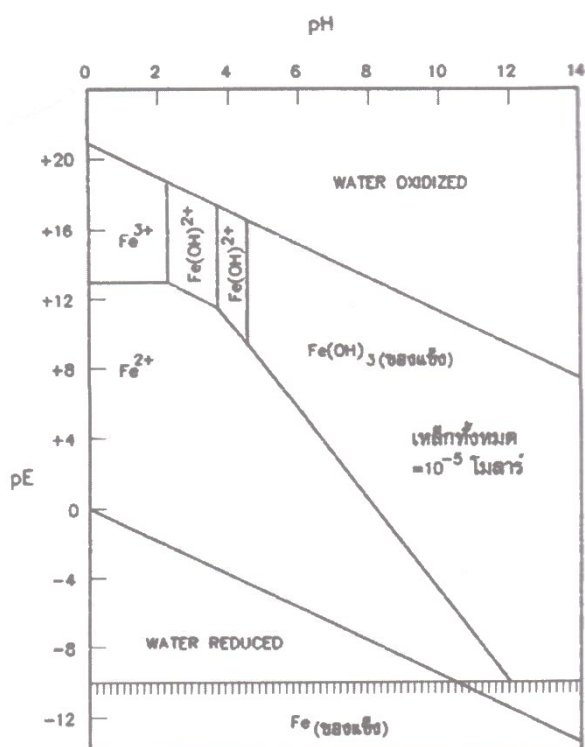
2.6.4 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก

ปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่ทำให้เหล็กละลายอยู่ในน้ำ โดยเกิดจากเหล็กเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นเหล็กเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2.27 (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)



การเปลี่ยนแปลงรูปแบบต่างๆของไอออนเหล็กที่เกิดขึ้นในน้ำสามารถหาได้จากไดอะแกรมแบบ 2 ตัวแปร (Two-Variable Diagram) โดยพิจารณาจาก pE/pH ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี (Electron Activity : a_e) และค่าไฮโดรเจนแอกติวิตี (Hydrogen Activity)

สามารถบอกออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของเหล็กได้ แต่ระดับของอิเล็กตรอนแอคตีวิตีของน้ำแปรผันในช่วงที่กว้างมาก จึงนิยมใช้ pE แสดงค่าอิเล็กตรอนแอคตีวิตี ในขณะที่ค่า pE เป็นลบ สารละลายจะมีค่าอิเล็กตรอนแอคตีวิตีสสูง ระบบจึงอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ถ้าค่า pE ของน้ำเป็นบวก สารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอคตีวิติต่ำ ระบบอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ ซึ่งค่า pE ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 (นลพวรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)



รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่าง pE และ pH กับสถานะของเหล็กในน้ำ
ที่มา: (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

รูปอิสระของเหล็กเฟอร์รัสอาจจะเป็นเหล็กละลายในไอออน Fe^{2+} หรือ FeOH^+ และเหล็กตกผลึกรูป Fe(OH)_2 ก็ได้ แต่รูปอิสระของเหล็กเฟอร์ริกจะตกผลึก Fe(OH)_3 เท่านั้นเนื่องจากเหล็ก Fe^{3+} ไม่สามารถเกิดในน้ำธรรมชาติได้ เพราะต้องมีพีเอชที่ต่ำมากและค่า pE ที่สูงมาก ในน้ำธรรมชาติที่มีพีเอชเป็นกลาง เมื่อน้ำกับอากาศสัมผัสกันเหล็กจะอยู่ในรูปเฟอร์ริกซึ่งจะเห็นได้จากสีแดงของ เหล็กเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ในน้ำ แต่น้ำบาดาลเหล็กมักจะอยู่ในรูปเฟอร์รัสที่ละลายอยู่ในน้ำ ส่วนน้ำที่ผิวดินที่พีเอชเป็นกลางและมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ เหล็กก็จะอยู่ในรูป Fe(OH)_3 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

แต่ว่าถึงแม้ที่พีเอชเท่ากันความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ก็ยังแตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับค่าคงที่การละลาย (K_{sp}) ของแต่ละรูปโดยที่มีค่าความสามารถในการละลายมากก็จะสามารถละลายได้มากและตกตะกอนได้ยาก ส่วนที่มีค่าความสามารถในการละลายต่ำก็จะสามารถละลายได้ยาก ตกตะกอนได้ดีกว่า (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)

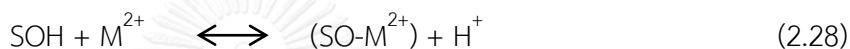
ตารางที่ 2 - 4 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบเหล็ก

ปฏิกิริยา	K_{sp} ที่ 25 องศาเซลเซียส
$\text{Fe(OH)}_2 (s) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	8.00×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2 (s) \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{OH}^-$	4.00×10^{-10}
$\text{FeCO}_3 (s) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	2.11×10^{-11}
$\text{FeCO}_3 (s) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	5.05×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2 (s) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3^-$	8.30×10^{-6}
$\text{Fe(OH)}_3 (s) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	4.00×10^{-38}
$\text{Fe(OH)}_3 (s) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_2^+ + \text{OH}^-$	5.13×10^{-17}
$\text{Fe(OH)}_3 (s) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.57×10^{-26}
$\text{Fe(OH)}_3 (s) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}^{4-}$	1.00×10^{-5}
$\text{Fe(OH)}_3 (s) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3 (d)$	2.90×10^{-7}

ที่มา : (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547)

2.7 ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (Hydrous Metal Oxide)

ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยโลหะประจุบวกตั้งแต่ 1 ไอออนหรือมากกว่า เชื่อมอยู่กับอนุภาคน้ำ (H_2O) ไฮโดรเจน (H) หรือออกซิเจน (O_2) ซึ่งครอบคลุมไปถึงไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซีไฮดรอก (-OOH) และออกไซด์ (-O) ซึ่งทำให้ไฮดรอกไซด์นั้นมีความชื้นสูงและเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (ธรรม รู้ประกอบกิจ, 2541) ไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติที่สำคัญคือพื้นที่ผิวที่มีความเป็นกรดเนื่องจากผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันสัมพันธ์กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเชื่อมต่อ เช่น ปฏิกิริยาการดูดติดผิว และการจับตัวเป็นก้อนไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวจะเกิดพันธะไอออนของโลหะได้เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.28 – 2.29 (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)



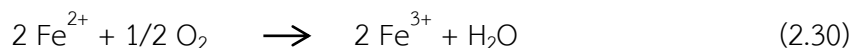
เมื่อ SOH = พื้นผิวไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

M^{2+} = ไอออนประจุบวกสอง

H^+ = ไฮโดรเจนไอออน

2.7.1 ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Hydrous Iron Oxide) (ธรรม รู้ประกอบกิจ, 2541)

ไฮดรอกไซด์ของเหล็กจะอยู่กระจายทั่วไปในดิน ดินเหนียว หรือตะกอนต่างๆ จะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุและอยู่ในรูปของออกไซด์ โดยรูปทางเคมีของเหล็กออกไซด์และไฮดรอกไซด์มักจะอยู่ในรูป Fe^{3+} เช่น $FeOH_3$ (Ferric Hydroxide), Fe_3O_4 (Magnetite), α - $FeOOH$ (Goethite) ส่วนใหญ่เหล็กไฮดรอกไซด์ที่มาจากไอออนของเหล็กจะเข้าระบบของเหลวหรือน้ำ ทั้งในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ในน้ำใต้ดินไอออนมักถูกรีดิวซ์เป็น Fe^{2+} ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ แต่ในน้ำผิวดินจะมีออกซิเจนละลายอยู่ Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์เป็น $Fe_2O_3 \cdot (H_2O)_x$ ซึ่งไม่ละลายน้ำและเกิดเฉพาะพีเอชที่เป็นต่างเท่านั้น เหล็กถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนละลายน้ำจากเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ในช่วงพีเอชที่สูงกว่า 7 เล็กน้อย ซึ่งพีเอชมีผลต่อการออกซิเดชัน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} พบว่าใน pH 5 ใช้เวลาถึง 2-3 ชั่วโมงในการออกซิเดชันแต่ขณะที่พีเอชประมาณ 7 ใช้เวลาเพียง 2-3 นาที



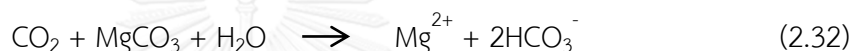
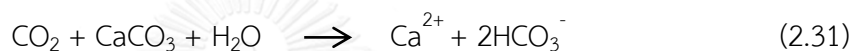
2.7.2 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (นลพรรณ ชันติกุลานนท์, 2554)

การดูดติดผิวเป็นการที่พื้นผิวพร้อมจะรับไอออนจากสารละลาย การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการแลกเปลี่ยนไอออนในเวลาเล็กน้อย ซึ่งการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีและกายภาพของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ รวมถึงส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาดของอนุภาค รูปร่างของสาร ปริมาณและธรรมชาติของพื้นผิวสัมผัส ความพรุน และพีเอชซึ่งมีผลต่อการดูดติดผิวของไอออนต่างๆเช่นกัน ในพีเอชที่สูงจะมีการดูดติดผิวไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ได้ดี ยิ่งพีเอชสูงขึ้น การดูดติดผิวไอออนบวกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากการดูดติดผิวไอออนลบ ที่พีเอชต่ำจะมีการดูดติดผิวบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ได้ดี นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดติดผิวไอออนบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิว และไอออนอื่นที่มารบกวนการดูดติดผิว

กลไกการดูดติดผิวไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์คือ โลหะออกไซด์ซึ่งจะมีพื้นผิวออกไซด์ที่แห้ง เพราะไม่มีน้ำเข้าไปจับ เมื่อโลหะออกไซด์สัมผัสกับน้ำ น้ำจะไปจับตรงที่ว่าง เกิดพันธะโดยการดูดติดผิวทางเคมี เกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวหน้า โปรตอนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดติดผิวไว้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมายังออกซิเจนไอออนที่อยู่ในชั้นผิว ซึ่งอาจมีการดูดติดผิวน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล

2.8 ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness)

ความกระด้างของน้ำเกิดจากไอออนโลหะประจุบวก (Cation) โดยประจุ +2 เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}), แมกนีเซียม (Mg^{2+}), เหล็ก (Fe^{2+}), สทรอนเซียม (Sr^{2+}), แมงกานีส (Mn^{2+}) เป็นต้น แต่ในน้ำธรรมชาติมี Ca^{2+} และ Mg^{2+} เป็นส่วนมาก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความกระด้างของน้ำเกิดจาก Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งจะบอกในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/l as CaCO_3) ซึ่งในน้ำบาดาลมักจะมีค่าความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดิน เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายชั้นหินปูนแคลเซียม (CaCO_3) และแมกนีเซียม (MgCO_3) ที่อยู่ในดิน ทำให้ในน้ำมีปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} มากขึ้น ดังสมการที่ 2.31 – 2.32 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)



ความกระด้างไม่มีอันตรายต่อการบริโภค จึงไม่มีการกำหนดมาตรฐานระดับความกระด้างที่แน่นอน มีการกำหนดระดับความกระด้างตามจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้ เช่น นำไปดื่ม ซึ่งน้ำดื่มไม่ควรมีความกระด้างเกิน 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545) การนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมและอุปโภคอาจเกิดปัญหาถ้ามีความกระด้างมาก ปัญหาที่เกิดจากความกระด้างได้แก่ ทำให้สบู่ไม่มีฟอง ท่อน้ำเย็นและท่อน้ำร้อนอุดตัน เกิดการอุดตันของอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ โดยแบ่งระดับความกระด้างได้เป็นดังตารางที่ 2 - 5

ตารางที่ 2 - 5 ตารางแสดงระดับความกระด้างของน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

ความกระด้าง (mg/l as CaCO_3)	ระดับความกระด้าง
0 - 75	น้ำอ่อน
75 - 150	น้ำกระด้างปานกลาง
150 - 300	น้ำกระด้าง
มากกว่า 300	น้ำกระด้างมาก

สำหรับน้ำที่จะมาผลิตน้ำประปาต้องมีความกระด้างอยู่ในช่วง 50-80 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในท่อ (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2544) ความกระด้างขั้นต่ำของน้ำต้องไม่น้อยกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

2.8.1 ชนิดของความกระด้าง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

การจำแนกชนิดของความกระด้างอาจจำแนกได้ 2 แบบ คือ จำแนกตามไอออนโลหะบวกที่มีอยู่ในน้ำ และการจำแนกตามไอออนลบที่มีอยู่ในน้ำ

(1) จำแนกตามไอออนโลหะบวกที่มีอยู่ในน้ำ

1) ความกระด้างแคลเซียม (Calcium Hardness)

2) ความกระด้างแมกนีเซียม (Magnesium Hardness)

วัตถุประสงค์ในการจำแนกความกระด้างมีวัตถุประสงค์ เพื่อใช้ในการออกแบบคำนวณปริมาณปูน - โซดา ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดความกระด้าง โดยคิดจากความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำ

(2) จำแนกตามไอออนลบที่มีอยู่ในน้ำ

1) ความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness) หรือเรียกว่า ความกระด้างชั่วคราว (Temporary Hardness) คือความกระด้างที่มีสมดุลอยู่กับสภาพต่างไบคาร์บอเนต ได้แก่ พวก CO_3^{2-} และ HCO_3^- ในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดน้ำกระด้าง เช่น $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaCO_3 , MgCO_3 ซึ่งความกระด้างจำพวกนี้สามารถกำจัดได้โดยการต้ม

2) ความกระด้างไม่ใช่คาร์บอเนต (Non-carbonate Hardness) หรือเรียกว่าความกระด้างถาวร (Permanent Hardness) คือความกระด้างที่ไม่ใช่ความกระด้างคาร์บอเนต จะเกิดจากคลอไรด์ (Cl^-) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) ของแคลเซียมและแมกนีเซียม เช่น CaCl_2 , MgCl_2 , CaSO_4 , MgSO_4 เป็นต้น ความกระด้างจำพวกนี้จะไม่สามารถกำจัดได้โดยการต้ม

การหาปริมาณของ Carbonate Hardness และ Non-carbonate Hardness

กรณีที่ Total Hardness มากกว่า Total Alkalinity

Carbonate Hardness = Total Alkalinity

Non-Carbonate Hardness = Total Hardness - Total Alkalinity

กรณีที่ Total Hardness น้อยกว่าหรือเท่ากับ Total Alkalinity

Carbonate Hardness = Total Hardness

Non-Carbonate Hardness = 0

2.9 เทคโนโลยีการกำจัดสารหนูในสถานะของเหลว (จอมจันทร์ นทีวัฒนา, 2553)

2.9.1 กระบวนการตกตะกอน (Precipitation Processes)

เป็นกระบวนการทำให้ตกตะกอน (Precipitation) หรือตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) โดยมีการเติมสารเคมีลงในน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนู เช่น สารส้ม เหล็ก ปูนขาว การรวมตัวกับเหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น สารเคมีที่เติมลงไปนี้จะไปรวมตัวกับสารหนูในน้ำ เปลี่ยนรูปเป็นตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ การตกตะกอนร่วมสารเคมีจะเกิดหลังจากตกตะกอนของแข็งหลักแล้วจะถูกดูดซับบนผิวของตะกอนหลักหรือเข้าไปแทนที่โครงสร้างผลึกองค์ประกอบของตะกอน แต่วิธีการตกตะกอนนี้เป็นวิธีใช้สารเคมีปริมาณมากทำให้สิ้นเปลือง

(1) ปูนขาว การใช้ปูนขาวในการตกตะกอนสารหนูสามารถตกตะกอน อาร์เซนเตได้ในรูปของแคลเซียมอาร์เซนเต (Calcium arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$) แต่อาร์เซนไต์ปูนขาวไม่สามารถตกตะกอนได้ นอกจากนี้การใช้ปูนขาวในการตกตะกอนนั้นก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเสถียรในสิ่งแวดล้อม

(2) เหล็กของเหล็กหรือเกลือของอะลูมิเนียม การตกตะกอนนี้ทำโดยการเติม เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, FeCl_3), เฟอร์ริกซัลเฟต (Ferric Sulfate, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum Sulphate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เกลือเฟอร์ริกมีประสิทธิภาพดีในการตกตะกอนอาร์เซนเต แต่สำหรับอาร์เซนไต์ต้องเติมออกซิเจนเพื่อให้เปลี่ยนรูปเป็นอาร์เซนเตก่อน นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีทางไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดเหล็กมาใช้ โดยทำให้เหล็กละลายน้ำมาตกตะกอนอาร์เซนเต แต่ถ้าเป็นอาร์เซนไต์ต้องทำการเติมออกซิเจนก่อนเช่นกัน แล้วจึงทำการกรองเอาเหล็กออกไซด์และ เหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ออก สำหรับเกลืออะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ตกตะกอนอะลูมิเนียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งตกตะกอนอาร์เซนเตได้ดี ตะกอนอะลูมิเนียมมีพื้นที่ในการดูดซับมากกว่าตะกอนเหล็กอีกด้วย แต่มีข้อจำกัดคืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้ดีกว่าเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

2.9.2 การดูดซับการดูดซึมและการแลกเปลี่ยนไอออน (Sorption and Ion Exchange)

Sorption คือกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และการดูดซึม (Absorption) การดูดซับเป็นการย้ายสารปนเปื้อนให้ติดติดบนพื้นผิวของสารดูดซับโดยมีการแลกเปลี่ยนไอออนมาเกี่ยวข้อง การดูดซึมเป็นการดูดซึมสารปนเปื้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุจะมีการเคลื่อนย้ายหรือแลกเปลี่ยนอะตอมในโครงสร้างสารดูดซับ สารดูดซับ (Sorbents) อาจเป็นเม็ดหรือเส้นใย ที่มีความสามารถ ดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนเพียงพอ วิธีนี้คุณลักษณะของน้ำมีผลต่อการนำไปใช้ได้แก่ พีเอช ค่ารีดอกซ์ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ชนิดและความเข้มข้นของสารหนู เป็นต้น โดยสารดูดซับที่ใช้ในการบำบัดสารหนูที่สำคัญมีดังนี้

(1) สารดูดซับกลุ่มที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ

- กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zerovalent Iron, Fe(0)) เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) และเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ (Iron Oxyhydroxide) สภาวะออกซิเดชันซึ่งจะมีออกซิเจนและน้ำทำให้เกิดเหล็กออกไซด์และเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ ทำหน้าที่ออกซิไดซ์โดยจะเกิดสนิมสีเขียวที่อาร์เซนไนต์ อาร์เซนเตตจะเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึกเกิดการดูดซับและดูดซึมที่ผิวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ แต่สภาวะรีดักชันจะเกิดการดูดซับและการแลกเปลี่ยนประจุอาร์เซนไนต์ อาร์เซนเตต เกิดตะกอนบนผิวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เป็นซิมพลีไซต์ (Symplectite, $Fe_3(AsO_4)_2$) หรือเรียลการ์ (Realgar, AsS_4) ข้อดีของวิธีนี้คือมีประสิทธิภาพสูงต้นทุนต่ำสามารถใช้กับความเข้มข้นอาร์เซนไนต์ อาร์เซนเตตในช่วงกว้าง โดยเหล็กที่ใช้อยู่ในรูปเกอร์ไทท์ (Goethite), เฟอริริกไฮไดรต์ (Ferrihydrite) และเฮมาไทต์ (Hematite) มีความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุดคือ เฟอริริกไฮไดรต์ รองลงมา เกอริไทท์ และเฮมาไทต์ ตามลำดับ

- กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxides) และอะลูมิเนียมออกซีไฮดรอกไซด์ (Aluminum Oxyhydroxides) เนื่องจากอะลูมิเนียมมีไอออนบวกสาม (Al^{3+}) มีประจุและขนาดใกล้เคียงกับเหล็ก (เฟอร์ริก) ทำให้สมบัติใกล้เคียงกัน แต่อะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารหนูน้อยกว่า โครงสร้างหลักๆของอะลูมิเนียมคือเดียสเปอร์ (Diaspore, $\alpha-AlO(OH)$) และโบฮีไมต์ (Boehmite, $\gamma-AlO(OH)$) ซึ่งเดียสเปอร์มีโครงสร้างผลึกคล้ายเกอร์ไทท์ โบฮีไมต์มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับลิพิโดโครไซต์ และในการใช้งานพบว่าอะลูมิเนียมออกไซด์หรือคอร์ันดัม (Corundum, $\gamma-Al_2O_3$) มีโครงสร้างคล้ายเฮมาไทต์ นอกจากนี้ยังมีการใช้

แอกติเวเตดอะลูมิเนียม (Activated Aluminum) ซึ่งในการเคลื่อนย้ายอาร์เซไนต์ต้องมีการเติมออกซิเจนให้เป็นอาร์เซเนตก่อน

- กลุ่มที่มีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แมงกานีสออกไซด์ (Manganese Oxides) และแมงกานีสออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Manganese Oxyhydroxides) การออกซิไดซ์แมงกานีส (II) จะทำให้เกิดแมงกานีสแมงกานีส (IV) ออกไซด์ (Mn(IV) Oxides) และแมงกานีส (IV) ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Mn(IV) Oxyhydroxides) แล้วจะตกตะกอนออกมา สารนี้มีพื้นที่ผิวมาก มีรูพรุนทำให้มีความสามารถในการดูดซับ จึงสามารถดูดซับดูดซึมอาร์เซไนต์ได้ โดยจะทำงานได้ดีในสภาวะที่แตกต่าง

(2) สารดูดซับที่มาจากชีวมวล สารดูดซับที่ทำมาจากชีวมวล เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ถ่านหินกัมมันต์สามารถดูดซับอาร์เซเนตจากน้ำได้บางส่วน แต่ไม่สามารถดูดซับอาร์เซไนต์ได้ ถ้าต้องการดูดซับอาร์เซไนต์ต้องนำมาปรับปรุงคุณภาพของถ่านกัมมันต์โดยนำไปซุบสารอินทรีย์ เช่น เงิน ทองแดง ซึ่งจะเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้การดูดซับดูดซึมอาร์เซไนต์เพิ่มขึ้น แต่การดูดซับอาร์เซเนตจะลดลง

(3) สารดูดซับเจลหรือเรซิน สารดูดซับเจลหรือเรซินจะมีองค์ประกอบโลหะเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิว สามารถเคลื่อนย้ายอาร์เซเนตได้ดี แต่ไม่สามารถเคลื่อนย้าย อาร์เซไนต์ได้ ต้องทำการเติมออกซิเจนให้อาร์เซไนต์เป็นอาร์เซเนตก่อน และต้องควบคุมพีเอช รวมถึงชนิดประจุสารหนูที่ละลายน้ำด้วย

2.9.3 การแยกโดยการกรองด้วยเยื่อกรอง (Membrane) และการแยกโดยใช้แม่เหล็ก

หลังจากกระบวนการตกตะกอน ตกตะกอนร่วม การดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจะต้องมีการนำน้ำมากรองเพื่อแยกออก การแยกมี 2 แบบด้วยกันคือ การแยกแบบใช้ความดัน และการแยกแบบไม่ใช้แรงดัน

(1) การแยกแบบใช้ความดัน เป็นการกรองมี 4 ชนิดคือ Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration และ Reverse Osmosis (RO) มีประสิทธิภาพดีในการเคลื่อนย้ายอาร์เซเนต สำหรับอาร์เซไนต์ต้องมีการเติมออกซิเจนก่อน แต่วิธีนี้จะมีราคาสูง เพราะใช้พลังงานมาก เป็นระบบที่ต้องใช้ความดันสูง

ตารางที่ 2 - 6 แสดงประเภทและเงื่อนไขในการใช้เยื่อกรองกรองด้วยความดัน

วิธีการ	เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด (ไมโครเมตร)	ความดัน (MPa)
Microfiltration	0.1	0.034-0.69
Ultrafiltration	0.01	0.034-0.69
Nanofiltration	0.001	0.34-6.9
Reverse Osmosis	0.0001	0.34-6.9

(2) การแยกแบบไม่ใช้ความดัน เป็นวิธีการแยกโดยใช้อนุภาคนาโนของแมกนีไทด์ ซึ่งเป็นสารประกอบแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นสูง อนุภาคนาโนแมกนีไทด์นี้มีพื้นที่ผิวมาก ใช้เป็นตัวดูดซับ อาร์เซนิตและอาร์เซเนตจากน้ำ โดยนำไปละลายกับสารละลายที่ปนเปื้อนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการแยกออกหลังจากดูดซับเสร็จโดยใช้อำนาจแม่เหล็กแยก วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ประสิทธิภาพสูง และบำบัดสารดูดซับได้ง่าย

2.9.4 เทคนิคกำแพงประติษฐ์ (Permeable Reactive Barriers, PRBs)

เทคนิคกำแพงประติษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนู โลหะหนักอื่นๆ หรือสารอินทรีย์ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ เป็นการใช้ดินที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบนำมาสร้างกำแพงล้อมรอบ บริเวณที่จะบำบัด เพื่อขวางทางน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูเอาไว้ อาจมีการใช้ปูนขาว หินปูน หรือ พอทแลนไคท์ร่วมโดยใส่ไปได้พื้นผิว เมื่อสัมผัสกับน้ำปนเปื้อนจะเกิดการดูดซับ แล้วหลังจากนั้นจึงทำการแยกออกโดยการกรอง การตกตะกอน หรือการตกตะกอนร่วมกับจุลินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์ในดิน จะสร้างโคลนินบนกำแพงประติษฐ์และเปลี่ยนซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ซึ่งการที่มีซัลไฟด์เกิดขึ้นทำให้สารหนูละลายน้ำ จึงต้องมีการเพิ่มเหล็กซัลไฟด์เพื่อเพิ่มการตกตะกอนอาร์เซนอไฟไรท์ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยวิธีนี้จะขึ้นกับการออกแบบติดตั้งและการตรวจวัดการปนเปื้อนระยะยาว

2.9.5 วิธีทางชีวภาพ

เป็นวิธีที่มีการใช้สิ่งมีชีวิตเข้ามาช่วยบำบัดสารหนู โดยมีปัจจัย คาร์บอนกัมมันตรังสี ฟอสฟอรัส คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสิ่งแวดล้อมมาเกี่ยวข้อง ซึ่งมีการประยุกต์ใช้สิ่งมีชีวิตดังนี้

(1) แบคทีเรีย (Bacteria) และเชื้อรา (Fungi) แบคทีเรียและเชื้อราที่ถูกนำมาใช้ เช่น *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* จุลินทรีย์จำพวกนี้ส่วนใหญ่จะพบได้ในดิน การใช้แบคทีเรียและเชื้อราในการบำบัดมีข้อควรระวังคือ มันอาจจะออกซิไดซ์เมธิลเลตติ้งอินทรีย์แก๊สอาร์เซนิก (Methylating Inorganic Arsenic) เป็นแก๊สเมธิลอาร์ซีน (Methyl Arsenic (Gas)) ซึ่งแก๊สอาร์ซีนมีความเป็นพิษสูง

(2) พืชบำบัด (Phytoremediation) ใช้พืชที่ยังมีชีวิตดูดสารหนูไปสะสมในพืช โดยสะสมในส่วนไหนนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช พืชที่ถูกนำมาใช้ เช่น ข้าว ธัญพืช บอน พุทธรักษา กกอียิปต์ และเฟิร์นชนิดต่างๆ โดยทั่วไปเมื่อพืชสะสมสารหนูซึ่งเป็นสารพิษ พืชจะมีกลไกขัดขวางไม่ให้สารหนูสะสม จะเกิดพลาตของเหล็ก (Iron Plaque) บริเวณราก เป็นสารประกอบเฟอร์ริกไฮไดรด์เกอร์ไทต์ สีเหมือนสนิมเหล็ก เป็นการสร้างเกราะป้องกันการสะสมสารพิษทางราก จึงมีการปรับปรุงพันธุวิศวกรรมทำให้พืชมีการเผาผลาญสารหนูและลดความเป็นพิษในพืช แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้เวลาในการบำบัดนาน มีปัญหาโรคพืชและแมลง ไม่สามารถทนต่อสารหนูและสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ นอกจากนี้ต้องมีการนำพืชไปกำจัดต่อ โดยอาจจะสกัดสารหนูออกจากพืช หรือการกำจัดโดยการเคลื่อนย้ายสารหนูโดยทำให้พืชให้แห้งแล้วผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้แข็งตัวแล้วนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย

(3) ธรรมชาติบำบัด เป็นกระบวนการที่มนุษย์ไม่เข้าไปเกี่ยวข้อง โดยจะเกิดกระบวนการทางชีวภาพ กายภาพ และเคมี ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพ การตกตะกอน การดูดซับ หรือการลดความเป็นพิษตามธรรมชาติ ข้อควรระวังในการใช้ธรรมชาติบำบัดคือ อาจเกิดการเพิ่มการแพร่กระจายของสารหนู นอกจากนั้นวิธีนี้ยังใช้เวลาในการบำบัดและตรวจวัดนาน จึงมักใช้วิธีนี้หลังจากบำบัดด้วยวิธีอื่นมาแล้ว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10 ความเป็นมาและประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ

ถังกรองทรายชีวภาพ (Biosand filter, BSF) ได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดย Centre for affordable water and sanitation technology (CAWST) จนปัจจุบันมีถัง BSF ค่าสุตรุ่น 10.0 (CAWST, 2009) จุดเริ่มต้นของถัง BSF มาจากความต้องการเทคโนโลยีในการผลิตน้ำดื่มที่ปลอดภัย ใช้งานได้ง่าย ราคาไม่แพง และใช้ในครัวเรือนขนาดเล็กได้ Palmateer และคณะ (1999) พบว่าถังกรองทรายช้าที่ออกแบบโดย Manz (Manz intermittent slow sand filter, MISSF) เป็นถังกรองทรายช้าขนาดเล็กที่สามารถใช้ในครัวเรือนได้ มีความสามารถในการกำจัด Total heterotrophic bacterial อย่างน้อยร้อยละ 83, *Giardia* cysts (โปรโตซัว) ร้อยละ 100, *Cryptosporidium* oocysts (พยาธิ) ร้อยละ 99.98 โดยฟิล์มชีวภาพในถัง MISSF ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษโดยกระบวนการยึดจับ (Entrapment), การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) หรือการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ (Biotransformation) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการกำจัด Total heterotrophic bacterial ของ MISSF ที่ไม่มีฟิล์มชีวภาพก็ยังคงสูงถึงร้อยละ 83

งานวิจัยของ Duke และคณะ (2006) ศึกษาการใช้ BSF ในพื้นที่จริง Duke พบว่าถัง BSF มีความสามารถในการลดเชื้อ *E. coli* และความขุ่นในน้ำตัวอย่างได้ โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถัง BSF มีการปนเปื้อน *E. coli* เหลือเพียง 0-10 CFU/100 ml นอกจากนี้ถัง BSF ยังสามารถลดความขุ่นจาก 6.2 NTU เหลือ 0.9 NTU

2.11 การพัฒนาถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

จุดเริ่มต้นของการนำเหล็กมาประยุกต์ใช้ในถัง BSF เริ่มจาก Khan และคณะ (2000) ต้องการพัฒนาถัง BSF ให้สามารถกำจัดสารหนูในน้ำ Khan นำถังกรอง 3 - Kalshi ธรรมดา มาปรับปรุงด้วยการเพิ่มชั้นเหล็ก โดยชั้นแรกของถังกรอง 3 - Kalshi เป็นชั้นทรายและเศษเหล็ก ชั้นที่สองเป็นชั้นของถ่านไม้และทรายละเอียด และชั้นที่สามเป็นชั้นที่ทำหน้าที่เก็บน้ำ ซึ่งการปรับปรุงนี้ทำให้ถัง 3 - Kalshi สามารถกำจัดสารหนูได้ดีขึ้น แต่วิธีนี้ยังไม่ยั่งยืนเพราะเกิดการสูญเสียสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic conductivity) อย่างรวดเร็ว ต่อมาถังรุ่นที่ 2 มีการนำเหล็กมาใช้เพื่อกำจัดเชื้อโรค You และคณะ (2005) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเหล็กลงไปบนทรายกรองเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไวรัส เนื่องจากเชื้อโรคถูกดูดซับบนเหล็กไฮดรอกไซด์ จากนั้น Ngai (Ngai และคณะ, 2006; Ngai และคณะ, 2007) ปรับปรุงเพิ่มเหล็กลงในถัง BSF ถือเป็นการปรับปรุงรุ่นที่ 3 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะกำจัดการปนเปื้อนทางเคมีและเชื้อก่อโรคไปพร้อมกัน การออกแบบถังกรองโดย Ngai ผสานแนวคิดของถัง BSF กับการกระจายของเหล็กลงไปอย่างชั้นบน โดยเหล็กออกไซด์และไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากสนิมเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนทางเคมี (เช่น As) ถัง BSF ที่มีการปรับปรุงเหล็กประเภทแรกคือ Kanchan arsenic filter แต่ Noubactep และคณะ (2009) พบข้อผิดพลาดของการที่เพิ่มเหล็กลงไปบนชั้นทรายนั่นทำให้ฟิล์มชีวภาพไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากเหล็กขัดขวางการละลายน้ำของออกซิเจนที่ใช้ในการเจริญเติบโต และ Chiew และคณะ (2009) พบว่าการเพิ่มตะปูเหล็กลงไปบนชั้นทราย นอกจากจะยับยั้งการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพแล้วยังทำให้น้ำไหลผ่านตะปูเหล็กเร็วเกินและลดเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำกับตะปูเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูจึงไม่ดีเท่าที่ควร และการที่เพิ่มชั้นเหล็กด้วยเหล็กเพียงอย่างเดียวยังทำให้เกิดการอุดตันเร็วจากตะกอนของเหล็กที่ถูกกัดกร่อน การนำเหล็กมาปรับปรุงถัง BSF รุ่นที่ 4 โดย Gottinger (2011) มีการผสมเหล็กกับวัสดุเฉื่อย (เช่น ทราย) ในชั้นปฏิกิริยาของเหล็กเพื่อป้องกันการอุดตัน โดยถัง BSF ชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า Iron - Amended Filter นอกจากนี้ Noubactep และคณะ (2012) ทดสอบอัตราส่วนของเหล็กต่อทรายพบว่าอัตราส่วนของเหล็กต่อทรายที่มากกว่า 0.52 ทำให้เกิดการอุดตันก่อนที่เหล็กจะหมดประสิทธิภาพ ซึ่งถือว่าเป็นการใช้เหล็กอย่างสิ้นเปลืองและทำให้อายุของตัวกรองสั้นลง อัตราส่วนของเหล็กต่อทรายที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.52 และปริมาณเหล็กที่ใช้ต่อหนึ่งถังกรองควรมีปริมาณขั้นต่ำ 3 กิโลกรัม โดย

Chiew และคณะ (2009) ใช้เหล็ก 5 กิโลกรัม และ Bradley และคณะ (2011) ใช้เหล็ก 5.54 กิโลกรัมต่อหนึ่งถังกรองซึ่งเกินปริมาณเหล็กขั้นต่ำที่แนะนำ

2.12 ประโยชน์ของเหล็กต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ

สารดูดซับที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบมีทั้งสารดูดซับที่มีเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส เป็นองค์ประกอบ จากงานวิจัยของ Ahammed และ Meera (2010) ที่เปรียบเทียบวัสดุกรอง 3 ชนิดคือ Dual - media (ทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์), ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์, ทรายไม่ได้เคลือบ พบว่า Dual - media มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียและโลหะหนักมากกว่าทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์อย่างเดียวเพียงเล็กน้อย ขณะที่ทรายที่ไม่ได้เคลือบมีประสิทธิภาพต่ำมาก น้ำที่ไหลผ่าน Dual - media มีความขุ่น 1.0 ± 0.1 NTU, Total coliform 3 ± 2 MPN/100 ml, ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (Heterotrophic plate count, HPC) 170 ± 20 CFU/ml, zinc 0.06 ± 0.01 mg/l ขณะที่น้ำผ่านทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์มีความขุ่น 1.0 ± 0.1 NTU, Total coliforms 4 ± 2 MPN/100 ml, ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด 181 ± 37 CFU/ml, zinc 0.20 ± 0.07 mg/l นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแบคทีเรีย เนื่องจากพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge, PZC) ของทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์ คือ พีเอช 8.6 ซึ่งมากกว่าพีเอชของน้ำปกติ ดังนั้นทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์ จึงมีประจุบวกสุทธิในช่วงพีเอชของน้ำธรรมชาติ และแบคทีเรียส่วนมากมีประจุลบเนื่องจากพบ Anionic group ภายในผนังเซลล์แบคทีเรีย ดังนั้นพื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็ก ไฮดรอกไซด์จึงดูดติดแบคทีเรียได้

