การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี

นางสาวนิรามัย ไตรยวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

REMOVAL OF LEAD AND MANGANESE IN GROUNDWATER USING ZERO VALENT IRON AND PRB

Niramai Traiyawong

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุดจิต ครุจิต)
กรรมการ

(อ. ดร.วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นิรามัย ไตรยวงศ์ : การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี (REMOVAL OF LEAD AND MANGANESE IN GROUNDWATER USING ZERO VALENT IRON AND PRB) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล, 242 หน้า.

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดินเป็นปัญหาที่สำคัญและเกิดขึ้นได้ทั่วโลก วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำใต้ดินที่นิยมกันนั้นเป็นวิธีการที่ยุ่งยากและสิ้นเปลือง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และเพื่อทดสอบความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ PRB (Permeable Reactive Barrier) ซึ่งเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ (In-Situ Remediation) โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การทดลองแบบกะ ศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วในการกวนผสม ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น และปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และ (2) การทดลองแบบคอลัมน์ ศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วการไหล สัดส่วนระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย และความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น

ผลการศึกษาการทดลองแบบกะพบว่า ที่ความเร็วในการกวนผสม ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เติมลงไปต่างมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสจากน้ำ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุด ร้อยละ 94.61 และมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสสูงสุด ร้อยละ 91.78 และพบว่าผงตะไบเหล็กมีความสามารถในการกำจัดได้ดีกว่าเศษผงเหล็ก โดยการกำจัดตะกั่วโดยใช้ผงตะไบเหล็ก ให้ค่าความสามารถในการกำจัดจากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ เท่ากับ 12.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ความเร็วการไหลที่สูงจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และพบว่าสัดส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสมที่ 1,114 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีจุดเริ่มหมดสภาพ (Breakthrough Time) 10 วัน มีจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) หรือมีอายุการใช้งาน 24 วัน ซึ่งความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายตะกั่วจะมีค่าน้อยกว่าในสารละลายผสม แสดงว่าแมงกานีสมีผลต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ผลการศึกษาทั้ง 2 การทดลองนี้ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ PRB ได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ ขนาด และลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตัวกลาง

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนักศึกษา______________________

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา________________

NIRAMAI TRAIYAWONG : REMOVAL OF LEAD AND MANGANESE IN GROUNDWATER USING ZERO VALENT IRON AND PRB. THESIS ADVISOR : CHATPET YOSSAPOL, Ph.D., 242 PP.

ZERO VALENT IRON / PERMEABLE REACTIVE BARRIER / LEAD / MANGANESE / IN – SITU REMEDIATION

Heavy metal contamination in groundwater posts serious problem in several areas around the world. Conventional methods for heavy metal removal are complicated and costly. The purpose of this research was to investigate appropriate conditions for the removal of lead and manganese using zero valent iron (ZVI) and its application in the permeable reactive barrier (PRB), an in-situ remediation technique. The experiments were divided into two-fold namely 1) a batch experiment to determine the influencing parameters such as mixing intensity, contact time, initial pH, initial contaminant concentration, and ZVI proportion and 2) a column experiment to determine the influencing parameters such as hydraulic conductivity, initial contaminant concentration, and ZVI proportion.

Results from the batch experiment showed that all the mixing intensity, contact time, initial pH, initial contaminant concentration, and ZVI proportion played role in the removal efficiency of lead and manganese. Removal efficiencies of lead and manganese were as high as 94.61% and 91.78%, respectively. The result also showed that iron filings was more effective than the iron waste particles in the removal of both lead and manganese. And the Langmuir isotherm calculated from the use of iron fillings was as high as 12.5 mg/g. For the column experiment, it was found

that the higher hydraulic conductivity posted a lower removal efficiency. It was also found that adsorption capacity for lead removal was as high as 1,114 mg/g at the breakthrough period of 10 days while the exhaustion point of the system was reached with the service time of 24 days. The sorption capacity of lead in mixed solution was higher than that of the single solution which means that the presence of manganese will increase the lead removal. Parameters obtained from both experiments can be used to determine the detention time, chemical and physical characteristics of media for the PRB.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Environmental Engineering Student's Signature ________________

Academic Year 2015 Advisor's Signature ________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษา แนวทางแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจ กำลังกายแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย อีกทั้งยังให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต และอาจารย์ ดร.วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการเครื่องมือวิเคราะห์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน และคุณนารี กลิ่นกลาง เลขานุการประจำสำนักวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณอลิษา ศรีคราม ที่ให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บุคลากร หน่วยวิจัยและที่ปรึกษาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมสุรนารี และพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ กำลังกาย ให้คำแนะนำปรึกษา และให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอระลึกถึงคุณพระศรีรัตนตรัย คุณครูบาอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ได้ให้การเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนให้กำลังใจ ด้วยความรักและความเข้าใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นิรามัย ไตรยวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3
1.3 สมมติฐานงานวิจัย 3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 ตะกั่วและแมงกานีส 6
2.1.1 คุณสมบัติของตะกั่วและแมงกานีส 6
2.1.2 ตะกั่วและแมงกานีสในธรรมชาติ 6
2.1.3 การใช้ประโยชน์จากตะกั่วและแมงกานีส 7
2.1.4 ความเป็นพิษของตะกั่วและแมงกานีส 7
2.1.5 การปนเปื้อนของตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน 8
2.1.6 การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ 9
2.2 น้ำใต้ดิน 12
2.2.1 นิยาม 12
2.2.2 การกระจายตัวของน้ำใต้ดิน 12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 การไหลของน้ำใต้ดิน 15
2.2.4 การปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน 17
2.2.5 เทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน 19
2.3 Permeable Reactive Barrier: PRB 23
2.3.1 ความเป็นมา 23
2.3.2 การใช้ประโยชน์ 25
2.3.3 การออกแบบ 29
2.4 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) 33
2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) 33
2.4.2 การกัดกร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 34
2.4.3 จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 37
2.4.4 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 38
2.4.5 การใช้ประโยชน์ 41
2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี 49
2.6 สรุปปริทรรศน์วรรณกรรม 55
3 วิธีดำเนินการวิจัย 57
3.1 รูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 57
3.2 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ 57
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 57
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 59
3.3 การเตรียมวัสดุตัวกลาง 59
3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของตะกั่วและแมงกานีส 60
3.5 รูปแบบของการทดลอง 60
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง 60
3.5.2 การทดลองแบบกะ 61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การทดลองแบบคอลัมน์ 66
3.5.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ 71
3.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล 72
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล 79
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง 79
4.1.1 ผลการคัดเลือกขนาดของตัวกลาง 79
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 80
4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพ 80
4.1.2.2 ลักษณะทางเคมี 81
4.2 ผลการทดลองแบบกะในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 83
4.2.1 ผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 83
4.2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น 86
4.2.3 ผลของความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น 89
4.2.4 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 93
4.2.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา 97
4.2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 98
4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้เศษผงเหล็ก 100
4.3.1 การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ 103
4.3.1.1 การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer Study) 103
4.3.1.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลาง 104
4.3.2 ผลของความเร็วการไหล 105
4.3.3 ผลของสัดส่วนระหว่างเศษผงเหล็กและทราย 107
4.3.4 ผลของความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น 108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.5 การศึกษาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์ 110
4.3.6 ผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อมในชุดทดลองแบบคอลัมน์ 117
4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 127
4.5 การออกแบบ Permeable Reactive Barrier (PRB) 131
5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ 134
5.1 สรุปผลการศึกษา 134
5.1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง 134
5.1.2 ผลการทดลองแบบกะ 135
5.1.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ 138
5.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 142
5.1.5 ผลการออกแบบ Permeable Reactive Barrier (PRB) เบื้องต้น 143
5.2 ปัญหาและอุปสรรค 144
5.3 ข้อเสนอแนะ 145
5.3.1 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ 145
5.3.2 งานวิจัยในขั้นต่อไป 145
รายการอ้างอิง 147
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ผลของความเร็วในการกวนผสม และระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 160
ภาคผนวก ข. ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น 173
ภาคผนวก ค. ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 180
ภาคผนวก ง. ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 184
ภาคผนวก จ. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา 189
ภาคผนวก ฉ. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 192
ภาคผนวก ช. ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study) 195
ภาคผนวก ซ. ผลการทดลองแบบคอลัมน์ 202
ภาคผนวก ฌ. ผลของการศึกษาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์ 223

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ญ. การคำนวณความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์ 229
ภาคผนวก ฎ. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 233
ภาคผนวก ฏ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.................... 240
ประวัติผู้เขียน................. 242

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดมลพิษ 18

2.2 สารปนเปื้อนที่บำบัดโดยใช้วัสดุตัวกลางใน PRB 26

3.1 เตรียมวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง 60

3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ชนิดต่าง ๆ 62

3.3 ตัวแปรในการทดลองแบบกะ 62

3.4 ตัวแปรในการทดลองแบบคอลัมน์ 66

3.5 สรุปเครื่องมือวิเคราะห์พารามิเตอร์ 72

4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ วิเคราะห์โดยวิธี BET Surface Area Analysis 81

4.2 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 98

4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 98

4.4 เวลากักเก็บและอัตราการไหลจริงของชุดทดลองคอลัมน์ 104

4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity; K) ของตัวกลาง 104

4.6 สรุปผลการทดลองหาความสามารถการดูดซับตะกั่วของชุดทดลองคอลัมน์ 115

4.7 สรุปผลการหาความยาวชั้นการดูดซับและระยะเวลาในการเดินระบบแบบคอลัมน์ 116

4.8 รายละเอียดการคำนวณออกแบบ PRB 133

สารบัญรูป

รูปที่ | หน้า

2.1 การแบ่งส่วนของน้ำใต้ดิน 13
2.2 ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) 14
2.3 แบ่งประเภทของเทคโนโลยีการฟื้นฟูสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน 21
2.4 การบำบัดน้ำใต้ดินโดยใช้ Permeable Reactive Barrier 23
2.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินการโดยรวมของเทคโนโลยี PRB 30
2.6 รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบเทคโนโลยี PRB 30
2.7 การติดตั้ง PRB แบบ Continuous และแบบ Funnel-and-Gate 32
2.8 กระบวนการลดลงของสี (Decolorize) ด้วย ZVI 43
2.9 การรีดักชัน (Reduction) ไนเตรท ด้วย ZVI 45
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของ Fe-N-H_2O 45
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E) กับสถานะของโครเมียม 46
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของ As-Fe-H_2O 48
2.13 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $Pb(CH_3COO)_2$ กับ nZVI 51
2.14 กราฟจำลองการกำจัดโลหะหนักด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 53
3.1 รูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 58
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH และ Eh (V) ของเหล็ก 64
3.3 ชุดทดลองแบบคอลัมน์ 68
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ (ก) เครื่อง FAAS และ (ข) เครื่อง ICP – OES 71
3.5 Breakthrough curve 76
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เศษผงเหล็ก 80
4.2 ลักษณะทางกายภาพ (ก) ผงตะไบเหล็ก (ข) เศษผงเหล็ก 80
4.3 XRD pattern ของ (ก) ผงตะไบเหล็ก (ข) เศษผงเหล็ก 82
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและความเร็วในการกวนผสม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ 84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและความเร็วในการกวนผสม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง 84
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ 86
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ 87
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ 88
4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ 88
4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ 90
4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ 90
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ 92
4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ 93
4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ 94
4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ 95
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ 96
4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ 96
4.18 ความสัมพันธ์ความเข้มข้น (C/C_0) กับเวลา 97
4.19 การติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์ 100
4.20 รายละเอียดชุดทดลองแบบคอลัมน์ 101
4.21 การทดลองชุดคอลัมน์โดยใช้ผงตะไบเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล 102
4.22 ความเข้มข้นของสารติดตามที่ระยะเวลาต่าง ๆ 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 105
4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 106
4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 107
4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร 108
4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร 109
4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 110
4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดกับกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 111
4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 112
4.31 Breakthrough curve (ก) ชุดการทดลองที่ ก (ข) ชุดการทดลองที่ ข (ค) ชุดการทดลองที่ ค 114
4.32 ปริมาณเหล็กเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ 117

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.33 ปริมาณเหล็กเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล 118

4.34 ชุดทดลองคอลัมน์ตามระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูงโดยใช้เหล็ก ร้อยละ 5 โดยมวลความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 119

4.35 ความเร็วการไหลหลังการบำบัดเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 120

4.36 ความเร็วการไหลเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล 121

4.37 ค่าพีเอชและอุณหภูมิเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส (ค) สารละลายผสม 122

4.38 ค่าพีเอชเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล 123

4.39 สภาพนำไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ โดยใช้เหล็ก ร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส (ค) สารละลายผสม 125

4.40 สภาพนำไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล 126

4.41 ชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายและชุดทดลองคอลัมน์ทราย 128

4.42 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ 129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.43 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์
โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง.......... 129
4.44 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์
โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง.......... 130
4.45 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดตามจุดเก็บน้ำแต่ละชุดทดลองคอลัมน์
โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง.......... 130

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

APHA	=	American Public Health Association
ASTM	=	American Society of Testing and Material
BET	=	Brunauer-Emmet-Teller
C/C_0	=	ความสัมพันธ์ความเข้มข้น
E^0	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential)
EBCT	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty bed contact time)
FAAS	=	Flame Atomic Absorption Spectrometer
Fe	=	เหล็ก (Iron)
H_0	=	สมมติฐานว่าง
H_1	=	สมมติฐานแย้ง
HRT	=	เวลากักเก็บ (Hydraulic retention time)
ICP – OES	=	Inductively Couple Plasma - Optical Emission Spectrometer
k	=	ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ณ อุณหภูมิที่กำหนด
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (Hydraulic conductivity)
$K_{d,trans}$	=	ค่า Transport distribution coefficient
L_{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone)
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
Mn	=	แมงกานีส (Manganese)
nZVI	=	Nanoscale Zero Valent Iron
Pb	=	ตะกั่ว (Lead)
pH	=	พีเอช
PRB	=	Permeable Reactive Barrier
PV	=	ระยะเวลา (Pore volume)
q	=	ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)
R^2	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)
SEM	=	Scaning Eletron Microscopy
t_b	=	ระยะเวลาเบรคทรู (Breakthrough time)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TEM	=	Transmission Electron Microscopy
U.S. EPA	=	United States Environmental Protection Agency
WHO	=	องค์การอนามัยโลก
XRD	=	X - ray Diffraction
XPS	=	X - ray Photoelectron Spectroscopy
ZVI	=	เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron: Fe^0)
ก./ล.	=	กรัมต่อลิตร
ชม.	=	ชั่วโมง
ซม.	=	เซนติเมตร
ซม./วัน	=	เซนติเมตรต่อวัน
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
ล./ก.	=	ลิตรต่อกรัม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทุกภูมิภาคทั่วโลก ในประเทศไทยคุณภาพน้ำใต้ดินโดยทั่วไปจะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้บริโภคตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) แต่ยังมีรายงานการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดินเกินค่ามาตรฐาน ได้แก่ สารหนู ปรอท โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งมีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทำเหมืองแร่ เช่น การทำเหมืองตะกั่ว หมู่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี การทำเหมืองแร่ดีบุก อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การทำเหมืองแร่ทองคำ เขาพนมพา จังหวัดพิจิตร การเกษตรกรรม เช่น ฟาร์มเลี้ยงสุกร จังหวัดราชบุรี และการอุตสาหกรรม เช่น นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง นอกจากนี้ น้ำบาดาลตามธรรมชาติบางพื้นที่จะมีแร่ธาตุบางชนิดละลายอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง เช่น เหล็กและแมงกานีส เมื่อโลหะหนักอยู่ในแหล่งน้ำดังกล่าวจะสามารถเปลี่ยนรูปและเคลื่อนย้ายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ ซึ่งท้ายที่สุดจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน ปัญหาคุณภาพน้ำใต้ดินเสื่อมโทรมนับวันยิ่งมีแนวโน้มที่รุนแรงและมีความถี่มากขึ้น โดยที่การแก้ไขยังเป็นไปอย่างยากลำบาก ต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังต้องใช้องค์ความรู้ บุคลากร รวมถึงเทคโนโลยีเพื่อการบรรเทาปัญหาอย่างต่อเนื่องอีกด้วย (กระทรวงสาธารณสุขและกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551)

ในอุตสาหกรรมประเภทผลิตสารเคมีต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ โรงงานผลิตสี โรงงานผลิตสารพิษกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น จะมีการใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสม เช่น มีความอ่อนตัว สามารถดัด รีด หรือตีได้ง่าย เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถนำมาผสมกับโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิด ตะกั่วเป็นโลหะที่เป็นพิษต่อร่างกาย การกำจัดตะกั่วในน้ำใช้วิธีการทางเคมีในการเปลี่ยนสารละลายของตะกั่วให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำโดยการเติมปูนขาวหรือโซดาไฟ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึก นอกจากนี้ยังสามารถใช้การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ หรือการรีดักชันด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ได้อีกด้วย ซึ่งบางพื้นที่จะมีแมงกานีสตามธรรมชาติในน้ำใต้ดินอยู่ในปริมาณสูง วิธีการกำจัดแมงกานีสส่วนใหญ่มักอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันในการเปลี่ยน Mn^{2+} ซึ่งละลายน้ำได้ให้เป็น Mn^{4+} ที่ตกผลึกได้ง่ายกว่า

วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำใต้ดิน แบ่งได้เป็นสองแบบหลัก ๆ คือการกำจัดแบบนอกพื้นที่ (Ex-situ remediation) และการกำจัดแบบอยู่กับที่ (In-situ remediation) เช่น การสกัดสารระเหยง่ายออกจากดิน (Soil vapor extraction) การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon absorption) การไล่ด้วยอากาศ (Air stripping) เป็นต้น และวิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไป (Conventional remediation technology) คือ วิธีสูบน้ำใต้ดินขึ้นเพื่อมาบำบัดหรือกำจัด (Pump and Treat) แต่เป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากและและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง (Oliva, De Pablo, Cortina, Cama, and Ayora, 2010)

Permeable Reactive Barrier หรือ PRB เริ่มเป็นที่ยอมรับว่าสามารถลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินอย่างได้ผลกับสารปนเปื้อนหลายชนิด อีกทั้งยังเป็นวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนแบบอยู่กับที่ ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนได้ดี ไม่มีการสูญเสียน้ำใต้ดินและสามารถใช้ประโยชน์ของที่ดินได้ในขณะที่มีการบำบัด ซึ่งมีหลักการคือ การใช้วัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกรองสารปนเปื้อน เมื่อสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบจะเกิดปฏิกิริยากับวัสดุตัวกลาง ทำให้สารปนเปื้อนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ปลอดภัยกว่า (U.S. EPA, 1998) วัสดุตัวกลางที่นิยมใช้กันมาก คือ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron หรือ ZVI) ซึ่งเป็นสารทำปฏิกิริยาที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงและมีศักย์รีดักชันสูง ทำให้มีความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้ดี อีกทั้งยังมีราคาไม่แพงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถกำจัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ อาทิเช่น สารประกอบฮาโลจีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon compounds) สีย้อม (Azo dyes) โลหะหนัก (Heavy metals) เป็นต้น

จากการปริทรรศน์งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ผ่านมานั้น พบว่ามีความเป็นไปได้สูงในการบำบัดตะกั่ว ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.9 (Xi, Mallavarapu, and Naidu, 2010) และมีค่าความสามารถในการกำจัด (Removal capacity) สูงถึง 1,667 มิลลิกรัม (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) (Zhang, Su, Zhou, Dai, and Keller, 2013) ส่วนการกำจัดแมงกานีสด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์พบว่า ผลการทดลองยังไม่เป็นที่แน่ชัด ทั้งนี้ยังพบอีกว่าแมงกานีสทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักตัวอื่นเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณแมงกานีสจะไม่ลดลง (Biterna, Arditsoglou, Tsikouras, and Voutsu, 2007; Biterna, Antonoglou, Lazou, and Voutsu, 2010; Tang, Huang, Zeng, and Zhang, 2014) อีกทั้งงานวิจัยการกำจัดตะกั่วด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่มีแมงกานีสร่วมด้วยยังไม่มีการศึกษา นอกจากนี้กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับโลหะหนักเป็นไปเพื่อลดความเป็นพิษหรือความเป็นอันตรายลง โดยกลไกที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้น ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) และการดูดซับ (Adsorption)

จะเห็นได้ว่า การปนเปื้อนในน้ำใต้ดินถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ ที่ต้องอาศัยน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภค รวมถึงพืชและสัตว์อีกด้วยประกอบกับในประเทศไทยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำใต้ดินโดยใช้ PRB ยังมีอยู่น้อย อีกทั้งวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำใต้ดินยังนิยมใช้วิธีการที่มีความยุ่งยากและราคาแพง ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะดำเนินการกำจัดตะกั่วในน้ำด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และ PRB โดยมีแมงกานีสปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งเป็นวิธีการที่ดำเนินการง่าย มีราคาไม่แพงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการทดลองได้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ เพื่อท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ PRB ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการกำจัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

1.2.2 เพื่อทดสอบความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสโดยอาศัยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ PRB

1.3 สมมติฐานการวิจัย

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำที่มีแมงกานีสผสมอยู่ได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลและทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และ Permeable Reactive Barrier (PRB) โดยการทดลองหลัก แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ ซึ่งมีรายละเอียดขอบเขตการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.4.1 วัสดุตัวกลางประกอบด้วย เหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ มี 2 แหล่งที่มา ได้แก่ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ขายกันในท้องตลาด (Commercial grade) หรือผงตะไบเหล็ก (Iron filling) ขนาดน้อยกว่า 200 เมช (Mesh) หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.07 มิลลิเมตร และเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมคัดเลือกขนาด 60 – 100 เมช หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร ส่วนทรายเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.425 – 0.85 มิลลิเมตร

1.4.2 การทดลองแบบกะ เพื่อให้ทราบความเป็นไปได้และกลไกที่เกิดขึ้นในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ รวมทั้งเพื่อคัดเลือกวัสดุตัวกลางที่จะใช้ในการทดสอบหาความสามารถของ PRB ในการทดลองแบบคอลัมน์ต่อไป โดยการศึกษาผลของตัวแปรหลัก 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและแมงกานีส และปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศ ชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ คือ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็ก ชนิดของสารปนเปื้อนใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีส และสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน โดยนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาและไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ศึกษาผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล โดยทดลองที่ความเร็วในการกวน คือ 50 150 250 350 และ 450 รอบต่อนาที และเวลาที่ 0 15 30 45 60 90 120 150 และ 180 นาที และที่ 4 5 6 12 18 ชั่วโมง จนสิ้นสุดที่เวลา 24 ชั่วโมง

2) ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น โดยทดลองที่ค่าพีเอช 3 5 6 7 8 9 และ 11

3) ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและแมงกานีส โดยทดลองที่ 1 10 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) ศึกษาผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยกำหนดที่ 1 10 30 และ 50 กรัมต่อลิตร

1.4.3 การทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อทดสอบหาความสามารถของ PRB ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในน้ำ เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ โดยมีอุปกรณ์การทดลองเป็นชุดทดลองแบบคอลัมน์ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งตั้งอยู่ที่อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการศึกษาผลของความเร็วการไหล สัดส่วนร้อยละโดยมวลระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและแมงกานีสที่ใช้ โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศ ชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เลือกใช้คือเศษผงเหล็ก ตัวกลางผสมคือทราย ชนิดของสารปนเปื้อนใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีสและสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน นำผลการทดลองไปศึกษาหาค่าความสามารถในการบำบัดของชุดทดลองแบบคอลัมน์ หาความยาวของชั้นการดูดซับและหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ รวมไปถึงศึกษาผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อมในชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ใช้ชุดทดลองแบบแนวตั้ง คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร โดยเจาะรูจำนวน 7 จุด ได้แก่ 5 10 15 20 25 30 และ 40 เซนติเมตร นับจากด้านล่าง เป็นจุดเก็บน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างทุกวัน

2) ศึกษาผลของความเร็วการไหล โดยกำหนดความเร็วการไหลในการทดลองให้มีค่าต่ำและสูง

3) ศึกษาผลของร้อยละโดยมวลระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย โดยกำหนดร้อยละ 5 และ 20 โดยมวล

4) ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและแมงกานีส โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเลือกวิธีการบำบัดโลหะหนักในน้ำ

1.5.2 ทราบถึงความสามารถของชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวกลางในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส

1.5.3 ได้ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ PRB ที่เป็นเทคโนโลยีการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ ได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ ขนาด และลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตัวกลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่วและแมงกานีส

2.1.1 คุณสมบัติของตะกั่วและแมงกานีส

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ตะกั่วมีสัญลักษณ์ Pb จากชื่อลาติน Plumbum เลขอะตอม 82 เป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ IV A ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ มีสีขาวอมน้ำเงินแต่เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเปลี่ยนเป็นสีเทา น้ำหนักอะตอม 207.19 amu จุดหลอมเหลว 327 °C จุดเดือด 1737 °C ความหนาแน่น 11.34 g/cc ที่ 20 °C เลขออกซิเดชันสามัญ 0 +2 และ +4

แมงกานีส (Manganese) เป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปในโลก ส่วนใหญ่มักพบปะปนกับเหล็ก เนื่องจากแร่ของธาตุนี้ คือ แร่ไพโรลูไซท์ (Pyrolusite: MnO_2) มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก จึงตั้งชื่อจากคำลาตินว่า Magnes ซึ่งแปลว่าแม่เหล็ก (Magnet) โดยเทียบเท่ากับคำเยอรมันว่า Mangan และคำฝรั่งเศสว่า Manganese แมงกานีสจึงมีสัญลักษณ์ Mn เลขอะตอม 25 เป็นธาตุแรกของหมู่ VII B จัดเป็นโลหะและธาตุทรานสิชัน (Transition) น้ำหนักอะตอม 54.938 amu จุดหลอมเหลว 1244 °C จุดเดือด 2097 °C เลขออกซิเดชันสามัญ 0 +2 +3 +4 +6 และ +7 (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2525)

2.1.2 ตะกั่วและแมงกานีสในธรรมชาติ

ตะกั่วมีกระจายทั่วไปในธรรมชาติ ที่เปลือกโลกมีเฉลี่ย 13 mg/kg (WHO, 2011) มักจะพบอยู่ในรูปของแร่กาลีนา (Galena, PbS) แร่แองกลีไซท์ (Angelsite, $PbSO_4$) แร่เซอรัสไซท์ (Cerrusite, $PbCO_3$) ตะกั่วในธรรมชาติเกิดจากหินประเภทต่าง ๆ ได้แก่ หินอัคนี หินแปร หินชั้น และพบมากในหินดินดานสีดำ นอกจากนี้ยังพบตะกั่วอยู่ทั่วไปทั้งในดิน น้ำ อากาศ และตะกอนดิน ตะกั่วในธรรมชาติเมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) อย่างช้า ๆ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb^{2+} เนื่องจากมีความเสถียรมากที่สุด ในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มักจะพบแมงกานีสอยู่พร้อมกับเหล็ก แต่ในปริมาณที่น้อยกว่า โดยเฉพาะในน้ำใต้ดิน ซึ่งละลายน้ำอยู่ในรูป Mn^{2+} ของแมงกานีสไบคาร์บอเนต ($Mn(HCO_3)_2$) หรือแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$) ส่วนแมงกานีสในน้ำผิวดินมักอยู่ในรูปสินแร่ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น MnO_2 ทั้งนี้เพราะน้ำผิวดินมักมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่เสมอ ทำให้มีการตกผลึกของแมงกานีสและตกตะกอนลงก้นคลองหรือก้นแม่น้ำ แต่หากเกิดการหมักแบบไร้ออกซิเจน แมงกานีสจะสามารถละลายน้ำได้ใหม่ (Sawyer, Mccarty, and Parkin, 2003)

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากตะกั่วและแมงกานีส

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีความอ่อนตัว สามารถดัด รีด หรือตีได้ง่าย เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ทนทานต่อการกัดกร่อน นำมาผสมกับโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิด สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ตะกั่วที่ถลุงได้จากเหมืองแร่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ทำขั้วไฟฟ้าของ แบตเตอรี่ สายเคเบิล หัวลูกปืน โลหะบัดกรี ฟิวส์ไฟฟ้า ตัวเชื่อมในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ตะกั่วยังใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมผลิตแก้ว เป็นสารผสมในน้ำมันเพื่อเพิ่มค่าออกเทน (Octane) การทำเม็ดสีและหมึกพิมพ์ การทำสีทาบ้านและพ่นสีกันสนิม การผลิตท่อน้ำประปา การทำเครื่องปั้นดินเผาและเซรามิก การทำเครื่องประดับโลหะ เป็นต้น (ภารดี ช่วยบำรุง, 2537; Wan, Kan, Rogel, and Dalida, 2010; Xi et al., 2010)

โลหะแมงกานีสบริสุทธิ์ถูกนำมาใช้น้อย เนื่องจากเปราะและทำปฏิกิริยากับน้ำได้ ดังนั้น จึงนำมาเป็นโลหะผสม (Alloys) เช่น ผสมกับเหล็กจะได้เหล็กกล้าที่เหนียวแข็งและทนทานต่อการขัดสี แต่บางอุตสาหกรรมก็มีการใช้ประโยชน์จากแมงกานีส อาทิ อุตสาหกรรมหลอมโลหะ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตหลอดโลหะ การผลิตเซรามิกและเครื่องปั้นดินเผา การผลิตถ่านไฟฉายและแบตเตอรี่ การผลิตน้ำมันชักเงา เป็นต้น (Ganesan, Kamaraj, Sozhan, and Vasudevan, 2012)

2.1.4 ความเป็นพิษของตะกั่วและแมงกานีส

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ กล่าวคือ ไม่มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหาร (Metabolism) ยิ่งไปกว่านั้นตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างร้ายแรง ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วได้ในปริมาณพอสมควร แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากในทันทีทันใด จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างฉับพลัน เช่น เกิดอาการปวดท้องอย่างแรง อุจจาระมีสีดำ (เกิดจาก PbS ในอุจจาระ) เกิดอาการช็อก (Shock) ตื่นเต้นง่ายความจำเสื่อม ทำอันตรายต่อไต และสามารถสะสมในเนื้อเยื่อของตับ ตะกั่วไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งจะเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหารและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ในที่สุด (Dwivedi, Sahu, Mohanty, Raj Mohan, and Meikap, 2008; Wan et al., 2010; Abou-Shady, Peng, Almeria O, and Xu, 2012) การศึกษาของ Jitrapun Pusapukdepob et al. (2007) พบว่า ประชาชนในหมู่บ้านคลิตี้และหมู่บ้านใกล้เคียง จังหวัดกาญจนบุรี ที่อาศัยอยู่ใกล้เหมืองตะกั่วที่มีการปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำซึ่งมีปัญหามาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันยังคงมีสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน พืชผัก และเนื้อสัตว์ที่เป็นแหล่งอาหารสูงเกินมาตรฐาน ประชากรกลุ่มตัวอย่างพบการสะสมสารตะกั่วในเลือดและฟันสูง

แมงกานีสเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับการมีชีวิตของมนุษย์ ขณะเดียวกันก็มีความเป็นพิษด้วย หากมีปริมาณมากเกินไปในร่างกาย ผลกระทบต่อสุขภาพโดยตรงต่อระบบทางเดินหายใจและสมอง อาการสำคัญ ได้แก่ ประสาทหลอน ขี้ลืม ระบบประสาทถูกทำลาย เกิดโรค Parkinson โรค Lung embolism และหลอดลมอักเสบ หากผู้ชายสัมผัสแมงกานีสเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เป็นหมัน นอกจากนี้พิษแมงกานีสยังทำให้เกิดอาการต่าง ๆ ได้แก่ Schizophrenia ปัญญาทึบ กล้ามเนื้ออ่อนแรง ปวดศีรษะ และนอนไม่หลับ แมงกานีสเรื้อรังเกิดจากการได้รับฝุ่นหรือฟูมของแมงกานีสทางการหายใจ มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลางทำให้เกิดความพิการอย่างถาวร (Okoniewska, Lach, Kacprzak, and Neczaj, 2007; Luan, Santelli, Hansel, and Burgos, 2012) การวินิจฉัยโรคที่เกิดจากพิษโลหะหนักจำเป็นต้องอาศัยแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ ประกอบกับการลงวินิจฉัยโรคตามอาการที่พบหรือไม่ระบุชนิดโลหะหนักเป็นพิษที่ได้รับ จึงทำให้ขาดข้อมูลในกลุ่มโรคนี้และการเกิดโรคจึงมีจำนวนน้อย (กระทรวงสาธารณสุข, กรมควบคุมโรค, 2546)

องค์การอนามัยโลก (WHO, 2011) ได้แนะนำคุณภาพของน้ำดื่ม (Guidelines for drinking - water quality) คือ ตะกั่วต้องไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสต้องไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับมาตรฐานของประเทศไทยตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 (2551) เกณฑ์อนุโลมสูงสุดของมาตรฐานน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ ดังนี้ ตะกั่ว 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีส 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1.5 การปนเปื้อนของตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน

การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมพบว่าสาเหตุส่วนใหญ่ เกิดจากองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในธรรมชาติ ได้แก่ หิน ดิน ซากพืช ซากสัตว์ และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ การอุตสาหกรรม ประกอบด้วย กระบวนการผลิตโลหะ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) รวมถึงแหล่งเกษตรกรรมที่มีการใช้สารกำจัดแมลงและเชื้อรา ที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิเนียม หรือทองแดง และแหล่งชุมชนที่มีการทิ้งขยะมูลฝอยที่มีถ่านไฟฉายหรือแบตเตอรี่ที่มีแมงกานีส แคดเมียม และตะกั่วเป็นองค์ประกอบ รวมถึงการปล่อยน้ำเสียทั้งที่ได้รับการบำบัดและไม่ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำ ในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ จะมีแมงกานีส 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และอาจมากถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแหล่งน้ำบริเวณเหมืองแร่ หรือบริเวณพื้นที่ที่เป็นเมือง พื้นที่อุตสาหกรรมที่มีการทิ้งขยะและกากของเสียอุตสาหกรรม รวมถึงพื้นที่ชุมชนเช่นเดียวกับการปนเปื้อนของตะกั่วในดินสูงมาก เมื่อตะกั่วถูกพืชดูดซึมก็จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและสุดท้ายก็เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์อย่างมาก ส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณพื้นที่ที่มีการถมหรือฝังกากของเสียที่มีส่วนประกอบของตะกั่ว (ประสิทธิ์ อ่อนจันทร์, 2551)

จากรายงานของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2554) ถึงผลการวิเคราะห์ปริมาณมลสารในดินและน้ำใต้ดิน พบว่ามีปริมาณตะกั่ว แมงกานีส และแคดเมียมที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณก่อนการทำเหมือง ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติตามสภาพธรณีวิทยาในพื้นที่ที่เป็นแหล่งแร่ ความไม่เสถียรของสายแร่ทำให้เกิดการผุพัง โลหะหนักจะถูกชะออกมาและถูกดูดซับไว้ในดิน เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านจะชะพาโลหะหนักไปกับน้ำด้วย นอกจากการปนเปื้อนของตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ยังมีการปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งเกิดขึ้นสืบเนื่องจากการปนเปื้อนบนผิวดิน กล่าวคือ เมื่อมีการปนเปื้อนบนดิน ดินจะดูดซึมสารปนเปื้อนและซึมลงสู่ใต้ผิวดิน เมื่อสารปนเปื้อนสามารถซึมลงจนถึงชั้นน้ำใต้ดินก็จะเกิดการพัดพาสารปนเปื้อนไปตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน เช่น การปนเปื้อนของ สารหนู แมงกานีส โมลิบดีนัม ซีลีเนียม ยูเรเนียม วาเนเดียม และสังกะสี ในน้ำใต้ดินบริเวณใกล้กับโรงงานผลิตแร่ยูเรเนียม ซึ่งการปนเปื้อนของตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดินส่วนใหญ่จะมาจากการทำเหมืองแร่ (Morrison, Metzler, and Dwyer, 2002; Oliva, 2010) ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน (2543) ได้กำหนดคุณภาพน้ำใต้ดินต้องมีมาตรฐานดังนี้ ตะกั่ว ต้องไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1.6 การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ

วิธีกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำ มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัด ความเข้มข้นและสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีออสโมซิสย้อนกลับ การแยกกรองด้วยไฟฟ้า การกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอนผลึก การรีดักชันทางเคมี การดูดซับ และการดูดซับทางชีวภาพ เป็นต้น สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ อาทิเช่น

- การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

หลักการพื้นฐาน คือ การกำจัดประจุบวก (Cation exchange) หรือประจุลบ (Anion exchange) ด้วยการแลกเปลี่ยนกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือ ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังนั้นการกำจัดตะกั่วที่เป็นไอออนบวก ต้องใช้เรซินชนิดกำจัดประจุบวก (Cationic resin) โดยการผ่านน้ำเข้าคอลัมน์ที่มีเรซินบรรจุอยู่ อนุภาคในเรซินจะเกิดพันธะอ่อน ๆ กับ H^+ และเกิดพันธะที่แข็งแรงกับ Fixed anions โดยที่ไอออนของตะกั่วในน้ำจะแลกเปลี่ยนกับ H^+ บนเรซิน ดังนั้นน้ำที่ผ่านออกมาจึงไม่มีไอออนบวกของตะกั่ว และน้ำที่ผ่านออกมาจะเป็นกรดค่อนข้างมาก ดังสมการที่ 2.1

$$RcH + Pb(NO_3)_2 \longrightarrow (Rc)(2Pb) + HNO_3 \tag{2.1}$$

เรซินหรือตัวแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งเป็น 2 แบบ คือ เรซินที่ได้จากธรรมชาติและเรซินสังเคราะห์ เรซินที่มีการใช้กำจัดตะกั่วในน้ำ อย่างเช่น Clinoptilolite เป็นเรซินที่ได้จากธรรมชาติ (Berber-Mendoza, Leyva-Ramos, Alonso-Davila, Fuentes-Rubio, and Guerrero-Coronado, 2006)

- การตกตะกอนผลึก (Precipitation)

กระบวนการตกตะกอนผลึกคือการเปลี่ยนรูปจากโลหะที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี โดยการเพิ่มพีเอช (pH) สำหรับการเปลี่ยนสารละลายของตะกั่วให้อยู่ในรูปของสารประกอบตะกั่วที่ไม่ละลายน้ำทำได้โดยการเติมสารเคมี ได้แก่ การเติมปูนขาว หรือโซดาไฟ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) การเติมโซดาแอช เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกในรูปของตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) และการเติมฟอสเฟตเพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกในรูปตะกั่วฟอสเฟต ($Pb(PO_4)_2$) สำหรับการกำจัดแมงกานีสในน้ำ ส่วนใหญ่มักอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันในการเปลี่ยน Mn^{2+} ที่ละลายน้ำได้เป็น Mn^{4+} ซึ่งตกผลึกได้ง่ายกว่า การตกผลึกของแมงกานีสสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มพีเอชให้สูงถึง 9 และมีออกซิเจนในน้ำ แต่การมีออกซิเจนเพียงลำพังอาจไม่ทำให้เกิดการตกผลึกได้จำเป็นต้องมีออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agent) อยู่ด้วย เช่น คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น (Clescerl, Greenberg, and Eaton, 1999)

- การกรอง (Filtration)

กลไกในการกรองคือการแยกของแข็งออกจากน้ำ เนื่องจากตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยได้จะไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งกลไกของการกรองคือของแข็งจะถูกกักอยู่บนตัวกรอง ส่วนของเหลวจะผ่านตัวกรองลงมา การกรองเป็นวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำที่ทำได้ง่ายที่สุด และเป็นวิธีที่มีราคาถูก ทั้งนี้ก็ขึ้นกับตัวกรองที่ถูกนำมาใช้ เช่น การใช้หินปูน ก้อนอิฐบด และกรวดเป็นตัวกรองในการกำจัดแมงกานีสและตะกั่ว (Aziz, and Smith, 1995; Aziz, Adlan, and Ariffin, 2008) แต่จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวกรองให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) และอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) ซึ่งพบว่าเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสารที่มีขนาดเล็กกว่าตัวกรองได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้กลไกในการกำจัดจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณตะกั่ว และชนิดของตัวกรอง (Malamis, Katsou, and Haralambous, 2011) ในการกำจัดแมงกานีสมีการใช้อัลตราฟิลเตรชันเช่นกัน แต่จะศึกษาในการกำจัดออกจากน้ำดื่มโดยในส่วนของน้ำเสียยังมีปัญหาในเรื่องการอุดตันของตัวกรองที่ใช้ (Choo, Lee, and Choi, 2005)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- การรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction)

ปฏิกิริยารีดักชัน จะเกิดเมื่อมีการรับอิเล็กตรอนจากผู้ให้ ซึ่งจะเกิดควบคู่กับปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีการศึกษาพบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรง และมีศักย์รีดักชัน (Reduction potential: E^0) สูง หมายถึงเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้กับทุกสารมลพิษที่มีศักย์รีดักชันต่ำกว่า ซึ่งตะกั่วในรูป Pb^{2+} สามารถเกิดปฏิกิริยากับ Fe^0 ได้ ดังสมการที่ 2.2 ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายจะได้ตะกั่วในรูปที่เป็นตะกอนสามารถกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น (Zhang, Lin, Lu, and Chen, 2010)

$$Fe^0(s) + Pb^{2+}(aq) \longrightarrow Pb^0(s) + Fe^{2+}(aq) \qquad (2.2)$$

- การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสีย และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถูกใช้เป็นตัวดูดซับอย่างแพร่หลาย (Dwivedi et al., 2008) ทั้งในการกำจัดแมงกานีสด้วยเช่นกัน (Bin Jusoh, Cheng, Low, Nora'aini, and Megat Mohd Noor, 2005; Okoniewska et al., 2007) โดยที่ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากตามไปด้วย เมื่อสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่าง ๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ซึ่งการพัฒนาตัวดูดซับยังมีงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็น เพอร์ไลท์ (Perlite) ดินเหนียว (Clay) อะลูมินา (Alumina) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) เป็นต้น (Da Fonseca, De Oliveira, and Arakaki, 2006; Ganesan et al., 2012) อย่างไรก็ตามตัวดูดซับเหล่านี้ยังพบปัญหา ไม่ว่าจะเป็นมีความสามารถหรือมีความเฉพาะเจาะจงในการดูดซับต่ำ ทั้งนี้ยังมีตัวดูดซับที่เชื่อว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดตะกั่วและมีราคาถูก นั่นคือ แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะขึ้นกับปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์และค่าพีเอช (Qin, Wang, Fu, and Ma, 2011)

- การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับโลหะด้วยมวลชีวภาพ เป็นปฏิกิริยาทางเคมี-ฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะที่มีประจุกับเซลล์จุลินทรีย์ มีข้อดีในด้านค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ กากตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งตัวดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) สามารถนำไปผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้โลหะที่ถูกดูดซับยังสามารถเอาออกมาจากตัวดูดซับนั้นได้อีกด้วย ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ใช้กระบวนการนี้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุด ตัวอย่างตัวดูดซับที่มีการศึกษาในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส ได้แก่ เปลือกถั่วพีแคน (Pecan nutshell) ทรายเคลือบไคโตแซน (Chitosan-coated sand) เปลือกกล้วย เป็นต้น (Vaghetti et al., 2009; Wan et al., 2010; ภัทรกฤตย์ จันสุนา และคณะ, 2555)

2.2 น้ำใต้ดิน

2.2.1 นิยาม

"น้ำบาดาล" หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ที่อยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดความลึก น้อยกว่า 10 เมตร มิได้ (พระราชบัญญัติน้ำบาดาล, 2520)

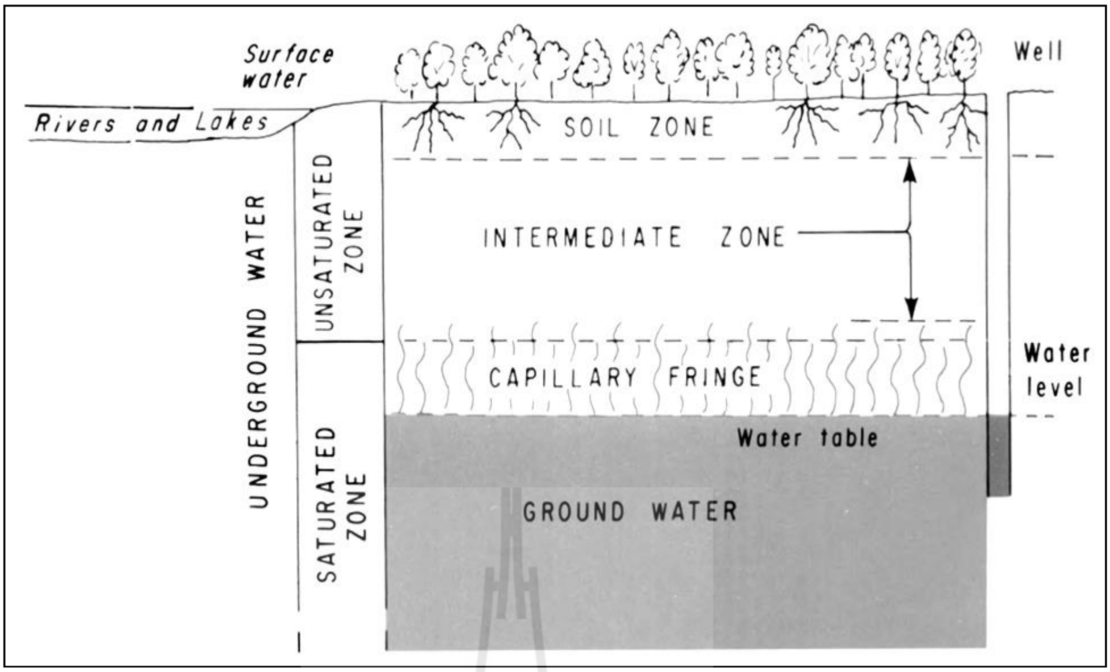
"น้ำใต้ดิน" หมายถึง น้ำที่อยู่ใต้ดิน และให้หมายความรวมถึงน้ำบาดาลตามกฎหมายว่าด้วยน้ำบาดาล (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน, 2543)

ดังนั้น น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล (Groundwater) หมายถึง น้ำที่ถูกกักเก็บหรือสะสมตัวอยู่ใต้ดิน อาจอยู่ตามรอยแตก รอยแยกของชั้นหิน หรืออาจอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด หรือเม็ดทรายใต้ผิวดิน ทั้งนี้น้ำภายใต้ผิวดินส่วนใหญ่มาจากน้ำฝน ซึ่งตกลงมายังผิวโลก แล้วส่วนหนึ่งซึมผ่านลงไปใต้ดิน อีกส่วนหนึ่งไหลลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งจะมีการซึมลงไปใต้ผิวดินด้วย

น้ำมีการถ่ายเทระหว่างแหล่งน้ำต่าง ๆ คือ น้ำที่ขังอยู่ในดิน น้ำในบรรยากาศ และน้ำจากทะเลและมหาสมุทร การเคลื่อนที่ของน้ำระหว่างแหล่งน้ำต่าง ๆ นี้เรียกว่า วัฏจักรของน้ำ โดยน้ำได้รับพลังงานพื้นฐานจากดวงอาทิตย์ในรูปของพลังงานความร้อน ทำให้น้ำในมหาสมุทรเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำแล้วก่อตัวเป็นก้อนเมฆ ก้อนเมฆจะเกิดการควบแน่นกลั่นตัวเพื่อเปลี่ยนสภาพจากไอน้ำในก้อนเมฆเป็นหยดน้ำในรูปแบบของฝนหรือหิมะตกลงมาสู่ผิวโลก หยดน้ำที่ตกลงมาสู่พื้นโลก บางส่วนจะถูกดูดซึมไปเป็นน้ำใต้ดิน บางส่วนก็ไหลลงสู่แม่น้ำ ทะเลและมหาสมุทรต่อไป แหล่งน้ำในประเทศไทยมีมากมาย ทั้งแหล่งน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยแหล่งน้ำที่เป็นแหล่งกำเนิดที่ใหญ่ที่สุด ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดของน้ำแทบทั้งหมดที่มีอยู่ในประเทศไทย คือ น้ำฝน ปริมาณฝนที่ตกลงมาเมื่อไหลลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง แอ่งน้ำ หรืออ่างเก็บน้ำ จะเรียกว่า น้ำท่า เมื่อซึมลงสู่ใต้ดินจะเรียกว่า น้ำใต้ดิน ซึ่งแหล่งน้ำใต้ดินที่นำมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดคือ น้ำบาดาล

2.2.2 การกระจายตัวของน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ตามระดับน้ำใต้ดิน (Water table) ซึ่งเป็นระดับที่ไม่สม่ำเสมอ ระดับน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของส่วนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยจะเป็นไปตามสภาพของผิวดิน ซึ่งมีระดับสูงสุดอยู่ในส่วนที่เป็นเนินเขา และมีระดับต่ำสุดอยู่ในส่วนที่เป็นหุบเขา (ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวราพันธ์, 2548) การแบ่งน้ำใต้ดิน แสดงตามรูป 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 การแบ่งส่วนของน้ำใต้ดิน (Heath, 1983)

1. ส่วนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone)

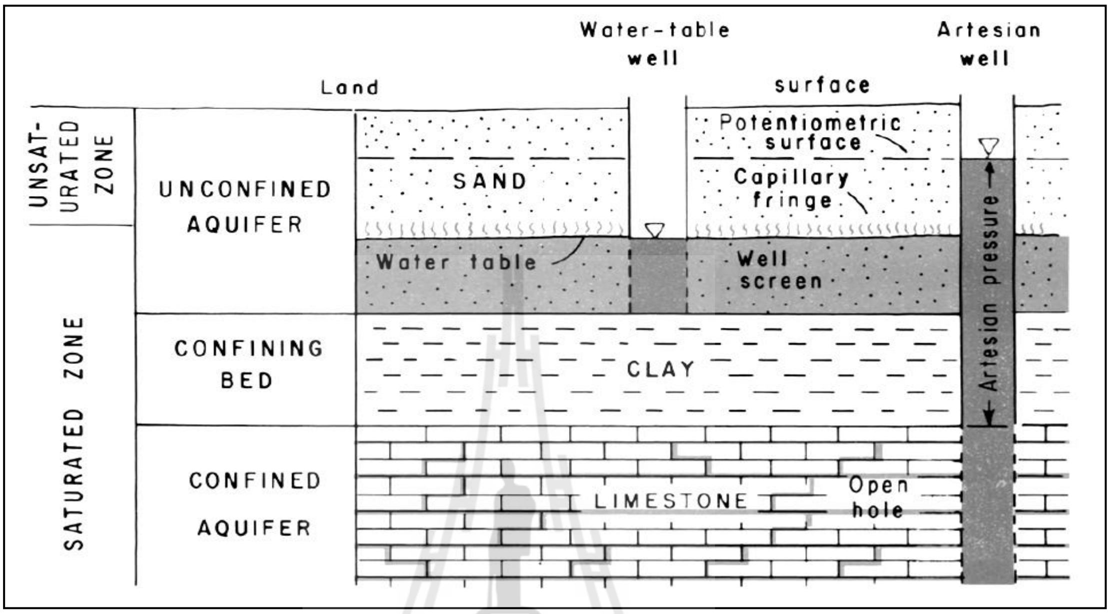
คือชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน เป็นส่วนที่มีทั้งน้ำและอากาศ มีความสำคัญมากสำหรับน้ำใต้ดิน มีชื่อเรียกอีกหลายอย่าง ได้แก่ Vadose zone และ Aeration zone ความหนาของชั้นนี้จะเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวน้ำในบ่อ หนอง บึง ซึ่งส่วนนี้สามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ Soil zoneจะเริ่มจากผิวดินลึกลงไปเมตรถึงสองเมตร พื้นที่ส่วนนี้จะมีรากต้นไม้ มีรูชอนไชของพืชและสัตว์ ทำให้มีรูพรุน (Porosity) และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ในส่วนนี้สูง Intermediate zone จะมีความลึกไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความหนาของ Soil zone และ Capillary fringe และ Capillary fringe เกิดจากแรงระหว่างหินและน้ำ ซึ่งผลจากแรงดึงดูดนี้ทำให้น้ำมีลักษณะคล้ายถูกตรึงอยู่ในช่องว่างของหิน น้ำใน Capillary fringe และที่อยู่ใต้โซนนี้จะมีค่า Hydraulic pressure เป็นลบคือมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

2. ส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone)

คือชั้นดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน เป็นส่วนที่มีแต่น้ำเท่านั้น โดยส่วนนี้จะเป็นส่วนของน้ำใต้ดินที่แท้จริง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phreatic zone หรือ Groundwater zone การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินขึ้นอยู่กับจำนวนของน้ำซึ่งผ่านลงมาจากส่วนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และขึ้นอยู่กับการสูญเสียหรือการถูกปล่อยออกไปของน้ำใต้ดิน ทั้งโดยเกิดจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์

ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer)

ชั้นหินที่เป็นแหล่งกักเก็บน้ำใต้ดิน คือชั้นของหินที่มีรูพรุนซึ่งสามารถกักเก็บน้ำและไหลผ่านรูพรุนเพื่อสูบใช้ได้ แสดงในรูป 2.2 โดยชั้นหินอุ้มน้ำแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ



รูปที่ 2.2 ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) (Heath, 1983)

- ชั้นหินอุ้มน้ำแบบเปิด (Unconfined layer)

คือชั้นน้ำใต้ดินที่ไม่ถูกปิดทับโดยชั้นหินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (Semipervious strata) หรือซึมผ่านได้ยาก (Impervious strata) เมื่อไม่ถูกปิดทับชั้นน้ำจึงไร้แรงดันและน้ำจากผิวดินสามารถซึมลงไปได้โดยตรง ระดับน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา หินอุ้มน้ำนี้มีคุณภาพต่ำและปนเปื้อนได้ง่ายจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และสารเคมีต่าง ๆ เนื่องจากสารเคมีที่ตกค้างในผิวดินสามารถถูกชะโดยน้ำฝนและซึมเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินนี้ได้โดยตรง

- ชั้นหินอุ้มน้ำแบบปิด (Confined layer)

คือชั้นน้ำใต้ดินที่มีชั้นหินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้หรือซึมผ่านได้ยากปิดทับ ทำให้ชั้นน้ำนี้มีแรงดัน บางครั้งจึงเรียกชั้นน้ำนี้ว่า Pressure aquifer หรือ Artesian aquifer โดยแรงดันจะอยู่ในลักษณะ Hydrostatic pressure คือ มีแรงดันเท่ากันทุกจุด หากทำการเจาะบ่อสำรวจในชั้นน้ำจะพบว่าระดับน้ำในบ่อเปลี่ยนแปลงน้อยมากและระดับน้ำในบ่อจะสูงกว่าชั้นหินอุ้มน้ำที่ถูกปิดทับเนื่องจากมีแรงดัน คุณภาพน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำถูกปิดทับจะมีคุณภาพสูงไม่ถูกปนเปื้อนได้ง่าย แต่ถ้าหากปนเปื้อนจะใช้เวลานานมากในการตรวจพบ

2.2.3 การไหลของน้ำใต้ดิน

การไหลของน้ำใต้ดินเป็นไปอย่างช้ามาก วัดโดยใช้หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวัน หรือในบางแห่งเป็นเซนติเมตรหรือเมตรต่อปี จะเหมาะสมสำหรับการวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน เหตุผลสำคัญที่ทำให้การไหลเป็นไปอย่างช้ามากคือ น้ำจะต้องไหลผ่านช่องว่างที่แคบและจำกัด ดังนั้น จึงควรจะพิจารณาถึงความพรุนและความซึมได้ของวัตถุไม่ว่าจะเป็นชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโลก (ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวราพันธ์, 2548)

ความพรุน (Porosity)

ความพรุน หมายถึง ช่องว่างในหิน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด หินยิ่งมีความพรุนมากเท่าไร จะยิ่งมีช่องว่างภายในเนื้อของมันมากขึ้นเท่านั้น และช่องว่างเหล่านี้คือทางที่จะทำให้น้ำใต้ดินไหลผ่านไปได้

ความพรุนแตกต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของวัตถุ พบว่าความพรุนจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะ ขนาด และการคลุกเคล้ากันของเศษหินเล็ก ๆ การทับถมของทรายที่ส่วนใหญ่เป็นเม็ดแร่ควอตซ์ที่มีลักษณะกลมและมีขนาดเกือบเท่า ๆ กัน จะมีความพรุนสูงมาก แต่เมื่อมีแร่อื่นเข้ามาปะปนในขณะทับถมและเชื่อมเม็ดแร่ควอตซ์ให้ติดกันเป็นหินทราย ความพรุนจะลดลงตามจำนวนช่องว่างที่มีตัวเชื่อมเข้ามาแทรกอยู่ การทับถมกันของทรายที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป โดยมีส่วนที่มีขนาดเล็ก เช่น ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) เข้ามาปะปนจะมีความพรุนต่ำ ทั้งนี้เพราะส่วนที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างส่วนที่มีขนาดใหญ่ หินที่มีเนื้อแน่น เช่น หินแกรนิต อาจจะมีความพรุนได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการแตกของหิน หินเนื้อแน่นที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น หินปูน อาจจะมีแนวที่มีการยึดเกาะกันไม่แน่น ทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นได้เมื่อน้ำไปละลายเอาเนื้อของหินออกมา

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าขอบเขตของความพรุนของวัตถุต่าง ๆ จะแตกต่างกันออกไป เช่น ดินเหนียวที่มีการทับถมใหม่ ๆ อาจจะมีความพรุนถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หินอัคนีที่ยังไม่ผุ เช่น หินแกรนิต หินแกบโบร หรือหินออบซิเดียน อาจจะมีความพรุนเพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ หินที่ยังไม่แข็งตัวซึ่งเกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของ ดินเหนียว ทรายแป้ง ทรายและกรวด มีความพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อตะกอนเหล่านี้แข็งตัวกลายไปเป็นหินตะกอนเนื่องจากการยึดติดกันหรืออัดตัวแน่นเข้า ความพรุนจะลดลงอย่างมากค่าเฉลี่ยของความพรุนของหินแต่ละชนิดมีความหมายน้อยมาก เพราะว่าภายในชนิดเดียวกันความพรุนยังจะแตกต่างกันไปอีกมาก อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปความพรุนที่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์จัดว่าต่ำ ความพรุน 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่าปานกลาง และความพรุนมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ถือว่าสูง

ความซึมได้ (Permeability)

น้ำบาดาลในพื้นที่หนึ่ง ๆ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถของชั้นหินในการที่จะกักเก็บน้ำเอาไว้ และความสามารถในการจ่ายน้ำ ซึ่งความสามารถในการที่จะดูดซึมหรือปล่อยน้ำออกมานี้ เรียกว่า ความซึมได้

อัตราการจ่ายน้ำของชั้นหินไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับความพรุนเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างที่ติดต่อกันด้วย ตัวอย่างเช่น ดินเหนียว ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีความพรุนสูง แต่ช่องว่างเล็กมาก เพราะประกอบขึ้นด้วยแผ่นเล็ก ๆ ของแร่ดินมารวมกัน ดังนั้นน้ำจะไหลผ่านทรายได้เร็วและง่ายกว่าดินเหนียว เพราะในดินเหนียวจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผนังของดินมาก น้ำจะไหลผ่านทรายได้เร็วกว่า เพราะช่องว่างระหว่างเม็ดทรายกว้าง และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและเม็ดทรายต่ำ ดังนั้น การที่น้ำจะไหลผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างว่าใหญ่หรือเล็กแค่ไหน ที่สำคัญคือช่องว่างเหล่านั้นจะต้องมีทางติดต่อกันเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้ ถ้าช่องว่างไม่มีทางติดต่อกันน้ำไหลผ่านไม่ได้ วัตถุนั้นจะเรียกว่าเป็นวัตถุที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable) ชั้นหินที่น้ำซึมผ่านได้และอยู่ภายใต้ระดับน้ำบาดาล เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) หินทรายและหินปูนซึ่งมีความซึมได้ เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำไปละลายเอาเนื้อหินปูนตามรอยแตกและแนวของชั้นหินออกไปทำให้เกิดเป็นช่องว่าง และส่วนของรอยแตกในหินเนื้อแน่น เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินแกบโบร อาจจะทำหน้าที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำได้

เนื่องจากการไหลของน้ำบาดาลเป็นไปอย่างช้า ๆ ดังนั้น ส่วนใหญ่การไหลจึงเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) ตรงข้ามกับการไหลของน้ำบนผิวดินซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) ยกเว้นการไหลของน้ำบาดาลในโพรงใหญ่ ๆ ของหินปูนซึ่งจะเป็นแบบปั่นป่วน ในการไหลแบบราบเรียบนั้น น้ำส่วนที่อยู่ติดกับผนังของหินมักจะไม่มีการเคลื่อนไหว เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและผนัง ส่วนของน้ำที่อยู่ห่างออกไปจากผนังจะมีการไหลเร็วขึ้น โดยไหลเป็นแบบเรียบ ๆ น้ำที่อยู่ในส่วนกลางของช่องว่างจะไหลได้เร็วที่สุด เพราะความต้านทานต่อการไหลของน้ำจะลดน้อยลงจากผนังของหินไปสู่ส่วนกลางของช่องว่าง พลังงานที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการไหลของน้ำบาดาลมาจากแรงดึงดูดของโลก ซึ่งจะเป็นตัวทำให้น้ำซึมจากผิวดินลงไปข้างใต้จนถึงระดับน้ำใต้ดิน และไหลผ่านช่องว่างในดินและหินไปสู่แม่น้ำ ลำธาร ทะเลสาบ และน้ำพุ น้ำบนผิวดินจะไหลได้ต้องมีความลาดเอียง การไหลของน้ำใต้ดินก็เช่นกัน จะเกิดขึ้นได้ระดับน้ำใต้ดินต้องมีความลาดเอียงที่เรียกว่า ความลาดของแรงดัน (Hydraulic gradient) การหาค่าอัตราการไหลของน้ำในหิน อาศัยสมการของเฮนรี ดาร์ซี (Henri Darcy) ในชั้นหินอุ้มน้ำทั่ว ๆ ไปจะมีอัตราการไหลประมาณไม่เร็วไปกว่า 1.5 เมตรต่อวัน และไม่ช้าไปกว่า 1.5 เมตรต่อปี แม้ในบางครั้งอัตราการไหลอาจจะเร็วถึง 120 เมตรต่อวัน หรือบางครั้งอาจจะช้ากว่าไม่กี่เซนติเมตรต่อปี

2.2.4 การปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

จากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2553 (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) เกี่ยวกับการปนเปื้อนน้ำใต้ดินซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ น้ำใต้ดินส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค โดยปกติจะพบแร่ธาตุบางชนิดละลายอยู่ในน้ำบาดาลตามธรรมชาติในปริมาณค่อนข้างสูง เช่น เหล็ก แมงกานีส ส่วนแร่ธาตุบางชนิดจะพบในบางพื้นที่ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาเฉพาะ เช่น ฟลูออไรด์ มักจะพบในพื้นที่ภาคเหนือและภาคใต้ ปัญหาน้ำบาดาลเค็มจะพบในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและบริเวณชายฝั่งทะเล ส่วนปัญหาน้ำกระด้างมักพบในน้ำบาดาลที่สะสมตัวอยู่ในหินปูน เช่น บางพื้นที่ของจังหวัดสระบุรีและจังหวัดราชบุรี นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของสารเคมีจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การลักลอบทิ้งสารเคมีที่ตำบลกลางดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ทำให้สารเคมีจากกากของเสียถูกชะลงใต้ดินและไหลซึมผ่านหน้าดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาลซึ่งเป็นหินแข็ง จากการตรวจสอบติดตามสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ลักลอบทิ้งสารเคมีพบสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าเกินมาตรฐานในน้ำใต้ดิน 4 ชนิด ได้แก่ สาร 1,1-ไดคลอโรเอทธิลีน เตตระคลอโรเอทธิลีน ไตรคลอโรเอทธิลีน และ 1,1,2-ไตรคลอโรอีเทน สำหรับพื้นที่จังหวัดระยองพบการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารอินทรีย์ระเหยง่ายในตัวอย่างดิน น้ำใต้ดิน และน้ำบาดาลเกินมาตรฐานน้ำใต้ดินบริเวณรอบ ๆ นิคมอุตสาหกรรมและในนิคมอุตสาหกรรม โดยโลหะหนักที่ปนเปื้อน ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ฟลูออไรด์ สารหนู ปรอท โครเมียมและตะกั่ว แต่ปริมาณเหล็กและแมงกานีสที่พบน่าจะเกิดจากธรรมชาติที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นศิลาแลงและดินลูกรัง ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปนเปื้อนในพื้นที่อุตสาหกรรมมาบตาพุดที่มีค่าเกินมาตรฐาน ได้แก่ สารไตรคลอโรเอทธิลีน 1-2-ไดคลอโรอีเทน และทรานต์-1-2-ไดคลอโรเอทธิลีน

ปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การลักลอบทิ้งกากของเสีย การรั่วไหลของสารเคมี การฝังกลบขยะมูลฝอยโดยไม่ถูกหลักวิชาการ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และการเกษตรกรรม เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) ซึ่งสามารถแบ่งแหล่งที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน 2 แหล่ง ได้แก่ แหล่งที่มีจุดกำเนิดแน่นอน (Point Source) และแหล่งที่มีจุดกำเนิดไม่แน่นอน (Non-Point Source) ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดมลพิษ แสดงในตารางที่ 2.1 การปนเปื้อนของมลพิษส่วนใหญ่จะสนใจการไหลของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของหินและลักษณะการกระจายตัวของมลสาร (Contaminant plume) ซึ่งการกระจายตัวของมลสารอาจจะขยายตัวออกไปหลายร้อยเมตร หรืออาจกระจายไปไกลมากจากแหล่งกำเนิดมลพิษ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดมลพิษ (Thiruvenkatachari, Vigneswaran, and Naidu, 2008)

แหล่งที่มีจุดกำเนิดแน่นอน (Point Source)	แหล่งที่มีจุดกำเนิดไม่แน่นอน (Non-Point Source)
- หลุมฝังกลบขยะชุมชน - กากอุตสาหกรรม - สถานที่รับกำจัดขยะ - การรั่วไหลของถังเก็บน้ำมัน - การรั่วไหลของถังส้วม - อุบัติเหตุที่ทำให้เกิดการรั่วไหลของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและของสารอินทรีย์	- จากบรรยากาศ - ตะกอนปนเปื้อน - กิจกรรมบนดิน ที่เป็นแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน เช่น การเกษตร (สารกำจัดศัตรูพืชและปุ๋ย) การตัดไม้และน้ำเสียในระบบบำบัด

สารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน อ้างอิงตามมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ได้แบ่งชนิดของสารมลพิษ ดังนี้

- สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvents) เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) เตตระคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethylene) ไตรคลอโรเอทธิลีน (Trichloroethylene) 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethane) ซึ่งจะปนเปื้อนน้ำใต้ดินจากสถานที่กำจัดขยะอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรม (Lookman et al., 2004)

- สารประกอบที่มีกลุ่มไนโตร อาทิเช่น ไนโตรเบนซิน (Nitrobenzene) ไนโตรอะโรมาติก (Nitroaromatic) ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม เช่น การผลิตอะนิลีน (Aniline) ยา สีย้อม (Dyes) สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) เป็นต้น (Lavine, Auslander, and Ritter, 2001; Yin et al., 2012)

- โลหะหนัก (Heavy metals) เป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์ พืชและสัตว์ โลหะหนักที่มีการนำมาใช้บ่อย ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี สารหนู และปรอท ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเกษตรกรรมที่มีการใช้สารกำจัดแมลงและวัชพืช (Insecticides and Herbicides) สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Eljamal, Sasaki, and Hirajima, 2011; Hashim, Mukhopadhyay, Sahu, and Sengupta, 2011)

- ไนเตรท (Nitrate) การปนเปื้อนส่วนใหญ่เกิดจากภาคเกษตรกรรม เช่น การใช้ปุ๋ย มูลสัตว์ หรือของเสียจากมนุษย์ นอกจากนี้อาจเกิดจากภาคอุตสาหกรรม ระบบบำบัดน้ำเสีย การระเบิดของคลังอาวุธ หรือแม้กระทั่งการปล่อยจากชั้นบรรยากาศ (Cheng, Muftikian, Fernando, and Korte, 1997; Zhang, Hao, et al., 2010)

2.2.5 เทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงในน้ำใต้ดินจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น เพื่อให้ผ่านมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด ความยากง่ายของการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนขึ้นกับ สภาพทางธรณีวิทยา ชนิดของสารปนเปื้อน และปริมาณของสารปนเปื้อน การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนสามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ตามวิธีการจัดการกับพื้นที่ปนเปื้อน ได้แก่

1. การบำบัดสารปนเปื้อนแบบนอกพื้นที่ (Ex-situ remediation)

คือ การนำน้ำใต้ดินขึ้นมาจากพื้นที่ปนเปื้อนก่อนนำมาบำบัดหรือกำจัดภายนอกบริเวณพื้นที่การปนเปื้อน เช่น