และงานวิจัย Bradley และคณะ (2011) ยังพบว่า การเพิ่มเหล็กออกไซด์ในถัง BSF ช่วยเพิ่มการดูดซับของไวรัส ซึ่งเป็นการดูดซับจากไฟฟ้าสถิตของประจุลบของไวรัสกับประจุบวกของเหล็กออกไซด์ ซึ่งถัง BSF ที่มีการปรับปรุงด้วยเหล็กสามารถกำจัด MS2 bacteriophage ได้มากกว่า 4 log (ร้อยละ 99.99) และการทดลองในคอลัมน์ที่บรรจุทรายปรับปรุงเพิ่มเหล็กสามารถกำจัด MS2 ได้สูงถึง 5 log (ร้อยละ 99.999) เหล็กจึงมีส่วนช่วยในการกำจัดไวรัสและแบคทีเรีย

นอกจากนี้เหล็กยังมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก เช่น สารหนู โดย Nitzsche และคณะ (2015) พบว่าในน้ำบาดาลที่มีปริมาณเหล็กละลายอยู่มากเมื่อนำมาผ่านกรองทรายธรรมดาสามารถกำจัดสารหนูได้ถึงร้อยละ 95 เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาลจะอยู่ในรูป Fe (II) เมื่อสัมผัสกับอากาศ

จะถูกออกซิไดซ์โดยทันที Fe (II) เกิดกระบวนการออกซิเดชันเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงของ Fe (III) (Oxyhydr)oxide เคลือบอยู่บนชั้นทรายกรองมีลักษณะคล้ายกับแร่ Ferrihydrite ซึ่งแร่ Ferrihydrite มีพื้นผิวที่เฉพาะเจาะจงสูง และยึดเหนี่ยวกับสารหนูได้อย่างแข็งแรงผ่านรูปร่างเชิงซ้อนภายใน ส่วนมากจะพบการกำจัดสารหนูโดยการดูดซับสารหนูบนตะกอนที่มีลักษณะคล้าย Ferrihydrite แต่มีบางส่วนที่สารหนุตกตะกอนร่วมกับ Fe (III) (Oxyhydr)oxide และ Berg และคณะ (2006) พบว่าถ้าในน้ำมีปริมาณเหล็กมากพอที่อัตราส่วนเหล็กต่อสารหนูมากกว่า 50 และความเข้มข้นของสารหนูในน้ำใต้ดินน้อยกว่า 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร การกรองทรายถือเป็นวิธีที่ดีและเหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดสารหนูในชนบท

2.13 ผลขององค์ประกอบของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัด

องค์ประกอบของน้ำมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก จากงานวิจัยของ Chiew และคณะ (2009) พบว่าฟอสเฟตในน้ำเป็นตัวรบกวนการกำจัดสารหนู น้ำที่ผ่านกระบวนการดูดซับที่มีความเข้มข้นฟอสเฟตสูงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูลดลง ถ้าในน้ำมีความเข้มข้นของฟอสเฟตสูงมากกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของเหล็กต่ำ (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะทำให้การกำจัดสารหนูไม่สมบูรณ์ เนื่องจากฟอสเฟตแย่งพื้นที่ในการดูดซับสารหนูบนผิวเหล็ก ดังนั้นการกำจัดสารหนูจะสมบูรณ์เมื่อน้ำมีปริมาณเหล็กที่เพียงพอต่อฟอสเฟตและสารหนู แต่ในทางกลับกัน Wilkie และ Hering และคณะ (1996) พบว่าน้ำที่มีแคลเซียมจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีขึ้น ประจุของ Hydrous ferric oxide (HFO) ขึ้นอยู่กับพีเอช โดย PZC ของ HFO จะมีค่าอยู่ประมาณ 8.1 และที่พีเอช มากกว่า 8.1 HFO จะมีประจุเป็นลบ โดยมี Ca^{2+} เป็นตัวเชื่อม (Bridging) ระหว่างสารหนู (AsO_4^{3-}) และ HFO ทำให้แคลเซียมเป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูบน HFO

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

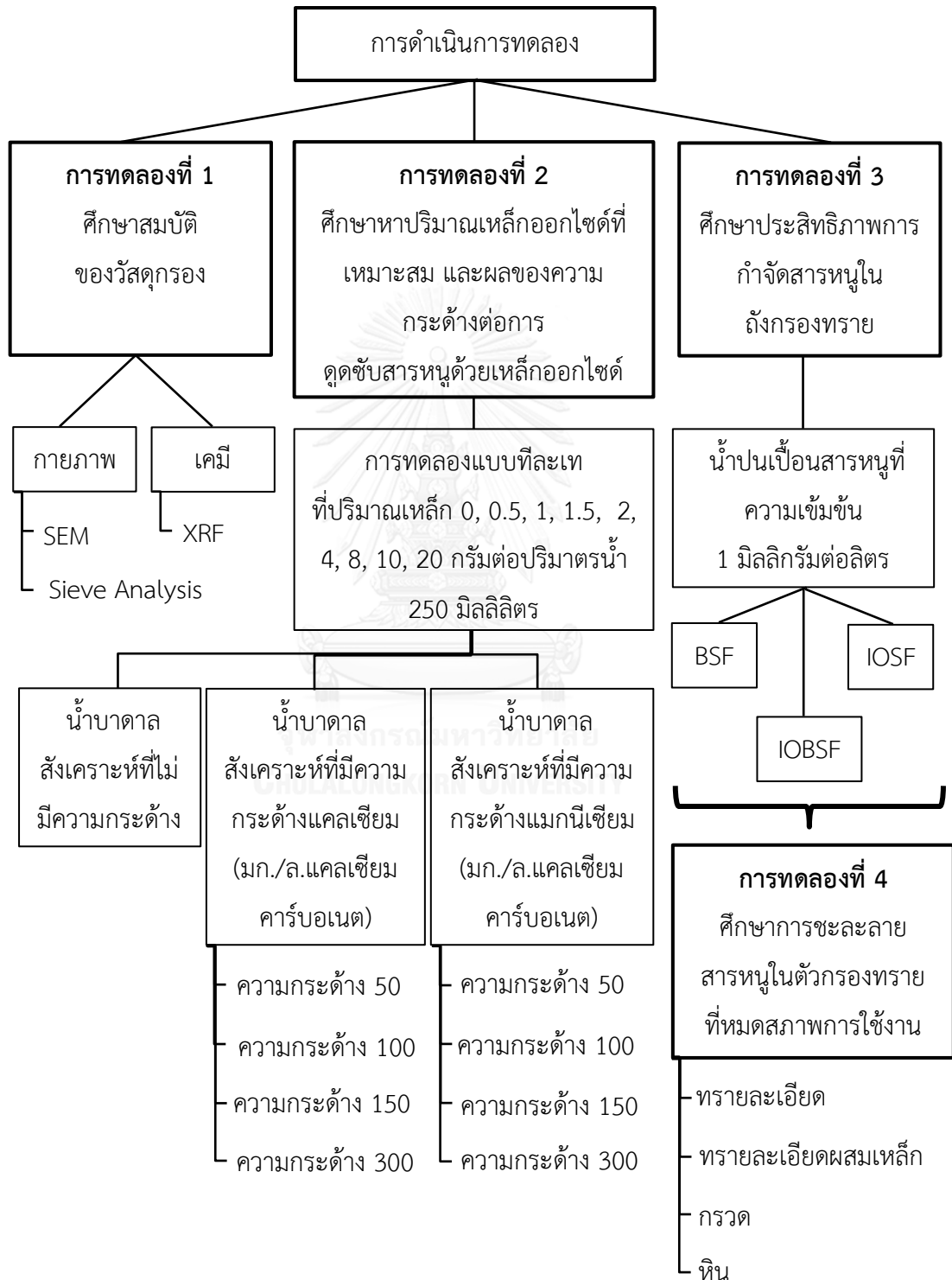
งานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการอาคารสีภาควิชา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาผลกระทบการจัดสารหนูในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์ ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ช่วงการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกรอง โดยวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุกรอง (ทราย เหล็ก และเหล็กออกไซด์) ด้วยเครื่อง SEM และการกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์ (Size Distribution) วิเคราะห์สมบัติทางเคมีองค์ประกอบของวัสดุกรองด้วยเครื่อง XRF

การทดลองที่ 2 ศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Experiment) ที่ปริมาณเหล็ก 9 ค่า คือ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 10, 20 กรัมต่อปริมาตรน้ำ 250 มิลลิลิตร (0, 2, 4, 6, 8, 16, 32, 40 และ 80 กรัมต่อลิตร) และการทดลองใช้น้ำบาดาลสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มี ความกระด้าง น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียมและน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม มีความเข้มข้นสารหนู 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชอยู่ในช่วง 8 โดยมีความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แตกต่างกัน 4 ค่าความเข้มข้น

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์ (IOBSF) เปรียบเทียบกับถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม (BSF) และศึกษาผลของฟิล์มชีวภาพในการกำจัดสารหนูโดยเปรียบเทียบถึง IOBSF กับถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก (IOSF) โดยใช้น้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองที่ 4 ศึกษาการชะละลายของสารหนูในตัวกรองทรายและเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพ โดยนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) หาปริมาณสารหนูที่จะถูกชะออกมาเพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดชั้นกรองต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการทดลอง

3.2 ตัวแปรในการทดลอง

ตารางที่ 3 - 1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในศึกษาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อการดูดซับที่เกิดขึ้นในการกำจัดสารหนูและสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุดูดซับ

ตัวแปร	Batch
ตัวแปรอิสระ	
1. ปริมาณเหล็กออกไซด์ (ต่อน้ำ 250 มิลลิลิตร)	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 10 และ 20 กรัม
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	ความเข้มข้นสารหนู ความเข้มข้นเหล็ก ความเข้มข้นแคลเซียม, แมกนีเซียม พีเอช
ตัวแปรควบคุม	
1. เวลากวน	1 ชั่วโมง
2. อัตราการกวน	130 รอบต่อนาที
3. สมบัติของน้ำที่ไหลเข้า	
- ความเข้มข้นสารหนู	1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- พีเอช	8
4. ชนิดของน้ำบาดาลสังเคราะห์	ไม่มีความกระด้าง มีความกระด้างแคลเซียม 50, 100, 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต มีความกระด้างแมกนีเซียม 50, 100, 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 3 - 2 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์และถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กออกไซด์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม

ตัวแปร	BSF	IOBSF	IOSF
ตัวแปรอิสระ			
1. ชนิดของตัวกรอง	ทราย	ทราย เหล็กออกไซด์	ทราย เหล็กออกไซด์
2. फिल्मชีวภาพ	มี	มี	ไม่มี
ตัวแปรตาม			
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	ความเข้มข้นสารหนู ความเข้มข้นเหล็ก พีเอช ออกซิเจนละลาย	ความเข้มข้นสารหนู ความเข้มข้นเหล็ก พีเอช ออกซิเจนละลาย	ความเข้มข้นสารหนู ความเข้มข้นเหล็ก พีเอช ออกซิเจนละลาย
ตัวแปรควบคุม			
1. ขนาดถังกรอง (ลบ. ซม.) (สูง×กว้าง×ยาว)	94 × 22.2 × 22.2	94 × 22.2 × 22.2	94 × 22.2 × 22.2
2. วัสดุกรอง	- 54.3	เหล็กออกไซด์ 54.3	เหล็กออกไซด์ 54.3
3. ชั้นกรองสูง (ซม.)	5	5	5
- ทรายชั้นบน	-	11	11
- เหล็ก+ทราย	49.3	38.3	38.3
- ทรายชั้นล่าง	0.4	0.4	0.4
4. อัตราไหลออก (ล./นาที)			
5. สมบัติน้ำ	1	1	1
- สารหนู (มก./ล.)			
6. จุดยุติ	As > 0.01 มก./ล. หรือ อัตราการไหลลดต่ำลง	As > 0.01 มก./ล. หรือ อัตราการไหลลดต่ำลง	As > 0.01 มก./ล. หรือ อัตราการไหลลดต่ำลง

ตารางที่ 3 - 3 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาการชะละลายของสารหนูในตัวกรองทราย และเหล็กที่หมดสภาพ

ตัวแปร	BSF	IOBSF	IOSF
ตัวแปรอิสระ			
1. ชนิดของตัวกรอง	ทรายละเอียด กรวด หิน	ทรายละเอียดชั้นบน เหล็กละเอียด ทรายละเอียดชั้นล่าง กรวด หิน	ทรายละเอียดชั้นบน เหล็กละเอียด ทรายละเอียดชั้นล่าง กรวด หิน
ตัวแปรตาม			
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	ความเข้มข้นสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู	ความเข้มข้นสารหนู
ตัวแปรควบคุม			
1. เวลาในการหมวน	18 ± 2 ชั่วโมง	18 ± 2 ชั่วโมง	18 ± 2 ชั่วโมง
2. ความถี่รอบการหมวน	30 รอบต่อนาที	30 รอบต่อนาที	30 รอบต่อนาที
3. พีเอช	2.8	2.8	2.8

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ถังมืออย่างพารา
- ถังมืออย่างไนไตร
- หน้ากากอนามัย
- หน้ากากป้องกันทางหายใจ
- ปีกเกอร์ (Beaker) 1 ลิตร
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- ซ้อนตักสาร
- แท่งแก้วคนสาร
- ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร, 500 มิลลิลิตร, 100 มิลลิลิตร และ 50 มิลลิลิตร
- ตู้อุ่น
- ปิเปตต์ (Pipette)
- เครื่องทดสอบการตกตะกอนของน้ำเสีย (Jar Tester)
- หลอดเซนตริฟิวส์ (Centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ตู้เย็นควบคุมอุณหภูมิ
- ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ
- สายยางแข็ง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร
- ถังแกลอนพลาสติก
- ตะแกรงร่อน (Seive) เบอร์ No. 8, 10, 20, 40, 50, 100, 200
- กระจบอกลง
- เครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (Rotator mixer)
- ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ

- กระจกกรอง Glass fiber (GF/F) 0.7 ไมครอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- เครื่องวัดออกซิเจนละลาย (DO meter)
- ตัวกรองเข็มฉีดยา (Syringe filter)

3.3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ทราบาย
- กรวด
- หิน
- เหล็ก
- น้ำกลั่น (18 M Ω)
- สารประกอบโซเดียมอาร์เซเนต (Disodium hydrogen arsenate; Na₂HAsO₄·H₂O)
- แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride; CaCl₂)
- แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride; MgCl₂)
- กรดอะซิติก (Acetic acid; C₂H₄O₂)
- โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate; NaHCO₃)
- กรดไนตริก (Nitric acid; HNO₃)
- โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)

3.3.3 เครื่องมือทดสอบและวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer; ICP-OES)
- เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีระดับความเข้มข้นต่ำ (Inductively coupled plasma-quadrupole mass spectrometry; ICP-QMS) (Detection limit 0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร)
- เครื่องวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น S4 Pioneer
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV

3.4 การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกรอง

3.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุกรอง

- 1) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของทรายละเอียด เหล็ก และเหล็กออกไซด์ด้วย SEM
- 2) วิเคราะห์การกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เบอร์ 4, 8, 10, 20, 40, 50, 100 และ 200 และคำนวณหาค่า Coefficient of Uniformity และ Coefficient of Curvature

การคำนวณหาค่า Coefficient of Uniformity (C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

โดยที่ D_{60} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 60

D_{10} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 10

การคำนวณหาค่า Coefficient of Curvature (C_c)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

โดยที่ D_{60} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 60

D_{10} คือ ขนาดของเหล็กขึ้นสนิมที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 10

D_{30} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 30

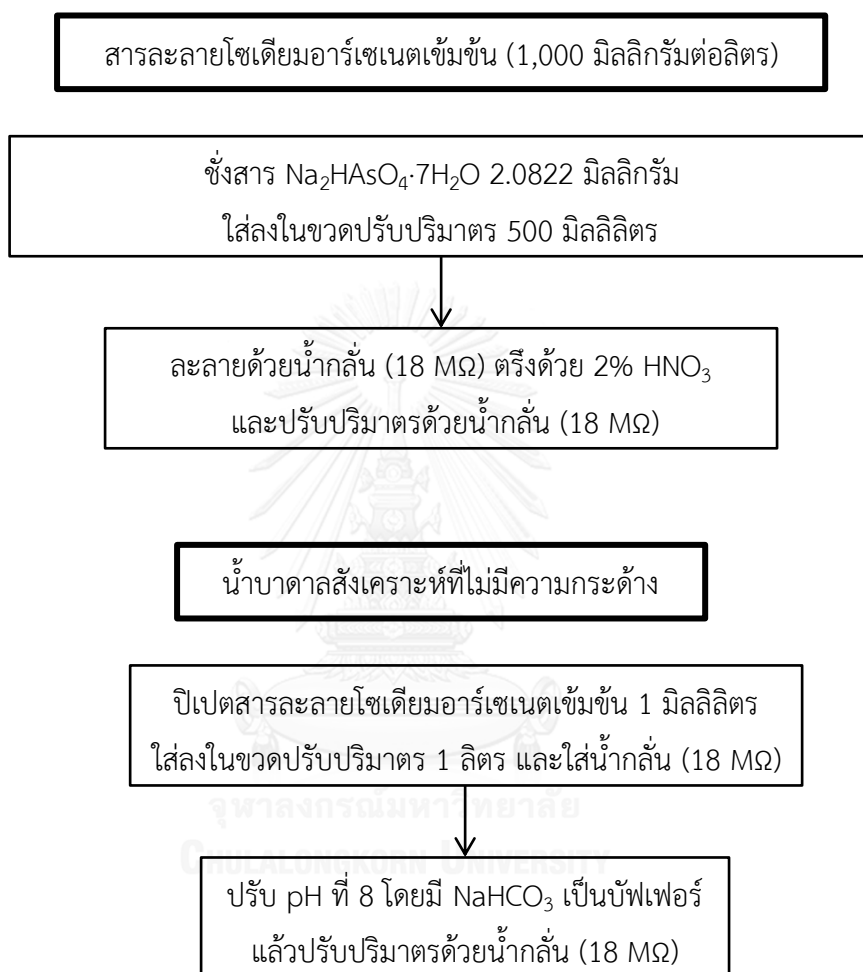
3.4.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุกรอง

1) วิเคราะห์องค์ประกอบของผิวทรายละเอียด เหล็ก และเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่อง XRF

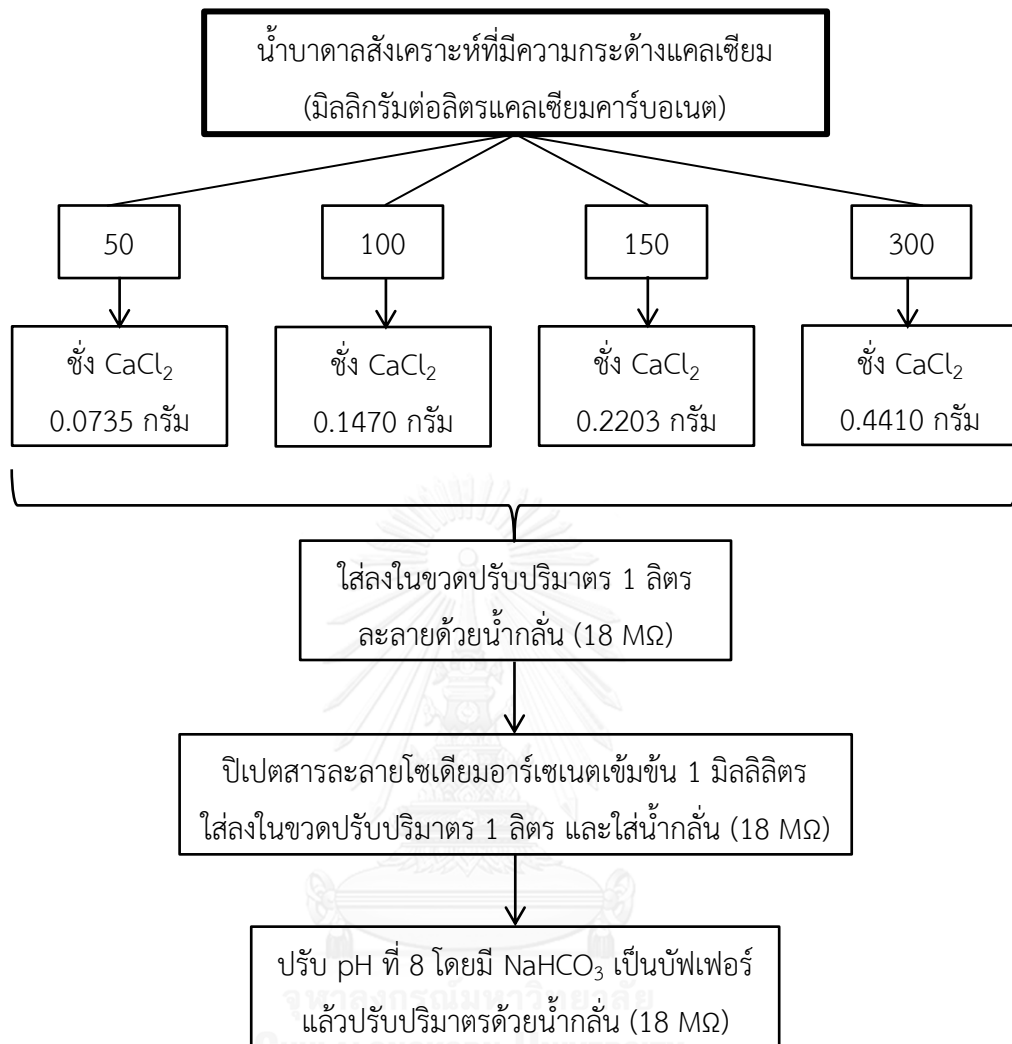


3.5 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์

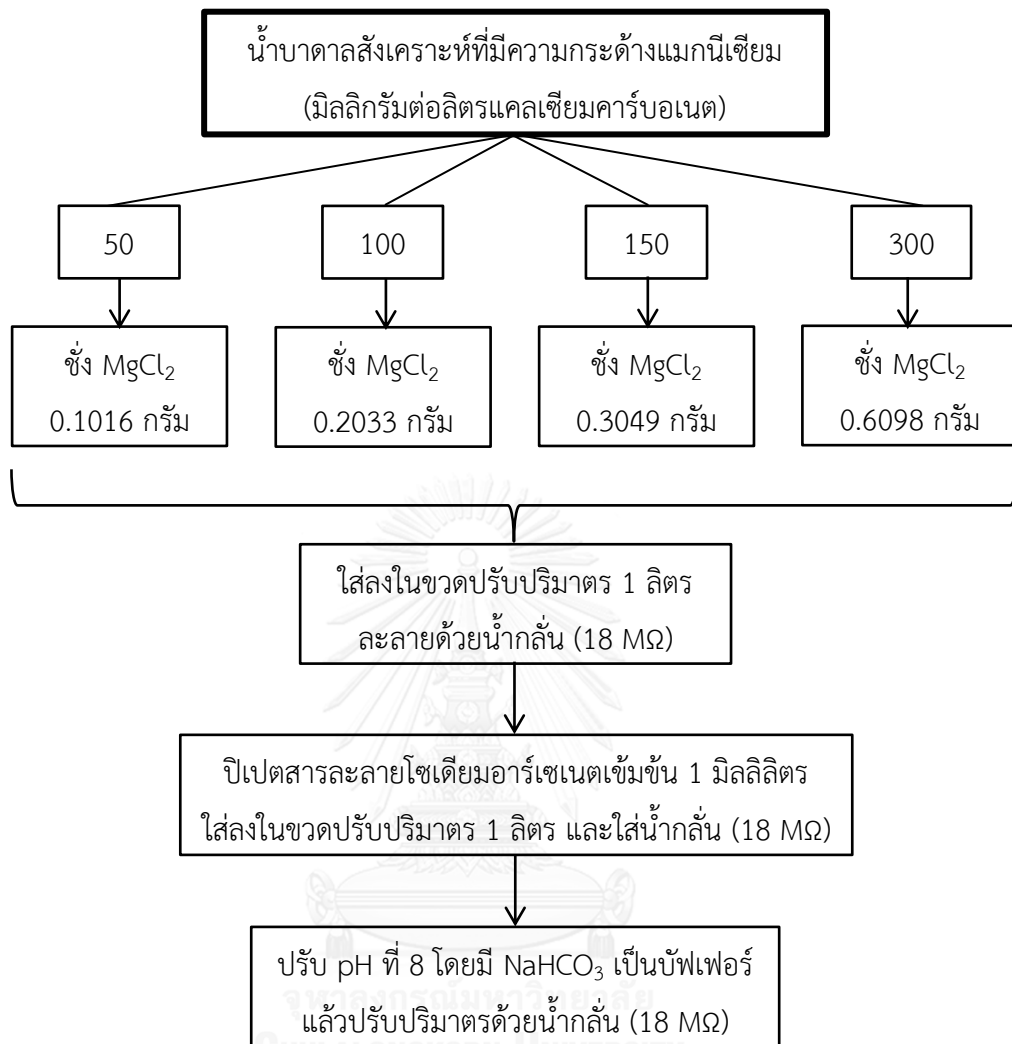
3.5.1 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์



รูปที่ 3.2 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มี ความกระด้าง



รูปที่ 3.3 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม



รูปที่ 3.4 การเตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม

1) เตรียมสารละลายโซเดียมอาร์เซเนตเข้มข้น (1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เตรียมสารละลายโซเดียมอาร์เซเนต 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายสารประกอบโซเดียมอาร์เซเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 2.0822 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น (18 M Ω) ตรึงด้วยกรดไนตริก 2% และปรับปริมาตรที่ 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีมีความกระด้าง ดังรูปที่ 3.2

ปิเปตสารละลายโซเดียมอาร์เซเนตเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร ปรับพีเอชที่ 8 โดยมีโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นบัฟเฟอร์ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (18 M Ω)

3) เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม ดังรูปที่ 3.3

เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคลเซียม 50, 100, 150, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 0.0735, 0.1470, 0.2203, 0.4410 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ใส่ขวดปรับปริมาตร 1 ลิตรละลายในน้ำกลั่น (18 M Ω) แล้วปิเปตสารละลายโซเดียมอาร์เซเนตเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร ปรับพีเอชที่ 8-8.5 โดยมีโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นบัฟเฟอร์ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (18 M Ω)

4) เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม ดังรูปที่ 3.4

เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแมกนีเซียม 50, 100, 150, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) 0.1016, 0.2033, 0.3049, 0.6098 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ใส่ขวดปรับปริมาตร 1 ลิตรละลายในน้ำกลั่น (18 M Ω) แล้วปิเปตสารละลายโซเดียมอาร์เซเนตเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร ปรับพีเอชที่ 8 โดยมีโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นบัฟเฟอร์ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (18 M Ω)

3.5.2 วิธีการทดลองแบบทีละเท

ศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม และผลของความกระด้างต่อการดูดซับสารหนู ด้วยเหล็กออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Experiment)

1) ชั่งปริมาณเหล็กทั้งหมด 9 ค่า คือ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 10 และ 20 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใส่น้ำบาดาลสังเคราะห์ 250 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ (ในแต่ละรอบจะใช้น้ำบาดาลสังเคราะห์ชนิดเดียวกัน)

น้ำบาดาลสังเคราะห์มีทั้งหมด 9 ชนิด คือ

- ไม่มีความกระด้าง
- ความกระด้างแคลเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแมกนีเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแมกนีเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแมกนีเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต
- ความกระด้างแมกนีเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

3) กวนด้วยเครื่อง Jar Test ความเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Youngran และคณะ, 2007) จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอน

4) กรองด้วยตัวกรองเซมิชนิดยาเพื่อเก็บตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร แล้วตรึงด้วยกรดไนตริก 2% ปริมาตร 2 มิลลิลิตร

5) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสารหนูด้วยเครื่อง ICP-QMS

3.6 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในถัง IOBSF กับถัง BSF และศึกษาอิทธิพลในการกำจัดสารหนูของฟิล์มชีวภาพโดยเปรียบเทียบกับ BSF กับถัง IOSF

3.6.1 การเตรียมวัสดุกรอง

1) ทรายละเอียด กรวด และหิน

ล้างทำความสะอาดทรายละเอียด, กรวด และหิน ให้สะอาดจนน้ำล้างไม่ขุ่น ตากแดดให้แห้ง และเก็บในที่แห้งไม่เปียกชื้น



รูปที่ 3.5 วัสดุกรองทรายละเอียด



รูปที่ 3.6 วัสดุกรองกรวด



รูปที่ 3.7 วัสดุกรองหิน

2) เหล็ก

นำเหล็กมาทำให้ขึ้นสนิมโดยการแช่น้ำในปริมาณน้อย และตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำเหล็กมาตากแดดให้แห้ง และเก็บในที่แห้งไม่เปียกชื้น



รูปที่ 3.8 วัสดุกรองเหล็กขึ้นสนิม

3.6.2 การเตรียมถังกรองคอนกรีต

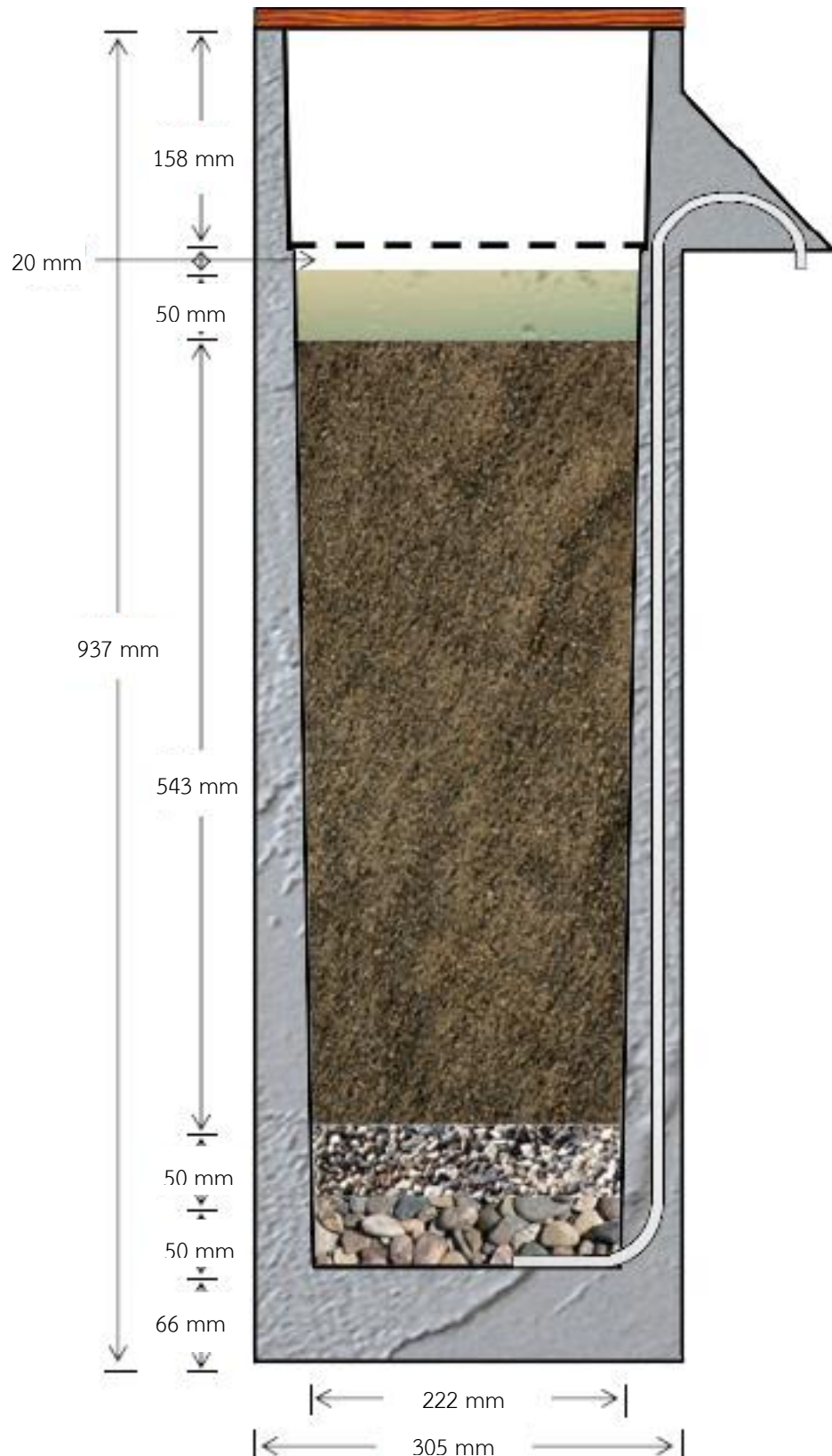
หล่อตัวถังกรองคอนกรีตตามแบบมาตรฐานของ CAWST (Centre for affordable water and sanitation technology) Version 10.0 โดยถังคอนกรีตมีขนาดดังรูปที่ 3.6

1) ผสมหิน 12 ลิตร, กรวด 12 ลิตร, ทราย 24 ลิตร, ซีเมนต์ 12 ลิตร และน้ำ 7 - 10 ลิตร (หิน : กรวด : ทราย : ซีเมนต์ 1 : 1 : 2 : 1)

2) ตัดตั้งสายยางกับแบบเหล็กสำหรับหล่อถังคอนกรีตของ CAWST Version 10.0

3) ทาน้ำมันพืชที่แบบเหล็กสำหรับหล่อถังคอนกรีตจนทั่ว

4) นำคอนกรีตที่ผสมเทลงแบบเหล็กหล่อ บ่มคอนกรีตให้เซตตัว 6 - 24 ชั่วโมงก่อนถอดแบบเหล็กหล่อออก



รูปที่ 3.9 ขนาดถังกรองคอนกรีต

ที่มา : (CAWST, 2009)

3.6.3 วิธีบรรจุตัวกรองลงในถังกรองคอนกรีต

1) ถัง BSF (ชั้นทราย + फिल्मชีวภาพ) ดังรูปที่ 3.7

ชั้นล่างสุดเป็นชั้นกรวดระบายน้ำประกอบด้วย หิน (6 - 12 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร และกรวด (1 - 6 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร ต่อไปบรรจุชั้นกรองด้วย ทรายละเอียด (≤ 0.7 มิลลิเมตร) สูง 54.3 เซนติเมตร และเลี้ยงฟิล์มชีวภาพบนชั้นทราย โดยนำจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใส่ถังกรองและเวียนน้ำเข้าออกถึงทุกวัน (ระยะเวลาเลี้ยงฟิล์มชีวภาพ 20 วัน) (Bradley และคณะ, 2011)

2) ถัง IOBSF (ชั้นทราย + เหล็ก + फिल्मชีวภาพ) ดังรูปที่ 3.8

ชั้นล่างสุดเป็นชั้นกรวดระบายน้ำประกอบด้วย หิน (6 - 12 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร และกรวด (1 - 6 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร ต่อไปบรรจุชั้นกรองซึ่งประกอบด้วยชั้นทรายละเอียด (≤ 0.7 มิลลิเมตร) สูง 38.3 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียดผสมกับเหล็กด้วยอัตราส่วนของเหล็ก : ทราย เท่ากับ 50 : 50 (โดยน้ำหนัก) อย่างละ 5 กิโลกรัม สูง 11 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียดสูง 5 เซนติเมตร และเลี้ยงฟิล์มชีวภาพบนชั้นทราย โดยนำจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใส่ถังกรองและเวียนน้ำเข้าออกถึงทุกวัน (ระยะเวลาเลี้ยงฟิล์มชีวภาพ 20 วัน) (Bradley และคณะ, 2011)

3) ถัง IOSF (ชั้นทราย+เหล็ก) ดังรูปที่ 3.9

ชั้นล่างสุดเป็นชั้นกรวดระบายน้ำประกอบด้วย หิน (ขนาดน้อยกว่า 6 - 12 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร และกรวด (ขนาดน้อยกว่า 1 - 6 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร ต่อไปบรรจุชั้นกรองซึ่งประกอบด้วยชั้นทรายละเอียด (ขนาดน้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร) สูง 38.3 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียดผสมกับเหล็กด้วยอัตราส่วนของเหล็ก : ทราย เท่ากับ 50 : 50 (โดยน้ำหนัก) อย่างละ 5 กิโลกรัม สูง 11 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียดสูง 5 เซนติเมตร

4) ทดสอบอัตราการไหลของถัง BSF, IOBSF และ IOSF ให้เท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาที โดยวัดจากน้ำปริมาตร 1 ลิตร จะใช้เวลาไหลออก 150 วินาที

3.6.4 วิธีทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน (Tracer test)

การทำ Tracer test เป็นการทดสอบอัตราการไหลในแบบตามกัน (Plug flow) เพื่อดูผลที่เกิดจาก Wall effect ในการบรรจุตัวกรอง และแก้ไขการไหลลัดวงจร (Short circuit) ในชั้นกรอง ซึ่งทำให้เกิดการกรองไม่ทั่วถึง และคุณภาพน้ำที่ออกมาไม่สะอาด

1) เตรียมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 1 มิลลิโมล ปริมาตรประมาณ 30 ลิตร

2) นำน้ำกลั่น (18 MΩ) ใส่ถังกรองประมาณ 25 ลิตร เพื่อไล่อากาศในช่องว่างชั้นกรองออกจนหมด

3) นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ใส่ในถังกรองอย่างต่อเนื่อง และเริ่มจับเวลาพร้อมวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ในน้ำที่ไหลออกจากถังกรองทุกๆ 1 นาที ค่าการนำไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และหยุดใส่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เมื่อค่าการนำไฟฟ้าคงที่

4) นำน้ำกลั่น (18 MΩ) ใส่ในถังกรองอย่างต่อเนื่องแทนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และจับเวลาพร้อมวัดค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ไหลออกจากถังกรองทุกๆ 1 นาที จนค่าการนำไฟฟ้าลดลงและหยุดใส่น้ำกลั่นเมื่อค่าการนำไฟฟ้าคงที่

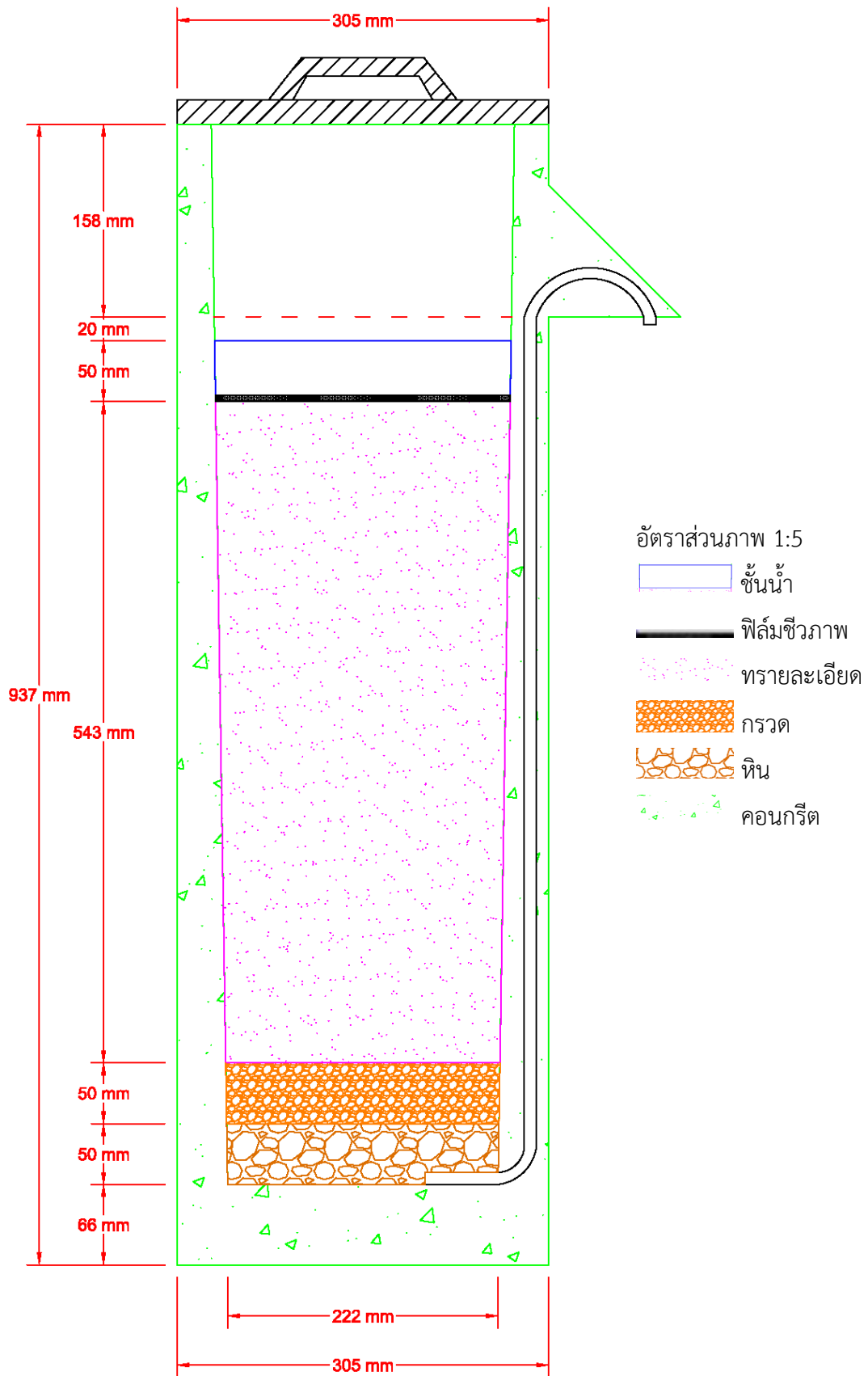
3.6.5 การเตรียมน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) เตรียมสารละลาย Sodium arsenate เข้มข้น (1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

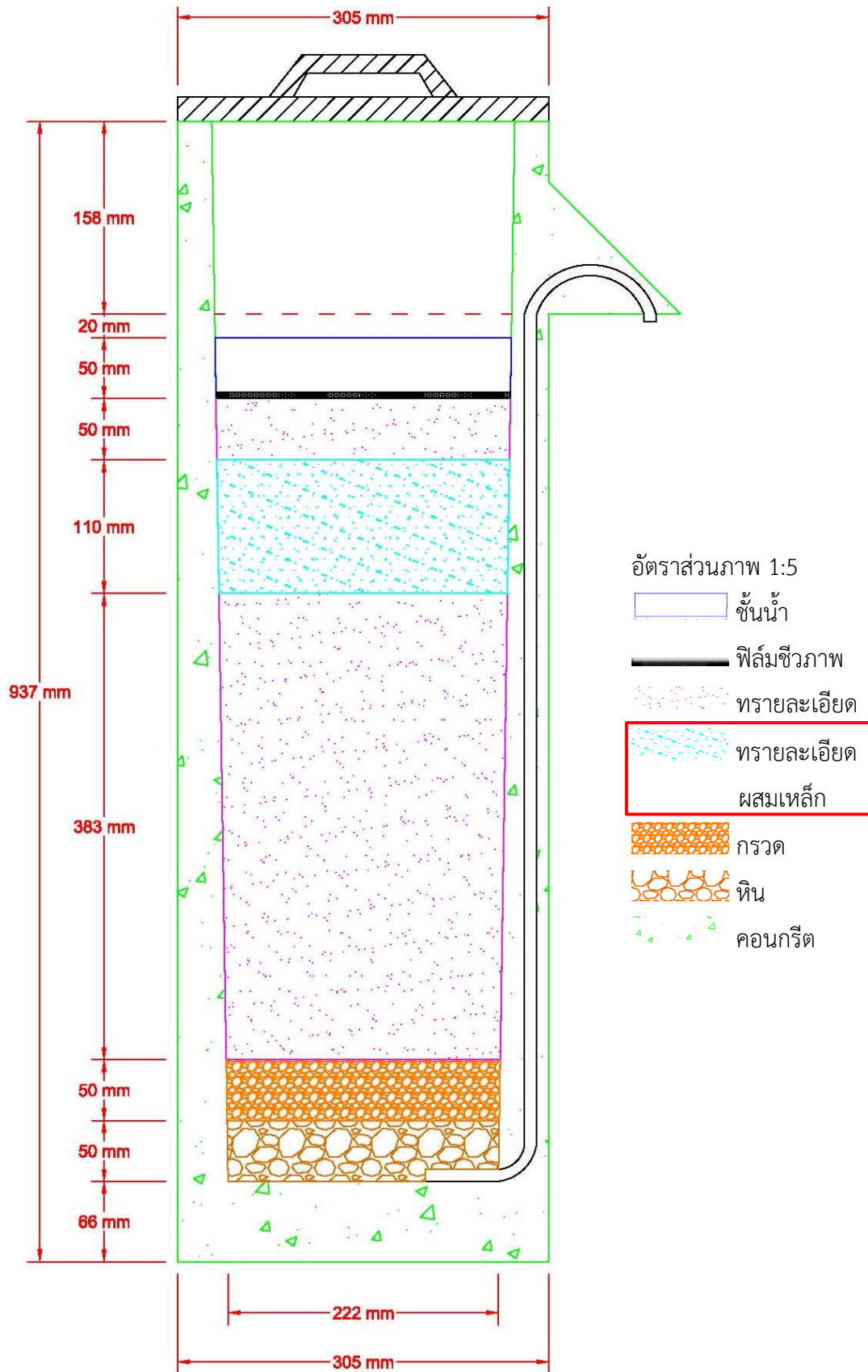
เตรียมสารละลาย Sodium arsenate 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์ซีเนต (Disodium arsenate; $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 2.0822 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น (18 MΩ) ตรึงด้วยกรดไนตริก 2% และปรับปริมาตรที่ 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมน้ำปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

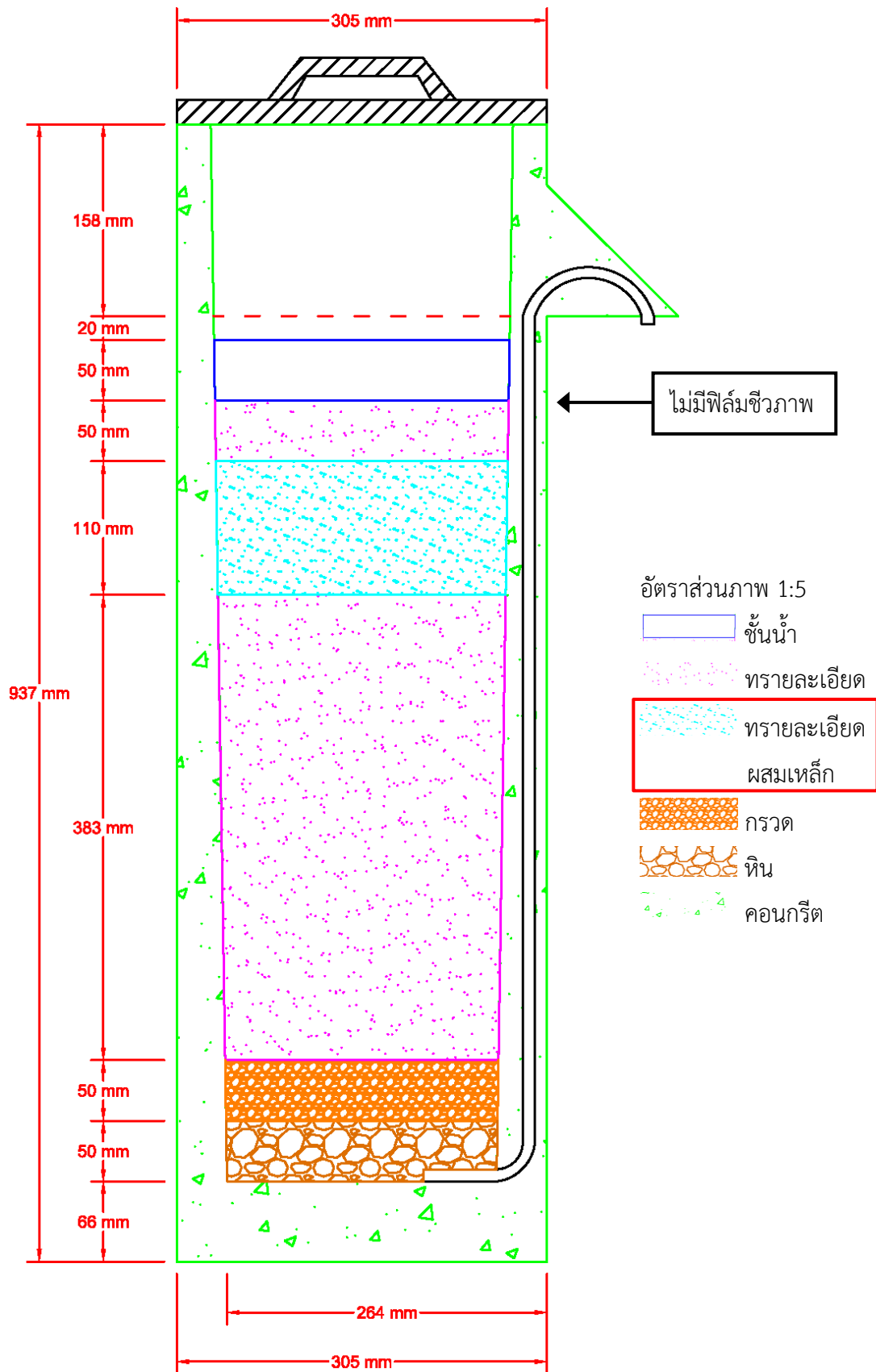
เตรียมน้ำปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลาย Sodium arsenate เข้มข้น 1 มิลลิลิตรต่อน้ำประปา 1 ลิตร ในแต่ละวันต้องมีการเตรียมน้ำปนเปื้อนสารหนู 36 ลิตร เนื่องจากแต่ละถังกรองทรายต้องใช้น้ำปนเปื้อนสารหนู 12 ลิตรต่อถัง จำนวนทั้งหมด 3 ถัง



รูปที่ 3.10 การบรรจุตัวกรองถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม ปรับปรุงภาพจาก (CAWST, 2009)



รูปที่ 3.11 การบรรจุตัวกรองถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก



รูปที่ 3.12 การบรรจุตัวกรองถังกรองทรายที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก (ไม่มีฟิล์มชีวภาพ)

3.6.6 วิธีการใช้งานถังกรองทราย

- 1) ใส่น้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถัง BSF, IOBSF และ IOSF 12 ลิตรต่อถังต่อวัน
- 2) นำน้ำปนเปื้อนสารหนูออกในวันรุ่งขึ้น โดยเติมน้ำปนเปื้อนสารหนูเข้าไปใหม่ 12 ลิตร ทำเช่นนี้ทุกวันจนกว่าชั้นกรองจะหมดประสิทธิภาพ (ความเข้มข้นสารหนูในน้ำหลังผ่านการกรองเกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร) หรืออัตราการไหลลดลงต่ำกว่า 0.4 ลิตรต่อนาที
- 3) วัดค่าพีเอช ออกซิเจนละลายน้ำ ทุกวัน และเก็บตัวอย่างน้ำ
- 4) วิเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูในน้ำด้วยเครื่อง ICP-QMS และวิเคราะห์ความเข้มข้นเหล็กในน้ำด้วยเครื่อง ICP-OES
- 5) หลังหยุดใช้งานถังกรอง ดำเนินการใช้งานถังกรองต่อด้วยน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนสารหนู และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูในน้ำ
- 6) นำทรายชั้นบนที่มีการเจริญเติบโตของไบโอฟิล์มไปวิเคราะห์ความสามารถการสร้างไบโอฟิล์มด้วยวิธี MTP (Microtiter Plate Assay)

3.7 การทดลองที่ 4 ศึกษาการชะละลายในตัวกรองทรายและเหล็กที่หมดสภาพการใช้งานด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP (U.S. EPA)

- 1) เจือจางกรดอะซิติกด้วยน้ำกลั่น (18 M Ω) ให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.88 ± 0.05
- 2) นำชั้นกรอง 1 กรัมมาสกัดด้วยกรดอะซิติกพีเอช 2.88 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1 : 20 กรัม : มิลลิลิตร)
- 3) หมุนด้วยเครื่อง Rotator mixer อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 - 20 ชั่วโมง
- 4) นำไปกรองด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรอง Glass fiber (GF/F) 4.7 เซนติเมตร 0.7 ไมครอน
- 5) วิเคราะห์หาความเข้มข้นสารหนูในน้ำใสด้วยเครื่อง ICP-QMS

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

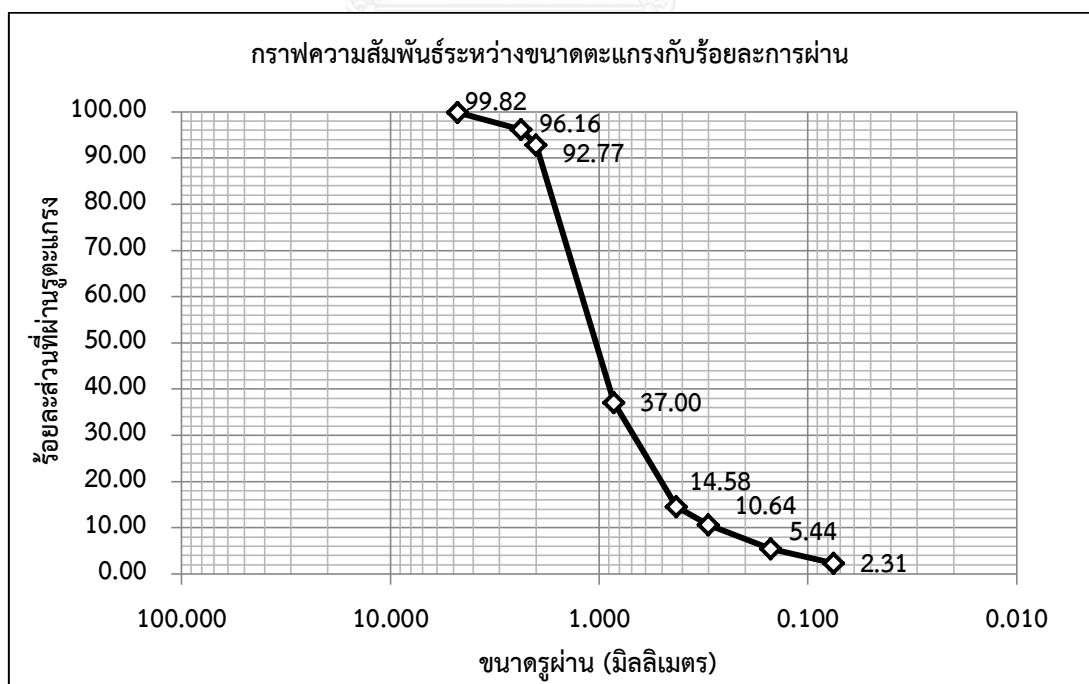
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุรอกก่อนผ่านการใช้งาน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์ (Size Distribution)

จากการศึกษาการกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4, 8, 10, 20, 40, 50, 100 และ 200 ซึ่งมีขนาดรูผ่าน 4.750, 2.360, 2.000, 0.850, 0.425, 0.300, 0.150 และ 0.075 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเหล็กออกไซด์ติดบนตะแกรงเบอร์ 20 มากที่สุด ร้อยละ 55.77 โดยน้ำหนัก และติดบนตะแกรงเบอร์ 40 ร้อยละโดยน้ำหนัก 22.42 แสดงว่าขนาดเหล็กออกไซด์ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 2.000 - 0.850 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4 - 1 เมื่อนำข้อมูลจากการร่อนผ่านตะแกรงมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรงกับร้อยละผ่าน ดังรูปที่ 4.1 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity; C_u) และหาค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature; C_c) อนุภาคที่มีลักษณะคละก้นได้ดีจะมีค่า C_u มากกว่า 6 และมีค่า C_c อยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 อนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอจะมีค่า C_u ประมาณ 1 (มานิตช่วยงาน, 2552) จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์มีค่า C_u เท่ากับ 4.15 และ C_c เท่ากับ 1.33 แสดงว่าอนุภาคเหล็กออกไซด์มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดที่แตกต่างกันมาก ทรายละเอียดที่ใช้เป็นวัสดุรอกมีขนาด 0.450 - 0.550 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเหล็กออกไซด์ส่วนมาก และช่วงขนาดของทรายละเอียดค่อนข้างแคบ ทรายละเอียดจึงมีขนาดที่สม่ำเสมอมากกว่าเหล็กออกไซด์ที่มีช่วงขนาดที่กว้าง ทำให้ขนาดของเหล็กออกไซด์ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับขนาดของทรายละเอียด

ตารางที่ 4 - 1 ผลการทดลองการกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง

น้ำหนักแห้งที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 1,047.55 กรัม							
เบอร์	ขนาด รูผ่าน (มม.)	นน. ตะแกรง (กรัม)	นน. ตะแกรง + ตัวอย่าง (กรัม)	นน. ตัวอย่าง ค้างตะแกรง (กรัม)	นน. ตัวอย่างค้าง ตะแกรง (ร้อยละ)	นน. ค้างตะแกรง สะสม (ร้อยละ)	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง (ร้อยละ)
4	4.750	447.46	449.30	1.84	0.18	0.18	99.82
8	2.360	389.17	427.53	38.36	3.66	3.84	96.16
10	2.000	399.42	434.98	35.56	3.39	7.23	92.77
20	0.850	352.96	937.14	584.18	55.77	63.00	37.00
40	0.425	315.84	550.71	234.87	22.42	85.42	14.58
50	0.300	299.88	341.18	41.30	3.94	89.36	10.64
100	0.150	280.61	335.11	54.50	5.20	94.56	5.44
200	0.075	270.16	302.92	32.76	3.13	97.69	2.31
Pan		264.87	288.88	24.01	2.29	99.98	0.02



รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคเหล็กออกไซด์

การคำนวณหาค่า Coefficient of Uniformity (C_u)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

โดยที่ D_{60} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 60

D_{10} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 10

$$C_u = \frac{1.2259}{0.2954}$$

$$= 4.15$$

การคำนวณหาค่า Coefficient of Curvature (C_c)

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

โดยที่ D_{60} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 60

D_{10} คือ ขนาดของเหล็กขึ้นสนิมที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 10

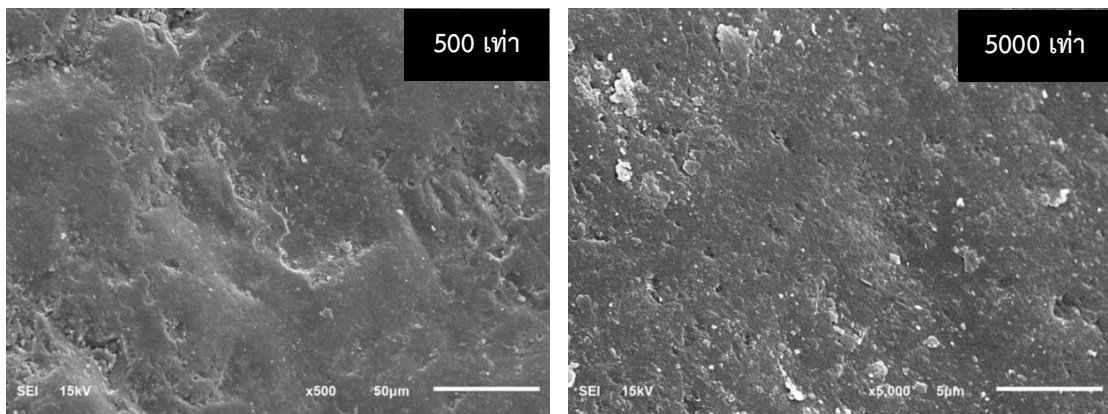
D_{30} คือ ขนาดของเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 30

$$C_c = \frac{0.6952^2}{0.2954 \times 1.2259}$$

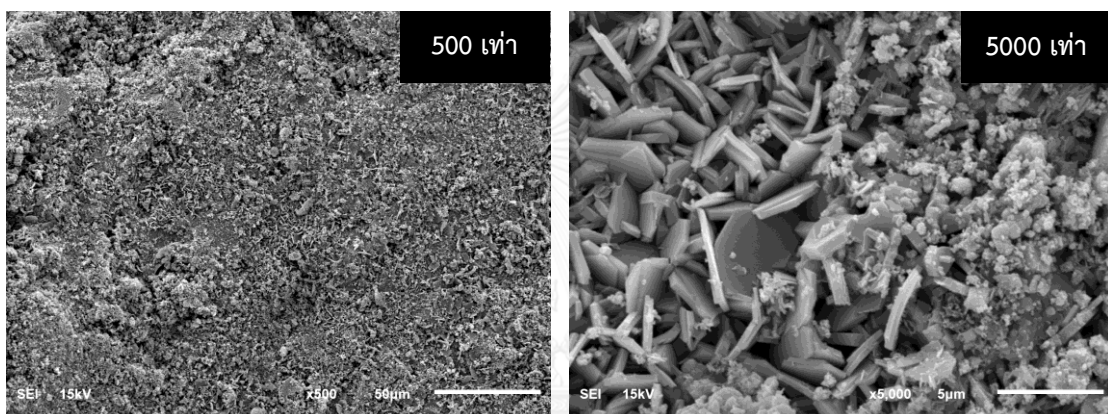
$$= 1.33$$

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุกรองด้วยเครื่อง SEM

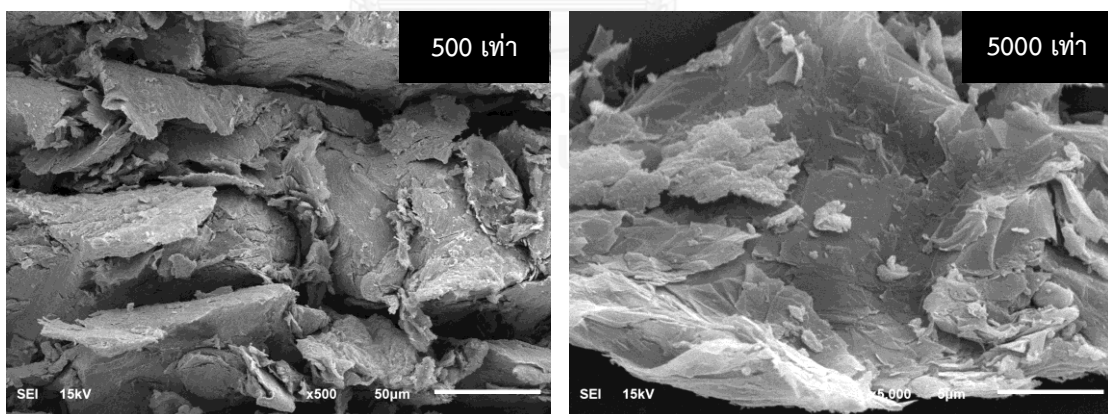
จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของตัวกรองต่างๆ คือ ทรายละเอียด เหล็ก และเหล็กขึ้นสนิม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าทรายละเอียดมีพื้นที่ผิวค่อนข้างเรียบ มีหลุมขรุขระบ้างเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของเหล็กและเหล็กที่ขึ้นสนิมพบว่า เหล็กจะมีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กที่มีพื้นผิวเรียบ แต่เหล็กที่ขึ้นสนิมจะมีลักษณะจับตัวกันเป็นแผ่น พื้นผิวมีลักษณะเป็นชั้นบางๆซ้อนกันหลายชั้น ดังรูปที่ 4.2



(ก) ถराยละเอียด



(ข) เหล็ก



(ค) เหล็กชั้นสนิม

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของถราย เหล็ก และเหล็กชั้นสนิมที่กำลังขยาย 500 และ 5000 เท่า

4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุกรอง ด้วยเครื่อง XRF

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวกรองด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังตารางที่ 4 - 2 พบว่าสารประกอบหลักของทรายละเอียดคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) รองลงมาคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ตามลำดับ ส่วนสารประกอบหลักของเหล็กและเหล็กขึ้นสนิมคือ แร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) รองลงมาคือซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าเหล็กและเหล็กขึ้นสนิมมีองค์ประกอบคล้ายกัน แต่เหล็กขึ้นสนิมมีสารประกอบแร่ฮีมาไทต์ลดลงและมีซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากผลวิเคราะห์ XRF แสดงให้เห็นว่าเหล็กที่ใช้ในการทดลองอยู่ในรูปแร่ฮีมาไทต์ ซึ่งเป็นเหล็กออกไซด์ (Iron(III) Oxide)

ตารางที่ 4 - 2 องค์ประกอบทางเคมีของตัวกรอง ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

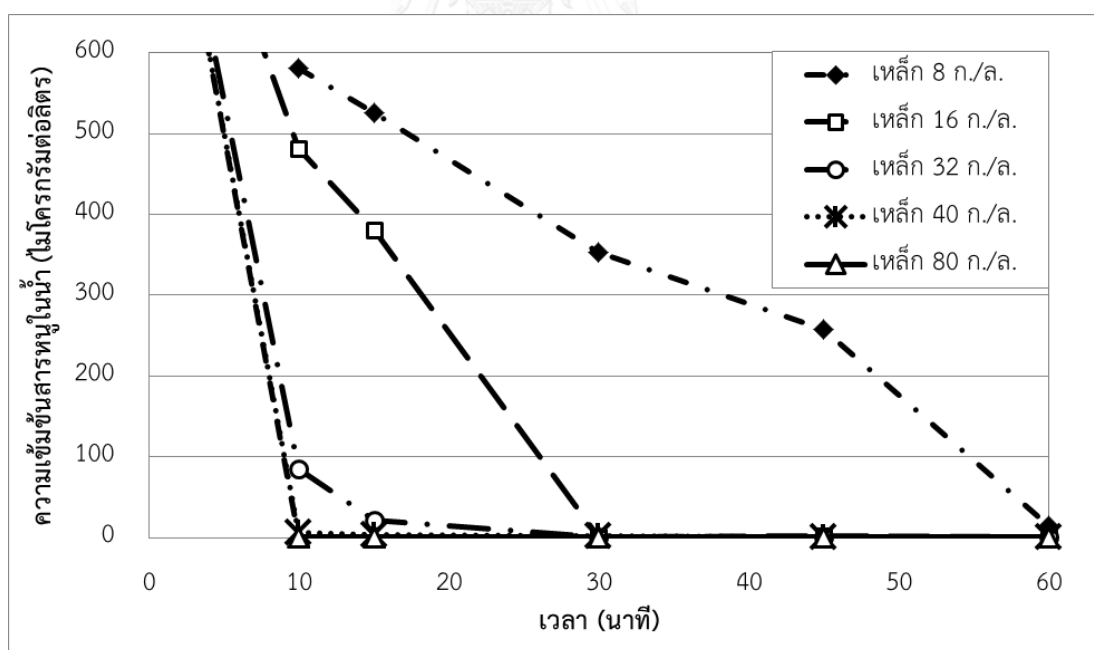
ชนิดวัสดุกรอง	ร้อยละ									
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	MnO	SO_3	CuO	Cr_2O_3
ทรายละเอียด	84.96	7.57	5.32	0.187	0.577	0.39	-	-	-	-
เหล็ก	1.38	-	-	97.15	-	-	0.486	0.437	0.144	0.143
เหล็กออกไซด์	2.7	-	-	96.08	-	-	0.422	0.144	0.166	0.142

แสดงว่าเมื่อนำเหล็กไปทำให้เกิดสนิมทำให้พื้นผิวของเหล็กเปลี่ยนไป จากพื้นผิวเหล็กที่เรียบ เปลี่ยนเป็นเหล็กขึ้นสนิมที่มีพื้นผิวเป็นชั้นซ้อนกัน แต่องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กและเหล็กขึ้นสนิมไม่ต่างกัน อาจเนื่องจากองค์ประกอบของเหล็กก่อนนำไปทำให้ขึ้นสนิมมีความเป็นเหล็กออกไซด์สูงอยู่แล้ว เมื่อนำไปทำให้เป็นสนิมองค์ประกอบทางเคมีจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมาก

4.2 การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูในน้ำด้วยเหล็กออกไซด์

4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetics)

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าการดูดซับที่เหล็ก 40 และ 80 กรัมต่อลิตร เข้าสู่สมดุลภายในเวลา 10 นาที ส่วนเหล็ก 16 และ 32 กรัมต่อลิตร เข้าสู่สมดุลภายในเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารหนูที่ใช้ปริมาณเหล็กมากจะทำให้เข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าการใช้เหล็กน้อย Dixit และ Hering (2003); Jeong และคณะ, (2007) พบว่าอัตราการดูดซับอาร์เซนิตแปรผันตรงกับปริมาณเหล็กออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์ทำให้อัตราการดูดซับอาร์เซนิตสูงขึ้น และอัตราการดูดซับอาร์เซนิตแปรผกผันกับความเข้มข้นในน้ำเริ่มต้น คือที่ปริมาณเหล็กออกไซด์เท่ากันน้ำที่มีความเข้มข้นอาร์เซนิตเริ่มต้นน้อยจะมีอัตราการดูดซับเร็วกว่าน้ำที่มีความเข้มข้นอาร์เซนิตสูง สอดคล้องกับงานวิจัย ฐาปนพงศ์ พึ่งประสพ (2550) ที่ใช้ตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนัก ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะสูงขึ้น ใช้เวลาการเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ

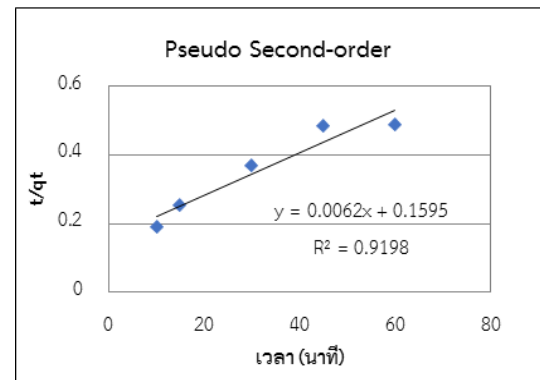
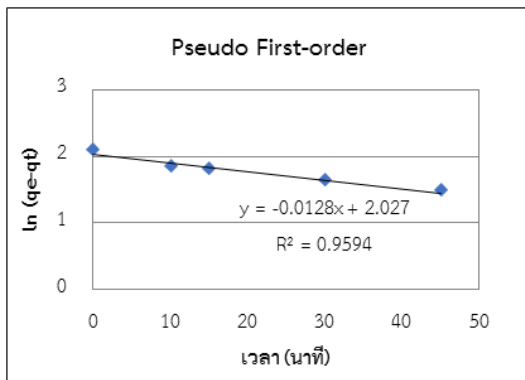


รูปที่ 4.3 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสารหนูที่ปริมาณเหล็กต่างๆ