- การสูบน้ำใต้ดินขึ้นเพื่อมาบำบัดหรือกำจัด (Pump and Treat) การสูบน้ำใต้ดินจากบ่อน้ำซึ่งสร้างขึ้นในจุดที่เหมาะสม เพื่อนำน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไปบำบัดหรือกำจัดสามารถบำบัดมลสารที่ละลายน้ำได้ดี หากเป็นมลสารที่ละลายน้ำได้น้อย จำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยเพิ่มความสามารถในการละลาย เช่น Surfactant cyclodextrin หรือ Nanoparticles ซึ่งวิธีนี้อาจเรียกว่า Soil flushing เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน แต่เป็นวิธีที่มีความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง (Oliva et al., 2010; U.S. EPA., 2012)

- การสกัดสารระเหยง่ายออกจากดิน (Soil vapor extraction) โดยการขุดดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาเพื่อทำการไล่สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) ออกจากดินก่อนที่จะซึมลงปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นการนำดินในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือเหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นมาบำบัด (Freeman, 1989; U.S. EPA., 2012)

- ดูดซับด้วยถ่าน (Carbon absorption) สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต่อสารปนเปื้อนอินทรีย์ต่าง ๆ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุล สภาพขั้ว ความอิ่มตัวของไฮโดรคาร์บอน และความสามารถละลายได้ของสารปนเปื้อน (Freeman, 1989)

2. การบำบัดสารปนเปื้อนแบบอยู่กับที่ (In-situ remediation)

คือ การบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษในน้ำใต้ดิน ณ บริเวณพื้นที่การปนเปื้อน เช่น

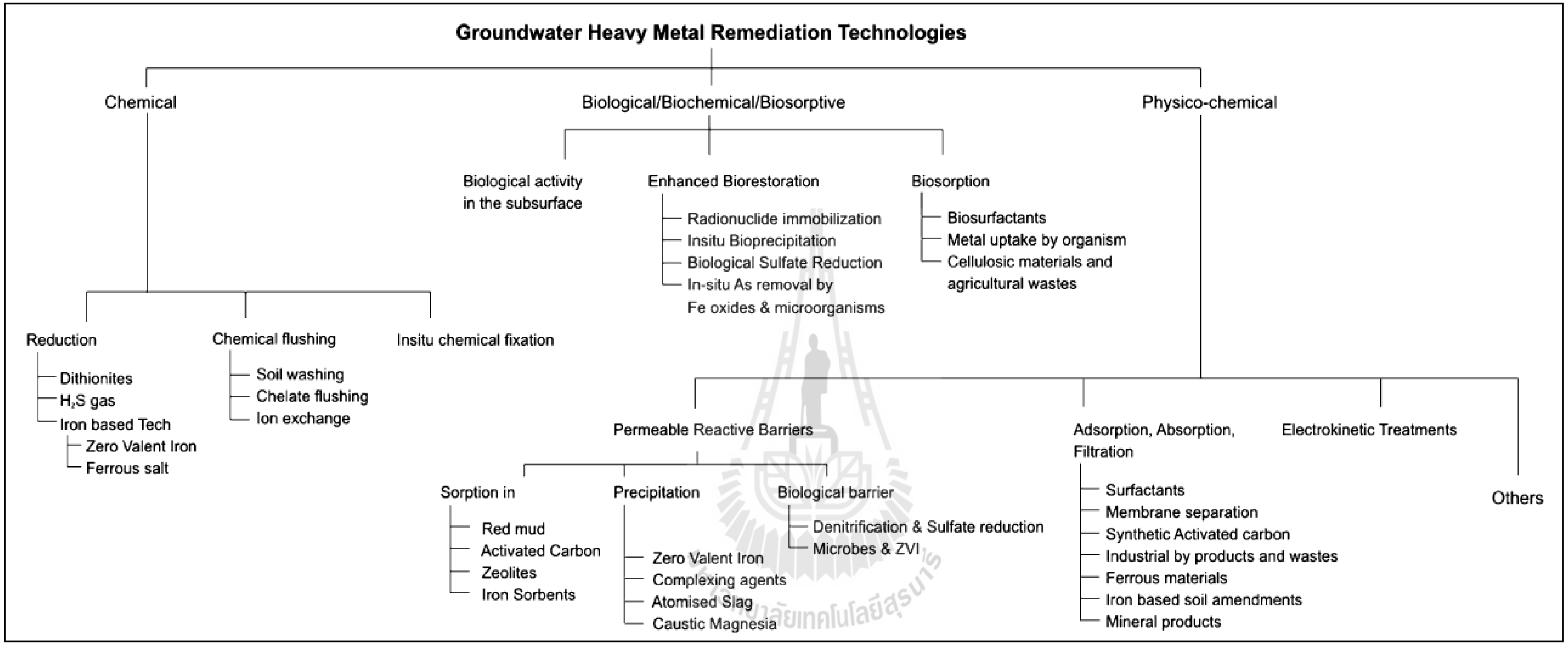
- การไล่ด้วยอากาศ (Air stripping) เป็นวิธีที่มีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนลงไปในแหล่งน้ำในดิน โดยหลักการจะอาศัยการอัดอากาศผ่านท่อลงสู่ชั้นน้ำที่มีการปนเปื้อน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ มีค่าใช้จ่ายน้อย และเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยาก โดยอาศัยหลักการที่ทำให้สารปนเปื้อนออกจากน้ำด้วยการระเหยออกไปสู่บรรยากาศ แต่สารปนเปื้อนต้องเป็นสารที่ระเหยง่าย เช่น ตัวทำละลาย (Solvents) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) สามารถทำร่วมกับ (Freeman, 1989; U.S. EPA., 2012)

- Permeable Reactive Barrier (PRB) คือการใช้วัสดุหรือสารเคมี เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) ในการสร้างกำแพงใต้ดินขวางการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งเมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านกำแพงนี้ จะทำปฏิกิริยากับมลสาร คล้ายกับการกรองน้ำ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบประเภทที่มีคลอรีน (Chlorinated compounds) เช่น ไตรคลอโรอีทีน (Trichloroethene: TCE) ทำให้กลายเป็นอีทีน (Ethene) ซึ่งไม่มีอันตรายและยังสามารถทำปฏิกิริยากับโครเมียม (Cr^{6+}) ให้กลายเป็นโครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งไม่ละลายน้ำ อาจใช้สารเคมีซึ่งเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ไนเตรท (Nitrate) และซัลเฟต (Sulfate) ในการสร้าง PRB จะต้องทำให้ PRB มี Hydraulic conductivity ใกล้เคียงหรือมากกว่าดินโดยรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินไหลอ้อมไป (U.S. EPA., 1998)

สำหรับการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน มีกระบวนการในการฟื้นฟูได้แก่ การทำลายหรือย่อยสลายโลหะหนัก การสกัดโลหะหนักออกก่อนการนำไปบำบัดหรือกำจัด การปรับเสถียรโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้น้อยหรือมีความเป็นพิษลดลง การแยกโลหะหนักออกจากวัสดุที่ไม่เป็นพิษและนำวัสดุนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ ลดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในวงกว้าง โดยสามารถแบ่งเทคโนโลยีที่ใช้เป็น 3 เทคโนโลยี (Hashim et al., 2011) ซึ่งแสดงตามรูป 2.3 ดังต่อไปนี้

1. เทคโนโลยีการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment technologies)

สารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจะแพร่กระจายไปทั่ว ซึ่งมักจะขยายตัวจนมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่การปนเปื้อนและลึกลงไปใต้พื้นดิน ทำให้เทคโนโลยีในการฟื้นฟูมีความยุ่งยากที่จะบำบัดสารปนเปื้อน ในกรณีดังกล่าวเทคโนโลยีการบำบัดทางเคมีอาจจะทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งกระบวนการทางเคมีเป็นการลดความเป็นพิษหรือการเคลื่อนไหวสารปนเปื้อนประเภทโลหะหนัก โดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) และปฏิกิริยาสะเทิน (Neutralization) ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้กันมากที่สุด



รูปที่ 2.3 แบ่งประเภทของเทคโนโลยีการฟื้นฟูสำหรับพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน (Hashim et al., 2011)

- กระบวนการบำบัดในพื้นที่โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน (In-situ reduction processes) โดยอาศัยตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ไดไธโอไนท์ (Dithionite) เหล็ก (Iron) โดยโลหะหนักที่ได้รับการบำบัด เช่น โครเมียม (Cr) ยูเรเนียม (U) สารหนู (As) เป็นต้น

- การบำบัดในพื้นที่โดยการตรึงทางเคมี (In-situ chemical fixation) โดยใช้โคลนแดง (Red mud) และสารผสมของ $FeSO_4$ $CaCO_3$ KMnO และ $Ca(H_2PO_4)_2$ ซึ่งสามารถใช้บำบัดตะกั่ว (Pb) และสารหนู (As)

2. เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment technologies)

วิธีการบำบัดทางชีวภาพเป็นการใช้ประโยชน์จากธรรมชาติผ่านกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้พืชและจุลินทรีย์ในการฟื้นฟูการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและน้ำใต้ดิน กลไกที่เกิดในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction reaction) และปฏิกิริยาเมททิเลชัน (Methylation) โดยเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดจะใช้ได้ทั้งในพื้นที่และนอกพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน

- การฟื้นฟูทางชีวภาพ (Biorestoration) โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ (Micro-organisms) เป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาค่าดำเนินการต่ำ สามารถบำบัดโลหะหนักได้หลายชนิด

- การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) การดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับทางชีวภาพ (Biosorbent) เป็นกระบวนการที่ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุด เช่น การใช้เซลลูโลส (Cellulose) บำบัดตะกั่ว (Pb) นิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn)

3. เทคโนโลยีการบำบัดทางฟิสิกส์ - เคมี (Physico-chemical treatment technologies)

เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับกระบวนหรือการดำเนินการทางกายภาพ เช่น การสร้างแผ่นกั้นในงานโยธา การดูดซับหรือการดูดซึมทางกายภาพ การถ่ายโอนมวล ซึ่งดำเนินการไปพร้อมกับกระบวนการทางเคมีหรือชีวเคมี กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์ - เคมีถูกนำใช้ในการจัดการกับปัญหาการปนเปื้อนสารมลพิษในน้ำใต้ดินเพิ่มมากขึ้น

- Permeable Reactive Barrier บำบัดโดยการสร้างแผ่นกั้นขวางการไหลของน้ำใต้ดิน เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านจะทำปฏิกิริยาในการบำบัดสารมลพิษ ซึ่งแบ่งตามกระบวนการบำบัดได้แก่ กระบวนการดูดซึม โดยใช้ตัวกลาง เช่น โคลนแดง ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ (Zeolites) และเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (ZVI) เป็นต้น กระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ

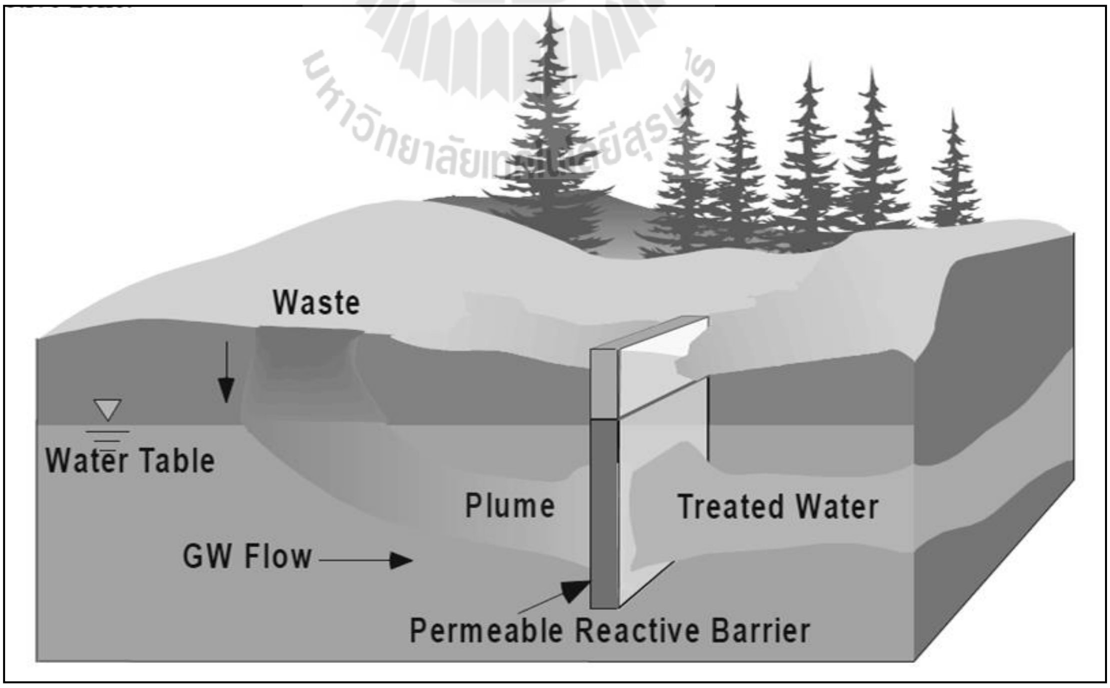
- การฟื้นฟูด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electrokinetic remediation) คือการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถใช้บำบัดโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) ปรอท (Hg) นิเกิล (Ni) เป็นต้น

2.3 Permeable Reactive Barrier (PRB)

2.3.1 ความเป็นมา

เทคโนโลยีที่ใช้ฟื้นฟูการปนเปื้อนมลพิษในน้ำใต้ดิน ที่นิยมใช้กันมาก คือ การสูบน้ำขึ้นมาบำบัด (Pump and Treat) แต่เป็นวิธีที่มีการดำเนินการที่ยุ่งยากและค่าใช้จ่ายสูง (Cantrell, Kaplan, and Wietsma, 1995; Gusmão, De Campos, De Melo Maia Nobre, and Do Amaral Vargas, 2004; Phillips, 2009; Jun, Yongsheng, Weihong, and Mei, 2009) ดังนั้น U.S. EPA. จึงมีความสนใจที่จะนำ Permeable Reactive Barrier มาใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดิน

Permeable Reactive Barrier หรือ PRB ตามความหมายของ U.S.EPA. (1998) คือ การใช้วัสดุตัวกลางที่มีความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนหรือสารมลพิษ ที่ยอมให้น้ำผ่านและเกิดปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารที่ปลอดภัยกว่าและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในการสร้างกำแพงใต้ดินขวางการไหลของน้ำใต้ดิน เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านกำแพงนี้ จะเกิดปฏิกิริยากับมลสาร ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งประกอบไปด้วย พื้นที่ที่ปนเปื้อนด้วยสารที่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำใต้ดิน ในการบำบัดฟื้นฟูน้ำใต้ดิน ติดตั้งระบบบำบัดบริเวณท้ายน้ำของแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Plume) และอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อจับ (Immobilize) หรือทำลาย (Degrade) สารปนเปื้อนที่ละลาย ด้วยวัสดุพรุนเป็นตัวกลาง ที่นิยมใช้คือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (ศิริลักษณ์ สุคะตะ และคณะ, 2556)



รูปที่ 2.4 การบำบัดน้ำใต้ดินโดยใช้ Permeable Reactive Barrier (U.S. EPA., 1998)

แนวคิดของ PRB คือการดำเนินการที่ค่อนข้างง่าย ใช้วัสดุตัวกลางที่สามารถวางกั้นเส้นทางการไหลของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ โดยการไหลของน้ำใต้ดินจะไหลตามธรรมชาติ ดังนั้นระบบนี้จะเป็นการบำบัดแบบเกิดขึ้นได้เอง (Passive treatment system)

PRB จะไม่ขวางกั้นการไหลของน้ำ แต่จะขวางกั้นสารปนเปื้อน เมื่อออกแบบและดำเนินการติดตั้งอย่างถูกต้อง PRB จะสามารถลดการปนเปื้อนได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเชื่อได้ว่าเป็นระบบที่ติดตั้งเพียงครั้งเดียว โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Maintenance) สำหรับอย่างน้อย 5 ถึง 10 ปี ต่ำมากและจะไม่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operational) นอกเหนือจากการตรวจสภาพและการตรวจสอบประสิทธิภาพ ทั้งนี้ PRB มีข้อดีและข้อเสีย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ (U.S.EPA., 1998; Gavaskar, Gopta, Sass, Janosy, and Hicks, 2000)

ข้อดี

- สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิด
- มีค่าใช้จ่ายถูกกว่าการบำบัดในบางวิธี เช่น การบำบัดแบบ Pump and Treat
- ป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนได้ดี
- ไม่มีการสูญเสียน้ำใต้ดิน
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดและการซ่อมบำรุงต่ำ
- มีอายุการใช้งานนาน
- สามารถใช้ประโยชน์ของที่ดินได้ในขณะที่มีการบำบัด
- ลักษณะของตัวกลางที่มีความพรุน ช่วยให้อากาศผ่านได้ดี ทำให้เกิดสภาพกึ่งมีอากาศ (Semi-aerobic condition) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

ข้อเสีย

- เมื่อใช้เป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดการอุดตันและอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงเนื่องจากการใช้ตัวกลางที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- เวลาที่มีการอุดตันของ PRB หรือฝนตก น้ำเสียจะล้นระบบได้
- ระยะเวลาของการบำบัดและติดตามตรวจสอบค่อนข้างนาน

2.3.2 การใช้ประโยชน์

จากการศึกษาของ U.S. EPA. พบว่า PRB สามารถใช้บำบัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งแบ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ Trap and Absorption เป็นกระบวนการจับและดูดซับสารที่ปนเปื้อนไว้ที่ผิวของตัวกลาง Precipitation เป็นการตกตะกอนสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำให้ตกตะกอนเป็นของแข็งและถูกจับไว้ที่ตัวกลาง Chemical transformation เป็นการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนที่มีความเป็นพิษให้อยู่ในรูปที่ไม่เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และ Biological enhancement เป็นการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปสารที่ปนเปื้อนให้อยู่ในรูปที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Blowes et al., 2000)

การทำงานของ PRB จะอาศัยกลไกการกำจัดสารปนเปื้อนของวัสดุตัวกลาง เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งวัสดุตัวกลางที่มีประสิทธิภาพต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (Gavaskar et al., 2000) Reactivity คือสามารถเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสารปนเปื้อนได้อย่างดี Stability คือจะต้องมีประสิทธิภาพคงที่และคงทนในการลดสารปนเปื้อนได้เป็นระยะเวลานาน Availability and cost คือสามารถหาง่ายและมีราคาถูก Hydraulic performance คือมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสม Environmental compatibility คือสามารถเข้ากันได้และเหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น

จากการศึกษารวมรวบข้อมูลของ Thiruvenkatachari et al. (2008) ซึ่งสอดคล้องกับของ Jun et al. (2009) พบว่า วัสดุตัวกลางที่มีการนำมาใช้ใน PRB ได้แก่

1. Zero valent iron

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นวัสดุตัวกลางที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ใน PRB โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรงและมีศักย์รีดักชัน (Reduction potential) สูง รวมทั้งไม่เป็นพิษและมีราคาถูก ซึ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิด ทั้งสารประกอบอินทรีย์ เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) จำพวกสารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ด (Halogenated organic compounds) สารประกอบสีย้อม (Dye compounds) สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) และสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ไนเตรท (Nitrate) และโลหะหนัก (Heavy metals) เป็นต้น ซึ่งกลไกของการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำโดยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation and Reduction reaction) และการดูดซับ (Adsorption)

ตารางที่ 2.2 สารปนเปื้อนที่บำบัดโดยใช้วัสดุตัวกลางใน PRB (U.S. EPA., 1998)

สารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds)		สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic compounds)	
Methanes	tetrachloromethane trichloromethane dichloromethane	Trace metals	chromium nickel lead uranium technetium iron manganese selenium copper cobalt cadmium zinc
Ethanes	hexachloroethane 1,1,1-trichloroethane 1,1,2-trichloroethane 1,1-dichloroethane		
Ethenes	tetrachloroethene trichloroethene cis-1,2-dichloroethene trans-1,2-dichloroethene 1,1-dichloroethene vinyl chloride		
Propanes	1,2,3-trichloropropane 1,2-dichloropropane	Anion contaminants	sulphate nitrate phosphate arsenic
Aromatics	benzene toluene ethylbenzene		
Other	hexachlorobutadiene 1,2-dibromoethane freon 113 N-nitrosodimethylamine		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. Activated carbon

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีความเสถียร ซึ่งมีการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับบำบัดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน มีความสามารถในการดูดซับสูงทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก (ประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม) และมีหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ที่ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้ดี เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอนิล (Carbonyl) เป็นต้น ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular activated carbon: GAC) มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ใน PRB โดยมีงานวิจัยในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ได้มีการใช้ GAC ใน PRB ร่วมกับจุลินทรีย์ สำหรับกำจัดโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polyaromatic hydrocarbon) อีกด้วย

3. Zeolites

ซีโอไลต์ คือแร่เทคโตซิลิเกต (Tectosilicate) มีโครงสร้างเป็นสามมิติของอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ประกอบไปด้วย โมเลกุลของน้ำ อะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียม และออกซิเจน (SiO_4 หรือ AlO_4) นอกจากนี้ยังมีประจุบวกของโลหะเกาะอยู่ด้วย เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เป็นต้น ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพสูงและถูกนำมาใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การดูดซับ (Adsorption) หรือใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic) ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำ ซีโอไลต์มาใช้ใน PRB ได้แก่ Clinoptilolite คือซีโอไลต์ตามธรรมชาติ เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสำหรับฟื้นฟูการปนเปื้อน โลหะหนักที่เป็นพิษหลายชนิด และสามารถดูดซับสารกัมมันตรังสี (Radionuclide) ได้บางชนิด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงซีโอไลต์ให้มีความสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์

4. Alkaline materials-complexing agents

ปูนขาว (Lime) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารเคมีราคาถูกที่สามารถนำมาใช้ใน PRB สำหรับฟื้นฟูการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ ก่อนหน้านี้มีการนำมาใช้ฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ โดยการเพิ่มค่า pH ประมาณ 12-12.5 เพื่อทำให้เกิดการก่อตัวของไฮดรอกไซด์ของโลหะ ทำให้ลดการละลายของโลหะบางชนิดได้ ซึ่งสามารถฟื้นฟูการปนเปื้อนของมลพิษได้ทั้งที่เป็นประจุลบและประจุบวก แต่การเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้า

5. Biomaterials

การฟื้นฟูสารปนเปื้อนโดยใช้จุลินทรีย์ (Microorganisms) มีชื่อเรียกว่า Bioremediation คือเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากธรรมชาติ โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กับกระบวนการทางชีวภาพในการลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งส่วนใหญ่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ และสารอนินทรีย์บางชนิด กลไกที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวภาพ ตัวอย่างการบำบัดสารมลพิษ เช่น ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Petroleum hydrocarbons) โดยเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งผลสุดท้ายของปฏิกิริยาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) นอกจากนี้ยังมีสารมลพิษประเภทสารละลายคลอริเนตด์ (Chlorinated solvents) และไนเตรท (Nitrates) ซึ่งจะเกิดการรีดักชัน (Reduction) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจุลินทรีย์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ได้ แต่ถึงอย่างไรงานวิจัยที่สามารถจะอธิบายถึงกลไกที่เกิดขึ้นจริงของกระบวนการทั้งหมดนี้ ยังมีความไม่แน่นอน

6. Hydroxyapatites

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ซึ่งเป็นตัวดูดซับ (Sorbent) ที่ดี นอกจากนี้ยังมีความเสถียรและไม่เกิดกระบวนการทางชีวภาพ ถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่ โดยเป็นวัสดุตัวกลางใน PRB เช่น Apatite II^{TM} ที่ผลิตมาจากสิ่งมีชีวิต (Biogenic origin) สามารถบำบัดโลหะประจุบวกสองได้ดี (Oliva, 2010)

ในประเทศไทยมีการศึกษาของ สุทธิสา ยาอีด และคณะ (2551) ได้นำผงตะไบเหล็กหรือที่เรียกว่าเหล็กกาวเลนซ์ศูนย์ และดินลูกรัง มาใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนของสังกะสีและตะกั่วจากสารละลายน้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเลือกวัสดุสำหรับสร้าง Permeable Reactive Barrier สำหรับติดตั้งในแหล่งที่ปนเปื้อนของน้ำใต้ดินต่อไป

การติดตั้ง PRB ที่นิยมใช้กันบ่อยมีด้วยกัน 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous) และแบบ Funnel-and-Gate โดยที่การติดตั้งแบบไหลต่อเนื่อง ประกอบไปด้วย PRB หนึ่งแผ่นวางขวางการไหลของน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน ส่วนการติดตั้งแบบ Funnel-and-Gate ประกอบไปด้วย PRB ที่วางอยู่ระหว่างกำแพงกั้นทางไหล เพื่อให้น้ำใต้ดินสามารถไหลเข้าสู่ PRB ปัญหาของ PRB แบบไหลต่อเนื่อง เมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยลง เกิดการอุดตันของวัสดุตัวกลางซึ่งมีสาเหตุมาจากการสะสมของตะกอน สามารถแก้ปัญหาโดยการเพิ่มการไหลเข้า PRB ให้มากขึ้น คือใช้การติดตั้งแบบ Funnel-and-Gate (Moraci and Calabrò, 2010) อย่างไรก็ตามการติดตั้งแบบไหลต่อเนื่องมีราคาค่าติดตั้งถูกกว่าการติดตั้งแบบ Funnel-and-Gate ดังนั้น ในการเลือกวิธีการติดตั้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยา ราคาวัสดุตัวกลาง ความลึกของ PRB และการขุดดิน (Thiruvenkatachari et al., 2008)

2.3.3 การออกแบบ

จากความสามารถของ PRB ในการกำจัดสารปนเปื้อนหรือสารมลพิษได้หลากหลายชนิด ทำให้เริ่มเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งาน เพื่อบำบัดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ดังนั้น จึงมีงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางการดำเนินการของเทคโนโลยี PRB (U.S. EPA., 1998; Gavaskar et al., 2000; Carey, Fretwell, Mosley, and Smith, 2001) ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการดำเนินการโดยรวมได้ดังรูปที่ 2.5 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. การคัดกรอง (Screening) เป็นการประเมินเบื้องต้น (Preliminary assessment) ว่า PRB สามารถดำเนินการในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้

2. การศึกษาลักษณะเฉพาะของพื้นที่ (Site characterization) เพื่อศึกษาข้อมูลสถานที่ที่จะใช้ในการติดตั้ง PRB ถึงความพร้อมและความเหมาะสม โดยการตรวจสอบและประเมินผลของพื้นที่ (Site investigation and evaluation) โดยละเอียด

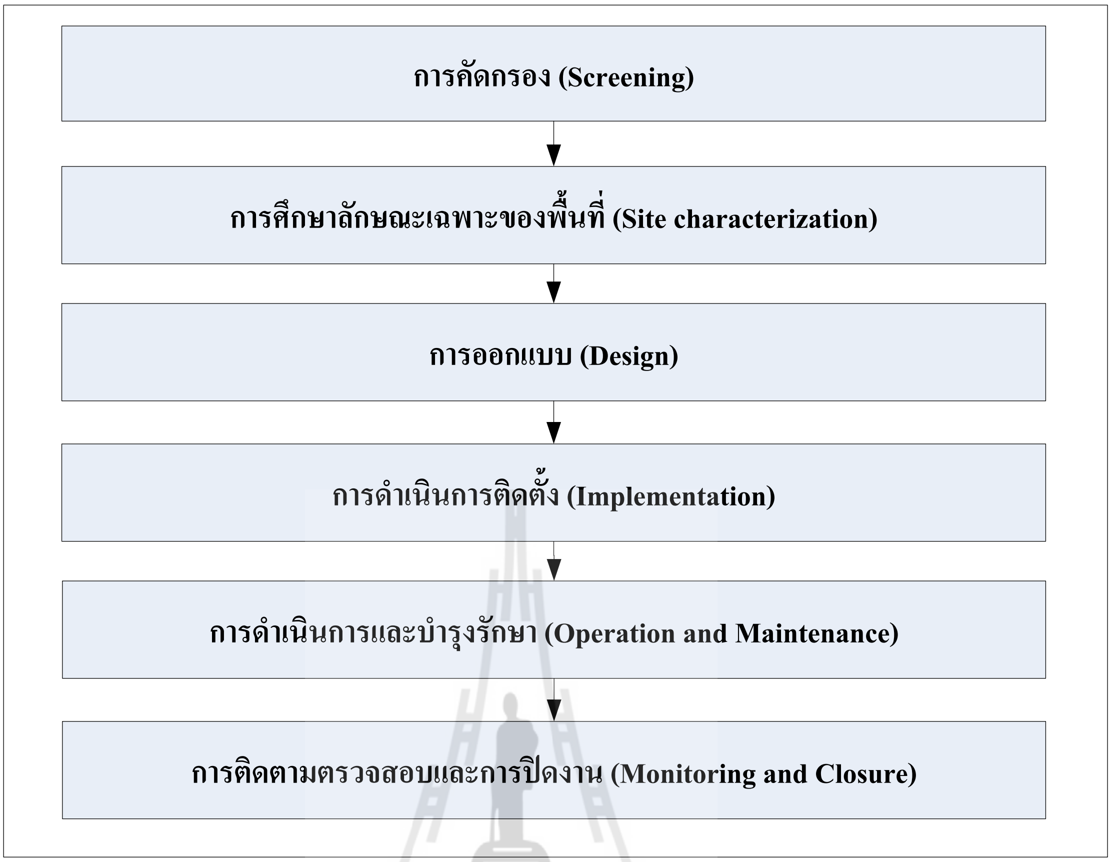
3. การออกแบบ (Design) ประกอบไปด้วย 1) การเลือกและทดสอบวัสดุตัวกลาง (Reactive medium) 2) การศึกษาด้านชลศาสตร์ (Hydraulic) และด้านเคมีธรณี (Geochemical) โดยใช้แบบจำลอง (Modelling) 3) การออกแบบเบื้องต้น (Outline design) 4) การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic assessment) และ 5) การออกแบบรายละเอียด (Detail design)

4. การดำเนินการติดตั้ง (Implementation) เป็นการนำข้อมูลจากการออกแบบรายละเอียด มาดำเนินการต่อ โดยเริ่มจากการวางแผนงาน การจัดทำขั้นตอนการดำเนินงาน (Working plan) และการก่อสร้างหรือติดตั้ง PRB ตามที่ได้ออกแบบไว้

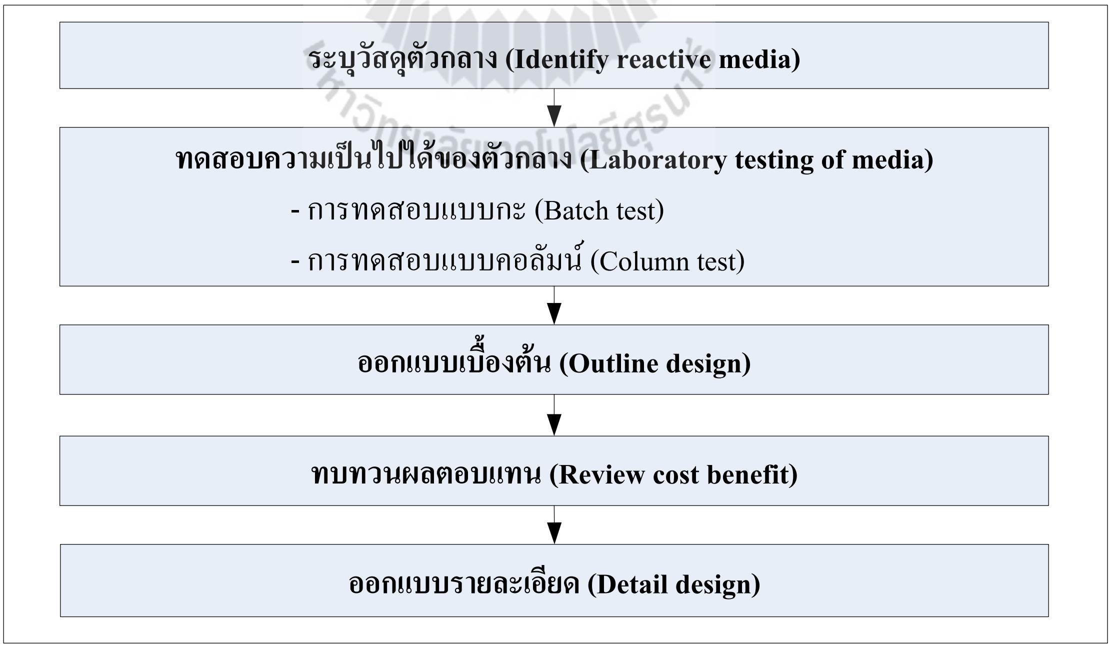
5. การดำเนินการและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance) โดยการดำเนินงานตามขั้นตอนที่วางแผนไว้รวมถึงการซ่อมบำรุง PRB ให้สามารถดำเนินการได้ นอกจากนี้อาจจะมีการประเมินความเสี่ยง (Risk management) จากเทคโนโลยี PRB เพิ่มเติม

6. การติดตามตรวจสอบและการปิดงาน (Monitoring and Closure) ดำเนินการติดตามตรวจสอบสมรรถนะ (Performance) การทำงานของ PRB และการดำเนินงานท้ายที่สุดคือ การนำชั้นวัสดุตัวกลางออกจากพื้นที่เพื่อกำจัดอย่างถูกวิธีต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบเทคโนโลยี PRB ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 โดย 2 ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุตัวกลาง ที่เป็นส่วนในการแสดงถึงความสามารถของ PRB ซึ่งเป็นหัวใจหลักและมีความสำคัญ ทั้งการระบุวัสดุตัวกลาง (Identify reactive media) และการทดสอบความเป็นไปได้ของตัวกลาง (Laboratory testing of media) ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบแบบกะ (Batch test) และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column test)



รูปที่ 2.5 สรุปขั้นตอนการดำเนินการโดยรวมของเทคโนโลยี PRB



รูปที่ 2.6 รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบเทคโนโลยี PRB

การทดสอบความเป็นไปได้ของวัสดุตัวกลาง (Carey et al., 2001) มีวัตถุประสงค์ดังนี้

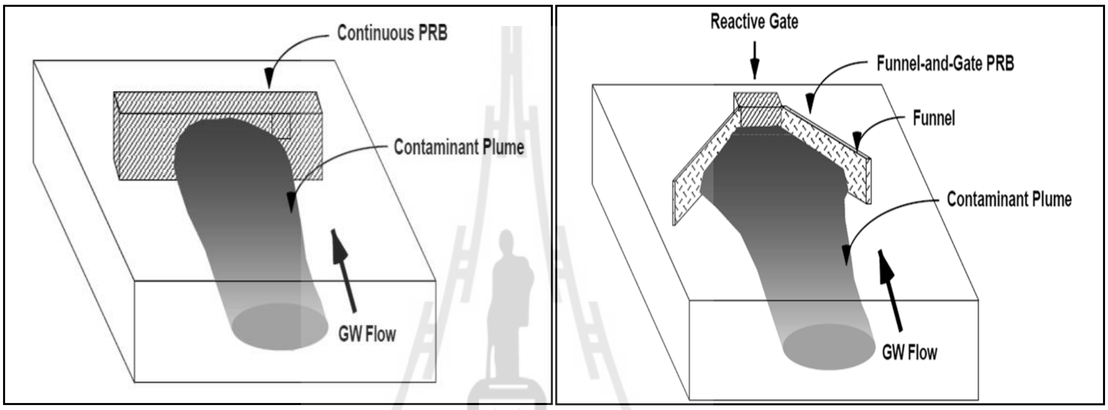
- คัดกรองและเลือกวัสดุตัวกลางที่มีประสิทธิภาพ (Reactive media)
- ทดสอบสารมลทินว่าจะสามารถบำบัดได้
- ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ (Physical property) ของวัสดุตัวกลาง
- เข้าใจถึงกระบวนการบำบัดและการควบคุม (Treatment process and control)
- หาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction)
- ระบุถึงผลิตภัณฑ์ตัวอื่น (By-product) ที่เกิดจากกระบวนการบำบัด
- ตรวจสอบสารมลทินอื่นที่มีผลในกระบวนการบำบัด
- หาค่าอายุการใช้งานของวัสดุตัวกลาง
- ตรวจสอบนัยสำคัญของผลจากการตกตะกอน (Precipitation) และการซึมผ่าน (Permeability) ของวัสดุตัวกลาง
- ระบุแนวโน้มของปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reverse reaction) ที่จะเกิดขึ้น

ในส่วนรายละเอียดของการทดสอบความเป็นไปได้ของวัสดุตัวกลาง จะดำเนินการทดลอง 2 ชนิด คือ การทดลองแบบกะและการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลในการออกแบบเทคโนโลยี PRB อันได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic residence time) ขนาด (Volume) และลักษณะทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical property) ของวัสดุตัวกลาง

การทดลองแบบกะ มักจะใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจคัดกรองเบื้องต้นเพื่อเป็นการยืนยันความเหมาะสมในการบำบัดสารมลทินของวัสดุตัวกลางว่ามีความสามารถในการบำบัดสารมลทินได้ แต่ไม่สามารถให้ผลการทดลองในส่วนของการเคลื่อนย้ายสารมลทินที่จะเกิดขึ้นในเทคโนโลยีได้ (Carey et al., 2001) นอกจากนี้ยังดำเนินการเพื่อ คัดกรองหาศักยภาพในการบำบัดของวัสดุตัวกลาง ตรวจสอบกลไกการบำบัดสารมลทินที่เกิดขึ้นจากตัวกลาง ได้แก่ การดูดซับ (Sorption) การสลายตัว (Degradation) หรือการตกตะกอน (Precipitation) รวมไปถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุตัวกลางที่ต่างชนิดกัน (Gusmão et al., 2004; Phillips, 2009)

การทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อให้ได้ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของวัสดุตัวกลางกับสารปนเปื้อนซึ่งสามารถนำมาใช้ในการออกแบบเทคโนโลยี PRB ต่อไป (Carey et al., 2001) การดำเนินการทดลองจะอาศัยชุดการทดลองที่จำลองการไหลผ่านชั้นวัสดุตัวกลางโดยใช้คอลัมน์ ซึ่งขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ตามค่าของ U.S. EPA. (1998) คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ในช่วง 2.5 – 3.8 เซนติเมตร และมีความสูงตั้งแต่ 10 – 100 เซนติเมตร ทั้งนี้ลักษณะการวางคอลัมน์และทิศทางการไหลขึ้นกับอยู่ความเหมาะสมและวัตถุประสงค์ของการทดลอง

การติดตั้ง PRB ได้แก่ แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous) และแบบ Funnel-and-Gate ดังแสดงในรูปที่ 2.7 PRB แบบไหลต่อเนื่อง เมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยลง ที่เกิดการอุดตันของวัสดุตัวกลางโดยมีสาเหตุมาจากการสะสมของตะกอน ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มการไหลเข้า PRB ให้มากขึ้น คือใช้การติดตั้งแบบ Funnel-and-Gate (Moraci and Calabrò, 2010) อย่างไรก็ตามการติดตั้งแบบไหลต่อเนื่องมีราคาค่าติดตั้งถูกกว่าการติดตั้งแบบ Funnel-and-Gate ดังนั้น ในการเลือกวิธีการติดตั้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยา ราคาวัสดุตัวกลาง ความลึกของ PRB และการขุดดิน (Thiruvenkatachari et al., 2008)



รูปที่ 2.7 การติดตั้ง PRB แบบ Continuous และแบบ Funnel-and-Gate (U.S. EPA., 1998)

การคำนวณหาปริมาณตัวกลางใน PRB จากรายงานของ U.S. EPA. (1998) ดังสมการที่ 2.3 คือ

$$W/A = (un/k_i) \ln (C_0/C) \tag{2.3}$$

โดย W คือ ปริมาณตัวกลาง (g)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (Cross – section area) ของ PRB (m^2)

u คือ ความเร็วการไหล (Flow velocity) ของน้ำใต้ดิน (cm/d)

n คือ ความพรุนของตัวกลาง

k_i คือ ค่าคงตัวของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant)

C_0, C คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ก่อนและหลังการบำบัด (mg/L)

2.4 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron)

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

เหล็ก (Iron) โดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0 +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์หรือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้น ได้แก่

- เหล็กอ่อน (Wrought iron) คือเหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddel furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่มีเนื้อเหล็กถึง 99.99% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กจะตีขึ้นรูปได้ง่ายมากจึงเป็นที่นิยมของช่างตีเหล็ก
- เหล็กกล้า (Steel) คือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2% นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส
- เหล็กหล่อ (Cast iron) คือเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2% ขึ้นไป ใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบชิ้นส่วน
- เหล็กดิบ (Pig iron) คือเหล็กที่นำมาจากการขุดสินแร่ดิบโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งอื่นเจือปนอยู่โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^{0}) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

เฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility constant) ตามสมการที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้

$$Fe(OH)_2(S) \longleftrightarrow Fe^{2+} + 2OH^- \qquad \log K_{SO} = -14.5 \qquad (2.4)$$

$$Fe(OH)_3(S) \longleftrightarrow Fe^{3+} + 3OH^- \qquad \log K_{SO} = -38.0 \qquad (2.5)$$

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว ตามสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + H_2O \longleftrightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (2.6)$$

เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ต่อไปนี้

$$2Fe(OH)_3 \longleftrightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O \quad (2.7)$$

$$Fe(OH)_3 \longleftrightarrow FeOOH + H_2O \quad (2.8)$$

สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษหิน ดิน ทรายปะปนอยู่ด้วยเสมอ (วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545; วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547; ศุทธวดี วีระพงษ์, 2548; อุทัย สอนเทศ, 2548) ส่วน FeOOH จะมีลักษณะเป็นตะกอนผลึก สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางผลึก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.2 การกัดกร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

โลหะสถานะออกซิเดชันศูนย์ มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically stable form) เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมาก เมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือ จะสามารถเกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอน (Electron: e^-) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (Metal cation) และอิเล็กตรอนจะถูกรับไป อีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า

เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมของมัน เช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของแร่เหล็ก เป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่มีสภาวะที่เหมาะสม สาเหตุ

การกัดกร่อนโลหะ ได้แก่ น้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด ไม่ว่าจะมีออกซิเจนละลายหรือไม่ก็ตาม น้ำมีออกซิเจนละลายและค่าพีเอชสูงกว่า 7 โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า โลหะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือเนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอกัน ผิวโลหะมีรอยร้าวหรือชำรุดเฉพาะแห่ง และโลหะที่ได้รับความกดดัน เช่น โลหะที่ถูกทำให้ยืด เป็นต้น (วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545)

การกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เป็นการผุกร่อนหรือการสลายตัวตามกลไกของธรรมชาติ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation – Reduction reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันลดลงจะเรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์(Oxidizing agent) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และปริมาณอิเล็กตรอนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์จะมีจำนวนเท่ากัน ในสมการที่ดุลแล้ว เลขออกซิเดชันที่เพิ่มจะเท่ากับเลขออกซิเดชันที่ลด สารตัวใดจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential) ใช้สัญลักษณ์ E^0_{red} หรือ E^0 ซึ่งคือความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาในแต่ละครึ่งเซลล์ โดยครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายบวก และครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายลบ (ศุทธวดี วีระพงษ์, 2548) ดังนั้น ปฏิกิริยารีดอกซ์ ต้องประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน คือมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron transfer) ระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และมีสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor)

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนประกอบด้วยครึ่งปฏิกิริยา (Haft reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชัน โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของเหล็ก จะเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วบวก (Anode) โลหะเหล็กจะสลายตัวกลายเป็นเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) และให้อิเล็กตรอน ส่วนปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) คือกลไกของการรับอิเล็กตรอน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) และสามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นกับตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้การกัดกร่อนของเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.9 (Zhang, Liu et al., 2010; Xi et al., 2011)

$$Fe^{2+} + 2e^- \longrightarrow Fe^0 \qquad E^0 = -0.44 \text{ โวลต์ (V)} \qquad (2.9)$$

จากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของเหล็ก เท่ากับ -0.44 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันนั้น Fe^{0} จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และ Fe^{2+} จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะมีสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) และตัวถูกรีดิวซ์ (Reduced) ตามลำดับ เนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ของโลหะ ทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้ โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอก หากมีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดสารปนเปื้อนสามารถเกิดได้ 3 รูปแบบ (ศิริพรรณ วัฒนะรัตน์, 2542; วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545) ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเหล็ก คือเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของเหล็ก

2. การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกลางอื่น ได้แก่ เฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กและจะละลายอยู่ในน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ แต่ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ

3. การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจน (H_2) จากการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาที่จะทำให้ไฮโดรเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้ ต้องอยู่ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นผิวของเหล็กเกิดการผุกร่อนหรือมีโลหะอื่นอยู่ในกระบวนการ ซึ่งจะทำให้ไฮโดรเจนเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^{+})

ตัวอย่างกลไกการเกิดการกัดกร่อน สามารถอธิบายโดยใช้เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion cell) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^{+}) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการที่ 2.10 ถึง 2.12 ตามลำดับ หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน จะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^{-}) ตัวอย่างของเซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วบวก จะเกิดตามสมการที่ 2.13 ถึง 2.15 ดังต่อไปนี้ (วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545)

กรณีที่ไม่มีออกซิเจน

$$Fe^{0} \longleftrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad (2.10)$$

$$2H^{+} + 2e^{-} \longleftrightarrow H_2 \qquad (2.11)$$

$$Fe^{0} + 2H^{+} \longleftrightarrow Fe^{2+} + H_2 \qquad (2.12)$$

กรณีมีออกซิเจน

$$Fe^{0} \longleftrightarrow Fe^{3+} + 3e^{-} \qquad (2.13)$$

$$6H^{+} + 1.5O_2 + 3e^{-} \longleftrightarrow 3OH^{-} + 1.5H_2 \qquad (2.14)$$

$$Fe^{0} + 6H^{+} + 1.5O_2 \longleftrightarrow Fe(OH)_3 + 1.5H_2 \qquad (2.15)$$

ปฏิกิริยากัดกร่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ที่ทำให้ค่าพีเอชของระบบกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (Powell et al., 1995 อ้างอิงในวุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545)

2.4.3 จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับเวลา เรียกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction) และการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ก็คือ จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) เป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารในขณะที่เกิดปฏิกิริยา และผลของการเปลี่ยนแปลงที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้ทราบถึงลำดับขั้นของปฏิกิริยา เรียกว่า กลไกปฏิกิริยา (Reaction mechanism) ในการศึกษาผลจากความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นการศึกษาถึงกฎอัตราและลำดับของปฏิกิริยา (Sawyer et al., 2003)

กฎอัตรา (Rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.16

$$\text{อัตรา } (r) = k[A]^{n}[B]^{m} \qquad (2.16)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ณ อุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้น ค่า k จะเปลี่ยนเมื่อมีการแปลงอุณหภูมิ

[A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (M/L^3) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

n และ m เป็นเลขยกกำลังตามที่สารเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งมีค่า = 0, ½, 1, 2, 3,…

ลำดับของปฏิกิริยา (Order of reaction) คือ ผลรวมของกำลังของสารที่ปรากฏในกฎอัตรา เช่น เมื่อผลรวมของ n และm มีค่าเท่ากับศูนย์ จะเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เท่ากับหนึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และเท่ากับสองเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

การศึกษาถึงจลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เพื่อให้ทราบถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารปนเปื้อน จากงานวิจัยส่วนใหญ่ลำดับปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบเท่า (Pseudo-first-order kinetics) (Helland, Alvarez, Schnoor, 1995; Komnitsas, Bartzas, Fytas, and Paspaliaris, 2007)

2.4.4 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เป็นสารถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate คือสารดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ (Sawyer et al., 2003; วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545) ได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนผิว แต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลาย ๆ ชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพโดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นคือโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ก็รวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า เช่นไอออนที่มีประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดยิ่งเล็ก ก็ยิ่งมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ (Sawyer et al., 2003; อุทัย สอนเทศ, 2548; ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551) ได้แก่ การกวนผสม (Mixing) ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface area of adsorbent) โดยที่ขนาดจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ เป็นผลให้ความจุของการดูดซับต่างกัน หมายความว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ชนิดของสารถูกดูดซับ (Nature of adsorbate) คุณสมบัติของสารแต่ละชนิดที่ต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย โครงสร้างโมเลกุล และขนาดของสารหรือโมเลกุล จะเป็นผลให้สารแต่ละชนิดดูดซับได้ไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวดูดซับเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้ ค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย มีผลต่อการแตกตัวของสาร การแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ โดยมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ดังนั้นพีเอชจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ อุณหภูมิ (Temperature) ของระบบ มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง และสุดท้าย ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ (Contact time) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา คือเมื่อเวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตาม แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งที่ความสามารถในการดูดซับคงที่ คือ ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

ไอโซเทอร์มการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) เป็นจุดสมดุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเป็นลักษณะเฉพาะของระบบซึ่งเกี่ยวกับปัจจัยของการดูดซับไม่ว่าจะเป็น สารดูดซับ สารถูกดูดซับ ตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และการศึกษาดังกล่าวจะใช้เส้นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ เรียกว่า ไอโซเทอร์ม (Isotherm) ซึ่งอาศัยสมการคณิตศาสตร์ในการอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น (Sawyer et al., 2003; อุทัย สอนเทศ, 2548; ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551) ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยอาศัยสมการเพื่อพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม สำหรับปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 (Zhang, Liu et al., 2010)

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \tag{2.17}$$

โดย q คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

C_i, C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและที่สมดุล (mg/L) ตามลำดับ

V คือ ปริมาณของสารละลาย (L)

W คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

กระบวนการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ อาศัยสมการไอโซเทอร์ม คือเมื่อคำนวณปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับได้ จากนั้นนำค่าที่ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยไอโซเทอร์มที่นิยมใช้กันได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) (วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547; สุทธิสา ยาอีด และคณะ, 2551; Arancibia-Miranda et al., 2014) ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) (Liu, Bei, and Zhou, 2009; อุทัย สอนเทศ, 2548) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface)

2.4.5 การใช้ประโยชน์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron: ZVI) เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับบำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อมเพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรงและมีศักย์รีดักชัน (Reduction potential) สูง รวมถึงไม่เป็นพิษและมีราคาถูก (Gillham and O'Hannesin, 1992 อ้างอิงใน Yossapol, 1999) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วย ZVI สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ZVI ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้

งานวิจัยของ Yossapol (1999) ได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของ ZVI ในอดีตว่า ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ ZVI ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบฮาโลจีเนเต็ดอะลิฟาติก (Halogenated aliphatic compounds) เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride: CT) เตตระคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) เป็นต้น สารประกอบฮาโลจีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon compounds) เช่น สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) เป็นต้น ไนเตรท (Nitrate) โลหะ (Metals) เช่น UO_2^{2+} MoO_4^{2-} TcO_4^{-} และ CrO_4^{2-} เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูป (Transformation) คือการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษน้อยลง เช่น เปลี่ยนจากคาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นมีเทน (Methanes) เป็นต้น แต่ถึงอย่างไร กลไกของการเกิดปฏิกิริยาก็ยังคงมีความไม่แน่นอน ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้เสนอเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วย ZVI ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หรือปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous reaction) โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) เข้าทำปฏิกิริยากับ ZVI ที่ผิวหน้าอย่างสมบูรณ์ การอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นการเกิดกลไกทางไฟฟ้าเคมี นั่นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่ ZVI จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยมีสารปนเปื้อนหรือสารตัวอื่น ๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน นอกจากนี้การลดการปนเปื้อนของน้ำยังอาศัยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการแยกสารที่ต้องการกำจัดออกจากสารละลายของเหลว โดยการให้สารละลายผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะเกิดกลไกการทางเคมีขึ้น

การนำ ZVI มาใช้บำบัดสารปนเปื้อน เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดย Reynolds ซึ่งได้ทำวิจัยเพื่อหาวัสดุที่จะนำมาใช้บำบัดสารปนเปื้อน 10 ชนิด โดยมี ZVI เป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ต่อมา ในปี ค.ศ. 1992 Gillham and O'Hannesin ได้ใช้ ZVI ในการบำบัดสารประกอบฮาโลจีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon compounds) และได้มีงานวิจัยออกมาต่อเนื่อง และในปี ค.ศ. 1994 Tratnyek et al. ได้เริ่มงานวิจัยที่ใช้ ZVI มาบำบัดสารปนเปื้อนเช่นกัน ซึ่งนับได้ว่าทั้ง Gillham และ Tratnyek ถือเป็นนักวิจัยที่ศึกษา ZVI มาใช้บำบัดการปนเปื้อนในลำดับต้น ๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 ได้มีงานสัมมนาวิชาการ ที่ได้รวบรวมงานวิจัยที่

เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จาก ZVI ซึ่งทำให้หลังจากนั้นมีงานวิจัยออกมาจากต่อเนื่อง โดยจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า ZVI สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งที่ได้รับความสนใจและมีกระบวนการบำบัดที่ค่อนข้างชัดเจน จะสามารถจำแนกตามชนิดของสารปนเปื้อนได้ดังนี้

1. สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)

1.1 สารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ด (Halogenated organic compounds)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสารพวกฮาโลเจน (Halogens) รวมอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติละลายน้ำได้มากและย่อยสลายได้น้อย แต่สามารถถูกดูดซับด้วยดินและระเหยได้ ทำให้เมื่อสารเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่พื้นดิน จึงเกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ง่าย ชนิดของสารประกอบนี้ ที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ สารพวกอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากสารไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ได้แก่ มีเทน (Methane), อีเทน (Ethane), อีทีน (Ethene), โพรเพน (Propane) เป็นต้น

ZVI ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการแยกสารฮาโลเจน (Dehalogenation) สมมุติฐานของการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ด ด้วย ZVI เป็นที่ยอมรับกันดีว่าปฏิกิริยาการแยกสารฮาโลเจนจะเกิดขึ้นควบคู่กับการกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็ก โดยที่เหล็กมีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential: E^{0}_{red}) จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และสารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ดเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.18 (Helland et al., 1995)

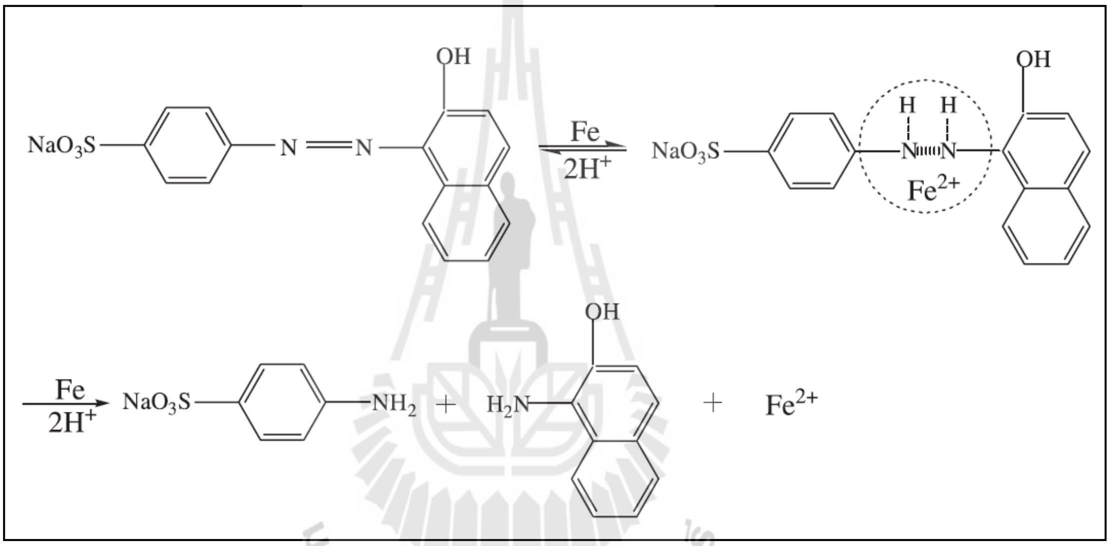
$$Fe^{0} + R\text{-}Cl + H^{+} \longrightarrow Fe^{2+} + R\text{-}H + Cl^{-} \qquad (2.18)$$

โดยอาศัยกลไกการลดจำนวนของไอออนคลอไรด์ (Cl^-) ลง ตัวอย่างเช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride: CCl_4) ถูกลด Cl^- กลายเป็นคลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) CH_2Cl_2 CH_3Cl และมีเทน (CH_4) ในที่สุด (Helland et al., 1995) ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยเหล็กที่เกี่ยวกับตัวทำละลายคลอริเนเต็ดอินทรีย์ (Chlorinated organic solvents) ให้อาศัยความสัมพันธ์ของ Pseudo first-order kinetics ซึ่งการลดลงของเตตระคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) และไตรคลอโรเอทธิลีน (Trichloroethylene: TCE) ด้วย ZVI เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน (Chen, Al-Abed, Ryan, and Li, 2001; Clark, Rao, and Annable, 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการกำจัด 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethane) โดยดูการเปลี่ยนไปเป็น 1,1-Dichloroethane และ Chloroethane ตามลำดับ (Lookman et al .,2004)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 สารประกอบสีย้อม (Dye compounds)

สีย้อมส่วนใหญ่จะปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Textile wastewater) เช่น Orange I Acid orange II Acid blue 113 Allura red เป็นต้น กระบวนการลดสี (Decolorize) ด้วย ZVI ได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกลไกที่เกิดคือการทำลายพันธะการเกิดสี (Azo bond) หรือ พันธะ N=N การทำลายพันธะนี้ถือเป็นการกำจัดสี ดังแสดงในรูป 2.8 อนุภาคของ ZVI จะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) ส่วนโมเลกุลของสีจะถูกรีดิวซ์ (Reduced) (Nam, and Tratnyek, 2000; Wang et al., 2010) แต่มีบางงานวิจัยที่กล่าวว่า การลดลงของสีเกิดจากกระบวนการดูดซับบนพื้นผิวของเหล็ก (Cao, Wei, Huang, Wang, and Han, 1999)



รูปที่ 2.8 กระบวนการลดลงของสี (Decolorize) ด้วย ZVI (Zhang, Duan, Zhang, and Wu, 2005)

1.3 สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) และสารระเบิด (Explosives)

สารจำพวกไนโตรอะโรมาติก (Nitroaromatics) และไนโตรเบนซิน (Nitrobenene) ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารกำจัดศัตรูพืชและกำจัดสัตว์ และสารระเบิด เช่น Benfluralin Nitralin Nitrofen Fenitrothion เป็นต้น (Keum and Li, 2004) การย่อยสลายโดยใช้ ZVI คือการลดรูปให้อยู่ในรูปของอะนิลีน (Aniline) ซึ่งแสดงในสมการ 2.19 (Lavine et al., 2001; Bell, Devlin, Gillham, and Binning, 2003)

$$ArNO_2 + 6H^+ + 3Fe^0 \longrightarrow ArNH_2 + 3Fe^{2+} + 2H_2O \quad (2.19)$$

ZVI สามารถเกิดปฏิกิริยาควบคู่กับการกัดกร่อนของโลหะเหล็ก และ Fe^{0} ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Reductants) ซึ่งอัตราการย่อยสลายสารดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณ ZVI ออกซิเจน และแอนไอออนที่ละลายในน้ำ เช่น คลอไรด์ (Cl^{-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^{-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^{-}) รวมถึงกรดฮิวมิค (Humic acid) ด้วย (Yin et al., 2012)

2. ไนเตรท (Nitrate)

การปนเปื้อนไนเตรทในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากภาคเกษตรกรรม ปัญหาของไนเตรทเมื่อเข้าไปในร่างกายมากเกินไป คือเมื่อกินไนเตรทเข้าไปแบคทีเรียในลำไส้จะเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนไตรท์ (Nitrite) ซึ่งไนไตรท์จะเป็นตัวทำให้เกิดปัญหาสำคัญคือจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของเด็กเนื่องจากไนไตรท์จะขัดขวางการพาออกซิเจนฮีโมโกลบินในเลือด กล่าวคือเมื่อไนไตรท์ถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือดแล้วจะเข้าจับกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจนได้สารประกอบสีน้ำเงินจะทำให้เด็กตัวเขียวคล้ำ ขาดอากาศหายใจและอาจตายในที่สุด อาการเช่นนี้เรียกว่า โรคบลูเบบี้ (Blue baby syndrome) หรือ โรคเมทีโมโกลบิเนเมีย (Methemoglobiemia) (Cheng et al., 1997; Rodríguez-Maroto, García-Herruzo, García-Rubio, Gómez-Lahoz, and Vereda-Alonso, 2009; Zhang, Hao et al., 2010)

การรีดักชัน (Reduction) ไนเตรทด้วย ZVI คือเปลี่ยนจากไนเตรท (NO_3^{-}) ให้เป็นแอมโมเนียไอออน (NH_4^{+}) และเกิดการตกตะกอนผลึกเหล็กเป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (Suzuki, Moribe, Oyama, and Niinae, 2012) แต่การศึกษาในอดีตได้กล่าวถึงแค่การเปลี่ยนจากไนเตรทเป็นแอมโมเนียไอออนและเกิดเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ตามสมการที่ 2.20 (Cheng et al., 1997)

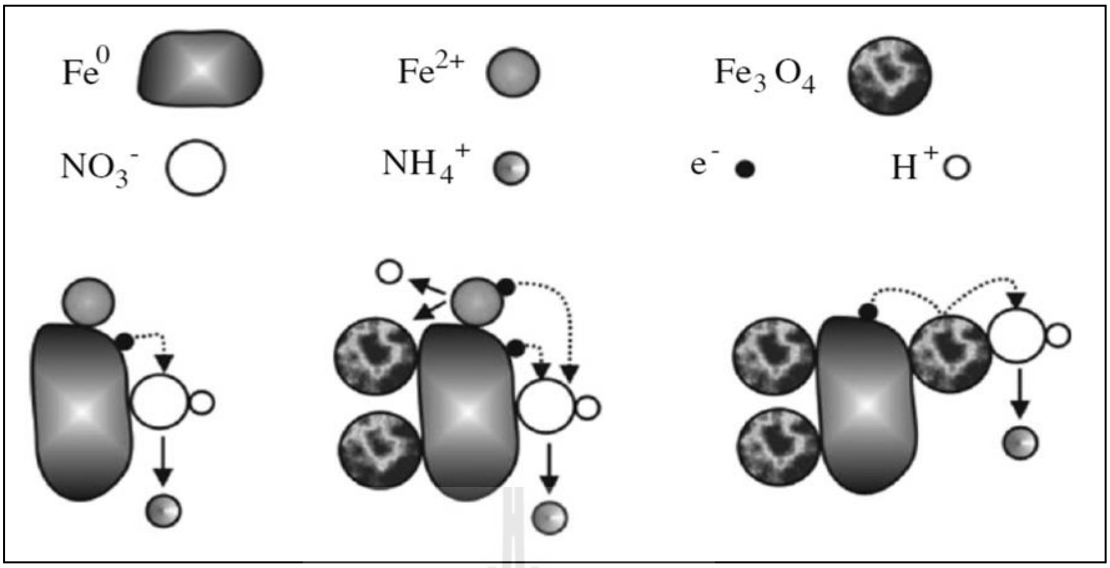
$$NO_3^{-} + 10H^{+} + 4Fe^{0} \longrightarrow NH_4^{+} + 4Fe^{2+} + 3H_2O \qquad (2.20)$$

โดยที่สภาพความเป็นจริง เฟอรัสไอออนสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปจนได้ตะกอนของเหล็กหรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.21

$$NO_3^{-} + 12Fe^{2+} + 13H_2O \longrightarrow NH_4^{+} + 4Fe_3O_4 + 22H^{+} \qquad (2.21)$$

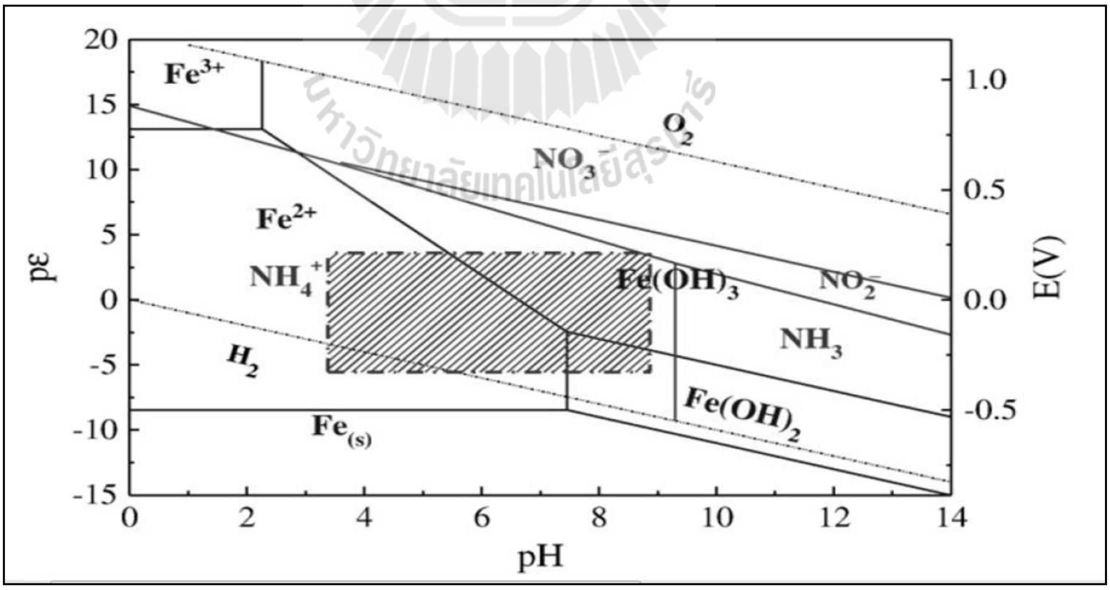
ดังนั้น การรีดักชันไนเตรทด้วย ZVI คือเปลี่ยนจากไนเตรท ให้เป็นเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.22 และปฏิกิริยาการกำจัดไนเตรททั้งหมดสามารถสรุปได้ดังแสดงตามรูปที่ 2.9

$$NO_3^{-} + 3Fe^{0} + H_2O + 2H^{+} \longrightarrow NH_4^{+} + Fe_3O_4 \qquad (2.22)$$



รูปที่ 2.9 การรีดักชัน (Reduction) ไนเตรท ด้วย ZVI (Xu et al., 2012)

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และพีอี (pE) กับสถานะของ Fe-N-H_2O ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่ง NO_3^- จะถูกรีดิวซ์ (Reduced) กลายเป็น NH_4^+ พร้อมกับการถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) ของ Fe^0 เป็น Fe^{2+}



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของ Fe-N-H_2O (Zhang, Hao et al., 2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

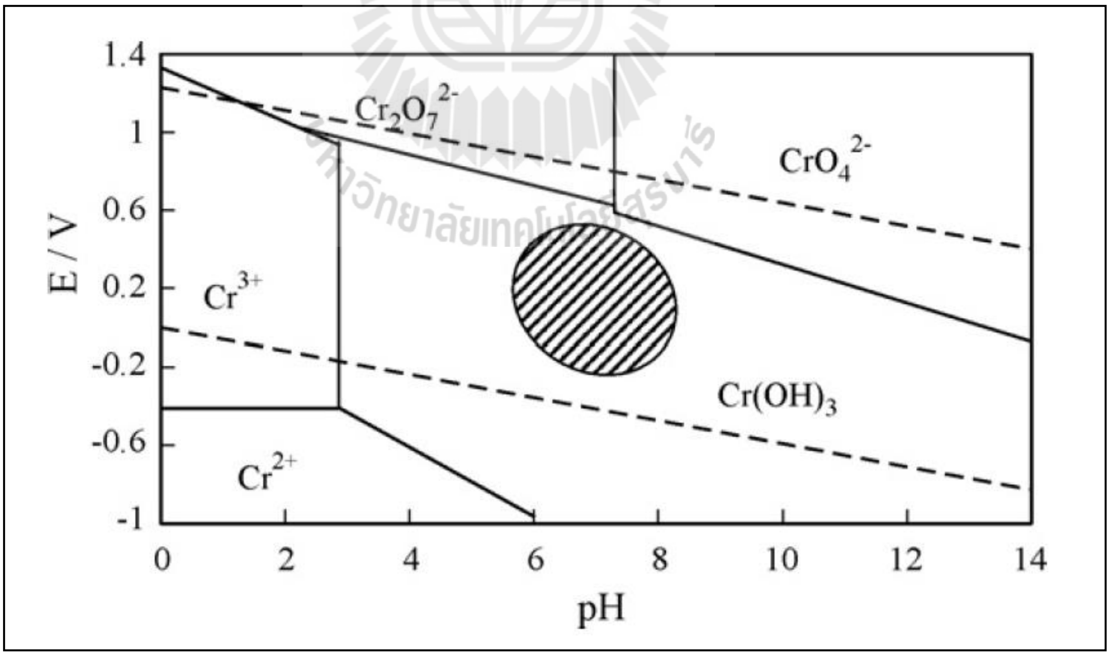
3. โลหะหนัก (Heavy metals)

การบำบัดโลหะหนักด้วย ZVI ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่ส่วนใหญ่จะบำบัด โครเมียมและสารหนู กลไกในการย่อยสลายคือการเปลี่ยนรูป (Transformation) จากสารที่เป็นพิษ (Toxic) ให้เป็นสารที่เป็นพิษน้อยลงหรือไม่เป็นพิษเลย (Non-toxic) หรือกลไกการดูดซับ (Adsorption) บนพื้นที่ผิวของ ZVI ซึ่งก็ขึ้นกับโลหะหนักแต่ละชนิด