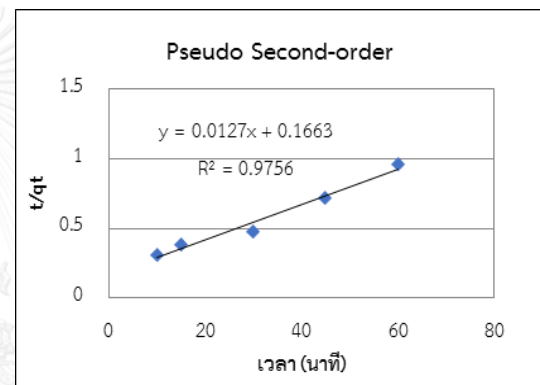
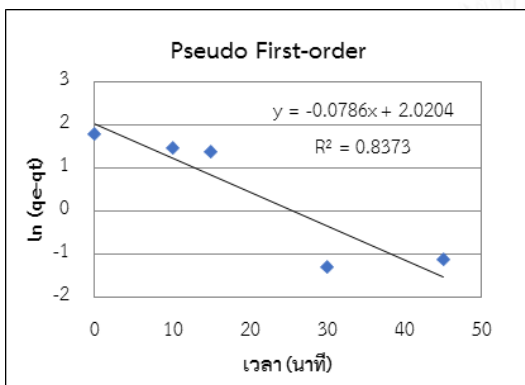
วิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับโดยใช้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo - First Order) และอันดับสอง (Pseudo - Second Order) เพื่ออธิบายการดูดซับที่ผิวเหล็กออกไซด์ดังสมการที่ 2.10 และ 2.12 พบว่าค่า R^2 ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสองเข้าใกล้ 1 มากกว่าปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ดังรูปที่ 4.4 - 4.8 และค่า $q_{e, cal}$ ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสองมีค่าที่ใกล้เคียงกับ $q_{e, exp}$ ขณะที่ค่า $q_{e, cal}$ ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง มีค่าไม่ใกล้เคียงกับ $q_{e, exp}$ การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์จึงสามารถคำนวณได้โดยโมเดลปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Jeong และคณะ (2007) ว่าการดูดซับอาร์เซนเตดด้วยเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง และ ฐาปนพงศ์ พึ่งประสพ (2007) ใช้กากตะกอนเคลือบเหล็กออกไซด์ดูดซับทองแดง แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เป็นไปตามปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง แม้บางกรณีค่า R^2 ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งจะสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาค่า q_e ทั้งหมดของการทดลองพบว่าค่า $q_{e, cal}$ ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสองใกล้เคียงกับ $q_{e, exp}$ ขณะที่ $q_{e, cal}$ ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งไม่ใกล้เคียงกับ $q_{e, exp}$

ตารางที่ 4 - 3 ค่าความสามารถและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็ก

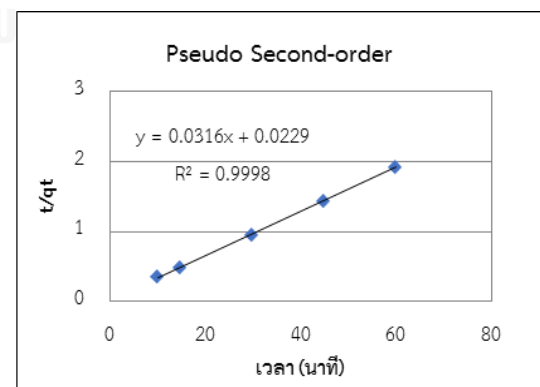
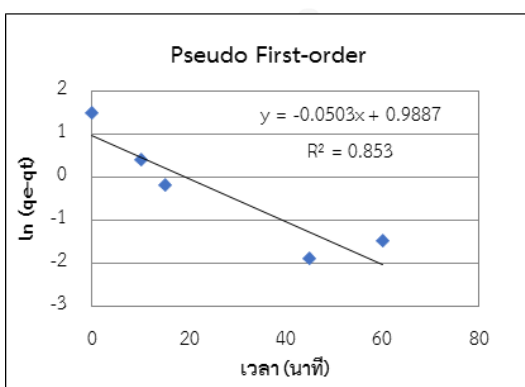
ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	$q_{e, exp}$	ปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			ปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
		$q_{e, cal}$	k_1 (นาที่ ⁻¹)	R^2	$q_{e, cal}$	k_2 (นาที่ ⁻¹)	R^2
8	123.19	7.59	0.0128	0.9594	161.29	2.42×10^{-4}	0.9198
16	62.48	7.54	0.0786	0.8373	78.74	9.70×10^{-4}	0.9756
32	31.25	2.69	0.0503	0.8530	31.65	0.0442	0.9998
40	24.99	1.74	0.0682	0.7822	25.00	0.4848	1.0000
80	12.49	1.48	0.0117	0.0081	12.48	128.41	1.0000



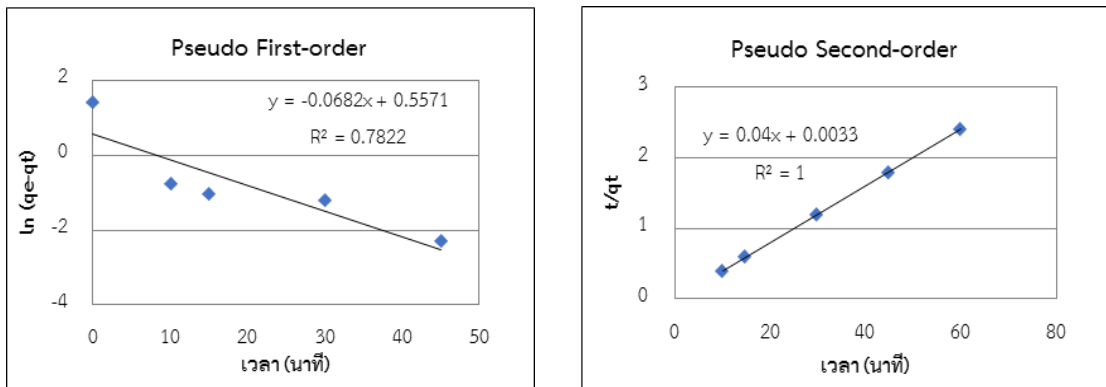
รูปที่ 4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 8 กรัมต่อลิตร
วิเคราะห์โดยปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง



รูปที่ 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 16 กรัมต่อลิตร
วิเคราะห์โดยปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

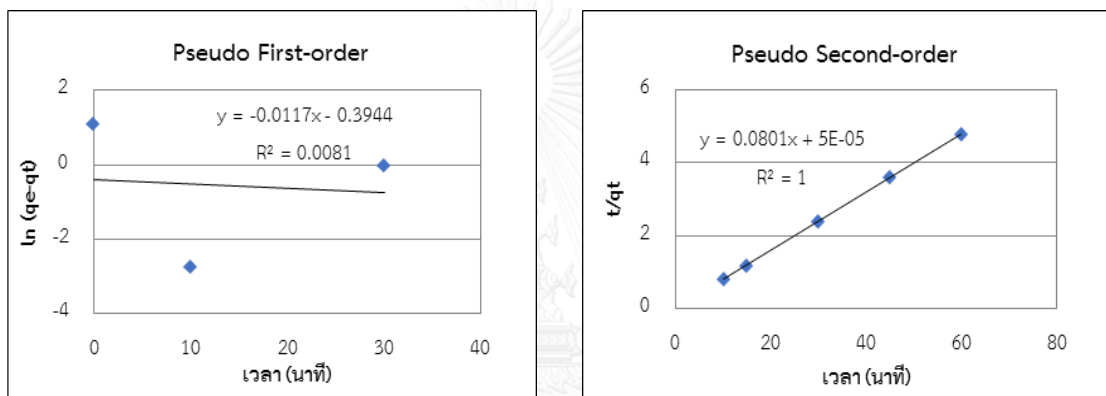


รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 32 กรัมต่อลิตร
วิเคราะห์โดยปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง



รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 40 กรัมต่อลิตร

วิเคราะห์โดยปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง



รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ 80 กรัมต่อลิตร

วิเคราะห์โดยปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

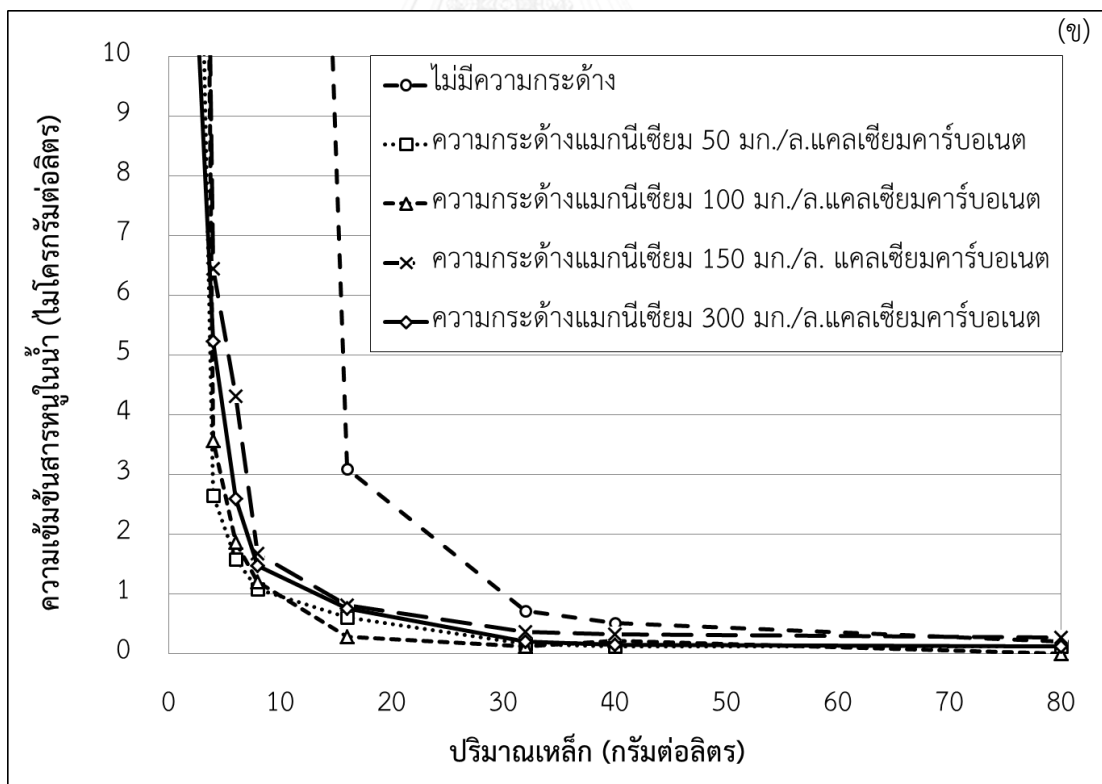
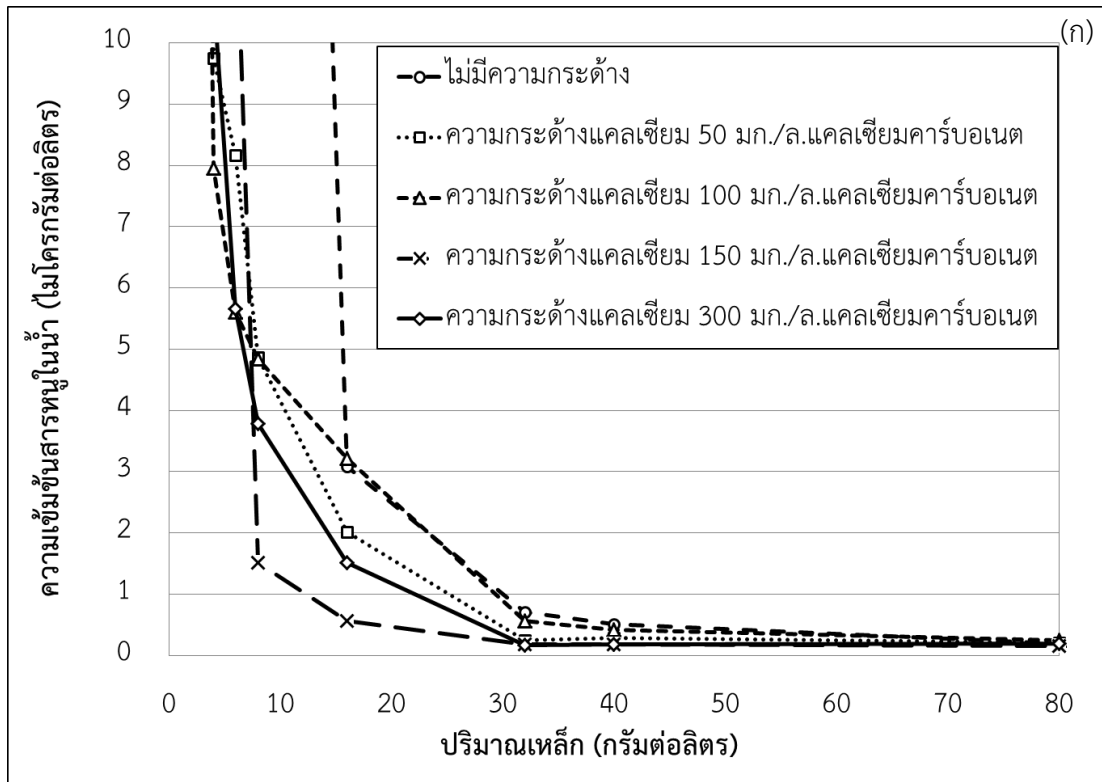
4.2.2 ผลการศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์และความกระด้างที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูในน้ำ

ผลการศึกษาหาปริมาณเหล็กออกไซด์และความกระด้างที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูในน้ำ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 - 4 จากการทดลองน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้างต้องใช้เหล็ก 16 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 3.09 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 99.72) ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มกำหนด ปริมาณเหล็กแปรผกผันกับความเข้มข้นสารหนูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมีความสัมพันธ์กันสูงถึงร้อยละ 33.4 คือ ปริมาณเหล็กแปรผกผันกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ เช่น ใช้ปริมาณเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร ในน้ำมีความเข้มข้นสารหนู 492.80 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 54.79) เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเป็น 8 กรัมต่อลิตร ในน้ำมีความเข้มข้นสารหนูลดลงเหลือ 45.67 ไมโครกรัมต่อลิตร

(ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 95.81) ส่วนน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ต้องใช้เหล็ก 4 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 9.75 และ 7.95 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 99.08 และ 99.26) ตามลำดับ ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้เหล็ก 4 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 10.81 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินมาตรฐานน้ำดื่มเล็กน้อยจึงต้องใช้เหล็ก 6 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 5.65 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 99.45) แต่น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ต้องใช้เหล็ก 8 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 1.52 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 99.85) ส่วนในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50, 100, 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ต้องใช้เหล็ก 4 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 2.64, 3.56, 6.45 และ 5.23 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูร้อยละ 99.75, 99.67, 99.41 และ 99.52) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าความกระด้างในน้ำบาดาลช่วยลดปริมาณเหล็กที่ต้องใช้ในการกำจัดสารหนูในน้ำ แต่การเพิ่มขึ้นของความกระด้างไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู ความกระด้างแคลเซียมและความกระด้างแมกนีเซียมไม่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นสารหนู อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นความกระด้างที่มีความเหมาะสมที่สุดเพื่อกำจัดสารหนู

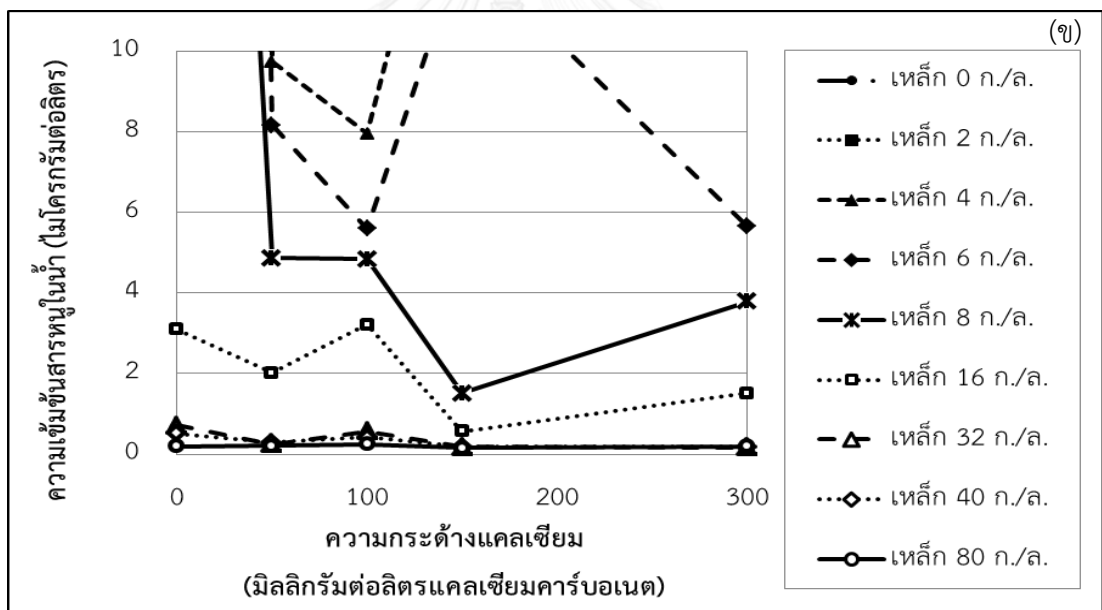
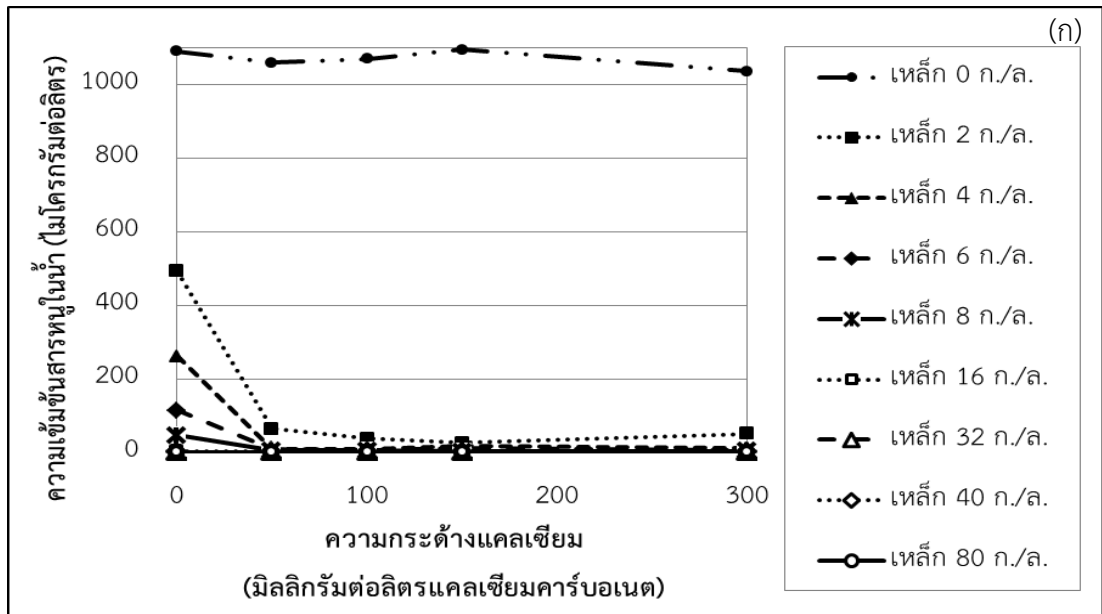
ตารางที่ 4 - 4 ความเข้มข้นสารหนูหลังความกับเหล็กที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณเหล็ก (g/L)	ความเข้มข้นสารหนู																	
	ไม่มีตัวกรอง		ความกระด้างแคลเซียม (mg/L as CaCO ₃)				ความกระด้างแมกนีเซียม (mg/L as CaCO ₃)											
	μg/L	% การกำจัด	50	100	150	300	μg/L	% การกำจัด	50	100	150	300	μg/L	% การกำจัด				
0.5	492.80	54.7886	63.94	93.9659	37.31	96.5135	26.11	97.6136	51.33	95.0454	20.42	98.0939	39.80	96.2879	32.60	97.0145	12.74	98.8269
1	261.47	76.0117	9.75	99.0803	7.95	99.2569	17.05	98.4419	10.81	98.9562	2.64	99.7535	3.56	99.6676	6.45	99.4098	5.23	99.5188
1.5	114.73	89.4742	8.16	99.2298	5.60	99.4768	12.61	98.8480	5.65	99.4542	1.57	99.8531	1.86	99.8266	4.30	99.6062	2.59	99.7619
2	45.67	95.8099	4.86	99.5412	4.84	99.5477	1.52	99.8613	3.79	99.6342	1.07	99.8999	1.20	99.8877	1.67	99.8474	1.47	99.8643
4	3.09	99.7164	2.01	99.8100	3.21	99.6999	0.56	99.9487	1.52	99.8535	0.61	99.9430	0.29	99.9733	0.81	99.9260	0.75	99.9306
8	0.72	99.9344	0.24	99.9772	0.56	99.9476	0.19	99.9829	0.17	99.9841	0.15	99.9856	0.12	99.9887	0.36	99.9668	0.20	99.9818



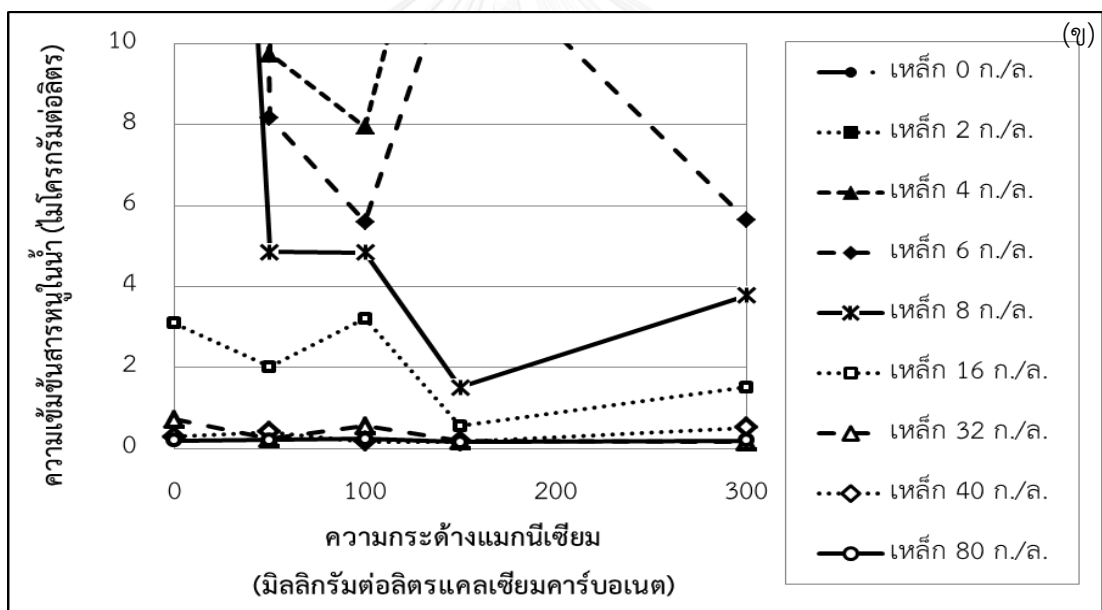
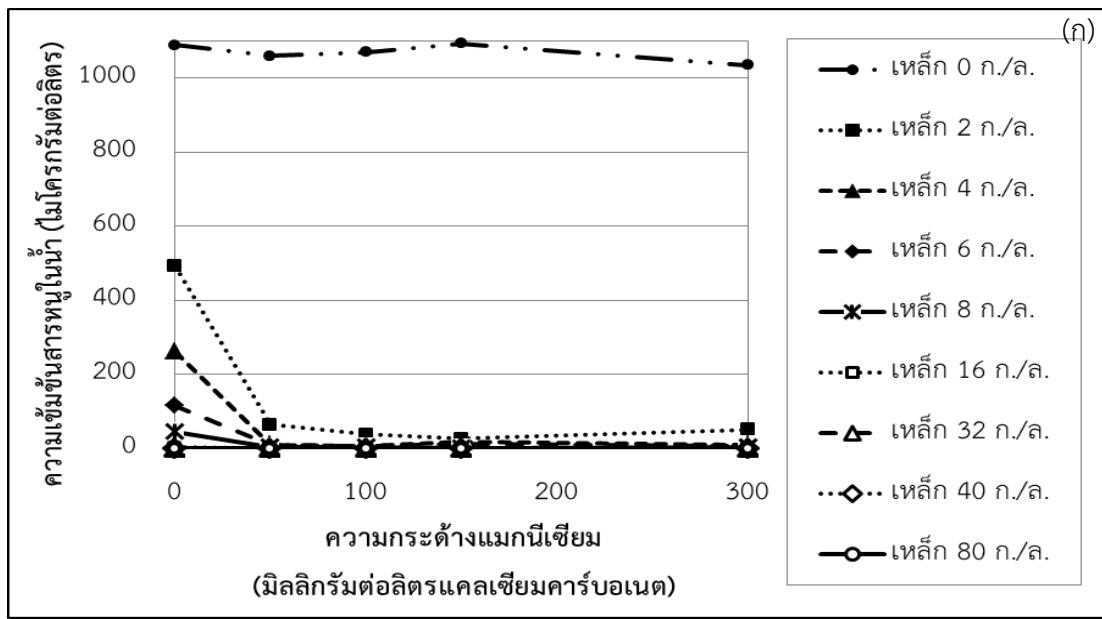
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสารหนูในน้ำกับปริมาณเหล็กที่ใช้ดูดซับ

(ก) น้ำบาดาลสังเคราะห์ความกระด้างแคลเซียม (ข) น้ำบาดาลสังเคราะห์ความกระด้างแมกนีเซียม



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสารทึบกับความกระด้างแคลเซียมที่มีในน้ำ

(ก) ภาพรวมของแผนภูมิ (ข) ภาพขยายของแผนภูมิ

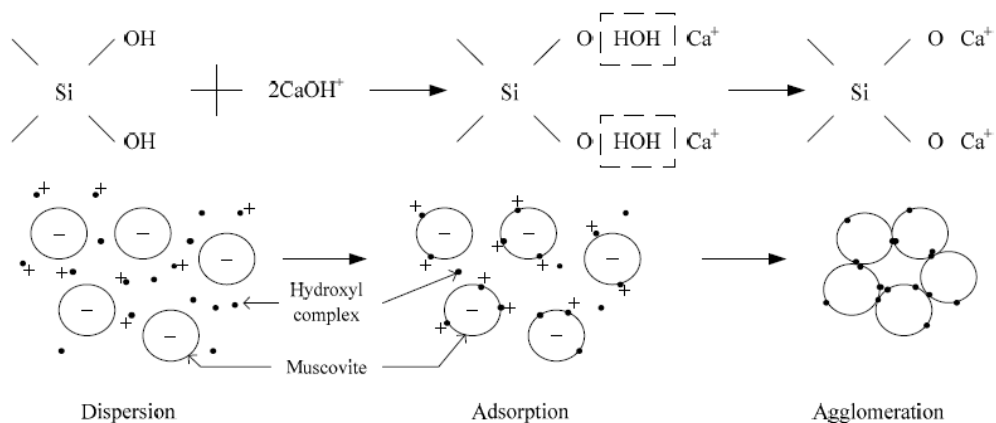


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของสารทึบกับความกระด้างแมกนีเซียมที่มีในน้ำ

(ก) ภาพรวมของแผนภูมิ (ข) ภาพขยายของแผนภูมิ

ดังนั้น น้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ควรใช้ปริมาณเหล็กละ 8 กรัมต่อลิตร และน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ควรใช้ปริมาณเหล็กละ 4 กรัมต่อลิตร จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ในน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียมมีผลช่วยในการดูดซับสารทึบของเหล็กออกไซด์มากกว่าน้ำที่มี

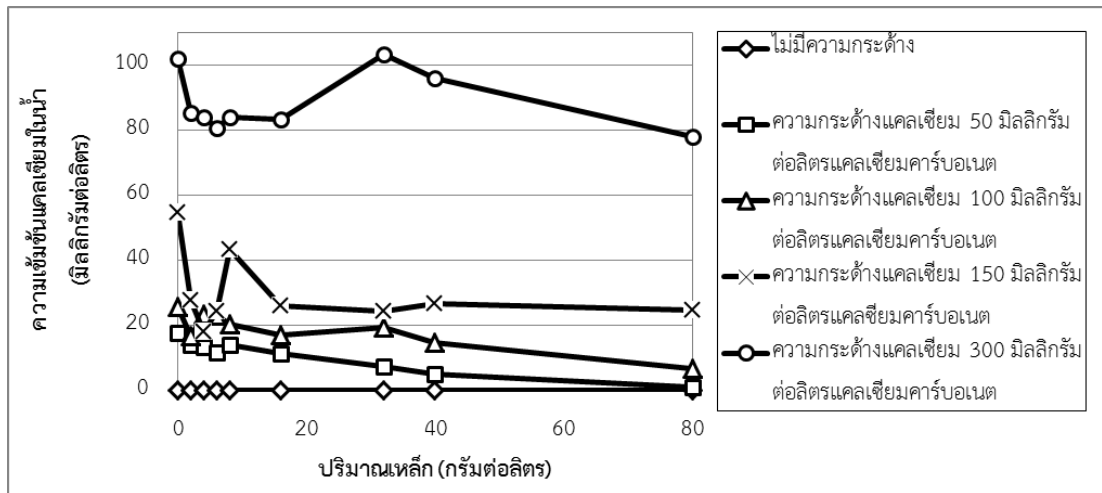
ความกระด้างแคลเซียม เนื่องจากความเฉพาะเจาะจงของสารประกอบอาร์เซนเตจจะทำให้มีแนวโน้มของรูปร่างที่แข็งแรง จะขึ้นอยู่กับ ประจุ/รัศมี (Z/R) และขนาดของประจุ ซึ่งรูปร่างของสารประกอบเชิงซ้อนแมกนีเซียมอยู่ในรูป outer-sphere แต่แคลเซียมอยู่ในรูป inner-sphere เพราะแคลเซียมมีขนาดใหญ่กว่าแมกนีเซียม ($R_{Ca} = 1.61\text{\AA}$, $R_{Mg} = 0.92\text{\AA}$) และ hydration sphere ของแคลเซียมจะมีการเกาะที่หลวมกว่าแมกนีเซียม (Janjaroen และคณะ, 2010) และงานวิจัย Chiew และคณะ (2009) พบว่าในน้ำที่มีแร่ธาตุแคลเซียมและโซเดียม ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดความกระด้าง จะทำให้การกำจัดสารหนูด้วยเหล็กมีประสิทธิภาพดีขึ้น จากงานวิจัย Tang, Zhang และ Bao, (2016) พบว่าการมี Ca^{2+} และ Mg^{2+} ส่งผลให้อัตราการตกตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมากกว่า 4 และที่พีเอชมากกว่า 4 ความสามารถในการดูดซับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการตกตะกอน การมี Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในช่วงพีเอชที่เป็นด่างทำให้มี Hydroxyl Complex เพิ่มขึ้นและความเข้มข้น Ca^{2+} และ Mg^{2+} ทำให้มี Hydroxy Complex มีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงมากขึ้น อัตราการตกตะกอนจึงมากขึ้น เนื่องจาก Hydroxy Complex เป็นรูปสำคัญในการดูดซับ ผลของการรวมตัวสารแขวนลอยเกิดจากการเชื่อมของ Hydroxy Complex ดังรูปที่ 4.12



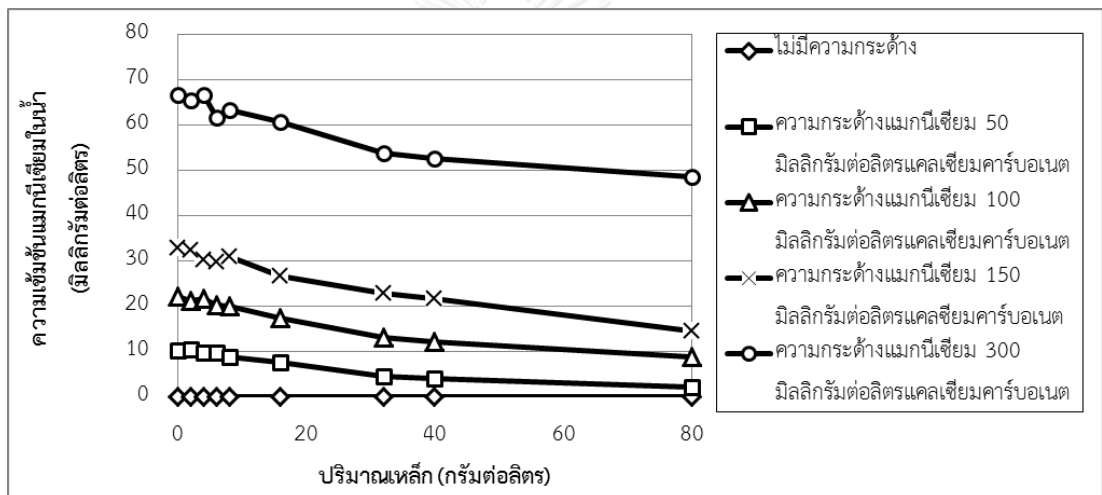
รูปที่ 4.12 การเชื่อมโยงของ Hydroxy Complex

ที่มา : (Tang, Zhang และ Bao, 2016)

จากการวัดความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลือในน้ำ ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าความเข้มข้นแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำลดลงเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น คาดว่าส่วนที่หายไปอยู่กับเหล็กออกไซด์ที่กำจัดสารหนู ซึ่งสอดคล้องกับการที่เหล็กออกไซด์สามารถกำจัดสารหนูได้ดีขึ้น เมื่อมีแคลเซียมหรือแมกนีเซียมในน้ำ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นแคลเซียมที่เหลือน้ำกับปริมาณเหล็ก



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นแมกนีเซียมที่เหลือน้ำกับปริมาณเหล็ก

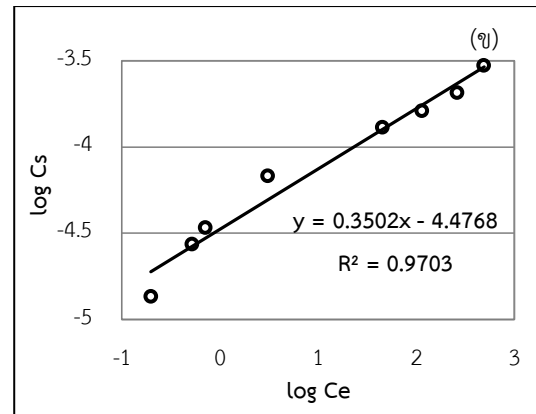
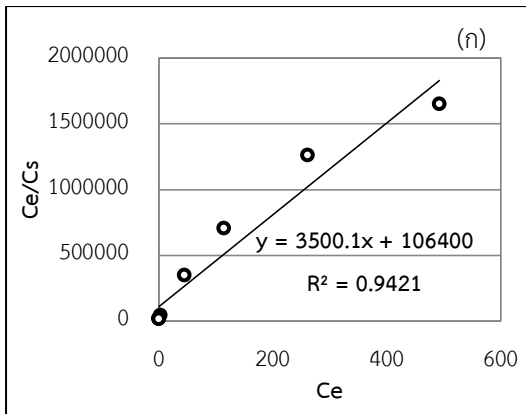
4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวเหล็กออกไซด์

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) สารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสม ในภาวะน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้าง แคลเซียมและความกระด้างแมกนีเซียมความเข้มข้นต่างๆ คือ ความเข้มข้นความกระด้าง 50, 100, 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งผลการศึกษาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูจากข้อที่ 4.2.1 สามารถนำมาอธิบายด้วยสมการเส้นตรงการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich) และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เพื่อพิจารณาว่าการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ที่ภาวะน้ำต่างๆ จะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบใด ด้วยการพิจารณาจากค่า R^2 ของกราฟไอโซเทอม ดังรูปที่ 4.15 - 4.23 ซึ่งสมการและค่า R^2 ที่ภาวะน้ำต่างๆของการดูดซับแบบฟรุนดิชและแลงเมียร์แสดงดังตารางที่ 4 - 5