การกำจัดโครเมียมด้วย ZVI ส่วนใหญ่ใช้กำจัด Cr(VI) เนื่องจากมีความเป็นพิษ ให้เป็น Cr(III) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) ตามสมการที่ 2.23 (Cissoko, Zhang, Zhang, and Xu, 2009)

$$2CrO_4^- + 3Fe^0 + 10H^+ \longrightarrow 2Cr(OH)_3 + 3Fe^{2+} + 2H_2O \quad (2.23)$$

ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและมาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential: E^0) ดังแสดงในรูป 2.11 เมื่อศักย์ไฟฟ้ารีดักชันลดลง พร้อมกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ของ Cr(VI) และกลายเป็น Cr(III) ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบ $Cr(OH)_3$ ขึ้นในที่สุด



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E) กับสถานะของโครเมียม (Cissoko et al., 2009)

แต่ในความเป็นจริง กลไกในการกำจัด Cr(VI) ด้วย Fe^0 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อเกิดแร่ที่ผิวหน้าของเหล็ก เช่น แร่เกอร์ไทต์ (Goethite: α-FeOOH) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide: γ-Al_2O_3) ซึ่งจะเกิดที่พีเอชของสารละลายที่ต่ำ ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 (Lee, Lim, Lee, and Park, 2003)

$$CrO_4^{2-} + Fe^0 + 3H^+ \longrightarrow Fe^{3+} + Cr^{3+} + 4H_2O \quad (2.24)$$

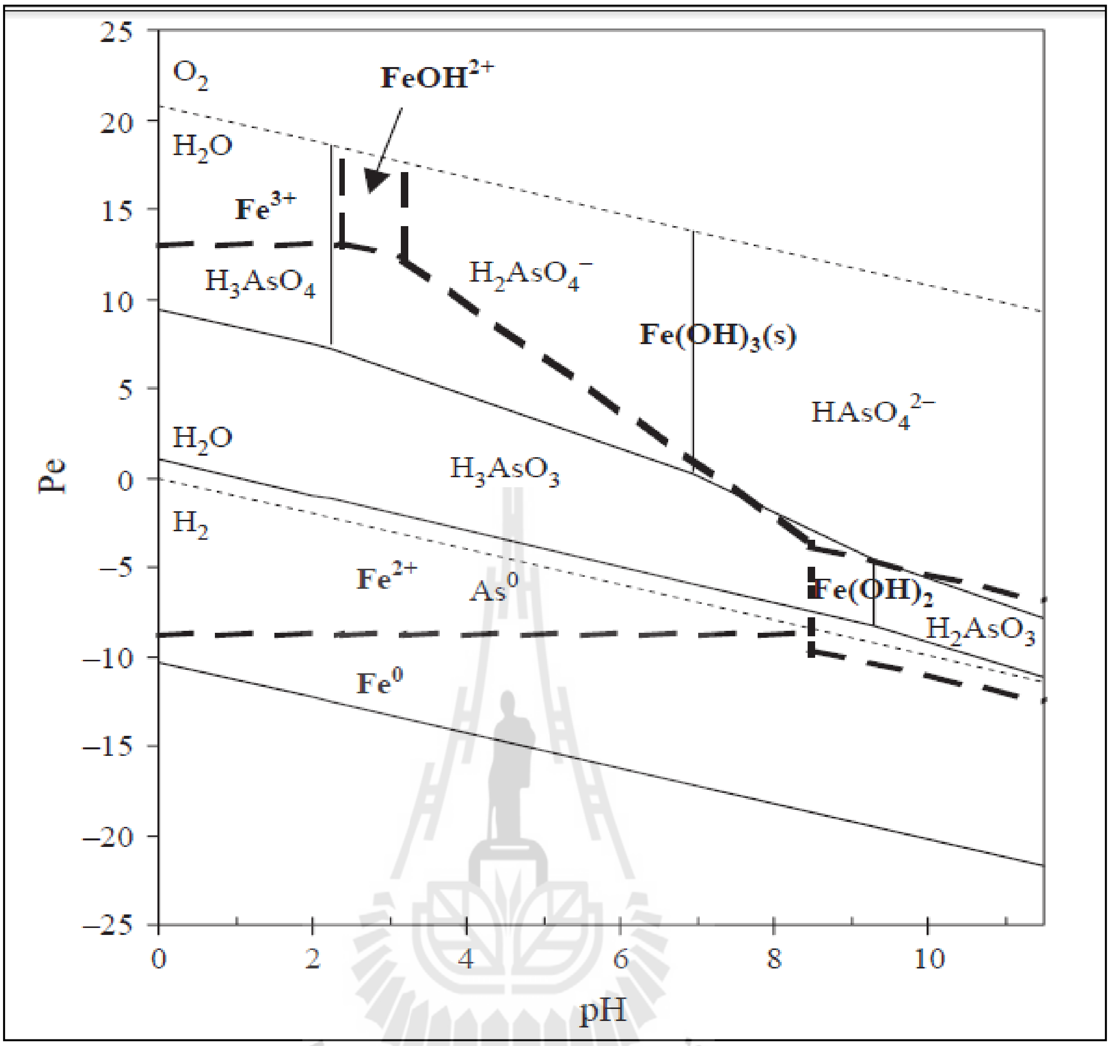
$$(1 - x)Fe^{3+} + (x)Cr^{3+} + 2H_2O \longrightarrow Fe_{(1-x)}Cr_xOOH(s) + 3H^+ \quad (2.25)$$

สารหนู (Arsenic) ที่ปนเปื้อนในน้ำและมีความเป็นพิษ มักพบในรูปอาร์เซไนท์ [As(III)] และอาร์เซเนต [As(V)] ลักษณะการเกิดของสารทั้งสองชนิดสามารถอธิบายได้โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) ดังนี้ As(V) จะมีความเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจนและค่าพีเอชตามธรรมชาติ โดยจะแสดงในรูปที่มีออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย (Oxyanionic forms) ได้แก่ H_3AsO_4 $H_2AsO_4^-$ และ $HAsO_4^{2-}$ ส่วน As(III) จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงและค่าพีเอชน้อยกว่า 9 โดยจะเกิดในรูป H_3AsO_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจาก Fe(0) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) อย่างแรงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่ง Fe(0) จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ได้ Fe(II) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง As(V) - As(III) และ As(III) – As(0) สามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่า H_2O - H_2 แสดงให้เห็นว่า As(V) และ As(III) สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ได้ดีว่าน้ำ ดังนั้น As(V) และ As(III) สามารถถูกรีดิวซ์ (Reduced) ได้ด้วย Fe(0) (Bang, Korfiatis, and Meng, 2005) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กำจัดสารหนูในรูป As(III) โดยใช้การออกซิเดชัน (Oxidation) ด้วย ZVI ร่วมกับการกรองด้วยทราย (Leupin, and Hug, 2005) ดังนี้ เริ่มด้วยการเกิด Fe(II) จากการกัดกร่อนของ Fe(0) ดังสมการที่ 2.26 การออกซิเดชันของ Fe(II) ด้วยออกซิเจน สามารถทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์อินเตอร์มิเดียต (Oxidizing intermediates) ได้แก่ $^{\bullet}O_2^-$ H_2O_2 และ $^{\bullet}OH$ หรือแม้กระทั่ง Fe(IV) ซึ่งสามารถเกิดการออกซิเดชันของ As(III) กลายเป็น As(V) ตามสมการที่ 2.27 และ 2.28 จากทำการกรอง As(V) ด้วยทรายต่อไป

$$2Fe(0) + 2H_2O + O_2 \longrightarrow 2Fe(II) + 4OH^- \quad (2.26)$$

$$As(III) + \text{intermediates}\,(^{\bullet}OH, Fe(IV)) \longrightarrow As(IV) \quad (2.27)$$

$$As(IV) + O_2 \longrightarrow As(V) + {}^{\bullet}O_2^- \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) กับสถานะของ As-Fe-H_2O
(Bang et al., 2005)

การปนเปื้อนของโลหะหนักตัวอื่น ๆ เริ่มมีงานวิจัยออกมา เช่น นิเกิล (Nickel) ทองแดง (Copper) และซีลีเนียม (Selenium) ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดได้ด้วย ZVI (Komnitsas et al., 2007; Yoon, Kim, Bang, and Kim, 2011; Calabrò, Moraci, and Suraci, 2012) นอกจากสารปนเปื้อนที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ยังมีสารปนเปื้อนที่นำเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มาทำการบำบัด ซึ่งเริ่มมีการศึกษาวิจัยมากขึ้น เช่น ฟีนอล (Phenol), เปอร์คลอเรต (Perchlorate) เป็นต้น (Shimizu, Tokumura, Nakajima, and Kawase, 2012) ทั้งนี้ในส่วนของโลหะหนักยังมีการศึกษาวิจัยที่แพร่หลายเพียงไม่กี่ชนิด ได้แก่ โครเมียมและสารหนู แต่ในความเป็นจริงโลหะหนักที่พบว่าเกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินบ่อยครั้งมักมีหลายชนิดมากกว่านั้น อาทิเช่น ฟลูออไรด์ ปรอท แคดเมียม แมงกานีส สังกะสี ดีบุกและตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดค่อนข้างน้อย และกลไกที่เกิดขึ้นยังมีความไม่ชัดเจน

2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี

งานวิจัยที่ใช้ ZVI กำจัดตะกั่ว ได้แก่ งานวิจัยของ Ponder, Darab, and Mallouk (2000) ศึกษาการบำบัดโครเมียม (Cr^{6+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^{0}) สังเคราะห์ขนาดนาโน และผงเหล็ก (Iron powder) โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch) จากการทดลองพบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สังเคราะห์และผงเหล็กสามารถกำจัดทั้งโครเมียมและตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยรีดิวซ์โครเมียม (Cr^{6+}) กลายเป็นโครเมียม (Cr^{3+}) และรีดิวซ์ตะกั่ว (Pb^{2+}) กลายเป็นตะกั่ว (Pb^{0}) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ดังสมการที่ 2.29

$$2Fe^{0}(s) + 3Pb(C_2H_3O_2)_2 + 4H_2O \longrightarrow 3Pb^{0}(s) + 2FeOOH(s) + 4HC_2H_3O_2 + 2H^{+} \quad (2.29)$$

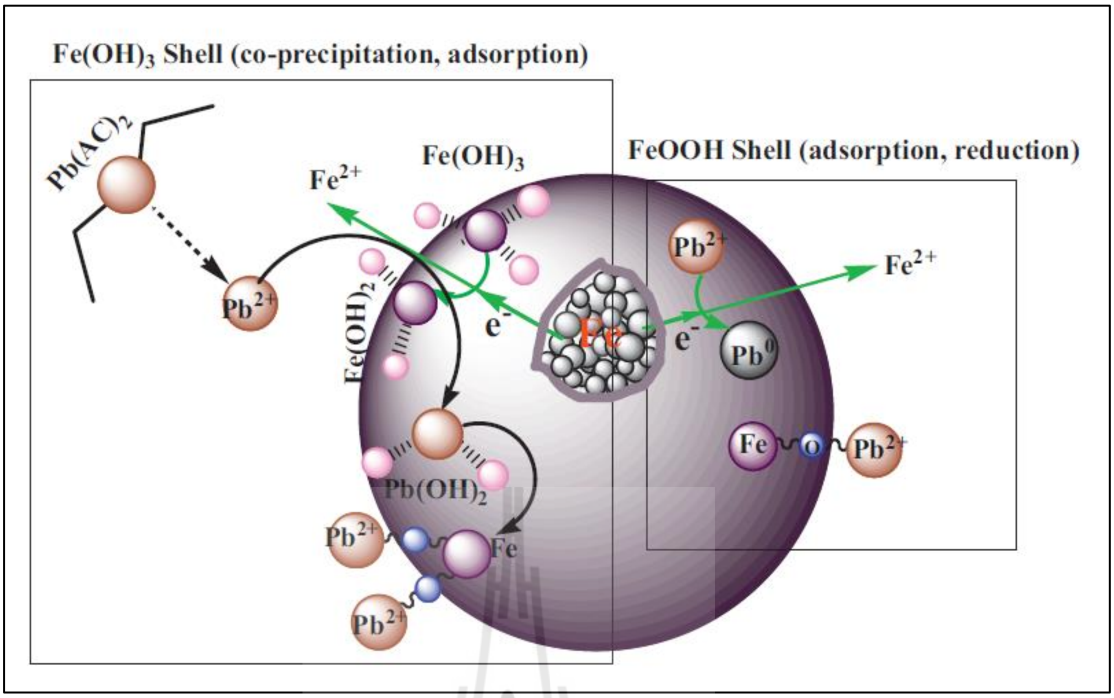
โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สังเคราะห์ มีอัตราการกำจัดโครเมียมและตะกั่วสูงกว่าผงเหล็ก ถึง 30 เท่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า ซึ่งการทดลองทั้งหมดจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xi et al. (2010) ได้ศึกษาการถึงปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) และการดูดซับ (Adsorption) ของตะกั่วในสารละลาย โดยเปรียบเทียบระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สังเคราะห์ขนาดนาโน (Nano-zero valent iron: nZVI) กับผงเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (ZVI powder) จากการทดลองพบว่าการกำจัดตะกั่วสามารถเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) โดยศึกษาจากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential) ของตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่าเท่ากับ -0.13 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าของเหล็ก (Fe^{2+}) ที่มีค่าเท่ากับ -0.44 โวลต์ ทำให้สามารถเกิดตะกอนของตะกั่ว (Pb(0)) ขึ้นที่ผิวหน้าของเหล็กได้ และสามารถใช้เทคนิค XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) ในการศึกษาถึงสิ่งที่เกิดขึ้น การเปรียบเทียบระหว่างผงเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโน (nZVI) พบว่า nZVI มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับตะกั่ว (Pb^{2+}) สูงมาก ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นประมาณ 4 ซึ่งจะยังไม่เกิดการตกตะกอนผลึกของ Pb^{2+} พบว่ามีอัตราการกำจัดที่ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้เวลาเพียง 15 นาทีในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ใช้ nZVI จำนวน 0.05 กรัม สามารถกำจัด Pb^{2+} ได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่ากับ 401.8 มิลลิกรัมต่อกรัม

งานวิจัยที่ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนในการกำจัดตะกั่วยังคงมีเพิ่มขึ้น แต่ความแตกต่างของงานวิจัยจะเป็นในส่วนรายละเอียดในการศึกษา เช่น งานวิจัยของ ศิวัช ภูครองหิน และคณะ (2557) ได้ใช้อนุภาคเหล็กนาโนวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับตะกั่วของอนุภาคเหล็กนาโนวาเลนซ์ศูนย์เท่ากับ 328.22 มิลลิกรัมต่อกรัม และสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงถึงร้อยละ 99 ภายในเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอนุภาคเหล็ก

ขนาดไมโครเมตร พบว่าความสามารถในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียของอนุภาคเหล็กนาโนวาเลนซ์ศูนย์มีมากกว่าอนุภาคเหล็กขนาดไมโครเมตรถึงประมาณ 12 - 20 เท่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลำดับที่สองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการดูดซับอยู่ที่ระหว่าง 0.0023 - 0.0073 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ลักษณะทางกายภาพก่อนทำการบำบัดมีลักษณะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนคล้ายรูปพวกตะกร้อรูปร่างไม่แน่ชัด ภาพหลังจากการบำบัดพบโครงสร้างมีการเพิ่มขึ้นของตะกั่วภายในรูพรุน และจากผลของการวิเคราะห์ธาตุพบพีคของตะกั่วภายหลังการบำบัดขึ้นมาอย่างชัดเจน และการศึกษาของ Zhang et al., (2013) เป็นการนำเสนอความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ที่ได้ผลิตภัณฑ์อื่น (By-product) เกิดขึ้น เช่น Fe_3O_4 และ FeOOH ซึ่งการอธิบายความเข้าใจในเรื่องนี้อาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ ได้แก่ เครื่อง TEM (Transmission electron microscopy) แสดงภาพสัณฐานแบบ 2 มิติ เครื่อง XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) แสดงองค์ประกอบบนพื้นผิว และเครื่อง XRD (X-ray diffraction) แสดงองค์ประกอบทางเคมี ผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.13 นั่นคือแบบจำลองแนวคิด (Conceptual model) ที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยให้มีความง่ายในการทำความเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและตะกั่ว พบว่าสัดส่วนการตกตะกอนของตะกั่วจากสารละลาย มีผลมาจาก $Fe(OH)_3$ ที่ลดลง นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จาก $Fe(OH)_3$ ที่อยู่บนผิวหน้าจำนวนมาก ยังมีผลต่อตำแหน่งการดูดซับของตะกั่ว ดังนั้น ความสามารถในการกำจัด (Removal capacity) ตะกั่วในการศึกษานี้จึงสูงเกิน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ 1,667 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเหล็ก กล่าวโดยสรุปคือ $Fe(OH)_3$ มีผลให้เกิดกลไกการตกตะกอนทางเคมีร่วม (Co-precipitation) และการดูดซับตะกั่ว (Adsorption) ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของ Pb(II) จะลดลง ทั้งนี้ $Fe(OH)_3$ เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.30

$$2Fe^0(s) + Pb^{2+} + 8H_2O \longrightarrow Pb(OH)_2(s) + 2Fe(OH)_3(s) + 8H^+ \quad (2.30)$$

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Arancibia-Miranda et al. (2014) ที่ได้ศึกษาคล้ายกันคือ การใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโน (nZVI) ในการกำจัดของ Pb^{2+} จากสารละลาย มีการศึกษาผลของค่า pH และการประเมินผลทางโครงสร้างและพื้นผิวของ nZVI รวมทั้งคุณสมบัติแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการดูดซับ โดยผลการหาค่าความสามารถในการกำจัด (Removal capacity) จาก Langmuir model เท่ากับ 50.31±2.36 และ 32.85±3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 6 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $Pb(CH_3COO)_2$ กับ nZVI (Zhang et al., 2013)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่นำเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ดัดแปรมาใช้ ได้แก่ งานวิจัยของ Zhang, Lin et al., (2010) และ Zhang, Lin, Chen, Megharaj, and Naidu, (2011) ทำการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในสารละลายน้ำ โดยใช้ดินขาว (Kaolin) ร่วมกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโน (Nanoscale zero valent iron) มีชื่อเรียกว่า K-nZVI โดยกลไกในการกำจัดตะกั่ว มีด้วยกันสองแบบ คือ การดูดซับตะกั่วไว้บนผิวหน้าของ K-nZVI ซึ่งทั้งดินขาวและเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับไอออนของโลหะได้ และการเกิดรีดักชันของ Pb^{2+} โดย K-nZVI ดังสมการที่ 2.31

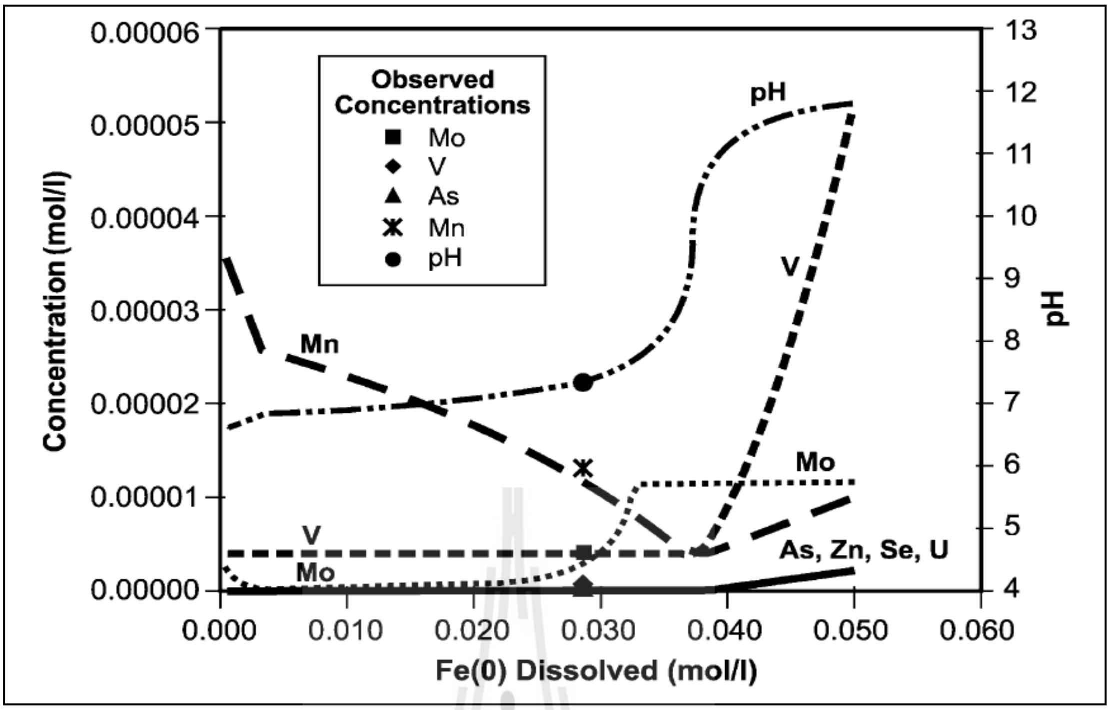
$$2Fe^0(s) + 3Pb^{2+} + 4H_2O \longrightarrow 3Pb^0 + 2FeOOH(s) + 2H^+ \qquad (2.31)$$

โดยที่การศึกษาของ Zhang, Lin et al., (2010) ได้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสังเคราะห์เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (K-nZVI) ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้ 90.1 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 60 นาที โดยใช้ K-nZVI จำนวน 5 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการศึกษาของ Zhang et al., (2011) เป็นงานเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ถึงกลไกการกำจัดที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ได้แก่ เทคนิค BET - N_2 เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ เครื่อง SEM ดูภาพสัณฐาน 3 มิติ เครื่อง XRD ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี เครื่อง XPS ดูธาตุองค์ประกอบที่ผิวหน้าวัสดุ และเครื่อง FTIR ใช้ยืนยันผลร่วมกับเครื่อง XRD และเครื่อง XPS

ทั้งนี้ยังมีการพัฒนาโดยในกระบวนการสังเคราะห์ได้เพิ่มฟังก์ชันขึ้น คือ การปรับสภาพพื้นที่ผิวโดยเพิ่มสารปรับสภาพ เช่น 3-Aminopropyl triethoxysilane ซึ่งเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Amino-functionalized โดยศึกษาถึงสมการการดูดซับ (Adsorption equation) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกในการกำจัดตะกั่วมีกระบวนการดูดซับร่วมอยู่ด้วย (Liu et al., 2009) การพัฒนาเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ยังคงมีงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยการสังเคราะห์เป็นวัสดุโลหะผสม (Bimetallic) ระหว่างเหล็กและนิเกิลเทียบกับเหล็กอย่างเดียว เพื่อใช้กำจัดตะกั่ว โดยการสังเคราะห์ใช้วิธีการรีดิวซ์ด้วยโบโรไฮไดรด์ (Borohydride reduction method) ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอช สัดส่วนระหว่างปริมาตรต่อมวล ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้น ซึ่งผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าไม่ต่างกันระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด (Saberi, 2012) การสังเคราะห์โดยเพิ่มซีโอไลต์ (Zeolite–nanoscale zero-valent iron composite: Z-nZVI) ของ Kim et al. (2013) ได้ผลการทดลอง ดังนี้ ตะกั่วถูกกำจัดมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ จากสารละลายตะกั่ว 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 140 นาที โดยใช้ Z-nZVI 0.1 กรัม และทดลองที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถให้ค่าความสามารถในการกำจัด (Removal capacity) ปริมาณ 806 มิลลิกรัมต่อกรัม

นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์โดยใช้ตัวรองรับ เช่น ใช้ของเสียจากมะกอกแดง (Sineguelas) (Arshadi, Soleymanzadeh, Salvacion, and SalimiVahid, 2014) โดยเปรียบเทียบระหว่าง NZVI กับ S-NaOH-NZVI พบว่า ผลของ XRD แสดงถึงเหล็กและตะกั่วจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และการดูดซับขึ้น การลดลงอย่างรวดเร็วของตะกั่วจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ S-NaOH-NZVI พร้อมกับการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก การดูดซับของตะกั่วอธิบายได้ด้วย Langmuir - Freundlich isotherm ขณะที่จลนศาสตร์สอดคล้องกับสมการ Pseudo-second-order และความสามารถในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยที่ใช้ Chelating resin พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว สูงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ (Shi, Yi, He, Long, and Li, 2013) เป็นต้น

สำหรับการกำจัดแมงกานีสตามการศึกษาของ Morrison et al. (2002) พบว่าแบบจำลองกระบวนการเกิดปฏิกิริยา (Reaction progress) ของโลหะ แสดงถึงความสามารถในการบำบัดแมงกานีสได้ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ตามแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่ค่าพีเอชประมาณ 6 และใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ประมาณ 0.03 โมลต่อลิตร สามารถกำจัดแมงกานีสให้เหลือจำนวนน้อยกว่า 0.02 มิลลิโมลต่อลิตรได้



รูปที่ 2.14 กราฟจำลองการกำจัดโลหะหนักด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Morrison et al., 2002)

ทั้งนี้ยังมีการศึกษาการกำจัดแมงกานีสในพื้นที่ปนเปื้อน โดยใช้ PRB เป็นการศึกษาของ Wilkems, Butler, Kahl, and Scrivner (2001) ซึ่งการศึกษาครั้งนั้นได้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อบำบัดโลหะ 2 ตัวหลัก คือ แบเรียม (Barium) และสังกะสี (Zinc) จากหลุมฝังกลบขยะ แต่ด้วยพื้นที่ดังกล่าวมีสภาพธรณีวิทยาที่มีปริมาณแมงกานีสในน้ำใต้ดินสูง ซึ่งอาจจะเกิดจากโลหะหนักบางชนิดเกิดขึ้นโดยธรรมชาติตามสภาพธรณีวิทยาในพื้นที่ที่เป็นแหล่งแร่ และความไม่เสถียรของสายแร่ทำให้เกิดการผุพัง โลหะหนักจะถูกชะออกมาและถูกดูดซับไว้ในดิน เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านจะชะพาโลหะหนักไปกับน้ำด้วย (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2554) หลังการทดลองการกำจัดแมงกานีสด้วยเหล็ก 4 ชนิด ได้แก่ Zero-valent iron Millscale Steel slag และ Iron sulfide พบว่า ความเข้มข้นแมงกานีสไม่ลดลงและบางครั้งกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวยับยั้ง (Inhibitor) ต่อการกำจัดโลหะหนัก เนื่องจากตัวยับยั้งมีผลต่อการบำบัด โดยที่ตัวหลักของตัวยับยั้งที่มีการศึกษา (Zhang, Amrhein, and Frankenberger Jr, 2005; Sun, Wang, Zhang, Sui, and Xu, 2006; Biterna et al., 2007; Biterna et al., 2010) ได้แก่

- ไอออนลบ (Anion) เช่น คลอไรด์ (Cl^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^-) ฟอสเฟส (PO_4^{3-}) โบเมต (BO_3^{3-}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เป็นต้น
- ไอออนบวก (Cation) เช่น แอมโมเนียมไอออน (NH^+) เป็นต้น
- อินทรียวัตถุ (Organic matter) เช่น กรดฮิวมิก (Humic acid) เป็นต้น
- โลหะตัวอื่น เช่น แมงกานีส (Mn) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) Arsenate [As(V)] Molydate [Mo(VI)] เป็นต้น

งานวิจัยของ Biterna et al. (2007; 2010) ได้ศึกษาการกำจัดสารหนูในรูปของ Arsenite [As(III)] และ Arsenate [As(V)] ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยได้ศึกษาผลของตัวยับยั้งหลายชนิด ซึ่งมีแมงกานีสรวมอยู่ด้วย ผลการทดลองพบว่า แมงกานีสทำให้ความสามารถในการกำจัดสารหนูเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณแมงกานีสจะไม่ลดลง ซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang et al. (2014) ที่ได้ศึกษาผลกระทบจาก Mn^{2+} และ Co^{2+} ต่อการกำจัดเซเลเนต (Selenate) ที่มีประจุ Se(VI) และ Se(IV) โดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ พบว่า ทั้งแมงกานีสและโคบอลต์มีผลทำให้การกำจัดเซเลเนตด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นสำหรับปฏิกิริยารีดักชันเซเลเนต โดยที่ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับไอออนโลหะที่เพิ่มเข้าไป ซึ่ง Se(VI) จะเปลี่ยนเป็น Se(0) ส่วน Se(IV) ก็จะเปลี่ยนเป็น Se(-II) นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาของเซเลเนตกับเหล็ก เมื่อเติมแมงกานีสและโคบอลต์ โดยผลการทดลอง คือ โคบอลต์จะมีค่าลดลง แต่แมงกานีสจะแทบไม่ลดลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Komnitsas, Bazdanis, Bartzas, Zaharaki, and Sahinkaya (2012) ได้ศึกษาการป้องกันการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจากหลุมฝังกลบโดยใช้ Composite Reactive Barriers ซึ่งมีเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ร่วมอยู่ด้วย สารปนเปื้อนประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิดซึ่งมีแมงกานีสเป็นอีกตัวหนึ่ง พบว่าวัสดุตัวกลางผสมด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถกำจัดแมงกานีสได้ในระยะเวลา 10 วัน จากนั้นก็ไม่สามารถกำจัดได้ ซึ่งการบำบัดที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากวัสดุผสมอื่น

จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำไปใช้ประโยชน์ ส่วนแมงกานีสจะมีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนักตัวอื่น และจะเห็นได้ว่างานวิจัยการกำจัดตะกั่วด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่มีแมงกานีสร่วมด้วยยังไม่มีการศึกษา

นอกจากนี้ การกำจัดตะกั่วด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่มีแมงกานีสผสมอยู่ จากการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E^0) ของแมงกานีสจะพบว่ามีค่าต่ำกว่าตะกั่ว ดังแสดงในสมการที่ 2.32 และ 2.33 ซึ่งทำให้แมงกานีสกลายเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนตะกั่วจะเป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้น เหมือนกับปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับตะกั่ว (เหล็ก มีค่า E^0 เท่ากับ -0.44 โวลต์)

$$Pb^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pb^0 \qquad E^0_{Pb2+/Pbo} = -0.126 \text{ โวลต์ (V)} \qquad (2.32)$$

$$Mn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mn^0 \qquad E^0_{Mn2+/Mn0} = -1.18 \text{ โวลต์ (V)} \qquad (2.33)$$

2.6 สรุปปริทัศน์วรรณกรรม

ปัญหาคุณภาพน้ำใต้ดินเสื่อมโทรมในปัจจุบันมีหลายสาเหตุ ได้แก่ การฝังกลบมูลฝอยโดยไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ การลักลอบทิ้งกากของเสีย การรั่วไหลของสารเคมี การทำเหมืองแร่และการเกษตรกรรม การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำใต้ดินถือเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เนื่องจากส่งผลกระทบโดยตรงกับสุขภาพของมนุษย์ที่จำเป็นต้องใช้แหล่งน้ำใต้ดินในการอุปโภคบริโภครวมไปจนถึงสิ่งมีชีวิตทุกชนิดอีกด้วย โลหะหนักที่พบว่ามีการปนเปื้อนบ่อยครั้ง ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ฟลูออไรด์ สารหนู ปรอท โครเมียมและตะกั่ว เป็นต้น การบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน ถือเป็นการแก้ไขที่เป็นไปอย่างยากลำบาก ต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังต้องใช้องค์ความรู้ บุคลากร รวมถึงเทคโนโลยีเพื่อใช้ในการบรรเทาปัญหาอย่างต่อเนื่อง วิธีการกำจัดโลหะหนักออกจากการปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดิน ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันวิธีบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดินนั้น ได้ใช้วิธีการบำบัดที่มีความยุ่งยากและราคาแพง

ในปัจจุบันมีการใช้ Permeable Reactive Barrier หรือ PRB มาบำบัดการปนเปื้อนน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ ซึ่งเริ่มเป็นที่ยอมรับในต่างประเทศแล้วว่าสามารถกำจัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิด โดยกลไกการทำงานของ PRB ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) ที่มีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้ แต่ทำปฏิกิริยาในการกำจัดสารปนเปื้อน โดยการลดความเป็นพิษหรือความเป็นอันตรายของสารปนเปื้อนลง กลไกที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้น ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation - Reduction reaction) และการดูดซับ (Adsorption) ในส่วนการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสออกจากแหล่งน้ำใต้ดิน พบว่ายังมีงานวิจัยค่อนข้างน้อย และส่วนใหญ่จะเน้นการพัฒนาไปทางด้านวัสดุศาสตร์ แต่ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำใต้ดิน สามารถใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงาน ซึ่งมุ่งเน้นเรื่องของค่าลงทุนในการติดตั้งระบบบำบัด

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดินโดยใช้ PRB ยังมีองค์ความรู้อยู่น้อยมาก อีกทั้งการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในแหล่งน้ำใต้ดินยังมีการศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อย และกลไกที่เกิดขึ้นยังมีความไม่ชัดเจน ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกำจัดตะกั่วในน้ำที่มีแมงกานีสผสม ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และ PRB ซึ่งเป็นวิธีที่มีราคาไม่แพงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ และถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำไปใช้ออกแบบเทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดินได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ที่อาศัยการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลและหาความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับออกแบบ Permeable Reactive Barrier (PRB) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ (In-situ remediation) โดยมีรูปแบบและขั้นตอนการวิจัย และแผนการวิจัย ดังนี้

3.1 รูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

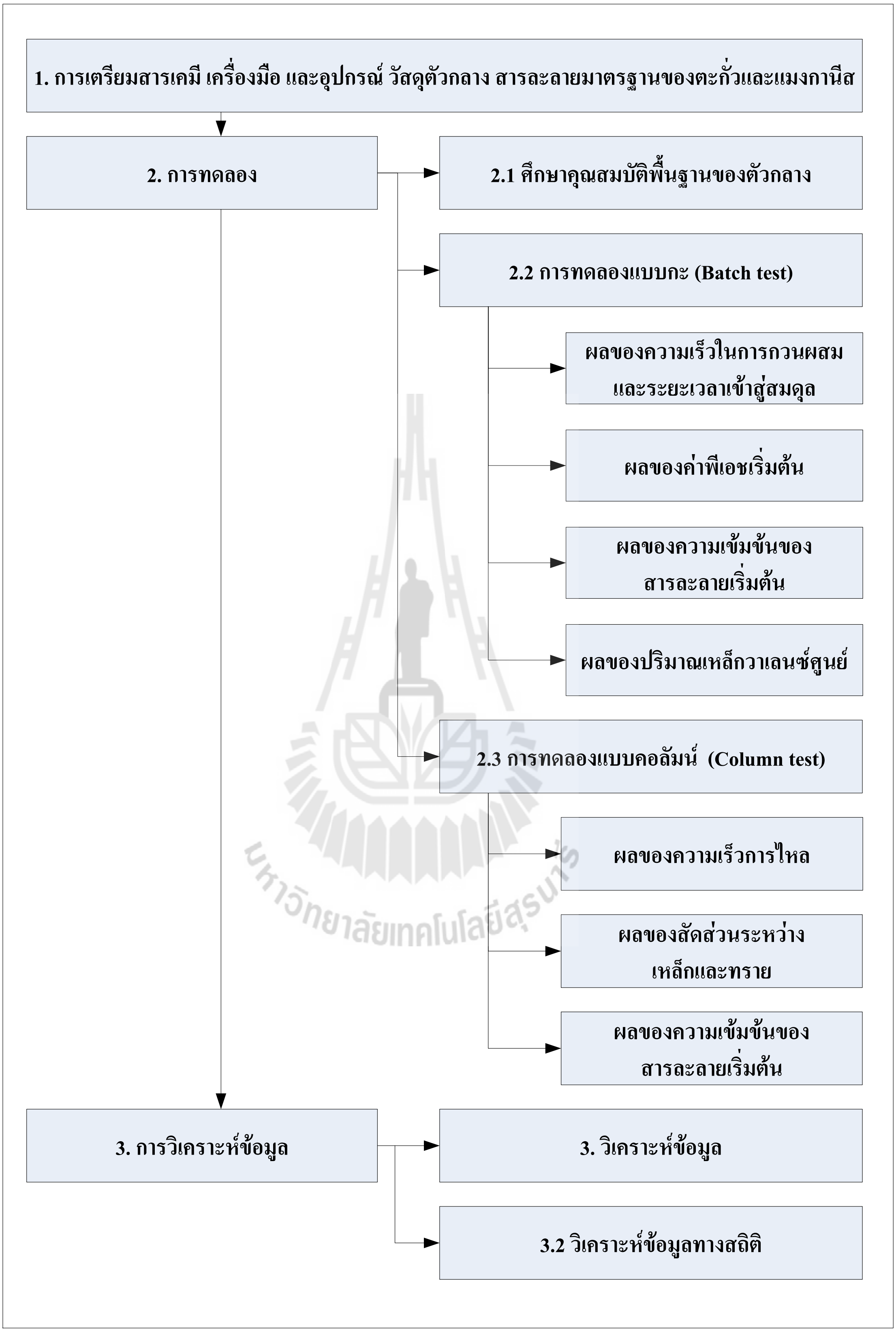
รูปแบบและขั้นตอนของการวิจัย เริ่มจากการเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทดลอง จากนั้นเตรียมวัสดุตัวกลาง ได้แก่ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย เตรียมสารละลายมาตรฐานของตะกั่วและแมงกานีส และหลังจากนั้นเริ่มดำเนินการทดลอง ซึ่งการทดลองจะประกอบไปด้วยการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง การทดลองแบบกะ (Batch test) และการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลและทดสอบสมมติฐานตามหลักสถิติเป็นขั้นตอนสุดท้าย ดังแสดงตามรูปที่ 3.1

3.2 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานของตะกั่วและแมงกานีส การเตรียมวัสดุตัวกลาง รวมถึงสารเคมีในการปรับค่าพีเอช ได้แก่ ตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) อะซิโตน (Acetone) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) กรดไนตริก (HNO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แต่ไม่รวมสารเคมีที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก แมงกานีส และตะกั่ว ซึ่งจะวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992; 1998; Clescerl et al., 1999)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 รูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve Shaker) ตะแกรงร่อน เครื่องเขย่า (Shaker) ตู้อบ (Oven) เครื่องวัดพารามิเตอร์ในน้ำ (pH/ ORP EC/ CF/ TDS/ Temp. Meter) เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) เครื่อง Autosorb เครื่อง X-ray Diffraction (XRD) เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP – OES) เครื่องชั่ง เครื่องกรองสูญญากาศ (Vacuum pump) อุปกรณ์ชุดทดลองแบบกะและคอลัมน์ และเครื่องแก้วต่าง ๆ

3.3 การเตรียมวัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางประกอบด้วย เหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย ในส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ทำการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ขายกันในท้องตลาด (Commercial grade) หรือผงตะไบเหล็ก (Iron filings) ขนาดน้อยกว่า 200 เมช (Mesh) หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.07 มิลลิเมตร ซึ่งไม่ต้องทำความสะอาดสามารถนำมาใช้งานได้เลย (Komnitsas et al., 2007) และเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งนำมาคัดเลือกขนาดให้ได้ 60 – 100 เมช หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร วิธีการคือร่อนเศษผงเหล็กผ่านตะแกรงร่อน โดยเลือกเศษผงเหล็กที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 60 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งจะได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปทำความสะอาดโดยชั่งเศษผงเหล็กจำนวน 100 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อปริมาตร จำนวน 200 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและกรดที่หลงเหลือ ล้างด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดน้ำ ทำให้แห้งด้วยการอบแห้ง เก็บเศษผงเหล็กที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้วในถุงซิปล็อค เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป (Lavine et al., 2001; Bang et al., 2005) ซึ่งการควบคุมคุณภาพของเศษผงเหล็ก ทำได้โดยการผสมเศษผงเหล็กหลังจากคัดเลือกขนาดแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งผสมเพียงครั้งเดียวและใช้ตลอดการทดลอง เพื่อให้ตัวกลางมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เศษผงเหล็กดังกล่าวมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงเนื่องจากมีความละเอียด ส่วนทรายที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์เลือกขนาด 10 – 20 เมช หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 – 2.00 มิลลิเมตร นำทรายขนาดตามที่กำหนดมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดหินปูน (Limestone) โดยการแช่ในกรดไนตริก ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือน้ำกลั่น (Komnitsas et al., 2007) ซึ่งวิธีการเตรียมวัสดุตัวกลางได้สรุปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เตรียมวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดตัวกลาง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	การทำความสะอาด
ผงตะไบเหล็ก	น้อยกว่า 0.07 มิลลิเมตร	-
เศษผงเหล็ก	0.15 – 0.25 มิลลิเมตร	3%v/v กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
ทราย	0.425 – 0.85 มิลลิเมตร	8%v/v กรดไนตริก (HNO_3)

3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของตะกั่วและแมงกานีส

เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้ตะกั่วไนเตรทและแมงกานีสซัลเฟต ตามลำดับ สารละลายดังกล่าวจะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับเจือจางที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อไป วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ชั่งตะกั่วไนเตรทหนัก 1.598 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1.5 มิลลิลิตร แล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วไนเตรทเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานแมงกานีส โดยชั่งแมงกานีสซัลเฟต จำนวน 1.5381 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปรับปริมาตร ปิดจุกแล้วเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายมาตรฐานแมงกานีสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Aziz, and Smith, 1995; Aziz, et al., 2008) โดยการทดลองจะทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแมงกานีสก่อนการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ เพื่อยืนยันความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5 รูปแบบของการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง การทดลองแบบกะ และการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง

1. คัดเลือกขนาดเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด ได้แก่ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยที่เศษผงเหล็กดังกล่าวนั้นไม่ทราบขนาด ดังนั้นจึงต้องทดสอบหาขนาดโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) (ASTM, 2004) เพื่อคัดเลือกเศษผงเหล็กที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

วิธีการร่อน คือ การนำเศษผงเหล็ก จำนวน 1,500 กรัม ใส่ลงไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งตะแกรงที่ใช้ร่อนประกอบด้วยตะแกรงเบอร์ 40 60 100 และ 200 โดยจัดให้ตะแกรงขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ข้างบนและขนาดเล็กสุดอยู่ข้างล่าง ขนาดเล็กสุดเป็นตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งมีขนาดรูตะแกรงเท่ากับ 0.075 มิลลิเมตร เมื่อทำการร่อนผ่านตะแกรงเสร็จแล้ว นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปชั่ง เพื่อคำนวณหาปริมาณเศษผงเหล็กส่วนที่ค้างหรือที่ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ เป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำหนักทั้งหมด จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรง (ขนาดเศษผงเหล็ก) กับเปอร์เซ็นต์เศษผงเหล็กที่ค้างบนตะแกรง

2. ทดสอบคุณสมบัติของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

เนื่องจากวัสดุตัวกลางที่เป็นเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ มีแหล่งที่มาต่างกัน คือ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเศษผงเหล็กนั้นไม่ใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะมีการผสมธาตุอื่นลงไปด้วยในขั้นตอนการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาองค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กดังกล่าว โดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction (XRD) (Lo et al., 2006; Zhang, Lin et al., 2011) นอกจากนี้กลไกการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) มีความเกี่ยวเนื่องกับประสิทธิภาพการกำจัดโดยตรง (Cissoko et al., 2009) ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพื้นที่ผิวของเหล็ก โดยใช้เครื่อง Autosorb ด้วยเทคนิควิธี Brunauer-Emmet-Teller (BET) (Ponder et al., 2000; Lee et al., 2003; Xi et al., 2010; Wan et al., 2010)

3.5.2 การทดลองแบบกะ

ทำการทดลองแบบกะ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดซึ่งเป็นพื้นฐานของกลไกการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยการศึกษาผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น และปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ เพื่อให้ทราบความเป็นไปได้และกลไกที่เกิดขึ้นในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ รวมทั้งเพื่อคัดเลือกวัสดุตัวกลางที่จะใช้ในการทดสอบหาความสามารถของ PRB ในการทดลองแบบคอลัมน์ต่อไป ทั้งนี้ปัจจัยอื่น ที่อาจมีผลต่อกลไกการกำจัดจะควบคุมให้คงที่ ได้แก่ อุณหภูมิ กำหนดไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศ ชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ คือ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็ก ชนิดของสารปนเปื้อนทดลองโดยใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีส และสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน โดยพารามิเตอร์ในการทดลองแบบกะทั้งหมดแสดงตามตารางที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ชนิดต่าง ๆ

ชนิด	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาด (มิลลิเมตร)	อ้างอิง
Metallic iron	2.43	0.42	Cantrell., 1995
- Waste iron particles - Peerless iron	1.2 0.87	0.25 – 0.84 (0.6) 0.7	Lee et al., 2003
Peerless ZVI	2.53	0.297 – 2.38	Lien and Wilkin, 2005
Fe(0) filings	0.55 0.169	0.15 0.42	Bang et al., 2005
Iron filings	1.8	0.25 - 2.0	Lo et al., 2006
ZVI filings	0.0482	0.2 – 1.2	Bartzas et al., 2006
ZVI filings	0.0482	0.2 – 1.2	Komnitsas et al., 2007
Zero valent iron	2.67	0.3 – 1.18	Tyrovola et al., 2007
Zero valent iron	0.3590	0.075	Yoon et al., 2011
Waste cast iron	0.5824	0.85 - 1.0	Choi et al., 2012

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองแบบกะ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความเร็วในการกวนผสม	50 150 250 350 และ 450 รอบต่อนาที
ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล	0 15 30 45 60 90 120 150 180 นาที 4 5 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง
พีเอชเริ่มต้น	3 5 6 7 8 9 และ 11
ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น	1 10 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	1 10 30 และ 50 กรัมต่อลิตร

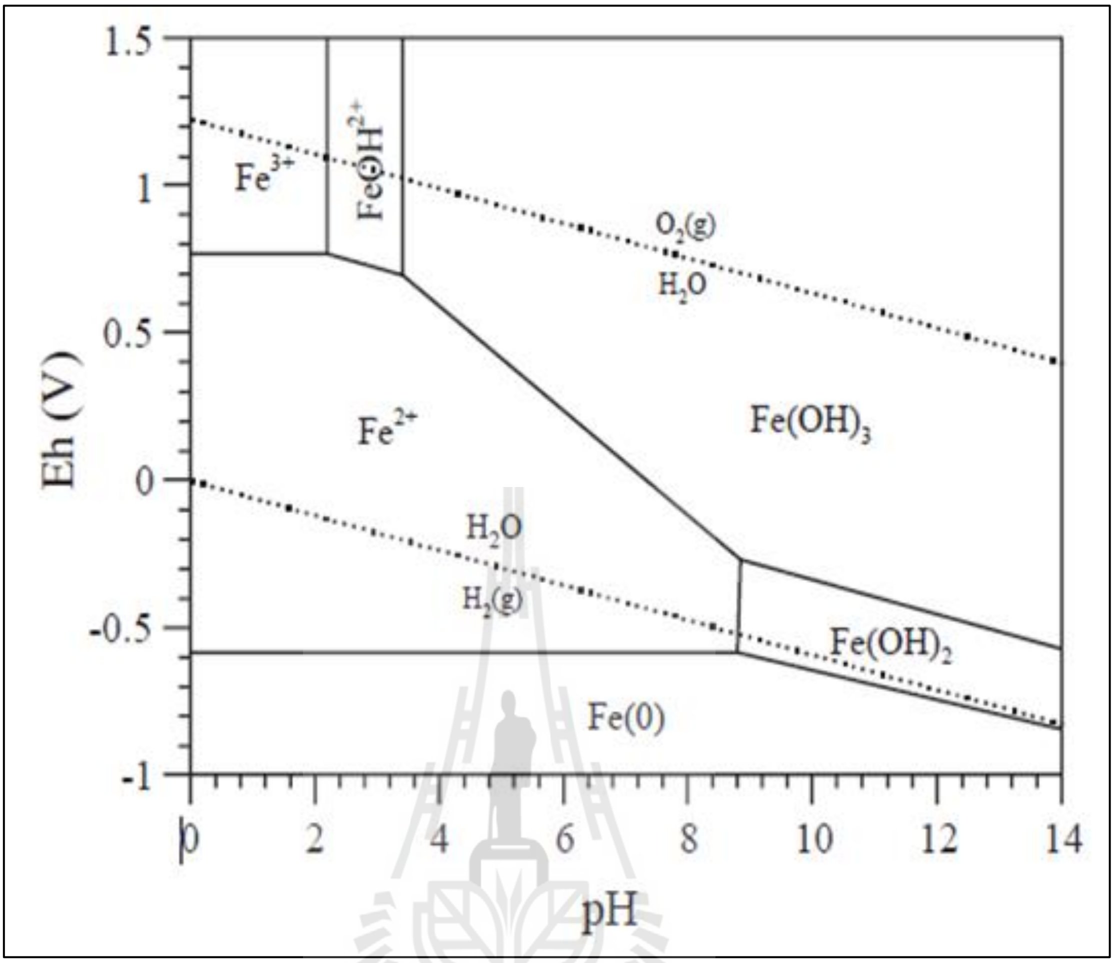
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ศึกษาผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

การกวนผสมมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมวล คือถ้ามีการกวนผสมที่เหมาะสมจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ (Yossapol, 1999) รวมถึงความเหมาะสมของระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงจุดหนึ่งที่ระบบเข้าสู่สมดุล (อุทัย สอนเทศ, 2548) จากงานวิจัยของ Zhang, Lin et al. (2010; 2011) ความเร็วในการกวนผสมที่เหมาะสมคือ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แต่งานวิจัยของ สุทธิสา ยาอีด และคณะ (2551) ความเร็วในการกวนผสมที่เหมาะสมคือ 150 รอบต่อนาที เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 5 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองไม่สอดคล้องกัน ดังนั้น จึงได้หาความเร็วในการกวนผสม และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม โดยทำการทดลองที่ความเร็วในการกวนผสมเป็น 50 150 250 350 และ 450 รอบต่อนาที และที่เวลา 0 15 30 45 60 90 120 150 และ 180 นาที และที่ 4 5 6 12 18 ชั่วโมง จนสิ้นสุดที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยกำหนดการทดลอง ดังนี้ ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่ละชนิดจำนวน 2 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ไม่มีการปรับค่าพีเอช ความเร็วในการกวนเป็น 50 รอบต่อนาที ทำการทดลองตามเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปกรองตะกอนออกด้วยเครื่องกรองสูญญากาศ ผ่านกระดาษกรอง Whatman GF/C และเติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และสุดท้ายเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีส และเปลี่ยนความเร็วในการกวนเป็น 150 250 350 และ 450 รอบต่อนาที ตามลำดับ

2. ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

ค่าพีเอช มีผลต่อการแตกตัวของสาร การแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ โดยมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ดังนั้นพีเอชจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ (อุทัย สอนเทศ, 2548; ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551) นอกจากนี้ในกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กตามธรรมชาติยังมีความเกี่ยวข้องกับค่าพีเอชอีกด้วย จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและพีอี (pE) ของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่ค่าพีเอชประมาณต่ำกว่า 6 และในสภาวะที่ออกซิเจนมีน้อย เหล็กจะมีสถานะเป็นเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) ซึ่งละลายน้ำ และในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยมากเหล็กจะอยู่ในรูปเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งในการกำจัดสารปนเปื้อนต้องการเหล็กในสภาวะที่สามารถเปลี่ยนรูปจากเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^{0}) ไปเป็นเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) ได้ ประกอบกับค่าพีเอชในการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกับสารปนเปื้อนจะมีค่าที่เหมาะสมในอยู่ในช่วง 5 - 7 (Morrison et al., 2002) ดังนั้น จึงจะหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ของสารที่จะกำจัดด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH และ Eh (V) ของเหล็ก
(Stumm and Morgan, 1996 อ้างอิงใน Zhang, Amrhein et al., 2005)

โดยกำหนดค่าพีเอชในการทดลองเป็น 3 5 6 7 8 9 และ 11 มีการทดลองดังนี้ ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่ละชนิดจำนวน 2 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ใช้ความเร็วในการกวนและระยะเวลาที่ได้จากการทดลอง จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน และเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 5 6 7 8 9 และ 11 ตามลำดับ

3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

ความเข้มข้นของตะกั่วและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินตามธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับสภาพของหินแร่ ซึ่งจะมีค่าไม่สูงมากนัก แต่หากมีการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ การอุตสาหกรรม เป็นต้น ความเข้มข้นก็จะแตกต่างกันไป จากรายงานขององค์การอนามัยโลก กล่าวว่าตรวจพบปริมาณแมงกานีสในน้ำใต้ดินอยู่ในช่วง 1,300 – 9,600 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจะมีค่ามากกว่าในแหล่งน้ำผิวดิน แต่ปริมาณตะกั่วไม่มีระบุไว้ (WHO, 2011) ซึ่งตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน (2543) ได้กำหนดคุณภาพน้ำใต้ดินต้องมี ตะกั่ว ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นหากความเข้มข้นที่ปนเปื้อนมากกว่ามาตรฐานกำหนดต้องมีการบำบัดการปนเปื้อน ซึ่งได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของตะกั่วและแมงกานีสเป็น 1 10 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินที่ครอบคลุมทุกช่วงการปนเปื้อนทำให้สามารถเห็นแนวโน้มในการกำจัดได้ รวมทั้งอ้างอิงจากค่า detection limit ของวิธีการวิเคราะห์ โดยออกแบบการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ไม่มีการปรับค่าพีเอช ความเร็วในการกวน และระยะเวลาที่ได้จากการทดลอง และใช้เหล็กเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน และเปลี่ยนความเข้มข้นของตะกั่วและแมงกานีสเป็น 10 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4. ศึกษาผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มีผลกับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ใช้ ซึ่งจากการทดลองการกำจัดโครเมียม พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้ 87 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 6 กรัมต่อลิตร และสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 10 กรัมต่อลิตร (Cissoko et al., 2009) การกำจัดซีลีเนียมเปรียบเทียบระหว่างที่ความเข้มข้นมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร กับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เท่ากันคือ 1 กรัมต่อลิตร พบว่า สามารถกำจัดซีลีเนียมได้ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Yoon et al., 2011) การกำจัดตะกั่วในน้ำที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโนร่วมกับดินขาว (K-nZVI) พบว่า หากใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์จำนวน 10 กรัมต่อลิตร และใช้เวลา 30 นาที จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ 96 เปอร์เซ็นต์ และถ้าใช้เหล็ก 5 กรัมต่อลิตร และใช้เวลา 60 นาที จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ 90.1 เปอร์เซ็นต์ (Zhang, Lin et al., 2010; 2011)

จากงานวิจัยดังกล่าวสรุปได้ว่าปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองหาปริมาณเหล็กที่เหมาะสม โดยกำหนดปริมาณเหล็ก ดังนี้ 1 10 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีการทดลองดังนี้ ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่ละชนิดจำนวน 0.1 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้ค่าพีเอช ความเร็วในการกวน และระยะเวลาที่ได้จากการทดลอง จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS ต่อไป ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน และเปลี่ยนปริมาณเหล็กที่ใช้เป็น 10 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5.3 การทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อทดสอบหาความสามารถของ PRB ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยอาศัยปัจจัยสภาวะจากการทดลองแบบกะ ได้แก่ ค่าพีเอชควบคุมให้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 7 ค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นใช้ที่ 5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ คือผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็ก โดยเริ่มจากการออกแบบคอลัมน์ที่ใช้ทดลอง จากนั้นทำการศึกษาผลของความเร็วการไหล สัดส่วนระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และทราย ความเข้มข้นของตะกั่วและแมงกานีสเริ่มต้น ผลการทดลองจะทำให้ทราบถึงปริมาณเหล็กที่ใช้ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นตะกั่วและแมงกานีส และผลของความเร็วการไหล ดำเนินการทดลองโดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่ได้ออกแบบไว้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร ควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ อุณหภูมิใช้อุณหภูมิบรรยากาศ ชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เลือกใช้เศษผงเหล็กจากการทดลองแบบกะ ขนาด 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร ทรายใช้ขนาด 0.85 – 2.00 มิลลิเมตร ชนิดของสารปนเปื้อนใช้สารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีส และสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีสในอัตราส่วนเท่ากัน โดยแสดงพารามิเตอร์ในการทดลองทั้งหมดตามตารางที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองแบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความเร็วการไหล	ในช่วง 10^{-2} และ 10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที
อัตราส่วนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อทราย	ร้อยละ 5 และ 20 โดยมวล
ความเข้มข้นของตะกั่วและแมงกานีสเริ่มต้น	5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. การออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์

ในการทดลองแบบคอลัมน์ได้ออกแบบชุดทดลองโดยอาศัยค่าแนะนำเบื้องต้นของ U.S. EPA (1998) ที่กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในคอลัมน์มีค่าระหว่าง 2.5 – 3.8 เซนติเมตร และความสูงมีค่าระหว่าง 10 – 100 เซนติเมตร โดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์แนวตั้งให้สารละลายไหลเข้าคอลัมน์ (Feed solution) จากด้านล่าง และไหลออกทางด้านบนโดยใช้เครื่องสูบน้ำ (Peristaltic pump) และจากงานวิจัยของ Komnitsas et al. (2007) ได้กล่าวไว้ว่าการไหลต้านแนวโน้มถ่วง (Flow against gravity) คือการไหลขึ้นด้านบนนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการไหลตามร่อง (Channeling) และเพื่อเป็นการป้องกันฟองอากาศตกค้างในคอลัมน์ (Gas entrainment) ดังนั้น ชุดทดลองที่ใช้ทดลองแบบคอลัมน์เบื้องต้น จึงออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร และเจาะรู (Sampling ports) ที่ 5 10 15 20 25 30 40 เซนติเมตร เพื่อใช้ศึกษาหากราฟเบรคทรู (breakthrough curve) และมีท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ทั้งนี้ก่อนเริ่มดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์จะศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ โดย 1) การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study) เพื่อหาระยะเวลากักเก็บและอัตราการไหลจริง และ 2) การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ของตัวกลาง ซึ่งมีหลักการดังนี้

1.1 การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม

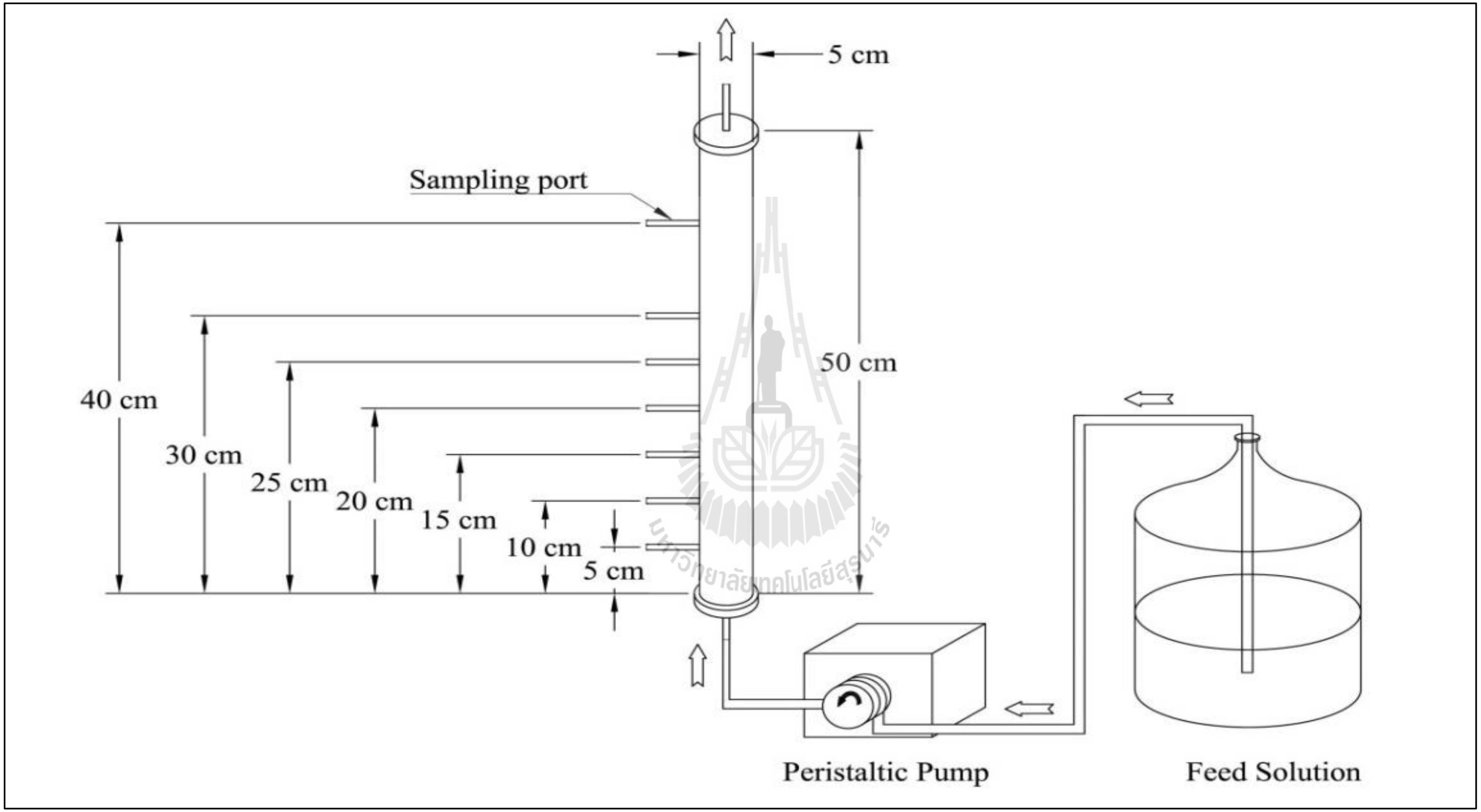
การศึกษาสารติดตามสามารถใช้ประเมินหาระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) โดยจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ไม่มีผลต่อการไหลและการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Komnitsas et al., 2007) โดยนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาระยะเวลากักเก็บจริง ดังสมการ 3.1 โดยอ้างอิงตามสมการของ Levenspiel (1972) ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบกับเวลากักเก็บจากทฤษฎี โดยที่อัตราการไหลเร็วจะมีค่าเท่ากับ 1.47 ชั่วโมง และที่อัตราการไหลช้ามีค่าเท่ากับ 5.89 ชั่วโมง

$$\text{เวลากักเก็บ (HRT)} = \frac{\sum_{t=0}^{t} t_i C_i dt_i}{\sum_{t=0}^{t} C_i dt_i} \qquad (3.1)$$

โดย HRT คือ ระยะเวลากักเก็บ (นาที)

t_i คือ ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากคอลัมน์ (นาที)

C_i คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองแบบคอลัมน์

1.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตัวกลาง

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (Hydraulic conductivity: K) ของตัวกลางเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งในด้านการยอมให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวกลาง ถ้าน้ำไหลผ่านชั้นตัวกลางได้ง่ายค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่ามาก นั่นคือ ตัวกลางจะมีช่องว่างมาก และถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยก็แสดงว่าตัวกลางนั้นมีความหนาแน่นมาก ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวกลาง จะอาศัยความสัมพันธ์จากสมการดาร์ซี เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ โดยตามสมการของดาร์ซี (Darcy'equation) คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวกลางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีวิธีการอยู่ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบความดันคงที่ สำหรับการทดสอบกับตัวกลางมีขนาดใหญ่ และการทดสอบแบบความดันเปลี่ยน สำหรับตัวกลางขนาดเล็ก

2. ศึกษาผลของความเร็วการไหล

ความเร็วการไหลในวัสดุพรุน (Porous media) ที่มีค่าความซึมผ่าน (Permeability) อยู่ในช่วง 10^{-2} – 10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที จะมีการซึมผ่านได้ดีในระดับปานกลาง (Semi - Pervious) (Bear, 1972) ซึ่งเป็นการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการอุดตันในวัสดุตัวกลาง ดังนั้นจึงกำหนดความเร็วการไหลในการทดลองให้มีค่าต่ำและสูง โดยให้อยู่ในช่วงค่าความซึมผ่านดังกล่าว อีกทั้งเพื่อให้สามารถเห็นจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) จาก Breakthrough curve ได้ในเวลาอันเร็ว ทั้งนี้จากรายงานการใช้งานของ PRB ในสถานที่จริง จะมีความเร็วการไหลในน้ำใต้ดินอยู่ในช่วง 6 – 220 เซนติเมตรต่อวัน (Phillips et al., 2000 อ้างอิงใน Komnitsas et al., 2007) ดังนั้นในการนำผลการทดลองความเร็วการไหลไปใช้ในการออกแบบ PRB จำเป็นต้องทอนค่าให้เหมาะสมในการออกแบบต่อไป

การทดลองคือ ใช้คอลัมน์ที่บรรจุเหล็กต่อทรายที่ร้อยละ 20 โดยมวล และค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มการทดลอง โดยปล่อยน้ำเข้าสู่คอลัมน์ในความเร็วการไหลต่ำ รอจนให้ความเร็วการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวกลางเท่ากับความเร็วการไหลของน้ำออก เพื่อไล่อากาศในตัวกลางและเพื่อให้น้ำไหลเข้าไปในตัวกลางด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจึงเปลี่ยนสารที่ไหลผ่านเข้าตัวกลางจากน้ำประปาเป็นสารละลายตะกั่ว รอจนกว่าความเร็วการไหลจะคงที่อีกครั้ง (Komnitsas et al., 2007) จึงทำการเก็บตัวอย่างทุกวัน จากจุดเก็บทั้งหมด ตรวจวัดค่าพีเอชและค่าความนำไฟฟ้าทันที จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง ICP - OES ต่อไป จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีส และสาร ละลายผสมตะกั่วและแมงกานีส และเปลี่ยนความเร็วการไหล

3. ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างเศษผงเหล็กและทราย

ในการดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์มักเกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ภายในคอลัมน์ ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กทำให้เกิดการตกตะกอนผลึก (Carey et al., 2001; U.S. EPA., 1998) จึงมีการนำทรายมาผสมเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว (Bang et al., 2005; Olivier et al., 2005; Komnitsas et al., 2007) แต่การผสมทรายเข้าไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ดังนั้นจึงต้องหาสัดส่วนที่เหมาะสม ตามงานวิจัยของ Komnitsas et al. ได้ทดลองโดยใช้สัดส่วนเหล็กต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยมวล ซึ่งเป็นสัดส่วนที่นิยมใช้ (วุฒิชัย ทิฐิพงษ์, 2545; Bartzas, et al. 2006; Bilardi, Amos, Blowes, Calabrò, and Moraci, 2012; Calabrò et al., 2012; Lien and Wilkin, 2005) แต่จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ตามงานวิจัยของ Wilkens et al. (2001) ที่ทดสอบเพื่อหาวัสดุตัวกลางที่จะใช้ใน PRB พบว่าได้กำหนดอัตราส่วนทรายต่อเหล็ก เท่ากับ 100 ต่อ 5 ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Baric, Majone, Beccari, and Papini (2012) ที่ทดลองการบำบัดคลอริเนเตตอีเทน (Chlorinated Ethane) โดยใช้ PRB ที่มีเหล็กกวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวกลาง ดังนั้น จึงกำหนดศึกษา 2 สัดส่วน คือ ใช้เหล็กร้อยละ 5 และ 20 โดยมวล ซึ่งได้ทำการทดสอบเบื้องต้นแล้วพบว่าไม่เกิดการอุดตันขึ้น โดยทำการทดลองดังนี้ ใช้คอลัมน์ที่บรรจุเหล็กกวาเลนซ์ศูนย์กับทรายโดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีการปรับค่าพีเอช เริ่มการทดลองโดยปล่อยน้ำเข้าสู่คอลัมน์ในความเร็วการไหลที่กำหนด รอจนให้ความเร็วการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวกลางเท่ากับความเร็วการไหลของน้ำออก ทำการเก็บตัวอย่างทุกวันจากจุดเก็บทั้งหมด ตรวจวัดค่าพีเอชและค่าความนำไฟฟ้าทันที จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง ICP - OES ต่อไป จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีส และสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีส

4. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้น

เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลาย มีผลโดยตรงกับปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ (Cissoko et al., 2009) ดังนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นตะกั่วและแมงกานีส จากงานวิจัย พบว่ามีการเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ทั้งนี้จะเป็นค่าในช่วงตั้งแต่ 1 10 100 จนถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำให้เห็นความแตกต่างของผลการทดลองที่ชัดเจน และค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่มีใช้กันมากคือที่ 5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (Bartzas et al., 2006; Calabrò et al., 2012; Komnitsas et al., 2007; 2012; Lien and Wilkin, 2005)

ดังนั้นจึงกำหนดศึกษาความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสัดส่วนของเศษผงเหล็กต่อทราย เป็นใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ทำการทดลองดังนี้ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มการทดลองโดยปล่อยน้ำเข้าสู่คอลัมน์ในความเร็วการไหลที่กำหนด รอจนให้ความเร็วการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวกลางเท่ากับความเร็วการไหลของน้ำออก ทำการเก็บตัวอย่างทุกวันจากจุดเก็บทั้งหมด ตรวจวัดค่าพีเอช และค่าความนำไฟฟ้าทันที จากนั้นนำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และนำตัวอย่างที่ได้เติมกรดไนตริกเข้มข้นให้พีเอชน้อยกว่า 2 และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซนเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง ICP - OES ต่อไป จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายตะกั่วเป็นสารละลายแมงกานีส และสารละลายผสมตะกั่วและแมงกานีส และเปลี่ยนความเข้มข้นของตะกั่ว และเปลี่ยนเป็นใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

3.5.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ประกอบด้วย ปริมาณตะกั่ว แมงกานีส และเหล็กตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992; 1998; Clescerl et al., 1999) โดยใช้เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer (FAAS) ในการทดลองแบบกะ และ เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP – OES) ในการทดลองแบบคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ค่าพีเอชและสภาพนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Multi Probe ทั้งนี้ได้สรุปเครื่องมือวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.5

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ (ก) เครื่อง FAAS และ (ข) เครื่อง ICP – OES

(ที่มา http://cste.sut.ac.th/2014/?p=935 สืบค้นวันที่ 20 สิงหาคม 2558)

ตารางที่ 3.5 สรุปเครื่องมือวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	เครื่องมือวิเคราะห์	บริษัท	ยี่ห้อ/รุ่น
ปริมาณตะกั่วและแมงกานีส	เครื่อง FAAS	บริษัท Perkin Elmer Ltd.	PinAAcle 900F Atomic Absorption Spectrometer
ปริมาณตะกั่ว แมงกานีส และเหล็ก	เครื่อง ICP – OES	บริษัท Perkin Elmer Ltd.	Optima 8000 ICP-OES Spectrometer
พีเอชและสภาพนำไฟฟ้า	เครื่อง Multi Probe	บริษัท YSI Ltd.	YSI 556 MPS Multi Probe System

3.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ข้อมูล

1.1 ข้อมูลผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลางจะทำให้ได้ลักษณะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่มีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่สุด และจากการทดลองแบบกะจะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส ได้แก่ ความเร็วในการกวน ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอช ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นตะกั่วและแมงกานีส และหลังจากได้ออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อใช้ศึกษาหาความสามารถของ PRB และเมื่อได้ดำเนินการทดลองเรียบร้อยแล้ว จะทำให้ทราบถึงอัตราการไหล ปริมาณของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น ที่มีความเป็นไปได้และมีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสจากการทดลองแบบคอลัมน์ในระดับห้องปฏิบัติการ ที่จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ PRB และเพื่อเป็นการศึกษาการทำงานของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์จะนำมาหาร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัด (% Removal) (Wan et al., 2010; Qin et al., 2011) ดังแสดงตามสมการที่ 3.2 และความสัมพันธ์ความเข้มข้น (C/C_0)

$$(\%\ Removal) = \frac{(C_i - C_e) \times 100}{C_i} \qquad (3.2)$$

โดย C_i คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

1.2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

การศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อน โดยการนำค่าที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลา ซึ่งจะนำไปหาลำดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ตามสมการที่ 3.3 (Sawyer, 2003)

$$r = -\frac{dC}{dt} = kC^n \tag{3.3}$$

โดย r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (M/L^3)

n คือ ลำดับของปฏิกิริยา

t คือ ระยะเวลา (T)

k คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ณ อุณหภูมิที่กำหนด

1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบเท่า (Pseudo-first-order kinetics) ดังสมการที่ 3.4 และ 3.5 (Sawyer, 2003; Arshadi, et al., 2014)

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q) \tag{3.4}$$

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_t}\right) = k_1 t \tag{3.5}$$

โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) สมการที่ 2.17

q_t คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ ระยะเวลา (นาที)

k_1 คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับหนึ่ง ณ อุณหภูมิที่กำหนด

2) ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบเท่า (Pseudo-second-order kinetics) ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7 (Sawyer, 2003; Arshadi, et al., 2014)

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q)^2 \tag{3.6}$$

โดย k_2 คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับสอง ณ อุณหภูมิที่กำหนด

$$\frac{1}{q_e} - \frac{1}{q_t} = k_2 t \tag{3.7}$$

1.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์ม จะใช้เส้นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งอาศัยสมการคณิตศาสตร์ในการอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น (อุทัย สอนเทศ, 2548; ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551) เพื่อพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม สำหรับปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 (Zhang, Lin et al., 2010) เมื่อคำนวณปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับได้ จากนั้นนำค่าที่ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยใช้ไอโซเทอร์มที่นิยม ดังต่อไปนี้

1) ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ดังสมการที่ 3.8 (Sawyer, 2003)

$$q = \frac{q_m \times K_L \times C}{1 + (K_L \times C)} \tag{3.8}$$

โดย q คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

q_m คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับสูงสุด (mg/g)

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mg/L)

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์

2) ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช

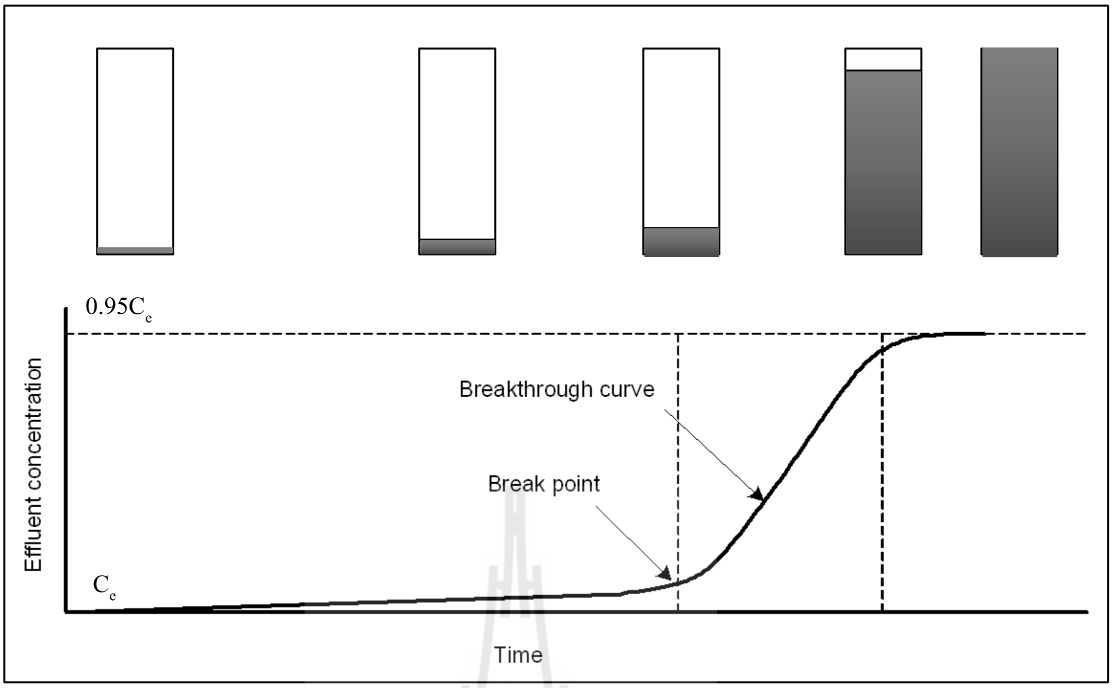
ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) ดังสมการที่ 3.9 (Sawyer, 2003)

$$q = K_F C^{1/n} \quad (3.9)$$

โดย K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอยด์ลิช

1.4 ความสามารถในการบำบัดของชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลักษณะของชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีการไหลขึ้น คือไหลต้านแนวโน้มถ่วง ตามเครื่องสูบส่งน้ำ ทำให้ลักษณะการดูดซับจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของคอลัมน์ แล้วบริเวณการดูดซับจะเริ่มเคลื่อนที่สูงขึ้นไปยังส่วนบนของคอลัมน์ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนสุด ณ จุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) หลังจากจุดนี้ต่อไปจะเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นคือ การดูดซับค่อย ๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำได้อีก ซึ่งนิยมเรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough curve ซึ่งจุดหมดสภาพ (Exhaustion point: C_E) มักใช้กันที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นน้ำที่เข้าระบบ ตัวอย่าง Breakthrough curve ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยทั่วไปกราฟเบรคทรูจะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-shape) คือ เมื่อกรองน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น C_0 ผ่านคอลัมน์ ซึ่งบรรจุสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่าง ๆ (ปริมาตรต่าง ๆ) คือ C_e ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่สนใจคือ เบรคทรูและจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ $0.95C_e$ ซึ่งหมายถึงเป็นปริมาตรที่สารดูดซับหมดสภาพ (ภูวดล ศิริสินเลิศ, 2552) ความสามารถในการดูดซับหรือปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) จากการทดลองแบบคอลัมน์นั้นนิยมนำผลไปใช้ในการออกแบบระบบ มากกว่าการทดลองแบบกะ โดยเป็นการจำลองลักษณะการใช้งานจริง คือ มีการบรรจุตัวกลางดูดซับลงในคอลัมน์และปล่อยให้สารละลายของตัวถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์โดยสารดูดซับจะสัมผัสกับสารถูกดูดซับอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.5 Breakthrough curve

การหาค่าความสามารถในการดูดซับจากชุดทดลองแบบคอลัมน์ ทำได้โดยการคำนวณพื้นที่ใต้เส้น $0.95C_e$ ลงมาจนถึงเส้น C_e จะได้ค่าปริมาณสารในของเหลวทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์ แล้วหารด้วยปริมาณสารดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สามารถดูดซับสารมลทินที่อยู่ในสารละลายนั้น ๆ ได้ ความสามารถในการดูดซับจะเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ หารด้วยปริมาณตัวกลางที่นำมาเป็นสารดูดซับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.10 (ภูวดล ศิริสินเลิศ, 2552) ได้ดังนี้

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ} = \frac{\sum_{n=1}^{T}\left(C_E - C_{ei}\right)dV_i}{\text{Weight media}} \quad (3.10)$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของสารมลทินที่อยู่ในสารละลายที่จุดหมดสภาพ (95% ของความเข้มข้นเริ่มต้น)

C_{ei} = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลว (Solute) ที่ผ่านระบบ ณ ปริมาตรที่ i

V_i = ปริมาตร ณ เวลา i

1.5 การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone)

ความยาวของ Mass transfer zone หรือ Sorption คือชั้นการดูดซับที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารถูกดูดซับ หาโดยสมการที่ 3.11 หรือ 3.12

$$L_m = L\left[1 - \frac{t_b}{t_s}\right] \tag{3.11}$$

โดยที่ L_m = ความยาวของ Mass transfer zone

L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ

t_b = เวลาที่ใช้จากเริ่มจนถึงน้ำออกเริ่มมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้ (Breakthrough time)

t_s = เวลาที่ใช้จากเริ่มจนกระทั่งสารดูดซับถูกใช้จนหมด (Time to saturation)

$$Z_s = Z\left[\frac{V_Z}{V_T - 0.5V_Z}\right] \tag{3.12}$$

โดยที่ Z_s = ความยาวของ Mass transfer zone

Z = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ

V_T = ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดซับ

V_Z = ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดซับ

1.6 การหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์ใช้ในการออกแบบ โดยที่นำผลการทดลองจากชุดคอลัมน์เพื่อนำไปใช้ในงานจริง โดยใช้วิธี Empty bed contact time (EBCT) ซึ่งหาได้จากสมการ 3.13 และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) ได้จากสมการ 3.14

$$\text{EBCT} = \frac{\text{Bed volume}}{\text{Flow rate}} \tag{3.13}$$

$$\text{Usage rate} = \frac{\text{Weight of absorbent in column}}{\text{Volume at breakthrough}} \tag{3.14}$$

2. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดตะกั่วและแมงกานีสได้ โดย นำผลที่ได้จากการทดลองทั้งแบบกะและแบบคอลัมน์ มาวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics) โดยการทดสอบสมมติฐาน (Test of hypotheses) เพื่อที่จะหาคำตอบมาอ้างอิงสมมติฐานที่ตั้งขึ้นมา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ตั้งสมมติฐานทางสถิติ ได้แก่ สมมติฐานว่าง และสมมติฐานแย้ง กำหนดการทดสอบค่าสถิติ ได้แก่ ทดสอบค่าเฉลี่ยและทดสอบค่าความแปรปรวน คำนวณค่าสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นสร้างเขตปฏิเสธสมมติฐาน เพื่อหาค่าวิกฤต (Critical value) และสรุปผลการทดสอบที่ได้ (Berthouex and Brown, 2002)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

ดำเนินการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลและหาความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง การทดลองแบบกะ และการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

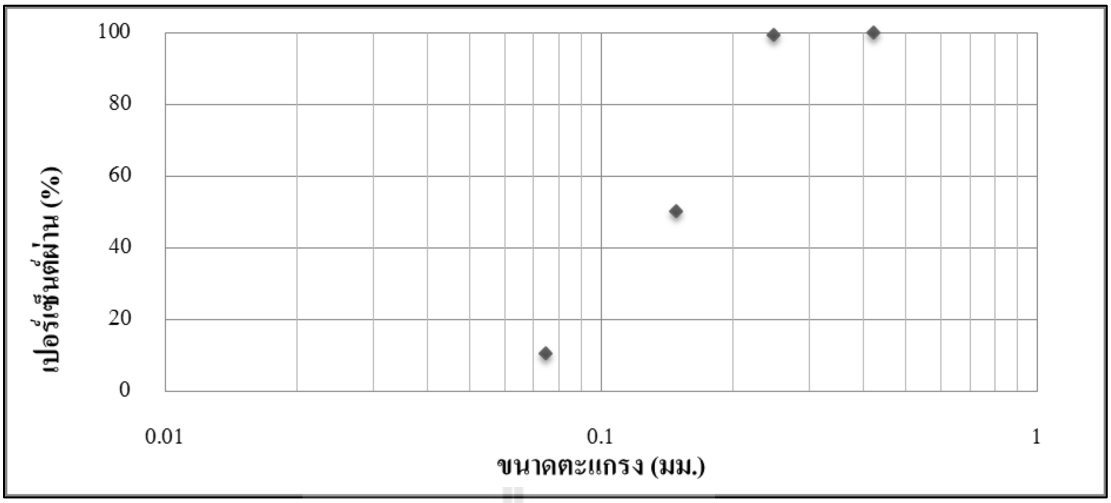
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง

4.1.1 ผลการคัดเลือกขนาดของตัวกลาง

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด ได้แก่ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเศษผงเหล็กดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นผงฝุ่นและมีสีดำ เนื่องจากเศษผงเหล็กที่นำมานั้น ไม่ทราบขนาดจึงต้องทดสอบหาขนาดโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) เพื่อหาเศษผงเหล็กที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ได้ผลการทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 4.1 พบว่า ขนาดของเศษผงเหล็กที่มีปริมาณมากคือ เศษผงเหล็กที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร และตะแกรงเบอร์ 200 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระหว่าง 0.075 - 0.15 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 49.08 และ 39.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ดังนั้น จึงเลือกเศษผงเหล็กที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 หรือมีขนาดระหว่าง 60 – 100 เมช หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดที่ไม่เล็กจนเกินไป ทั้งนี้ ถ้าเศษผงเหล็กมีขนาดเล็ก จะไม่สามารถล้างทำความสะอาดได้ (ศุทธวดี วีระพงษ์, 2548) และไม่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัสดุตัวกลางใน PRB เนื่องจากอาจจะเกิดการอุดตันของชั้นเกิดปฏิกิริยาในระบบ PRB ได้ง่าย (Jun et al., 2009)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



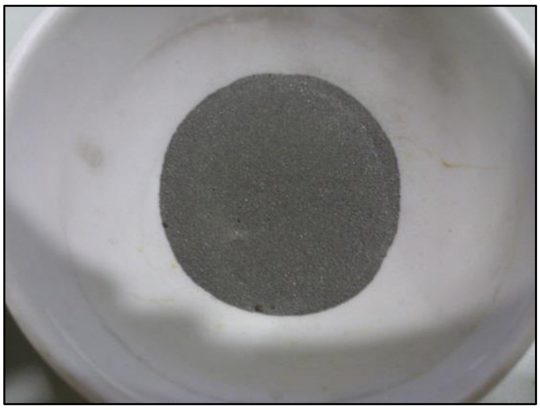
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรงกับเปอร์เซ็นต์เศษผงเหล็ก

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

1. ลักษณะทางกายภาพทั่วไป

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้ง 2 ชนิด คือผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะทางกายภาพ ดังรูปที่ 4.2 พบว่าผงตะไบเหล็ก รูป 4.2 (ก) มีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กและมีสีเทา ส่วนเศษผงเหล็กที่คัดขนาดและล้างทำความสะอาดแล้วนั้น รูป 4.2 (ข) จะมีลักษณะเป็นเกล็ดและมีสีดำ จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผงตะไบเหล็กมีขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเศษผงเหล็ก เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพ (ก) ผงตะไบเหล็ก (ข) เศษผงเหล็ก

2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)

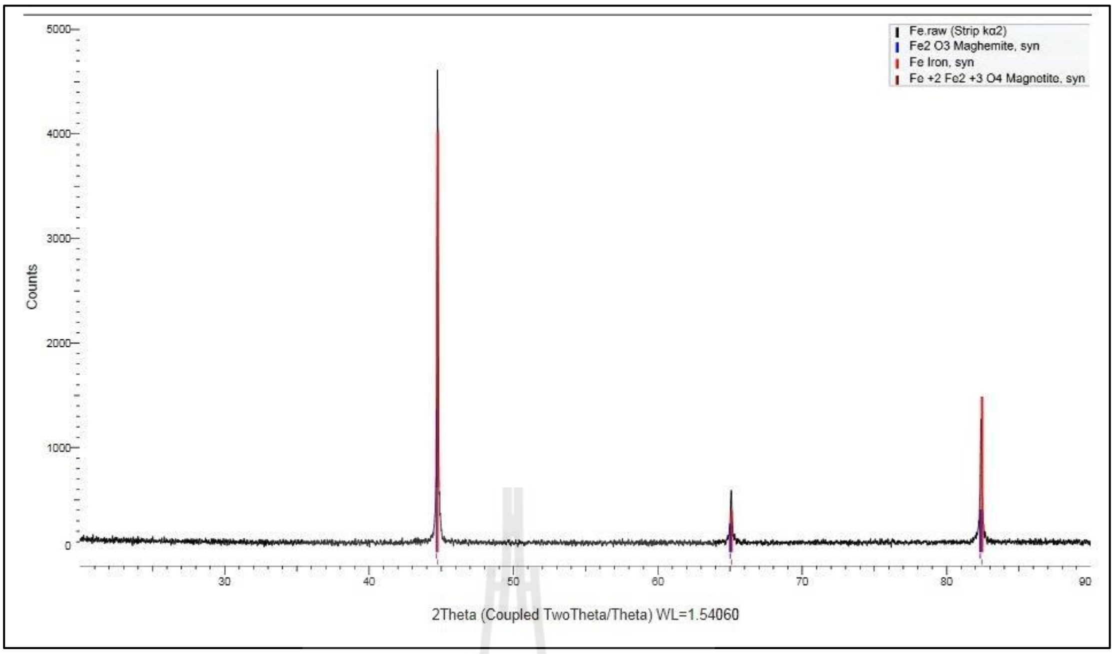
พื้นที่ผิวสัมผัสมีผลโดยตรงกับกลไกการกำจัดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ จากการทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี BET Surface Area Analysis แสดงผลดังตารางที่ 4.1 ซึ่งทดสอบเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้งหมด 4 ชนิด พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผงตะไบเหล็กมีค่ามากที่สุด คือ 2.1169 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อเทียบกับเศษผงเหล็กที่มีขนาดเดียวกัน (น้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร) เศษผงเหล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และเศษผงเหล็กขนาด 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการทดลองมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.2883 ตารางเมตรต่อกรัม จากงานวิจัยของ Yoon et al., (2011) เลือกใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาด 0.075 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 0.359 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนงานวิจัยของ Lee et al. (2003) เลือกใช้เศษผงเหล็กขนาด 0.25 – 0.84 มิลลิเมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.2 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจะเห็นว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของงานวิจัยที่ต่างกันให้ผลที่ต่างกัน ดังตารางที่ 3.2 แต่ถึงอย่างไรพื้นที่ผิวจำเพาะก็มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ผิวจำเพาะของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ วิเคราะห์โดยวิธี BET Surface Area Analysis

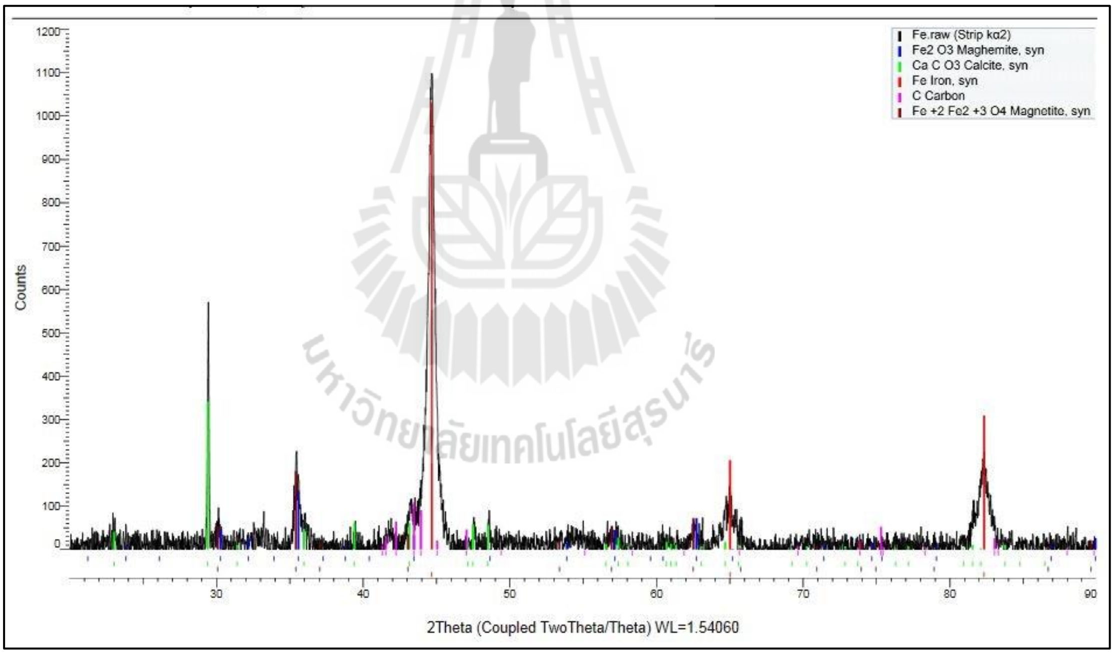
ชนิดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
ผงตะไบเหล็ก	น้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร	2.1169
เศษผงเหล็ก	0.15 – 0.25 มิลลิเมตร	0.2883
เศษผงเหล็ก	0.075 – 0.15 มิลลิเมตร	1.3852
เศษผงเหล็ก	น้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร	1.7827

4.1.2.2 ลักษณะทางเคมี

การยืนยันองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้ง 2 ชนิด ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยเปรียบเทียบ XRD pattern กับ Standard ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า XRD pattern ของผงตะไบเหล็ก รูปที่ 4.3 (ก) จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2Theta ประมาณ 44 Theta ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ ชีวนันท์ ชมภูจันทร์ (2552) และ Lo et al. (2006) โดยที่ปรากฏพีค 2Theta ที่ตำแหน่ง 44.2 - 44.3 Theta ซึ่งเป็นตำแหน่งของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron; Fe^{0}) เมื่อเทียบกับ Standard และเศษผงเหล็ก ก็พบ XRD pattern ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.3 (ข) แต่ทั้งนี้จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งอื่นด้วย เนื่องจากเศษผงเหล็กมีการเจือปนของธาตุอื่นจากกระบวนการผลิต ได้แก่ แคลไซท์ (Calcite) และคาร์บอน (Carbon) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเหล็กทั้งสองก็มีองค์ประกอบหลักคือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์



(ก)



(ข)

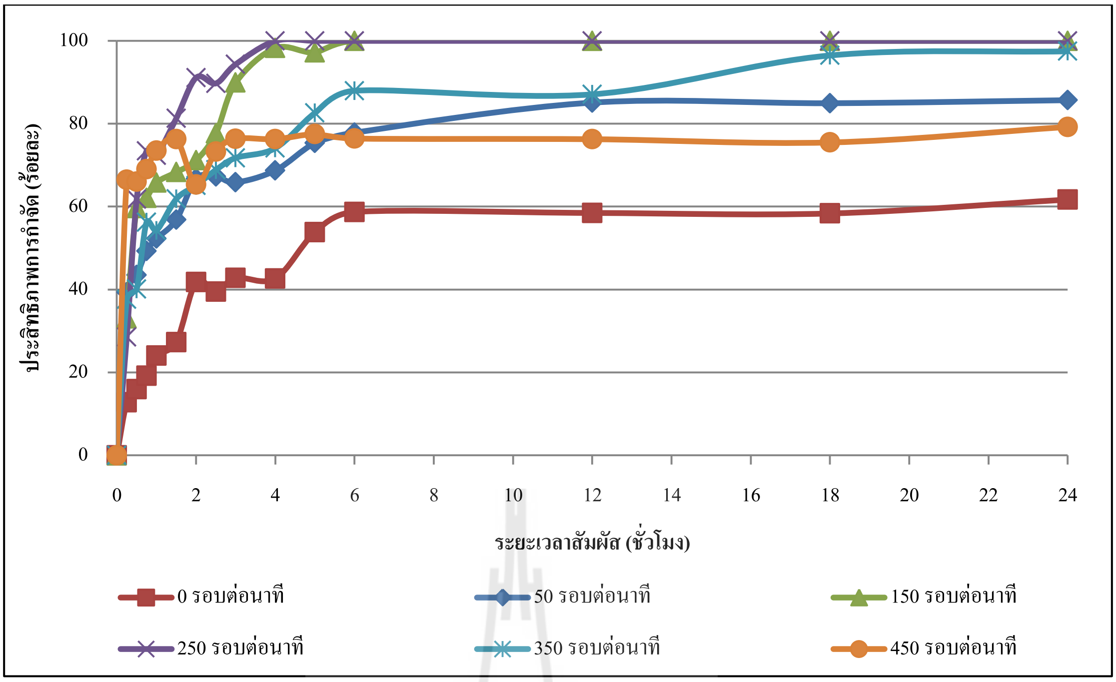
รูปที่ 4.3 XRD pattern ของ (ก) ผงตะไบเหล็ก (ข) เศษผงเหล็ก

4.2 ผลการทดลองแบบกะในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

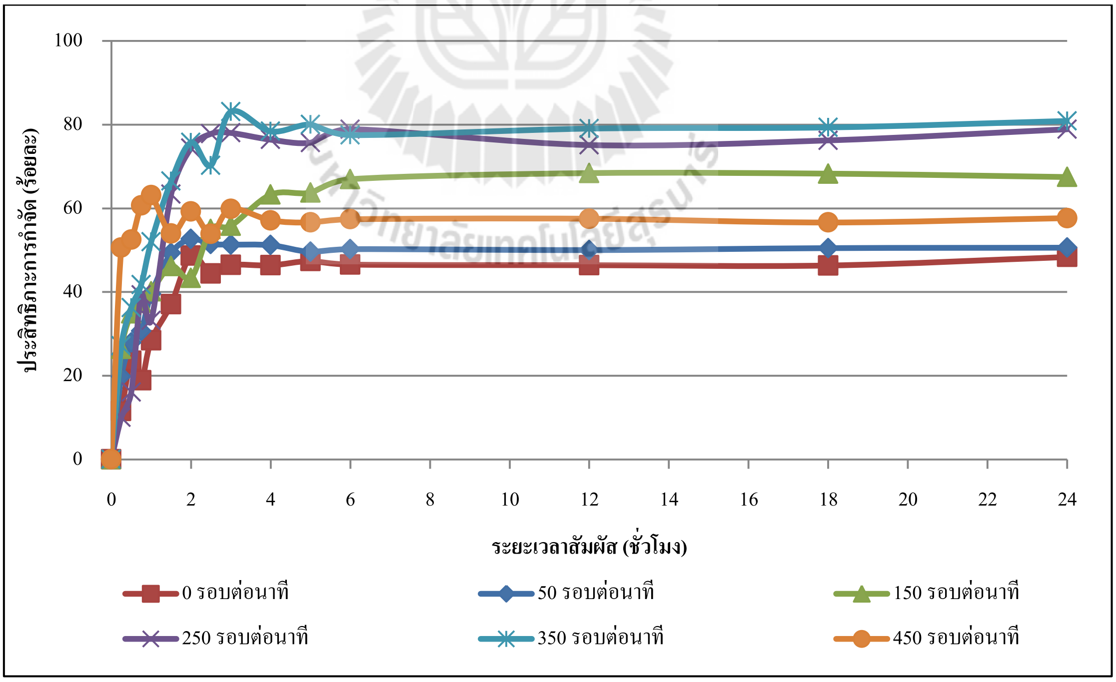
4.2.1 ผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

จากการทดลองเพื่อหาความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล โดยได้ผลการทดลองของการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงตามรูปที่ 4.4 พบว่า การทดลองที่ไม่มีการกวนผสม (0 รอบต่อนาที) ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มเป็นร้อยละ 12.75 ในเวลา 15 นาที หลังจากสารละลายตะกั่วทำปฏิกิริยากับเศษผงเหล็ก จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มคงที่ที่เวลา 6 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเป็นร้อยละ 58.71 ซึ่งความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาการสัมผัสนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันในทุกความเร็วของการกวนผสม กล่าวคือ ที่ความเร็วในการกวนผสม 50 รอบต่อนาที และ ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 6 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเป็นร้อยละ 77.85 ที่ความเร็วในการกวนผสม 150 รอบต่อนาที และ ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 6 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วถึงร้อยละ 100 และเช่นเดียวกันกับความเร็วในการกวนผสมที่ 250 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเป็นร้อยละ 100 เช่นกัน แต่ ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 4 ชั่วโมง ส่วนความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเป็นร้อยละ 87.96 ที่เวลาเริ่มคงที่ คือ 6 ชั่วโมง และท้ายสุดความเร็วในการกวนผสมที่ 450 รอบต่อนาที จะเริ่มคงที่ที่เวลา 3 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเป็นร้อยละ 76.37 โดยรายละเอียดผลการทดลองจะแสดงใน ภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1 – ก.6)

ผลการทดลองของการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงตามรูปที่ 4.5 พบว่า จะมีลักษณะคล้ายกับการกำจัดตะกั่ว คือ มีประสิทธิภาพการกำจัดคงที่ ณ เวลาหนึ่ง โดยการทดลองที่ไม่มีการกวนผสม ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะเพิ่มในเวลา 15 นาที เป็นร้อยละ 11.55 จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มคงที่ที่เวลา 2 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส เป็นร้อยละ 48.72 ที่ความเร็วในการกวนผสม 50 รอบต่อนาที และ ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 2 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสเป็นร้อยละ 52.66 ที่ความเร็วในการกวนผสม 150 รอบต่อนาที และ ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 6 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสร้อยละ 66.96 ที่ความเร็วในการกวนผสมที่ 250 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสเป็นร้อยละ 78.02 ณ เวลาที่เริ่มคงที่ คือ 3 ชั่วโมง และความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสสูงสุดเป็นร้อยละ 83.13 ที่เวลาเริ่มคงที่ คือ 3 ชั่วโมง และท้ายสุดความเร็วในการกวนผสมที่ 450 รอบต่อนาที จะเริ่มคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงแรก และมีประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสเป็นร้อยละ 63.13 โดยรายละเอียดผลการทดลองจะแสดงใน ภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.7 – ก.12)



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและความเร็วในการกวนผสม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ



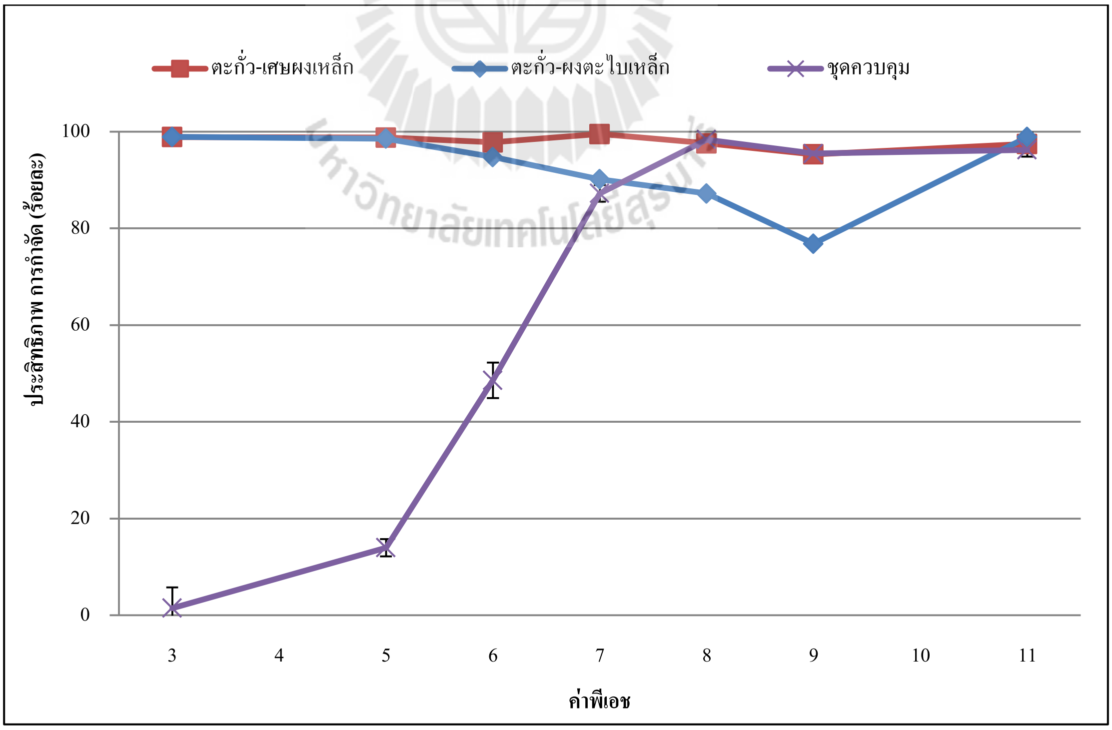
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและความเร็วในการกวนผสม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากัน ความเร็วในการกวนผสมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเช่นกัน คือ ที่ความเร็วในการกวนผสม 0 – 250 รอบต่อนาที แต่ถ้าความเร็วในการกวนผสมเร็วเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง คือ ที่ความเร็วในการกวนผสม 350 และ 450 รอบต่อนาที ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีส จะเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที ส่วนระยะเวลาสัมผัสของเศษผงเหล็กกับสารละลายนั้น พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จนถึงระยะเวลาหนึ่ง ประสิทธิภาพการกำจัดจะคงที่นั่นคือ เวลาสมดุลของปฏิกิริยานั่นเอง (อุทัย สอนเทศ, 2548) ซึ่งทั้งสองปัจจัยคือความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุลนั้นเป็นไปตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ การกวนผสม (Mixing) นั้น ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้ และระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ (Contact time) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา คือเมื่อเวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตาม แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งที่ความสามารถในการดูดซับคงที่ คือ ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (Sawyer, 2003)

ดังนั้น จึงสรุปผลการหาความเร็วในการกวนผสมและหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็ก ได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง จากนั้นจะคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลนั่นเอง โดยพบว่าเศษผงเหล็กสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วดีที่สุด คือร้อยละ 100 ที่ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที และที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง ส่วนความสามารถในการกำจัดแมงกานีสของเศษผงเหล็ก จะได้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุด คือร้อยละ 83.1 ที่ความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที และที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 3 ชั่วโมง โดยใช้เศษผงเหล็ก จำนวน 2 กรัมต่อ สารละลาย 40 มิลลิลิตร หรือ 50 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที และระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง ในการทดลองต่อไปทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสที่ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที ก็มีค่าใกล้เคียงกับที่ความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที

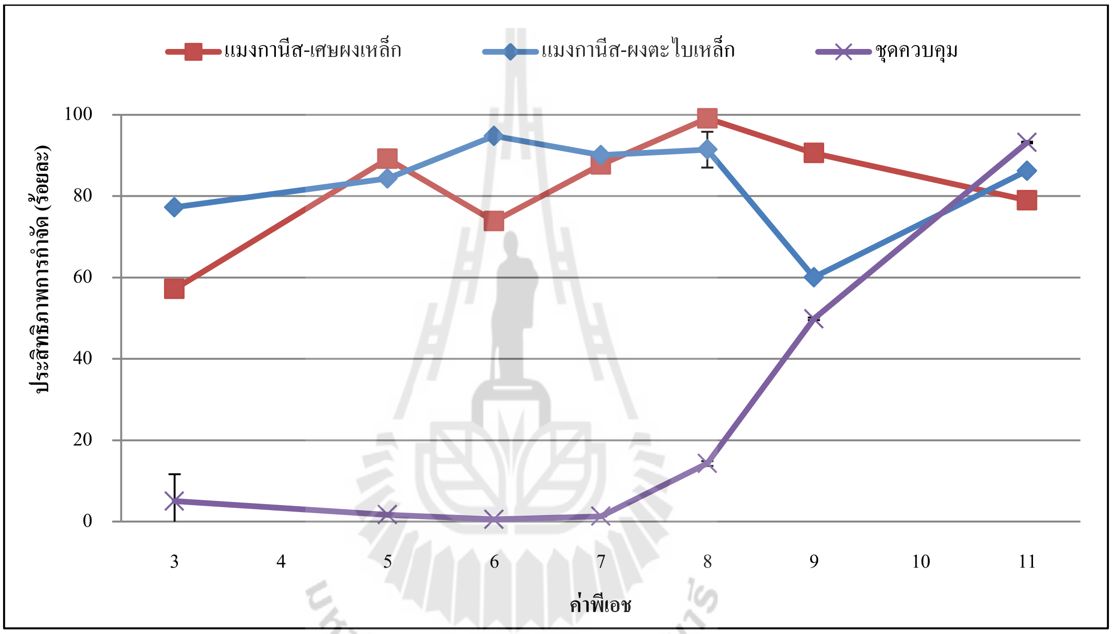
4.2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

การทดลองหาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งได้ทดลองที่ค่าพีเอชต่าง ๆ ตั้งแต่ 3 5 6 7 8 9 และ 11 เป็นค่าพีเอชสุดท้าย โดยได้ผลการทดลองของการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าตั้งแต่ค่าพีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะสูงเกือบถึงร้อยละ 100 ทั้งจากเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วก็ยังคงสูงมากกว่าร้อยละ 90 ในการทำปฏิกิริยากับเศษผงเหล็ก ส่วนผงตะไบเหล็ก ที่ค่าพีเอช 9 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะต่ำกว่าร้อยละ 80 โดยรายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 – ข.3) นอกจากนี้ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ พบว่าที่ค่าพีเอชในช่วง 3 – 5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นจนมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองด้วยเศษผงเหล็ก แสดงให้เห็นว่าที่ค่าพีเอชสูงกว่า 5 กลไกการกำจัดตะกั่วที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่อาจเกิดจากการตกตะกอนผลึกทางเคมี (Precipitation) โดยการปรับค่าพีเอช ส่วนที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 5 กลไกการกำจัดที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นกลไกการดูดซับ (Adsorption) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) หรืออาจจะเกิดจากการตกตะกอนผลึกทางเคมีด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ร่วมด้วย ดังนั้นการกำจัดตะกั่วด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ จึงควรดำเนินการที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ



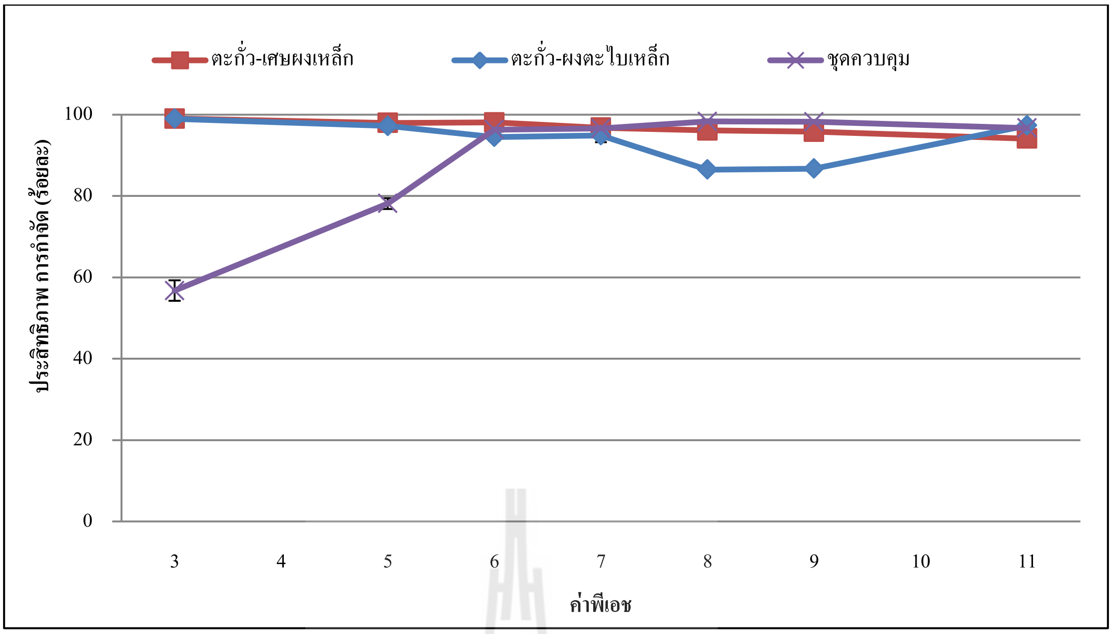
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

ส่วนการทดลองการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ได้ผลการทดลอง ดังแสดงตามรูปที่ 4.7 และภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.4 – ข.6) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในแต่ละค่าพีเอชจะมีค่าส่วนใหญ่สูงกว่าร้อยละ 60 เช่น ที่ค่าพีเอช 5 การกำจัดแมงกานีส จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 80 ทั้งการกำจัดด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก โดยที่ผลการทดลองของชุดควบคุมจะเริ่มมีผลที่ค่าพีเอช 8 ซึ่งสารละลายแมงกานีสจะเริ่มตกตะกอนทางเคมี ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองการกำจัดตะกั่ว ดังนั้น การกำจัดแมงกานีสด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ สามารถดำเนินการได้ดี ที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ เช่นกัน

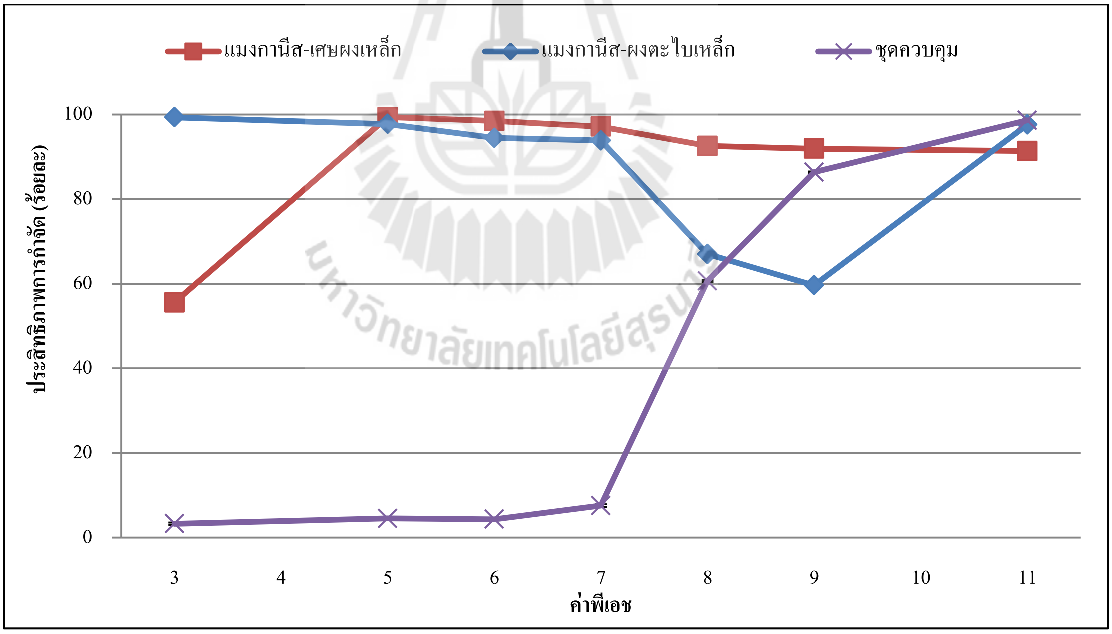


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการทดลองการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายผสมด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก โดยได้ผลการทดลอง ดังแสดงตามรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งจะพบว่า ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสนั้น มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสารละลายตะกั่วหรือแมงกานีส คือ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะสูงเกือบถึงร้อยละ 100 ทั้งจากเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเกิดจากการตกตะกอนผลึกทางเคมีของสารละลายตะกั่ว ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสมจะมีค่าส่วนใหญ่สูงกว่าในสารละลายแมงกานีสเอง คือร้อยละ 90 ทั้งการกำจัดด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก โดยที่ผลการทดลองของชุดควบคุมจะเริ่มมีผลที่ค่าพีเอช 8 เช่นกัน โดยรายละเอียดผลการทดลองได้แสดงใน ภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.7 – ข.12)



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

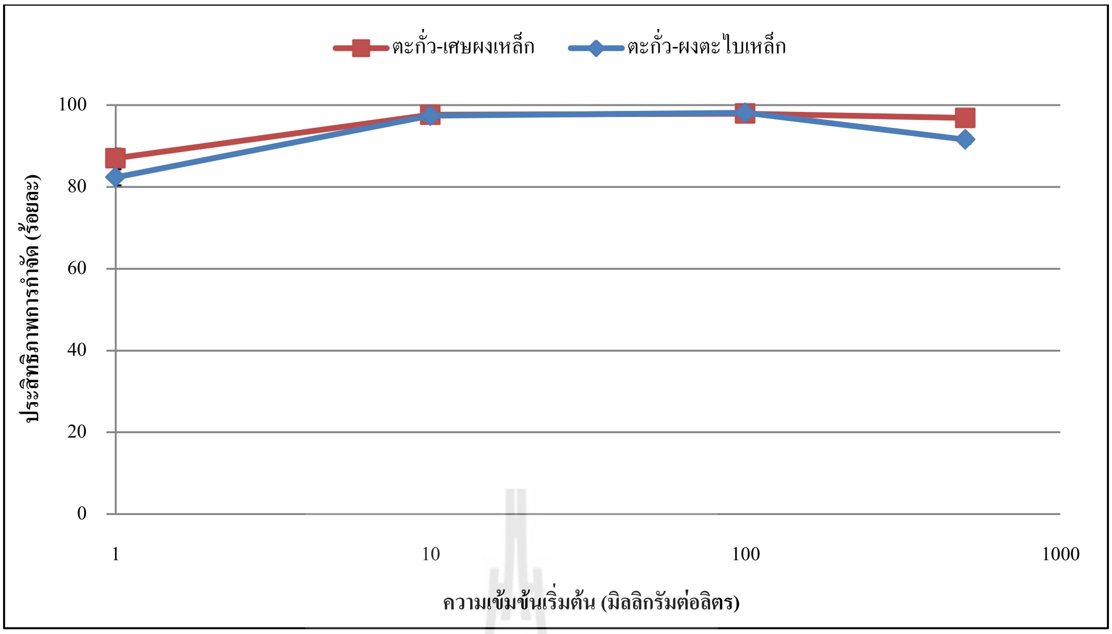


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

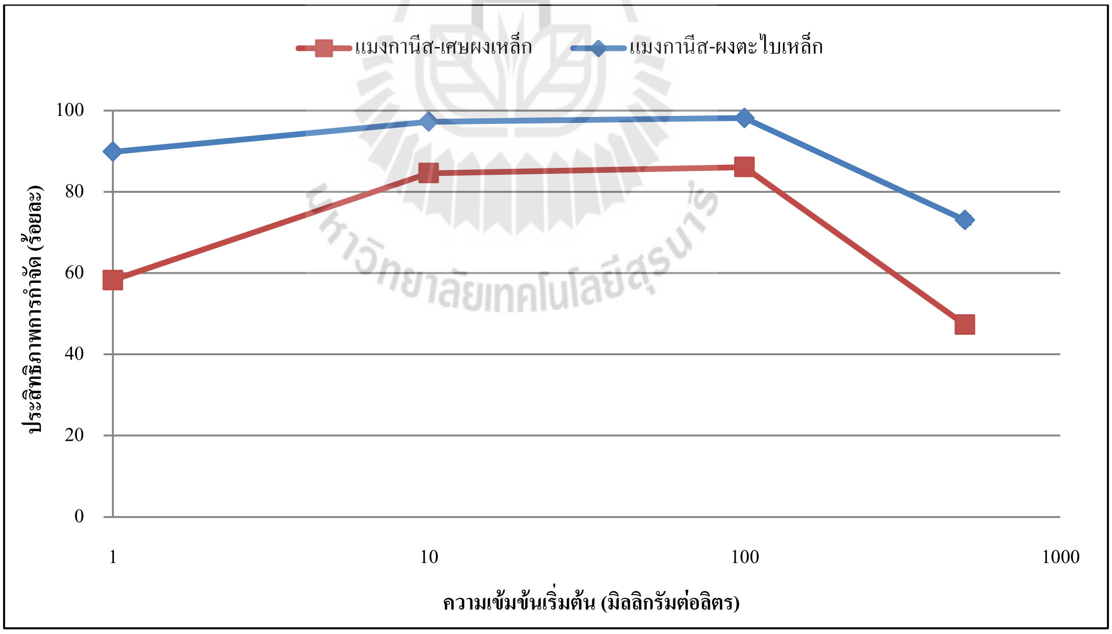
ดังนั้น จากการทดลองผลของค่าพีเอชเริ่มต้นทั้งหมด สรุปได้ว่าผลของค่าพีเอชเริ่มต้นมีความสัมพันธ์กับการกัดกร่อนของเหล็ก ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว จะสูงเกินร้อยละ 90 ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 3 จนถึงค่าพีเอช 7 ซึ่งให้ผลคล้ายกันทั้งเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก และในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส จะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ต่ำกว่าการกำจัดตะกั่ว แต่ก็ยังสามารถกำจัดแมงกานีสได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ เช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Cissoko et al. (2009) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ และค่าพีเอชของการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกับสารปนเปื้อนจะมีค่าที่เหมาะสมในช่วงค่าพีเอชที่ 5 – 7 (Morrison et al., 2002) โดยค่าพีเอชที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดกลไกการตกตะกอนทางเคมีขึ้นแทน ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง pH และ Eh (V) ของเหล็ก (รูปที่ 3.2) จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 8 และค่า Eh (V) เป็นบวก เหล็กจะอยู่ในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น เหล็กจะตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_2$ หรือ $Fe(OH)_3$ ซึ่งเกิดกลไกการตกตะกอนผลึกทางเคมี (Precipitation) จากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ดังนั้น ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมคือต้องอยู่ในช่วงที่มีสภาพเป็นกรด (ค่าพีเอชต่ำกว่า 6) จึงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูงสุด

4.2.3 ผลของความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นกับประสิทธิภาพการกำจัด โดยความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วและแมงกานีสเริ่มต้นเป็น 1 10 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 2 กรัม และปริมาตรของสารละลาย 50 มิลลิลิตร ได้ผลการทดลองของการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะสูงมากกว่าร้อยละ 80 ทั้งเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กสูงสุด ร้อยละ 97.94 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 98.15 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นกัน ทั้งนี้รายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.1 – ค.2) ในส่วนผลการทดลองของการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ ภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.3 – ค.4) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด ที่ความเข้มข้นของสารละลายแมงกานีสเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมือนกับการทดลองของตะกั่ว แต่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ ร้อยละ 86.10 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็ก จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของตะกั่ว คือ ร้อยละ 98.16



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว
ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ

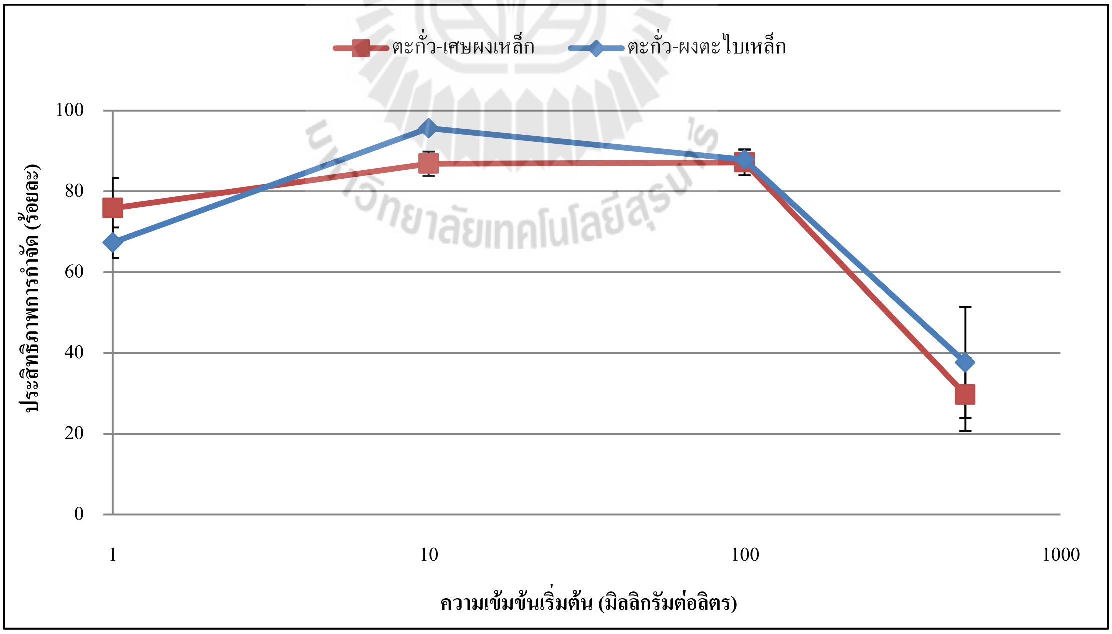


รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส
ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ

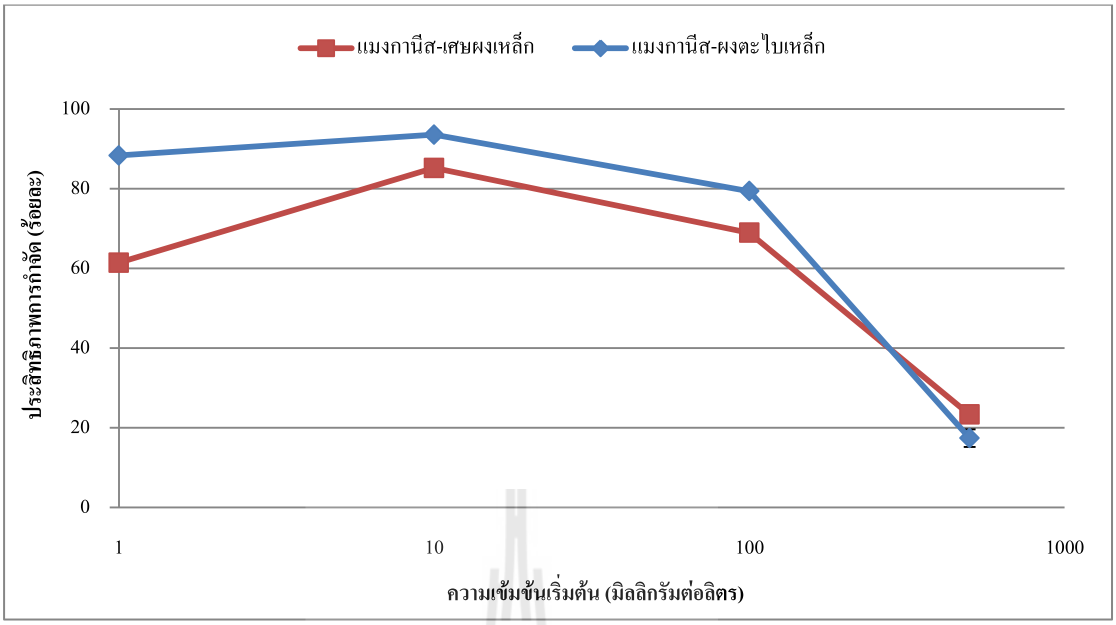
ทั้งนี้ เมื่อสังเกตแนวโน้มของเส้นกราฟจะพบว่า กราฟมีลักษณะโค้งคือ มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นต่ำ และประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น จนความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นมีค่าสูงเกินไป ประสิทธิภาพการกำจัดก็จะลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Ponder et al. (2000) ที่ได้ศึกษาการบำบัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ดัดแปร (Iron-on-resin Ferragel) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang, Lin et al. (2010) ที่ได้ศึกษาการบำบัดตะกั่วโดยใช้ดินขาว (Kaolin) และเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สังเคราะห์ (K-nZVI) ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดลองในความเข้มข้นต่ำ ๆ จะไม่สอดคล้องกัน แต่ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ คือ การทดลองนี้ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 40 กรัมต่อลิตร ส่วนการศึกษาของ Ponder et al. ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 1 กรัมต่อลิตร ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงสุดจะเกิดที่สภาวะเหมาะสมระหว่างความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นกับปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ เนื่องจากขีดความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) จะมีค่าเหมาะสมที่สภาวะหนึ่ง นอกจากนี้ในผลการทดลองของการกำจัดแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็ก พบว่าที่ความเข้มข้นแมงกานีสเริ่มต้นต่ำ ๆ จะมีประสิทธิภาพเพียง ร้อยละ 58.26 อาจจะเนื่องจากเศษผงเหล็กมีแมงกานีสเจือปนอยู่ด้วย ทำให้หากใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มาก ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจึงมีค่าน้อย

นอกเหนือจากนั้น ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน (2543) ได้กำหนดคุณภาพน้ำใต้ดินต้องมี ตะกั่ว ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะพบว่าการกำจัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นที่ได้ทำการทดลองนี้จะไม่สามารถบำบัดให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินได้ เนื่องจากความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นที่ได้ทดลองที่ค่าสูงมาก ส่วนการกำจัดแมงกานีสจะสามารถบัดบัดให้ผ่านมาตรฐานได้ที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้จากการสืบค้นข้อมูลปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ยังไม่พบข้อมูล แต่จากการรวบรวมข้อมูลของ ประสิทธิ์ อ่อนจันทร์ (2551) พบว่า ในประเทศไทยการปนเปื้อนตะกั่วในแม่น้ำ 34 สาย มีค่าความเข้มข้นสูงสุด 15.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ จะมีแมงกานีส 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และอาจมากถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแหล่งน้ำบริเวณเหมืองแร่ หรือบริเวณพื้นที่ที่เป็นเหมือง

การทดลองในสารละลายผสม จะพบว่า ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสนั้น มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสารละลายตะกั่วหรือแมงกานีส คือ ประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าน้อย ที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นต่ำ และประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นจนสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นหนึ่ง จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดจึงจะลดลงตามความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ จากกราฟดังแสดงตามรูปที่ 4.12 ผลการพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ด้วยเศษผงเหล็กสูงสุด ร้อยละ 87.20 ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 95.63 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าแตกต่างจากการทดลองข้างต้น ในส่วนผลการทดลองของการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 4.13พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมือนกับการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 85.22 และประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสสูงสุดด้วยผงตะไบเหล็ก ร้อยละ 93.59 ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยรายละเอียดผลการทดลองได้แสดงใน ภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.5 – ค.8)



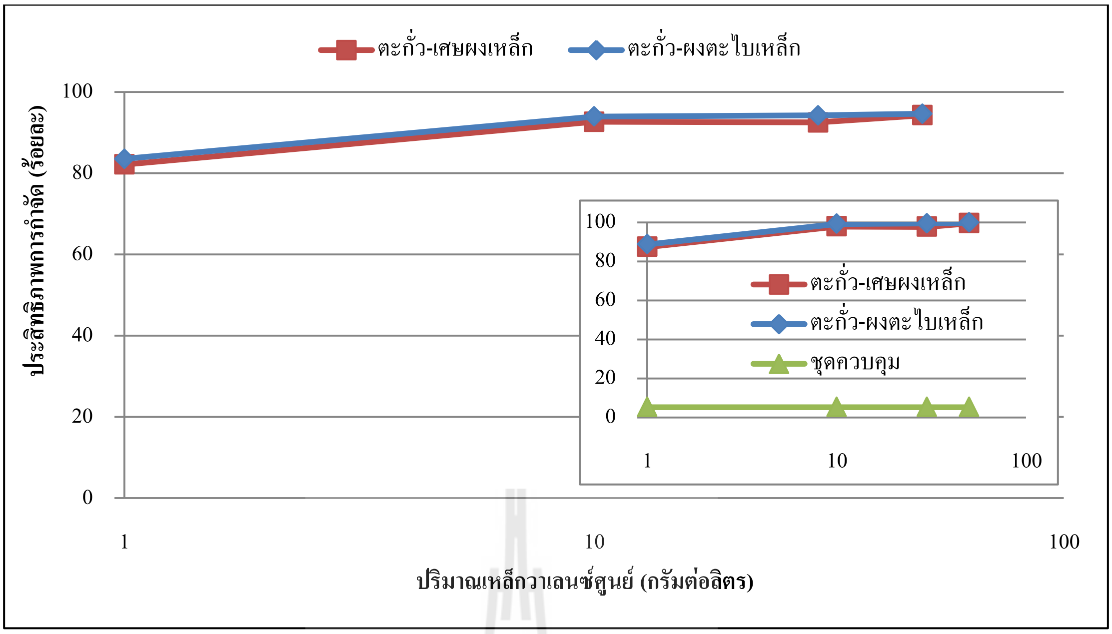
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม
ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม
ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่าง ๆ

4.2.4 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

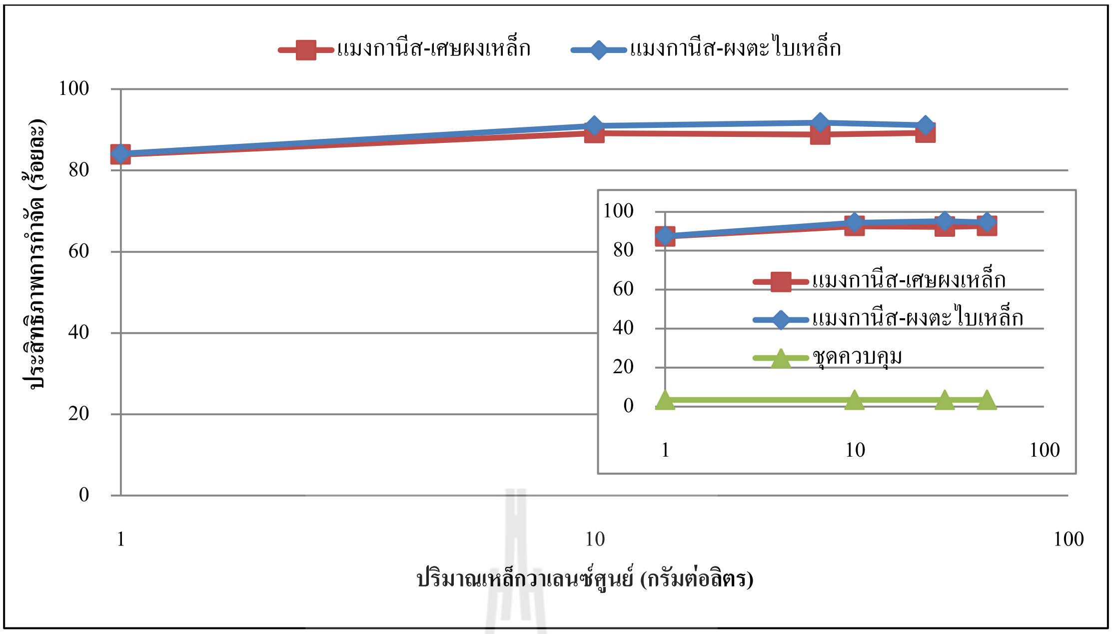
การศึกษาผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส โดยความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ทดลองคือ 1 10 30 และ 50 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองของการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าการทดลองจะมีชุดควบคุม คือ การทดลองที่ไม่เติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (ดังแสดงในกราฟย่อย) โดยรายละเอียดผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1 – ง.2) การกำจัดตะกั่วโดยใช้ทั้งเศษผงเหล็กหรือผงตะไบเหล็ก ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ 1 กรัมต่อลิตร จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (ค่าหลังการหักลบด้วยประสิทธิภาพการกำจัดของชุดควบคุม ดังแสดงในกราฟหลัก) ต่ำสุดที่ประมาณ ร้อยละ 80 จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด ร้อยละ 94.26 ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก ร้อยละ 94.61 เป็นค่าสูงสุด ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 50 กรัมต่อลิตร เช่นกัน



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว
ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ

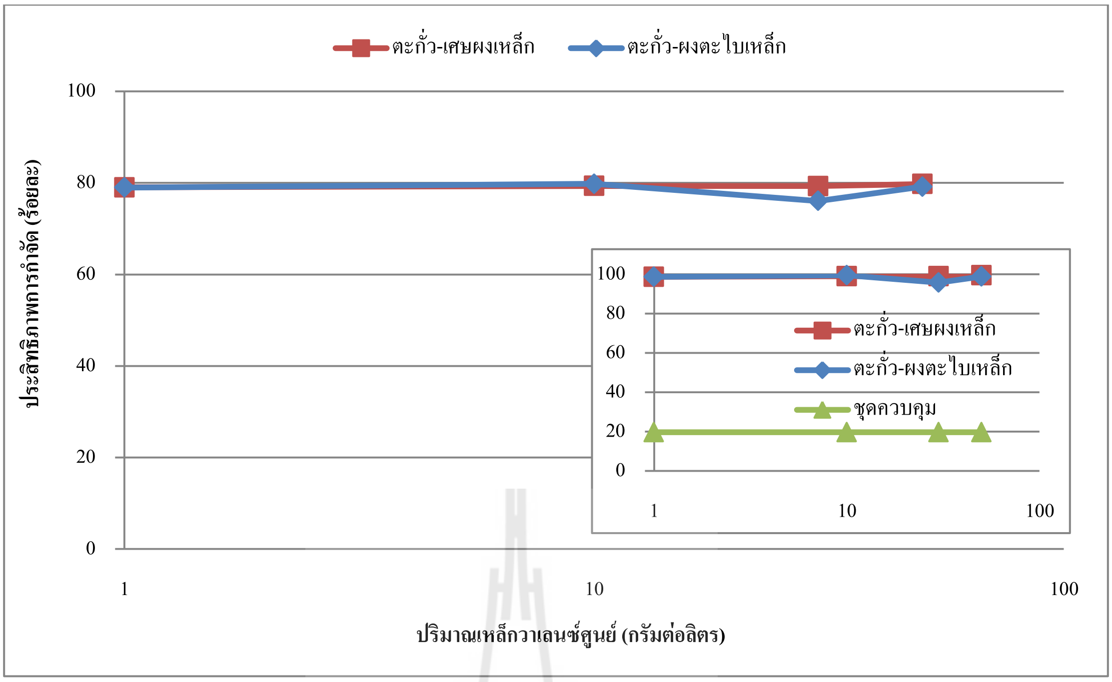
สำหรับการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็กนั้น พบว่าผลการทดลองจะคล้ายกับการกำจัดตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ ภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.3 – ง.4) คือ ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 89.25 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 91.78 แต่ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 30 กรัมต่อลิตร

แนวโน้มผลการทดลองการกำจัดโลหะหนักที่เกิดจากปัจจัยปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ คือ ยิ่งใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มาก ความสามารถในการกำจัดยิ่งเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าสูงสุดของขีดจำกัดความสามารถ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการกำจัดมีค่าคงที่สูงสุดประมาณค่าหนึ่ง (Zhang, Lin et al., 2010) หากเพิ่มปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ไปมากกว่าขีดจำกัดความสามารถนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดก็จะไม่สามารถเพิ่มสูงขึ้นได้อีก จึงเป็นการสิ้นเปลืองเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ผลการศึกษาของ Ponder et al. (2000) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุด โดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ปริมาณ 1.75 กรัมต่อลิตร ผลการศึกษาเพิ่มเติมของ Zhang, Lin et al. (2010; 2011) พบว่า หากใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 10 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงถึง ร้อยละ 96 และถ้าใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 5 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 90.1