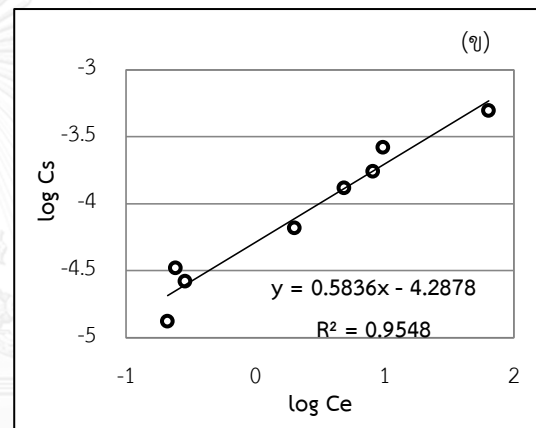
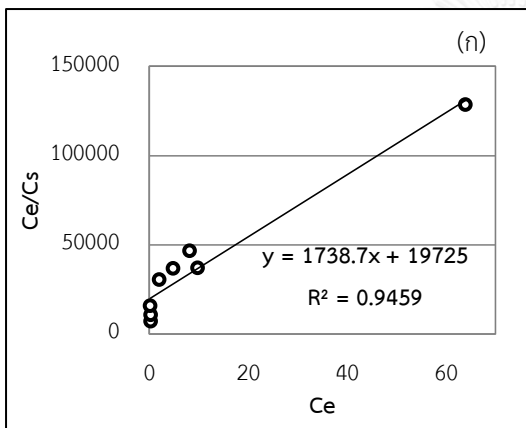
ตารางที่ 4 - 5 แสดงสมการการดูดซับสารหนูของเหล็กออกไซด์แบบแลงเมียร์และฟรุนดิชกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียมหรือความกระด้างแมกนีเซียม

Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
ไม่มีความกระด้าง $C_e/C_s = 3500.1C_e + 106400$ $R^2 = 0.9421$ $a = 2.8571 \times 10^{-4}$ $b = 0.0329$	$\log C_s = 0.3502 \log C_e - 4.4768$ $R^2 = 0.9703$ $K_f = 3.3358 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.3502$
ความกระด้างแคลเซียม 50 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต $C_e/C_s = 1738.7C_e + 19725$ $R^2 = 0.9459$ $a = 5.7514 \times 10^{-4}$ $b = 0.8815$	$\log C_s = 0.5836 \log C_e - 4.2878$ $R^2 = 0.9548$ $K_f = 5.1546 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.5836$
ความกระด้างแคลเซียม 100 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต $C_e/C_s = 1348.1C_e + 23462$ $R^2 = 0.7539$ $a = 7.4178 \times 10^{-4}$ $b = 0.0574$	$\log C_s = 0.6839 \log C_e - 4.3287$ $R^2 = 0.9531$ $K_f = 4.6914 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.6839$

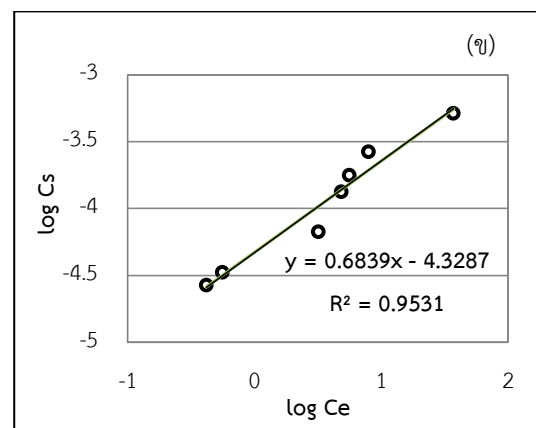
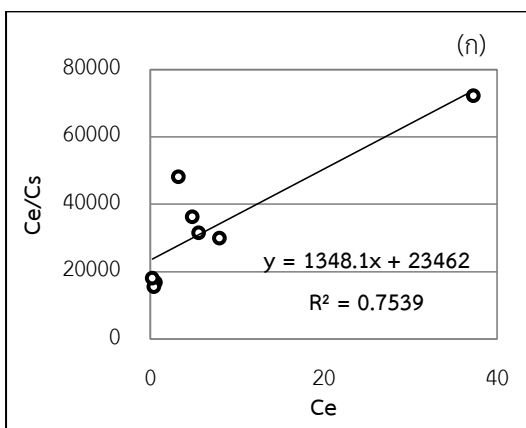
Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
<p>ความกระด้างแคลเซียม 150 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 2292.9C_e + 11348$ $R^2 = 0.6935$ $a = 4.3613 \times 10^{-4}$ $b = 0.2020$	$\log C_s = 0.5452 \log C_e - 4.158$ $R^2 = 0.9102$ $K_f = 6.9502 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.5452$
<p>ความกระด้างแคลเซียม 300 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 1770.6C_e + 16128$ $R^2 = 0.9448$ $a = 5.6478 \times 10^{-4}$ $b = 0.1098$	$\log C_s = 0.5646 \log C_e - 4.2307$ $R^2 = 0.9435$ $K_f = 5.8789 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.5646$
<p>ความกระด้างแมกนีเซียม 50 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 1594.1C_e + 6287.6$ $R^2 = 0.9795$ $a = 6.2731 \times 10^{-4}$ $b = 0.2535$	$\log C_s = 0.6782 \log C_e - 3.9949$ $R^2 = 0.9305$ $K_f = 1.0118 \times 10^{-4}$ $1/n = 0.6782$
<p>ความกระด้างแมกนีเซียม 100 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 1819.9C_e + 4991.8$ $R^2 = 0.9896$ $a = 5.4948 \times 10^{-4}$ $b = 0.3646$	$\log C_s = 0.5212 \log C_e - 3.9845$ $R^2 = 0.9171$ $K_f = 1.0363 \times 10^{-4}$ $1/n = 0.5212$
<p>ความกระด้างแมกนีเซียม 150 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 1503.1C_e + 13059$ $R^2 = 0.9588$ $a = 6.6529 \times 10^{-4}$ $b = 0.1151$	$\log C_s = 0.7084 \log C_e - 4.203$ $R^2 = 0.9354$ $K_f = 6.2661 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.7084$
<p>ความกระด้างแมกนีเซียม 300 มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต</p> $C_e/C_s = 1361.5C_e + 8470.5$ $R^2 = 0.8395$ $a = 7.3448 \times 10^{-4}$ $b = 0.1607$	$\log C_s = 0.7151 \log C_e - 4.0488$ $R^2 = 0.9776$ $K_f = 8.9372 \times 10^{-5}$ $1/n = 0.7151$



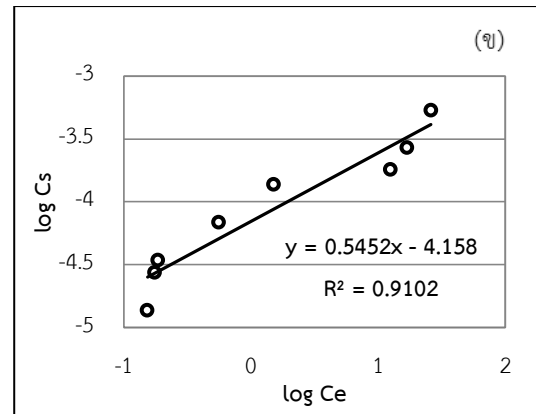
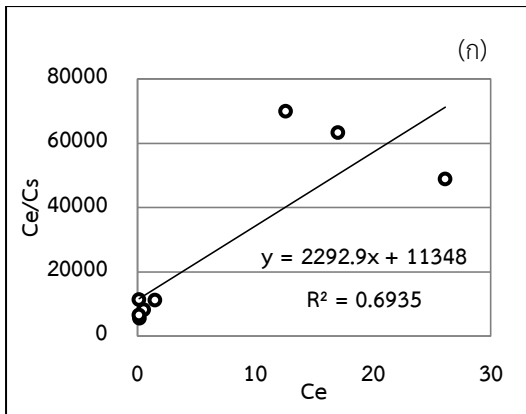
รูปที่ 4.15 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์
ที่ไม่มีความกระด้าง (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



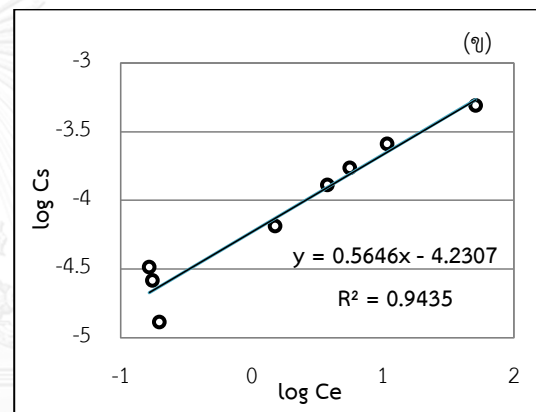
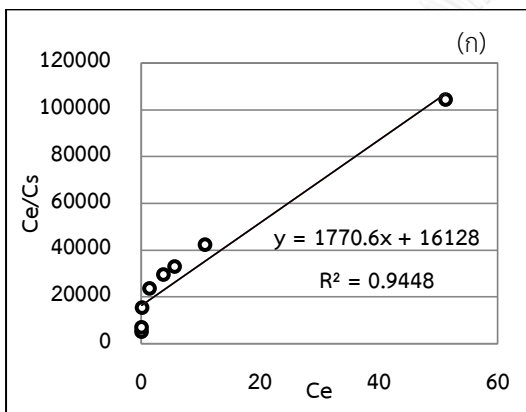
รูปที่ 4.16 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความ
กระด้างแคลเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



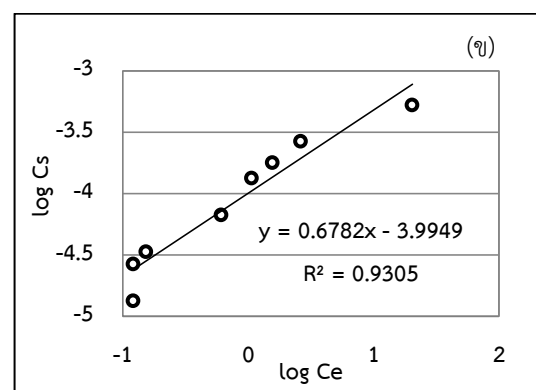
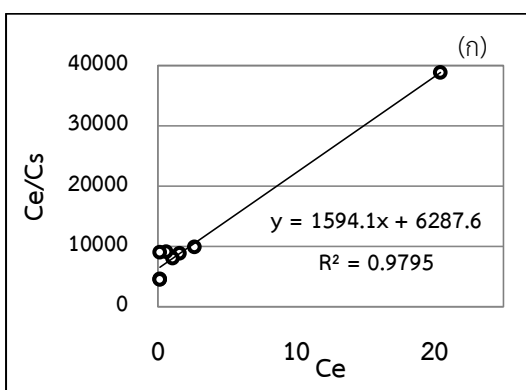
รูปที่ 4.17 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความ
กระด้างแคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช

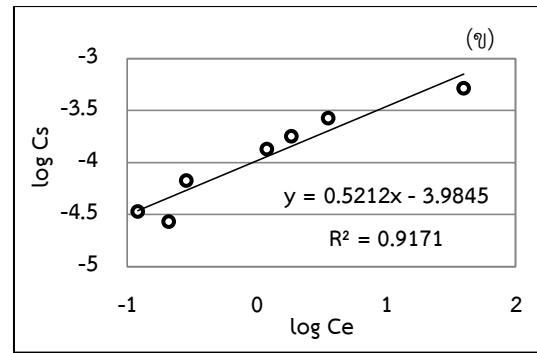
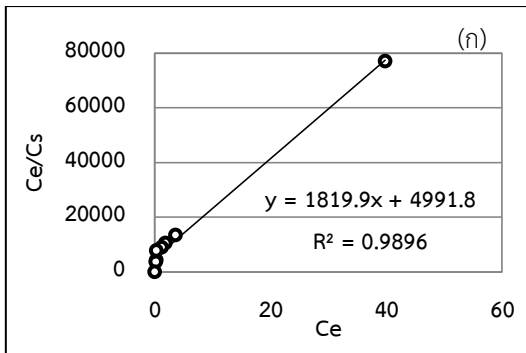


รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



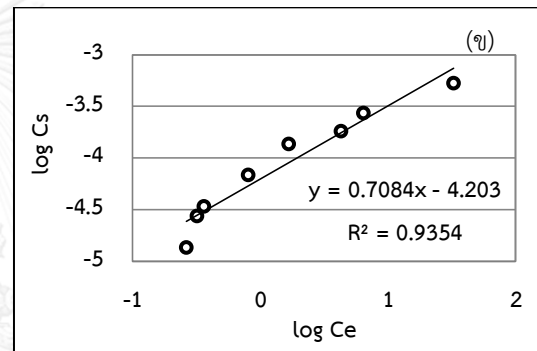
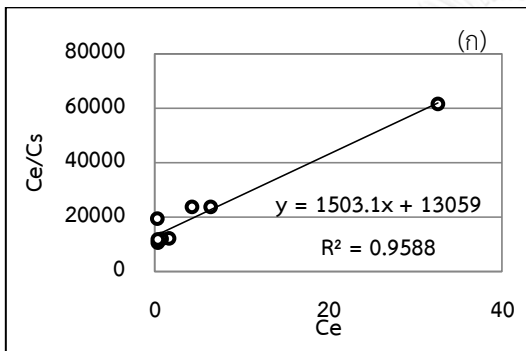
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



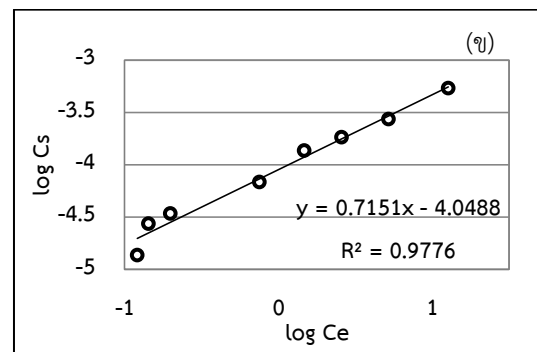
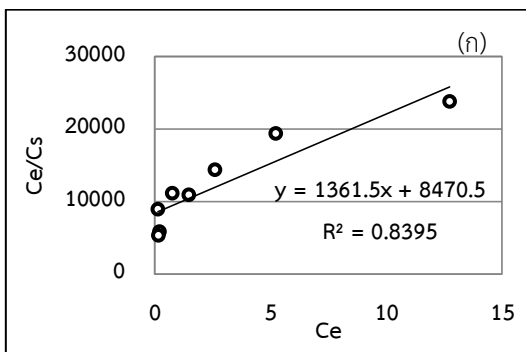
รูปที่ 4.21 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์
ที่มีความกระด้างแมกนีเซียมเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



รูปที่ 4.22 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์
ที่มีความกระด้างแมกนีเซียมเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช



รูปที่ 4.23 ไอโซโทมการดูดซับสารหนูบนผิวของเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์
ที่มีความกระด้างแมกนีเซียมเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช

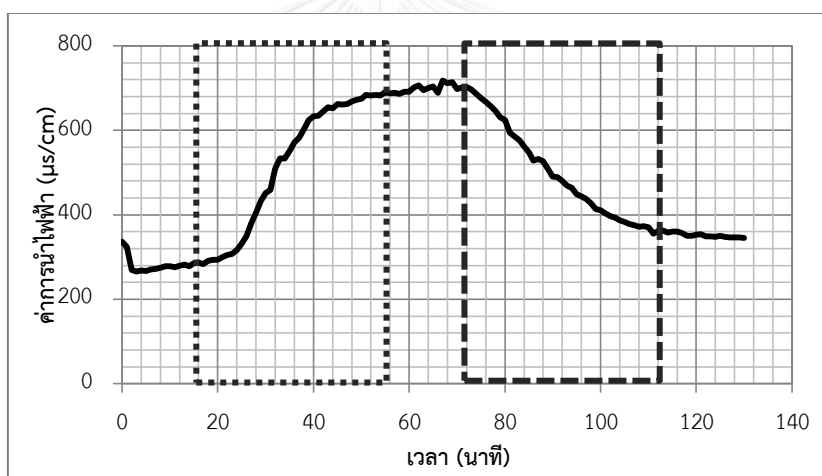
โดยผลการวิเคราะห์ค่า R^2 สามารถสรุปได้ว่าสมการแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการคาดการณ์กลไกการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50, 100, 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากค่า R^2 ของแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่า R^2 ของแบบฟรุนดิช ดังนั้นไอโซเทอมการดูดซับของสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50, 100, 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นการดูดซับติดผิวทางเคมีแบบชั้นเดียว ส่วนสมการแบบฟรุนดิชมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการคาดการณ์กลไกการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากค่า R^2 ของแบบฟรุนดิชมีค่ามากกว่า R^2 ของแบบแลงเมียร์ ดังนั้นไอโซเทอมการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นการดูดซับติดผิวทางเคมีแบบหลายชั้น สอดคล้องกับงานวิจัย Yao, Liu และ Shi (2014) ทำการทดลองกำจัดสารหนูด้วยถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กออกไซด์ มีการดูดซับสารหนูได้สูงกว่า เนื่องจาก ค่า q_m และค่า b จากไอโซเทอมแลงเมียร์ ค่า k_f จากไอโซเทอมฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กออกไซด์มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ และโมเดลในการคาดการณ์การดูดซับที่เหมาะสม คือ ไอโซเทอมแลงเมียร์และไอโซเทอมฟรุนดิช เนื่องจากไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดิช มีค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน และค่า R^2 ทั้งสองไอโซเทอมมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

4.3 ผลการศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำของถังกรองทราย

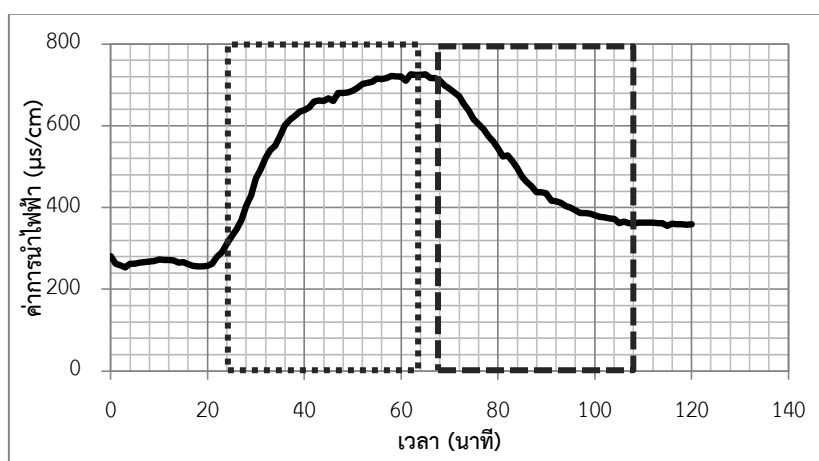
น้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจากน้ำประปาที่มีความเข้มข้นแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก 19.31, 3.24, 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon, TOC) 62.51 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.1 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน (Tracer test)

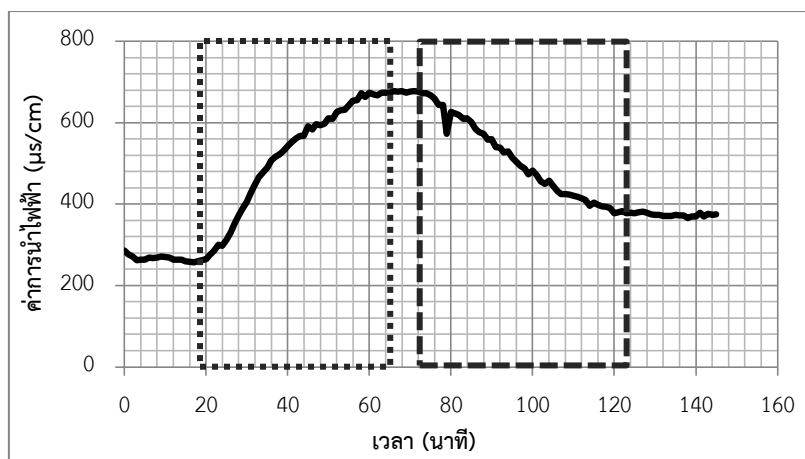
จากการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF ดังรูปที่ 4.24 - 4.26 พบว่าการไหลผ่านชั้นกรองไม่เกิดการไหลลัดวงจรและวงจรการไหลของถังกรองทั้ง 3 ชนิดใช้เวลาใกล้เคียงกันประมาณ 40 นาทีต่อรอบวงจรไหล แสดงว่าถัง IOBSF และถัง IOSF ที่มีการเพิ่มเหล็กออกไซด์ไม่ทำให้อัตราการไหลของน้ำออกจากถังกรองต่างกับถัง BSF การกระจายขนาดของเหล็กออกไซด์จึงไม่ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำออกจากถังกรองเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง BSF



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง IOBSF



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของถัง IOSF

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพ

จากการศึกษาปริมาณฟิล์มชีวภาพที่เจริญเติบโตบนชั้นทรายของถัง BSF ถึง IOBSF และถัง IOSF โดยการทดสอบความสามารถสร้างฟิล์มชีวภาพด้วยวิธี Microtiter Plate Assay (MTP) พบว่าบนชั้นทรายของถังกรองทั้ง 3 ชนิด มีการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพในระดับปานกลาง โดยมีเกณฑ์การแบ่งระดับการสร้างฟิล์มชีวภาพจากค่า OD_{540} ดังตารางที่ 4 - 6 แต่ถัง IOSF ไม่ควรมีฟิล์มชีวภาพเจริญเติบโตเนื่องจากไม่ได้ใส่เชื้อจุลินทรีย์ลงไปในถังกรอง การพบฟิล์มชีวภาพเจริญเติบโตทำให้คุณลักษณะถัง IOSF เหมือนกับถัง IOBSF จึงไม่สามารถทราบผลของการมีฟิล์มชีวภาพต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้

ตารางที่ 4 - 6 ระดับการสร้างฟิล์มชีวภาพบนพื้นทราย

ชนิดถังกรอง	OD_{540}	ระดับการสร้างฟิล์มชีวภาพ
BSF	0.80 ± 0.08	สร้างได้ระดับปานกลาง
IOBSF	0.41 ± 0.05	สร้างได้ระดับปานกลาง
IOSF	0.42 ± 0.09	สร้างได้ระดับปานกลาง

หมายเหตุ ค่า $OD_{540} \geq 1$ หมายถึงการสร้างฟิล์มชีวภาพระดับสูง

ค่า $0.1 \leq OD_{540} < 1$ หมายถึงมีการสร้างฟิล์มชีวภาพระดับปานกลาง

ค่า $OD_{540} < 0.1$ หมายถึงไม่มีการสร้างฟิล์มชีวภาพ

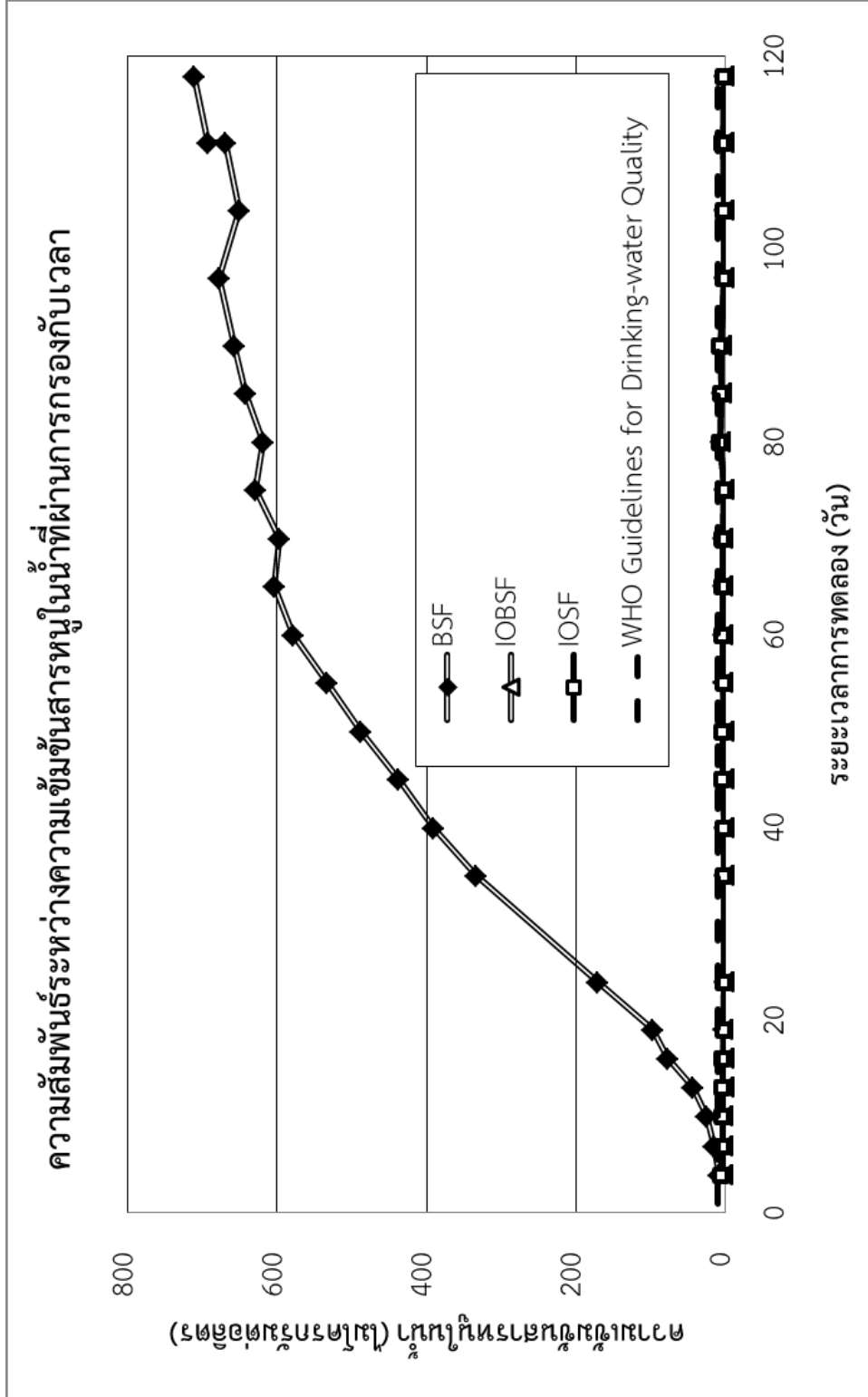
เนื่องจากน้ำที่นำไปใส่ถังกรองมีอาหารที่ไม่เพียงพอทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตน้อยกว่าที่ควร ส่วนถัง IOSF ที่ไม่มีการใส่เชื้อจุลินทรีย์ แต่พบการเจริญเติบโตของฟิล์มชีวภาพ อาจเนื่องมาจากมีจุลินทรีย์อยู่ในทราย เพราะน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อ แต่ชั้นกรอง เช่น ทรายละเอียด กรวด และหินก่อนนำมาใช้งานได้ทำการล้าง แต่ไม่ได้ผ่านการฆ่าเชื้อโรคอาจมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่

4.3.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูของถังกรองทราย

จากการทดลองใช้งานถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF ดังรูปที่ 4.27 พบว่าถัง BSF สามารถกำจัดสารหนูในน้ำเหลือ 7-8 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.25) ซึ่งน้อยกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่ม ได้เพียง 1 สัปดาห์ แต่ถัง IOBSF และถัง IOSF มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในน้ำได้ดี น้ำที่ผ่านการกรองน้ำมีความเข้มข้นสารหนูประมาณ 2-6 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.6) ถัง IOBSF และ IOSF มีอายุการใช้งาน 4 เดือน ความเข้มข้นสารหนูในน้ำของถัง IOBSF และ IOSF แตกต่างกับถัง BSF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งจากการทดลองถัง IOBSF และ ถัง IOSF ต้องหยุดการใช้งานเนื่องจากอัตราการไหลออกจากถังของน้ำลดลง ไม่ใช่จากปัญหาการเสื่อมประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูของเหล็กออกไซด์ อัตราการไหลออกจากถังเริ่มลดลงในเดือนที่ 3 และในเดือนที่ 4 ลดลงเหลือ 0.2 ลิตรต่อนาที จาก 0.4 ลิตรต่อนาที สาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการไหลออกของน้ำลดลงคือการอุดตันเกิดจากตะกอนของเหล็กที่เพิ่มลงไปติดบนชั้นทรายละเอียดด้านล่าง แต่ถัง BSF ไม่พบปัญหาเรื่องอัตราการไหลออกจากถังลดลง นอกจากนั้นปริมาณออกซิเจนละลายของน้ำที่ผ่านการกรองมีค่า 3.1-5.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งมากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่ต่ำกว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำของน้ำเสีย

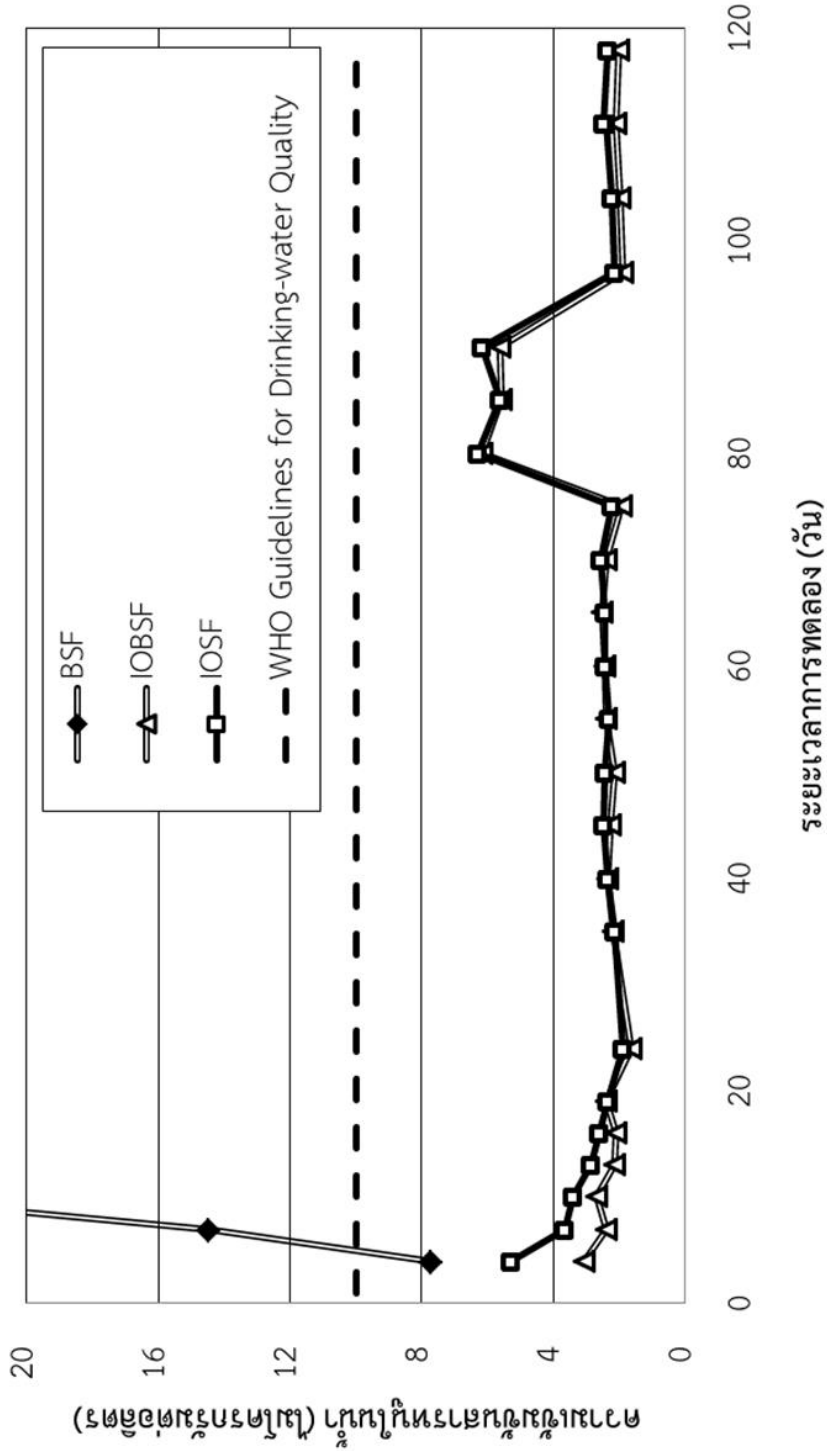
จากจลนพลศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่าการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ที่มีเวลาในการสัมผัสน้อยจะต้องใช้ปริมาตรเหล็กที่มากขึ้น ซึ่งในถัง IOBSF และถัง IOSF มีอัตราการไหล 0.4 ลิตรต่อนาที มีเวลาในการสัมผัส 2.5 นาทีต่อลิตร ซึ่งจากการทดลองแบบที่ละเทมีเวลาในการสัมผัส 1 ชั่วโมง ในถัง IOBSF และถัง IOSF จึงต้องใช้ปริมาณเหล็กในการกำจัดสารหนูมากกว่าการทดลองแบบที่ละเท จากสมการ ปฏิกิริยาเทียมอันดับสองที่ปริมาณเหล็ก 80 กรัมต่อลิตร ($y = 0.0801x + (5 \times 10^{-5})$) เมื่อนำมาคำนวณพบว่าสามารถกำจัดสารหนูตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มได้ภายในเวลา 2.5 นาทีต่อลิตร แต่การทดลองแบบที่ละของน้ำที่ไม่มีความกระด้างต้องใช้เหล็ก 16 กรัม

ต่อลิตร จะเห็นว่าในถังกรองต้องใช้ปริมาณเหล็กมากกว่าการทดลองแบบที่ละเทถึง 5 เท่า ถังกรองสามารถผลิตน้ำได้ 12 ลิตรต่อวันต่อถัง ถังกรองจึงต้องมีเหล็กอย่างน้อย 960 กรัมต่อถัง (0.96 กิโลกรัมต่อถัง) แต่การใช้งานถังกรองมีการใช้งานซ้ำทุกวัน จึงควรมีปริมาณเหล็กมากกว่า 0.96 กิโลกรัมต่อถัง ในการทดลองเลือกใช้ที่ 5 กิโลกรัมต่อถัง ซึ่งอาจลดปริมาณเหล็กที่ใส่ในถังลงได้ เพราะการใส่เหล็กลงในถังมากเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้ถังกรองอุดตันเร็ว ทั้งนี้ปริมาณเหล็กยังขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำแต่ละท้องที่ เนื่องจากน้ำบางแหล่งมีบางธาตุเป็นตัวขัดขวางการดูดซับสารหนูของเหล็กออกไซด์ งานวิจัย Youngran (2005); Youngran และคณะ (2007) พบว่าธาตุที่รบกวนเหล็กออกไซด์ในการดูดซับสารหนู คือ ฟอสเฟต ซิลิกา วาเนเดียม และซัลเฟต ฟอสเฟตดูดซับได้ดีบนเหล็กออกไซด์จึงลดความสามารถการดูดซับของอาร์เซเนต เนื่องจากอาร์เซเนตและฟอสเฟตมีโครงสร้างคล้ายกัน ฟอสเฟตจึงแย่งพื้นที่ยึดเกาะของอาร์เซเนตบนเหล็กออกไซด์ ส่วนซิลิกาที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการดูดซับอาร์เซเนตบนเหล็กออกไซด์ไม่มากนัก แต่เมื่อความเข้มข้นซิลิกามากกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูอย่างชัดเจน Chiew และคณะ (2009) พบว่าการมีฟอสฟอรัสในน้ำเป็นตัวรบกวนการกำจัดสารหนูของเหล็ก เนื่องจากฟอสฟอรัสแย่งพื้นที่ในการดูดซับสารหนู ดังนั้นปริมาณเหล็กที่ใช้ต้องเพียงพอสำหรับฟอสฟอรัสและสารหนู การกำจัดสารหนูจึงสมบูรณ์



(ก) ภาพรวมของแผนภูมิ

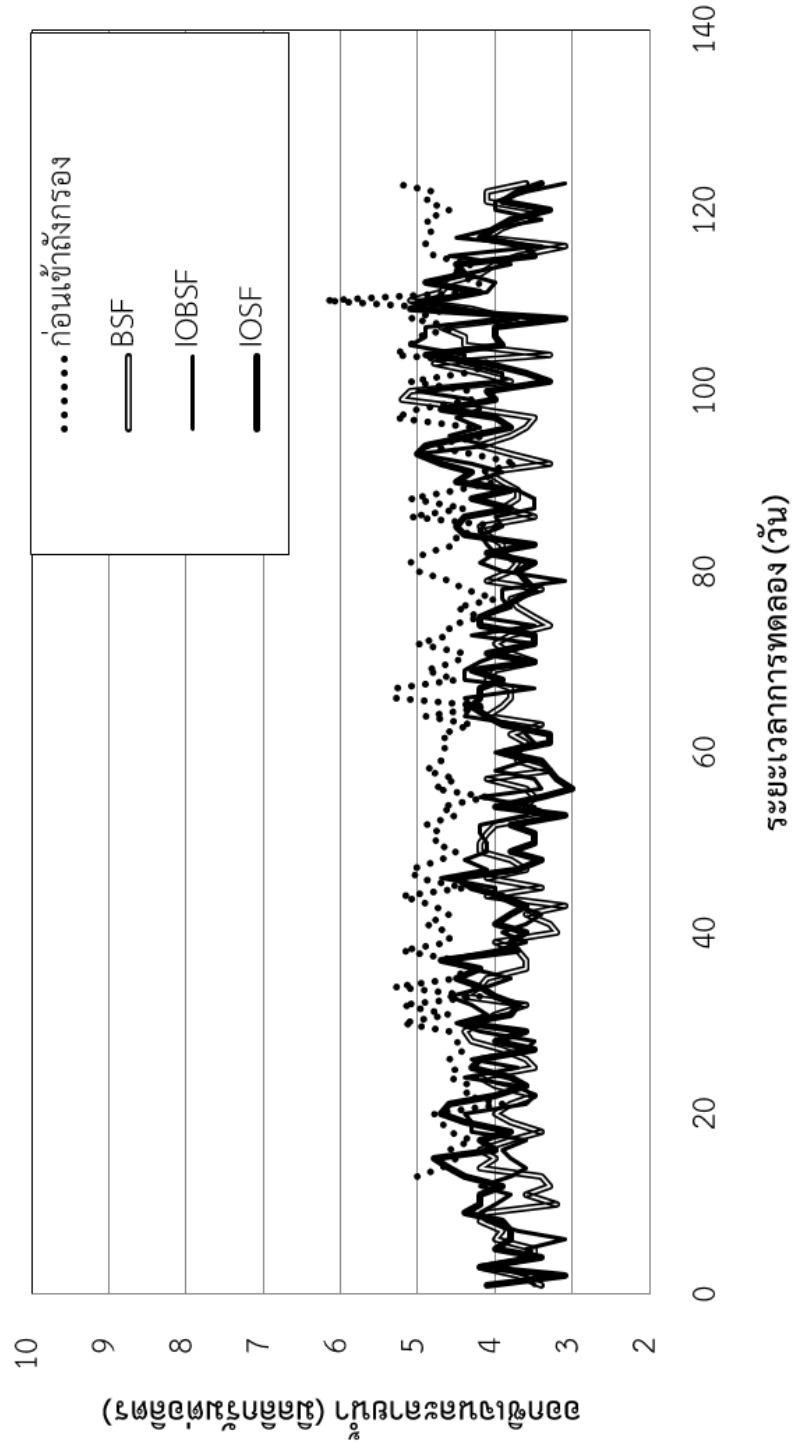
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ผ่านการกรองกับเวลา



(๑) ภาพขยายของแผนภูมิ

รูปที่ 4.27 ความเข้มข้นสารหนูในน้ำหลังผ่านการกรอง

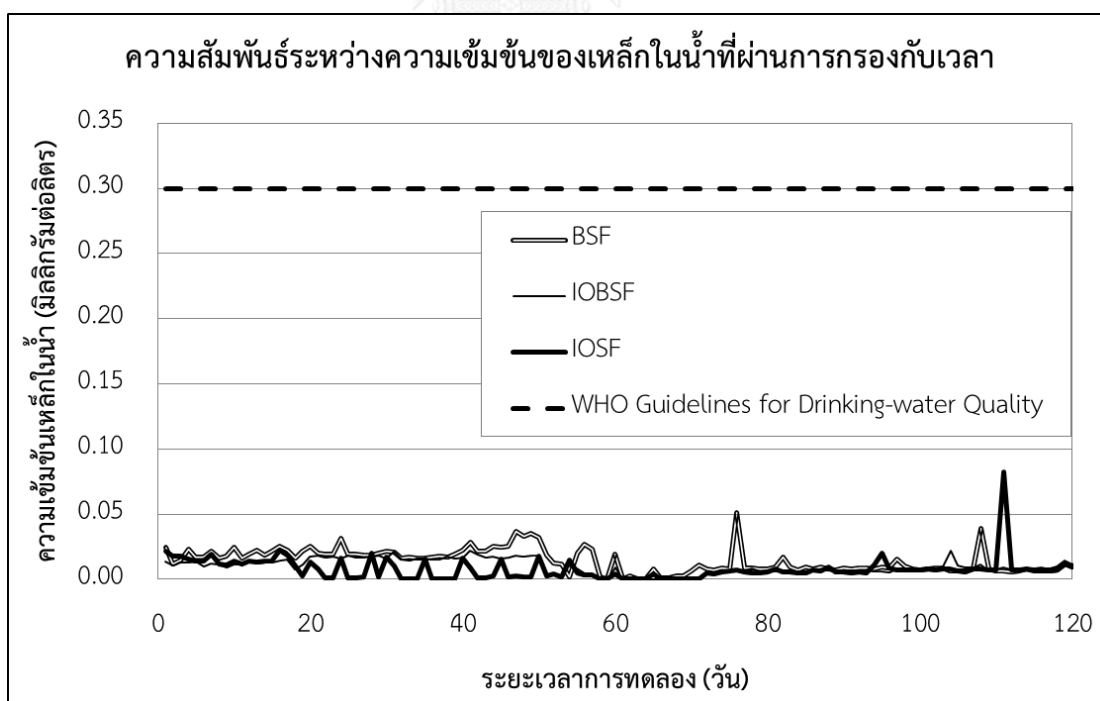
ความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนในน้ำก่อนและหลังผ่านการกรองกับเวลา



รูปที่ 4.28 ค่าออกซิเจนละลายในน้ำหลังออกจากถังกรอง

4.3.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่ออกมากับน้ำหลังผ่านการกรอง

จากการทดลองใช้งานถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF พบว่าปริมาณของเหล็กในน้ำหลังผ่านการกรองมีความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเหล็กโดยเฉลี่ย 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองจากถัง BSF มีความเข้มข้นของเหล็กสูงสุดประมาณ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ถัง IOBSF และถัง IOSF มีความเข้มข้นของเหล็กสูงสุดประมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าน้ำก่อนเข้าถังกรองทราย (0.04 - 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าถังกรองทรายทั้ง 3 ชนิดสามารถลดปริมาณเหล็กในน้ำได้ โดยความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กที่เพิ่มลงในถัง IOBSF และถัง IOSF ไม่หลุดออกมากับน้ำ จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มเหล็กในถังกรองไม่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนของเหล็ก Devi และคณะ (2014) พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำได้ จะเกิดการออกซิเดชันของเหล็กละลายน้ำ (Fe^{2+}) เป็นเหล็กไม่ละลายน้ำ (Fe^{3+}) โดยเกิดขึ้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตกตะกอน



รูปที่ 4.29 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังผ่านการกรอง

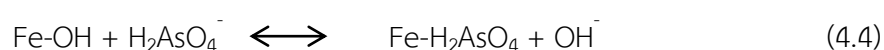
4.4 ผลของการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ต่อพีเอชน้ำ

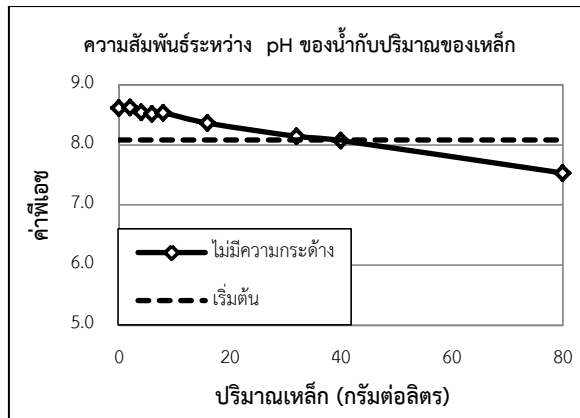
จากการทดลองแบบที่ละเทของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแมกนีเซียม น้ำเริ่มต้นมีพีเอช 8 ทำให้อาร์เซนเตอยู่ในรูป HAsO_4^{2-} ซึ่งเมื่อกวนเหล็กกับน้ำ 1 ชั่วโมง ที่ปริมาณเหล็กน้อย ความเข้มข้นสารหนูในน้ำถูกกำจัดเพียงบางส่วน พีเอชของน้ำเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น เนื่องจากเหล็กออกไซด์ถูกใช้ดูดซับสารหนู การดูดซับอาร์เซนเตด้วยเหล็กออกไซด์เกิดจากการแลกเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) กับอาร์เซนเตไอออน ทำให้มีการปล่อยหมู่ไฮดรอกซิลออกมา ซึ่งทำให้พีเอชของน้ำสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กถึงระดับหนึ่ง ค่าพีเอชของน้ำจะลดลงต่ำกว่าพีเอชของน้ำเริ่มต้น แต่ น้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต พีเอชของน้ำต่ำกว่าพีเอชเริ่มต้นทุกปริมาณเหล็ก และเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชของน้ำยิ่งลดลง ดังรูปที่ 4.30

จากการทดลองใช้ถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF น้ำสังเคราะห์มีพีเอชเริ่มต้น 7.1 – 7.6 ทำให้อาร์เซนเตอยู่ในรูป $\text{H}_2\text{AsO}_4^{4-}$ และ HAsO_4^{2-} เมื่อน้ำผ่านถังกรอง พีเอชของน้ำออกจากถัง IOBSF และถัง IOSF ที่มีการเพิ่มเหล็กลงไปปริมาณมาก มีค่าพีเอชสูงขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับผลจากการทดลองแบบที่ละเล เนื่องจากถังกรองทำจากคอนกรีตซึ่งมีความเป็นด่าง นันทนา ชูฉัตร (2008) สารประกอบของซีเมนต์หลัง hydrolysis จะประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง นอกจากนั้นคอนกรีตยังมีผลต่อการกำจัดสารหนู โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของ Ca^{2+} กับอาร์เซนเต ในสารละลายที่พีเอช 7 – 11 จะตกตะกอนเป็นแคลเซียมอาร์เซนเตบนผิวคอนกรีต ดังสมการที่ 4.1

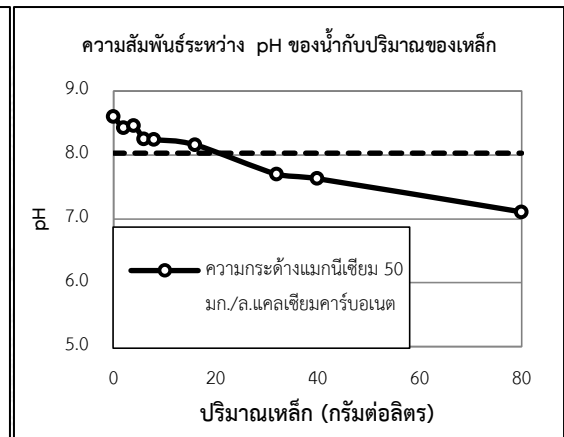
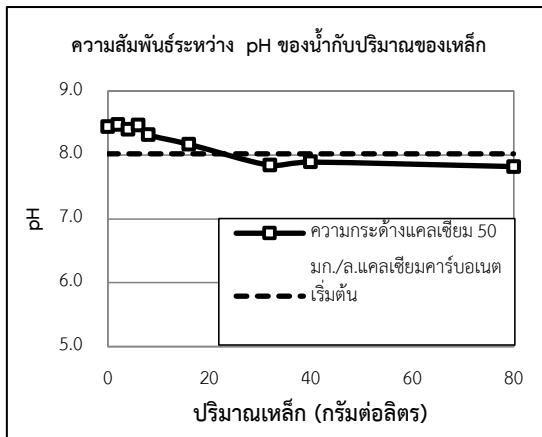


แต่น้ำที่ผ่านถัง IOBSF มีค่าพีเอช 8.29 - 9.53 และ ถัง IOSF มีค่าพีเอช 8.38 – 9.54 ซึ่งสูงกว่าถัง BSF ที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 7.83 – 9.19 เพราะหมู่ไฮดรอกซิลถูกปล่อยออกมาจากการดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก ดังสมการ 4.2 – 4.4

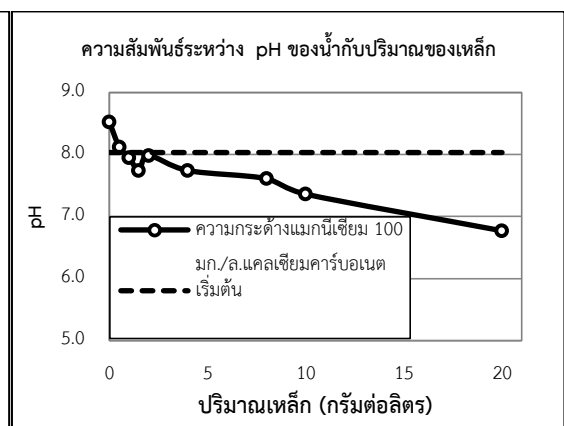
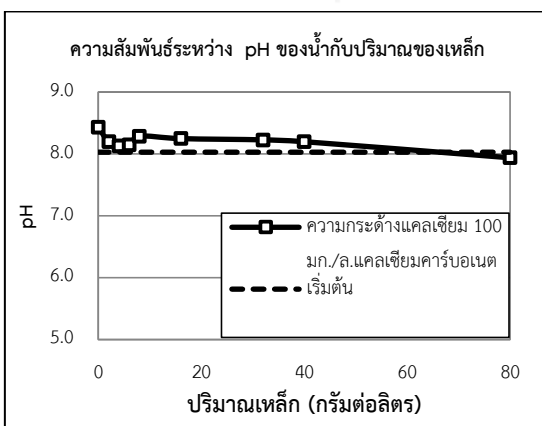




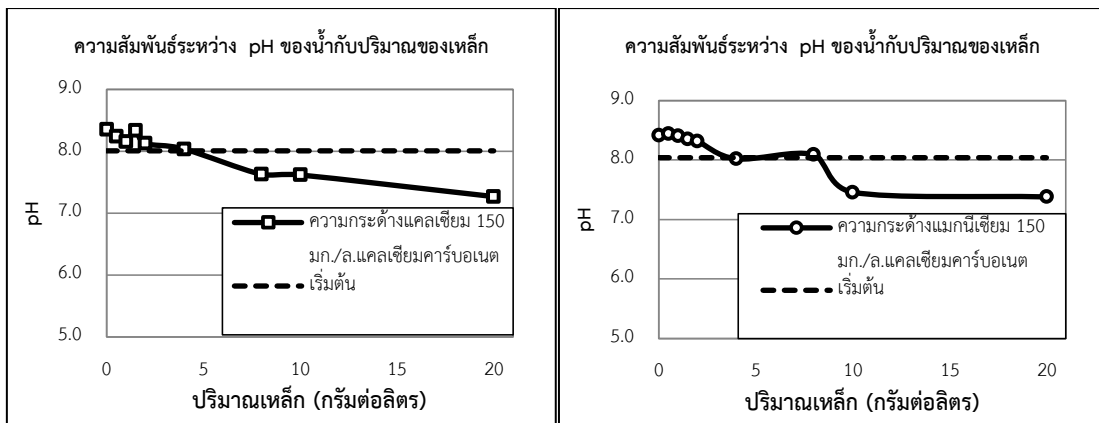
(ก) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มีความกระด้าง



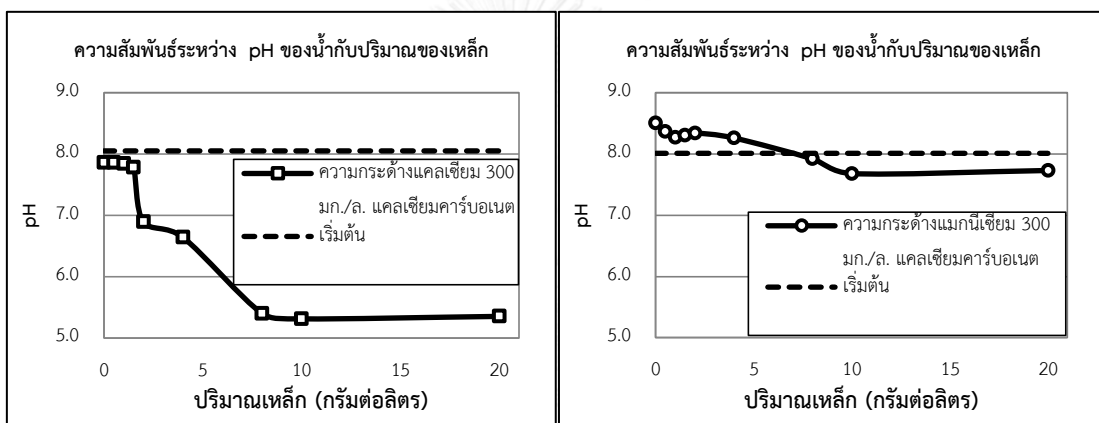
(ข) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม/แมกนีเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมอาร์เซเนต



(ค) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม/แมกนีเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมอาร์เซเนต



(ง) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม/แมกนีเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมอาร์เซเนต



(จ) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีความกระด้างแคลเซียม/แมกนีเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมอาร์เซเนต

รูปที่ 4.30 พีเอชของน้ำที่ปริมาณเหล็กต่างๆเปรียบเทียบกับพีเอชน้ำเริ่มต้น

4.5 การศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากชั้นกรองที่หมดอายุการใช้งาน

4.5.1 การชะละลายหลังใช้งานด้วยน้ำ

หลังจากหยุดใช้งานถังกรองได้ทดสอบการปนเปื้อนสารหนูที่ถูกชะละลายจากชั้นกรองสู่น้ำที่ไม่มีความเข้มข้นสารหนู เมื่อน้ำผ่านถังกรองที่ผ่านการใช้งานในการกำจัดสารหนูแล้วพบว่ามีการปนเปื้อนของสารหนูออกมากับน้ำที่ผ่านถังกรอง ในถัง BSF สารหนูถูกชะละลายออกมาสูง โดยเฉพาะในครั้งแรกสารหนูมีความเข้มข้น 908.23 ไมโครกรัมต่อลิตร และลดลงเรื่อยๆ ถึง 676.63 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่ถึง IOBSF และถึง IOSF สารหนูถูกชะละลายออกมาต่ำ โดยมีความเข้มข้นไม่เกิน 3 ไมโครกรัมต่อลิตร การใช้งานด้วยน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนสารหนูในครั้งแรก น้ำที่ออกมาเป็นน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนูที่ค้างอยู่ก่อนหน้า แต่ในครั้งถัดไปน้ำที่ออกมาเป็นน้ำที่ชะสารหนูจากชั้นกรองออกมา แสดงให้เห็นว่าถึง BSF, ถึง IOBSF และถึง IOSF เมื่อชั้นกรองผ่านการใช้งานในการกำจัดสารหนูแล้ว หากนำไปใช้กับน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนสารหนูจะมีการชะสารหนูจากชั้นกรองออกมากับน้ำที่ผ่านการกรอง ซึ่งถึง BSF จะมีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะออกมามากกว่าถึง IOBSF และถึง IOSF เนื่องจากในระหว่างการใช้งานด้วยน้ำที่ปนเปื้อนสารหนู น้ำได้ผ่านชั้นเหล็กที่ช่วยกำจัดสารหนู ทำให้น้ำที่ไหลผ่านชั้น กรวด หิน และทรายของถัง IOBSF และถึง IOSF มีความเข้มข้นสารหนูต่ำ สารหนูที่ถูกชะออกมาจึงมีความเข้มข้นต่ำ

ตารางที่ 4 - 7 ความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาจากถังกรองทรายทั้ง 3 ชนิดด้วยน้ำ

ครั้งที่	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
1	908.23	2.48	2.78
2	904.84	2.48	2.60
3	855.35	2.37	2.71
4	790.86	2.31	2.65
5	692.85	2.42	2.69
6	676.63	2.42	2.70

4.5.2 การชะละลายชั้นกรองด้วยวิธี TCLP

หลังจากชั้นกรองหมดอายุการใช้งานได้นำชั้นกรองมาทดสอบการชะละลายของสารหนู เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแนวทางในการกำจัดต่อไป โดยนำชั้นกรองชนิดต่างๆ มาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ผลการทดลองแสดงออกมา ดังตารางที่ 4 - 8 พบว่าชั้นทรายละเอียด กรวด และหิน มีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมามาก เมื่อเทียบกับชั้นทรายผสมเหล็กที่มีความเข้มข้นสารหนูถูกชะละลายออกมา 0.47 และ 0.83 ไมโครกรัมต่อลิตร เนื่องจากเหล็กออกไซด์สามารถตรึงสารหนูไว้ได้ แต่จะเห็นว่าทรายละเอียดชั้นล่าง กรวด และหินของถัง IOBSF และ IOSF มีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าถัง BSF เนื่องจากน้ำที่ผ่านชั้นเหล่านี้มีความเข้มข้นสารหนูต่ำ เพราะน้ำได้ผ่านชั้นทรายละเอียดผสมเหล็กที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสารหนูแล้ว แต่ทรายละเอียดชั้นบนของถัง IOBSF และ IOSF มีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาสูง เนื่องจากน้ำที่ผ่านทรายชั้นบนมีความเข้มข้นสารหนูสูง และไม่มีชั้นเหล็กเป็นตัวช่วยดูดซับ ทั้งนี้ชั้นกรองของถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF มีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาไม่เกินมาตรฐานของ TCLP กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4 - 8 ความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาจากชั้นกรองของถังกรองทรายทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธี TCLP

วัสดุกรอง	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
ทรายละเอียดชั้นบน	130.11 ± 6.62	107.02 ± 7.46	162.68 ± 39.17
ทรายละเอียดผสมเหล็ก	-	0.47 ± 0.12	0.83 ± 0.54
ทรายละเอียดชั้นล่าง	-	2.40 ± 0.31	1.49 ± 0.34
กรวด	17.81 ± 2.77	1.52 ± 0.62	4.38 ± 2.45
หิน	41.86 ± 32.58	1.37 ± 0.36	1.31 ± 0.83

วัสดุกรอง	BSF (µg/L)	IOBSF (µg/L)	IOSF (µg/L)
น้ำ	0	0	0
ทรายละเอียดชั้นบน	130.11	107.02	162.68
ทรายละเอียดผสมเหล็ก	0	0.47	0.83
ทรายละเอียดชั้นล่าง	0	2.40	1.46
กรวด	17.81	1.52	4.38
หิน	41.86	1.37	1.31

บทที่ 5

สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสัมพันธ์กับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ ศึกษาผลของความกระด้างแคลเซียม ความกระด้างแมกนีเซียมต่อการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ และนำเหล็กออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิมที่มีการใช้งานตามชนบท และประเทศกำลังพัฒนา

จากการทดลองเพื่อศึกษาหาปริมาณเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูด้วยการทดลอง แบบที่ละเทที่มีเวลาในการสัมผัสระหว่างเหล็กออกไซด์กับสารหนูในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยน้ำ สิ่งเคราะห์มีความเข้มข้นสารหนูรูปอาร์เซนิตเริ่มต้นที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำมีค่าพีเอช 8 ทำให้ สารหนูอยู่ในรูป HAsO_4^{2-} พบว่าปริมาณเหล็กที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสารหนูในน้ำบาดาลสิ่งเคราะห์ ที่ไม่มีความกระด้างคือ 16 กรัมต่อลิตร น้ำที่มีความกระด้างแคลเซียมต้องใช้เหล็ก 8 กรัมต่อลิตร และ น้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียมต้องใช้เหล็ก 4 กรัมต่อลิตร ทำให้ทราบว่าความกระด้างในน้ำส่งผลให้ ใช้ปริมาณเหล็กในการกำจัดสารหนูที่น้อยลง ความกระด้างของน้ำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด สารหนู โดยเฉพาะการมีความกระด้างแมกนีเซียมมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูดีกว่าการมี ความกระด้างแคลเซียม และความกระด้างแคลเซียมที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กคือ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ความกระด้างแมกนีเซียมที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กพบว่าน้ำบาดาลสิ่งเคราะห์ที่ไม่มี ความกระด้าง มีความกระด้างแคลเซียม 50, 100, 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และที่มี ความกระด้างแมกนีเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต มีไอโซเทอมการดูดซับแบบ ฟรุนดิช ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีแบบหลายชั้น แต่น้ำบาดาลสิ่งเคราะห์ที่มีแคลเซียม 300 มิลลิกรัม ต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50, 100, 150 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต มีไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ จึงเป็นการดูดซับทางเคมีแบบชั้นเดียว

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์พบว่าอัตราการดูดซับสารหนูแปรผันตรงกับปริมาณเหล็กออกไซด์ การดูดซับสารหนูที่ใช้ปริมาณเหล็กออกไซด์มากจะทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น และเมื่อวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับพบว่าการดูดซับที่ผิวเหล็กออกไซด์ในน้ำที่ไม่มีความกระด้างเป็นปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

การศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กเปรียบเทียบกับถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิมพบว่าถังกรองที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูให้ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก โดยมีอายุการใช้งานได้ถึง 4 เดือน หลังจากนั้นต้องหยุดใช้งานถังกรองที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กเนื่องจากอัตราการไหลที่ลดลงจากการอุดตันของตะกอนเหล็กออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไป การหยุดใช้งานของถังกรองไม่ได้เกิดจากการเสื่อมประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูของเหล็ก และน้ำที่ออกจากถังกรองมีความเข้มข้นเหล็กในน้ำต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก แสดงว่าการเพิ่มเหล็กลงในถังกรองไม่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนของเหล็ก ในขณะที่เดียวกันที่ถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ 1 สัปดาห์ แต่ไม่พบปัญหาอัตราการไหลที่ลดลงหรือการอุดตันของน้ำที่ออกจากถังกรอง

ศึกษาการชะละลายสารหนูของชั้นกรองที่หมดอายุการใช้งาน พบว่าวัสดุกรอง ทราย กรวด และหิน จะถูกชะละลายความเข้มข้นสารหนูออกมามากกว่าเหล็กออกไซด์ เนื่องจากทราย กรวด และหิน จะดูดซับสารหนูไว้ที่ผิวด้วยการดูดซับทางกายภาพ ทำให้สารหนูถูกชะละลายออกมาได้ง่าย ส่วนเหล็กออกไซด์เป็นการดูดซับทางเคมี สารหนูจึงถูกชะละลายออกมาได้ยากและน้อยกว่า แต่ชั้นทรายล่าง กรวด และหินของถังกรองที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กมีความเข้มข้นสารหนูถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าถังกรองทรายชีวภาพแบบดั้งเดิม เนื่องจากน้ำที่ผ่านชั้นเหล่านี้ได้ผ่านชั้นเหล็กออกไซด์ที่ทำหน้าที่ในการดูดซับสารหนูไว้ ทำให้น้ำที่ผ่านมีความเข้มข้นสารหนูต่ำ และมีความเข้มข้นสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาน้อยกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษามีข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นด้วยเหล็กออกไซด์ หรือในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดรวมกันอยู่ในน้ำ
2. ศึกษาผลของการมีความกระด้างแคลเซียมและความกระด้างแมกนีเซียมที่อยู่รวมกันต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูด้วยเหล็ก
3. สามารถลดปริมาณเหล็กที่เพิ่มในถังกรองได้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเหล็กที่มากเกินไป ทำให้ถังกรองอุดตันเร็ว และเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุเหล็ก ทั้งนี้ปริมาณเหล็กที่ใช้ในการกำจัดสารหนูขึ้นกับความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น และคุณสมบัติของน้ำที่อาจมีตัวขัดขวางการดูดซับสารหนูของเหล็ก ทำให้ต้องใช้ปริมาณเหล็กที่มากขึ้น
4. ศึกษาจุดหมดสภาพ (Breakthrough Curve) ของถังกรองเพื่อหาปริมาณเหล็กที่เหมาะสม และจำลองกลไกที่เกิดขึ้นในชั้นกรองเหล็กที่เพิ่มเข้าไป ด้วยการทดลองคอลัมน์ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากจุดหมดสภาพการดูดซับของเหล็กใช้เวลานาน
5. ศึกษาการนำชั้นกรองที่หมดอายุการใช้งานไปใช้ประโยชน์ต่อด้านอื่นๆ เช่น นำไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง โดยทำการศึกษาถึงความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ประโยชน์

5.3 ความสำคัญของงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันแหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำอุปโภคบริโภคยังมีคุณภาพลดต่ำลง มีการปนเปื้อนของสารพิษ และโลหะหนัก โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเทคโนโลยีการกำจัดสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น โดยมีการนำเหล็กออกไซด์มาพัฒนาใช้ร่วมกับถังกรองทรายชีวภาพที่มีการใช้งานจริงตามชนบทและประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งการพัฒนานี้เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจสำหรับใช้กำจัดสารหนูเนื่องจากมีขั้นตอนการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน ประชาชนสามารถทำได้ด้วยตนเอง ไม่ต้องใช้ไฟฟ้า วัสดุหาได้ในท้องถิ่นและมีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำ (ประมาณ 2,000 บาทต่อถัง)

และผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการใช้งานถังกรองที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กเพื่อใช้ในการกำจัดสารหนูและจุลินทรีย์ก่อโรคที่อัตราร่วง เพื่อเป็นประโยชน์กับผู้นำไปใช้งานต่อไป

รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิงภาษาไทย

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2554). โครงการศึกษาการปนเปื้อนและการวางเครือข่ายเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่อำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และ อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์.
from http://www.dgr.go.th/newproject/54/toxic/final_report.pdf
- กรรณิการ์ สิริสิงห. (2544). เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์ (พิมพ์ครั้งที่ 3 ed.). กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2530). สารหนู: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา. (2553). เทคโนโลยีการกำจัดสารหนู. Naresuan Phayao Journal, 5.
- จิราภรณ์ ปกรณ์. (2558). สนิมเกิดจากอะไร!! และมีวิธีป้องกันอย่างไร. from <http://www.scimath.org/articles/item/4742-2015-04-21-01-43-49>
- ฐาปนพงศ์ พึ่งประสพ. (2550). การเตรียมและใช้กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สำหรับกำจัดโลหะจากน้ำ. (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดลภพ ศรีบุตตา. (2557). การกำจัดปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทโดยใช้มอดูลเส้นใยถลุงแบบสัมผัส. (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล. (2557). วิศวกรรมการประปา Water Supply Engineering: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธรรม รุ่งประกอบกิจ. (2541). การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีส. (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นลพรรณ ชันติกุลานนท์. (2554). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิกระหว่างทรายเคลือบเหล็กและทรายเคลือบโคโซซานที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด. (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- นันทนา ชูฉัตร. (2551). ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษ คอนกรีต.
(วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. (2547). การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสีย โดยใช้ลิกนินที่ใช้อย่างมีประสิทธิภาพ
ด้วยเหล็กออกไซด์. (ปริญญาโท), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. (2538). วิศวกรรมกรรมประปา เล่ม 2: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. (2545). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานิต ช่วยงาน (Producer). (2552). การทดลองหาขนาดมวลคละของดิน (Sieve Analysis).
Retrieved from krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/5.pdf
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบา
เป็นตัวดูดซับ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2541). สารหนู: ฝ่ายศูนย์ข้อมูลสารอันตรายและ
อนุสัญญา กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ.
- สุนทร ศุภพงษ์. (2542). อาชีพเวชศาสตร์ ฉบับ พิษวิทยา: บริษัท ไชเบอร์ เพรส จำกัด.
- สมลทา วาจาบัณฑิต. (2549). โลหะ. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์: คณะวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี.
- อภิรัฐ จันทลักษณ์, วัชรพล ชยประเสริฐ, และเอนก สุขเจริญ. (2555). การวัดความพรุนโดยการ
เปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน:
การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.
- อรุณศักดิ์ โสภณธรรมภาณ. (2551). อันตรายจากการปนเปื้อนสารหนูในแหล่งน้ำ. from
<http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a2.shtml>

รายการอ้างอิงภาษาอังกฤษ

- Ahammed, M. M., & Meera, V. (2010). Metal oxide/hydroxide-coated dual-media filter for simultaneous removal of bacteria and heavy metals from natural waters. Journal of Hazardous Materials, 181(1–3), 788-793.
- Ahmad, S. A., & Khan, M. H. (2015). 2 - Ground Water Arsenic Contamination and Its Health Effects in Bangladesh A2 - Flora, S.J.S Handbook of Arsenic Toxicology (pp. 51-72). Oxford: Academic Press.
- Boyle, R. W., & Jonasson, I. R. (1973). The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. Journal of Geochemical Exploration, 2(3), 251-296.
- Bradley, I., Straub, A., Maraccini, P., Markazi, S., & Nguyen, T. H. (2011). Iron oxide amended biosand filters for virus removal. Water Research, 45(15), 4501-4510.
- CAWST. (2009). Biosand Filter Manual, Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance: Center for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST).
- Chiew, H., Sampson, M. L., Huch, S., Ken, S., & Bostick, B. C. (2009). Effect of Groundwater Iron and Phosphate on the Efficacy of Arsenic Removal by Iron-Amended BioSand Filters. Environmental Science & Technology, 43(16), 6295-6300.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design: Wiley.

- Devi, R. R., Umlong, I. M., Das, B., Borah, K., Thakur, A. J., Raul, P. K., Banerjee, S., & Singh, L. (2014). Removal of iron and arsenic (III) from drinking water using iron oxide-coated sand and limestone. Applied Water Science, 4(2), 175-182.
- Dixit, S., & Hering, J. G. (2003). Comparison of arsenic (V) and arsenic (III) sorption onto iron oxide minerals: implications for arsenic mobility. Environmental Science & Technology, 37(18), 4182-4189.
- Janjaroen, D., Liu, Y., Kuhlenschmidt, M. S., Kuhlenschmidt, T. B., & Nguyen, T. H. (2010). Role of Divalent Cations on Deposition of *Cryptosporidium parvum* Oocysts on Natural Organic Matter Surfaces. Environmental Science & Technology, 44(12), 4519-4524.
- Jeong, Y., Fan, M., Singh, S., Chuang, C.-L., Saha, B., & Hans van Leeuwen, J. (2007). Evaluation of iron oxide and aluminum oxide as potential arsenic(V) adsorbents. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 46(10), 1030-1039.
- Khan, A. H., Rasul, S. B., Munir, A. K. M., Habibuddowla, M., Alauddin, M., Newaz, S. S., & Hussam, A. (2000). Appraisal of a simple arsenic removal method for ground water of Bangladesh. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 35(7), 1021-1041.
- Ngai, T. K. K., Murcott, S., Shrestha, R. R., Dangol, B., & Maharjan, M. (2006). Development and dissemination of Kanchan™ Arsenic Filter in rural Nepal. Water Science and Technology: Water Supply, 6(3), 137-146.
- Ngai, T. K. K., Shrestha, R. R., Dangol, B., Maharjan, M., & Murcott, S. E. (2007). Design for sustainable development—Household drinking water filter for arsenic and pathogen treatment in Nepal. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 42(12), 1879-1888.

- Noubactep, C., Temgoua, E., & Rahman, M. A. (2012). Designing Iron-Amended Biosand Filters for Decentralized Safe Drinking Water Provision. CLEAN – Soil, Air, Water, 40(8), 798-807.
- Organization, W. H. (2011). Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition (WHO Ed.): World Health Organization.
- Tang, J., Zhang, Y., & Bao, S. (2016). The Effect of Ca²⁺ and Mg²⁺ on the Dispersion and Flocculation Behaviors of Muscovite Particles. Minerals, 6(3), 93.
- Ungureanu, G., Santos, S., Boaventura, R., & Botelho, C. (2015). Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption. Journal of Environmental Management, 151, 326-342.
- Wang, H., Narihiro, T., Straub, A. P., Pugh, C. R., Tamaki, H., Moor, J. F., Bradley, I. M., Kamagata, Y., Liu, W., & Nguyen, T. H. (2014). MS2 Bacteriophage Reduction and Microbial Communities in Biosand Filters. Environmental Science & Technology, 48(12), 6702-6709.
- WHO. (2011). Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition (WHO Ed.): World Health Organization.
- Yao, S., Liu, Z., & Shi, Z. (2014). Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption onto iron oxide/activated carbon magnetic composite. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 12(1), 58.
- Youngran, J. (2005). The adsorption of arsenic (V) by iron (Fe₂O₃) and aluminum (Al₂O₃) oxides. Retrieved from <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/1743/>
- Youngran, J., Maohong, F., Van Leeuwen, J., & Belczyk, J. F. (2007). Effect of competing solutes on arsenic (V) adsorption using iron and aluminum oxides. Journal of Environmental Sciences, 19(8), 910-919.