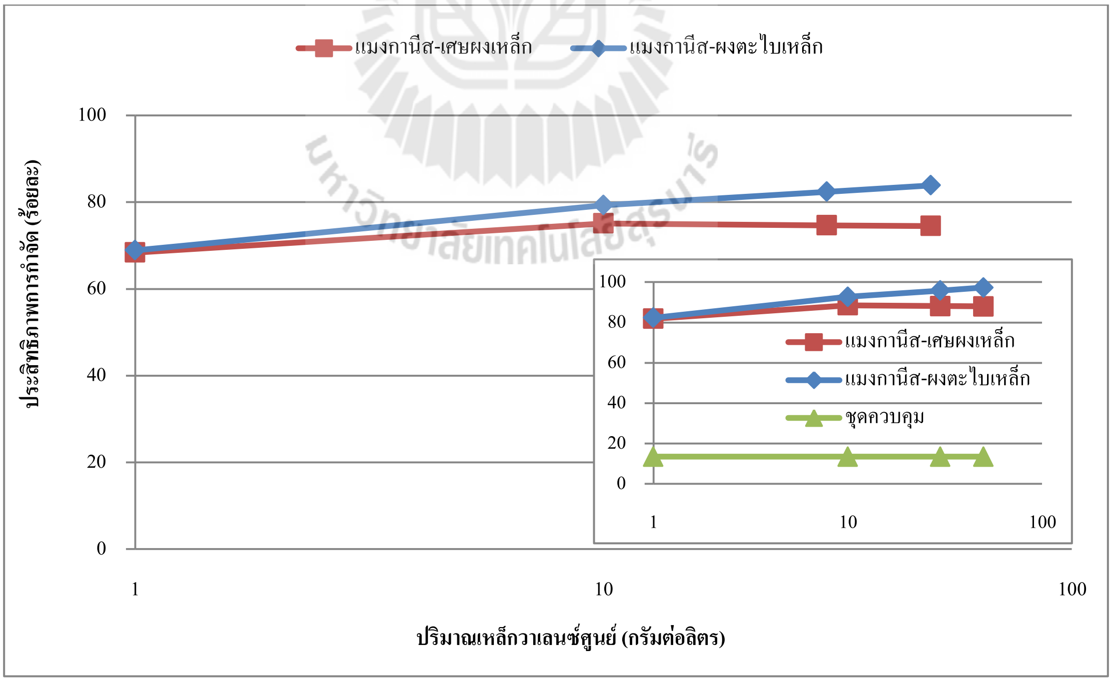


รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส
ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ

สำหรับการศึกษาผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายผสม ได้ผลการทดลอง ดังแสดงตามรูปที่ 4.16 และ 4.17 และรายละเอียดผลการทดลองดังแสดงใน ภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.5 – ง.8) พบว่า ผลการทดลองนั้น มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสารละลายตะกั่วหรือแมงกานีส คือ การกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมด้วยเศษผงเหล็ก จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุด ร้อยละ 79.75 โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองในสารละลายตะกั่ว แต่ค่าสูงสุดของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก จะเกิดที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 10 กรัมต่อลิตร ได้ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 79.79 และในส่วนผลการทดลองการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสมด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก คือ ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 10 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 75.08 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 83.86 แต่ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้จะพบว่าจากผลการทดลองของชุดควบคุมจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเกือบถึงร้อยละ 20 หมายความถึงว่า สารละลายผสมมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้น ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กจะเพิ่มเป็นร้อยละ 99.49 และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กจะเพิ่มเป็นร้อยละ 99.53



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม
ที่ปริมาณเหล็กกวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ

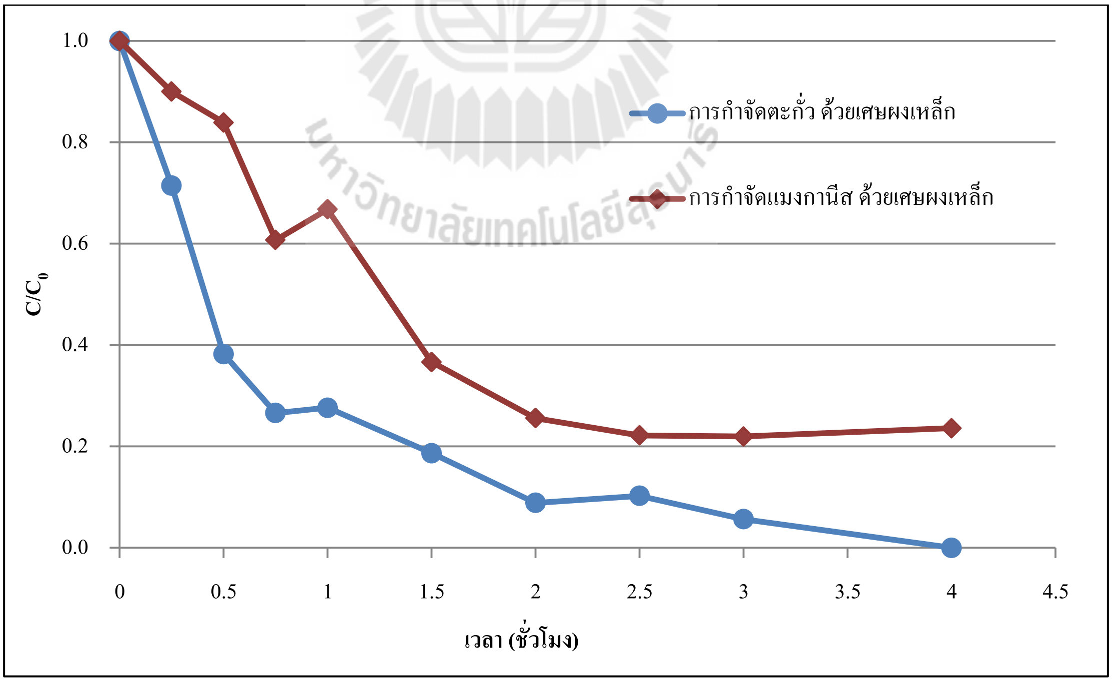


รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม
ที่ปริมาณเหล็กกวาเลนซ์ศูนย์ต่าง ๆ

4.2.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

จลนพลศาสตร์ หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยา สามารถอธิบายได้ด้วย กฎอัตรา ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยที่จะทราบอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยการหาค่าลำดับของปฏิกิริยา

ดังนั้นจึงนำผลการทดลองการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจากเริ่มต้นการทดลองจนถึงเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) ที่ระยะเวลา 240 นาที ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที จากผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (C/C_0) กับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.18 และนำผลการทดลองดังกล่าวไปหาค่าจลนพลศาสตร์การบำบัด โดยศึกษาสมการ Pseudo first order และ Pseudo second order ตามสมการที่ 3.5 และ 3.7 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ ได้ผลการศึกษาตามตารางที่ 4.2 พบว่าจลนพลศาสตร์การบำบัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กจะสอดคล้องกับ Pseudo first order ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ลำดับปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบเท่า (Pseudo-first-order kinetics) (Helland et al., 1995; Komnitsas et al., 2007) ส่วนจลนพลศาสตร์การบำบัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะสอดคล้องกับ Pseudo second order



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ความเข้มข้น (C/C_0) กับเวลา

ตารางที่ 4.2 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

พารามิเตอร์	Pseudo first order		Pseudo second order	
	k_1 (min^{-1})	R^2	k_2 (min^{-1} g mg^{-1})	R^2
ตะกั่ว-เศษผงเหล็ก	0.0148	0.9329	0.1262	0.9034
แมงกานีส-เศษผงเหล็ก	0.0097	0.9477	0.0233	0.9502

4.2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ความสามารถในการกำจัด (Removal capacity) คือค่าสูงสุดระหว่างปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ ดังนั้นจึงนำผลการทดลองจากการหาค่าปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้มาศึกษาตามสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) (สมการที่ 3.8) และสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) (สมการที่ 3.9) โดยแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ฉ ได้ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลของค่าที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับดังกล่าว

ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

พารามิเตอร์	Freundlich Adsorption Isotherm			Langmuir Adsorption Isotherm		
	R^2	n	K	R^2	q_m (mg/g)	K_{ads}(L/mg)
ตะกั่ว-เศษผงเหล็ก	0.8672	0.8230	3.5043	0.7955	8.2034	0.4826
ตะกั่ว-ผงตะไบเหล็ก	0.9679	1.0317	8.1809	0.9033	12.5156	0.8170
แมงกานีส-เศษผงเหล็ก	0.8383	0.1676	0.0002	0.4566	-1.4665	-0.1172
แมงกานีส-ผงตะไบเหล็ก	0.8639	0.2746	0.0261	0.4474	-3.2268	-0.1123

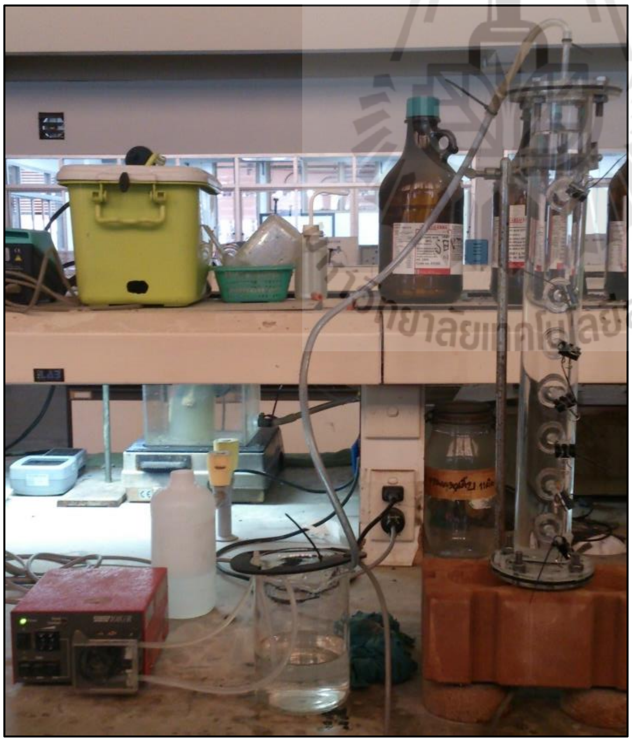
พบว่า การกำจัดทั้งตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ให้ค่า R^2 จากไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชสูงกว่าไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ซึ่งไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชจะเป็นสมการที่แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับได้หลาย ๆ ชั้น (Multilayer) ซ้อนทับกัน โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเกิดได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี หมายถึงเป็นการดูดซับที่เกิดทั้งจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน และเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลด้วย (Sawyer, 2003) ดังนั้น การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับตะกั่วและแมงกานีส เป็นกระบวนการกักโมเลกุลสารละลายมลทินซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของเหล็ก

วาเลนซ์ศูนย์ โดยการเกาะจับจะมี Driving force อยู่ 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกำจัดจากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ พบว่า การกำจัดตะกั่วโดยใช้ผงตะไบเหล็ก ให้ค่าสูงสุด เท่ากับ 12.5156 มิลลิกรัม (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผงตะไบเหล็กมีความสามารถในการกำจัดได้ดีกว่าเศษผงเหล็ก ที่มีค่าเท่ากับ 8.2034 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้น่าจะเกิดจากปัจจัยหลักคือ ขนาดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่ละชนิดที่จะส่งผลถึงพื้นที่ผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสมีผลต่อความสามารถในการกำจัดโดยตรง (Cissoko et al., 2009) โดยผงตะไบเหล็กที่ใช้มีขนาดน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.1169 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนเศษผงเหล็กที่ขนาด 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.2883 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการพัฒนาเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ให้เป็นวัสดุนาโนโดยการรีดิวซ์ด้วยโบโรไฮไดรด์ (Borohydride reduction method) (Ponder et al., 2000) เพื่อเพิ่มศักยภาพในการกำจัดสารปนเปื้อน จากการศึกษาของ Arancibia-Miranda et al. (2014) ได้ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ขนาดนาโน (nZVI) ในการกำจัดของ Pb^{2+} จากสารละลาย โดยผลของค่าความสามารถในการกำจัดจาก Langmuir model เท่ากับ 50.31±2.36 และ 32.85±3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 6 และ 4 ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Zhang et al. (2013) สามารถเพิ่มค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงถึง 1,667 มิลลิกรัมต่อกรัม ด้วยกลไกการตกตะกอนทางเคมีร่วม (Co-precipitation) การดูดซับ (Adsorption) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction)

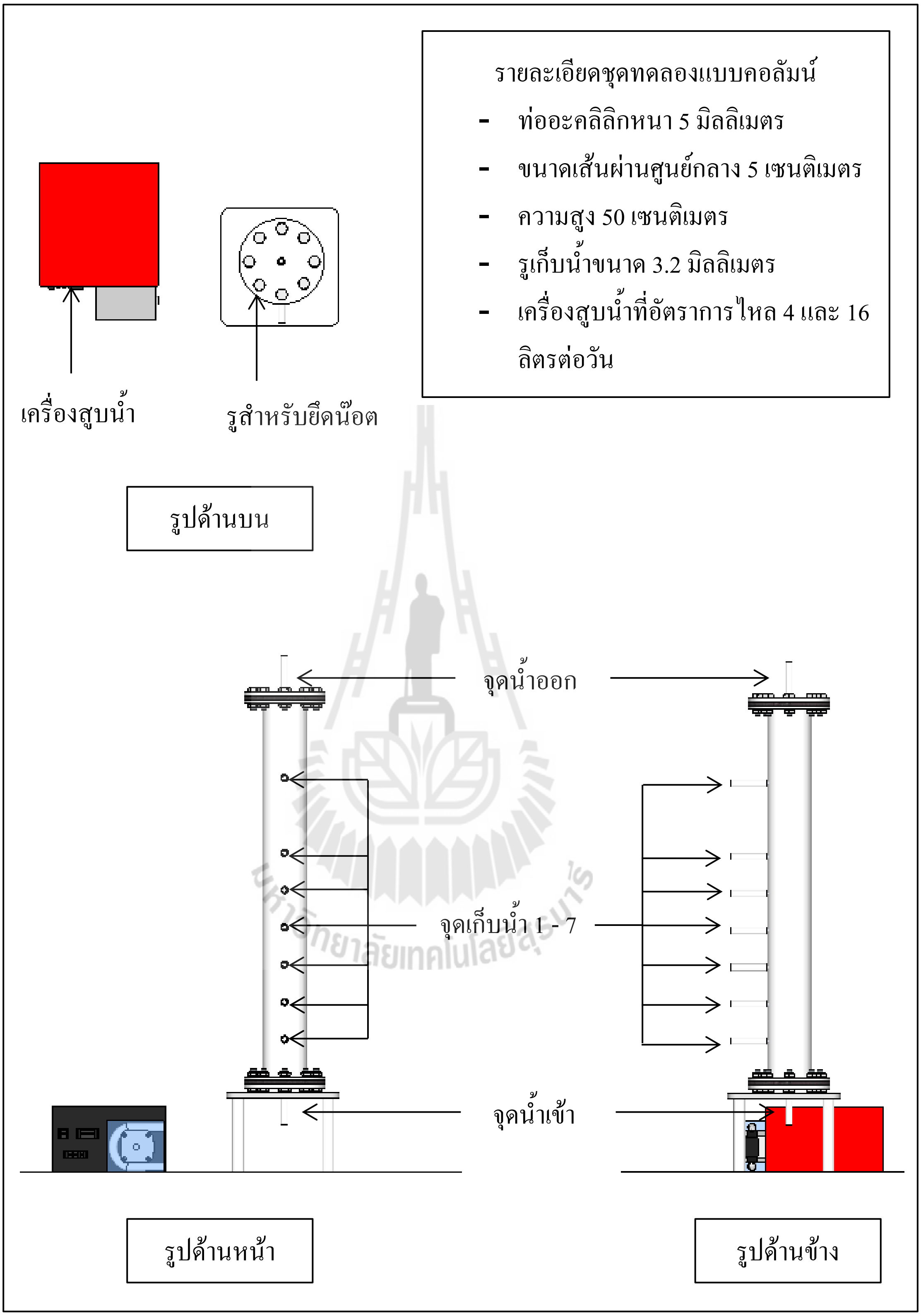
จากผลการทดลองแบบกะทั้งหมดพบว่า กลไกการบำบัดตะกั่วด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์น่าจะประกอบด้วย 3 กลไกหลัก ได้แก่ การดูดซับ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน และการตกตะกอนผลึก ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดกลไกทั้งสาม ได้โดยอาศัยผลการทดลอง ดังนี้ การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่เกิดจากกลไกการดูดซับสามารถยืนยันได้โดยอาศัยไอโซเทอร์มการดูดซับที่กล่าวแล้วข้างต้น ส่วนกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันและการตกตะกอนผลึกนั้น จะเกิดขึ้นควบคู่กับกลไกการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทั้งนี้การแยกกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันหรือการตกตะกอนผลึกออกจากกลไกการดูดซับนั้น จากผลการทดลองจะยังไม่สามารถแยกกลไกได้ ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง คือ เครื่อง XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) (Zhang et al., 2013) เพื่อแสดงองค์ประกอบบนพื้นผิว ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นหลังการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเกิดเหล็กในรูปต่าง ๆ เช่น $Fe(OH)_3$ FeOOH และ Fe_3O_4 เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถแยกหรือระบุกลไกการบำบัดระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันและการตกตะกอนผลึกได้ โดยที่หากพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็น $Fe(OH)_3$ จะเกิดกลไกการตกตะกอนผลึกขึ้น ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และตะกั่วดังสมการที่ 2.29 แต่หากเกิดเป็น FeOOH ขึ้น กลไกที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และตะกั่วดังสมการที่ 2.30 ทั้งนี้การศึกษาดังกล่าวจะอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษาในครั้งนี้

4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เศษผงเหล็ก

การทดลองแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะการไหลของน้ำโดยไหลผ่านชั้นตัวกลางที่อยู่กับที่ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการกรอง เรียกว่าเป็นแบบ Fixed – bed column และมีการไหลแบบไหลขึ้นคือไหลต้านแนวโน้มถ่วง ซึ่งการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์จะอ้างอิงตามการแนะนำของ U.S. EPA (1998) ดังนั้นจึงใช้ชุดคอลัมน์การทดลอง ตามรูปที่ 3.3 โดยมีการติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์จริงดังแสดงรูปที่ 4.19 และมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.20 ก่อนเริ่มการศึกษาเพื่อทดลองปัจจัยที่มีผลต่าง ๆ จะทำการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study) เพื่อหาระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity: K) ของตัวกลาง จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผล 3 ปัจจัย ได้แก่ ผลของความเร็วการไหล ผลของสัดส่วนระหว่างเศษผงเหล็กและทราย และผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และจากนั้นศึกษาถึงความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการออกแบบ PRB นอกจากนั้นยังศึกษาไปถึงผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ



รูปที่ 4.19 การติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.20 รายละเอียดชุดทดลองแบบคอลัมน์

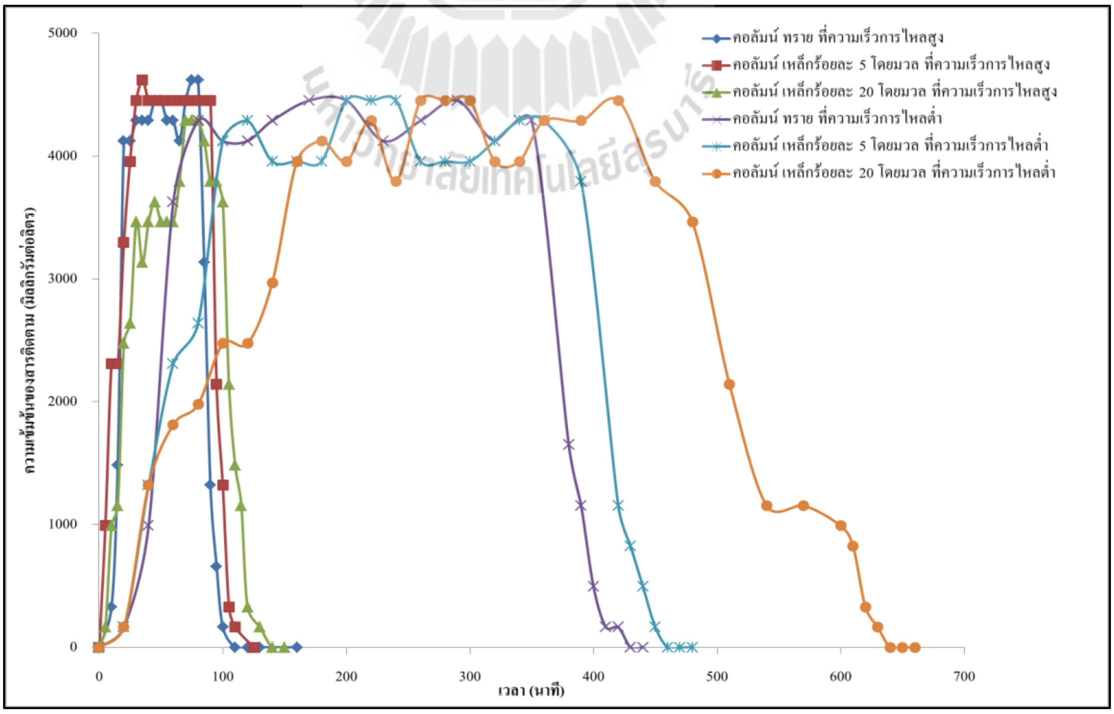
ทั้งนี้ จากผลการทดลองแบบกะพบว่า ผงตะไบเหล็กมีความสามารถในการกำจัดทั้งตะกั่วและแมงกานีสได้ดีกว่าเศษผงเหล็ก แต่จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเกิดการอุดตันขึ้นทันทีถึงแม้จะใช้ผงตะไบเหล็กเพียงร้อยละ 5 โดยมวลก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจากผงตะไบเหล็กที่ใช้มีขนาดน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร โดยที่วัสดุตัวกลางใน PRB ต้องมีขนาดไม่เล็กจนเกินไป ซึ่งมักจะเกิดการอุดตันที่ชั้นเกิดปฏิกิริยาในระบบ PRB ได้ง่าย (Jun et al., 2009) ดังนั้นในการทดลองแบบคอลัมน์จึงเลือกใช้เศษผงเหล็กในการดำเนินการทดลองทั้งหมดแทนผงตะไบเหล็ก

รูปที่ 4.21 การทดลองชุดคอลัมน์โดยใช้ผงตะไบเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์

4.3.1.1 การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study)

การศึกษาสารติดตามเพื่อใช้ประเมินหาระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) ซึ่งการทดลองจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22 และภาคผนวก ช ซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบที่ความเร็วการไหลต่ำและสูง โดยใช้ชุดคอลัมน์ทราย ทรายผสมเหล็กร้อยละ 5 และร้อยละ 20 โดยมวล จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาระยะเวลากักเก็บ ตามสมการของ Levenspiel (1972) ดังสมการที่ 3.1 จะได้ระยะเวลากักเก็บและอัตราการไหลจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าชุดคอลัมน์ทรายที่ความเร็วการไหลสูง มีค่าระยะเวลากักเก็บเท่ากับ 0.87 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าชุดคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล (0.91 ชั่วโมง) และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล (1.07 ชั่วโมง) และที่ความเร็วการไหลสูง ชุดคอลัมน์ทรายมีเวลากักเก็บน้อยกว่าชุดคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล เช่นกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเวลากักเก็บตามทฤษฎีแล้ว พบว่าเวลากักเก็บส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกันมากกว่าร้อยละ 90 ยกเว้นเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลต่ำจะมีค่าต่างกันอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 ส่วนค่าอัตราการไหลจริงของชุดคอลัมน์ทรายที่ความเร็วการไหลสูงจะเท่ากับ 27.08 ลิตรต่อวัน ซึ่งมีค่ามากกว่าชุดคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล (25.89 ลิตรต่อนาที) และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล (22.02 ลิตรต่อนาที) ซึ่งที่ความเร็วการไหลต่ำก็เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของสารติดตามที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 เวลากักเก็บและอัตราการไหลจริงของชุดทดลองคอลัมน์

คอลัมน์	เวลากักเก็บ (ชม.)		อัตราการไหล	ความเร็วการไหล
	ทฤษฎี	จริง	จริง (ลิตรต่อวัน)	(ซม./วินาที)
ทราย ที่ความเร็วการไหลต่ำ	3.71	3.60	6.55	3.86×10^{-3}
เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลต่ำ	3.83	4.01	5.88	3.46×10^{-3}
เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลต่ำ	4.01	5.89	4.00	2.36×10^{-3}
ทราย ที่ความเร็วการไหลสูง	0.96	0.87	27.08	1.60×10^{-2}
เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลสูง	0.96	0.91	25.89	1.53×10^{-2}
เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลสูง	1.00	1.07	22.02	1.30×10^{-2}

4.3.1.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลาง

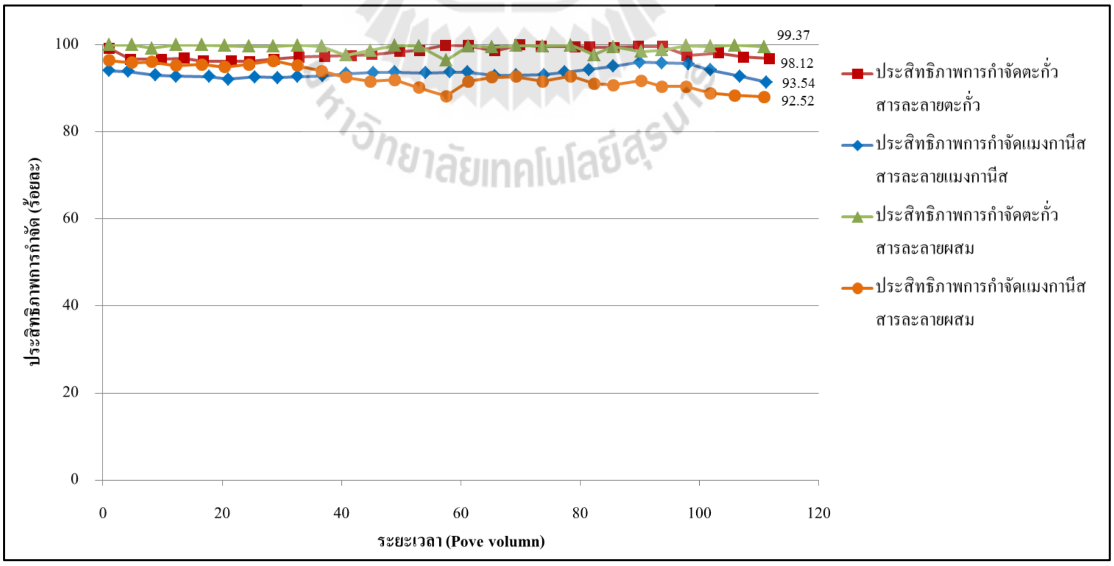
ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (Hydraulic conductivity: K) ของตัวกลางเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งในด้านการยอมให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวกลาง ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวกลาง จะอาศัยความสัมพันธ์จากสมการดาร์ซี เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ นอกจากนี้การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านยังใช้ในการคำนวณหาค่าความพรุนได้อีกด้วย (Cissoko et al., 2009) โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ของทราย เท่ากับ 1.07×10^{-3} เมตรต่อวินาที เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล เท่ากับ 4.17×10^{-4} เมตรต่อวินาที และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล เท่ากับ 1.41×10^{-4} เมตรต่อวินาที ซึ่งตัวกลางที่มีค่า K อยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-5} คือ ทรายหยาบ (Coarse sand) (Heath, 1983) แสดงให้เห็นว่า ตัวกลางทั้งหมดจะมีการซึมผ่านได้ในระดับปานกลาง ส่วนค่าความพรุน (Porosity) พบว่าทราย ขนาด 0.85 – 2.00 มิลลิเมตร มีความพรุน 0.63 เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล มีความพรุน 0.65 และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล มีความพรุน 0.68 จะเห็นได้ว่าปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น คล้ายกับการศึกษาของ Lien, and Wilkin (2005) ที่ปริมาณเหล็กร้อยละ 50 มีความพรุนเท่ากับ 0.55 และที่เหล็กร้อยละ 100 มีความพรุน 0.73 แต่อีกงานวิจัยพบว่าปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความพรุนลดลง คือ เหล็กร้อยละ 10 มีความพรุน 0.69 ส่วนเหล็กร้อยละ 50 มีความพรุน 0.67 (Calabrò et al., 2012) ทั้งนี้ต้องขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น ความคละกันดีของวัสดุผสม เป็นต้น

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity; K) ของตัวกลาง

ตัวกลาง	K (เมตรต่อวินาที)	ความพรุน
ทราย ขนาด 0.85 – 2.00 มิลลิเมตร	1.07×10^{-3}	0.63
เหล็กขนาด 0.15 -0.25 มิลลิเมตร ร้อยละ 5 โดยมวล	4.17×10^{-4}	0.65
เหล็กขนาด 0.15 -0.25 มิลลิเมตร ร้อยละ 20 โดยมวล	1.41×10^{-4}	0.68

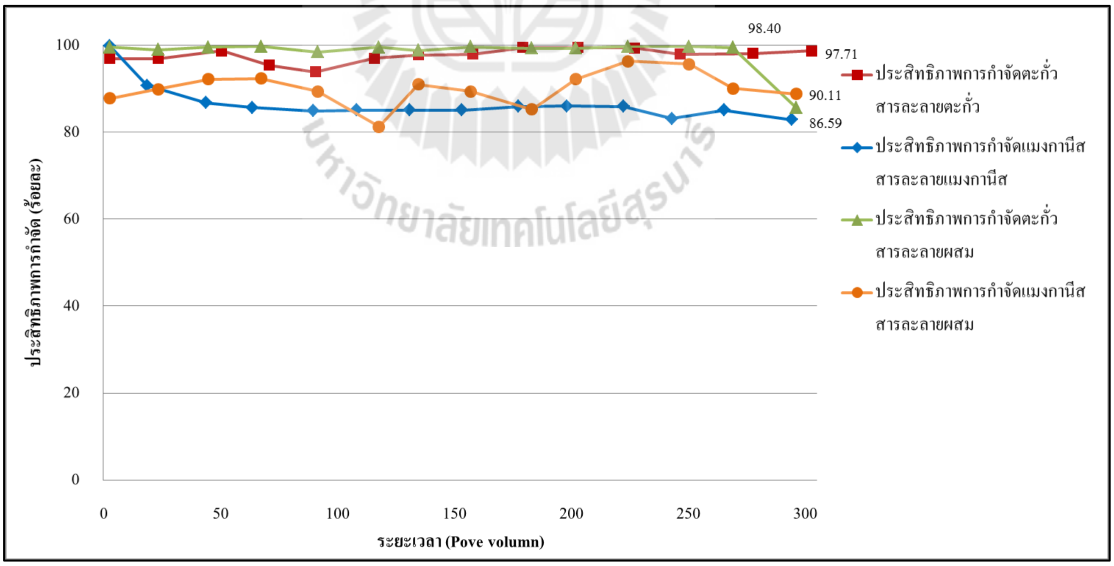
4.3.2 ผลของความเร็วการไหล

ความเร็วการไหลที่ใช้ในการศึกษา มี 2 ค่า คือมีความเร็วการไหลต่ำและสูง ซึ่งอยู่ในช่วง 10^{-2} – 10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ที่มีการซึมผ่านได้ดีในระดับปานกลาง (Semi - Pervious) (Bear, 1972) เพื่อไม่ทำให้เกิดการอุดตันในวัสดุตัวกลางและให้ได้ Breakthrough curve ในเวลาอันเร็ว โดยออกแบบการทดลองคือ ใช้คอลัมน์ที่บรรจุเหล็กต่อทรายที่ร้อยละ 20 โดยมวล และค่าความเข้มข้นของสารละลายมลทินเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองความเร็วการไหลต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และรายละเอียดดังภาคผนวก ซ (ตารางที่ ซ.1 – ซ.4) แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายตะกั่ว แมงกานีสและสารละลายผสม ตามระยะเวลา (Pore volume: PV) ต่าง ๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงหมดระยะเวลาทำการทดลองที่ประมาณ 120 PV ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสก็ไม่ได้ลดลง ซึ่งการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 99.37 และตามด้วยการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว (ร้อยละ 98.12) การกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส (ร้อยละ 93.54) และการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม (ร้อยละ 92.52) ทั้งนี้การกำจัดสารมลทินที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างคงที่ในระยะเวลาดังกล่าว ยกเว้นการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม โดยที่ในช่วงแรกจะสูงจากนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

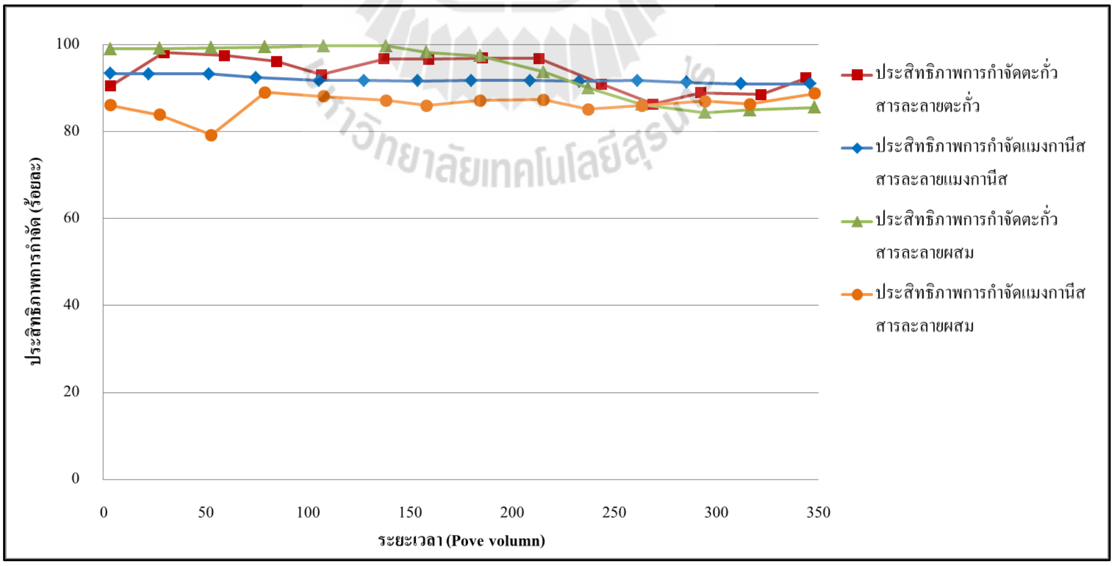
ส่วนความเร็วการไหลสูง ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และรายละเอียดดังภาคผนวก ซ (ตารางที่ ซ.5 – ซ.8) โดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุเหล็กต่อทรายเท่ากันคือที่ร้อยละ 20 โดยมวล และค่าความเข้มข้นของสารละลายมลทินเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสม จะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงใกล้เคียงกับความเร็วการไหลต่ำ คือประสิทธิภาพการกำจัดที่มากกว่าร้อยละ 90 (ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 97.71 และ 98.40 ตามลำดับ) แต่ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสม คือมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 86.59 และ 90.11 ตามลำดับนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดต่ำกว่าที่ความเร็วการไหลต่ำ แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีมีผลต่อการกำจัดตะกั่ว แต่จะมีผลต่อการกำจัดแมงกานีส ทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกในการกำจัดแมงกานีสไม่ได้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เพียงกลไกเดียวเหมือนการทดลองแบบกะ แต่จะเกิดจากการดูดติดบนตัวกลางผสม (ทรายและเศษผงเหล็ก) เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นกลไกในการดูดซับจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลง นอกจากนี้การกำจัดตะกั่วจากผลการทดลองดังกล่าวที่ใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ร้อยละ 20 โดยมวล จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 100 ที่ความเร็วการไหลต่ำ และร้อยละ 99.77 ที่ความเร็วการไหลสูง



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.3 ผลของสัดส่วนระหว่างเศษผงเหล็กและทราย

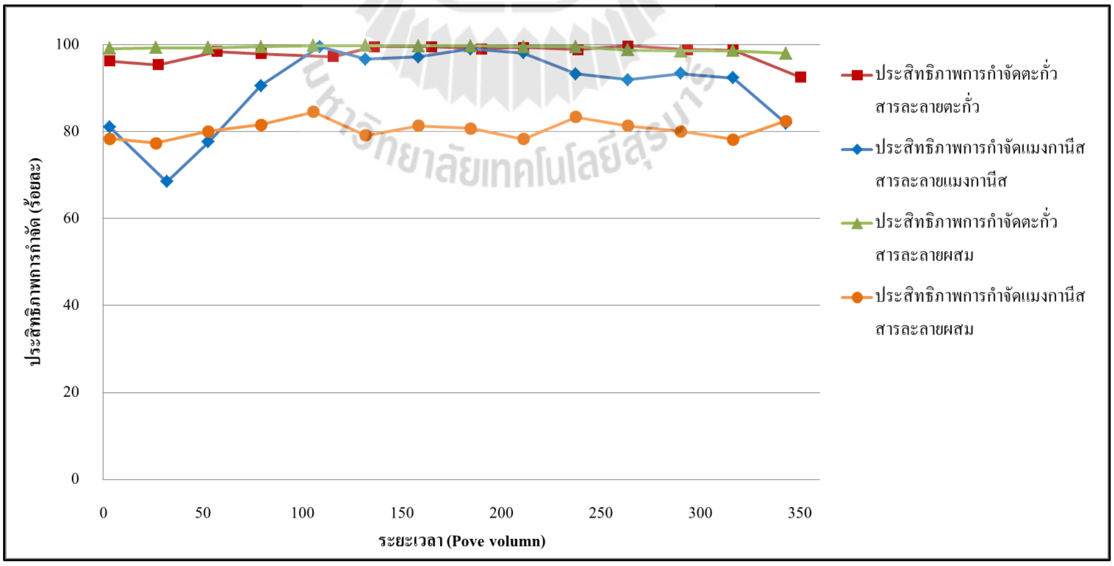
สัดส่วนระหว่างเหล็กกับทรายที่ใช้ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบนั้น มีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อไม่ให้ระบบเกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกัดกร่อนของเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกขึ้น จึงมีการนำทรายมาผสมเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว แต่การผสมทรายเข้าไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ดังนั้นจึงต้องหาสัดส่วนที่เหมาะสม ดังนั้นการทดลองจึงกำหนดศึกษา 2 สัดส่วน คือ ใช้เหล็กร้อยละ 5 และ 20 โดยมวล ใช้ความเข้มข้นของสารละลายมลทินเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วการไหลสูง ได้ผลการทดลองการใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ตามรูปที่ 4.25 และรายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ซ (ตารางที่ ซ.9 – ซ.12) พบว่า การกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสมจะเริ่มมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เมื่อปริมาณเหล็กที่ร้อยละ 5 โดยมวล คือมีประสิทธิภาพการกำจัดประมาณร้อยละ 100 ในช่วงแรก จากนั้นที่ระยะเวลาประมาณ 200 PV จะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จนเหลือประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงร้อยละ 80 - 90 ที่ระยะเวลาสุดท้ายในการทดลองประมาณ 350 PV ส่วนการกำจัดแมงกานีสทั้งในสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสม จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กที่ร้อยละ 20 โดยมวล ตามรูปที่ 4.24 คือมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 80 – 90 สรุปได้ว่า ปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นส่วนความสามารถในการกำจัดแมงกานีสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

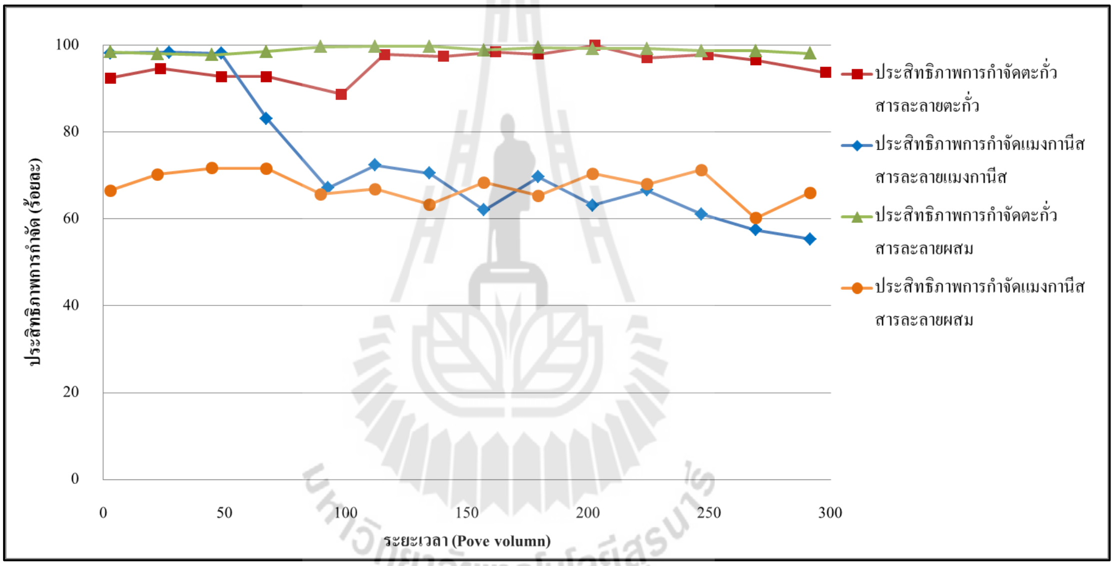
4.3.4 ผลของความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น

ความเข้มข้นของสารมลทินที่เข้าสู่ระบบจะมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับปริมาณเหล็กที่อยู่ในระบบด้วย โดยได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 5 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และดูผลการทดลองทั้งสัดส่วนของเศษผงเหล็กต่อทราย เป็นใช้เหล็กร้อยละ 5 และ 20 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ผลการทดลองความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 และรายละเอียดในภาคผนวก ซ (ตารางที่ ซ.13 – ซ.16) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสมจะสูงมากคือเกือบร้อยละ 100 แต่ในช่วงท้ายการทดลองที่ระยะเวลาประมาณ 350 PV ประสิทธิภาพการกำจัดจึงเริ่มมีค่าลดลง ส่วนการกำจัดแมงกานีสนั้น จะพบว่าในสารละลายแมงกานีส ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปกลับเห็นว่า แมงกานีสจะเริ่มลดลงที่ระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น แต่ในสารละลายผสมประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะมีค่าค่อนข้างคงที่ คือประมาณร้อยละ 80 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.25) จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้เบื้องต้นว่า ยังไม่เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดทั้งของตะกั่วและแมงกานีส แต่จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้นต่ำ ๆ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ดีกว่า



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้ยังมีการทดลองความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.27 และรายละเอียดในภาคผนวก ซ (ตารางที่ ซ.17 – ซ.20) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วยังคงสูงทั้งในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสม ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 100 แม้เพิ่มปริมาณเหล็ก แต่ในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณเหล็กในระบบเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า ปริมาณเหล็กที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณแมงกานีสในระบบไม่ลดลง ซึ่งหากเทียบกับการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล (รูปที่ 4.24) สามารถสรุปได้ว่า เมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณสารมลทินน้อย จะส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสในระบบไม่ลดลงหรืออาจมีเพิ่มขึ้น

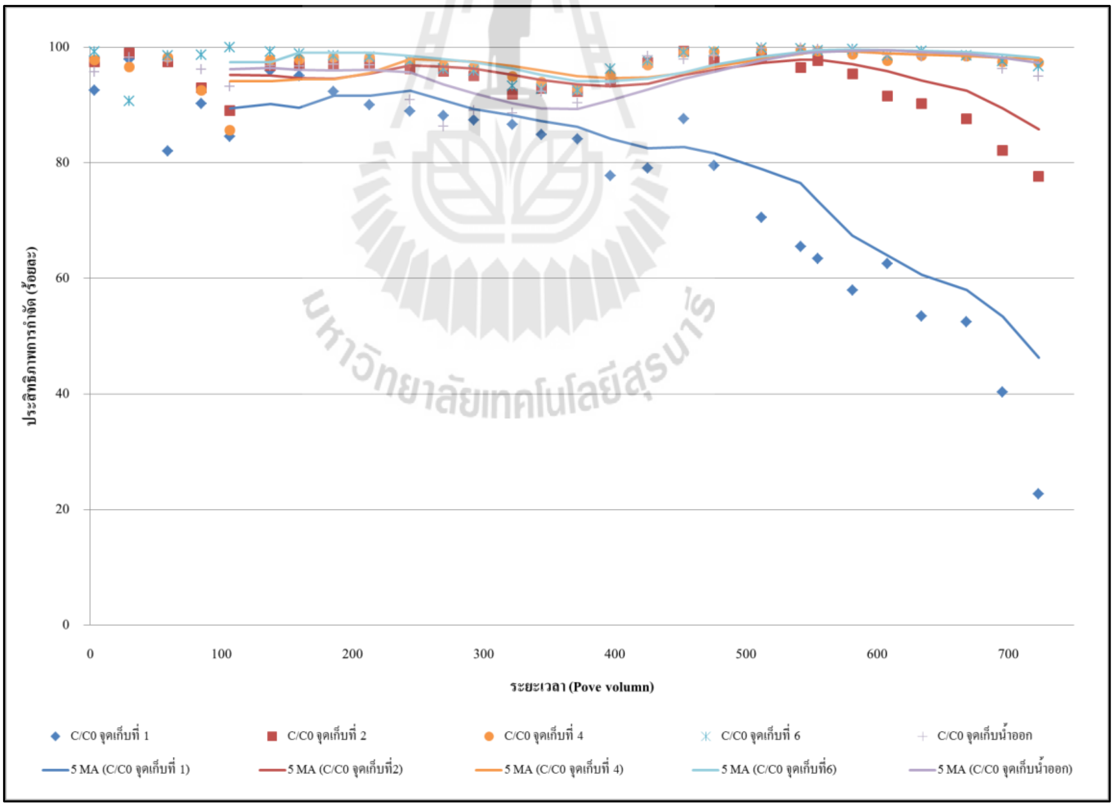


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วการไหล สัดส่วนของเหล็ก และความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น สรุปได้ว่า ความเร็วการไหลที่สูงกว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงได้เร็วกว่า และสัดส่วนของเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสมซึ่งต้องดูประกอบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลทินที่จะเข้าระบบด้วย โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดจะอยู่สูงสุดที่สัดส่วนของเหล็ก ต่อความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นค่าหนึ่ง

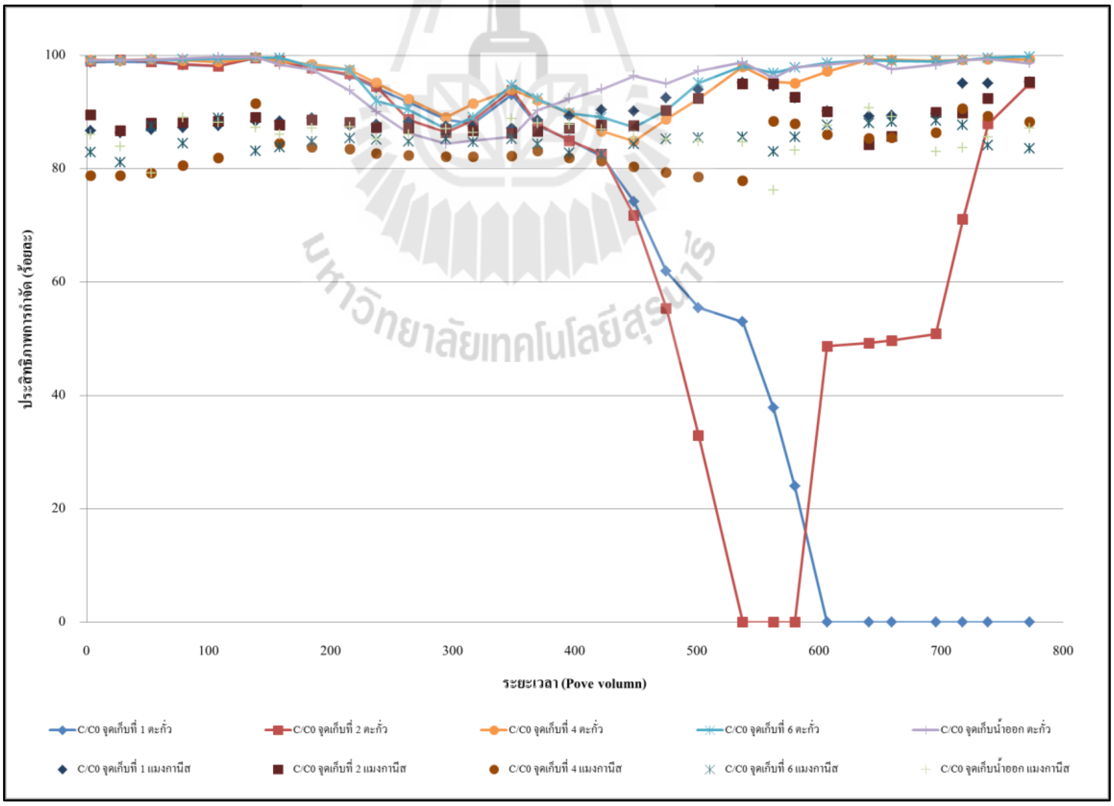
4.3.5 การศึกษาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

การศึกษา Breakthrough curve เพื่อหาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์นั้น จะอาศัยผลการทดลองทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลอง ก. ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.28 ชุดการทดลอง ข. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.29 และชุดการทดลอง ค. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.30 ซึ่งผลการทดลองได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลาต่าง ๆ ตามจุดเก็บน้ำทั้ง 8 จุด ตลอดความยาวของคอลัมน์ที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นดังแสดงตามรูปที่ 3.3 (รูปที่ 4.20) โดยมีรายละเอียดทั้งหมดดังแสดงในภาคผนวก ฌ แต่ในการนำเสนอกราฟผลการทดลอง ได้แสดงเพียง 5 จุดเก็บน้ำเท่านั้น ได้แก่ จุดเก็บที่ 1 2 4 6 และ จุดเก็บน้ำออก ซึ่งมีความยาวอยู่ที่ 5 10 20 30 และ 50 เซนติเมตร วัดจากจุดน้ำเข้า



รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

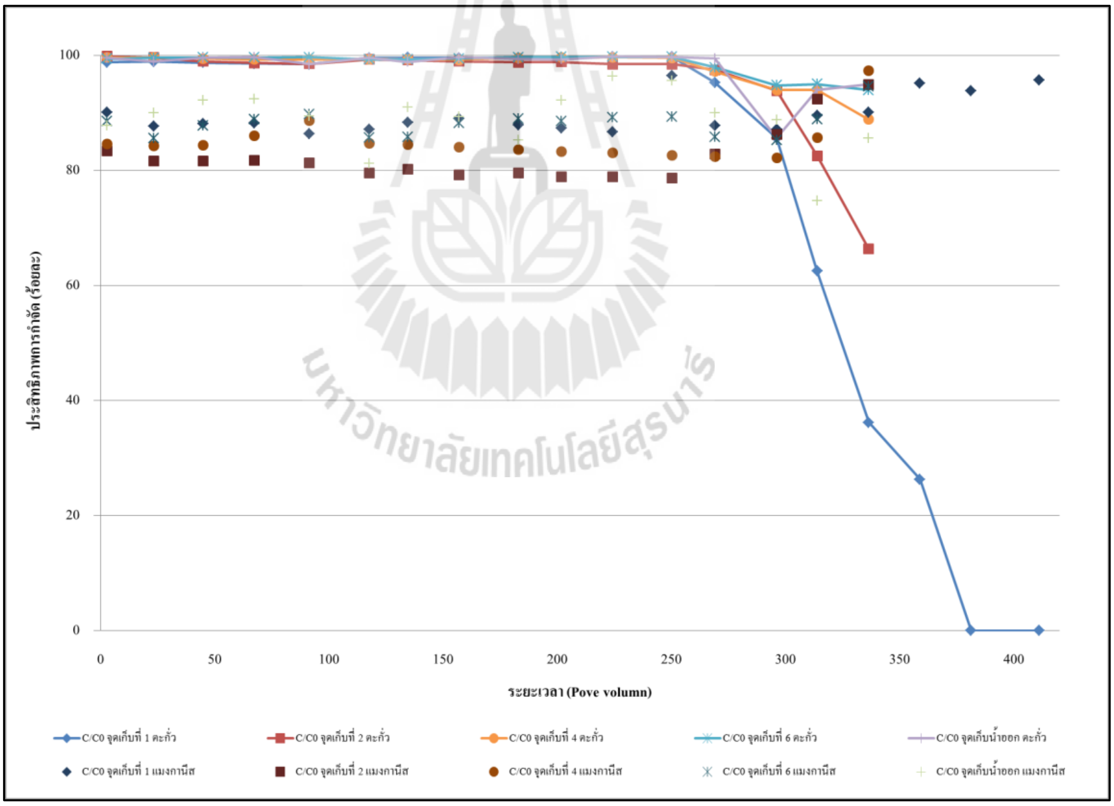
จากรูปที่ 4.28 แสดงความสามารถในการกำจัดตะกั่ว พบว่าในช่วงระยะเวลาประมาณ 350 PV ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว จากจุดเก็บน้ำทั้งหมด 5 จุด จะมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 80 หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นมากกว่า 350 PV ณ จุดเก็บน้ำที่ 1 คือที่ความสูง 5 เซนติเมตร เหนือจุดน้ำเข้า ประสิทธิภาพการกำจัดจะเริ่มลดลงจนมีประสิทธิภาพเหลือประมาณร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาประมาณ 700 PV ซึ่ง ณ จุดสิ้นสุดการทดลองดังกล่าวยังไม่ใช่จุดสิ้นสุดความสามารถในการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถนำไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับที่ถูกต้องได้ อย่างไรก็ตามยังสามารถอธิบายถึงลักษณะการบำบัดสารละลายตะกั่วด้วยคอลัมน์เศษผงเหล็กผสมทรายได้ กล่าวคือ สารละลายตะกั่วที่ผ่านการบำบัด ณ เวลาเริ่มต้นจะมีความเข้มข้นตะกั่วต่ำ ซึ่งตะกั่วส่วนใหญ่จะถูกบำบัดด้วยอนุภาคเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้งจากปฏิกิริยาทางเคมีและการดูดซับ นอกจากนั้นอาจเกิดการกรองด้วยทรายบางส่วน เมื่อสารละลายตะกั่วไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้น เหล็กจะเริ่มเกิดการหมดสภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจึงลดลง จนกระทั่งเหล็กหมดสภาพ ความเข้มข้นตะกั่วจะเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น ส่วนจุดเก็บน้ำอื่น ๆ ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงอยู่ ซึ่งแสดงว่ายังมีการบำบัดเกิดขึ้น



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดกับกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.29 แสดงความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายผสม พบว่าการกำจัดตะกั่วจะมีลักษณะเส้นกราฟคล้ายการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว ตามรูปที่ 4.28 แต่จุดที่แสดง Breakthrough curve จะเกิดที่จุดเก็บน้ำที่ 2 คือ ที่ความสูง 10 เซนติเมตร เหนือจุดน้ำเข้า ได้เร็วกว่าจุดเก็บที่ 1 ซึ่งน่าจะเกิดจากการอุดตัน (Clogging) จนทำให้เกิดการไหลลัดวงจร (Short Circuit) ขึ้น โดยจะเห็นว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเริ่มหมดสภาพ ที่ระยะเวลาประมาณ 400 PV จนกระทั่งเหล็กวาเลนซ์ศูนย์หมดสภาพที่จะบำบัดตะกั่ว ณ ระยะเวลาประมาณ 500 PV แต่ที่ 600 PV กลับมีความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ที่ระยะเวลามากกว่า 600 PV ณ จุดเก็บน้ำที่ 1 จะแสดง Breakthrough curve ขึ้น ส่วนการกำจัดแมงกานีสนั้นจะค่อนข้างคงที่

ดังนั้นที่จุดเก็บน้ำที่ 1 พบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเริ่มเกิดการหมดสภาพ ที่ระยะเวลาประมาณ 400 PV จนกระทั่งเหล็กวาเลนซ์ศูนย์หมดสภาพที่จะบำบัดตะกั่ว ณ ระยะเวลาประมาณ 600 PV ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความสามารถในดูดซับได้ต่อไป



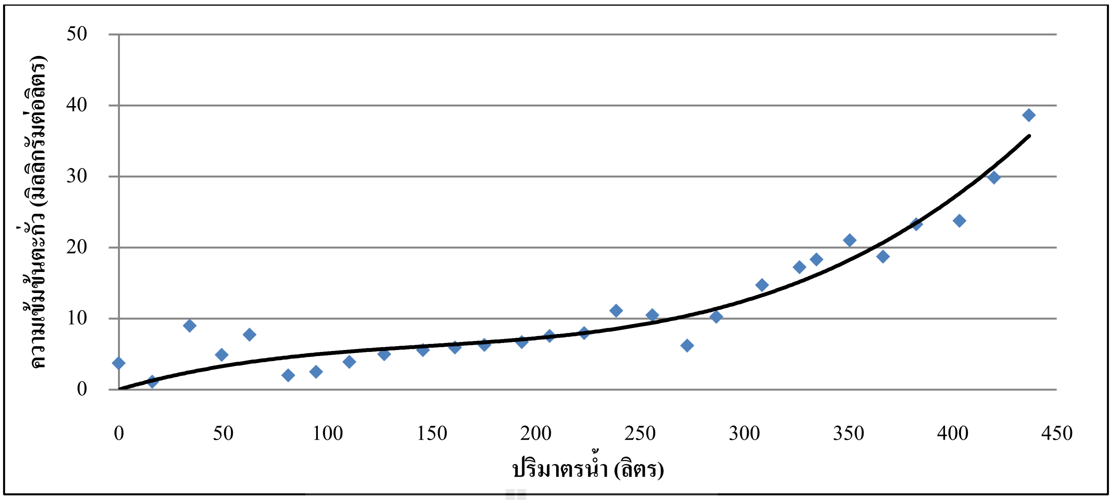
รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลา ที่จุดเก็บต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเร็วการไหลสูง ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.30 แสดงความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายผสม โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล พบว่าจุดที่แสดง Breakthrough curve จะเกิดที่จุดเก็บน้ำที่ 1 โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะสูงมาก ประมาณร้อยละ 100 จนถึงระยะเวลาที่ 250 PV เหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเริ่มเกิดการหมดสภาพ ประสิทธิการการกำจัดตะกั่วจะลดลง จนกระทั่งเหล็กวาเลนซ์ศูนย์หมดสภาพที่จะบำบัดตะกั่ว ที่ระยะเวลาประมาณ 380 PV ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะค่อนข้างคงที่คล้ายการทดลองก่อนหน้า (รูปที่ 4.29) คือมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ประมาณร้อยละ 80 – 90 และเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการกำจัดตะกั่วลดลงลงคือที่ระยะเวลาประมาณ 380 PV ทั้งนี้ที่ระยะเวลาประมาณ 340 PV จุดเก็บน้ำที่ 2 เป็นต้นไปเกิดการอุดตันขึ้น จึงไม่สามารถเก็บน้ำต่อไปได้

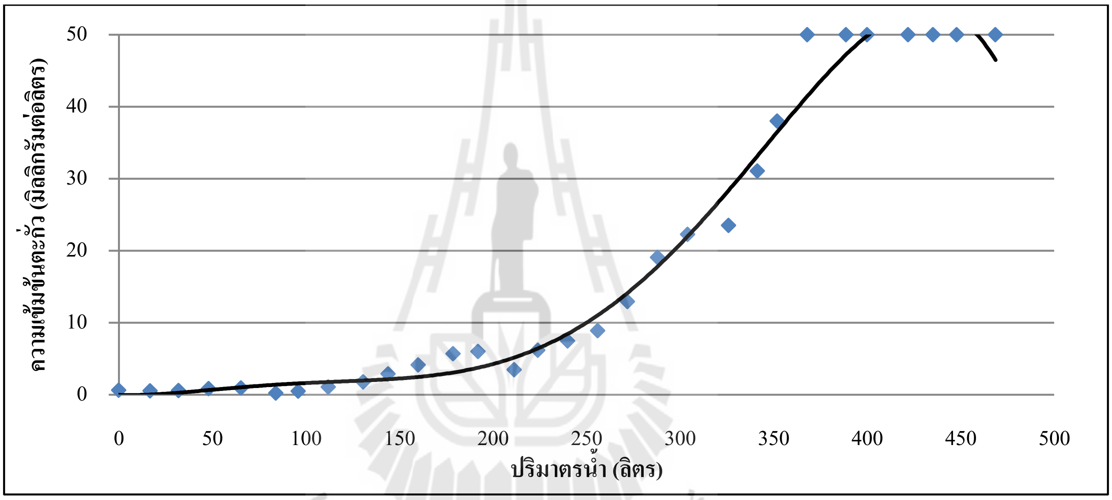
ดังนั้น จากผลการทดลองทั้ง 3 ชุดการทดลอง สรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว จะเริ่มหมดสภาพเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง และพบว่าปริมาณแมงกานีสในสารละลายผสมและปริมาณเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะคงที่จนกว่าปริมาณตะกั่วที่อยู่ในระบบลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจึงจะเพิ่มสูงขึ้น

ความสามารถในการดูดซับ

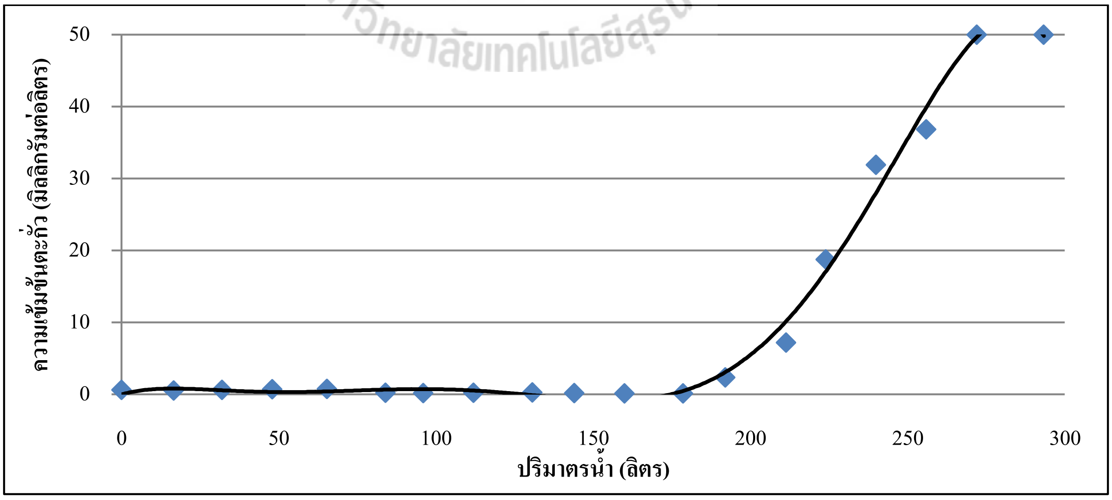
การหาค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางเป็นวัสดุผสมระหว่างเศษผงเหล็กกับทราย จะใช้จุดเก็บน้ำที่ 1 ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นจุดที่เกิด Breakthrough curve ดังนั้นจะได้กราฟผลการทดลอง Breakthrough curve ของ 3 ชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ประกอบด้วย ชุดการทดลอง ก. ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ชุดการทดลอง ข. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง และชุดการทดลอง ค. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ไปใช้ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity: q) ตะกั่ว โดยมีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ญ (ความสามารถในการดูดซับ) ซึ่งได้สรุปผลการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ประกอบไปด้วย 1) ระยะเวลาเบรคทรู (Breakthrough time; t_b) (วัน) คือเวลาที่ใช้จากเริ่มจนถึงน้ำออกเริ่มมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้หรือถึงจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) 2) จุดหมดสภาพ (Exhaustion point: C_E) (วัน) 3) ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ 4) ค่า Transport distribution coefficient ($K_{d,trans}$) (ลิตรต่อกรัม) คือปริมาณของมลสารที่สามารถถูกดูดซับโดยตัวดูดซับหาได้จากความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หารด้วยความเข้มข้นมลสาร (มิลลิกรัมต่อลิตร)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.31 Breakthrough curve (ก) ชุดการทดลองที่ ก (ข) ชุดการทดลองที่ ข (ค) ชุดการทดลองที่ ค

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดลองหาความสามารถการดูดซับตะกั่วของชุดทดลองคอลัมน์

ชุดทดลอง	กำหนดเงื่อนไข			ผลการทดลอง			
	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ร้อยละเหล็กโดยมวล	ความเร็วการไหล (ซม./วัน)	จุดเริ่มหมดสภาพ (วัน)	จุดหมดสภาพ (วัน)	ความสามารถการดูดซับ (มก./ก.)	$K_{d,trans}$ (ล./ก.)
ก.	50 (ตะกั่ว)	5	1,319	6	28	962.38	24.91
ข.	50 (ผสม)	5	1,319	10	24	1,114.18	22.28
ข.*	50 (ผสม)	5	1,319	10	23	1,139.74	29.99
ค.	50 (ผสม)	20	1,122	13	18	193.95	3.88

หมายเหตุ; ข.* คำนวณที่จุดหมดสภาพเดียวกับชุดทดลอง ก.