ตารางที่ ก - 1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ปริมาณต่างๆ ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มี ความกระด้าง และมีความกระด้างแคลเซียม

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	ไม่มี ความ กระด้าง	ความกระด้างแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)			
		50	100	150	300
0	1089.99	1059.69	1070.19	1094.28	1035.93
2	492.80	63.94	37.31	26.11	51.33
4	261.47	9.75	7.95	17.05	10.81
6	114.73	8.16	5.60	12.61	5.65
8	45.67	4.86	4.84	1.52	3.79
16	3.09	2.01	3.21	0.56	1.52
32	0.72	0.24	0.56	0.19	0.17
40	0.52	0.29	0.42	0.18	0.18
80	0.20	0.21	0.24	0.15	0.20

ตารางที่ ก - 2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ปริมาณต่างๆ ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่มี ความกระด้าง และมีความกระด้างแคลเซียม

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)				
	ไม่มี ความ กระด้าง	ความกระด้างแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)			
		50	100	150	300
0	1089.99	1071.07	1072.12	1092.08	1085.87
2	492.80	20.42	39.80	32.60	12.74
4	261.47	2.64	3.56	6.45	5.23
6	114.73	1.57	1.86	4.30	2.59
8	45.67	1.07	1.20	1.67	1.47
16	3.09	0.61	0.29	0.81	0.75
32	0.72	0.15	0.12	0.36	0.20
40	0.52	0.12	0.21	0.32	0.14
80	0.20	0.12	0.00	0.26	0.12

ตารางที่ ก - 3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำ

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ความแตกต่างแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)			
	50	100	150	300
เริ่มต้น	17.84	35.28	49.82	112.1725
0	17.76	25.65	54.67	101.9975
2	13.93	16.80	27.75	85.25
4	13.21	23.22	18.00	83.82
6	11.61	23.10	24.46	80.63
8	14.18	20.50	43.15	84.04
16	11.32	17.14	25.95	83.27
32	7.52	19.24	24.21	103.125
40	5.19	14.55	26.68	95.92
80	1.02	6.70	24.61	77.77

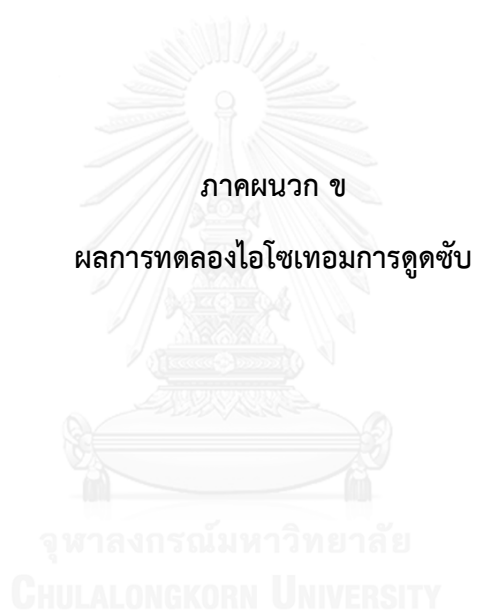
ตารางที่ ก - 4 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นแมกนีเซียมในน้ำ

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ความแตกต่างแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)			
	50	100	150	300
เริ่มต้น	10.21	23.16	32.45	67.76
0	10.27	22.22	32.89	66.55
2	10.52	21.12	32.34	65.45
4	9.69	21.67	30.25	66.55
6	9.74	20.24	29.81	61.6
8	8.83	20.02	30.91	63.25
16	7.55	17.38	26.73	60.72
32	4.58	13.09	22.88	53.68
40	4.08	12.12	21.67	52.69
80	2.04	8.71	14.51	48.62

ตารางที่ ก - 5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารหนูในน้ำที่ปริมาณเหล็กต่างๆ ในแต่ละช่วงเวลา

เวลา (นาทีก)	ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)					
	8	16	24	32	40	80
0	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	580.47	482.02	287.76	85.503	6.809	1.232
15	525.8	380.93	203.72	21.714	3.916	1.023
30	353.76	1.177	0.759	0.11	2.794	1.133
45	258.06	1.639	0.935	0.528	0.66	1.089
60	14.454	0.385	0.319	1.221	0.473	1.089





ตารางที่ ข - 1 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่ไม่มีความกระด้าง

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1089.99	0	#NUM!	3.0374225	#DIV/0!
0.5	492.8	0.0002986	-3.524917	2.6926707	1650396
1	261.47	0.0002071	-3.683757	2.4174219	1262347.3
1.5	114.73	0.0001625	-3.789031	2.059677	705842.54
2	45.672	0.0001305	-3.884257	1.65965	349870.44
4	3.091	6.793E-05	-4.167931	0.490099	45501.928
8	0.715	3.404E-05	-4.468012	-0.145694	21004.797
10	0.517	2.724E-05	-4.564844	-0.286509	18981.654
20	0.198	1.362E-05	-4.865746	-0.703335	14534.884

ตารางที่ ข - 2 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1059.685	0	#NUM!	3.025176787	#DIV/0!
0.5	63.943	0.000497874	-3.302880989	1.805793008	128432.2222
1	9.746	0.000262486	-3.580893855	0.988826407	37129.59929
1.5	8.162	0.000175255	-3.756330409	0.91179659	46572.22632
2	4.862	0.000131854	-3.879908338	0.686814955	36874.25817
4	2.013	6.61048E-05	-4.179766922	0.303843775	30451.64072
8	0.242	3.31078E-05	-4.480070333	-0.616184634	7309.466817
10	0.286	2.64851E-05	-4.576998383	-0.543633967	10798.52445
20	0.209	1.32435E-05	-4.877996814	-0.679853714	15781.31179

ตารางที่ ข - 3 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1070.19	0	#NUM!	3.029460889	#DIV/0!
0.5	37.312	0.000516439	-3.286980968	1.571848529	72248.61019
1	7.953	0.000265559	-3.575838567	0.900530982	29948.11892
1.5	5.599	0.000177432	-3.75096846	0.748110467	31555.78058
2	4.84	0.000133169	-3.875597677	0.684845362	36344.86319
4	3.212	6.66861E-05	-4.175964518	0.506775537	48165.94157
8	0.561	3.34259E-05	-4.475916809	-0.251037139	16783.38938
10	0.418	2.67443E-05	-4.572768765	-0.378823718	15629.49862
20	0.242	1.33744E-05	-4.873727316	-0.616184634	18094.33729

ตารางที่ ข - 4 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1094.28	0	#NUM!	3.039128462	#DIV/0!
0.5	26.114	0.000534083	-3.272391246	1.4168734	48895.02193
1	17.05	0.000269308	-3.569751552	1.231724383	63310.52793
1.5	12.606	0.000180279	-3.74405486	1.100577303	69924.94966
2	1.518	0.000136595	-3.864564403	0.181271772	11113.12436
4	0.561	6.83574E-05	-4.165214226	-0.251037139	8206.861177
8	0.187	3.41904E-05	-4.466095739	-0.728158393	5469.37052
10	0.176	2.73526E-05	-4.563001386	-0.754487332	6434.48886
20	0.154	1.36766E-05	-4.864022649	-0.812479279	11260.12909

ตารางที่ ข - 5 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแคลเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1035.925	0	#NUM!	3.015328314	#DIV/0!
0.5	51.326	0.000492302	-3.3077684	1.71033742	104257.143
1	10.813	0.000256279	-3.591286556	1.033946203	42192.25708
1.5	5.654	0.000171713	-3.765197667	0.752355804	32927.09915
2	3.7895	0.000129018	-3.889351167	0.578581911	29371.97019
4	1.518	6.46508E-05	-4.189426433	0.181271772	23480.00603
8	0.165	3.23677E-05	-4.489888747	-0.782516056	5097.681424
10	0.176	2.58939E-05	-4.586803372	-0.754487332	6796.98075
20	0.198	1.29467E-05	-4.887842593	-0.70333481	15293.53153

ตารางที่ ข - 6 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1071.07	0	#NUM!	3.029817855	#DIV/0!
0.5	20.416	0.000525327	-3.279570277	1.309970657	38863.41269
1	2.64	0.000267108	-3.573313917	0.421603927	9883.661073
1.5	1.573	0.00017825	-3.74897168	0.196728723	8824.709186
2	1.0725	0.00013375	-3.873707224	0.030397301	8018.710324
4	0.6105	6.69037E-05	-4.174549742	-0.214314332	9125.053307
8	0.154	3.34661E-05	-4.475394571	-0.812479279	4601.668105
10	0.121	2.67737E-05	-4.572291202	-0.91721463	4519.356197
20	0.121	1.33869E-05	-4.873321197	-0.91721463	9038.712394

ตารางที่ ข - 7 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

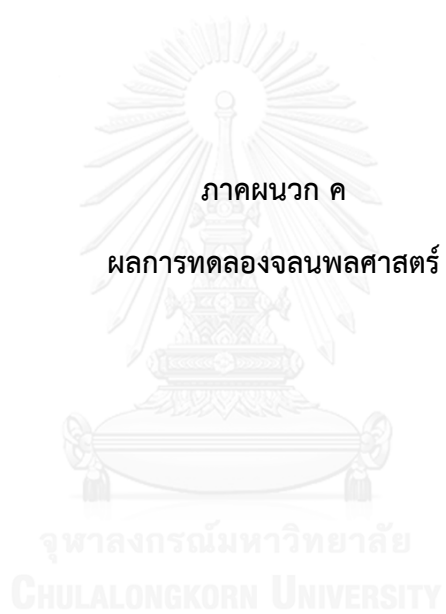
ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1072.115	0	#NUM!	3.030241372	#DIV/0!
0.5	39.798	0.000516161	-3.287214813	1.599861248	77103.84938
1	3.564	0.000267139	-3.573262704	0.551937695	13341.3691
1.5	1.859	0.000178377	-3.74866155	0.26927939	10421.75694
2	1.2045	0.000133864	-3.873334783	0.080806804	8997.908799
4	0.286	6.69896E-05	-4.173992453	-0.543633967	4269.317823
8	0.121	3.35E-05	-4.474955598	-0.91721463	3611.943668
10	0.209	2.67978E-05	-4.571901264	-0.679853714	7799.154967
20	0	1.34015E-05	-4.872846589	#NUM!	0

ตารางที่ ข - 8 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 150 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1092.08	0	#NUM!	3.038254454	#DIV/0!
0.5	32.604	0.000529738	-3.275938872	1.513270884	61547.40645
1	6.446	0.000271409	-3.566376555	0.809290301	23750.17732
1.5	4.301	0.000181297	-3.74161058	0.633569443	23723.56885
2	1.6665	0.000136302	-3.865498767	0.221805318	12226.55442
4	0.8085	6.82045E-05	-4.166187169	-0.092319976	11854.06198
8	0.363	3.41162E-05	-4.467039905	-0.440093375	10640.1201
10	0.319	2.7294E-05	-4.563932415	-0.496209317	11687.53967
20	0.264	1.36477E-05	-4.864940533	-0.578396073	19343.91876

ตารางที่ ข - 9 แสดงผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยเหล็กออกไซด์ของน้ำที่มีความกระด้างแมกนีเซียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	C_e	C_s	$\log C_s$	$\log C_e$	C_e/C_s
0	1085.865	0	#NUM!	3.035775835	#DIV/0!
0.5	12.738	0.000536566	-3.27037685	1.105101245	23739.85679
1	5.225	0.000270161	-3.568376943	0.718086295	19340.30139
1.5	2.585	0.000180548	-3.743408521	0.412460547	14317.56186
2	1.474	0.00013555	-3.86790208	0.168497484	10874.25627
4	0.7535	6.78198E-05	-4.168643615	-0.122916743	11110.32779
8	0.198	3.39273E-05	-4.469451341	-0.70333481	5836.016771
10	0.143	2.71432E-05	-4.566339353	-0.844663963	5268.359357
20	0.121	1.35719E-05	-4.867360549	-0.91721463	8915.504412



ตารางที่ ค - 1 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก 8 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)	q_t ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/L}$)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t
0	1000	0	123.1933	2.090587	#DIV/0!
10	580.47	52.44125	123.1933	1.849739	0.19069
15	525.8	59.275	123.1933	1.805625	0.253058
30	353.76	80.78	123.1933	1.627502	0.371379
45	258.06	92.7425	123.1933	1.483598	0.485214
60	14.454	123.1933	123.1933	#NUM!	0.48704

ตารางที่ ค - 2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก 16 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)	q_t ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/L}$)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t
0	1000	0	62.47594	1.795712782	#DIV/0!
10	482.02	32.37375	62.47594	1.478598057	0.308892235
15	380.93	38.691875	62.47594	1.376286037	0.387678292
30	1.177	62.4264375	62.47594	-1.305394801	0.480565626
45	1.639	62.3975625	62.47594	-1.105822446	0.721182017
60	0.385	62.4759375	62.47594	#NUM!	0.960369742

ตารางที่ ค - 3 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก 32 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)	q_t ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/L}$)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t
0	1000	0	31.2465625	1.494802247	#DIV/0!
10	85.503	28.57803125	31.2465625	0.426272293	0.349919136
15	21.714	30.5714375	31.2465625	-0.17061581	0.490654062
30	0.11	31.2465625	31.2465625	#NUM!	0.960105612
45	0.528	31.2335	31.2465625	-1.883973697	1.440760722
60	1.221	31.21184375	31.2465625	-1.459435919	1.922347186

ตารางที่ ค - 4 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก 40 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)	q_t ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/L}$)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t
0	1000	0	24.988175	1.397734539	#DIV/0!
10	6.809	24.829775	24.988175	-0.800244823	0.402742272
15	3.916	24.9021	24.988175	-1.065122969	0.602358837
30	2.794	24.93015	24.988175	-1.236384851	1.203362194
45	0.66	24.9835	24.988175	-2.330218385	1.801188785
60	0.473	24.988175	24.988175	#NUM!	2.401135737

ตารางที่ ค - 5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยเหล็ก 80 กรัมต่อลิตร


เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)	q_t ($\mu\text{g/L}$)	q_e ($\mu\text{g/L}$)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t
0	1000	0	12.4863875	1.096436809	#DIV/0!
10	1.232	12.4846	12.4863875	-2.74775395	0.800986816
15	1.023	12.4872125	12.4863875	#NUM!	1.201228857
30	1.133	12.4858375	12.4863875	-3.259637311	2.402722284
45	1.089	12.4863875	12.4863875	#NUM!	3.603924674
60	1.089	12.4863875	12.4863875	#NUM!	4.805232899



วิธี Microtiter Plate Assay (MTP)

วัดโดยห้องปฏิบัติการงานบริการวิชาการ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. นำเกลือใส่ในตัวอย่างทรายและนำไป sonicate 15 นาที
2. ดูดสารละลายปริมาตร 200 μL ใส่ใน 96-well microtiter plate บ่มที่ 37 °C 24 ชั่วโมง
3. ล้างด้วย phosphate buffered saline 2 ครั้ง ทิ้งให้แห้งประมาณ 1 ชม.
4. เติม 1% crystal violet 200 μL ทิ้งไว้ 5 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
5. เติม 95% ethanol 200 μL
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร



ห้องปฏิบัติการงานบริการวิชาการ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานผลการทดสอบ

15/02/2017

วิธีการทดลอง

ทดสอบความสามารถการสร้างไบโอฟิล์มด้วยวิธี Microtiter (MTP) plate assay คัดแปลงวิธีจาก Zmantar และคณะ (2008) โดยนำเกลือใส่ในตัวอย่างทรายและนำไป sonicate เป็นเวลา 15 นาที และดูดสารละลายปริมาตร 200 ไมโครลิตร ใส่ใน 96-well microtiter plate บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างด้วย phosphate buffered saline 2 ครั้ง ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วเติม 1% crystal violet ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเทสี crystal violet ออก และล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้ง แล้วเติม 95% ethanol ปริมาตร 200 ไมโครลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร

ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 การทดสอบการสร้าง Biofilm ของตัวอย่างทราย

ตัวอย่าง	OD540	การสร้าง Biofilm
Bio ₊ No Fe ทราย 1	0.80±0.08	สร้างได้ระดับปานกลาง
Bio ₊ With Fe ทราย 2	0.41±0.05	สร้างได้ระดับปานกลาง
No Bio ₋ With Fe ทราย 3	0.42±0.09	สร้างได้ระดับปานกลาง

หมายเหตุ ค่า OD540 ≥ 1 หมายถึงมีการสร้างไบโอฟิล์มระดับสูง
 ค่า $0.1 \leq \text{OD540} < 1$ หมายถึงมีการสร้างไบโอฟิล์มระดับปานกลาง
 ค่า OD540 < 0.1 แสดงว่าไม่มีการสร้างไบโอฟิล์ม

.....นันทธร เถียรช...
 (นางสาวนันทธร เถียรช)
 เจ้าหน้าที่วิเคราะห์

รูปที่ ง - 1 ในรายงานผลการวิเคราะห์การสร้างไบโอฟิล์ม

จากภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง - 1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำก่อนและหลังออกจากถังกรอง

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
6/10/2016		3.4	3.5	4.1
7/10/2016		3.7	3.6	3.1
8/10/2016		4.2	4.0	4.2
9/10/2016		3.5	3.5	3.4
10/10/2016		3.5	3.6	4.0
11/10/2016		4.0	3.1	3.8
12/10/2016		3.9	3.7	3.8
13/10/2016		4.2	4.1	3.9
14/10/2016		4.1	4.2	4.4
15/10/2016		3.2	4.0	4.2
16/10/2016		3.6	3.8	4.2
17/10/2016		3.3	4.2	3.9
18/10/2016	5.0	3.4	3.8	4.4
19/10/2016	4.7	4.2	3.6	4.6
20/10/2016	4.5	4.0	3.8	4.8
21/10/2016	4.6	4.2	3.9	4.0
22/10/2016	4.3	3.8	3.6	4.2
23/10/2016	4.6	3.4	4.3	3.8
24/10/2016	4.7	3.8	4.3	4.4
25/10/2016	4.8	4.0	4.4	4.7
26/10/2016	3.9	3.8	3.6	4.6
27/10/2016	4.4	3.5	3.5	4.0
28/10/2016	4.3	4.0	3.7	3.6
29/10/2016	4.6	4.2	4.4	3.8
30/10/2016	4.5	3.5	3.7	4.3
31/10/2016	4.6	3.6	4.3	4.2
1/11/201	4.4	3.9	3.6	3.5

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
2/11/2016	4.5	4.3	3.5	4.0
3/11/2016	4.6	4.4	4.2	3.6
4/11/2016	5.2	4.2	4.5	4.4
5/11/2016	4.6	4.0	4.1	3.8
6/11/2016	5.2	3.6	4.3	3.7
7/11/2016	4.2	4.4	4.6	4.0
8/11/2016	5.3	4.2	4.1	4.2
9/11/2016	4.5	4.1	3.8	4.5
10/11/2016	4.4	3.6	4.3	4.2
11/11/2016	4.5	3.6	4.7	4.7
12/11/2016	5.2	3.7	4.0	3.7
13/11/2016	4.6	4.0	3.6	3.8
14/11/2016	4.6	3.2	3.9	3.6
15/11/2016	4.9	3.3	3.6	4.0
16/11/2016	4.6	3.6	3.4	3.8
17/11/2016	4.8	3.1	3.7	3.6
18/11/2016	5.2	4.1	4.0	3.9
19/11/2016	4.4	3.4	4.0	4.3
20/11/2016	5.0	4.1	4.7	4.5
21/11/2016	5.1	3.6	4.1	3.7
22/11/2016	4.7	3.8	4.4	3.4
23/11/2016	4.5	4.2	4.1	3.8
24/11/2016	4.8	4.2	4.1	3.5
25/11/2016	4.7	4.1	4.2	3.5
26/11/2016	4.9	4.0	4.2	3.8
27/11/2016	4.5	3.3	3.6	3.1
28/11/2016	4.7	3.6	3.5	4.0
29/11/2016	4.1	3.5	4.2	3.4

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
30/11/2016	4.8	3.6	3.4	3.0
1/12/2016	4.5	4.1	3.5	3.2
2/12/2016	4.9	3.3	4.0	3.3
3/12/2016	4.7	3.7	3.6	3.4
4/12/2016	4.7	3.7	4.0	3.9
5/12/2016	4.6	3.6	3.5	3.3
6/12/2016	4.7	3.8	3.6	3.3
7/12/2016	4.3	3.4	3.7	3.9
8/12/2016	4.9	4.1	4.4	4.1
9/12/2016	4.1	3.9	4.3	4.3
10/12/2016	5.3	3.8	4.4	4.2
11/12/2016	5.3	3.8	3.5	4.2
12/12/2016	4.5	4.1	4.4	3.9
13/12/2016	4.9	4.0	4.4	4.3
14/12/2016	4.5	3.5	4.2	3.5
15/12/2016	4.4	3.8	3.9	4.1
16/12/2016	5.0	4.0	3.5	3.5
17/12/2016	4.6	3.8	4.3	3.5
18/12/2016	4.6	3.3	3.5	4.2
19/12/2016	4.2	3.5	4.2	4.2
20/12/2016	4.5	3.7	3.8	3.9
21/12/2016	4.0	3.8	3.9	3.7
22/12/2016	4.4	3.4	3.9	3.5
23/12/2016	4.6	4.1	3.1	3.6
24/12/2016	5.0	3.8	3.9	3.7
25/12/2016	5.1	3.7	4.2	3.5
26/12/2016	4.9	3.9	4.0	4.1
27/12/2016	4.5	3.9	4.1	3.5

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
28/12/2016	4.5	4.1	4.2	4.4
29/12/2016	3.9	4.2	3.9	4.5
30/12/2016	5.1	3.5	4.0	4.4
31/12/2016	4.4	3.9	3.5	3.8
1/1/2017	5.1	3.7	3.5	4.3
2/1/2017	4.5	3.7	3.7	3.8
3/1/2017	4.0	3.9	4.3	4.5
4/1/2017	4.2	4.1	3.9	4.3
5/1/2017	3.7	3.3	4.3	4.7
6/1/2017	4.3	3.8	5.0	5.0
7/1/2017	4.9	4.2	4.1	4.9
8/1/2017	4.1	3.8	4.6	4.3
9/1/2017	4.3	3.6	4.2	3.8
10/1/2017	5.3	3.5	4.5	4.0
11/1/2017	5.0	4.2	4.2	4.7
12/1/2017	4.3	5.2	4.3	4.0
13/1/2017	4.3	5.1	5.0	4.1
14/1/2017	5.1	3.8	3.9	3.3
15/1/2017	4.4	4.2	3.9	3.6
16/1/2017	4.0	4.8	4.4	4.1
17/1/2017	5.3	3.3	4.4	4.9
18/1/2017	5.1	4.4	5.1	3.9
19/1/2017	5.0	4.4	4.9	4.0
20/1/2017	4.5	4.7	4.9	4.0
21/1/2017	5.1	3.8	3.7	3.1
22/1/2017	4.6	4.3	4.4	5.1
23/1/2017	6.2	5.1	5.0	4.8
24/1/2017	4.3	4.7	4.1	4.2

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
25/1/2017	4.2	4.6	4.0	4.9
26/1/2017	4.6	4.2	4.4	4.4
27/1/2017	4.3	4.0	3.8	4.5
28/1/2017	4.8	3.7	4.6	3.5
29/1/2017	4.9	3.1	3.4	3.6
30/1/2017	4.9	4.1	4.5	4.2
31/1/2017	4.8	3.9	4.0	4.0
1/2/2017	4.9	3.6	3.4	3.8
2/2/2017	4.6	3.5	4.0	3.3
3/2/2017	4.9	4.1	4.0	3.9
4/2/2017	4.8	4.1	3.6	3.7
5/2/2017	5.3	3.6	3.1	3.4

ตารางที่ ง - 2 ค่าพีเอชของน้ำก่อนและหลังออกจากถังกรอง

วันที่	พีเอช			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
16/10/2016		9.07	9.50	9.49
17/10/2016		9.05	9.41	9.44
18/10/2016	7.20	9.14	9.41	9.48
19/10/2016	7.13	9.19	9.53	9.54
20/10/2016	7.30	9.07	9.44	9.47
21/10/2016	7.19	9.02	9.33	9.43
22/10/2016	7.17	9.05	9.35	9.40
23/10/2016	7.15	9.15	9.48	9.47
24/10/2016	7.18	9.09	9.40	9.46
25/10/2016	7.22	8.95	9.34	9.34
26/10/2016	7.23	9.05	9.35	9.40
27/10/2016	7.17	8.97	9.31	9.40
28/10/2016	7.24	9.1	9.44	9.50
29/10/2016	7.24	9.01	9.30	9.33
30/10/2016	6.96	8.79	9.04	9.23
31/10/2016	7.15	8.88	9.18	9.30
1/11/201	7.24	9.06	9.28	9.41
2/11/2016	7.23	8.93	9.16	9.30
3/11/2016	7.19	8.97	9.19	9.24
4/11/2016	7.21	8.98	9.25	9.32
5/11/2016	7.21	8.82	9.26	9.25
6/11/2016	7.28	8.92	9.20	9.31
7/11/2016	7.29	9.38	9.41	9.05
8/11/2016	7.34	8.96	9.30	9.32
9/11/2016	7.50	8.91	9.25	9.31
10/11/2016	7.44	9.05	9.32	9.34
11/11/2016	7.46	8.99	9.31	9.30

วันที่	พีเอช			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
12/11/2016	7.49	8.93	9.33	9.32
13/11/2016	7.39	8.87	9.31	9.30
14/11/2016	7.42	8.97	9.28	9.33
15/11/2016	7.31	8.91	9.24	9.27
16/11/2016	7.67	8.87	9.31	9.32
17/11/2016	7.68	8.90	9.25	9.31
18/11/2016	7.56	8.87	9.07	9.28
19/11/2016	7.28	8.78	9.06	9.15
20/11/2016	7.29	8.89	9.22	9.24
21/11/2016	7.36	8.83	9.07	9.20
22/11/2016	7.32	8.87	9.12	9.12
23/11/2016	7.19	8.71	8.98	9.20
24/11/2016	7.23	8.80	9.22	9.24
25/11/2016	7.27	8.79	9.09	9.22
26/11/2016	7.39	8.83	9.16	9.24
27/11/2016	7.19	8.80	9.10	9.11
28/11/2016	7.45	8.86	9.12	9.19
29/11/2016	7.42	8.81	9.13	9.17
30/11/2016	7.65	8.89	9.19	9.18
1/12/2016	7.66	8.83	9.20	9.23
2/12/2016	7.73	8.83	9.22	9.23
3/12/2016	7.61	8.70	9.13	9.14
4/12/2016	7.42	8.78	9.08	9.13
5/12/2016	7.41	8.65	9.12	9.20
6/12/2016	7.35	8.73	9.16	9.17
7/12/2016	7.47	8.76	8.98	9.07
8/12/2016	7.53	8.74	9.10	9.15
9/12/2016	7.55	8.73	9.12	9.10

วันที่	พีเอช			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
10/12/2016	7.53	8.64	9.08	9.10
11/12/2016	7.61	8.66	9.12	9.10
12/12/2016	7.50	8.71	8.94	9.08
13/12/2016	7.75	8.61	8.81	8.86
14/12/2016	6.65	8.35	8.81	8.84
15/12/2016	7.28	8.40	8.85	8.82
16/12/2016	7.29	8.41	8.87	8.88
17/12/2016	7.24	8.34	8.79	8.87
18/12/2016	7.48	8.40	8.89	8.90
19/12/2016	7.47	8.36	8.81	8.84
20/12/2016	7.35	8.36	8.75	8.73
21/12/2016	7.44	8.32	8.77	8.79
22/12/2016	7.34	8.26	8.70	8.76
23/12/2016	7.46	8.33	8.47	8.86
24/12/2016	7.48	8.32	8.43	8.83
25/12/2016	7.42	8.31	8.79	8.84
26/12/2016	7.39	8.23	8.68	8.70
27/12/2016	7.45	8.26	8.79	8.80
28/12/2016	7.20	8.30	8.74	8.78
29/12/2016	7.38	8.32	8.80	8.78
30/12/2016	7.49	8.28	8.71	8.82
31/12/2016	7.47	8.31	8.91	8.92
1/1/2017	7.37	8.29	8.61	8.65
2/1/2017	7.31	8.24	8.79	8.83
3/1/2017	7.44	8.25	8.81	8.85
4/1/2017	7.36	8.21	8.71	8.75
5/1/2017	7.29	8.17	8.70	8.70
6/1/2017	7.28	8.12	8.70	8.67

วันที่	พีเอช			
	เริ่มต้น	BSF	IOBSF	IOSF
7/1/2017	7.38	8.13	8.77	8.82
8/1/2017	7.28	8.26	8.62	8.68
9/1/2017	7.31	8.10	8.71	8.69
10/1/2017	7.39	8.26	8.62	8.77
11/1/2017	7.49	8.27	8.73	8.72
12/1/2017	7.41	8.26	8.74	8.76
13/1/2017	7.54	8.23	8.73	8.74
14/1/2017	7.49	8.17	8.75	8.80
15/1/2017	7.47	8.16	8.63	8.67
16/1/2017	7.45	8.05	8.53	8.57
17/1/2017	7.51	8.26	8.71	8.65
18/1/2017	7.39	8.15	8.55	8.69
19/1/2017	7.51	8.06	8.57	8.63
20/1/2017	7.37	8.10	8.60	8.63
21/1/2017	7.45	8.31	8.31	8.38
22/1/2017	7.43	8.32	8.54	8.67
23/1/2017	7.46	8.18	8.64	8.62
24/1/2017	7.35	8.10	8.58	8.60
25/1/2017	7.39	8.11	8.60	8.63
26/1/2017	7.37	8.17	8.65	8.59
27/1/2017	7.31	8.1	8.60	8.62
28/1/2017	7.39	7.93	8.45	8.57
29/1/2017	7.38	7.83	8.54	8.64
30/1/2017	7.37	8.11	8.29	8.35
31/1/2017	7.32	8.04	8.46	8.54
1/2/2017	7.39	8.19	8.39	8.41
2/2/2017	7.69	8.16	8.44	8.48
3/2/2017	7.67	8.05	8.59	8.64
4/2/2017	7.44	8.04	8.32	8.44
5/2/2017	7.59	8.04	8.65	8.78

ตารางที่ ง - 3 ความเข้มข้นเหล็กในน้ำหลังผ่านถังกรอง

วันที่	ความเข้มข้นเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
6/10/2016	0.0246	0.0139	0.0214
7/10/2016	0.0118	0.0104	0.0181
8/10/2016	0.0150	0.0131	0.0174
9/10/2016	0.0233	0.0125	0.0153
10/10/2016	0.0173	0.0133	0.0141
11/10/2016	0.0168	0.0102	0.0138
12/10/2016	0.0219	0.0122	0.0191
13/10/2016	0.0161	0.0113	0.0117
14/10/2016	0.0174	0.0089	0.0107
15/10/2016	0.0248	0.0115	0.0142
16/10/2016	0.0162	0.0115	0.0120
17/10/2016	0.0195	0.0137	0.0143
18/10/2016	0.0225	0.0122	0.0131
19/10/2016	0.0183	0.0127	0.0142
20/10/2016	0.0213	0.0127	0.0138
21/10/2016	0.0251	0.0147	0.0227
22/10/2016	0.0222	0.0148	0.0185
23/10/2016	0.0160	0.0075	0.0099
24/10/2016	0.0213	0.0116	0.0028
25/10/2016	0.0251	0.0176	0.0136
26/10/2016	0.0204	0.0180	0.0079
27/10/2016	0.0190	0.0163	0.0014
28/10/2016	0.0190	0.0172	0.0015
29/10/2016	0.0314	0.0159	0.0160
30/10/2016	0.0190	0.0184	0.0011
31/10/2016	0.0194	0.0164	0.0008
1/11/201	0.0186	0.0164	0.0017

วันที่	ความเข้มข้นเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
2/11/2016	0.0183	0.0172	0.0204
3/11/2016	0.0204	0.0181	0.0019
4/11/2016	0.0217	0.0160	0.0171
5/11/2016	0.0208	0.0214	0.0100
6/11/2016	0.0165	0.0149	0.0002
7/11/2016	0.0169	0.0146	0.0000
8/11/2016	0.0160	0.0156	0.0000
9/11/2016	0.0161	0.0159	0.0158
10/11/2016	0.0169	0.0151	0.0000
11/11/2016	0.0177	0.0153	0.0000
12/11/2016	0.0172	0.0173	0.0000
13/11/2016	0.0190	0.0158	0.0000
14/11/2016	0.0224	0.0166	0.0160
15/11/2016	0.0285	0.0221	0.0083
16/11/2016	0.0213	0.0186	0.0007
17/11/2016	0.0218	0.0168	0.0011
18/11/2016	0.0255	0.0172	0.0028
19/11/2016	0.0250	0.0159	0.0155
20/11/2016	0.0254	0.0166	0.0016
21/11/2016	0.0371	0.0179	0.0028
22/11/2016	0.0332	0.0173	0.0020
23/11/2016	0.0350	0.0182	0.0017
24/11/2016	0.0322	0.0184	0.0179
25/11/2016	0.0189	0.0016	0.0026
26/11/2016	0.0125	0.0037	0.0037
27/11/2016	0.0118	0.0024	0.0017
28/11/2016	0.0022	0.0105	0.0151
29/11/2016	0.0202	0.0083	0.0050

วันที่	ความเข้มข้นเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
30/11/2016	0.0266	0.0043	0.0031
1/12/2016	0.0228	0.0028	0.0030
2/12/2016	0.0018	0.0000	0.0000
3/12/2016	0.0006	0.0000	0.0000
4/12/2016	0.0196	0.0092	0.0038
5/12/2016	0.0000	0.0000	0.0000
6/12/2016	0.0025	0.0000	0.0000
7/12/2016	0.0000	0.0000	0.0000
8/12/2016	0.0000	0.0000	0.0000
9/12/2016	0.0078	0.0000	0.0039
10/12/2016	0.0009	0.0000	0.0000
11/12/2016	0.0010	0.0000	0.0000
12/12/2016	0.0028	0.0000	0.0000
13/12/2016	0.0026	0.0000	0.0000
14/12/2016	0.0062	0.0000	0.0000
15/12/2016	0.0110	0.0000	0.0000
16/12/2016	0.0078	0.0050	0.0046
17/12/2016	0.0068	0.0054	0.0042
18/12/2016	0.0090	0.0066	0.0054
19/12/2016	0.0082	0.0062	0.0065
20/12/2016	0.0510	0.0061	0.0069
21/12/2016	0.0088	0.0065	0.0054
22/12/2016	0.0088	0.0083	0.0052
23/12/2016	0.0076	0.0059	0.0051
24/12/2016	0.0080	0.0066	0.0055
25/12/2016	0.0092	0.0062	0.0083
26/12/2016	0.0171	0.0068	0.0059
27/12/2016	0.0094	0.0065	0.0053