จากผลการทดลองหาความสามารถการดูดซับตะกั่วของชุดทดลองคอลัมน์ พบว่า ชุดการทดลอง ก. มีระยะเวลาเบรคทรูหรือจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) ที่ 6 วัน จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ที่ 28 วัน ซึ่งเป็นอายุการใช้งานของระบบ มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 962.38 มิลลิกรัม (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) และมีค่า $K_{d,trans}$ เท่ากับ 24.91 ลิตร (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) ชุดการทดลอง ข. มีจุดเริ่มหมดสภาพ ที่ 10 วัน อายุการใช้งาน ที่ 24 วัน ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม มีค่าเท่ากับ 1,114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม และ $K_{d,trans}$ เท่ากับ 22.28 ลิตรต่อกรัม จะเห็นว่า ในสารละลายผสมจะมีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงกว่า แต่ในชุดทดลอง ก. ยังไม่ได้ Breakthrough curve ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงคำนวณชุดทดลอง ข.* เพื่อเปรียบเทียบที่จุดหมดสภาพเดียวกับชุดทดลอง ก. ซึ่งก็ยังพบว่าในสารละลายผสมจะมีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงกว่า แสดงว่าแมงกานีสมีผลต่อการกำจัดตะกั่ว

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กในชุดการทดลอง ค. พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม มีค่าเท่ากับ 193.95 มิลลิกรัมต่อกรัม และ $K_{d,trans}$ เท่ากับ 3.88 ลิตรต่อกรัม ที่จุดเริ่มหมดสภาพ 13 วันและอายุการใช้งาน 18 วัน เห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วกลับลดลง ซึ่งหมายถึงว่าปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น แสดงว่าสัดส่วนของเหล็กต่อทรายต้องมีค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองจะได้ว่าที่ปริมาณเหล็กร้อยละ 5 โดยมวลจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาค่าความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการดูดซับสารหนู จะเท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (Lien, and Wilkin, 2005) หรือค่าความสามารถในการดูดซับทองแดง เท่ากับ 13.33 มิลลิกรัมต่อกรัม (Komnitsas et al., 2007)

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วจากการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับจากการทดลองแบบคอลัมน์มีค่าสูงกว่าแบบกะ เนื่องจากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองต่างกัน ได้แก่ ปริมาณเศษผงเหล็กและระยะเวลาสัมผัส ซึ่งในการทดลองแบบคอลัมน์นั้นใช้ปริมาณเศษผงเหล็กที่มากกว่า และมีระยะเวลาในการดูดซับอย่างต่อเนื่องจนเศษผงเหล็กที่ใช้หมดสภาพ หรือจนถึงจุดอิ่มตัว (Saturation point)

ดังนั้นจึงได้หาค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่ว โดยคำนวณที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง ตามการทดลองแบบกะ พบว่า ชุดการทดลอง ก. ข. และ ค. มีค่าเท่ากับ 17.35 17.55 และ 3.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งยังพบว่าการทดลองแบบคอลัมน์ยังคงมีค่าสูงกว่าแบบกะ อย่างไรก็ตามจากทฤษฎี ค่าความสามารถในการดูดซับจากการทดลองแบบกะควรมีค่าสูงกว่าจากการทดลองแบบคอลัมน์ แต่ทั้งนี้ในชุดการทดลองแบบคอลัมน์ อาจจะมีกลไกอื่นเกิดขึ้นร่วมด้วย ได้แก่ กลไกการกรอง (Filtration) ซึ่งมีผลทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดมีค่าสูงขึ้น

ความยาวของชั้นการดูดซับ และระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ

การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) หรือ L_{MTZ} และการหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (EBCT) จะอาศัยรูปที่ 4.31 โดยมีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ญ (ความยาวของชั้นการดูดซับและระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ) ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าชุดการทดลอง ก. มีความยาวของชั้นการดูดซับจากสมการได้ค่า L_m 4.05 เซนติเมตร ส่วนค่า Z_s 6.79 เซนติเมตร ซึ่งเกินความสูงของชั้นสารดูดซับ (5 เซนติเมตร) เนื่องจากปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดซับมีค่ามาก ดังนั้นจึงใช้ค่า L_m เป็นค่า L_{MTZ} ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ มีค่าเท่ากับ 0.91 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าเดียวกับระยะเวลากักเก็บจริง และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) เท่ากับ 0.031 กรัมต่อลิตร ซึ่งหมายถึงปริมาณเศษผงเหล็กที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ที่ใช้ในการบำบัดสารมลทิน (ตะกั่ว) ณ จุดเริ่มหมดสภาพ ส่วนชุดการทดลอง ข. และชุดการทดลอง ค. ได้ผลดังแสดงในตาราง ซึ่งสรุปได้ว่า ชุดทดลอง ก. มีความยาวของชั้นการดูดซับมากที่สุด ส่วนอัตราการใช้สารดูดซับให้ผลคล้อยตามกับผลของค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการหาความยาวชั้นการดูดซับและระยะเวลาในการเดินระบบแบบคอลัมน์

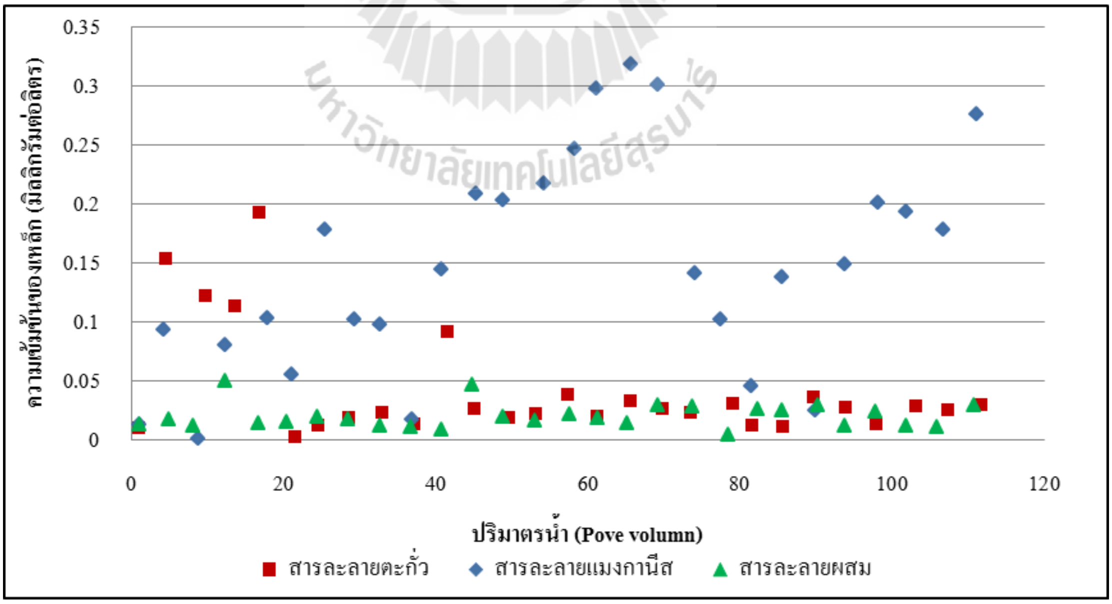
ชุดทดลอง	ผลการทดลอง			
	L_m (ซม.)	Z_s (ซม.)	EBCT (ชม.)	Usage rate (ก./ล.)
ก.	4.05	6.79	0.91	0.031
ข.	3.04	4.39	0.91	0.036
ค.	1.47	1.72	1.07	0.221

4.3.6 ผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อมในชุดทดลองแบบคอลัมน์

1. ปริมาณเหล็ก

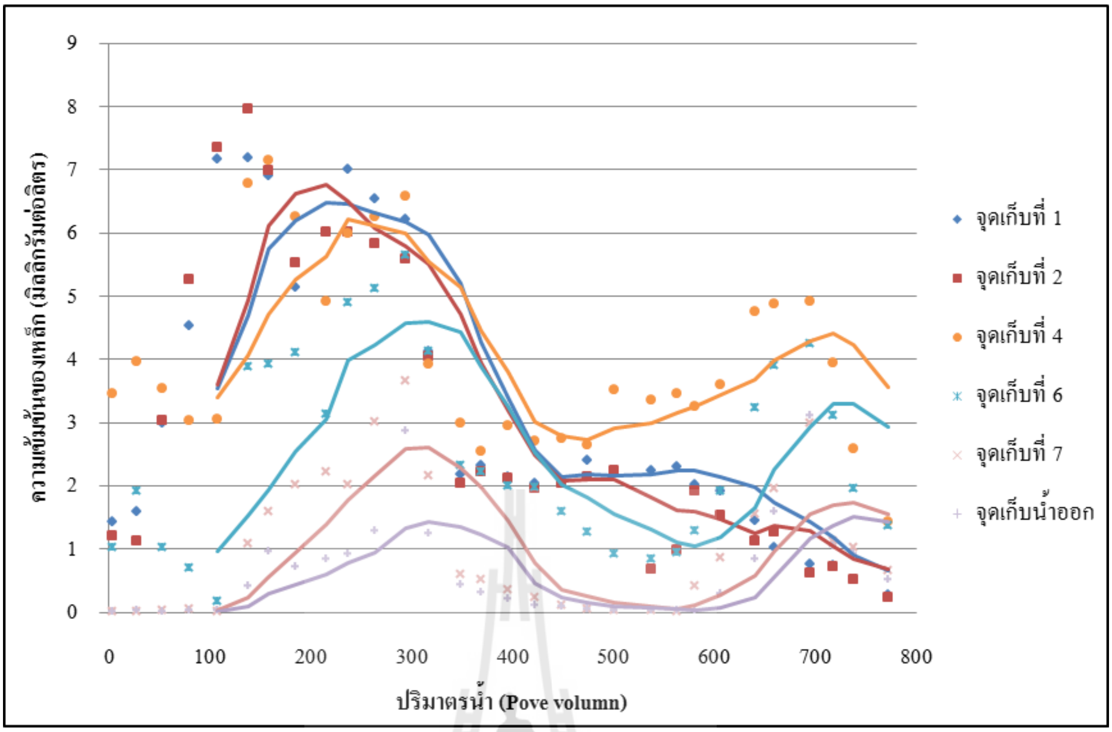
ปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจากการทดลองการกำจัดสารมลทินในสารละลายต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.32 พบว่า ปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสมจะน้อยกว่าในสารละลายแมงกานีส และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.33 ซึ่งแสดงผลในทุกจุดเก็บน้ำ พบว่าปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับชั้นความสูงของสนิมเหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับสารมลทิน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.34 คือปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามชั้นของการดูดซับ

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันของการกำจัดสารมลทินด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^{0}) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาตัวหลักคือเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และสารตัวอื่น ๆ ซึ่ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^{-}) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ [$Fe(OH)_2$] และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ [$Fe(OH)_3$] ตามลำดับ $Fe(OH)_2$ ที่เกิดขึ้น จะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิว อย่างไรก็ตาม $Fe(OH)_2$ มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็น $Fe(OH)_3$ อย่างรวดเร็ว โดยที่ $Fe(OH)_3$ สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ ได้เป็นหลายรูป แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Fe_2O_3 และ FeOOH ซึ่งมีลักษณะเป็นสนิมเหล็ก (รูปที่ 4.34)

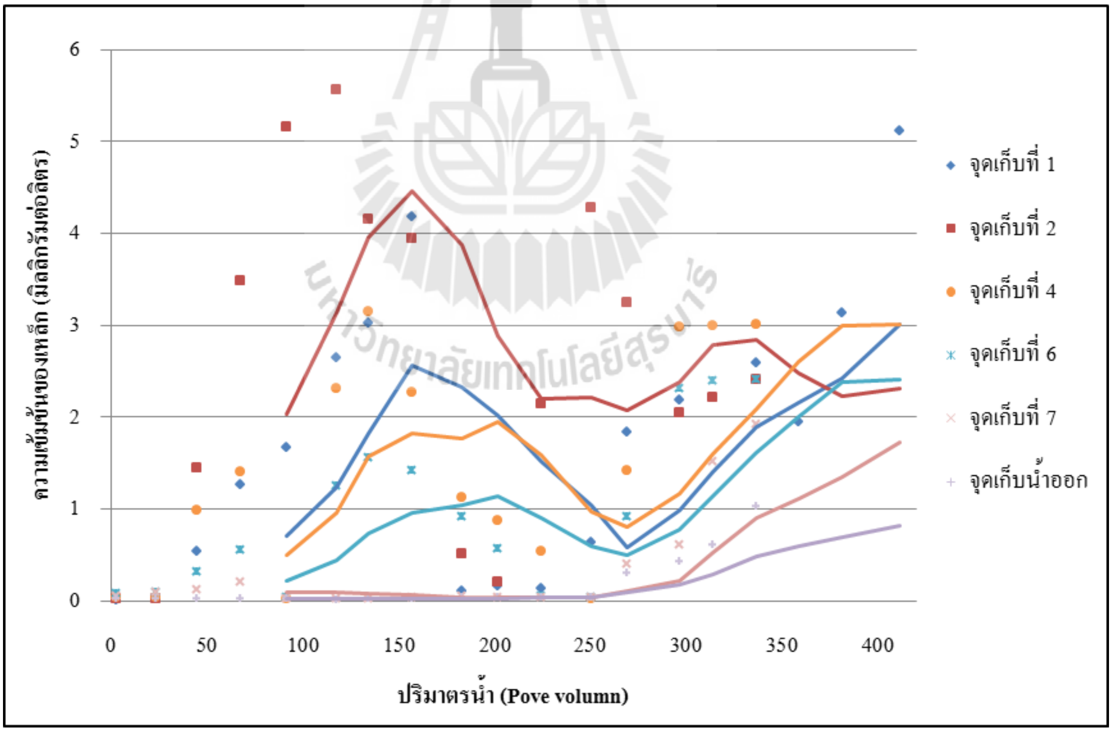


รูปที่ 4.32 ปริมาณเหล็กเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



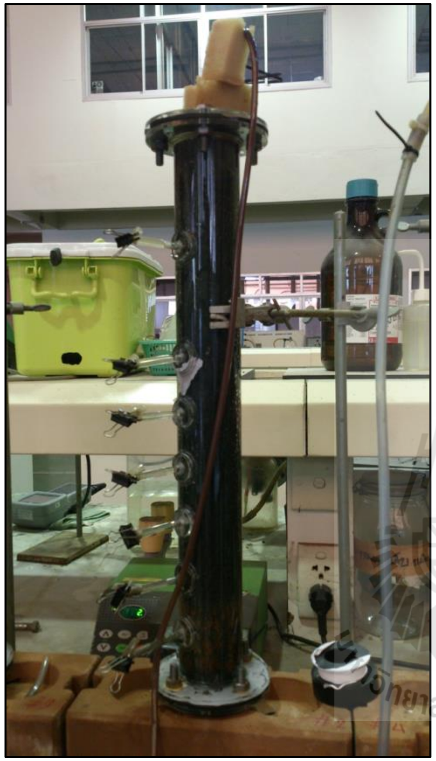
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.33 ปริมาณเหล็กเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล

วันที่ 1



วันที่ 7

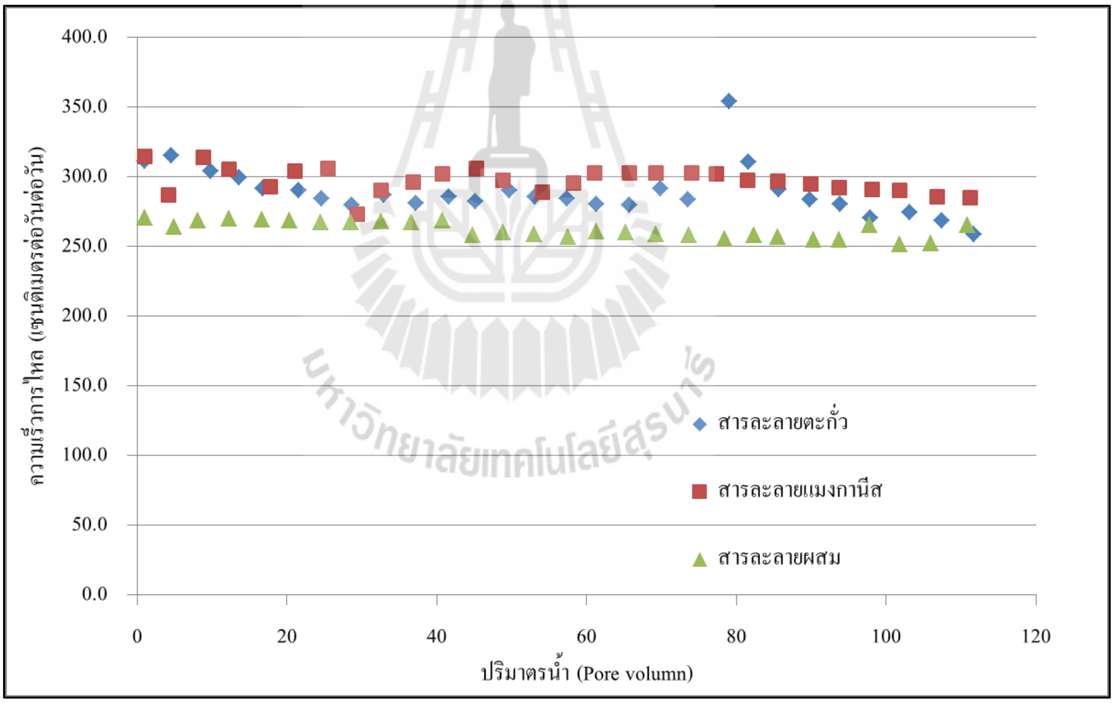
วันที่ 14

วันที่ 28

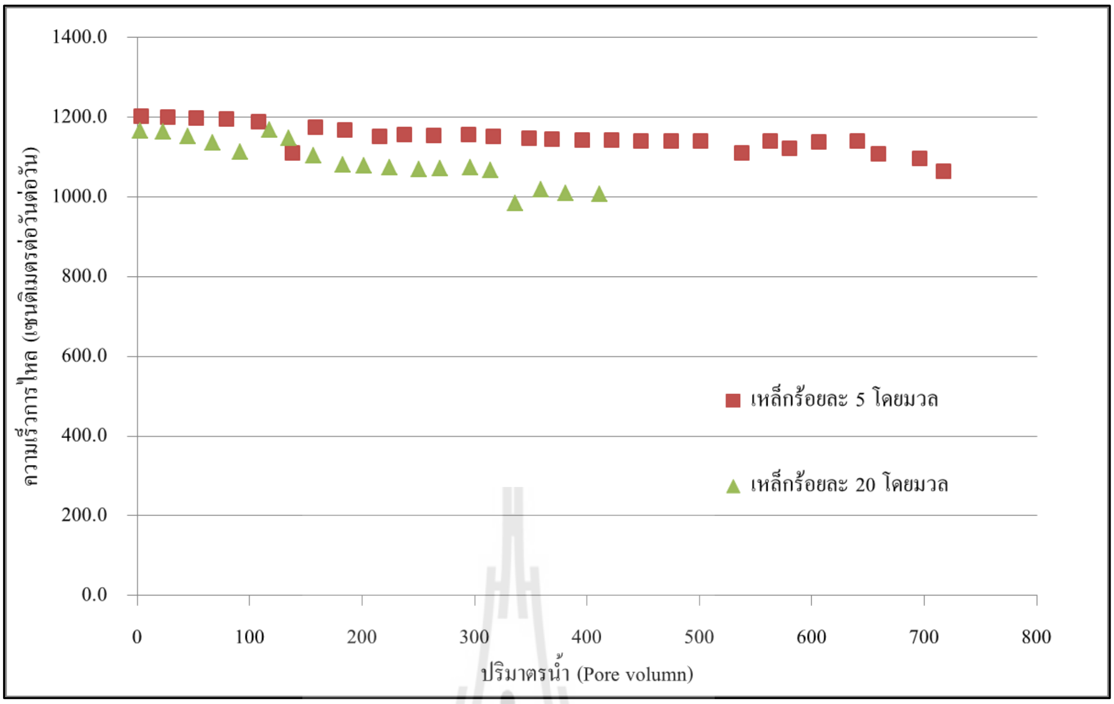
รูปที่ 4.34 ชุดทดลองคอลัมน์ตามระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ความเร็วการไหลหลังการบำบัด

ความเร็วการไหลที่ใช้ในการทดลองมี 2 ความเร็ว ซึ่งการทดลองที่ความเร็วการไหลต่ำ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.22 พบว่า ที่ระยะเวลาเกือบ 120 PV ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสยังคงสูง ส่งผลทำให้ความเร็วการไหลหลังการบำบัดจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงตามรูปที่ 4.35 ซึ่งได้คำนวณโดยใช้ค่าความพรุนตามตารางที่ 4.5 มาหารความเร็วการไหลจากการทดลอง ในหน่วยเซนติเมตรต่อวัน และที่ความเร็วการไหลสูง เมื่อดูเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเหล็กร้อยละ 5 และ 20 ในชุดการทดลองเพื่อหา Breakthrough curve (รูปที่ 4.29 และ 4.30) พบว่าตามรูปที่ 4.36 ได้ผลความเร็วการไหลหลังการบำบัดของชุดคอลัมน์ที่ใช้เหล็กร้อยละ 5 จะเห็นได้ว่าความเร็วการไหลหลังการทดลองจะเริ่มลดลงในช่วงท้าย ๆ ของการทดลอง ส่วนชุดคอลัมน์ที่ใช้เหล็กร้อยละ 20 ความเร็วการไหลหลังการทดลองจะลดต่ำกว่าปริมาณเหล็กร้อยละ 5 ทั้งนี้ ที่ระยะเวลาประมาณ 400 PV ดังรูป ระบบได้เกิดการอุดตันขึ้น



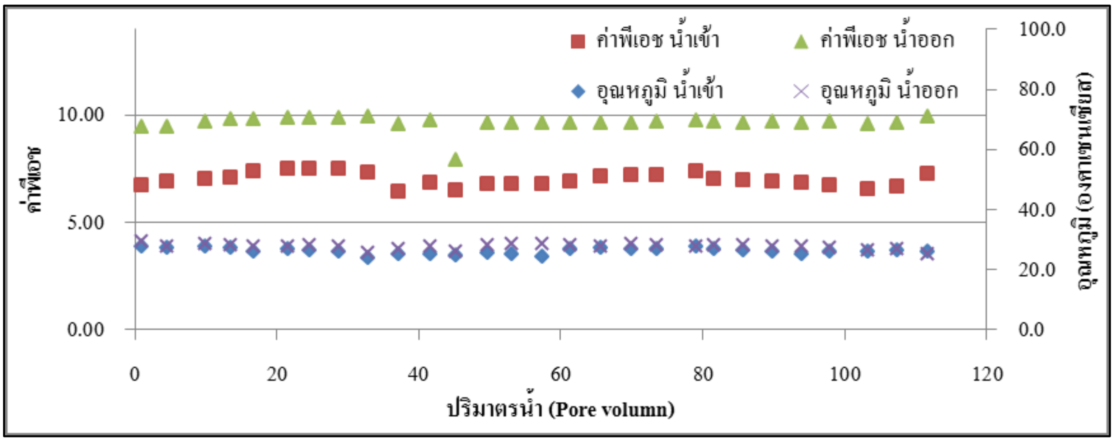
รูปที่ 4.35 ความเร็วการไหลหลังการบำบัดเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ โดยใช้เหล็ก
ร้อยละ 20 โดยมวล ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ
ความเข้มข้นสารเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



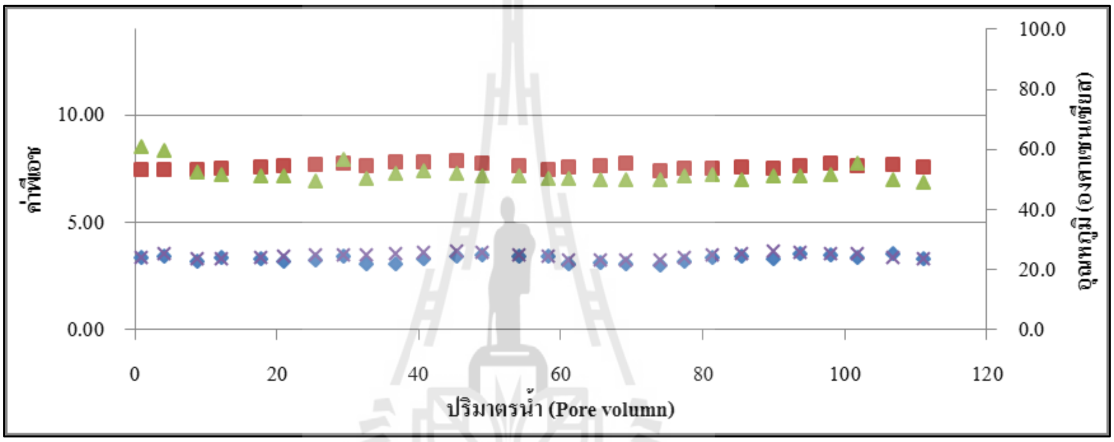
รูปที่ 4.36 ความเร็วการไหลเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล

3. ค่าพีเอช

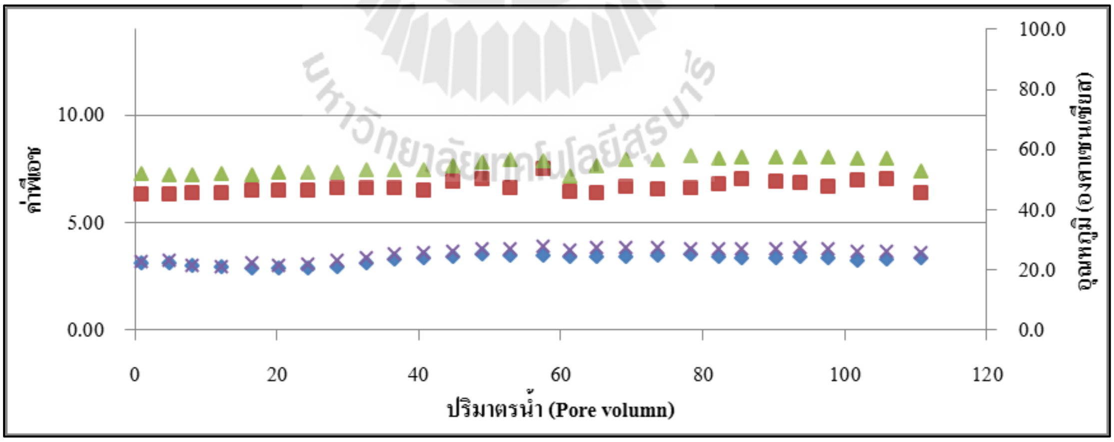
เนื่องจากทั้งค่าพีเอชและอุณหภูมิล้วนมีผลต่อความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งตามรูปที่ 4.37 เป็นผลของค่าพีเอชและอุณหภูมิของการทดลองที่ความเร็วการไหลต่ำ ใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส และ (ค) สารละลายผสม พบว่าอุณหภูมิของระบบค่อนข้างคงที่ ส่วนค่าพีเอชน้ำเข้าจะมีค่าไม่ถึง 7 และค่าพีเอชน้ำออกของสารละลายตะกั่วจะมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นคือประมาณเกือบ 10 แต่ในสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสม ค่าพีเอชของน้ำออกจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเข้า และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงผลของค่าพีเอชตามจุดการเก็บน้ำ พบว่าแนวโน้มเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือน้ำเข้าจะมีค่าพีเอชต่ำสุด และค่อยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนค่าพีเอชที่สูงสุดที่จุดน้ำออก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่อาจจะอยู่ในรูป FeOOH (Zhang, Lin et al., 2010) ซึ่งปริมาณเหล็กที่มากกว่าจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้มากกว่าปริมาณเหล็กที่น้อย ทั้งนี้ในการใช้งานระบบ PRB ในน้ำใต้ดินจริง จะไม่สามารถกำหนดค่าพีเอชน้ำเข้าระบบได้แต่จะทำให้ทราบถึงกลไกที่เกิดขึ้นในการบำบัดสารปนเปื้อน



(ก)



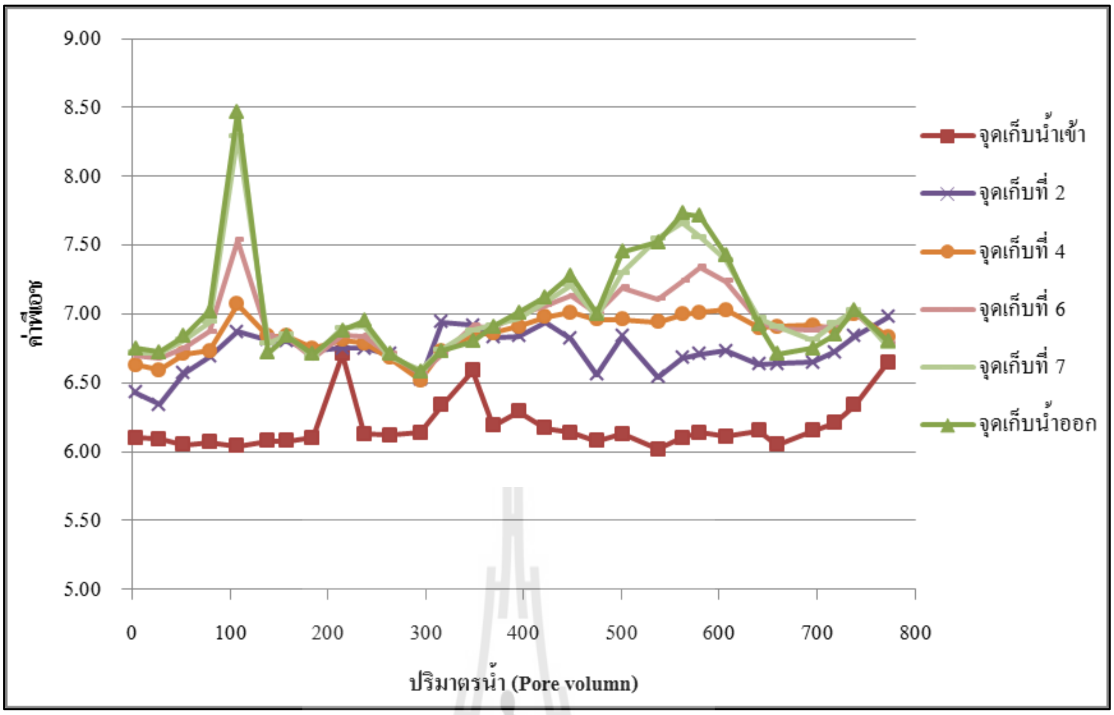
(ข)



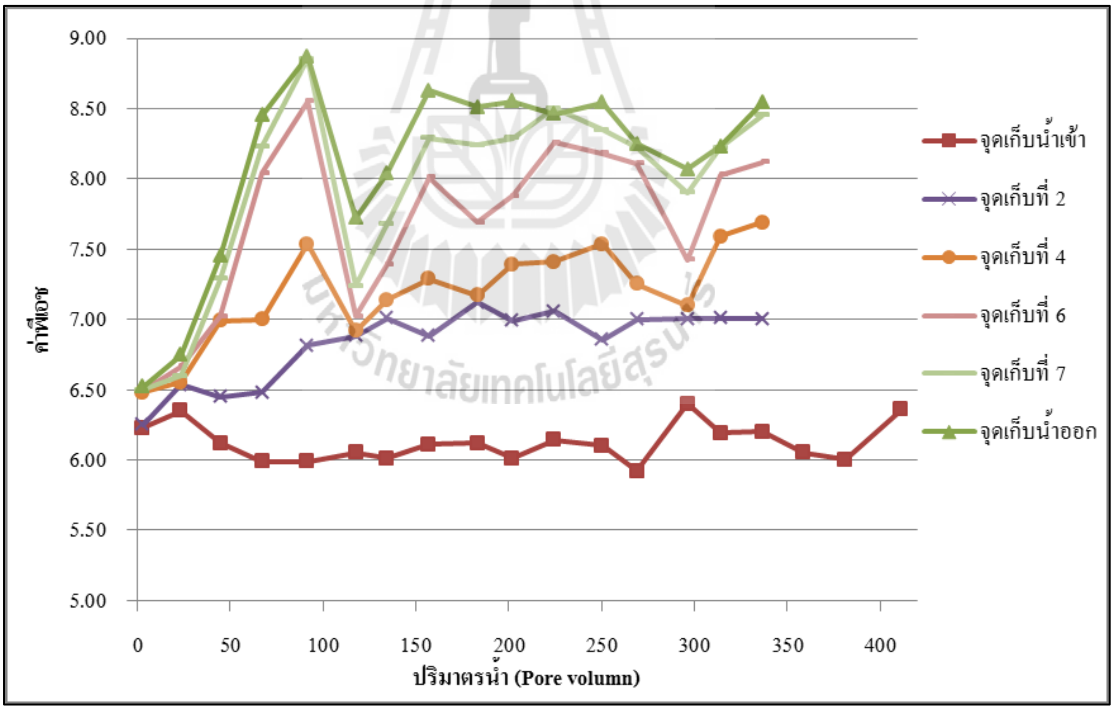
(ค)

รูปที่ 4.37 ค่าพีเอชและอุณหภูมิเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส (ค) สารละลายผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)

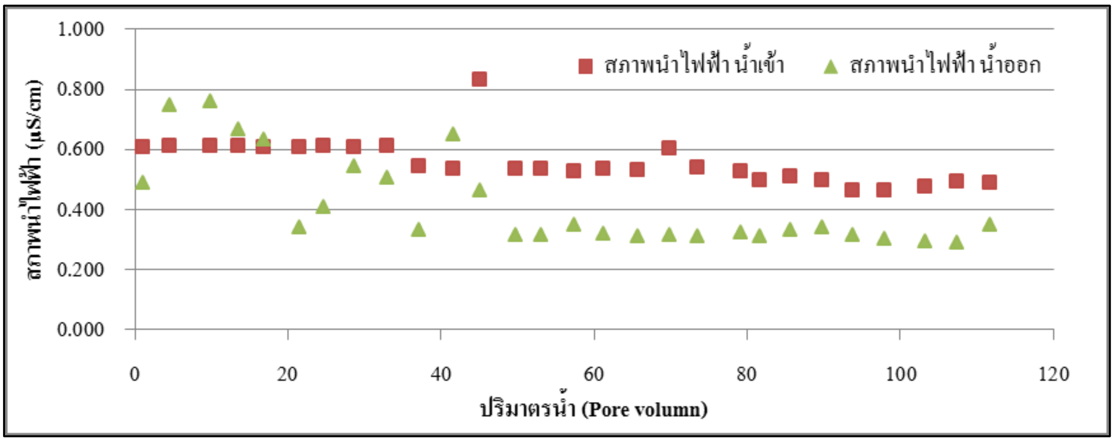
รูปที่ 4.38 ค่าพีเอชเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล

4. สภาพนำไฟฟ้า

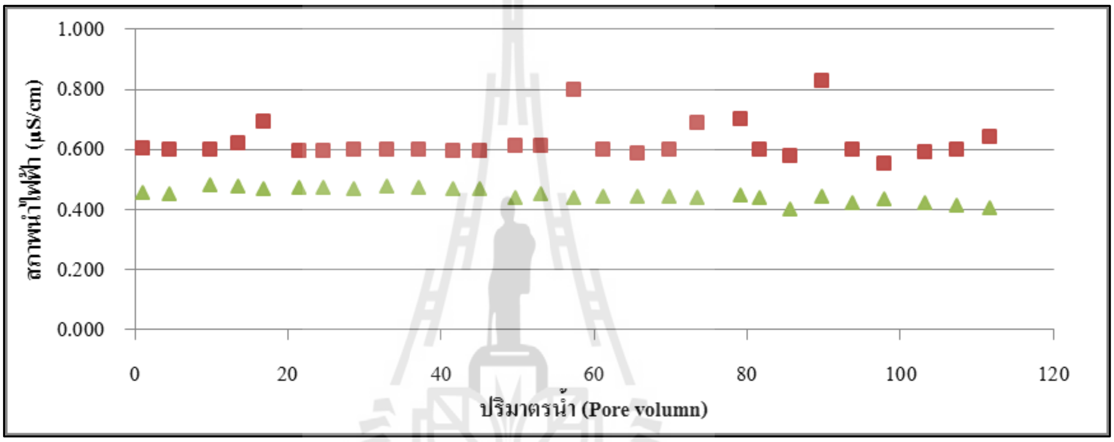
สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลาย หมายถึง ความสามารถในการนำไฟฟ้าซึ่งแปรผันตรงกับจำนวนและชนิดของอิออนที่อยู่ในสารละลาย หน่วยของสภาพนำไฟฟ้า คือ โมห์/ซม. (mho/cm) โมห์อาจแทนได้ด้วยซีเมน (Siemen) สภาพนำไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ในน้ำ หรือ อาจแสดงค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ได้อย่างคร่าว ๆ ได้ ทั้งนี้ สภาพนำไฟฟ้าของอิออนต่าง ๆจะไม่เท่ากัน ในน้ำที่มีพีเอชต่ำ (มี H^+ มาก) หรือมีพีเอชสูง (มี OH^- มาก) จะวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าได้สูงกว่าอิออนตัวอื่น เนื่องจาก H^+ และ OH^- สามารถนำไฟฟ้าได้มากกว่าอิออนอื่น ๆ และในการตกผลึก (Precipitation) เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะพบว่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากค่า TDS ลดระดับลง

ผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของการทดลองที่ความเร็วการไหลต่ำ ใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส และ (ค) สารละลายผสม ดังรูปที่ 4.39 พบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำเข้าในทุกสารละลายจะให้ค่าที่สูงกว่าน้ำออก ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณอิออนหลังกระบวนการบำบัดมีปริมาณน้อยลง แต่ยังคงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนการทดลองที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกันได้ผลดังรูปที่ 4.40 ซึ่งแสดงผลของค่าสภาพนำไฟฟ้าตามจุดการเก็บน้ำ พบว่าแนวโน้มเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือน้ำเข้าจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด และค่อย ๆ ลดลง จนค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำสุดอยู่ที่จุดน้ำออก โดยปริมาณเหล็กที่มากกว่าจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าได้ชัดเจนกว่าปริมาณเหล็กที่น้อย

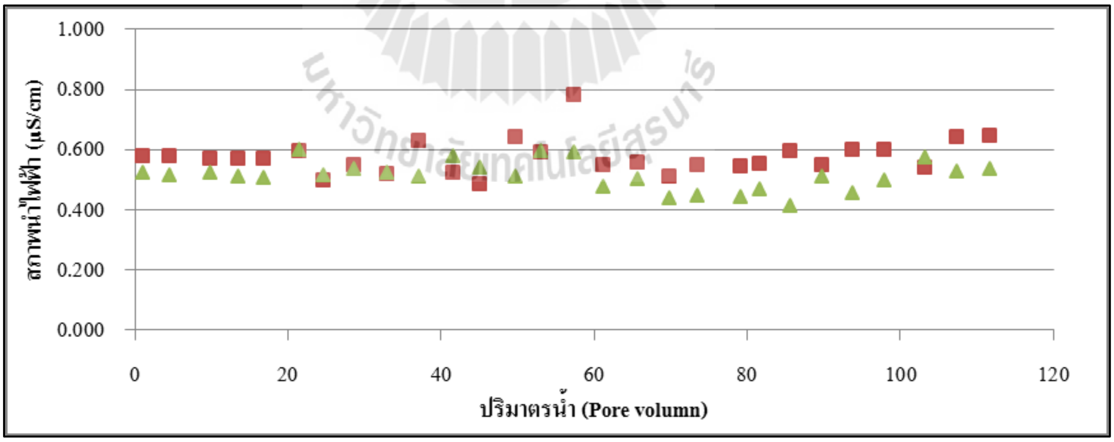
จากการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการกำจัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงมากกว่าร้อยละ 90 ส่วนการกำจัดแมงกานีสโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์นั้น อาจไม่ได้เกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและแมงกานีสเพียงอย่างเดียว อาจเกิดมาจากการกรองด้วยทรายหรือเป็นการดูดติดบนผิวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ซึ่งเหล็กอาจทำหน้าที่เป็นตัวกรองนั่นเอง ทั้งนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าปริมาณแมงกานีสที่อยู่ในสารละลายผสมมีส่วนทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นจนถึง ร้อยละ 100 ในส่วนของปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกำจัดสารมลทินของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ทาง U.S. EPA แนะนำให้ตรวจวัด คือปริมาณเหล็ก ค่าอัตราการไหล ค่าพีเอช และค่าสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะสามารถบอกถึงสภาพการทำงานของระบบที่กำลังเกิดขึ้น โดยที่เมื่อเดินระบบไปเรื่อย ๆ ปริมาณเหล็กอาจมีปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐาน อัตราการไหลย่อมมีค่าลดลง ส่วนค่าพีเอชเมื่อเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกับสารปนเปื้อนขึ้นอย่างสมบูรณ์ควรจะเกิดผลึกของ FeOOH ขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น และค่าสภาพนำไฟฟ้าก็จะลดลงเมื่ออิออนในน้ำลดลง



(ก)

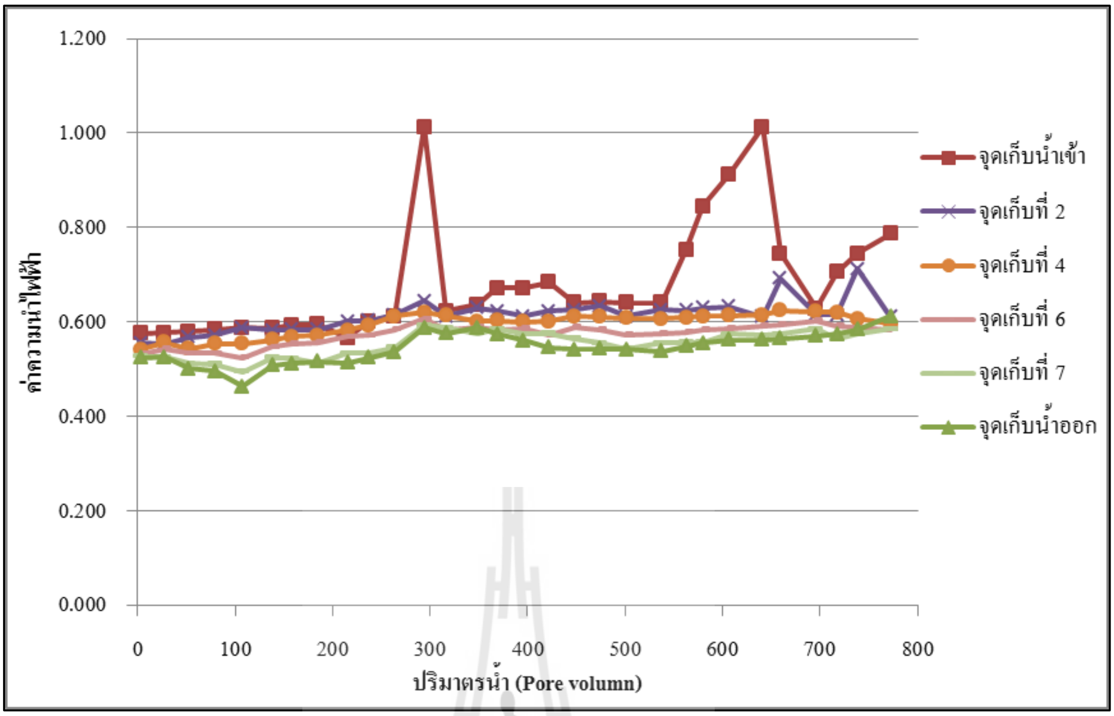


(ข)

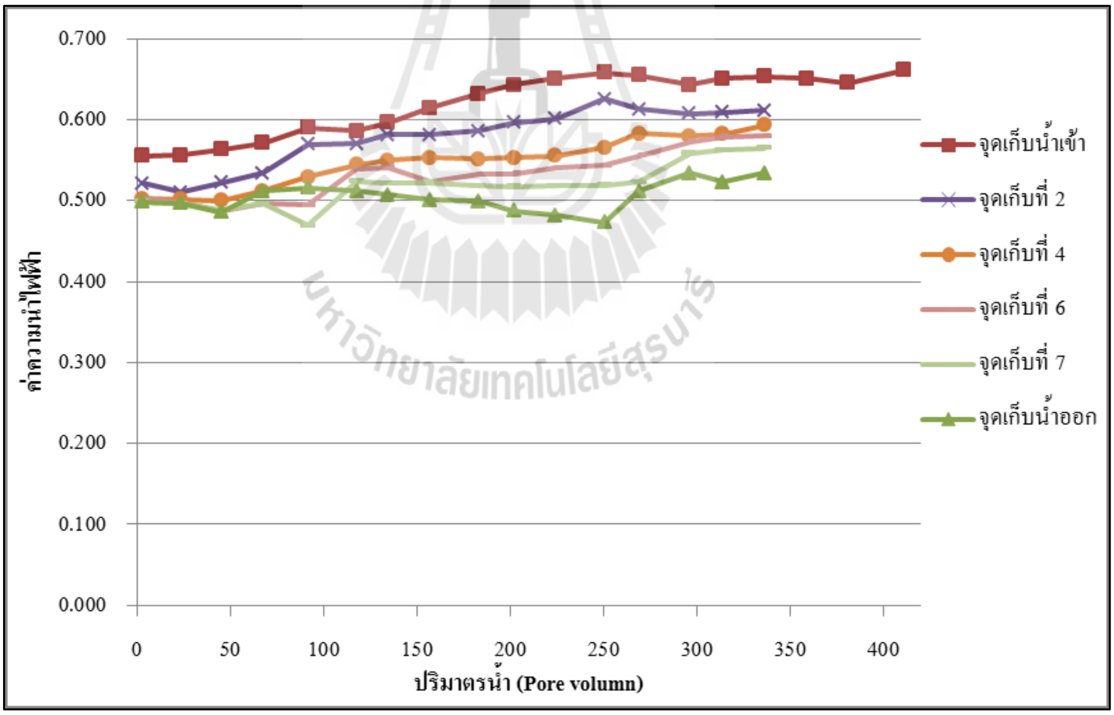


(ค)

รูปที่ 4.39 สภาพนำไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) สารละลายตะกั่ว (ข) สารละลายแมงกานีส (ค) สารละลายผสม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.40 สภาพนำไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง โดยใช้เหล็ก (ก) ร้อยละ 5 โดยมวล (ข) ร้อยละ 20 โดยมวล

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วที่มีแมงกานีสผสมอยู่ได้ โดยการนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งแบบกะและแบบคอลัมน์ มาวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics) โดยการทดสอบสมมติฐาน (Test of hypotheses) เพื่อที่จะหาคำตอบมาอ้างอิงสมมติฐานที่ตั้งขึ้นมา

การวิเคราะห์ทางสถิติจากการทดลองแบบกะ จะใช้วิธี Two – tailed Student' t – test โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารมลทินจากผลการทดลองของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ 50 กรัมต่อลิตร เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว การกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส การกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมและการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก

โดยการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) ที่ตั้งไว้ คือ

H_0 : ประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองแบบกะกับชุดควบคุม ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองแบบกะกับชุดควบคุม แตกต่างกัน

ซึ่งจะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ระดับนัยสำคัญที่ 0.05) และได้ผลการทดสอบทางสถิติดังภาคผนวก ฎ. (ตารางที่ ฎ.1) พบว่า การทดลองทั้งจากการใช้เศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็กได้ผลเหมือนกันดังนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีสเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสมเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นสรุปได้ว่า ตะกั่วและแมงกานีสสามารถกำจัดได้ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก

การวิเคราะห์ทางสถิติจากการทดลองแบบคอลัมน์ จะใช้วิธี Independent t – test เนื่องจากชุดทดลองแบบคอลัมน์เป็นอิสระต่อกัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารมลทินของชุดทดลองคอลัมน์ที่มีเหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทรายอย่างเดียว ดังแสดงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งวิเคราะห์จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.42 ถึง 4.45 ประกอบด้วยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีสและสารละลายผสม เทียบกับชุดคอลัมน์ทราย โดยแสดงผลจากจุดเก็บน้ำทั้งหมด

รูปที่ 4.41 ชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายและชุดทดลองคอลัมน์ทราย

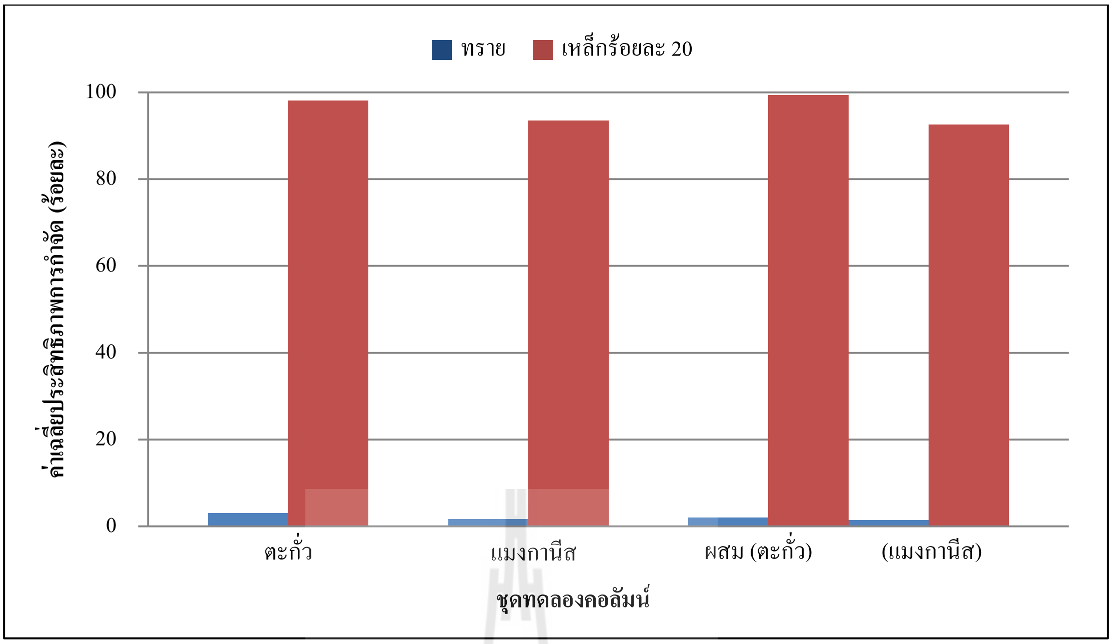
โดยการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) ที่ตั้งไว้ คือ

H_0 : ประสิทธิภาพการกำจัดชุดคอลัมน์เหล็กกับชุดคอลัมน์ทราย ไม่แตกต่างกัน

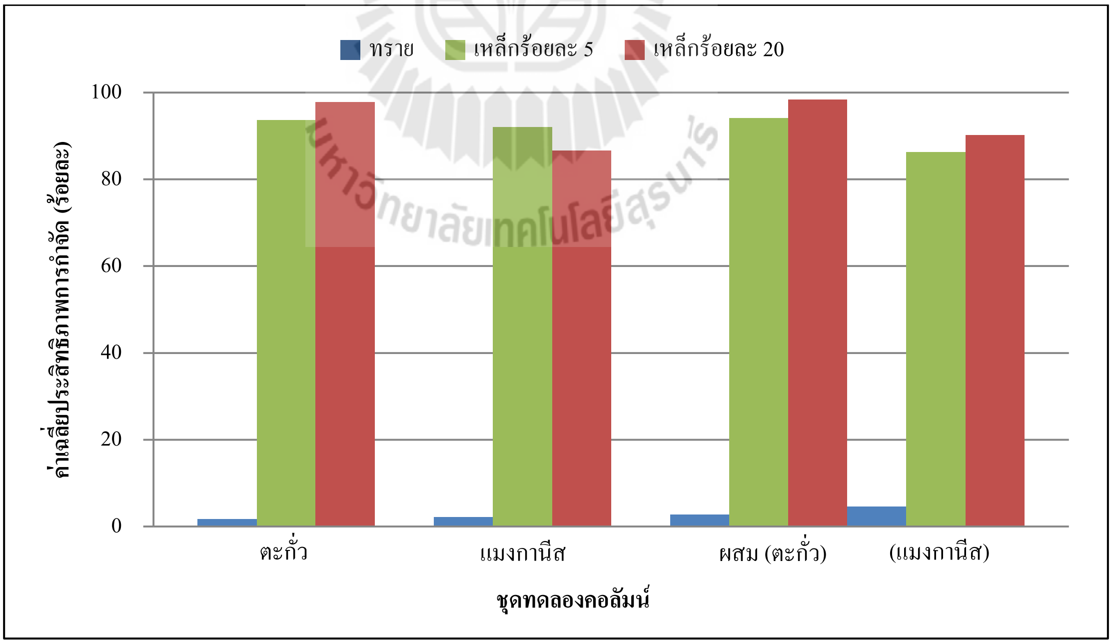
H_1 : ประสิทธิภาพการกำจัดชุดคอลัมน์เหล็กกับชุดคอลัมน์ทราย แตกต่างกัน

ซึ่งจะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ระดับนัยสำคัญที่ 0.05) และได้ผลการทดสอบดังภาคผนวก ฎ. (ตารางที่ ฎ.2 – ตารางที่ ฎ.3) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วเมื่อเทียบกับชุดคอลัมน์ทราย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีสเมื่อเทียบกับชุดคอลัมน์ทราย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมเมื่อเทียบกับ ชุดคอลัมน์ทราย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสมเมื่อเทียบกับชุดคอลัมน์ทราย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นสรุปได้ว่า ตะกั่วและแมงกานีสสามารถถูกกำจัดได้ด้วยเศษผงเหล็กผสมกับทรายในชุดการทดลองแบบคอลัมน์

เพราะฉะนั้นทั้งจากผลการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์สามารถสรุปได้ว่าเหล็กกวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วที่มีแมงกานีสผสมอยู่ด้วยได้ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

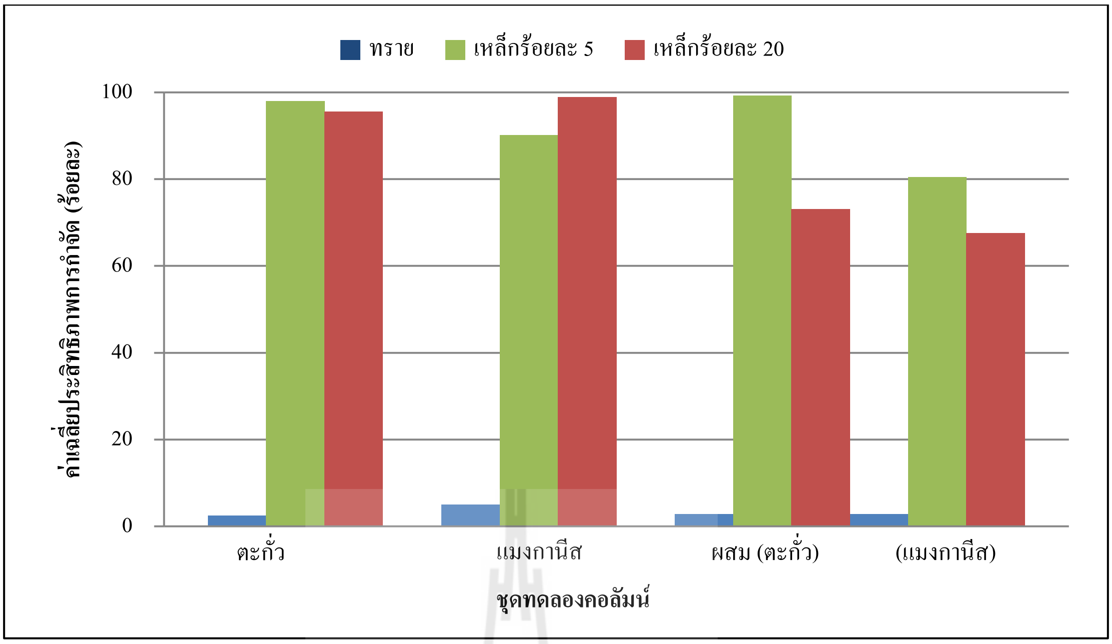


รูปที่ 4.42 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นต่ำ

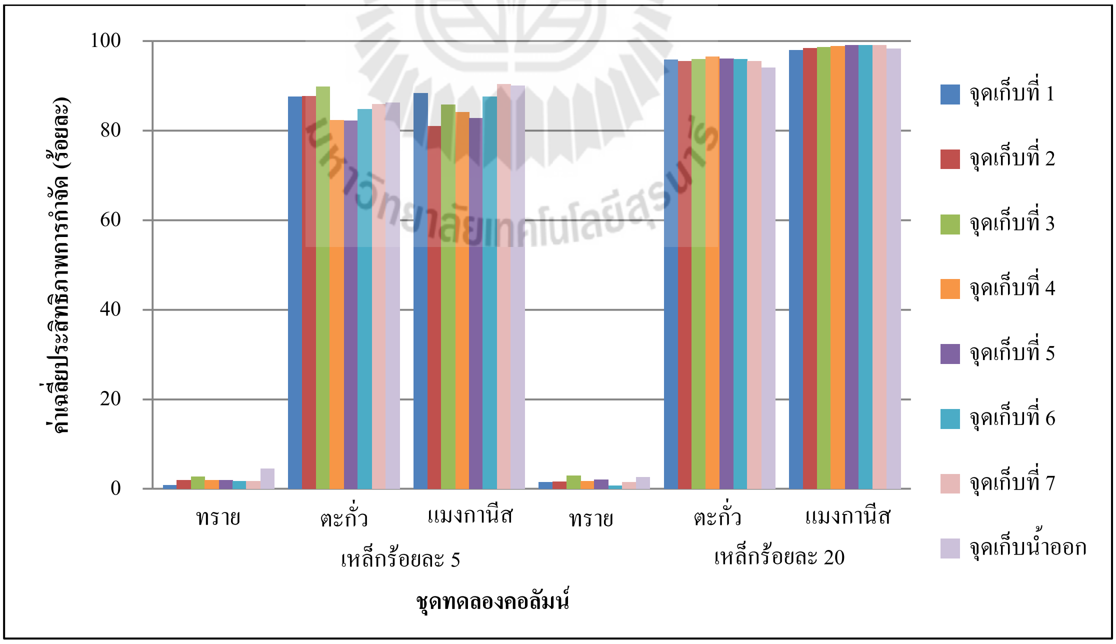


รูปที่ 4.43 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.44 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดจุดน้ำออกแต่ละชุดทดลองคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง



รูปที่ 4.45 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดตามจุดเก็บน้ำแต่ละชุดทดลองคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเร็วการไหลเริ่มต้นสูง

4.5 การออกแบบ Permeable Reactive Barrier (PRB)

ตามขั้นตอนการดำเนินการของเทคโนโลยี PRB ตามการศึกษาของ U.S. EPA. (1998); Gavaskar et al. (2000) and Carey et al. (2001) ในส่วนของการออกแบบ PRB จะประกอบไปด้วย 1) การเลือกและทดสอบวัสดุตัวกลาง 2) การศึกษาด้านชลศาสตร์และด้านเคมีธรณี 3) การออกแบบเบื้องต้น 4) การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ และ 5) การออกแบบรายละเอียด ซึ่งการออกแบบนั้นจะอาศัยข้อมูลสองส่วน คือ ข้อมูลของวัสดุตัวกลางและข้อมูลของพื้นที่การปนเปื้อน ทั้งนี้ในส่วนข้อมูลที่เกี่ยวกับวัสดุตัวกลางนั้น จะดำเนินการเพื่อระบุวัสดุตัวกลางที่จะใช้งานและทดสอบความเป็นไปได้ของตัวกลางในการบำบัดสารปนเปื้อน ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบแบบกะและการทดสอบแบบคอลัมน์ เพื่อท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลในการออกแบบ PRB อันได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic residence time) ขนาด (Volume) รวมไปถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical property) ของวัสดุตัวกลางด้วย โดยมีรายละเอียดในการนำผลการทดลองทั้งแบบกะและแบบคอลัมน์มาใช้ในการออกแบบ ดังนี้

1. ระยะเวลาการกักเก็บ

จากการทดลองแบบกะ พบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลจะเท่ากับ 4 ชั่วโมง ส่วนจากการทดลองแบบคอลัมน์ การหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ ซึ่งหาโดยวิธี Empty bed contact time (EBCT) ตามสมการ 3.8 และจากผลการศึกษา Tracer study พบว่า ที่สัดส่วนเศษผงเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล มีระยะเวลาการเดินระบบ เท่ากับ 0.91 ชั่วโมง และสัดส่วนเศษผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล มีระยะเวลาการเดินระบบ เท่ากับ 1.07 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองแบบกะมีระยะเวลากักเก็บมากกว่าแบบคอลัมน์ ดังนั้นในการคำนวณออกแบบ PRB จะใช้ระยะเวลากักเก็บเป็น 4 ชั่วโมง ตามการทดลองแบบกะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ขนาด

ปริมาณตัวกลางใน PRB จะอาศัยค่าความสามารถในการดูดซับจากผลการทดลองแบบคอลัมน์ในการคำนวณ พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนของเหล็กต่อทรายเป็นร้อยละ 5 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม เท่ากับ 1,114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม และสัดส่วนของเหล็กต่อทรายเป็นร้อยละ 20 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม เท่ากับ 114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่สัดส่วนเศษผงเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ให้ค่าที่สูงกว่าสัดส่วนเศษผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ดังนั้นในการคำนวณออกแบบ PRB จะใช้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สัดส่วนเศษผงเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ตามการทดลองแบบคอลัมน์ ไปใช้ในการออกแบบ PRB นอกจากนี้ US.EPA ยังได้นำเสนอสมการในการคำนวณปริมาณตัวกลางใน PRB ดังสมการที่ 2.3

3. ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตัวกลาง

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical property) ของวัสดุตัวกลาง โดยการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และไอโซเทอร์มการดูดซับ จากการทดลองแบบกะ พบว่า กลไกที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส น่าจะประกอบด้วย กลไกการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) การดูดซับ (Adsorption) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์นั้นกลไกที่ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่าการทดลองแบบกะน่าจะมีกลไกการกรอง (Filtration) เกิดขึ้นร่วมด้วย ทั้งนี้ในการยืนยันกลไกต่าง ๆ นั้นต้องอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงซึ่งอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

ตัวอย่างการออกแบบ PRB

กรณีศึกษา : โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต ซึ่งเกิดการรั่วไหลของสารตะกั่วลงดินและซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยการตรวจวัดคุณภาพน้ำใต้ดินพบว่ามีปริมาณตะกั่วและแมงกานีสสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ทั้งนี้ปริมาณแมงกานีสที่สูงเกินกว่ามาตรฐานเกิดจากพื้นที่ดังกล่าวโดยธรรมชาติตามสภาพธรณีวิทยาเป็นแหล่งแร่แมงกานีส

จากผลการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ สามารถคำนวณหาขนาดของ PRB ที่สามารถบำบัดตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้เศษผงเหล็กกับทรายเป็นวัสดุตัวกลางผสม ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.8 พบว่า หากต้องการบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำใต้ดินมีความเร็วการไหลอยู่ที่ 10 เมตรต่อวัน และได้ออกแบบขนาดความลึกและความกว้างของ PRB ให้สามารถรองรับ Plume ของสารปนเปื้อนได้ คือมีความลึกเท่ากับ 4 เมตร และความกว้างเท่ากับ 10 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่ใช้สัดส่วนของเศษผงเหล็กร้อยละ 5 โดยมวล จะมีค่าความสามารถในการดูดซับประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นของตัวกลางผสมเท่ากับ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นคำนวณหาปริมาณเศษผงเหล็กที่ต้องการใน PRB ได้เท่ากับ 73 ตัน และต้องใช้ทรายเท่ากับ 1,387 ตัน ต่อจากนั้นคำนวณหาความยาวของ PRB ได้เท่ากับ 18.3 เมตร ในขั้นตอนสุดท้ายคือการตรวจสอบการคำนวณโดยใช้ค่าระยะเวลากักเก็บ พบว่าการออกแบบ PRB ตามการคำนวณดังกล่าว มีค่าระยะเวลากักเก็บมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองแบบกะ

ทั้งนี้การออกแบบดังกล่าวอ้างอิงสภาวะจากการทดลองแบบคอลัมน์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตะกั่ว และความเร็วการไหล ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่สูงกว่าการปนเปื้อนในความเป็นจริง คือ จากรายงานการปนเปื้อนของตะกั่ว พบว่ามีค่าไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าความเร็วการไหลจริงของน้ำใต้ดินก็พบว่ามีค่าในช่วง 6 – 200 เซนติเมตรต่อวัน ดังนั้นในการคำนวณเพื่อการออกแบบ PRB ในการใช้งานจริง ควรมีการทอนค่าจากการทดลองให้เหมาะสมก่อนการคำนวณออกแบบ

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดการคำนวณออกแบบ PRB

Design Parameters				
(A)	Concentration of Pb, C	50	mg/L	
(B)	Hydraulic conductivity, K	10.0	m./day	
(C)	% ZVI	5	% by weight	
(D)	Maximum adsorption capacity, q_{max}	1,000	g/kg	
(E)	Bulk density of ZVI/sand mixture	2,000	$kg/m.^3$	$=2.07\ g/cm^3$
	Design PRB			
(F)	Design period, t	10	year	
(G)	Depth, D	4.0	m.	
(H)	Width, W	10.0	m.	
Calulation				
(1)	Flow Rate, Q = (B) x [(G) x (H)]	400.0	$m.^3/d$	Q = KA
(2)	Volume, V = (1) x (F)	1,460,000.0	$m.^3$	V = Q x t
(3)	Mass of Pb, M_{Pb} = (2) x (A)	73,000,000.0	g	$M_{Pb} = V \times C$
(4)	Mass of ZVI, M_{ZVI} = (3) / (D)	73,000.0	kg	$M_{ZVI} = M_{Pb} / q_{max}$
		73.0	ton	
(5)	Mass of sand, M_{sand}	1,387,000.0	kg	
		1,387.0	ton	
(6)	Mass of composites, M_{mix} = (4) + (5)	1,460,000.0	kg	$M_{mix} = M_{ZVI} + M_{sand}$
		1,460.0	ton	
(7)	Volume of PRB, V_{PRB} = (6) / (E)	730.0	$m.^3$	$V_{PRB} = M_{mix}$ / density
(8)	Length, L	18.3	m.	$L = V_{PRB} / A$
Ckeck				
	HRT > 4 hr -----> OK			
	HRT = (8) / (B)	43.80	hr	HRT = L / K
		OK		

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การปนเปื้อนในน้ำใต้ดินถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ที่ต้องอาศัยน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภคบริโภค รวมถึงพืชและสัตว์อีกด้วย ประกอบกับในประเทศไทยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำใต้ดินโดยใช้ PRB ยังมีอยู่น้อย และวิธีการกำจัดยังนิยมใช้วิธีการที่มีความยุ่งยากและราคาแพง อีกทั้งการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดินยังมีงานศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อย และกลไกที่เกิดขึ้นยังมีความไม่ชัดเจน ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นกำจัดตะกั่วในน้ำด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และ PRB โดยมีแมงกานีสปนเปื้อนอยู่ด้วย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำ ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และเพื่อทดสอบความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส โดยอาศัยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ PRB ซึ่งอาศัยข้อมูลจากผลการทดลอง 2 ส่วนหลัก คือ การทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ เพื่อท้ายที่สุดจะได้ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และทราบถึงความสามารถของชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวกลางในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส รวมไปถึงได้ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ PRB ที่เป็นเทคโนโลยีการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ ได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ ขนาด และลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตัวกลาง จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวกลาง

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด ได้แก่ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งผลการคัดเลือกขนาดของเศษผงเหล็ก ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) โดยเลือกเศษผงเหล็กที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 หรือมีขนาดระหว่าง 60 – 100 เมช หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้ง 2 ชนิด คือผงตะไบเหล็กมีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กและมีสีเทา ส่วนเศษผงเหล็กที่คัดขนาดและล้างทำความสะอาดแล้วจะมีลักษณะเป็นเกล็ดและมีสีดำ แสดงให้เห็นว่าผงตะไบเหล็กมีขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเศษผงเหล็กเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า

นอกจากนี้การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) โดยวิธี BET Surface Area Analysis พบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เลือกใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะดังนี้ ผงตะไบเหล็กเท่ากับ 2.1169 ตารางเมตรต่อกรัม และเศษผงเหล็กขนาด 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.2883 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ส่วนลักษณะทางเคมีโดยการยืนยันองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) พบว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทั้ง 2 ชนิด จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta ประมาณ 44 Theta เป็นตำแหน่งของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron; Fe^0) เมื่อเทียบกับ Standard และเศษผงเหล็กจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งอื่นด้วย เนื่องจากเศษผงเหล็กมีการเจือปนของธาตุอื่นจากกระบวนการผลิต

5.1.2 ผลการทดลองแบบกะ

การทดลองแบบกะ ประกอบด้วย ความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น และปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลอง ดังนี้

การหาความเร็วในการกวนผสมและหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็ก พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง จากนั้นจะคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลนั่นเอง โดยพบว่าเศษผงเหล็กมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วดีที่สุด คือร้อยละ 100 ที่ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 4 ชั่วโมง ส่วนแมงกานีสมีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุด คือร้อยละ 83.1 ที่ความเร็วในการกวน 350 รอบต่อนาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 3 ชั่วโมง โดยใช้เศษผงเหล็ก จำนวน 2 กรัม ต่อ สารละลาย 40 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นทั้งหมด สรุปได้ว่าผลของค่าพีเอชเริ่มต้นมีความสัมพันธ์กับการกัดกร่อนของเหล็ก ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว จะสูงเกินร้อยละ 90 ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 3 จนถึงค่าพีเอช 7 ซึ่งให้ผลคล้ายกันทั้งเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก และในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส จะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ต่ำกว่าการกำจัดตะกั่ว แต่ก็ยังสามารถกำจัดแมงกานีสได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ นอกจากนี้ จากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นในสารละลายผสม เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันขึ้นระหว่างแมงกานีสและตะกั่ว เพราะค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E^0) ของแมงกานีสมีค่าต่ำกว่าตะกั่ว ซึ่งทำให้แมงกานีสกลายเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนตะกั่วจะเป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้น เหมือนกับปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับตะกั่ว ดังนั้น จึงทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วลดลงและประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจึงเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของแมงกานีสก็จะลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ผลของความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้น ที่ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 40 กรัมต่อลิตร เมื่อสังเกตแนวโน้มของเส้นกราฟจะพบว่า กราฟมีลักษณะโค้งนั่นคือ มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่ความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นต่ำ และประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น จนความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นมีค่าสูงเกินไป ประสิทธิภาพการกำจัดก็จะลดลง ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กสูงสุด ร้อยละ 97.94 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 98.15 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นกัน ในส่วนการกำจัดแมงกานีส พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด ที่ความเข้มข้นของสารละลายแมงกานีสเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมือนกับการทดลองของตะกั่ว แต่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ ร้อยละ 86.10 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็ก จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของตะกั่ว คือ ร้อยละ 98.16 นอกจากนี้การทดลองในสารละลายผสมพบว่าการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสนั้น มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสารละลายตะกั่วหรือแมงกานีส ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม ด้วยเศษผงเหล็กสูงสุด ร้อยละ 87.20 ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 95.63 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนการกำจัดแมงกานีสพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหมือนกับการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 85.22 และประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสสูงสุดด้วยผงตะไบเหล็ก ร้อยละ 93.59 ที่ความเข้มข้นของสารละลายผสมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีส สรุปได้ว่าแนวโน้มการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่เกิดจากปัจจัยปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ คือ ยิ่งใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มาก ความสามารถในการกำจัดยิ่งเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าสูงสุดของขีดจำกัดความสามารถ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการกำจัดมีค่าคงที่สูงสุดประมาณค่าหนึ่ง ซึ่งผลการกำจัดตะกั่วโดยใช้เศษผงเหล็ก พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าสูงสุด ร้อยละ 94.26 ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก ร้อยละ 94.61 เป็นค่าสูงสุด ที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 50 กรัมต่อลิตร เช่นกัน การกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็กพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 89.25 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 91.78 แต่ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 30 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ผลของ

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายผสมพบว่า ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสนั้น มีลักษณะคล้ายกับการทดลองในสารละลายตะกั่วหรือแมงกานีส คือการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสมด้วยเศษผงเหล็ก จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุด ร้อยละ 79.75 โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองในสารละลายตะกั่ว แต่ค่าสูงสุดของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็ก จะเกิดที่ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ 10 กรัมต่อลิตร ได้ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 79.79 และในส่วนผลการทดลองการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสมด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก คือประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจะมีค่าสูงสุด โดยใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 10 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด ร้อยละ 75.08 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยผงตะไบเหล็กสูงสุด ร้อยละ 83.86 แต่ใช้ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็น 50 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้จะพบว่าจากผลการทดลองของชุดควบคุมจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเกือบถึงร้อยละ 20 หมายความถึงว่า สารละลายผสมมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้น ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กจะเพิ่มเป็น ร้อยละ 99.49 และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยผงตะไบเหล็กจะเพิ่มเป็นร้อยละ 99.53

นอกเหนือจากนั้น การศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อระบุกลไกในการกำจัด ซึ่งกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation - Reduction reaction) และการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งสามารถยืนยันโดยใช้ผลการทดลองดังที่กล่าวมา ประกอบกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาและไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งการหาจลนพลศาสตร์การบำบัด โดยศึกษาสมการ Pseudo first order และ Pseudo second order พบว่าจลนพลศาสตร์การบำบัดตะกั่วจะสอดคล้องกับ Pseudo first order ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยส่วนใหญ่ คือการบำบัดตะกั่วเกิดขึ้นเนื่องด้วยความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งหมายถึงเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วได้ดี ส่วนจลนพลศาสตร์การบำบัดแมงกานีสจะสอดคล้องกับ Pseudo second order คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งมีความเข้มข้นมากจนแทบไม่เปลี่ยนแปลง หมายถึงแมงกานีสมีค่ามากกว่าความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ หรือการบำบัดแมงกานีสเกิดจากกลไกอื่นที่นอกเหนือจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยอาศัยไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) พบว่า การกำจัดทั้งตะกั่วและแมงกานีสโดยใช้เศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก ให้ค่า R^2 จากไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชสูงกว่าไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ แสดงว่ามีการดูดซับเกิดขึ้นเป็นหลาย ๆ ชั้น (Multilayer) ซ้อนทับกัน ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดได้จากทั้งทางกายภาพและทางเคมี

หมายถึงเป็นการดูดซับที่เกิดทั้งจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน และเกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุล ดังนั้น การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับตะกั่วและแมงกานีส เป็นกระบวนการกักโมเลกุลสารละลายมลทินซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยการเกาะจับจะมี Driving force อยู่ 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้ค่าความสามารถในการกำจัดจากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ พบว่า การกำจัดตะกั่วโดยใช้ผงตะไบเหล็ก ให้ค่าสูงสุด เท่ากับ 12. 5156 มิลลิกรัม (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผงตะไบเหล็กมีความสามารถในการกำจัดได้ดีกว่าเศษผงเหล็ก ทั้งนี้เกิดจากปัจจัยหลักคือขนาดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่ละชนิดที่จะส่งผลถึงพื้นที่ผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน

จากการทดลองแบบกะ สามารถสรุปได้ว่ากลไกที่น่าจะเกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับสารมลทิน ประกอบด้วย การตกตะกอนทางเคมี ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และการดูดซับ ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดกลไกทั้งสาม ได้โดยอาศัยผลการทดลองคือ การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสที่เกิดจากกลไกการดูดซับสามารถยืนยันได้โดยอาศัยไอโซเทอร์มการดูดซับที่กล่าวแล้วข้างต้น ส่วนกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันและการตกตะกอนผลึกนั้น จะเกิดขึ้นควบคู่กับกลไกการดูดซับ โดยที่กลไกการดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งจากแรงทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการดูดซับทางเคมีที่เกิดขึ้นก็คือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันหรือเกิดการตกตะกอนผลึกระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับสารมลทิน โดยผลการดูดซับทางเคมีจะทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) หรือสนิมเหล็ก (Rust) ขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยส่วนใหญ่มีการยืนยันว่าเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูป Fe_2O_3 Fe_3O_4 และ FeOOH ทั้งนี้ การแยกกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันและการตกตะกอนผลึกออกจากกลไกการดูดซับนั้น จากผลการทดลองจะยังไม่สามารถแยกกลไกได้ ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง คือ เครื่อง XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) เพื่อแสดงองค์ประกอบบนพื้นผิว

5.1.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์

การทดลองแบบคอลัมน์ ประกอบด้วย การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ ได้แก่ การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study) เพื่อหาระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time; HRT) และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity: K) ของตัวกลาง จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผล 3 ปัจจัย ได้แก่ ผลของความเร็วการไหล ผลของสัดส่วนระหว่างเศษผงเหล็กและทราย และผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และศึกษาถึงความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะสามารถได้ค่าเพื่อใช้ในการออกแบบ PRB นอกจากนั้นยังศึกษาไปถึงผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

การศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามเพื่อหาระยะเวลากักเก็บ (HRT) พบว่าคอลัมน์ทรายที่อัตราการไหลสูง มีค่าระยะเวลากักเก็บเท่ากับ 0.87 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล (0.91 ชั่วโมง) และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล (1.07 ชั่วโมง) และที่อัตราการไหลต่ำ คอลัมน์ทรายก็มีเวลากักเก็บน้อยกว่าคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล เช่นกัน นอกจากนี้ที่อัตราการไหลสูง ก็มีระยะเวลากักเก็บเร็วกว่าอัตราการไหลต่ำประมาณ 4 เท่า

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (K) ของตัวกลางเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งในด้านการยอมให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวกลาง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ของทราย เท่ากับ 1.07×10^{-3} เมตรต่อวินาที เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล เท่ากับ 4.17×10^{-4} เมตรต่อวินาที และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล เท่ากับ 1.41×10^{-4} เมตรต่อวินาที ซึ่งตัวกลางที่มีค่า K อยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-5} คือ ทรายหยาบ (Coarse sand) แสดงให้เห็นว่า ตัวกลางทั้งหมดจะมีการซึมผ่านได้ในระดับปานกลาง ส่วนค่าความพรุน (Porosity) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคเม็ดดินต่อปริมาตรมวลดินโดยรวม ซึ่งพบว่าทราย ขนาด 0.85 – 2.00 มิลลิเมตร มีความพรุน 0.63 เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล มีความพรุน 0.65 และเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล มีความพรุน 0.68 จะเห็นได้ว่าปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น

การศึกษาปัจจัยที่มีผล 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วการไหลจากการทดลองเปรียบเทียบความเร็วการไหลต่ำและสูง การเพิ่มความเร็วการไหลจะไม่มีมีผลต่อการกำจัดตะกั่ว แต่จะมีผลต่อการกำจัดแมงกานีส ทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกในการกำจัดแมงกานีสไม่ได้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์แต่จะเกิดจากการดูดซับบนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์แทน ตามการทดลองแบบกะ ดังนั้นเมื่อความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นกลไกในการดูดซับจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลง ส่วนการกำจัดตะกั่วนั้นแสดงให้เห็นว่าคอลัมน์เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ร้อยละ 20 โดยมวล ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 100 ที่ความเร็วการไหลต่ำ และร้อยละ 99.77 ที่ความเร็วการไหลสูง ในส่วนสัดส่วนระหว่างเหล็กกับทรายที่ใช้ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบนั้น มีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อไม่ให้ระบบเกิดปัญหาการอุดตัน (Clogging) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกัดกร่อนของเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกขึ้น พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนของเหล็กที่ต่างกัน คือ เหล็กร้อยละ 5 และร้อยละ 20 โดยมวล สรุปได้ว่า ปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นส่วนความสามารถในการกำจัดแมงกานีสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดและปัจจัยสุดท้ายความเข้มข้นของสารมลทินที่เข้าสู่ระบบซึ่งทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสมจะสูงมากคือเกือบร้อยละ 100 แต่ในช่วงท้ายการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดจึงเริ่มมีค่าลดลง

ส่วนการกำจัดแมงกานีสนั้น จะพบว่าในสารละลายแมงกานีส ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น แต่ในสารละลายผสมประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นสามารถสรุปได้เบื้องต้นว่า ยังไม่เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดทั้งของตะกั่วและแมงกานีส แต่จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสารมลทินเริ่มต้นต่ำ ๆ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังมีการทดลองความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วยังคงสูง ทั้งในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสม ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 100 แม้เพิ่มปริมาณเหล็ก แต่ในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณเหล็กในระบบเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณสารมลทินน้อย จะส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสในระบบไม่ลดลงหรืออาจมีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเศษผงเหล็กที่ใช้มีส่วนประกอบของแมงกานีสร่วมอยู่ด้วย

จากการทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 3 ปัจจัย สรุปได้ว่า ความเร็วการไหลที่เร็วกว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงได้เร็วกว่า และสัดส่วนของเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสมซึ่งต้องดูประกอบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลทินที่จะเข้าระบบด้วย โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดจะอยู่สูงสุดที่สัดส่วนของเหล็ก ต่อความเข้มข้นของสารมลทินเริ่มต้นค่าหนึ่ง

ความสามารถการบำบัดของชุดทดลองแบบคอลัมน์ โดยการศึกษา Breakthrough curve จะอาศัยผลการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ ก. ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง ชุดการทดลองที่ ข. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง และชุดการทดลองที่ ค. ความเข้มข้นผสมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และความเร็วการไหลสูง และจากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว จะเริ่มหมดสภาพเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง และพบว่าปริมาณแมงกานีสในสารละลายผสมและปริมาณเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจะคงที่จนกว่าปริมาณตะกั่วที่อยู่ในระบบลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสจึงจะเพิ่มสูงขึ้น

ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity: q) พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 962.38 มิลลิกรัม (ตะกั่ว) ต่อกรัม (เหล็ก) ที่มีระยะเวลาเบรคทรูหรือจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) ที่ 6 วัน จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ที่ 28 วัน ซึ่งเป็นอายุการใช้งานของระบบ และค่า Transport distribution coefficient ($K_{d,trans}$) ชุดการทดลอง ก. มีค่าเท่ากับ 24.91 ลิตรต่อกรัม ชุดการทดลอง ข. ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลาย

ผสม มีค่าเท่ากับ 1,114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม และ $K_{d,trans}$ เท่ากับ 22.28 ลิตรต่อกรัม ที่จุดเริ่มหมดสภาพ ที่ 10 วัน และอายุการใช้งาน ที่ 24 วัน และชุดการทดลอง ค. คือเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็ก ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม มีค่าลดลงเท่ากับ 193.95 มิลลิกรัมต่อกรัม และ $K_{d,trans}$ เท่ากับ 3.88 ลิตรต่อกรัม ที่จุดเริ่มหมดสภาพ 13 วันและอายุการใช้งาน 18 วัน จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายตะกั่วจะมีค่าน้อยว่าในสารละลายผสมแสดงว่าแมงกานีสมีผลต่อความสามรถในการกำจัด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กทำให้ความสามารถในการดูดซับกลับลดลง ซึ่งหมายถึงว่าปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น แสดงว่าสัดส่วนของเหล็กต่อทรายที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 โดยมวล

การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) หรือ L_{MTZ} และหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ พบว่า ชุดการทดลอง ก. ความยาวของชั้นการดูดซับจากสมการได้ค่า L_{MTZ} 4.05 เซนติเมตร และค่าระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (EBCT) 0.91 ชั่วโมง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับระยะเวลากักเก็บจริง และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) เท่ากับ 0.031 กรัมต่อลิตร ชุดการทดลอง ข. มีค่า L_{MTZ} เท่ากับ 3.04 เซนติเมตร ค่า EBCT เท่ากับ 0.91 ชั่วโมง และ Usage rate เท่ากับ 0.036 กรัมต่อลิตร และสุดท้ายชุดการทดลอง ค. มีค่า L_{MTZ} เท่ากับ 1.47 เซนติเมตร ค่า EBCT เท่ากับ 1.07 ชั่วโมง และ Usage rate เท่ากับ 0.221 กรัมต่อลิตร ซึ่งสรุปได้ว่า ชุดทดลอง ก. มีความยาวของชั้นการดูดซับมากที่สุด ส่วนอัตราการใช้สารดูดซับให้ผลคล้อยตามกับผลของค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

และส่วนสุดท้ายของการทดลองชุดคอลัมน์คือ ผลของปัจจัยสภาวะแวดล้อม อันได้แก่ ปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด ความเร็วการไหลหลังการบำบัด ค่าพีเอชและสภาพนำไฟฟ้า ดังนี้ ปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจากการทดลองการกำจัดสารมลทินในสารละลายต่าง ๆ พบว่าปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นในสารละลายตะกั่วและสารละลายผสมจะน้อยกว่าในสารละลายแมงกานีส และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกันซึ่งแสดงผลในทุกจุดเก็บน้ำ พบว่าปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับชั้นความสูงของสนิมเหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับสารมลทิน โดยที่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันของการกำจัดสารมลทินด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Fe_2O_3 และ FeOOH ซึ่งมีลักษณะเป็นสนิมเหล็ก ความเร็วการไหลพบว่าความไหลการไหลหลังการบำบัดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากความเร็วการไหลที่ใช้เพื่อหา Breakthrough curve ดังนั้นจึงมีค่าที่สูงทำให้ไม่ค่อยเห็นความแตกต่าง ค่าพีเอช พบว่าค่าพีเอชน้ำเข้าจะอยู่ในช่วง 6 – 7 และค่าพีเอชน้ำออกการกำจัดสารในสารละลายตะกั่วจะมีค่าพีเอช เพิ่มสูงขึ้นคือประมาณเกือบ 10 แต่ในสารละลายแมงกานีสและสารละลายผสม ค่าพีเอชของน้ำออกจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเข้า และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกัน ซึ่งแสดงผลของค่าพีเอชในทุกจุดการเก็บน้ำ พบว่าแนวโน้มเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือน้ำเข้าจะมีค่าพีเอชต่ำสุด

และค่อยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนค่าพีเอชที่สูงสุดที่จุดน้ำออก โดยปริมาณเหล็กที่มากกว่าจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้มากกว่าปริมาณเหล็กที่น้อย และผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า พบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำเข้าในทุกสารละลายจะให้ค่าที่สูงกว่าน้ำออก ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณอิออนหลังกระบวนการบำบัดมีปริมาณน้อยลง แต่ยังคงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนการทดลองที่ปริมาณเหล็กที่ใช้ต่างกัน ซึ่งแสดงผลของค่าสภาพนำไฟฟ้าในทุกจุดการเก็บน้ำ พบว่าแนวโน้มเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือน้ำเข้าจะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด และค่อยลดลงเรื่อย ๆ จนค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำสุดอยู่ที่จุดน้ำออก โดยปริมาณเหล็กที่มากกว่าจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าได้ชัดเจนกว่าปริมาณเหล็กที่น้อย

จากผลการทดลองคอลัมน์แสดงให้เห็นว่าการกำจัดตะกั่วโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงมากกว่าร้อยละ 90 ส่วนการกำจัดแมงกานีสโดยใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์นั้น อาจไม่ได้เกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและแมงกานีสเพียงอย่างเดียว อาจเกิดมาจากการกรองด้วยทรายหรือเป็นการดูดติดบนผิวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ซึ่งเหล็กอาจทำหน้าที่เป็นตัวกรองนั่นเอง ทั้งนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าปริมาณแมงกานีสที่อยู่ในสารละลายผสมมีส่วนทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นจนถึง ร้อยละ 100 ในส่วนของปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกำจัดสารมลทินของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ทาง U.S. EPA แนะนำให้ตรวจวัด คือปริมาณเหล็ก ค่าอัตราการไหล ค่าพีเอช และค่าสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะสามารถบอกถึงสภาพการทำงานของระบบที่กำลังเกิดขึ้น โดยที่เมื่อเดินระบบไปเรื่อย ๆ ปริมาณเหล็กอาจมีปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐาน อัตราการไหลย่อมมีค่าลดลง ส่วนค่าพีเอชเมื่อเกิดปฏิกิริยาของเหล็กกับสารปนเปื้อนขึ้นอย่างสมบูรณ์จะเกิดผลึกของ FeOOH ขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น และค่าสภาพนำไฟฟ้าก็จะลดลงเมื่ออิออนในน้ำลดลง

5.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อที่จะหาคำตอบมาอ้างอิงสมมติฐานที่ตั้งไว้คือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วที่มีแมงกานีสผสมอยู่ได้ โดยการนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งแบบกะและแบบคอลัมน์ มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทั้งจากผลการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์สามารถสรุปได้ว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วที่มีแมงกานีสผสมอยู่ด้วยได้ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ ดังนี้

การวิเคราะห์ทางสถิติจากการทดลองแบบกะ จะใช้วิธี Two – tailed Student' t – test โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารมลทินจากผลการทดลองของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ 50 กรัมต่อลิตร เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว การกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส การกำจัดตะกั่วใน

สารละลายผสมและการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก พบว่า การทดลองทั้งจากการใช้เศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็กได้ผลเหมือนกันคือ ประสิทธิภาพการกำจัดสารมลทินเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นสรุปได้ว่าตะกั่วและแมงกานีสสามารถกำจัดได้ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก

การวิเคราะห์ทางสถิติจากการทดลองแบบคอลัมน์ จะใช้วิธี Independent t – test เนื่องจากชุดทดลองแบบคอลัมน์เป็นอิสระต่อกัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารมลทินของชุดทดลองคอลัมน์ที่มีเหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทรายอย่างเดียว ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในสารละลายตะกั่ว สารละลายแมงกานีส และสารละลายผสม เทียบกับชุดคอลัมน์ทราย โดยแสดงผลจากจุดเก็บน้ำทั้งหมด พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นสรุปได้อีกว่า ตะกั่วและแมงกานีสสามารถถูกกำจัดได้ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ผสมกับทรายในชุดการทดลองแบบคอลัมน์

และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดสารละลายตะกั่วที่มีแมงกานีสผสมอยู่ด้วยได้ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

5.1.5 ผลการออกแบบ Permeable Reactive Barrier (PRB) เบื้องต้น

จากความสามารถของ PRB ในการกำจัดสารปนเปื้อนหรือสารมลพิษได้หลากหลายชนิด ทำให้เริ่มเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งาน เพื่อบำบัดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ดังนั้น จึงมีงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางการดำเนินการของเทคโนโลยี PRB พบว่าขั้นตอนที่สำคัญส่วนหนึ่งคือ การระบุวัสดุตัวกลาง (Identify reactive media) และการทดสอบความเป็นไปได้ของตัวกลาง (Laboratory testing of media) ที่ประกอบด้วย การทดสอบแบบกะ (Batch test) และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column test) เพื่อท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบเทคโนโลยี PRB อันได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic residence time) พบว่าระยะเวลาการกักเก็บจากการทดลองแบบกะเท่ากับ 4 ชั่วโมง ขนาด (Volume) พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนของเหล็กต่อทรายเป็นร้อยละ 5 โดยมวล ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม เท่ากับ 1,114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม และสัดส่วนของเหล็กต่อทรายเป็นร้อยละ 20 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายผสม เท่ากับ 114.18 มิลลิกรัมต่อกรัม และลักษณะทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical property) ของวัสดุตัวกลาง พบว่า กลไกที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วน่าจะประกอบด้วยกลไกการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) การดูดซับ (Adsorption) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) และการกรอง (Filtration)

ผลการออกแบบ PRB เบื้องต้น จากกรณีศึกษา : โรงงานอุตสาหกรรมที่พบการปนเปื้อนน้ำใต้ดินด้วยตะกั่วและแมงกานีสสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งจากผลการทดลองแบบกะและแบบคอลัมน์ สามารถคำนวณหาขนาดของ PRB โดยใช้เศษผงเหล็กผสมกับทรายเป็นวัสดุตัวกลาง ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า หากต้องการบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำใต้ดินมีความเร็วการไหลอยู่ที่ 10 เมตรต่อวัน และได้ออกแบบขนาดความลึกและความกว้างของ PRB ให้สามารถรองรับ Plume ได้ คือมีความลึกเท่ากับ 4 เมตร และความกว้างเท่ากับ 10 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่ใช้สัดส่วนของเศษผงเหล็กร้อยละ 5 โดยมวลจะมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความหนาแน่นของตัวกลางผสมเท่ากับ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นคำนวณหาปริมาณเศษผงเหล็กที่ต้องการได้เท่ากับ 73 ตัน และใช้ทรายเท่ากับ 1,387 ตัน ต่อจากนั้นก็คำนวณหาความยาวของ PRB ได้เท่ากับ 18.3 เมตร ในขั้นตอนสุดท้ายคือการตรวจสอบรายการคำนวณโดยใช้ค่าระยะเวลากักเก็บ พบว่าการออกแบบ PRB ตามรายการคำนวณดังกล่าว มีค่าระยะเวลากักเก็บมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองแบบกะ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. การได้มาและการคัดเลือกเศษผงเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องเลือกชนิดของเหล็กที่ได้มาว่าเป็นเหล็กชนิดใด เพื่อจะสามารถทำนายสิ่งเจือปนในเหล็กเพื่อความเป็นไปได้และความปลอดภัยในการใช้งานต่อไป

2. เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ชนิด คือ ผงตะไบเหล็กและเศษผงเหล็กล้วนมีขนาดเล็ก นอกจากจะมีอันตรายจากการฟุ้งกระจายแล้ว ในการใช้งานยังค่อนข้างลำบาก ประกอบกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ดังกล่าวมีคุณสมบัติในการดูดติด ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง

3. การทดลองแบบกะ พบว่าในขั้นตอนการทดลองในการหาปริมาณโลหะหนักต้องมีการเก็บตัวอย่างให้เหมาะสม เพราะปริมาณโลหะหนักหลังการบำบัดจะมีค่าต่ำมาก ซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณบางส่วนหายไปได้

4. การทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าจะเกิดปัญหาในส่วนของการอุดตัน ทั้งจากขนาดของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้มีขนาดเล็ก หรือสัดส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับทรายไม่เหมาะสมก็ล้วนมีผลทั้งสิ้น ดังนั้นหากจะทำการทดลองในระยะยาว ควรศึกษาสัดส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์กับทรายให้เหมาะสมเบื้องต้นก่อนเริ่มดำเนินการระยะยาวจริง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

การทดลองทั้งหมดเป็นแนวทางในการศึกษาความเหมาะสม ในการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีการบำบัดโลหะหนักในน้ำ และยังได้ค่าความสามารถของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดตะกั่วจากชุดทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถบำบัดตะกั่วได้

นอกจากนี้การออกแบบ PRB ที่เป็นเทคโนโลยีการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินแบบอยู่กับที่ เพื่อฟื้นฟูน้ำใต้ดิน พบว่า ขั้นตอนที่สำคัญส่วนหนึ่งคือ การระบุวัสดุตัวกลาง (Identify reactive media) และการทดสอบความเป็นไปได้ของตัวกลาง (Laboratory testing of media) ที่ประกอบด้วย การทดสอบแบบกะและการทดสอบแบบคอลัมน์เพื่อท้ายที่สุดจะได้ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบเทคโนโลยี PRB อันได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic residence time) ขนาด (Volume) และลักษณะทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical property) ซึ่งจากงานวิจัยในครั้งนี้จะได้ข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวให้สามารถนำไปใช้ออกแบบ PRB เพื่อบำบัดการปนเปื้อนตะกั่วในน้ำใต้ดินที่มีแมงกานีสปนเปื้อนอยู่ด้วยโดยใช้เศษผงเหล็กผสมกับทรายได้

5.3.2 งานวิจัยในขั้นต่อไป

1. ในปัจจุบันมีการพัฒนาเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ให้เป็นวัสดุนาโนอย่างแพร่หลาย แต่การนำมาใช้ประโยชน์ในเทคโนโลยี PRB ยังมีน้อย เนื่องจากวัสดุมีขนาดเล็กมาก ทำให้ยังมีปัญหาในเรื่องของการอุดตัน ซึ่งควรได้รับการศึกษาต่อไป นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มศักยภาพของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ด้วยการดัดแปรเป็นวัสดุผสมอีกด้วย

2. โลหะหนักที่สามารถจะเกิดปฏิกิริยากับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ได้ดี ควรมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (E^0) สูงกว่าเหล็ก ซึ่งจะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันขึ้นได้

3. ในการยืนยันกลไกการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็น เครื่อง TEM (Transmission electron microscopy) แสดงภาพสัณฐานแบบ 2 มิติ เครื่อง SEM (Scanning electron microscope) แสดงภาพสัณฐาน 3 มิติ เครื่อง XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) แสดงองค์ประกอบบนพื้นผิว และเครื่อง XRD (X-ray diffraction) แสดงองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น

4. จากขั้นตอนการดำเนินการของเทคโนโลยี PRB ได้แก่ การคัดกรอง (Screening) การศึกษาลักษณะเฉพาะของพื้นที่ (Site characterization) การออกแบบ (Design) การดำเนินการติดตั้ง (Implementation) การดำเนินการและบำรุงรักษา (Operation and maintenance) การติดตามตรวจสอบและการปิดงาน (Monitoring and closure) ซึ่งในส่วนของการออกแบบเทคโนโลยี PRB นอกจากการระบุวัสดุตัวกลาง (Identify reactive media) และการทดสอบความเป็นไปได้ของตัวกลาง (Laboratory testing of media) แล้วยังเหลือในส่วนที่สำคัญอีกอย่างคือ การออกแบบรายละเอียด ซึ่งต้องดำเนินการอย่างคุ้มค่าทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางด้านเศรษฐศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2554). **รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2553**. กรุงเทพฯ: บีทีเอสเพรส.

กรมควบคุมมลพิษ. (2555). **แผนจัดการมลพิษ พ.ศ. 2555-2559.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กองแผนงานและประเมินผล กรมควบคุมมลพิษ.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2554). รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร: **โครงการศึกษาการปนเปื้อนและการวางเครือข่ายเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดิน ในพื้นที่อำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และอำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์** (เล่มที่ 3/4).

กระทรวงสาธารณสุข, กรมควบคุมโรค. (2546). **สรุปรายงานการเฝ้าระวังโรค 2546**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์.

กระทรวงสาธารณสุขและกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2551). **แผนยุทธศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2552-2554.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กองแผนงานและประเมินผล กรมควบคุมมลพิษ.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2525). **สารานุกรมธาตุ**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ชีวนันท์ ชมภูจันทร์. (2552). **การพัฒนาตัวกรองเหล็กขนาดนาโนสเกลที่ยึดติดกับซิลิกาออกไซด์เพื่อการบำบัดสี.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551. (2551). **ราชกิจจานุเบกษา** เล่ม 125, ตอนพิเศษ 85 ง (11 พฤษภาคม): 15-18.

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543). (2543). ออกตามความใน**พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535** เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน

ประสิทธิ์ อ่อนจันทร์. (2551). **ความเข้มข้นของตะกั่ว และแมงกานีสในน้ำ และการดูดซับของตะกอนดิน ในแม่น้ำป่าสัก แม่น้ำสะแกกรัง และแม่น้ำเจ้าพระยาตอนกลาง**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ปรินทร เต็มญารศิลป์. (2551). **การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไผ่ตง และ ไผ่หมาจู๋**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520. (2520). ภูมิพลอดุลยเดช ป.ร. ให้ไว้ ณ วันที่ ๒๓ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๒๐ เป็นปีที่ ๓๒ ในรัชกาลปัจจุบัน.

ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวราพันธ์. (2548). **น้ำบาดาล การเกิดและการพัฒนาที่ยั่งยืน**. เอกสารศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ภัทรกฤตย์ จันสุนา อรอุมา วรญาณ และ สุนิดา เถาว์โท. (2555). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแมงกานีสด้วยเปลือกกล้วย. **งานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**: 130-136.

ภารดี ช่วยบำรุง. (2537). **การแยกตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีเมนเทชันด้วยผงเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภูวดล ศิริสินเลิศ. (2552). สมรรถนะของกระบวนการโคแอกกูเลชั่นและการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในแหล่งน้ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วรรณวิภา ผลาหาญ. (2547). **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผงเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วุฒิชัย ทิฐิพงษ์. (2545). **การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศิริพรรณ วัฒนะรัตน์. (2542). **การเพิ่มการสลายตัวของสารฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนคลอรีนโดยใช้ผงเหล็ก.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริลักษณ์ สุคะตะ พีรพงษ์ สุนทรเดชะ และ แฟร์ดาซ์ มาเหล็ม. (2556). เหล็กประจุศูนย์ที่เหมาะสมใน PRB กับการบำบัดสาร DNAPL. Green Research. ปีที่ 9 ฉบับที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม.

ศิวัช ภูครองหิน พิจิตร เจียมวรางกูร และ จินต์ อโณทัย. (2557). จลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วในน้ำโดยอนุภาคเหล็กนาโนวาเลนซ์ศูนย์. **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13.** วันที่ 26-28 มีนาคม 2557. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ศุทธวดี วีระพงษ์. (2548). **การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม โดยใช้เศษผงเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุทธิสา ยาอีด ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ธนิต เฉลิมยานนท์. (2551). การดูดซับไอออนของสังกะสีและตะกั่วจากสารละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับแบบเดี่ยวและแบบผสม. **The 18h Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference**. October 20-21: Pattaya, Thailand.

อุทัย สอนเทศ. (2548). **การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร.

Abou-Shady, A., Peng, C., Almeria O, J., and Xu, H. (2012). Effect of pH on separation of Pb (II) and NO_3^- from aqueous solutions using electrodialysis. **Desalination** 285: 46-53.

APHA. (1992). **Standard Methods for the Exemination of Water and wastewater**. 18th edition. American Public Health Association, Washington, D.C.

APHA (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th edition. American Public Health Association, Washington, D.C.

Arancibia-Miranda, N., Baltazar, S.E., García, A., Romero, A.H., Rubio, M.A., and Altbir, D. (2014). Lead removal by nano-scale zero valent iron: Surface analysis and pH effect. **Materials Research Bulletin** 59: 341-348.

Arshadi, M., Soleymanzadeh, M., Salvacion, J.W.L., and SalimiVahid, F. (2014). Nanoscale Zero-Valent Iron (NZVI) supported on sineguelas waste for Pb(II) removal from aqueous solution: Kinetics, thermodynamic and mechanism. **Journal of Colloid and Interface Science** 426: 241-251.

ASTM. (2004). Annual Book of ASTM Standaard: Soil and Rock. 04.08-04.09. USA: Baltimore.

Aziz, H.A., and Smith, P.G. (1995). Removal of manganese from water using crushed dolomite filtration technique. **Wat. Res.** 30(2): 489-492.

Aziz, H.A., Adlan, M.N., and Ariffin, K.S. (2008). Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu and Cr(III)) removal from water in Malaysia: Post treatment by high quality limestone. **Bioresource Technology** 99: 1578-1583.

Bang, S., Korfiatis, G.P., and Meng, X. (2005). Removal of arsenic from water by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials** 121: 61-67.

Baric, M., Majone, M., Beccari, M., and Papini, M.P. (2012). Coupling of polyhydroxybutyrate (PHB) and zero valent iron (ZVI) for enhanced treatment of chlorinated ethanes in permeable reactive barriers (PRBs). **Chemical Engineering Journal** 195-196: 22-30.

Bartzas, G., Komnitsas, K., and Paspaliaris, I. (2006). Laboratory evaluation of Fe^0 barriers to treat acidic leachates. **Minerals Engineering** 19: 505-514.

Bell, L.S., Devlin, J.F., Gillham, R.W., and Binning, P.J. (2003). A sequential zero valent iron and aerobic biodegradation treatment system for nitrobenzene. **Journal of Contaminant Hydrology** 66: 201-217.

Berber-Mendoza, M.S., Leyva-Ramos, R., Alonso-Davila, P., Fuentes-Rubio, L., and Guerrero-Coronado, R.M. (2006). Comparison of isotherms for the ion exchange of Pb(II) from aqueous solution onto homoionic clinoptilolite. **Journal of Colloid and Interface Science** 301: 40-45.

Berthouex, P.M., and Brown, L.C. (2002). **Statistics for Environmental Engineers**. (2nd ed.). Washington D.C.: Lewis.

Bilardi, S., Amos, R.T., Blowes, D.W., Calabrò, P.S., and Moraci, N. (2012). Reactive Transport Modeling of ZVI Column Experiments for Nickel Remediation. **Groundwater Monitoring & Remediation** 33(1): 97-104.

Bin Jusoh, A., Cheng, W.H., Low, W.M., Nora'aini, A., and Megat Mohd Noor, M.J. (2005). Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon. **Desalination** 182: 347-353.

Biterna, M., Arditsoglou. A., Tsikouras, E., and Voutsa D. (2007). Arsenate removal by zero valent iron: Batch and column tests. **Journal of Hazardous Materials** 149: 548-552.

Biterna, M., Antonoglou, L., Lazou, E., and Voutsa, D. (2010). Arsenite removal from waters by zero valent iron: Batch and column tests. **Chemosphere** 78: 7-12.

Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Benner, S.G., McRae, C.W.T., Bennett, T.A., and Puls, R.W. (2000). Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers. **Journal of Contaminant Hydrology** 45: 123-137.

Calabrò, P.S., Moraci, N., and Suraci, P. (2012). Estimate of the optimum weight ratio in Zero-Valent Iron/Pumice granular mixtures used in permeable reactive barriers for the remediation of nickel contaminated groundwater. **Journal of Hazardous Materials** 207-208: 111-116.

Cantrell, K.J., Kaplan, D.I., and Wietsma, T.W. (1995). Zero-valent iron for the in situ remediation of selected metals in groundwater. **Journal of Hazardous Materials** 42: 201-212.

Cao, J., Wei, L., Huang, Q., Wang, L., and Han, S. (1999). Reducing degradation of azo dye by zero-valent iron in aqueous solution. **Chemosphere** 38(3): 565-571.

Carey, M.A., Fretwell, B.A., Mosley, N.G., and Smith, J.W.N. (2001). Guidance on the use of permeable reactive barriers for remediating contaminated groundwater. **National Groundwater & Contaminated Land Centre report** NC/01/51.

Chatpet Yossapol. (1999). Effect of Mixing and pH in the Reduction of Nitrate by Zero Valent Iron. Thesis of Master of Science in Environmental Engineering, Nashville, Tennessee.

Chen, J-L., Al-Abed, S.R., Ryan, J.A., and Li, Z. (2001). Effects of pH on dechlorination of trichloroethylene by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials** B83: 243-254.

Cheng, I.F., Muftikian, R., Fernando, Q., and Korte, N. (1997). Reduction of nitrate to ammonia by zero-valent iron. **Chemosphere** 35(11): 2689-2695.

Choi, N-C., Kim, S-B., Kim, S-O., Lee, J-W., and Park, J-B. (2012). Removal of arsenate and arsenite from aqueous solution by waste cast iron. **Journal of Environmental Sciences** 24(4): 589-595.

Choo, K-H., Lee, H., and Choi, S-J. (2005). Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water treatment. **Journal of Membrane Science** 267: 18-26.

Cissoko, N., Zhang, Z., Zhang, J., and Xu, X. (2009). Removal of Cr(VI) from simulative contaminated groundwater by iron metal. **Process Safety and Environmental Protection** 87: 395-400.

Clark, C.J., Rao, P.S.C., and Annable, M.D. (2003). Degradation of perchloroethylene in cosolvent solutions by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials** B96: 65-78.

Clescerl, L.S., Greenberg, A.E., and Eaton, A.D. (1999). **Standard Methods for Examination of Water & Wastewater**. (20th ed.). American Public Health Association.

Da Fonseca, M.G., De Oliveira, M.M., and Arakaki, L.N.H. (2006). Removal of cadmium, zinc, manganese and chromium cations from aqueous solution by a clay mineral. **Journal of Hazardous Materials** B137: 288-292.

Dwivedi, C.P., Sahu, J.N., Mohanty, C.R., Raj Mohan, B., and Meikap, B.C. (2008). Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal. Journal of Hazardous Materials 156: 596-603.

Eljamal, O., Sasaki, K., and Hirajima, T. (2011). Numerical simulation for reactive solute transport of arsenic in permeable reactive barrier column including zero-valent iron. **Applied Mathematical Modelling** 35: 5198-5207.

Freeman, H.M. (1989). Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposol. New York: McGraw-Hill.

Ganesan, P., Kamaraj, R., Sozhan, G., and Vasudevan, S. (2012). Oxidized multiwalled carbon nanotubes as adsorbent for the removal of manganese from aqueous solution. **Environ Sci Pollut Res.**

Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., and Hicks, J. (2000). **Final design guidance for application of permeable reactive barriers for groundwater remediation**. Battelle, Columbus, Ohio.

Gusmão, A.D., De Campos, T.M.P., De Melo Maia Nobre, M., and Do Amaral Vargas Jr, E. (2004). Laboratory tests for reactive barrier design. **Journal of Hazardous Materials** 110: 105-112.

Hashim, M.A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J.N., and Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. **Journal of Environmental Management** 92: 2355-2388.

Heath, R.C. (1983). **Basic ground-water hydrology**. U.S. geological survey water-supply paper; 2220. North Carolina.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Helland, B.R., Alvarez, P.J.J., and Schnoor, J.L. (1995). Reductive dechlorination of carbon tetrachloride with elemental iron. **Journal of Hazardous Materials** 41: 205-216.

Jitrapun Pusapukdepob, Pichan Sawangwong, Chompusakdi Pulket, Duangduen Satraphat, Sastri Saowakontha, and Suwanna Panutrakul. (2007). Health risk assessment of villagers who near a lead mining area: a case study of Klity village, Kanchanaburi province, Thailand. **Southeast Asian J Trop Med Public Health** 38(1): 168-177.

Jun, D., Yongsheng, Z., Weihong, Z., and Mei, H. (2009). Laboratory study on sequenced permeable reactive barrier remediation for landfill leachate-contaminated groundwater. **Journal of Hazardous Materials** 161: 224-230.

Keum, Y-S., and Li, Q.X. (2004). Reduction of nitroaromatic pesticides with zero-valent iron. **Chemosphere** 54: 255-263.

Kim, S.A., Kamala-Kannan, S., Lee, K-J., Park, Y-J., Shea, P.J., Lee, W-H., Kim, H-M., and Oh B-T. (2013). Removal of Pb (II) from aqueous solution by a zeolite–nanoscale zero-valent iron composite. **Chemical Engineering Journal** 217: 54-60.

Komnitsas, K., Bartzas, G., Fytas, K., and Paspaliaris, I. (2007). Long-term efficiency and kinetic evaluation of ZVI barriers during clean-up of copper containing solutions. **Minerals Engineering** 20: 1200-1209.

Komnitsas, K., Bazdanis, G., Bartzas, G., Zaharaki, D., and Sahinkaya, E. (2012). Prevention of groundwater contamination in waste disposal sites using composite reactive barriers. **Protection and restoration of the environment XI.**

Lavine, B.K., Auslander, G., and Ritter, J. (2001). Polarographic studies of zero valent iron as a reductant for remediation of nitroaromatics in the environment. **Microchemical Journal** 70: 69-83.

Lee, T., Lim, H., Lee, Y., and Park, J-W. (2003). Use of waste iron metal for removal of Cr(VI) from water. **Chemosphere** 53: 479-485.

Leupin, O.X., and Hug, S.J. (2005). Oxidation and removal of arsenic (III) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron. **Water Research** 39: 1729-1740.

Levenspiel, O. (1972). **Chemical Reaction Engineering**. 2nd edition. John Wiley & Sons. Canada.

Lien H.L., and Wilkin, R.T. (2005). High-level arsenite removal from groundwater by zero-valent iron. **Chemosphere** 59: 377-386.

Liu, Q., Bei, Y., and Zhou, F. (2009). Removal of lead (II) from aqueous solution with amino-functionalized nanoscale zero-valent iron. **Central European Journal of Chemistry** 7(1): 79-82.

Lo, I.M.C., Lam C.S.C., and Lai, K.C.K. (2006). Hardness and carbonate effects on the reactivity of zero-valent iron for Cr(VI) removal. **Water Research** 40: 595-605.

Lookman, R., Bastiaens, L., Borremans, B., Maesen, M., Gemoets, J., and Diels, L. (2004). Batch-test study on the dechlorination of 1,1,1-trichloroethane in contaminated aquifer material by zero-valent iron. **Journal of Contaminant Hydrology** 74: 133-144.

Luan, F., Santelli, C.M., Hansel, C.M., and Burgos, W.D. (2012). Defining manganese (II) removal processes in passive coal mine drainage treatment systems through laboratory incubation experiments. **Applied Geochemistry** 27: 1567-1578.

Malamis, S., Katsou, E., and Haralambous, K.J. (2011). Study of Ni(II), Cu(II), Pb(II), and Zn(II) Removal Using Sludge and Minerals Followed by MF/UF**. Water Air Soil Pollut**. 218: 81-92.

Moraci, N., and Calabrò, P.S. (2010). Heavy metals removal and hydraulic performance in zero-valent iron/pumice permeable reactive barriers. **Journal of Environmental Management** 91: 2336-2341.

Morrison, S.J., Metzler, D.R., and Dwyer, B.P. (2002). Removal of As, Mn, Mo, Se, U, V and Zn from groundwater by zero-valent iron in a passive treatment cell: reaction progress modeling. **Journal of Contaminant Hydrology** 56: 99-116.

Nam, S., and Tratnyek, P.G. (2000). Reduction of azo dyes with zero-valent iron. **Wat. Res**. 34(6): 1837-1845.

Okoniewska, E., Lach, J., Kacprzak, M., and Neczaj, E. (2007). The removal of manganese, iron and ammonium nitrogen on impregnated activated carbon. **Desalination** 206: 251-258.

Oliva, J., De Pablo, J., Cortina, J-L., Cama, J., and Ayora, C. (2010). The use of Apatite II™ to remove divalent metal ions zinc(II), lead(II), manganese(II) and iron(II) from water in passive treatment systems: Column experiments. **Journal of Hazardous Materials** 184: 364-374.

Phillips, D.H. (2009). Permeable reactive barriers: A sustainable technology for cleaning contaminated groundwater in developing countries. **Desalination** 248: 352-359.

Ponder, S.M., Darab, J.G. and Mallouk, T.E. (2000). Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. **Environmental Science & Technology** 34(12): 2564 - 2569.

Qin, Q., Wang, Q., Fu, D., and Ma, J. (2011). An efficient approach for Pb(II) and Cd(II) removal using manganese dioxide formed in situ. **Chemical Engineering Journal** 172: 68-74.

Rodríguez-Maroto, J.M., García-Herruzo, F., García-Rubio, A., Gómez-Lahoz, C., and Vereda-Alonso, C. (2009). Kinetics of the chemical reduction of nitrate by zero-valent iron. **Chemosphere** 74: 804-809.

Saberi, A. (2012). Comparison of Pb^{2+} Removal Efficiency by Zero Valent Iron Nanoparticles and Ni/Fe Bimetallic Nanoparticles. **Iranica Journal of Energy & Environment** 3(2): 189-196.

Sawyer, C.N., Mccarty, P.L., and Parkin, G.F. (2003). **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.

Shi, J., Yi, S., He, H., Long, C., and Li, A. (2013). Preparation of nanoscale zero-valent iron supported on chelating resin with nitrogen donor atoms for simultaneous reduction of Pb^{2+} and NO^{-}_{3}. **Chemical Engineering Journal** 230: 166-171.

Shimizu, A., Tokumura, M., Nakajima, K., and Kawase, Y. (2012). Phenol removal using zero-valent iron powder in the presence of dissolved oxygen: Roles of decomposition by the Fenton reaction and adsorption/precipitation. **Journal of Hazardous Materials** 201-202: 60-67.

Sun, H., Wang, L., Zhang, R., Sui, J., and Xu, G. (2006). Treatment of groundwater polluted by arsenic compounds by zero valent iron. **Journal of Hazardous Materials** B129: 297-303.

Suzuki, T., Moribe, M., Oyama, Y., and Niinae, M. (2012). Mechanism of nitrate reduction by zero-valent iron: Equilibrium and kinetics studies. **Chemical Engineering Journal** 183: 271-277.

Tang, C., Huang, Y.H., Zeng, H., and Zhang, Z. (2014). Promotion effect of Mn^{2+} and Co^{2+} on selenate reduction by zero-valent iron. **Chemical Engineering Journal** 244: 97-104.

Thiruvenkatachari, R., Vigneswaran, S., and Naidu, R. (2008). Permeable reactive barrier for groundwater remediation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 14: 145-156.

Tyrovola, K., Peroulaki, E., and Nikolaidis, N.P. (2007). Modeling of arsenic immobilization by zero valent iron. **European Journal of Soil Biology** 43: 356-367.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (1998). **Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation.** Washington DC.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (2012). **A Citizen's Guide.**

Vaghetti, J.C.P., Lima, E.C., Royer, B., Da Cunha, B.M., Cardoso, N.F., Brasil, J.L., and Dias, S.L.P. (2009). Pecan nutshell as biosorbent to remove Cu(II), Mn(II) and Pb(II) from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials** 162: 270-280.

Wan, M-W., Kan, C-C., Rogel, B.D., and Dalida, M.L.P. (2010). Adsorption of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solution on chitosan-coated sand. **Carbohydrate Polymers** 80: 891-899.

Wang, K-S., Lin, C-L., Wei, M-C., Liang, H-H., Li, H-C., Chang, C-H., Fang, Y-T., and Chang, S-H. (2010). Effects of dissolved oxygen on dye removal by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials** 182: 886-895.

Wilkems, J.A., Butler, P.B., Kahl, W.R., and Scrivner, N.C. (2001). **Permeable Reactive Barrier for Metals Treatment at the Newport, DE Superfund Site.** The 2001 International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition.

WHO. (2011). **Guidelines for Drinking-water Quality**. (4th ed.). Switzerland.

Xi, Y., Mallavarapu, M., and Naidu, R. (2010). Reduction and adsorption of Pb^{2+} in aqueous solution by nano-zero-valent iron - A SEM, TEM and XPS study. **Materials Research Bulletin** 45: 1361-1367.

Xu, J., Hao, Z., Xie, C., Lv, X., Yang, Y., and Xu, X. (2012). Promotion effect of Fe^{2+} and Fe_3O_4 on nitrate reduction using zero-valent iron. **Desalination** 284: 9-13.

Yin, W., Wu, J., Li, P., Wang, X., Zhu, N., Wu, P., and Yang, B. (2012). Experimental study of zero-valent iron induced nitrobenzene reduction ingroundwater: The effects of pH, iron dosage, oxygen and common dissolved anions. **Chemical Engineering Journal** 184: 198-204.

Yoon, I-H., Kim, K-W., Bang, S., and Kim, M.G. (2011). Reduction and adsorption mechanisms of selenate by zero-valent iron and related iron corrosion. **Applied Catalysis B: Environmental** 104: 185-192.

Zhang, Y., Amrhein, C., and Frankenberger Jr, W.T. (2005). Effect of arsenate and molybdate on removal of selenate from an aqueous solution by zero-valent iron. **Science of the Total Environment** 350: 1-11.

Zhang, H., Duan, L., Zhang, Y., and Wu, F. (2005). The use of ultrasound to enhance the decolorization of the C.I. Acid Orange 7 by zero-valent iron. **Dyes and Pigments** 65: 39-43.

Zhang, X., Lin, S., Lu, X-Q., and Chen, Z-L. (2010). Removal of Pb(II) from water using synthesized kaolin supported nanoscale zero-valent iron. **Chemical Engineering Journal** 163: 243-248.

Zhang, Z., Hao, Z., Yang, Y., Zhang, J., Wang, Q., and Xu, X. (2010). Reductive denitrification kinetics of nitrite by zero-valent iron. **Desalination** 257: 158-162.

Zhang, X., Lin, S., Chen, Z., Megharaj, M., and Naidu, R. (2011). Kaolinite-supported nanoscale zero-valent iron for removal of Pb^{2+} from aqueous solution: Reactivity, characterization and mechanism. **Water Research** 45: 3481-3488.

Zhang, Y., Su, Y., Zhou, X., Dai, C., and Kellerd, A.A. (2013). A new insight on the core–shell structure of zero valent iron nano particles and its application for Pb (II) sequestration. **Journal of Hazardous Materials** 263: 685-693.

ภาคผนวก ก

ผลของความเร็วในการกวนผสม และระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ ก.1 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 0 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	63.55	63.55	0
0.25	63.55	55.45	12.75
0.5	63.55	53.43	15.92
0.75	63.55	51.35	19.20
1	63.55	48.28	24.03
1.5	63.55	46.22	27.27
2	63.55	36.97	41.83
2.5	63.55	38.47	39.46
3	63.55	36.34	42.82
4	63.55	36.44	42.66
5	63.55	29.34	53.83
6	63.55	26.24	58.71
12	63.55	26.39	58.47
18	63.55	26.47	58.35
24	63.55	24.34	61.70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 50 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	55.45	55.45	0
0.25	55.45	33.63	39.35
0.5	55.45	31.35	43.46
0.75	55.45	28.13	49.27
1	55.45	26.47	52.26
1.5	55.45	23.93	56.84
2	55.45	18.45	66.73
2.5	55.45	18.14	67.29
3	55.45	18.93	65.86
4	55.45	17.34	68.73
5	55.45	13.67	75.35
6	55.45	12.28	77.85
12	55.45	8.26	85.10
18	55.45	8.34	84.96
24	55.45	7.94	85.68

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล
ที่ความเร็วในการกวนผสม 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	82.74	82.74	0
0.25	82.74	55.45	32.98
0.5	82.74	33.43	59.60
0.75	82.74	31.35	62.11
1	82.74	28.28	65.82
1.5	82.74	26.22	68.31
2	82.74	23.87	71.15
2.5	82.74	18.47	77.68
3	82.74	8.34	89.92
4	82.74	1.44	98.26
5	82.74	2.34	97.17
6	82.74	0	100
12	82.74	0	100
18	82.74	0	100
24	82.74	0	100

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.4 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	33.43	33.43	0
0.25	33.43	23.89	28.54
0.5	33.43	12.78	61.77
0.75	33.43	8.89	73.41
1	33.43	9.24	72.36
1.5	33.43	6.25	81.30
2	33.43	2.97	91.12
2.5	33.43	3.43	89.74
3	33.43	1.89	94.35
4	33.43	0	100
5	33.43	0	100
6	33.43	0	100
12	33.43	0	100
18	33.43	0	100
24	33.43	0	100

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.5 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล
ที่ความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	53.09	53.09	0
0.25	53.09	33.13	37.60
0.5	53.09	31.82	40.06
0.75	53.09	23.23	56.24
1	53.09	24.29	54.25
1.5	53.09	20.26	61.84
2	53.09	18.52	65.12
2.5	53.09	16.54	68.85
3	53.09	14.99	71.76
4	53.09	13.75	74.10
5	53.09	9.24	82.60
6	53.09	6.39	87.96
12	53.09	6.85	87.10
18	53.09	1.87	96.48
24	53.09	1.34	97.48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.6 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 450 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	68.9	68.9	0
0.25	68.9	23.09	66.49
0.5	68.9	23.43	65.99
0.75	68.9	21.35	69.01
1	68.9	18.28	73.47
1.5	68.9	16.32	76.31
2	68.9	23.91	65.30
2.5	68.9	18.39	73.31
3	68.9	16.28	76.37
4	68.9	16.34	76.28
5	68.9	15.51	77.49
6	68.9	16.24	76.43
12	68.9	16.35	76.27
18	68.9	16.89	75.49
24	68.9	14.31	79.23

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 0 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	52.63	52.63	0
0.25	52.63	46.55	11.55
0.5	52.63	40.22	23.58
0.75	52.63	42.68	18.91
1	52.63	37.64	28.48
1.5	52.63	33.11	37.08
2	52.63	26.99	48.72
2.5	52.63	29.24	44.45
3	52.63	28.17	46.47
4	52.63	28.22	46.38
5	52.63	27.67	47.42
6	52.63	28.12	46.57
12	52.63	28.20	46.42
18	52.63	28.24	46.35
24	52.63	27.17	48.37

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.8 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 50 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	69.03	69.03	0
0.25	69.03	55.34	19.83
0.5	69.03	49.78	27.88
0.75	69.03	47.84	30.70
1	69.03	41.73	39.55
1.5	69.03	35.00	49.29
2	69.03	32.68	52.66
2.5	69.03	33.49	51.48
3	69.03	33.59	51.34
4	69.03	33.69	51.19
5	69.03	34.79	49.60
6	69.03	34.34	50.25
12	69.03	34.49	50.03
18	69.03	34.17	50.50
24	69.03	34.10	50.60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.9 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	82.00	82.00	0
0.25	82.00	60.39	26.35
0.5	82.00	53.43	34.84
0.75	82.00	51.35	37.38
1	82.00	49.11	40.11
1.5	82.00	44.11	46.21
2	82.00	46.45	43.35
2.5	82.00	36.89	55.01
3	82.00	36.23	55.82
4	82.00	30.12	63.27
5	82.00	29.74	63.73
6	82.00	27.09	66.96
12	82.00	25.89	68.43
18	82.00	26.00	68.29
24	82.00	26.66	67.49

ตารางที่ ก.10 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	50.05	50.05	0
0.25	50.05	45.04	10.01
0.5	50.05	42.00	16.08
0.75	50.05	30.39	39.28
1	50.05	33.43	33.21
1.5	50.05	18.35	63.34
2	50.05	12.81	74.41
2.5	50.05	11.11	77.80
3	50.05	11.00	78.02
4	50.05	11.81	76.40
5	50.05	12.17	75.68
6	50.05	10.56	78.90
12	50.05	12.45	75.12
18	50.05	11.89	76.24
24	50.05	10.56	78.90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.11 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 350 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	54.97	54.97	0
0.25	54.97	40.05	27.14
0.5	54.97	35.04	36.26
0.75	54.97	32.00	41.79
1	54.97	26.39	51.99
1.5	54.97	18.43	66.47
2	54.97	13.35	75.71
2.5	54.97	16.35	70.26
3	54.97	9.29	83.10
4	54.97	11.87	78.41
5	54.97	10.98	80.03
6	54.97	12.36	77.52
12	54.97	11.51	79.06
18	54.97	11.36	79.33
24	54.97	10.51	80.88

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.12 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ที่ความเร็วในการกวนผสม 450 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ	ประสิทธิภาพการกำจัด
ชั่วโมง	มิลลิกรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละ
0	85.04	85.04	0
0.25	85.04	42.00	50.61
0.5	85.04	40.39	52.50
0.75	85.04	33.43	60.69
1	85.04	31.35	63.13
1.5	85.04	39.11	54.01
2	85.04	34.67	59.23
2.5	85.04	39.23	53.87
3	85.04	34.14	59.85
4	85.04	36.45	57.14
5	85.04	36.89	56.62
6	85.04	36.23	57.40
12	85.04	36.12	57.53
18	85.04	36.89	56.62
24	85.04	36.00	57.67

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว โดยใช้เศษผงเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	45.70	0.56	0.56	0.45	0.52	0.07	12.52	98.86
5	44.49	0.64	0.55	0.44	0.55	0.10	17.76	98.78
6	25.59	0.38	0.36	0.98	0.57	0.35	61.44	97.77
7	32.46	0.36	0.12	0.01	0.16	0.18	108.75	99.50
8	38.68	0.93	0.93	0.95	0.94	0.01	0.92	97.58
9	32.92	1.59	1.51	1.55	1.55	0.04	2.65	95.29
11	42.67	0.96	1.02	1.31	1.10	0.19	17.28	97.43

ตารางที่ ข.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	45.70	0.61	0.43	0.47	0.50	0.10	19.01	98.90
5	44.49	0.68	0.60	0.67	0.65	0.04	6.39	98.54
6	25.59	1.51	1.19	1.35	1.35	0.16	11.76	94.74
7	32.46	3.33	3.21	3.07	3.20	0.13	4.02	90.14
8	38.68	4.70	4.93	5.22	4.95	0.26	5.32	87.21
9	32.92	7.80	7.52	7.59	7.63	0.15	1.95	76.81
11	42.67	0.23	0.31	0.92	0.49	0.38	77.95	98.86

ตารางที่ ข.3 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว โดยไม่ใช้เหล็ก (ชุดควบคุม)

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	45.70	45.02	46.98	43.06	45.02	1.96	4.35	1.49
5	44.49	37.36	38.74	38.72	38.27	0.79	2.07	13.98
6	25.59	12.20	13.21	14.08	13.16	0.94	7.13	48.57
7	32.46	3.71	3.96	4.77	4.15	0.55	13.30	87.22
8	38.68	0.63	0.66	0.65	0.64	0.01	2.24	98.34
9	32.92	1.95	1.59	0.94	1.49	0.51	34.28	95.47
11	42.67	0.94	1.76	2.13	1.61	0.61	37.99	96.23

ตารางที่ ข.4 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส โดยใช้เศษผงเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	42.73	18.30	18.33	18.28	18.30	0.03	0.14	57.17
5	42.70	4.68	4.62	4.59	4.63	0.05	0.98	89.16
6	42.60	11.14	11.13	11.19	11.15	0.03	0.30	73.82
7	42.54	5.31	5.21	5.16	5.22	0.08	1.45	87.72
8	44.97	0.15	0.36	0.75	0.42	0.30	72.96	99.07
9	41.95	4.09	3.94	3.84	3.96	0.13	3.18	90.57
11	39.36	8.42	8.26	8.13	8.27	0.15	1.76	78.99

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.5 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	42.73	9.74	9.74	9.71	9.73	0.02	0.18	77.23
5	42.70	6.91	6.66	6.51	6.69	0.20	3.06	84.33
6	42.60	2.42	2.23	2.04	2.23	0.19	8.64	94.77
7	42.54	4.38	4.23	4.07	4.23	0.16	3.73	90.07
8	44.97	5.98	3.52	2.08	3.86	1.97	51.17	91.42
9	41.95	16.95	16.68	16.67	16.76	0.16	0.94	60.04
11	39.36	5.58	5.27	5.47	5.44	0.16	2.93	86.19

ตารางที่ ข.6 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส โดยไม่ใช้เหล็ก (ชุดควบคุม)

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	42.73	42.29	42.11	37.33	40.58	2.81	6.93	5.03
5	42.70	41.92	41.91	42.11	41.98	0.11	0.27	1.69
6	42.60	42.31	42.37	42.41	42.36	0.05	0.12	0.56
7	42.54	41.97	41.99	42.01	41.99	0.02	0.05	1.29
8	44.97	38.23	38.70	38.69	38.54	0.27	0.69	14.30
9	41.95	20.97	21.21	21.00	21.06	0.13	0.62	49.81
11	39.36	2.65	2.79	2.64	2.69	0.08	3.07	93.17

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.7 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	33.54	0.50	0.13	0.39	0.34	0.19	56.25	98.99
5	26.40	0.56	0.58	0.49	0.54	0.04	8.20	97.95
6	26.86	0.61	0.32	0.63	0.52	0.17	33.13	98.06
7	22.82	0.86	0.78	0.56	0.73	0.15	21.03	96.79
8	32.54	1.36	1.39	1.06	1.27	0.18	14.39	96.10
9	33.16	1.52	1.41	1.27	1.40	0.13	9.14	95.79
11	30.42	1.65	1.62	2.12	1.80	0.28	15.62	94.09

ตารางที่ ข.8 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	33.54	0.53	0.14	0.37	0.35	0.20	57.79	98.96
5	26.40	0.79	0.74	0.69	0.74	0.05	6.51	97.20
6	26.86	1.26	1.76	1.42	1.48	0.26	17.32	94.49
7	22.82	1.33	1.45	0.73	1.17	0.39	33.18	94.88
8	32.54	4.60	4.48	4.13	4.40	0.25	5.58	86.48
9	33.14	4.49	4.41	4.31	4.40	0.09	2.13	86.72
11	30.42	1.00	0.97	0.49	0.82	0.29	35.26	97.31

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.9 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม โดยไม่ใช้เหล็ก (ชุดควบคุม)

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	33.54	14.89	15.08	13.55	14.51	0.83	5.75	56.75
5	26.40	5.47	5.68	6.16	5.77	0.35	6.15	78.14
6	26.86	1.03	0.99	0.97	1.00	0.03	2.91	96.29
7	22.82	0.71	0.74	0.89	0.78	0.10	12.74	96.58
8	32.54	0.63	0.67	0.35	0.55	0.17	31.41	98.30
9	33.14	0.47	0.73	0.58	0.59	0.13	21.90	98.21
11	30.42	0.81	1.35	0.84	1.00	0.31	30.50	96.71

ตารางที่ ข.10 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	39.20	17.38	17.48	17.39	17.42	0.05	0.30	55.57
5	38.46	0.26	0.25	0.23	0.25	0.02	6.12	99.36
6	38.18	0.63	0.59	0.56	0.59	0.03	5.50	98.45
7	38.86	1.15	1.11	1.09	1.11	0.03	2.75	97.14
8	38.20	2.87	2.85	2.84	2.85	0.01	0.44	92.53
9	35.99	2.90	2.90	2.94	2.91	0.02	0.69	91.91
11	37.22	3.25	3.20	3.23	3.23	0.03	0.86	91.33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	39.20	0.31	0.26	0.22	0.26	0.05	17.12	99.33
5	38.46	0.89	0.87	0.85	0.87	0.02	2.60	97.74
6	38.18	2.18	2.11	2.07	2.12	0.06	2.61	94.46
7	38.86	2.42	2.40	2.36	2.39	0.03	1.28	93.84
8	38.20	12.65	12.56	12.64	12.62	0.05	0.38	66.98
9	35.99	14.51	14.56	14.52	14.53	0.03	0.18	59.62
11	37.22	0.93	0.90	0.88	0.90	0.03	2.80	97.59

ตารางที่ ข.12 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส โดยไม่ใช้เหล็ก (ชุดควบคุม)

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
3	39.20	37.88	38.01	37.84	37.91	0.09	0.24	3.30
5	38.46	36.79	36.65	36.70	36.71	0.07	0.20	4.55
6	38.18	36.50	36.57	36.49	36.52	0.05	0.13	4.34
7	38.86	35.78	35.94	36.04	35.92	0.13	0.36	7.56
8	38.20	14.95	15.09	15.07	15.03	0.08	0.51	60.65
9	35.99	4.85	4.91	4.99	4.91	0.07	1.43	86.35
11	37.22	0.53	0.52	0.53	0.52	0.01	1.46	98.59

ภาคผนวก ค

ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว โดยใช้เศษผงเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	1.52	0.20	0.16	0.23	0.20	0.04	18.28	87.02
10	8.84	0.23	0.21	0.18	0.21	0.02	10.56	97.68
100	110.01	2.42	2.09	2.28	2.26	0.17	7.32	97.94
500	627.00	35.30	14.05	9.60	19.65	13.73	69.90	96.87

ตารางที่ ค.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	1.52	0.29	0.28	0.23	0.27	0.03	11.14	82.37
10	8.84	0.13	0.24	0.32	0.23	0.10	42.84	97.44
100	110.01	2.68	2.21	1.23	2.04	0.74	36.26	98.15
500	627.00	59.85	50.10	47.65	52.53	6.45	12.29	91.62

ตารางที่ ค.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายแมงกานีส โดยใช้เศษผงเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.85	0.37	0.36	0.34	0.36	0.02	4.30	58.26
10	12.00	1.84	1.88	1.82	1.85	0.03	1.65	84.61
100	89.00	12.80	12.30	12.00	12.37	0.40	3.27	86.10
500	640.00	344.50	334.50	333.00	337.33	6.25	1.85	47.29

ตารางที่ ค.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส
ในสารละลายแมงกานีส โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.85	0.09	0.09	0.08	0.09	0.00	5.47	89.87
10	12.00	0.34	0.30	0.34	0.33	0.02	7.07	97.28
100	89.00	1.70	1.80	1.40	1.63	0.21	12.74	98.16
500	640.00	179.50	172.50	165.50	172.50	7.00	4.06	73.05

ตารางที่ ค.5 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
ในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.81	0.26	0.15	0.17	0.20	0.06	30.72	75.84
10	10.06	1.03	1.63	1.31	1.32	0.30	22.94	86.86
100	100.00	15.10	9.15	14.15	12.80	3.20	24.97	87.20
500	450.00	363.00	289.00	297.00	316.33	40.61	12.84	29.70

ตารางที่ ค.6 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
ในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.81	0.26	0.30	0.24	0.26	0.03	11.44	67.33
10	10.06	0.46	0.38	0.48	0.44	0.05	11.10	95.63
100	100.00	10.00	14.90	11.50	12.13	2.51	20.69	87.87
500	450.00	213.00	294.00	335.00	280.67	62.08	22.12	37.63

ตารางที่ ค.7 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.73	0.30	0.28	0.27	0.28	0.01	4.85	61.46
10	9.00	1.38	1.38	1.23	1.33	0.09	6.51	85.22
100	88.00	27.60	27.60	26.80	27.33	0.46	1.69	68.94
500	550.00	431.00	421.00	413.00	421.67	9.02	2.14	23.33

ตารางที่ ค.8 ผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ความเข้มข้นเริ่มต้น		ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
มิลลิกรัมต่อลิตร						-	%	ร้อยละ
1	0.73	0.09	0.09	0.08	0.09	0.00	4.71	88.36
10	9.00	0.57	0.57	0.60	0.58	0.02	2.99	93.56
100	88.00	18.60	17.60	18.20	18.13	0.50	2.78	79.39
500	550.00	468.00	448.00	446.00	454.00	12.17	2.68	17.45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ตารางที่ ง.1 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว โดยใช้เศษผงเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	44.02	41.02	42.74	41.44	41.73	0.90	2.15	5.19
1	44.02	5.96	5.75	5.04	5.58	0.48	8.66	87.32
10	44.02	1.11	0.98	0.77	0.95	0.17	18.08	97.83
30	44.02	1.79	0.99	0.28	1.02	0.76	74.31	97.68
50	44.02	0.28	0.14	0.30	0.24	0.09	36.24	99.45

ตารางที่ ง.2 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	44.02	41.02	42.74	41.44	41.73	0.90	2.15	5.19
1	44.02	5.23	4.88	4.83	4.98	0.22	4.35	88.69
10	44.02	0.46	0.32	0.38	0.39	0.07	18.81	99.12
30	44.02	0.52	0.13	0.13	0.26	0.23	86.61	99.41
50	44.02	0.03	0.20	0.03	0.09	0.10	110.22	99.80

ตารางที่ ง.3 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายแมงกานีส โดยใช้เศษผงเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	66.20	64.00	64.00	63.90	63.97	0.06	0.09	3.37
1	66.20	8.43	8.42	8.41	8.42	0.01	0.09	87.28
10	66.20	4.96	4.94	4.90	4.94	0.03	0.59	92.54
30	66.20	5.14	5.16	5.15	5.15	0.01	0.27	92.22
50	66.20	4.88	4.89	4.88	4.88	0.01	0.16	92.62

ตารางที่ ง.4 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายแมงกานีส โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	66.20	64.00	64.00	63.90	63.97	0.06	0.09	3.37
1	66.20	8.30	8.28	8.31	8.30	0.02	0.21	87.47
10	66.20	3.76	3.74	3.69	3.73	0.03	0.90	94.37
30	66.20	3.20	3.22	3.21	3.21	0.01	0.30	95.15
50	66.20	3.62	3.64	3.64	3.64	0.01	0.32	94.51

ตารางที่ ง.5 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
ในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	34.98	27.02	28.74	28.46	28.07	0.92	3.29	19.74
1	34.98	0.24	0.58	0.49	0.44	0.17	39.57	98.75
10	34.98	0.28	0.34	0.35	0.32	0.04	12.21	99.08
30	34.98	0.30	0.41	0.30	0.34	0.07	19.68	99.04
50	34.98	0.07	0.20	0.27	0.18	0.10	57.65	99.49

ตารางที่ ง.6 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
ในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	34.98	27.02	28.74	28.46	28.07	0.92	3.29	19.74
1	34.98	0.66	0.23	0.43	0.44	0.22	48.46	98.73
10	34.98	0.10	0.38	0.02	0.17	0.19	114.39	99.53
30	34.98	2.07	1.90	0.44	1.47	0.90	60.89	95.79
50	34.98	0.33	0.36	0.44	0.38	0.06	15.36	98.92

ตารางที่ ง.7 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายผสม โดยใช้เศษผงเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	42.10	36.50	36.40	36.40	36.43	0.06	0.16	13.46
1	42.10	7.63	7.64	7.64	7.64	0.01	0.13	81.86
10	42.10	4.84	4.82	4.81	4.82	0.01	0.26	88.54
30	42.10	4.98	5.03	4.99	5.00	0.03	0.54	88.12
50	42.10	5.07	5.06	5.06	5.06	0.01	0.12	87.97

ตารางที่ ง.8 ผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ในสารละลายผสม โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลือ						ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD	
กรัมต่อลิตร	มิลลิกรัมต่อลิตร					-	%	ร้อยละ
0	42.10	36.50	36.40	36.40	36.43	0.06	0.16	13.46
1	42.10	7.44	7.44	7.40	7.43	0.02	0.30	82.36
10	42.10	3.07	3.05	3.05	3.06	0.01	0.40	92.74
30	42.10	1.74	1.75	1.74	1.75	0.01	0.44	95.85
50	42.10	1.14	1.13	1.13	1.13	0.01	0.74	97.32

ภาคผนวก จ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

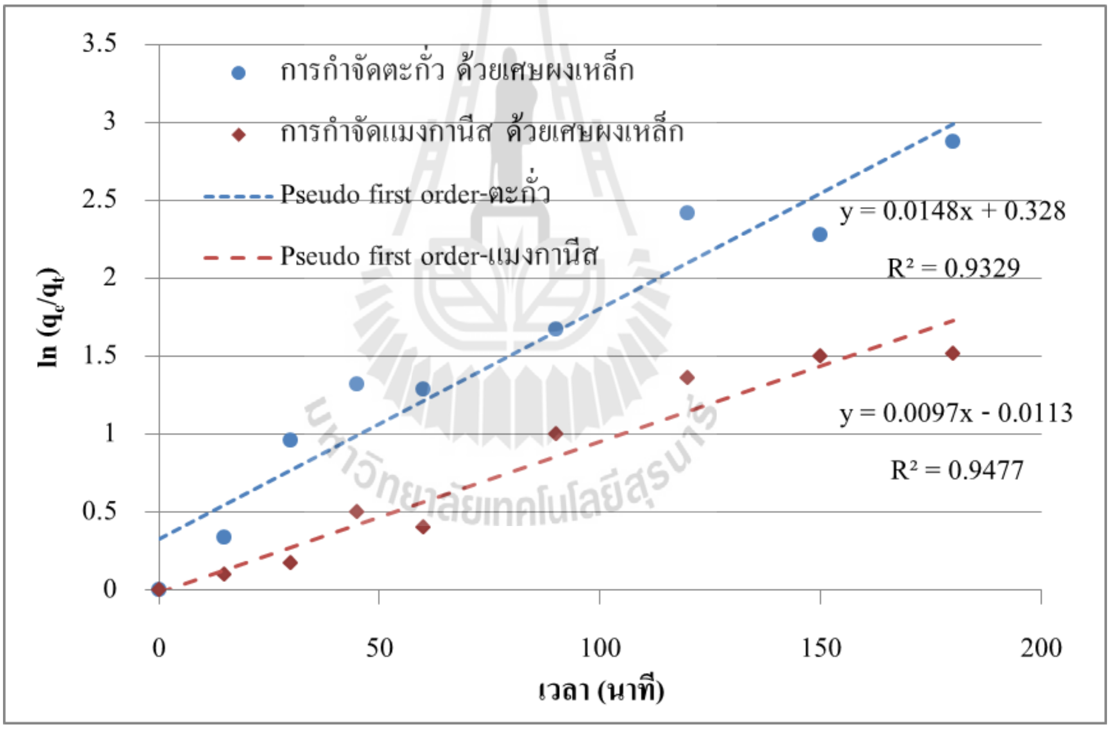
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