วันที่	ความเข้มข้นเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
28/12/2016	0.0074	0.0062	0.0051
29/12/2016	0.0091	0.0060	0.0051
30/12/2016	0.0082	0.0070	0.0070
31/12/2016	0.0092	0.0070	0.0068
1/1/2017	0.0077	0.0068	0.0095
2/1/2017	0.0071	0.0065	0.0055
3/1/2017	0.0085	0.0069	0.0055
4/1/2017	0.0080	0.0070	0.0052
5/1/2017	0.0091	0.0068	0.0055
6/1/2017	0.0090	0.0065	0.0047
7/1/2017	0.0077	0.0064	0.0110
8/1/2017	0.0095	0.0060	0.0199
9/1/2017	0.0086	0.0053	0.0086
10/1/2017	0.0158	0.0080	0.0075
11/1/2017	0.0104	0.0078	0.0068
12/1/2017	0.0081	0.0077	0.0071
13/1/2017	0.0072	0.0076	0.0073
14/1/2017	0.0080	0.0093	0.0079
15/1/2017	0.0087	0.0080	0.0068
16/1/2017	0.0088	0.0096	0.0078
17/1/2017	0.0065	0.0218	0.0077
18/1/2017	0.0067	0.0106	0.0067
19/1/2017	0.0059	0.0093	0.0066
20/1/2017	0.0080	0.0090	0.0079
21/1/2017	0.0395	0.0115	0.0078
22/1/2017	0.0076	0.0067	0.0068
23/1/2017	0.0064	0.0072	0.0069
24/1/2017	0.0063	0.0094	0.0825

วันที่	ความเข้มข้นเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
25/1/2017	0.0060	0.0077	0.0069
26/1/2017	0.0065	0.0081	0.0070
27/1/2017	0.0076	0.0084	0.0077
28/1/2017	0.0074	0.0085	0.0065
29/1/2017	0.0076	0.0081	0.0064
30/1/2017	0.0067	0.0083	0.0066
31/1/2017	0.0069	0.0095	0.0070
1/2/2017	0.0119	0.0144	0.0118
2/2/2017	0.0095	0.0112	0.0100
3/2/2017	0.0117	0.0143	0.0127
4/2/2017	0.0121	0.0138	0.0125
5/2/2017	0.0124	0.0143	0.0129

ตารางที่ ง - 4 ความเข้มข้นสารหนูในน้ำหลังผ่านถังกรอง

วันที่	ความเข้มข้นสารหนู (ไมโครกรัมต่อลิตร)		
	BSF	IOBSF	IOSF
6/10/2016	8.15	5.69	17.75
9/10/2016	7.71	3.06	5.30
12/10/2016	14.47	2.39	3.63
15/10/2016	25.26	2.68	3.41
18/10/2016	44.33	2.14	2.84
21/10/2016	77.90	2.12	2.61
24/10/2016	96.92	2.39	2.33
29/10/2016	171.00	1.62	1.87
9/11/2016	333.34	2.19	2.15
14/11/2016	391.50	2.33	2.33
19/11/2016	438.19	2.25	2.46
24/11/2016	488.81	2.14	2.44
29/11/2016	533.36	2.39	2.30
4/12/2016	578.36	2.42	2.42
9/12/2016	604.91	2.52	2.42
14/12/2016	597.15	2.39	2.54
19/12/2016	629.55	1.94	2.24
24/12/2016	619.20	6.17	6.29
29/12/2016	642.94	5.56	5.60
3/1/2017	657.56	5.63	6.15
10/1/2017	677.70	1.88	2.14
11/1/2017	651.60	1.97	2.23
17/1/2017	668.93	2.12	2.37
24/1/2017	692.55	2.10	2.46
31/1/2017	711.56	2.01	2.36



การนำเสนอผลการทดสอบนัยสำคัญค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตารางที่ จ - 1 แสดงการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ และความแตกต่างกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่าง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ปริมาณเหล็กกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ	-0.334*
ความแตกต่างแคลเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ	-0.071*
ความแตกต่างแมกนีเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ	-0.067*

* P<0.05

จากการทดสอบพบว่า ปริมาณเหล็กมีความสัมพันธ์ทางลบกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และมีความสัมพันธ์กันสูงถึงร้อยละ 33.4 ความแตกต่างแคลเซียมมีความสัมพันธ์ทางลบกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และมีความสัมพันธ์กันสูงถึงร้อยละ 7.1 และความแตกต่างแมกนีเซียมมีความสัมพันธ์ทางลบกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และมีความสัมพันธ์กันสูงถึงร้อยละ 6.7

Correlations			
		ปริมาณเหล็ก	ความเข้มข้นสารหนู
ปริมาณเหล็ก	Pearson Correlation	1	-.334**
	Sig. (2-tailed)		.002
	N	81	81
ความเข้มข้นสารหนู	Pearson Correlation	-.334**	1
	Sig. (2-tailed)	.002	
	N	81	81

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

จากตารางเป็นการทดสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ

$$\text{ทดสอบสมมติฐาน} \quad H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho < 0$$

พบว่า ค่า sig = 0.02 (<0.05) หมายความว่า ปฏิเสธ H0 ยอมรับ H1 ซึ่งแสดงว่า $H_1 : \rho > 0$ ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณเหล็กมีความสัมพันธ์ทางลบกับความเข้มข้นสารหนู โดยมีความสัมพันธ์กัน -0.334

Correlations			
		ความกระด้าง	ความเข้มข้นสารหนูCa
ความกระด้าง	Pearson Correlation	1	-.071
	Sig. (2-tailed)		.642
	N	45	45
ความเข้มข้นสารหนูCa	Pearson Correlation	-.071	1
	Sig. (2-tailed)	.642	
	N	45	45

จากตารางเป็นการทดสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างแคลเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ

$$\text{ทดสอบสมมุติฐาน} \quad H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho < 0$$

พบว่า ค่า sig = 0.642 (<0.05) หมายความว่า ยอมรับ H_0 ซึ่งแสดงว่า $H_0 : \rho = 0$ ดังนั้นสรุปได้ว่าความกระด้างแคลเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำไม่มีความสัมพันธ์กัน

Correlations			
		ความกระด้าง	ความเข้มข้นสารหนูMg
ความกระด้าง	Pearson Correlation	1	-.067
	Sig. (2-tailed)		.661
	N	45	45
ความเข้มข้นสารหนูMg	Pearson Correlation	-.067	1
	Sig. (2-tailed)	.661	
	N	45	45

จากตารางเป็นการทดสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างแมกนีเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำ

$$\text{ทดสอบสมมุติฐาน} \quad H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho < 0$$

พบว่า ค่า sig = 0.661 (<0.05) หมายความว่า ยอมรับ H_0 ซึ่งแสดงว่า $H_0 : \rho = 0$ ดังนั้นสรุปได้ว่าความกระด้างแมกนีเซียมกับความเข้มข้นสารหนูในน้ำไม่มีความสัมพันธ์กัน

การนำเสนอผลการวิเคราะห์ด้วย Independent t-test

ตารางที่ จ - 2 ความเข้มข้นสารหนูในน้ำของถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF

ชนิดถัง	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า t	Sig.
BSF	25	414.52	268.61	7.66	0.000
IOBSF	25	2.80	1.35		
BSF	25	414.52	268.61	7.65	0.000
IOSF	25	3.62	3.22		
IOBSF	25	2.80	1.35	-1.18	0.123
IOSF	25	3.62	3.22		

จากการทดสอบพบว่าความเข้มข้นสารหนูของถัง BSF แตกต่างกับถัง IOBSF และถัง IOSF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และความเข้มข้นสารหนูของถัง IOBSF แตกต่างกับถัง IOSF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

Group Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Mean
ค่า	25	414.5180	268.60691	53.72138	
IOBSF	25	2.8040	1.35070	.27014	

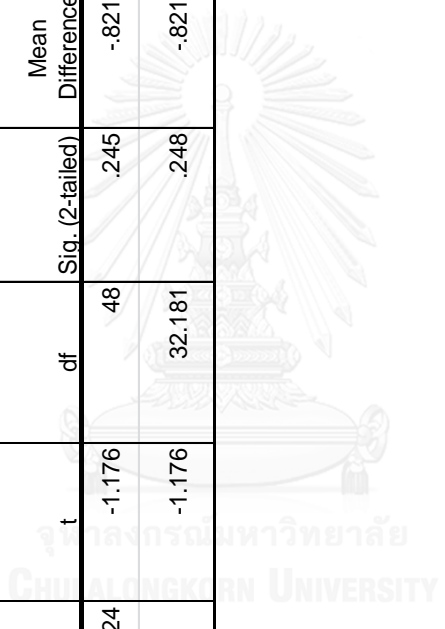
Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ค่า	Equal variances assumed	106.687	.000	7.664	48	.000	411.71400	53.72206	303.69856	519.72944
	Equal variances not assumed			7.664	24.001	.000	411.71400	53.72206	300.83741	522.59059

Group Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Mean
ค่า	25	414.5180	268.60691	53.72138	
IOSF	25	3.6256	3.22233	.64447	

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ค่า	Equal variances assumed	105.856	.000	7.648	48	.000	410.89240	53.72525	302.87055	518.91425
	Equal variances not assumed			7.648	24.007	.000	410.89240	53.72525	300.01063	521.77417

Group Statistics				
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ค่า	25	2.8040	1.35070	.27014
ค่า	25	3.6256	3.22233	.64447

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances				t-test for Equality of Means				
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ค่า	Equal variances assumed	2.453	.124	-1.176	48	.245	-.82160	.69879	-2.22662	.58342
ค่า	Equal variances not assumed			-1.176	32.181	.248	-.82160	.69879	-2.24468	.60148



เปรียบเทียบความเข้มข้นสารหนูของถ้ำ BSF กับถ้ำ IOBSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = 7.66 และค่า Sig = 0.000 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.000/2 = 0.000 (1-tailed) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ดังนั้นสรุปว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นสารหนูในน้ำของถ้ำ BSF แตกต่างกับถ้ำ IOBSF

เปรียบเทียบความเข้มข้นสารหนูของถ้ำ BSF กับถ้ำ IOSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = 7.65 และค่า Sig = 0.000 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.000/2 = 0.000 (1-tailed) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ดังนั้นสรุปว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นสารหนูในน้ำของถ้ำ BSF แตกต่างกับถ้ำ IOSF

เปรียบเทียบความเข้มข้นสารหนูของถ้ำ IOBSF กับถ้ำ IOSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = -1.18 และค่า Sig = 0.245 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.245/2 = 0.122 (1-tailed) ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่ายอมรับสมมติฐาน H_0 ดังนั้นสรุปว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นสารหนูในน้ำของถ้ำ IOBSF ไม่แตกต่างกับถ้ำ IOSF

ตารางที่ จ - 3 ความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถัง BSF ถัง IOBSF และถัง IOSF

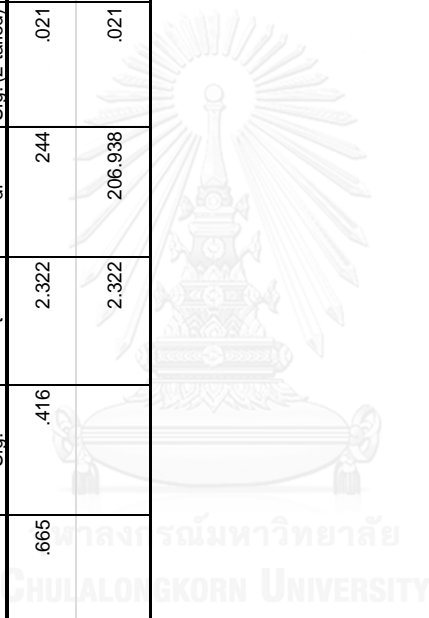
ชนิดถัง	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า t	Sig.
BSF	123	0.014	0.009	4.46	0.000
IOBSF	123	0.010	0.005		
BSF	25	0.0143	0.009	5.68	0.000
IOSF	25	0.008	0.009		
IOBSF	25	0.010	0.006	2.322	0.010
IOSF	25	0.008	0.009		

จากการทดสอบพบว่าความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถัง BSF กับถัง IOBSF และถัง IOSF แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05



Group Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean		
Fe	123	.0100	.00568	.00051		
IOBSF	123	.0078	.00892	.00080		

Independent Samples Test									
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Fe									
Equal variances assumed	.665	.416	2.322	244	.021	.00222	.00095	.00034	.00409
Equal variances not assumed			2.322	206.938	.021	.00222	.00095	.00033	.00410



เปรียบเทียบความเข้มข้นเหล็กของถ้ำ BSF กับถ้ำ IOBSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = 4.46 และค่า Sig = 0.000 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.000/2 = 0.000 (1-tailed) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ดังนั้นสรุปว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถ้ำ BSF แตกต่างกับถ้ำ IOBSF

เปรียบเทียบความเข้มข้นเหล็กของถ้ำ BSF กับถ้ำ IOSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = 5.68 และค่า Sig = 0.000 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.000/2 = 0.000 (1-tailed) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ดังนั้นสรุปว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถ้ำ BSF แตกต่างกับถ้ำ IOSF

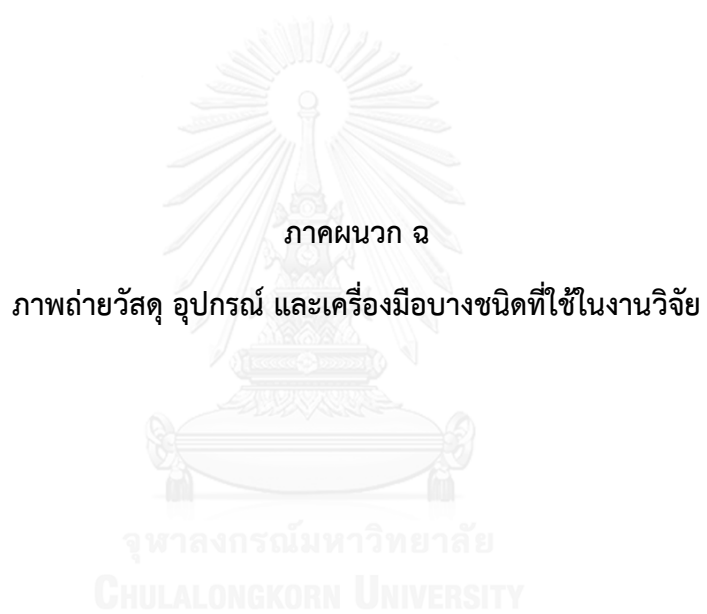
เปรียบเทียบความเข้มข้นเหล็กของถ้ำ IOBSF กับถ้ำ IOSF

ทดสอบค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ t-test ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

พบว่า ค่าสถิติ t-test = 2.32 และค่า Sig = 0.021 (2-tailed) แต่เราต้องการทดสอบทางเดียว ดังนั้นค่า Sig = 0.021/2 = 0.0105 (1-tailed) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ดังนั้นสรุปว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หมายความว่าความเข้มข้นเหล็กในน้ำของถ้ำ IOBSF แตกต่างกับถ้ำ IOSF





รูปที่ ฉ - 1 วัสดุรองทรายผสมเหล็ก



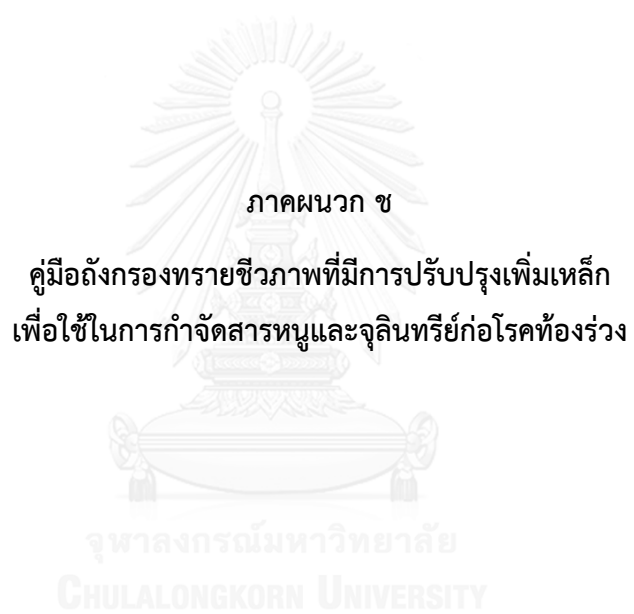
รูปที่ ฉ - 2 ถังกรองทราย



รูปที่ ฉ - 3 การทดลองแบบทีละเท



รูปที่ ฉ - 4 การหมุนเพื่อทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP



คู่มือ

ถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเติม

IRON AMENDED BIOSAND-FILTER

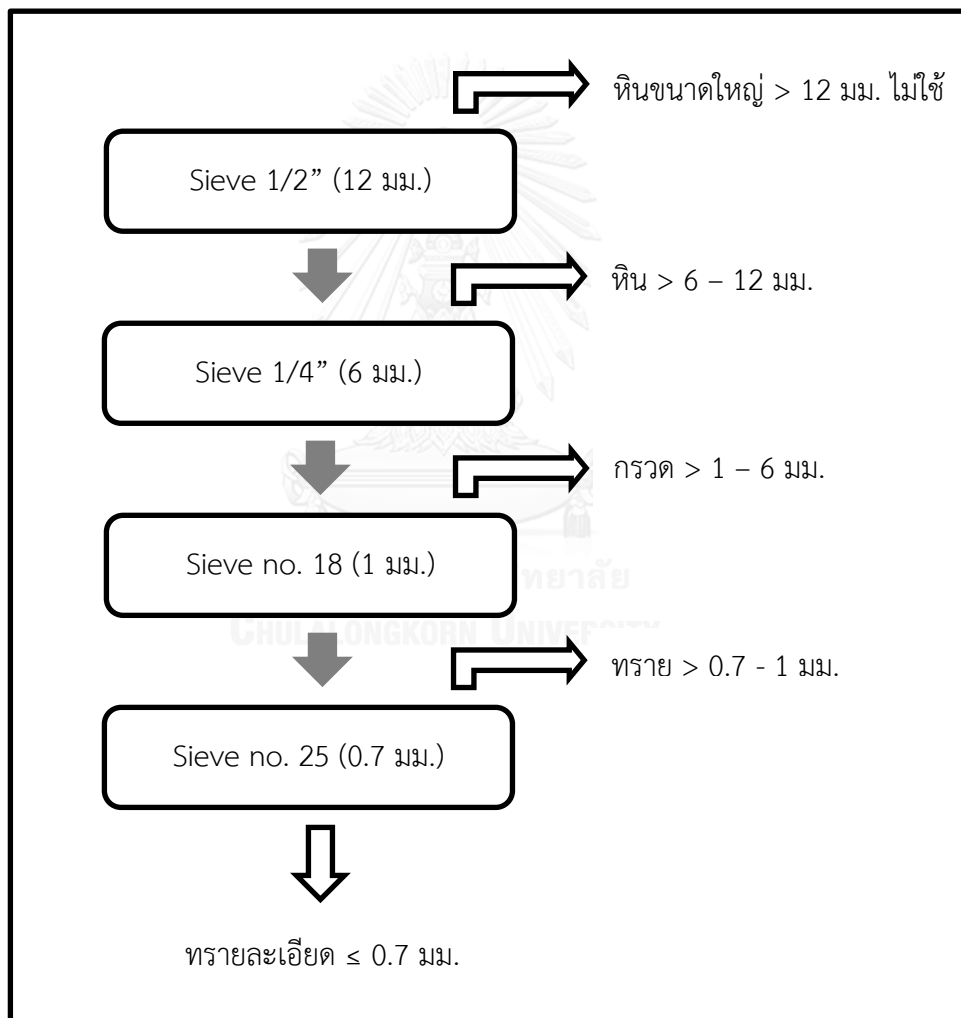
เพื่อใช้ในการกำจัดสารหนู



1. การเตรียมทราย กรวด หิน และเหล็ก

1.1 การคัดขนาดทราย กรวด และหิน

คัดขนาดทราย กรวด และหิน โดยนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 1/2", 1/4", 18 และ 25 ดังรูปที่ 1 ทรายละเอียดมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตร ทรายมีขนาดมากกว่า 0.7 ถึง 1 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 25) กรวดมีขนาดมากกว่า 1 ถึง 6 มิลลิเมตร (ค้างบนตะแกรงร่อนเบอร์ 18) และหินมีขนาดมากกว่า 6 ถึง 12 มิลลิเมตร (ค้างบนตะแกรงร่อนเบอร์ 1/4") โดยใช้ทรายละเอียด กรวด หินเป็นวัสดุกรอง และใช้ทรายเป็นส่วนผสมเพื่อหล่อถังกรองคอนกรีต



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคัดขนาดกรวดและทราย

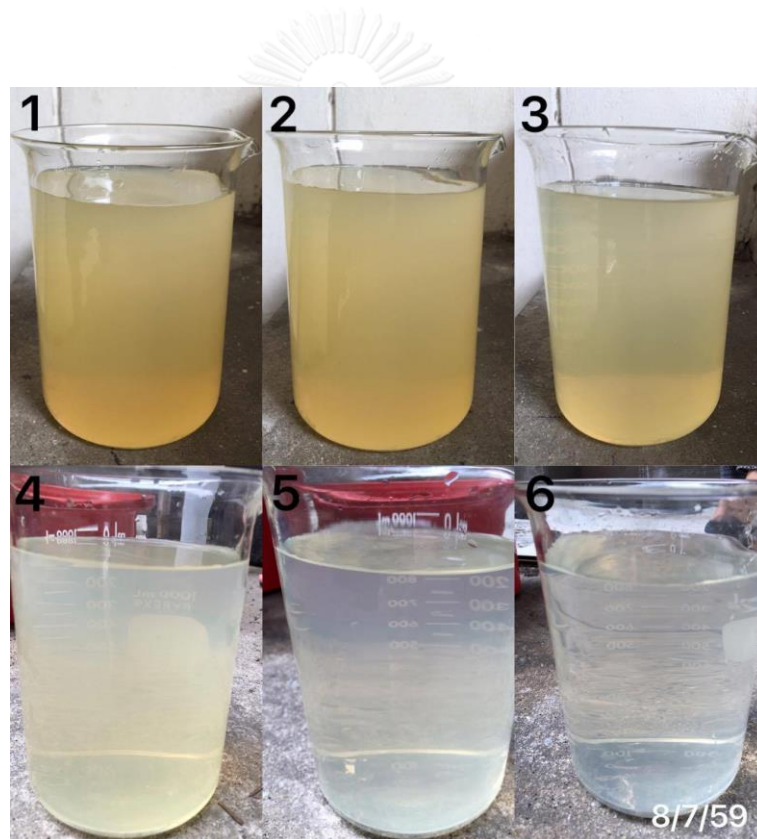
1.2 การเตรียมวัสดุกรอง

1) ทรายละเอียด กรวด และหิน

ล้างทำความสะอาดทรายละเอียด, กรวด และหิน ให้สะอาดจนน้ำล้างไม่ขุ่น (ประมาณ 6 ครั้ง) ดังรูปที่ 2 ตากแดดให้แห้ง และเก็บในที่แห้งไม่เปียกชื้น

2) เหล็กชั้นสนิม

ใช้เศษเหล็กที่ได้หลังจากการกลึง (ห้ามเปื้อนน้ำมัน) นำมาทำให้ขึ้นสนิมโดยการแช่น้ำในปริมาณน้อย และตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำเหล็กมาตากแดดให้แห้ง และเก็บในที่แห้งไม่เปียกชื้น



รูปที่ 2 ความขุ่นของน้ำหลังใช้ล้างทรายละเอียด กรวด และหิน



รูปที่ 3 วัสดุรองทรายละเอียด



รูปที่ 4 วัสดุรองกรวด



รูปที่ 5 วัสดุรองหิน



รูปที่ 6 วัสดุรองเหล็กขึ้นสนิม



2. ขั้นตอนการหล่อถังกรองคอนกรีต

หล่อตัวถังกรองคอนกรีตตามแบบมาตรฐานของ CAWST (Centre for affordable water and sanitation technology) Version 10.0 โดยถังคอนกรีตมีขนาดดังรูปที่ 7

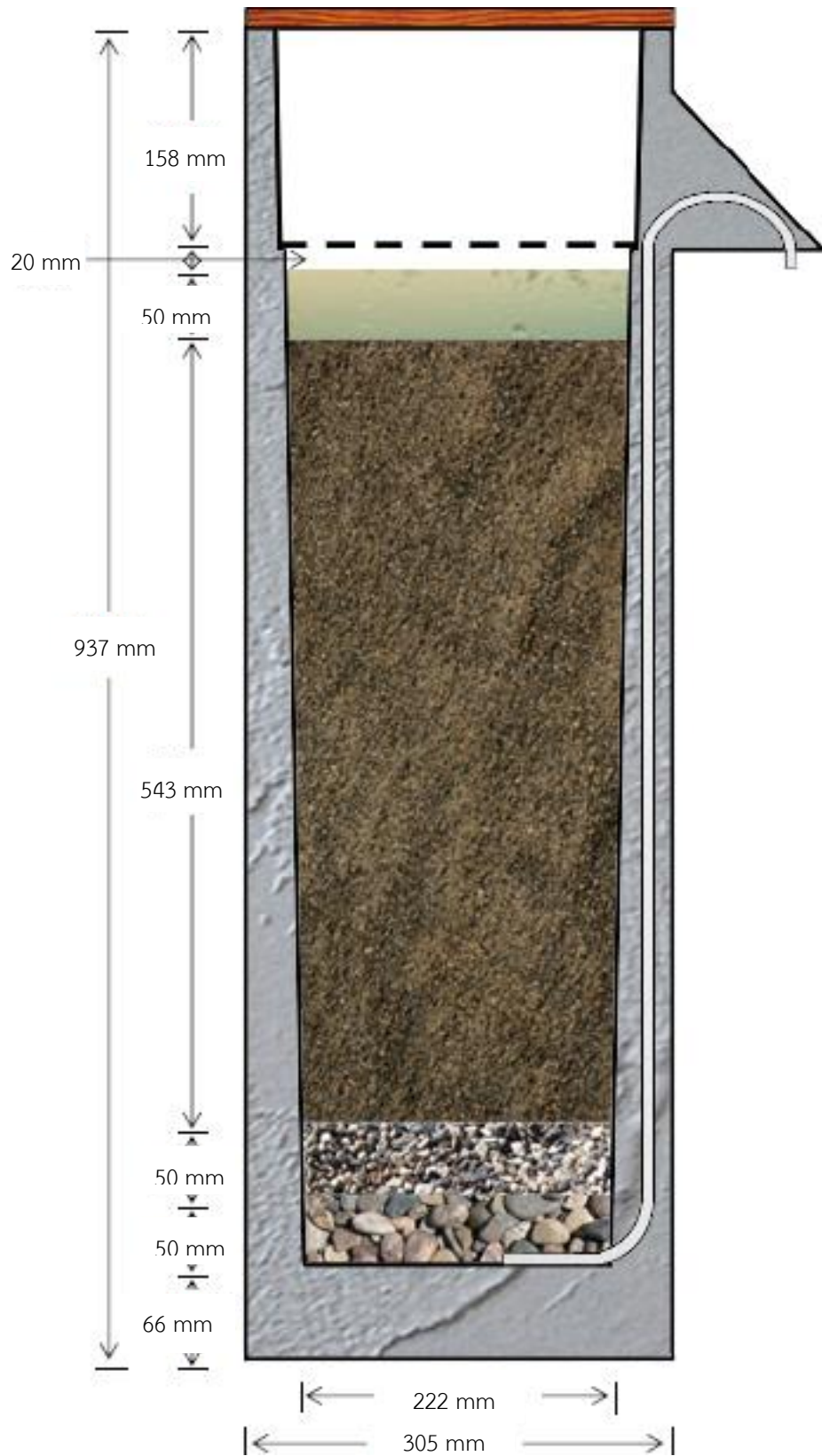
1) ผสมหิน 12 ลิตร, กรวด 12 ลิตร, ทราย 24 ลิตร, ซีเมนต์ 12 ลิตร และน้ำ 7 - 10 ลิตร (หิน : กรวด : ทราย : ซีเมนต์ 1 : 1 : 2 : 1)

2) ติดตั้งสายยางกับแบบเหล็กสำหรับหล่อถังคอนกรีตของ CAWST Version 10.0

3) ทาน้ำมันพืชที่แบบเหล็กสำหรับหล่อถังคอนกรีตจนทั่ว

4) นำคอนกรีตที่ผสมเทลงแบบเหล็กหล่อ บ่มคอนกรีตให้เซตตัว 6 - 24 ชั่วโมงก่อนถอดแบบเหล็กหล่อออก



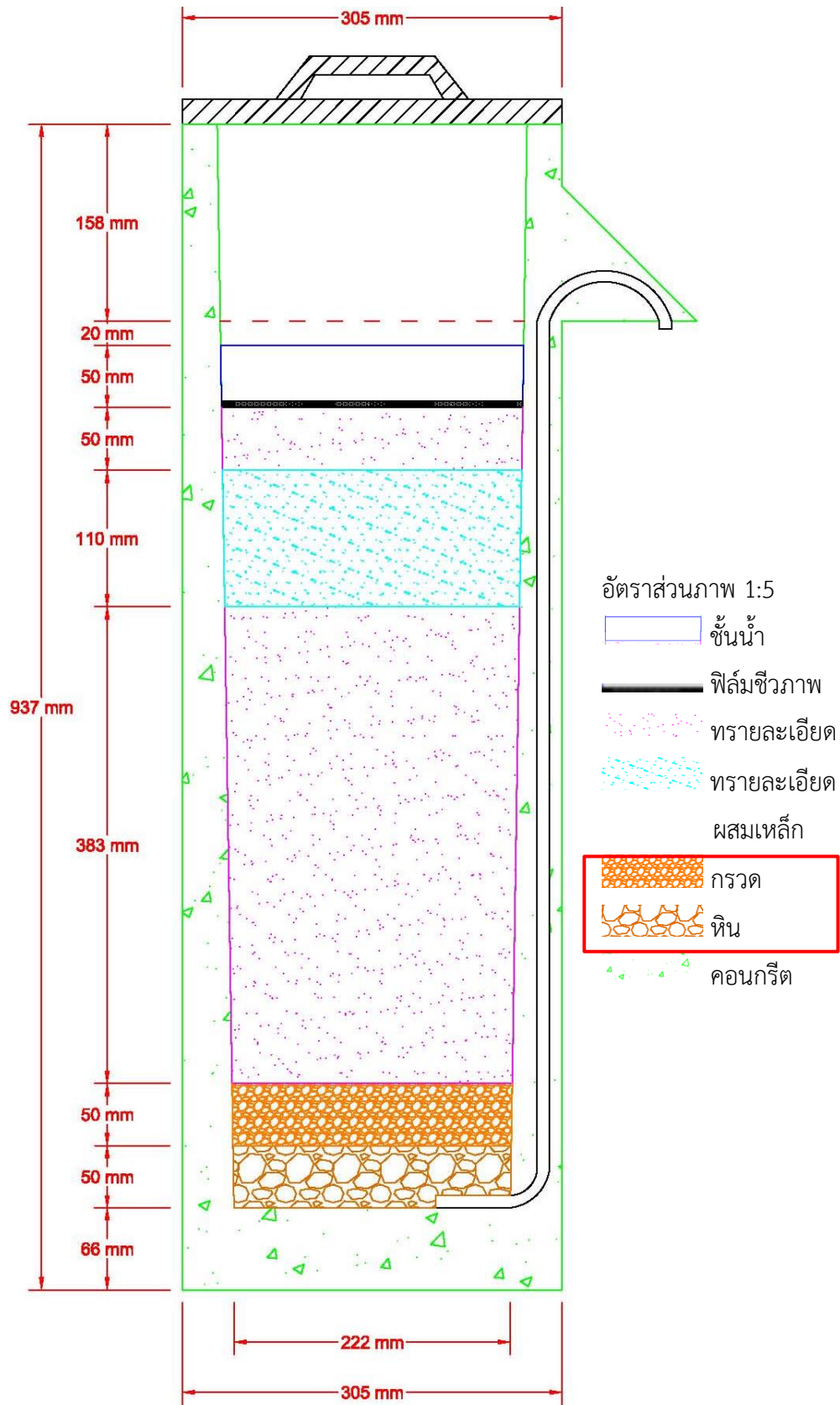


รูปที่ 7 ขนาดถังกรองคอนกรีต ที่มา : (CAWST, 2009)

3. ขั้นตอนการบรรจุตัวกรองลงในถังกรองคอนกรีต ดังรูปที่ 8

- 1) ใส่หิน (6 - 12 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร ชั้นล่างสุดเป็นชั้นกรวดระบายน้ำ
- 2) ใส่กรวด (1 - 6 มิลลิเมตร) สูง 5 เซนติเมตร
- 3) ใส่ทรายละเอียด (≤ 0.7 มิลลิเมตร) สูง 38.3 เซนติเมตร เพื่อเป็นชั้นกรอง
- 4) ใส่ชั้นทรายละเอียดผสมกับเหล็กด้วยอัตราส่วนของเหล็ก : ทราย เท่ากับ 50 : 50 (โดยน้ำหนัก) อย่างละ 5 กิโลกรัม สูง 11 เซนติเมตร
- 5) ใส่ชั้นทรายละเอียดสูง 5 เซนติเมตร และเลี้ยงฟิล์มชีวภาพบนชั้นทราย
- 6) ทดสอบอัตราการไหลที่ 0.4 ลิตรต่อนาที โดยนำน้ำใส่ถัง และรองน้ำที่ออกจากถังกรองให้ปริมาณน้ำ 1 ลิตรใช้เวลา 2 นาที 30 วินาที
- 7) เลี้ยงไบโอฟิล์มโดยเวียนน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติผ่านถังกรองทุกวันเป็นระยะเวลา 20 วัน (Bradley และคณะ, 2011)





รูปที่ 8 การบรรจุตัวกรองถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

4. ขั้นตอนการบำรุงรักษา

4.1 อัตราการไหลลดลง

1) ล้างทรายชั้นบนสุดของถังกรอง โดยใช้ไม้กวาดทรายชั้นบนสุดให้สิ่งสกปรกหลุดออกมากับน้ำแล้วดูน้ำสกปรกที่ทิ้ง

2) หากหลังจากล้างทรายชั้นบนสุดของถังกรองแล้วอัตราการไหลยังคงลดลง ต้องรื้อชั้นกรองออกไปถึงชั้นทรายละเอียดล่างชั้นเหล็ก แล้วบรรจุชั้นกรองใหม่ โดยสามารถใช้ชั้นเหล็กเดิมได้ซึ่งจากงานวิจัยเหล็กมีอายุใช้งานมากกว่า 4 เดือน ระยะเวลาในใช้งานเหล็กต้องศึกษาต่อไป

4.2 การกำจัดชั้นกรองหลังหมดอายุการใช้งาน

1) นำชั้นกรองผสมกับคอนกรีตแล้วนำไปฝังกลบต่อไป

5. ข้อกำหนดการใช้งานและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อกำหนดการใช้งานถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็ก

1) ถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเหล็กถูกพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ในการกำจัดสารหนูเท่านั้น

2) สามารถกำจัดสารหนูในน้ำที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มได้

3) จากงานวิจัยมีการใช้งานถังกรอง 4 เดือน และน้ำที่ใช้ในการทดลองไม่มีการปนเปื้อนแร่ธาตุอื่นๆ ในน้ำ การมีแร่ธาตุอื่นๆ ในน้ำทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูลดลง

4) สารหนูที่ใช้ในการทดลองอยู่ในรูปอาร์เซเนต (+5) ซึ่งในน้ำบาดาลสารหนูส่วนมากอยู่ในรูปอาร์เซไนต์ (+3) ควรผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปอาร์ไนต์เป็นอาร์เซเนตก่อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สามารถลดปริมาณเหล็กที่เพิ่มลงไปชั้นกรองได้ ซึ่งจะลดปัญหาอัตราการไหลที่ลดลงจากการอุดตันจากตะกอนเหล็ก ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นและเป็นการใช้เหล็กอย่างคุ้มค่านอกจากนี้ปริมาณเหล็กที่ใช้ในถังกรองขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำแต่ละท้องถิ่น

อ้างอิง

CAWST. (2009). Biosand Filter Manual, Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance: Center for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST).

Bradley, I., Straub, A., Maraccini, P., Markazi, S., & Nguyen, T. H. (2011). Iron oxide amended biosand filters for virus removal. Water Research, 45(15), 4501-4510.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสมน แดงฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2535 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 โดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.) ในหัวข้อผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมต่อการกำจัดสารหนูในถังกรองทรายชีวภาพที่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมเล็ก ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ ระหว่าง 17-18 พฤษภาคม 2560