จากผลของความเร็วในการกวนผสมและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล จะใช้ผลการทดลองจากการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสด้วยเศษผงเหล็กจากเริ่มต้นการทดลองจนถึงเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) ที่ระยะเวลา 240 นาที ความเร็วในการกวนผสม 250 รอบต่อนาที ไปศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ดังนี้

1. ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

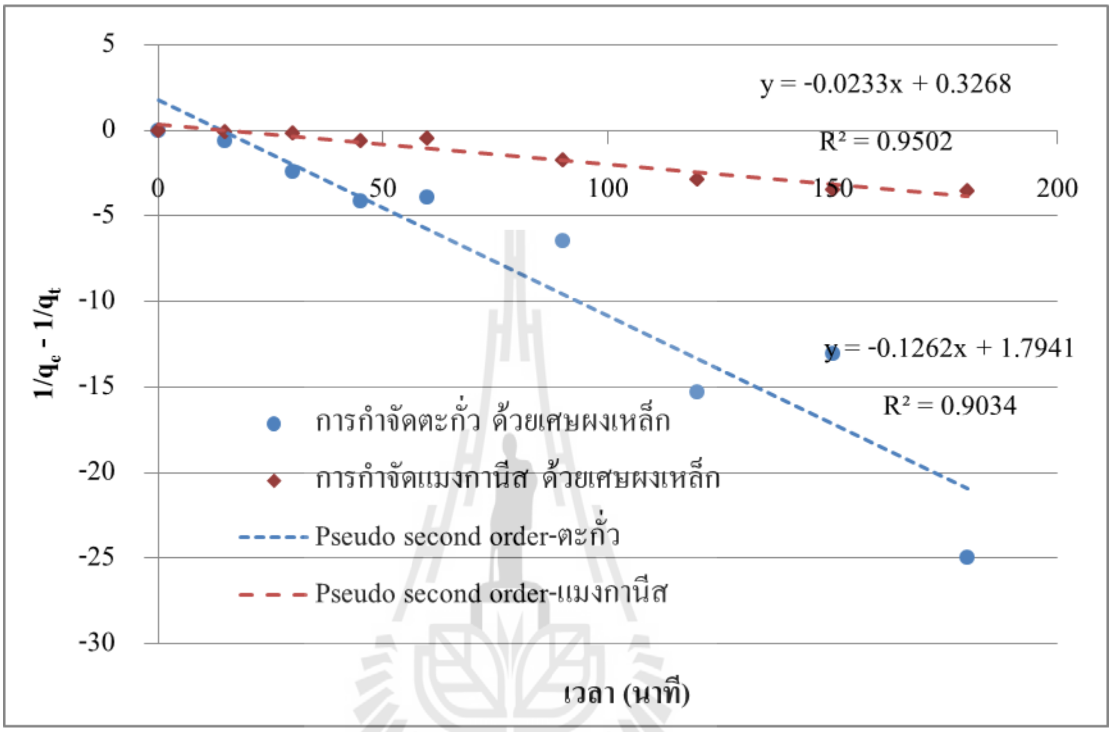
จากสมการ Pseudo first order ตามสมการที่ 3.5 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ $\ln(q_e/q_t)$ กับเวลา ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ จ.1 ซึ่งจะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่า k_1



รูปที่ จ.1 Pseudo first order

2. ปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมการ Pseudo second order ตามสมการที่ 3.7 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ $1/q_e - 1/q_t$ กับเวลา ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ จ.2 ซึ่งจะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่า k_2



รูปที่ จ.2 Pseudo second order

ภาคผนวก ฉ

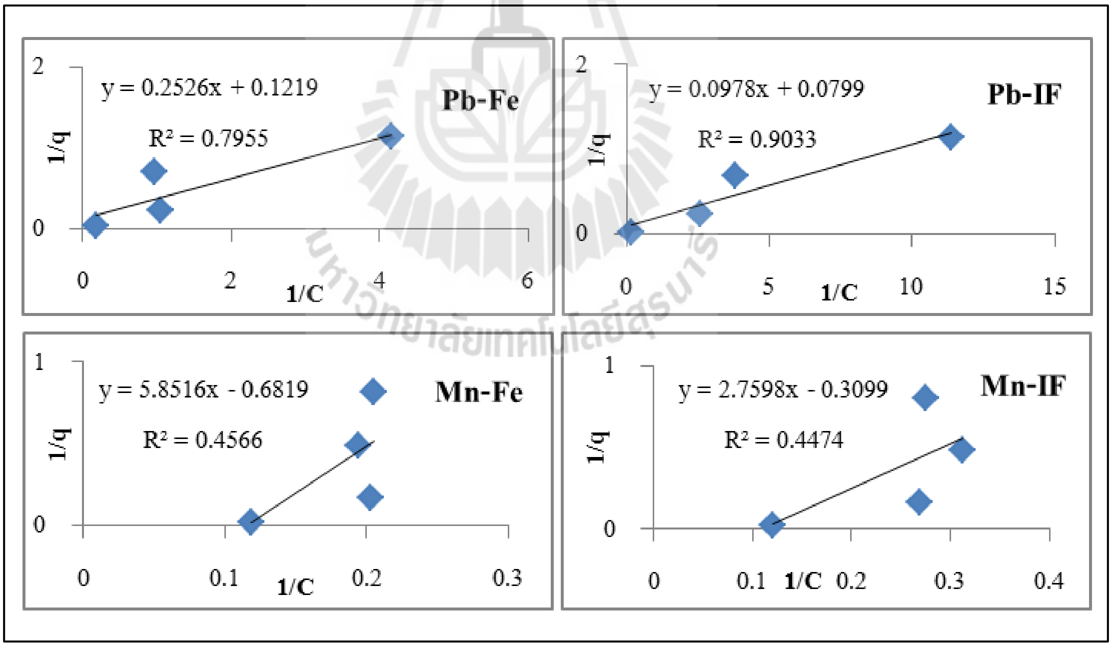
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

จากผลของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ จะใช้ผลการทดลองจากการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว และการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส ด้วยเศษผงเหล็กและผงตะไบเหล็ก เนื่องจากในสารละลายผสมประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าไม่ต่างกันในแต่ละความแตกต่างของปริมาณเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ใช้ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) ตามสมการที่ 2.17 และไปศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ดังนี้

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

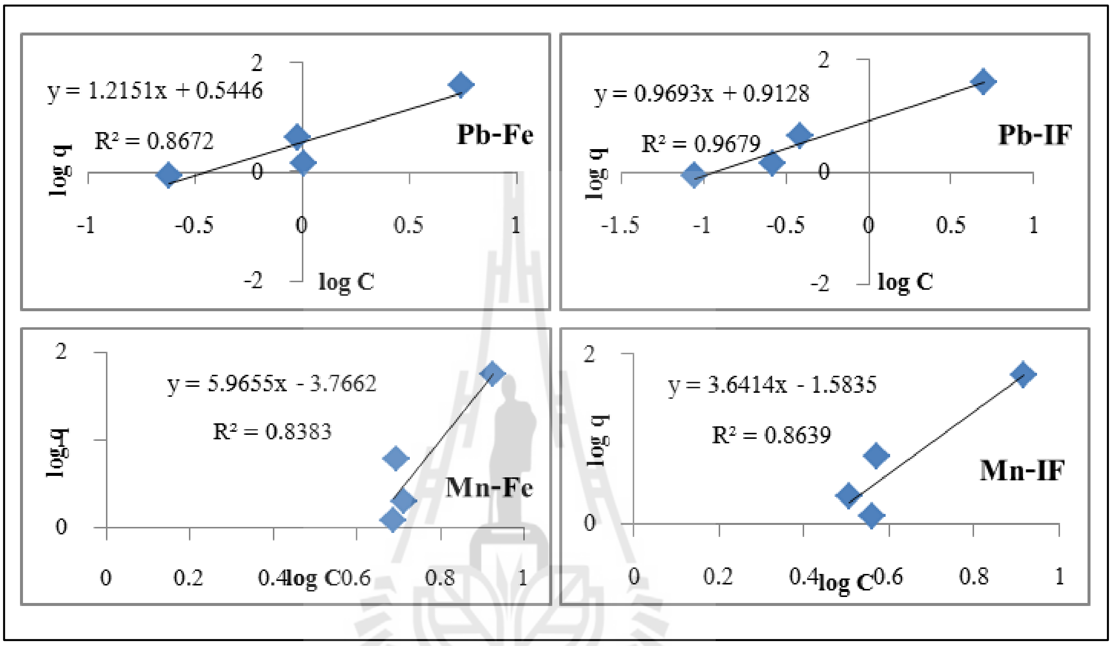
จากสมการ Langmuir isotherm ตามสมการที่ 3.8 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ 1/q กับ 1/C ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ ฉ.1 ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า q_m (mg/g) และ K_{ads} (L/mg)



รูปที่ ฉ.1 Langmuir isotherm

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

จากสมการ Langmuir isotherm ตามสมการที่ 3.9 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของ log q กับ log C ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ ฉ.2 ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า n และ K



รูปที่ ฉ.2 Freundlich isotherm

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ช

ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตาม (Tracer study)

ตารางที่ ช.1 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์ทราย ที่อัตราการไหลสูง

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C-C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.4	329.9	10	0.1	0.7	6.6	0.7
15	1.1	1484.5	5	0.3	4.5	22.3	1.5
20	2.7	4123.7	5	0.8	16.5	82.5	4.1
25	2.7	4123.7	5	0.8	20.6	103.1	4.1
30	2.8	4288.7	5	0.9	25.7	128.7	4.3
35	2.8	4288.7	5	0.9	30.0	150.1	4.3
40	2.8	4288.7	5	0.9	34.3	171.5	4.3
45	2.9	4453.6	5	0.9	40.1	200.4	4.5
50	2.9	4453.6	5	0.9	44.5	222.7	4.5
55	2.8	4288.7	5	0.9	47.2	235.9	4.3
60	2.8	4288.7	5	0.9	51.5	257.3	4.3
65	2.7	4123.7	5	0.8	53.6	268.0	4.1
70	2.9	4453.6	5	0.9	62.4	311.8	4.5
75	3.0	4618.6	5	0.9	69.3	346.4	4.6
80	3.0	4618.6	5	0.9	73.9	369.5	4.6
85	2.1	3134.0	5	0.6	53.3	266.4	3.1
90	1.0	1319.6	5	0.3	23.8	118.8	1.3
95	0.6	659.8	5	0.1	12.5	62.7	0.7
100	0.3	164.9	5	0.0	3.3	16.5	0.2
110	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
120	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
130	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
160	0.2	0.0	30	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**3341.0**	**63.8**
HRT				= **52.3**	**min**	= **0.87**	**hr**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.2 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ที่อัตราการไหลสูง

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C-C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.8	989.7	5	0.2	1.0	4.9	1.0
10	1.6	2309.3	5	0.5	4.6	23.1	2.3
15	1.6	2309.3	5	0.5	6.9	34.6	2.3
20	2.2	3299.0	5	0.7	13.2	66.0	3.3
25	2.6	3958.8	5	0.8	19.8	99.0	4.0
30	2.9	4453.6	5	0.9	26.7	133.6	4.5
35	3.0	4618.6	5	0.9	32.3	161.6	4.6
40	2.9	4453.6	5	0.9	35.6	178.1	4.5
45	2.9	4453.6	5	0.9	40.1	200.4	4.5
50	2.9	4453.6	5	0.9	44.5	222.7	4.5
55	2.9	4453.6	5	0.9	49.0	244.9	4.5
60	2.9	4453.6	5	0.9	53.4	267.2	4.5
65	2.9	4453.6	5	0.9	57.9	289.5	4.5
70	2.9	4453.6	5	0.9	62.4	311.8	4.5
75	2.9	4453.6	5	0.9	66.8	334.0	4.5
80	2.9	4453.6	5	0.9	71.3	356.3	4.5
85	2.9	4453.6	5	0.9	75.7	378.6	4.5
90	2.9	4453.6	5	0.9	80.2	400.8	4.5
95	1.5	2144.3	5	0.4	40.7	203.7	2.1
100	1.0	1319.6	5	0.3	26.4	132.0	1.3
105	0.4	329.9	5	0.1	6.9	34.6	0.3
110	0.3	164.9	5	0.0	3.6	18.1	0.2
125	0.2	0.0	15	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**4095.7**	**74.9**
HRT				**= 54.7**	**min**	**= 0.91**	**hr**

ตารางที่ ช.3 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์เหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่อัตราการไหลสูง

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C-C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.3	164.9	5	0.0	0.2	0.8	0.2
10	0.8	989.7	5	0.2	2.0	9.9	1.0
15	0.9	1154.6	5	0.2	3.5	17.3	1.2
20	1.7	2474.2	5	0.5	9.9	49.5	2.5
25	1.8	2639.2	5	0.5	13.2	66.0	2.6
30	2.3	3463.9	5	0.7	20.8	103.9	3.5
35	2.1	3134.0	5	0.6	21.9	109.7	3.1
40	2.3	3463.9	5	0.7	27.7	138.6	3.5
45	2.4	3628.9	5	0.7	32.7	163.3	3.6
50	2.3	3463.9	5	0.7	34.6	173.2	3.5
55	2.3	3463.9	5	0.7	38.1	190.5	3.5
60	2.3	3463.9	5	0.7	41.6	207.8	3.5
65	2.5	3793.8	5	0.8	49.3	246.6	3.8
70	2.8	4288.7	5	0.9	60.0	300.2	4.3
75	2.8	4288.7	5	0.9	64.3	321.7	4.3
80	2.8	4288.7	5	0.9	68.6	343.1	4.3
85	2.7	4123.7	5	0.8	70.1	350.5	4.1
90	2.5	3793.8	5	0.8	68.3	341.4	3.8
95	2.5	3793.8	5	0.8	72.1	360.4	3.8
100	2.4	3628.9	5	0.7	72.6	362.9	3.6
105	1.5	2144.3	5	0.4	45.0	225.2	2.1
110	1.1	1484.5	5	0.3	32.7	163.3	1.5
115	0.9	1154.6	5	0.2	26.6	132.8	1.2
120	0.4	329.9	5	0.1	7.9	39.6	0.3
130	0.3	164.9	10	0.0	4.3	42.9	0.3
140	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
150	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**4378.6**	**68.3**
HRT				**= 64.1**	**min**	**= 1.07**	**hr**

ตารางที่ ช.4 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์ทราย ที่อัตราการไหลต่ำ

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C\text{-}C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.3	164.9	20	0.0	0.7	13.2	0.7
40	0.8	989.7	20	0.2	7.9	158.4	4.0
60	2.4	3628.9	20	0.7	43.5	870.9	14.5
80	2.8	4288.7	20	0.9	68.6	1372.4	17.2
100	2.7	4123.7	20	0.8	82.5	1649.5	16.5
120	2.7	4123.7	20	0.8	99.0	1979.4	16.5
140	2.8	4288.7	20	0.9	120.1	2401.7	17.2
170	2.9	4453.6	30	0.9	151.4	4542.7	26.7
200	2.9	4453.6	30	0.9	178.1	5344.3	26.7
230	2.7	4123.7	30	0.8	189.7	5690.7	24.7
260	2.8	4288.7	30	0.9	223.0	6690.3	25.7
290	2.9	4453.6	30	0.9	258.3	7749.3	26.7
320	2.7	4123.7	30	0.8	263.9	7917.5	24.7
350	2.8	4288.7	30	0.9	300.2	9006.2	25.7
380	1.2	1649.5	30	0.3	125.4	3760.8	9.9
390	0.9	1154.6	10	0.2	90.1	900.6	2.3
400	0.5	494.8	10	0.1	39.6	395.9	1.0
410	0.3	164.9	10	0.0	13.5	135.3	0.3
420	0.3	164.9	10	0.0	13.9	138.6	0.3
430	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
440	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**60717.7**	**281.4**
HRT				**= 215.8**	**min**	**= 3.60**	**hr**

ตารางที่ ช.5 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ที่อัตราการไหลต่ำ

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C-C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.3	164.9	20	0.0	0.7	13.2	0.7
40	1.0	1319.6	20	0.3	10.6	211.1	5.3
60	1.6	2309.3	20	0.5	27.7	554.2	9.2
80	1.8	2639.2	20	0.5	42.2	844.5	10.6
100	2.7	4123.7	20	0.8	82.5	1649.5	16.5
120	2.8	4288.7	20	0.9	102.9	2058.6	17.2
140	2.6	3958.8	20	0.8	110.8	2216.9	15.8
160	2.6	3958.8	20	0.8	126.7	2533.6	15.8
180	2.6	3958.8	20	0.8	142.5	2850.3	15.8
200	2.9	4453.6	20	0.9	178.1	3562.9	17.8
220	2.9	4453.6	20	0.9	196.0	3919.2	17.8
240	2.9	4453.6	20	0.9	213.8	4275.5	17.8
260	2.6	3958.8	20	0.8	205.9	4117.1	15.8
280	2.6	3958.8	20	0.8	221.7	4433.8	15.8
300	2.6	3958.8	20	0.8	237.5	4750.5	15.8
320	2.7	4123.7	20	0.8	263.9	5278.4	16.5
340	2.8	4288.7	20	0.9	291.6	5832.6	17.2
360	2.8	4288.7	20	0.9	308.8	6175.7	17.2
390	2.5	3793.8	30	0.8	295.9	8877.5	22.8
420	0.9	1154.6	30	0.2	97.0	2909.7	6.9
430	0.7	824.7	10	0.2	70.9	709.3	1.6
440	0.5	494.8	80	0.1	43.5	3483.7	7.9
450	0.3	164.9	60	0.0	14.8	890.7	2.0
460	0.2	0.0	40	0.0	0.0	0.0	0.0
470	0.2	0.0	30	0.0	0.0	0.0	0.0
480	0.2	0.0	10	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**72148.6**	**299.9**
HRT				**= 240.6**	**min**	**= 4.01**	**hr**

ตารางที่ ช.6 ผลการศึกษาลักษณะทางชลศาสตร์ด้วยสารติดตามคอลัมน์เหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่อัตราการไหลต่ำ

Time (min)	mL of $AgNO_3$ 0.141 N	C (mgNaCl/L)	dt_i	$C_i = C-C_0$	t_iC_i	$t_iC_idt_i$	C_idt_i
0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.3	164.9	20	0.0	0.7	13.2	0.7
40	1.0	1319.6	20	0.3	10.6	211.1	5.3
60	1.3	1814.4	20	0.4	21.8	435.5	7.3
80	1.4	1979.4	20	0.4	31.7	633.4	7.9
100	1.7	2474.2	20	0.5	49.5	989.7	9.9
120	1.7	2474.2	20	0.5	59.4	1187.6	9.9
140	2.0	2969.1	20	0.6	83.1	1662.7	11.9
160	2.6	3958.8	20	0.8	126.7	2533.6	15.8
180	2.7	4123.7	20	0.8	148.5	2969.1	16.5
200	2.6	3958.8	20	0.8	158.4	3167.0	15.8
220	2.8	4288.7	20	0.9	188.7	3774.0	17.2
240	2.5	3793.8	20	0.8	182.1	3642.1	15.2
260	2.9	4453.6	20	0.9	231.6	4631.8	17.8
280	2.9	4453.6	20	0.9	249.4	4988.1	17.8
300	2.9	4453.6	20	0.9	267.2	5344.3	17.8
320	2.6	3958.8	20	0.8	253.4	5067.2	15.8
340	2.6	3958.8	20	0.8	269.2	5383.9	15.8
360	2.8	4288.7	20	0.9	308.8	6175.7	17.2
390	2.8	4288.7	30	0.9	334.5	10035.5	25.7
420	2.9	4453.6	30	0.9	374.1	11223.1	26.7
450	2.5	3793.8	30	0.8	341.4	10243.3	22.8
480	2.3	3463.9	30	0.7	332.5	9976.1	20.8
510	1.5	2144.3	30	0.4	218.7	6561.7	12.9
540	0.9	1154.6	30	0.2	124.7	3741.0	6.9
570	0.9	1154.6	30	0.2	131.6	3948.9	6.9
600	0.8	989.7	30	0.2	118.8	3562.9	5.9
610	0.7	824.7	250	0.2	100.6	25154.7	41.2
620	0.4	329.9	230	0.1	40.9	9408.7	15.2
630	0.3	164.9	210	0.0	20.8	4364.5	6.9
640	0.2	0.0	30	0.0	0.0	0.0	0.0
650	0.2	0.0	30	0.0	0.0	0.0	0.0
660	0.2	0.0	20	0.0	0.0	0.0	0.0
Total						**151030.5**	**427.5**
HRT				**= 353.2**	**min**	**= 5.89**	**hr**

ภาคผนวก ซ

ผลการทดลองแบบคอลัมน์

ตารางที่ ซ.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วกับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
1	43.14	0.32	99.26
5	42.27	1.40	96.69
10	41.21	1.36	96.70
14	40.96	1.27	96.90
17	40.46	1.52	96.24
22	39.74	1.50	96.23
25	39.67	1.50	96.22
29	39.65	1.31	96.70
33	39.44	1.12	97.16
37	39.08	1.04	97.34
42	38.71	0.96	97.52
45	38.52	0.85	97.79
50	37.43	0.56	98.50
53	37.84	0.47	98.76
57	47.52	0.04	99.92
61	47.01	0.09	99.81
66	46.82	0.63	98.65
70	43.99	0.00	100.00
74	41.80	0.13	99.69
79	38.85	0.18	99.54
82	38.49	0.19	99.51
86	37.89	0.23	99.39
90	37.56	0.13	99.65
94	37.31	0.12	99.68
98	37.01	0.90	97.57
103	46.01	0.88	98.09
107	45.12	1.28	97.16
112	44.48	1.41	96.83

ตารางที่ ซ.2 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
1	43.81	2.59	94.09
4	41.02	2.49	93.93
9	41.07	2.87	93.01
12	40.97	2.94	92.82
18	41.14	3.01	92.68
21	41.25	3.26	92.10
25	41.31	3.04	92.64
29	41.28	3.13	92.42
33	41.30	3.00	92.74
37	41.26	2.94	92.87
41	41.32	2.74	93.37
45	41.20	2.61	93.67
49	41.16	2.57	93.76
54	40.98	2.65	93.53
58	40.91	2.57	93.72
61	40.84	2.56	93.73
66	40.89	2.89	92.93
69	40.99	2.84	93.07
74	40.92	2.81	93.13
77	40.86	2.57	93.71
81	40.88	2.34	94.28
86	40.74	1.99	95.12
90	43.24	1.72	96.02
94	43.13	1.79	95.85
98	42.69	1.84	95.69
102	42.71	2.47	94.22
107	42.49	3.08	92.75
111	41.17	3.54	91.40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
1	41.53	0.00	100.00
5	38.58	0.01	99.97
8	38.94	0.30	99.23
12	38.13	0.01	99.97
17	41.87	0.00	100.00
20	41.74	0.09	99.78
24	41.59	0.13	99.69
29	41.58	0.15	99.64
33	41.25	0.05	99.88
37	41.31	0.13	99.69
41	41.37	0.98	97.63
45	40.98	0.54	98.68
49	40.42	0.08	99.80
53	40.13	0.09	99.78
58	45.53	1.61	96.46
61	45.24	0.13	99.71
65	45.41	0.23	99.49
69	45.37	0.09	99.80
74	45.41	0.13	99.71
78	42.27	0.04	99.91
82	43.06	1.00	97.68
86	42.97	0.17	99.60
90	42.89	0.67	98.44
94	42.13	0.52	98.77
98	41.75	0.09	99.78
102	41.68	0.13	99.69
106	41.58	0.03	99.93
111	43.08	0.17	99.61

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลต่ำ โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
1	43.51	1.56	96.41
5	42.07	1.71	95.94
8	41.96	1.63	96.12
12	41.52	1.98	95.23
17	44.17	2.00	95.47
20	43.94	2.23	94.92
24	43.98	1.98	95.50
29	43.13	1.56	96.38
33	42.85	2.03	95.26
37	42.56	2.57	93.96
41	42.14	3.13	92.57
45	41.97	3.52	91.61
49	42.25	3.41	91.93
53	41.98	4.12	90.19
58	41.88	4.94	88.20
61	43.70	3.68	91.58
65	43.13	3.21	92.56
69	42.71	3.13	92.67
74	41.69	3.50	91.60
78	44.07	3.17	92.81
82	43.73	3.89	91.10
86	43.52	4.01	90.79
90	43.21	3.57	91.74
94	42.68	4.09	90.42
98	42.94	4.12	90.41
102	42.63	4.75	88.86
106	41.62	4.83	88.40
111	41.96	5.02	88.04

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	41.43	1.28	96.91
23	41.23	1.25	96.97
50	40.77	0.53	98.70
71	40.56	1.85	95.44
91	41.38	2.52	93.91
116	41.27	1.23	97.02
135	40.97	0.91	97.78
158	44.43	0.89	98.00
179	44.38	0.23	99.48
203	44.29	0.22	99.50
227	44.28	0.27	99.39
247	44.59	0.91	97.96
278	44.86	0.84	98.13
303	43.50	0.57	98.69

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.6 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	41.07	0.08	99.81
19	40.97	3.78	90.77
44	44.04	5.81	86.81
64	42.91	6.15	85.67
90	41.02	6.2	84.89
108	41.05	6.13	85.07
131	40.98	6.11	85.09
153	40.82	6.09	85.08
178	42.57	5.99	85.93
198	42.09	5.88	86.03
222	41.08	5.78	85.93
243	41.59	7.01	83.14
265	41.35	6.15	85.13
294	41.17	7.05	82.88

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.7 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	49.19	0.21	99.57
23	49.66	0.53	98.93
45	49.91	0.21	99.58
67	49.94	0.15	99.70
92	49.99	0.75	98.50
118	41.57	0.18	99.56
135	42.16	0.49	98.84
157	45.17	0.15	99.67
183	43.28	0.28	99.35
202	42.75	0.30	99.30
224	43.15	0.10	99.77
250	46.32	0.11	99.76
269	45.78	0.25	99.45
296	41.5	5.97	85.62

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.8 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	41.26	5.04	87.78
23	40.75	4.10	89.94
45	40.19	3.12	92.24
67	40.79	3.12	92.35
92	40.72	4.32	89.39
118	40.75	7.64	81.25
135	40.18	3.62	90.99
157	41.07	4.36	89.38
183	40.74	6.02	85.22
202	40.81	3.18	92.21
224	40.71	1.48	96.36
250	40.78	1.78	95.64
269	40.98	4.08	90.04
296	41.05	4.60	88.79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.9 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	41.76	3.97	90.49
30	45.1	0.81	98.20
59	43.88	1.07	97.56
85	41.51	1.59	96.17
107	40.83	2.79	93.17
137	42.04	1.36	96.76
159	41.54	1.36	96.73
186	41.09	1.24	96.98
213	40.8	1.27	96.89
244	40.71	3.69	90.94
269	41.16	5.63	86.32
292	41.07	4.52	88.99
322	40.97	4.69	88.55
344	40.95	3.14	92.33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.10 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส กับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	41.05	2.7	93.42
22	41.05	2.75	93.30
52	41.02	2.76	93.27
75	41.06	3.09	92.47
105	41.07	3.37	91.79
127	41.11	3.38	91.78
154	40.98	3.41	91.68
180	41.01	3.38	91.76
209	41.12	3.39	91.76
233	41.16	3.45	91.62
262	41.18	3.4	91.74
286	41.17	3.57	91.33
312	41.13	3.69	91.03
346	41.27	3.7	91.03

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.11 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	44.06	0.4	99.09
27	44.71	0.38	99.15
53	44.23	0.31	99.30
79	44.21	0.23	99.48
108	47.61	0.14	99.70
138	45.55	0.14	99.70
158	45.23	0.76	98.32
185	45.06	1.16	97.43
215	44.85	2.76	93.85
237	43.15	4.27	90.10
264	42.18	5.78	86.30
295	41.14	6.42	84.39
316	41.41	6.21	85.00
348	41.5	5.97	85.62

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.12 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	40.34	5.62	86.07
27	40.73	6.56	83.89
53	40.62	8.44	79.22
79	40.52	4.44	89.04
108	40.8	4.84	88.14
138	43.06	5.50	87.23
158	42.98	6.02	85.99
185	42.74	5.48	87.18
215	42.56	5.36	87.41
237	42.18	6.24	85.21
264	42.28	5.90	86.05
295	43.11	5.58	87.06
316	42.18	5.74	86.39
348	41.05	4.60	88.79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.13 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	4.58	0.17	96.29
27	4.39	0.20	95.44
57	4.56	0.07	98.46
79	4.42	0.09	97.96
115	4.37	0.12	97.25
136	4.28	0.02	99.53
165	4.67	0.02	99.57
190	4.26	0.04	99.06
211	4.94	0.03	99.39
238	4.58	0.05	98.91
264	4.29	0.01	99.77
293	4.56	0.05	98.90
316	4.14	0.05	98.79
351	4.29	0.32	92.54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.14 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	4.59	0.87	81.05
32	3.126	0.99	68.49
53	3.89	0.87	77.63
79	4.05	0.38	90.62
109	3.045	0.01	99.57
132	4.26	0.14	96.71
158	4.59	0.13	97.17
185	4.08	0.04	99.02
211	3.74	0.07	98.13
237	3.75	0.25	93.33
264	3.48	0.28	91.95
290	4.06	0.27	93.35
316	3.95	0.30	92.41
343	3.82	0.69	81.94

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.15 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	4.46	0.04	99.10
26	4.47	0.03	99.33
53	4.43	0.03	99.32
79	4.42	0.02	99.55
105	4.71	0.01	99.79
132	4.55	0.01	99.78
158	4.23	0.01	99.76
185	4.06	0.01	99.75
211	4.45	0.02	99.55
237	4.31	0.02	99.54
264	4.28	0.05	98.83
290	4.14	0.06	98.55
316	4.41	0.06	98.64
343	4.5	0.09	98.00

ตารางที่ ซ.16 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	4.4	0.95	78.41
26	4.03	0.91	77.42
53	4.06	0.81	80.05
79	4.02	0.74	81.59
105	4.8	0.74	84.58
132	4.36	0.91	79.13
158	4.39	0.82	81.32
185	4.74	0.91	80.80
211	4.56	0.99	78.29
237	4.28	0.71	83.41
264	4.08	0.76	81.37
290	4.11	0.82	80.05
316	4.18	0.91	78.23
343	4.05	0.71	82.47

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.17 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา (Pore volumn)	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
3	4.52	0.34	92.48
23	4.31	0.23	94.66
49	4.28	0.31	92.76
67	4.3	0.31	92.79
98	4.26	0.48	88.73
116	4.19	0.09	97.85
140	4.78	0.12	97.49
162	4.59	0.07	98.47
179	4.35	0.09	97.93
203	4.21	0.00	100.00
224	4.2	0.12	97.14
250	4.15	0.09	97.83
269	4.11	0.14	96.59
298	4.8	0.30	93.75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.18 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายแมงกานีส กับระยะเวลาต่าง ๆ
ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	3.95	0.07	98.23
27	3.84	0.06	98.41
49	3.74	0.07	98.13
67	3.61	0.61	83.10
93	3.41	1.12	67.13
112	4.09	1.13	72.37
135	3.94	1.16	70.56
157	3.82	1.45	62.04
179	3.69	1.12	69.65
202	3.07	1.13	63.19
224	3.96	1.32	66.67
247	3.47	1.35	61.10
269	3.41	1.45	57.48
292	3.74	1.67	55.35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.19 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	3.97	0.06	98.49
22	3.109	0.06	98.04
45	3.12	0.07	97.76
67	4.09	0.06	98.53
90	3.019	0.01	99.67
112	3.98	0.01	99.75
135	3.71	0.01	99.73
157	3.64	0.04	98.90
179	3.59	0.02	99.44
202	4.02	0.03	99.25
224	3.96	0.03	99.24
247	3.97	0.05	98.74
269	4.01	0.05	98.75
292	3.78	0.07	98.15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.20 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระยะเวลา	ความเข้มข้นของน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก	ประสิทธิภาพการกำจัด
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	3.41	1.14	66.57
22	4.04	1.20	70.30
45	4.13	1.17	71.67
67	4.09	1.16	71.64
90	3.32	1.14	65.66
112	3.38	1.12	66.86
135	3.41	1.25	63.34
157	3.64	1.15	68.41
179	3.29	1.14	65.35
202	4.02	1.19	70.40
224	4.12	1.32	67.96
247	3.97	1.14	71.28
269	3.64	1.45	60.16
292	3.74	1.27	66.04

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ฌ

ผลของการศึกษาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ตารางที่ ฌ.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่ว กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดเก็บน้ำต่าง ๆ

ระยะเวลา	ความเข้มข้นน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 1		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 2		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 3		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 4		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 5		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 6		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 7		ความเข้มข้นน้ำออก	
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	41.76	3.11	92.55	1.07	97.44	1.07	97.44	0.93	97.77	1.38	96.70	0.71	99.23	1.64	96.07	3.97	95.71
30	45.10	0.97	97.85	0.43	99.05	0.81	98.20	1.52	96.63	8.04	82.17	4.20	90.69	0.71	98.43	0.81	98.20
59	43.88	7.88	82.04	1.10	97.49	2.68	93.89	0.77	98.25	7.71	82.43	0.64	98.54	2.35	94.64	1.07	97.56
85	41.51	4.04	90.27	2.92	92.97	2.14	94.84	3.12	92.48	1.87	95.50	0.54	98.70	3.05	92.65	1.59	96.17
107	40.83	6.32	84.52	4.46	89.08	1.76	95.69	5.88	85.60	1.91	95.32	0.00	100.00	9.75	76.12	2.79	93.17
137	42.04	1.69	95.98	1.34	96.81	0.97	97.69	0.91	97.84	1.50	96.43	0.34	99.19	1.52	96.38	1.36	96.76
159	41.54	2.07	95.02	1.32	96.82	0.97	97.66	0.88	97.88	1.47	96.46	0.48	98.84	1.47	96.46	1.36	96.73
186	41.09	3.18	92.26	1.21	97.06	0.84	97.96	0.71	98.27	0.94	97.71	0.59	98.56	1.09	97.35	1.24	96.98
213	40.80	4.07	90.02	1.12	97.25	0.76	98.14	0.71	98.26	0.61	98.50	0.66	98.38	1.02	97.50	1.27	96.89
244	40.71	4.52	88.90	1.54	96.22	1.07	97.37	1.05	97.42	1.24	96.95	0.98	97.59	1.69	95.85	3.69	90.94
269	41.16	4.88	88.14	1.73	95.80	1.56	96.21	1.31	96.82	1.56	96.21	1.52	96.31	2.58	93.73	5.63	86.32
292	41.07	5.17	87.41	2.04	95.03	1.58	96.15	1.41	96.57	1.97	95.20	1.68	95.91	2.96	92.79	4.52	88.99
322	40.97	5.48	86.62	3.32	91.90	2.07	94.95	2.07	94.95	2.04	95.02	2.74	93.31	3.04	92.58	4.69	88.55
344	40.95	6.19	84.88	2.94	92.82	2.58	93.70	2.49	93.92	2.84	93.06	2.96	92.77	5.07	87.62	3.14	92.33
371	40.70	6.45	84.15	3.14	92.29	2.97	92.70	2.97	92.70	2.97	92.70	3.02	92.58	5.41	86.71	3.95	90.29
397	40.91	9.08	77.80	2.45	94.01	2.47	93.96	1.97	95.18	1.14	97.21	1.54	96.24	3.25	92.06	2.54	93.79
425	41.38	8.67	79.05	1.08	97.39	1.47	96.45	1.26	96.96	1.17	97.17	0.96	97.68	0.69	98.33	0.63	98.48
453	45.91	5.7	87.58	0.29	99.37	0.29	99.37	0.43	99.06	0.39	99.15	0.40	99.13	0.41	99.11	0.94	97.95
476	44.05	9.04	79.48	1.05	97.62	0.30	99.32	0.33	99.25	0.24	99.46	0.34	99.23	0.36	99.18	0.65	98.52
512	42.59	12.54	70.56	0.79	98.15	0.25	99.41	0.21	99.51	0.11	99.74	0.07	99.84	0.02	99.95	0.10	99.77
542	42.14	14.52	65.54	1.48	96.49	0.78	98.15	0.21	99.50	0.24	99.43	0.08	99.81	0.04	99.91	0.04	99.91
555	43.01	15.74	63.40	1.00	97.67	0.94	97.81	0.28	99.35	0.37	99.14	0.24	99.44	0.19	99.56	0.17	99.60
581	42.92	18.04	57.97	1.98	95.39	1.14	97.34	0.54	98.74	0.58	98.65	0.13	99.70	0.28	99.35	0.29	99.32
608	41.15	15.41	62.55	3.47	91.57	0.97	97.64	0.97	97.64	0.69	98.32	0.58	98.59	0.69	98.32	0.54	98.69
634	40.96	19.07	53.44	4.01	90.21	1.45	96.46	0.57	98.61	0.97	97.63	0.29	99.29	0.48	98.83	0.69	98.32
668	44.43	21.12	52.46	5.49	87.64	1.33	97.01	0.70	98.42	0.71	98.40	0.63	98.58	0.69	98.45	0.76	98.29
696	42.58	25.41	40.32	7.59	82.17	2.41	94.34	1.07	97.49	1.08	97.46	1.05	97.53	1.09	97.44	1.58	96.29
723	41.20	31.83	22.74	9.23	77.60	2.38	94.22	1.10	97.33	1.24	96.99	1.34	96.75	1.62	96.07	2.10	94.90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฌ.2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดเก็บน้ำต่าง ๆ

ปริมาตรน้ำ	ความเข้มข้นน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 1		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 2		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 3		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 4		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 5		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 6		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 7		ความเข้มข้นน้ำออก	
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	44.06	0.53	98.80	0.47	98.93	0.42	99.05	0.35	99.21	0.54	98.77	0.41	99.07	0.51	98.84	0.40	99.09
27	44.71	0.46	98.97	0.35	99.22	0.41	99.08	0.39	99.13	0.51	98.85	0.39	99.13	0.48	98.92	0.38	99.15
53	44.23	0.52	98.82	0.49	98.89	0.51	98.85	0.28	99.37	0.49	98.89	0.36	99.19	0.31	99.30	0.31	99.30
79	44.21	0.74	98.33	0.68	98.46	0.57	98.71	0.38	99.14	0.47	98.94	0.31	99.30	0.25	99.43	0.23	99.48
108	47.61	0.89	98.13	0.89	98.13	0.68	98.57	0.56	98.82	0.46	99.03	0.30	99.37	0.19	99.59	0.14	99.70
138	45.55	0.18	99.60	0.19	99.58	0.16	99.65	0.17	99.63	0.16	99.65	0.19	99.57	0.18	99.60	0.14	99.70
158	45.23	0.45	99.01	0.45	99.01	0.42	99.07	0.47	98.96	0.39	99.14	0.19	99.58	0.24	99.47	0.76	98.32
185	45.06	0.96	97.87	1.02	97.74	0.93	97.94	0.71	98.42	0.64	98.58	0.91	97.98	0.62	98.62	1.16	97.43
215	44.85	1.59	96.45	1.47	96.72	1.24	97.24	1.14	97.46	1.68	96.25	1.14	97.46	1.45	96.77	2.76	93.85
237	43.15	2.48	94.25	2.35	94.55	2.14	95.04	2.09	95.16	3.04	92.95	3.45	92.00	3.64	91.56	4.27	90.10
264	42.18	3.47	91.77	4.78	88.67	4.23	89.97	3.24	92.32	4.27	89.88	4.01	90.49	5.01	88.12	5.78	86.30
295	41.14	4.66	88.67	5.59	86.41	5.09	87.63	4.50	89.06	5.12	87.55	5.34	87.02	6.39	84.47	6.42	84.39
316	41.41	4.98	87.97	4.75	88.53	4.58	88.94	3.54	91.45	3.45	91.67	4.53	89.06	5.02	87.88	6.21	85.00
348	41.50	2.86	93.11	2.55	93.86	2.47	94.05	2.50	93.98	2.19	94.72	2.17	94.78	2.25	94.58	5.97	85.62
369	41.23	5.09	87.65	5.01	87.85	4.17	89.89	3.27	92.07	3.14	92.38	3.14	92.38	3.14	92.38	4.00	90.30
396	40.97	6.13	85.04	6.17	84.94	5.17	87.38	4.17	89.82	4.17	89.82	4.17	89.82	3.97	90.31	3.12	92.38
422	40.96	7.29	82.20	7.13	82.59	6.14	85.01	5.47	86.65	5.47	86.65	4.47	89.09	4.14	89.89	2.45	94.02
448	40.59	10.48	74.18	11.47	71.74	9.74	76.00	6.14	84.87	6.71	83.47	5.14	87.34	4.12	89.85	1.47	96.38
475	40.63	15.48	61.90	18.14	55.35	5.48	86.51	4.58	88.73	4.17	89.74	3.95	90.28	3.04	92.52	2.01	95.05
501	40.78	18.14	55.52	27.34	32.96	3.47	91.49	3.11	92.37	2.14	94.75	1.97	95.17	1.54	96.22	1.12	97.25
537	45.83	21.54	53.00	45.83	0.00	0.89	98.06	0.91	98.01	0.80	98.25	0.83	98.18	0.60	98.70	0.57	98.76
563	41.74	25.93	37.88	41.74	0.00	1.99	95.23	1.92	95.40	1.56	96.26	1.30	96.90	1.27	96.95	1.68	95.98
580	41.71	31.71	23.98	41.71	0.00	2.16	94.82	2.04	95.11	1.94	95.35	0.91	97.82	0.74	98.23	0.87	97.91
607	41.07	41.07	0.00	21.07	48.70	3.14	92.35	1.16	97.18	1.04	97.47	0.54	98.69	0.64	98.44	0.69	98.32
641	40.80	40.8	0.00	20.72	49.22	4.20	89.71	0.32	99.22	0.23	99.43	0.34	99.16	0.29	99.30	0.33	99.19
659	40.27	40.27	0.00	20.27	49.66	5.14	87.24	0.32	99.21	0.35	99.13	0.39	99.03	0.34	99.16	0.99	97.54
696	41.88	41.88	0.00	20.58	50.86	6.90	83.52	0.39	99.07	0.41	99.02	0.44	98.94	0.41	99.02	0.70	98.32
718	44.63	44.63	0.00	12.92	71.05	4.33	90.30	0.34	99.24	0.36	99.19	0.36	99.19	0.28	99.36	0.39	99.12
738	45.51	45.51	0.00	5.51	87.89	2.23	95.10	0.33	99.27	0.27	99.41	0.19	99.58	0.28	99.38	0.29	99.36
773	47.01	47.01	0.00	2.31	95.09	0.74	98.43	0.34	99.28	0.25	99.47	0.09	99.81	0.28	99.40	0.64	98.63

ตารางที่ ฌ.3 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 5 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดเก็บน้ำต่าง ๆ

ระยะเวลา	ความเข้มข้นน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 1		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 2		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 3		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 4		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 5		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 6		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 7		ความเข้มข้นน้ำออก	
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	40.34	5.38	86.66	4.22	89.54	4.22	89.54	8.58	78.73	8.76	78.28	6.88	82.94	6.94	82.80	5.62	86.07
27	40.73	5.56	86.35	5.42	86.69	5.02	87.67	8.66	78.74	8.26	79.72	7.68	81.14	6.94	82.96	6.56	83.89
53	40.62	5.3	86.95	4.84	88.08	4.24	89.56	8.42	79.27	7.84	80.70	5.06	87.54	5.92	85.43	8.44	79.22
79	40.52	5.16	87.27	4.78	88.20	4.02	90.08	7.88	80.55	6.54	83.86	6.30	84.45	4.86	88.01	4.44	89.04
108	40.80	5.08	87.55	4.76	88.33	3.86	90.54	7.38	81.91	6.36	84.41	4.50	88.97	4.60	88.73	4.84	88.14
138	43.06	5	88.39	4.72	89.04	4.08	90.52	3.66	91.50	7.80	81.89	7.24	83.19	6.28	85.42	5.50	87.23
158	42.98	4.98	88.41	5.26	87.76	4.10	90.46	6.66	84.50	7.78	81.90	6.94	83.85	6.86	84.04	6.02	85.99
185	42.74	4.74	88.91	4.88	88.58	4.26	90.03	6.94	83.76	7.62	82.17	6.50	84.79	5.96	86.06	5.48	87.18
215	42.56	5.3	87.55	5.02	88.20	4.26	89.99	7.04	83.46	7.50	82.38	6.24	85.34	6.02	85.86	5.36	87.41
237	42.18	5.16	87.77	5.36	87.29	4.38	89.62	7.32	82.65	7.54	82.12	6.26	85.16	5.92	85.96	6.24	85.21
264	42.28	4.94	88.32	5.42	87.18	4.40	89.59	7.48	82.31	7.38	82.54	6.40	84.86	5.78	86.33	5.90	86.05
295	43.11	5.38	87.52	5.62	86.96	4.40	89.79	7.72	82.09	7.24	83.21	6.38	85.20	5.74	86.69	5.58	87.06
316	42.18	5.28	87.48	5.60	86.72	4.04	90.42	7.54	82.12	6.84	83.78	6.44	84.73	5.46	87.06	5.74	86.39
348	41.05	5.28	87.14	5.64	86.26	3.92	90.45	7.30	82.22	6.62	83.87	6.04	85.29	5.06	87.67	4.60	88.79
369	41.16	4.7	88.58	5.50	86.64	3.08	92.52	6.94	83.14	6.24	84.84	6.44	84.35	4.82	88.29	4.94	88.00
396	41.07	4.42	89.24	5.26	87.19	2.46	94.01	7.42	81.93	7.58	81.54	7.08	82.76	4.72	88.51	5.02	87.78
422	40.91	3.94	90.37	5.04	87.68	2.04	95.01	7.62	81.37	7.34	82.06	7.14	82.55	4.72	88.46	5.34	86.95
448	40.97	4.04	90.14	5.10	87.55	1.96	95.22	8.04	80.38	6.94	83.06	6.42	84.33	4.58	88.82	5.94	85.50
475	40.85	3.08	92.46	3.96	90.31	1.76	95.69	8.44	79.34	7.18	82.42	6.04	85.21	4.34	89.38	6.08	85.12
501	41.05	2.48	93.96	3.10	92.45	1.58	96.15	8.78	78.61	7.10	82.70	5.98	85.43	4.90	88.06	6.24	84.80
537	41.07	1.98	95.18	2.06	94.98	1.56	96.20	9.06	77.94	7.36	82.08	5.90	85.63	9.92	75.85	6.30	84.66
563	41.14	2.22	94.60	2.08	94.94	1.66	95.96	4.76	88.43	4.18	89.84	6.98	83.03	4.92	88.04	9.80	76.18
580	41.07	3.08	92.50	3.04	92.60	2.04	95.03	4.94	87.97	4.70	88.56	5.94	85.54	4.72	88.51	6.90	83.20
607	40.94	4.02	90.18	4.08	90.03	2.40	94.14	5.70	86.08	4.94	87.93	5.02	87.74	4.66	88.62	5.08	87.59
641	41.15	4.4	89.31	6.46	84.30	4.16	89.89	6.04	85.32	5.34	87.02	4.94	88.00	4.56	88.92	3.84	90.67
659	41.18	4.38	89.36	5.90	85.67	2.90	92.96	5.98	85.48	5.32	87.08	4.82	88.30	4.24	89.70	4.48	89.12
696	41.06	4.22	89.72	4.12	89.97	1.84	95.52	5.58	86.41	5.36	86.95	4.72	88.50	8.00	80.52	6.96	83.05
718	41.00	2	95.12	4.16	89.85	1.86	95.46	3.84	90.63	1.50	96.34	5.06	87.66	3.76	90.83	6.70	83.66
738	40.96	2.02	95.07	3.10	92.43	1.80	95.61	4.40	89.26	3.98	90.28	6.50	84.13	4.28	89.55	5.88	85.64
773	41.07	1.92	95.33	1.94	95.28	1.76	95.71	4.80	88.31	3.76	90.84	6.72	83.64	5.50	86.61	5.28	87.14

ตารางที่ ฉ.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดเก็บน้ำต่าง ๆ

ระยะเวลา	ความเข้มข้นน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 1		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 2		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 3		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 4		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 5		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 6		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 7		ความเข้มข้นน้ำออก	
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	49.19	0.59	98.80	0.08	99.84	0.27	99.45	0.17	99.65	0.27	99.45	0.29	99.41	0.34	99.31	0.21	99.57
23	49.66	0.53	98.93	0.19	99.62	0.18	99.63	0.18	99.64	0.19	99.62	0.22	99.55	0.24	99.52	0.53	98.93
45	49.91	0.62	98.76	0.51	98.98	0.38	99.24	0.27	99.46	0.19	99.62	0.19	99.62	0.19	99.62	0.21	99.58
67	49.94	0.71	98.58	0.64	98.72	0.57	98.86	0.34	99.32	0.19	99.62	0.18	99.64	0.16	99.68	0.15	99.70
92	49.99	0.75	98.50	0.73	98.55	0.63	98.75	0.36	99.28	0.20	99.61	0.16	99.69	0.14	99.72	0.75	98.50
118	41.57	0.18	99.57	0.29	99.30	0.30	99.27	0.28	99.33	0.24	99.43	0.30	99.29	0.24	99.43	0.18	99.56
135	42.16	0.15	99.64	0.34	99.19	0.33	99.22	0.29	99.31	0.11	99.74	0.29	99.31	0.22	99.48	0.49	98.84
157	45.17	0.19	99.58	0.47	98.96	0.41	99.09	0.34	99.25	0.27	99.40	0.24	99.47	0.23	99.49	0.15	99.67
183	43.28	0.21	99.51	0.52	98.80	0.31	99.28	0.19	99.56	0.19	99.56	0.13	99.70	0.01	99.98	0.28	99.35
202	42.75	0.13	99.70	0.49	98.85	0.27	99.37	0.17	99.60	0.15	99.65	0.11	99.74	0.15	99.65	0.30	99.30
224	43.15	0.11	99.75	0.67	98.45	0.29	99.33	0.13	99.70	0.14	99.68	0.11	99.75	0.11	99.75	0.10	99.77
250	46.32	0.11	99.76	0.70	98.48	0.32	99.30	0.20	99.57	0.14	99.70	0.12	99.75	0.05	99.89	0.11	99.76
269	45.78	2.15	95.30	1.14	97.51	1.44	96.85	1.27	97.23	1.19	97.40	0.96	97.90	0.92	97.99	0.25	99.45
296	41.50	5.96	85.64	2.55	93.85	2.47	94.05	2.50	93.98	2.19	94.72	2.17	94.78	2.25	94.58	5.97	85.62
314	41.23	15.47	62.48	7.19	82.56	4.17	89.89	2.47	94.01	2.07	94.98	2.05	95.03	2.47	94.01	2.47	94.01
336	40.97	26.14	36.20	13.78	66.37	7.48	81.74	4.57	88.85	2.78	93.21	2.47	93.97	2.13	94.80	2.07	94.95
359	40.95	30.17	26.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
381	40.75	40.75	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
411	41.95	41.95	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฌ.5 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสในสารละลายผสม กับระยะเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็วการไหลสูง โดยใช้เหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดเก็บน้ำต่าง ๆ

ระยะเวลา	ความเข้มข้นน้ำเข้า	ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 1		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 2		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 3		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 4		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 5		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 6		ความเข้มข้นน้ำออก จุดเก็บที่ 7		ความเข้มข้นน้ำออก	
(Pore volumn)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)	(มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
3	41.26	4.10	90.06	6.84	83.42	6.08	85.26	6.36	84.59	6.12	85.17	4.72	88.56	4.28	89.63	5.04	87.78
23	40.75	5.00	87.73	7.48	81.64	6.14	84.93	6.40	84.29	6.00	85.28	5.88	85.57	5.42	86.70	4.10	89.94
45	40.19	4.76	88.16	7.40	81.59	6.24	84.47	6.28	84.37	6.88	82.88	4.90	87.81	5.04	87.46	3.12	92.24
67	40.79	4.80	88.23	7.46	81.71	6.04	85.19	5.68	86.08	8.34	79.55	4.54	88.87	4.64	88.62	3.12	92.35
92	40.72	5.56	86.35	7.62	81.29	6.08	85.07	4.60	88.70	10.40	74.46	4.18	89.73	0.48	98.82	4.32	89.39
118	40.75	5.24	87.14	8.34	79.53	7.04	82.72	6.24	84.69	5.94	85.42	5.82	85.72	4.44	89.10	7.64	81.25
135	40.18	4.70	88.30	7.94	80.24	6.28	84.37	6.24	84.47	6.24	84.47	5.68	85.86	4.24	89.45	3.62	90.99
157	41.07	4.52	88.99	8.54	79.21	6.42	84.37	6.54	84.08	6.90	83.20	4.82	88.26	4.14	89.92	4.36	89.38
183	40.74	4.94	87.87	8.34	79.53	5.88	85.57	6.66	83.65	6.72	83.51	4.46	89.05	3.70	90.92	6.02	85.22
202	40.81	5.18	87.31	8.60	78.93	5.64	86.18	6.82	83.29	6.94	82.99	4.68	88.53	3.84	90.59	3.18	92.21
224	40.71	5.42	86.69	8.58	78.92	5.42	86.69	6.88	83.10	7.04	82.71	4.38	89.24	2.90	92.88	1.48	96.36
250	40.78	1.44	96.47	8.68	78.72	5.34	86.91	7.08	82.64	7.30	82.10	4.36	89.31	2.40	94.11	1.78	95.64
269	40.98	5.02	87.75	7.02	82.87	4.48	89.07	7.20	82.43	6.82	83.36	5.82	85.80	4.08	90.04	4.08	90.04
296	41.05	5.28	87.14	5.64	86.26	3.92	90.45	7.30	82.22	6.62	83.87	6.04	85.29	5.06	87.67	4.60	88.79
314	41.13	4.28	89.59	3.14	92.37	3.08	92.51	5.88	85.70	5.88	85.70	4.56	88.91	4.58	88.86	10.40	74.71
336	40.78	4.02	90.14	2.08	94.90	1.88	95.39	1.08	97.35	2.44	94.02	2.22	94.56	2.90	92.89	5.88	85.58
359	70.82	3.46	95.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
381	40.95	2.54	93.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
411	40.89	1.78	95.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ญ

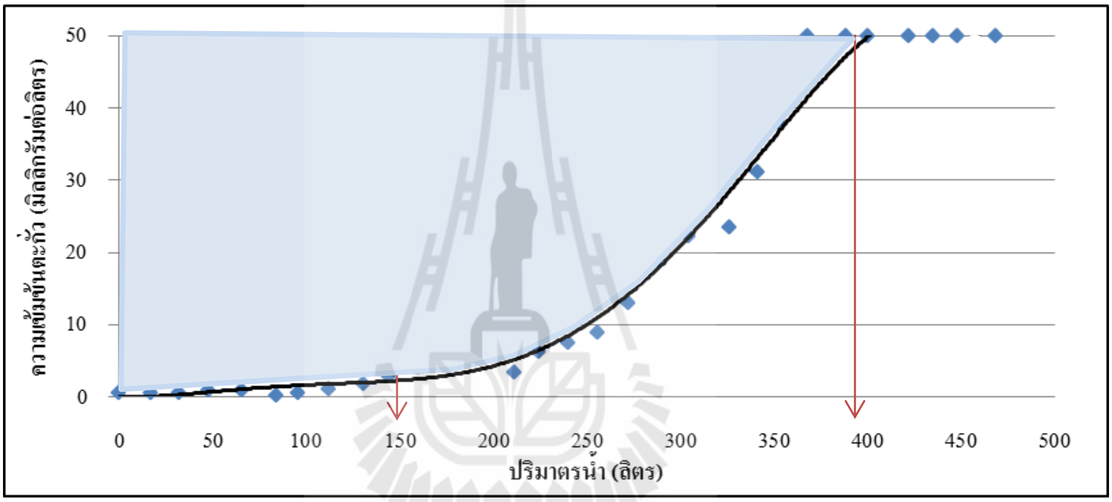
การคำนวณความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

การคำนวณความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

1. ความสามารถในการดูดซับ

การหาค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางเป็นวัสดุผสมระหว่างเศษผงเหล็กกับทราย จะใช้จุดเก็บน้ำที่ 1 ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นจุดที่เกิด Breakthrough curve

ตัวอย่างการคำนวณจาก Breakthrough curve ชุดทดลอง ข.



การคำนวณประกอบไปด้วย

1) ระยะเวลาเบรคทรู (Breakthrough time; t_b) (วัน) คือเวลาที่ใช้จากเริ่มจนถึงน้ำออกเริ่มมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้หรือถึงจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) จากรูปได้ประมาณ 150 ลิตร หรือเท่ากับ 10 วัน

2) จุดหมดสภาพ (Exhaustion point: C_E) (วัน) จากรูปได้ประมาณเกือบ 400 ลิตร หรือเท่ากับ 24 วัน

3) ความสามารถในการดูดซับ หาได้จากสมการที่ 3.10

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ (q)} = \frac{\sum_{n=1}^{T}\left(C_E - C_{ei}\right)dV_i}{\text{Weight media}}$$

$$= \frac{15{,}711.06 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)(ลิตร)}}{14.101 \text{ (กรัม)}}$$

$$= 1{,}114.18 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

4) ค่า Transport distribution coefficient ($K_{d,trans}$) คือปริมาณของมลสารที่สามารถถูกดูดซับโดยตัวดูดซับหาได้จากความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หารด้วยความเข้มข้นมลสาร (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$K_{d,trans} = \frac{\text{ความสามารถในการดูดซับ}}{\text{ความเข้มข้นมลสาร}}$$

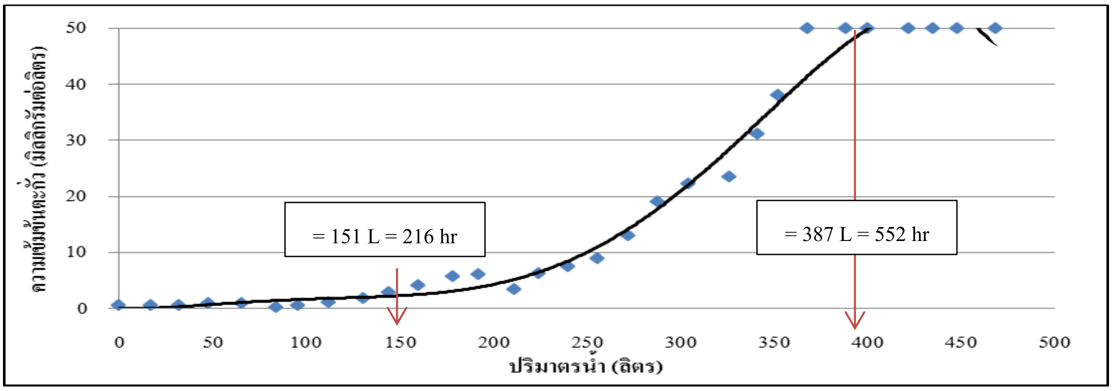
$$= \frac{1{,}114.18 \text{ (มิลลิกรัมต่อกรัม)}}{50 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}$$

$$= 22.28 \text{ ลิตรต่อกรัม}$$

2. ความยาวของชั้นการดูดซับ และระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ

ความยาวของ Mass transfer zone หรือ Sorption คือชั้นการดูดซับที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารถูกดูดซับ หาโดยสมการที่ 3.11 หรือ 3.12

ตัวอย่างการคำนวณจาก Breakthrough curve ชุดทดลอง ข.



$$L_m = L\left[1 - \frac{t_b}{t_s}\right]$$

$$= 5\left[1 - \frac{216}{552}\right]$$

$$= 3.04 \text{ เซนติเมตร}$$

$$Z_s = Z\left[\frac{V_Z}{V_T - 0.5V_Z}\right]$$

$$= Z\left[\frac{236}{387 - 236}\right]$$

$$= 4.39 \text{ เซนติเมตร}$$

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์ใช้ในการออกแบบ โดยที่นำผลการทดลองจากชุดคอลัมน์เพื่อนำไปใช้ในงานจริง โดยใช้วิธี Empty bed contact time (EBCT) ซึ่งหาได้จากสมการ 3.13 และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) ได้จากสมการ 3.14

$$\text{EBCT} = \frac{\text{Bed volume}}{\text{Flow rate}}$$

$$= \frac{981.75 \text{ mL}}{25.89 \text{ L/d}}$$

$$= 0.91 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{Usage rate} = \frac{\text{Weight of absorbent in column}}{\text{Volume at breakthrough}}$$

$$= \frac{14.101 \text{ g}}{387 \text{ L}}$$

$$= 0.036 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ภาคผนวก ฎ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฎ.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Two – tailed Student' t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองแบบกะกับชุดควบคุม

ชุดทดลอง	สารละลาย	ความเข้มข้น (มก./ล.)	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	t	p	sig.	สรุป
ชุดควบคุม	ตะกั่ว	50	3	5.19	2.0371				
เศษผงเหล็ก	ตะกั่ว	50	3	99.45	0.1976	0.0002	0.9999	0.05	ปฏิเสธ H_0
ผงตะไบเหล็ก	ตะกั่ว	50	3	99.80	0.2203	0.0001	0.9999	0.05	ปฏิเสธ H_0
ชุดควบคุม	แมงกานีส	50	3	3.37	0.0872				
เศษผงเหล็ก	แมงกานีส	50	3	92.62	0.0121	2.51E-07	1.0000	0.05	ปฏิเสธ H_0
ผงตะไบเหล็ก	แมงกานีส	50	3	94.51	0.0174	3.79E-07	1.0000	0.05	ปฏิเสธ H_0
ชุดควบคุม	ผสม (ตะกั่ว)	50	3	19.74	2.6383				
เศษผงเหล็ก	ผสม (ตะกั่ว)	50	3	99.49	0.2945	0.0003	0.9998	0.05	ปฏิเสธ H_0
ผงตะไบเหล็ก	ผสม (ตะกั่ว)	50	3	98.92	0.1657	0.0003	0.9998	0.05	ปฏิเสธ H_0
ชุดควบคุม	ผสม (แมงกานีส)	50	3	13.46	0.1371				
เศษผงเหล็ก	ผสม (แมงกานีส)	50	3	87.97	0.0144	9.04E-07	1.0000	0.05	ปฏิเสธ H_0
ผงตะไบเหล็ก	ผสม (แมงกานีส)	50	3	97.32	0.0199	6.52E-07	1.0000	0.05	ปฏิเสธ H_0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฎ.2-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Independent t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทราย

คอลัมน์	สารละลาย	ความเข้มข้น	ความเร็วการไหล	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S^2_p	S_p	t_b	t_{cr}	สรุป
ทราย	ตะกั่ว	50	ต่ำ	14	3.00	1.8542					
เหล็กร้อยละ 20	ตะกั่ว	50	ต่ำ	28	98.12	1.3296	1.5001	1.2248	-237.286	2.021	ปฏิเสธ H_0
ทราย	แมงกานีส	50	ต่ำ	14	1.69	1.3044					
เหล็กร้อยละ 20	แมงกานีส	50	ต่ำ	28	93.54	1.1048	1.1697	1.0815	-259.481	2.021	ปฏิเสธ H_0
ทราย	ผสม (ตะกั่ว)	50	ต่ำ	14	1.97	1.6263					
ทราย	ผสม (แมงกานีส)			14	1.50	1.2154					
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (ตะกั่ว)	50	ต่ำ	28	99.37	0.8619	1.1103	1.0537	-282.38	2.021	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (แมงกานีส)			28	92.52	2.6326	2.1720	1.4738	-188.697	2.021	ปฏิเสธ H_0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฎ.2-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Independent t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทราย

คอลัมน์	สารละลาย	ความเข้มข้น	ความเร็วการไหล	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S^2_p	S_p	t_b	t_{cr}	สรุป
ทราย	ตะกั่ว	50	สูง	7	1.62	1.0038					
เหล็กร้อยละ 5	ตะกั่ว	50	สูง	14	93.58	3.9587	3.0256	1.7394	-114.212	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ตะกั่ว	50	สูง	14	97.71	1.5861	1.4022	1.1842	-175.296	2.093	ปฏิเสธ H_0
ทราย	แมงกานีส	50	สูง	7	2.15	0.8117					
เหล็กร้อยละ 5	แมงกานีส	50	สูง	14	92.00	0.8043	0.8066	0.8981	-216.121	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	แมงกานีส	50	สูง	14	86.59	4.2225	3.1454	1.7735	-102.852	2.093	ปฏิเสธ H_0
ทราย	ผสม (ตะกั่ว)	50	สูง	7	2.70	1.9447					
ทราย	ผสม (แมงกานีส)	50	สูง	7	4.50	2.2171					
เหล็กร้อยละ 5	ผสม (ตะกั่ว)	50	สูง	14	94.10	6.3485	4.9578	2.2266	-88.676	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 5	ผสม (แมงกานีส)	50	สูง	14	86.26	2.4468	2.3742	1.5409	-114.627	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (ตะกั่ว)	50	สูง	14	98.40	3.6984	3.1446	1.7733	-116.581	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (แมงกานีส)	50	สูง	14	90.11	3.8723	3.3496	1.8302	-101.052	2.093	ปฏิเสธ H_0

ตารางที่ ฎ.2-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Independent t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทราย

คอลัมน์	สารละลาย	ความเข้มข้น	ความเร็วการไหล	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S^2_p	S_p	t_b	t_{cr}	สรุป
ทราย	ตะกั่ว	5	สูง	7	2.53	3.3959					
เหล็กร้อยละ 5	ตะกั่ว	5	สูง	14	97.99	2.0251	2.4580	1.5678	-131.535	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ตะกั่ว	5	สูง	14	95.61	3.1284	3.2129	1.7925	-112.174	2.093	ปฏิเสธ H_0
ทราย	แมงกานีส	5	สูง	7	4.99	4.1117					
เหล็กร้อยละ 5	แมงกานีส	5	สูง	14	90.10	9.3169	7.6731	2.7700	-66.3685	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	แมงกานีส	5	สูง	14	98.89	0.6507	1.7436	1.3205	-153.609	2.093	ปฏิเสธ H_0
ทราย	ผสม (ตะกั่ว)	5	สูง	7	2.82	1.2592					
ทราย	ผสม (แมงกานีส)	5	สูง	7	2.77	1.7860					
เหล็กร้อยละ 5	ผสม (ตะกั่ว)	5	สูง	14	99.25	0.5534	0.7763	0.8811	-236.446	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 5	ผสม (แมงกานีส)	5	สูง	14	80.51	2.1111	2.0084	1.4172	-118.498	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (ตะกั่ว)	5	สูง	14	73.10	15.2373	10.8232	3.2899	-46.1514	2.093	ปฏิเสธ H_0
เหล็กร้อยละ 20	ผสม (แมงกานีส)	5	สูง	14	67.55	3.3804	2.8769	1.6961	-82.5006	2.093	ปฏิเสธ H_0

ตารางที่ ฎ.3-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Independent t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทราย ตามจุดเก็บน้ำต่าง ๆ

คอลัมน์	สารละลาย	จุดเก็บ	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	คอลัมน์	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S^2_p	S_p	t_b	t_{cr}	สรุป
ทราย	ผสม (ตะกั่ว)	จุดเก็บที่ 1	7	1.51	1.2135	เหล็กร้อยละ 5	14	95.84	3.9936	3.1157	1.7651	-115.4422	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 2	7	1.59	2.1661		14	95.62	4.5532	3.7994	1.9492	-104.2176	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 3	7	2.96	2.2411		14	95.98	4.2052	3.5849	1.8934	-106.1401	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 4	7	1.73	1.1634		14	96.58	3.5264	2.7802	1.6674	-122.8893	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 5	7	2.10	1.3276		14	96.06	4.0224	3.1714	1.7808	-113.9803	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 6	7	0.71	0.4716		14	96.00	4.4707	3.2078	1.7910	-114.9287	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 7	7	1.53	0.9235		14	95.51	5.2905	3.9114	1.9777	-102.6551	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บน้ำออก	7	2.70	1.9447		14	94.10	6.3485	4.9578	2.2266	-88.6760	2.093	ปฏิเสธ H_0
	ผสม (แมงกานีส)	จุดเก็บที่ 1	7	0.80	0.9838		14	87.59	0.7206	0.8037	0.8965	-209.1362	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 2	7	1.98	2.5289		14	87.78	0.9588	1.4546	1.2061	-153.6810	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 3	7	2.77	1.9904		14	89.88	0.7401	1.1350	1.0653	-176.6232	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 4	7	1.98	1.6518		14	82.42	3.1720	2.6919	1.6407	-105.9022	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 5	7	2.01	1.5100		14	82.20	1.7107	1.6474	1.2835	-134.9780	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 6	7	1.78	0.6215		14	84.82	1.8845	1.4856	1.2189	-147.1820	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 7	7	1.72	0.7334		14	85.93	1.7522	1.4305	1.1960	-152.0910	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บน้ำออก	7	4.50	2.2171		14	86.26	2.4468	2.3742	1.5409	-114.6266	2.093	ปฏิเสธ H_0

ตารางที่ ฎ.3-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Independent t – test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดของชุดทดลองคอลัมน์เหล็กผสมทรายกับชุดทดลองคอลัมน์ทราย ตามจุดเก็บน้ำต่าง ๆ

คอลัมน์	สารละลาย	จุดเก็บ	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	คอลัมน์	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S^2_p	S_p	t_b	t_{cr}	สรุป
ทราย	ผสม (ตะกั่ว)	จุดเก็บที่ 1	7	1.51	1.2135	เหล็กร้อยละ 20	14	98.00	3.7388	2.9413	1.7150	-121.5364	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 2	7	1.59	2.1661		14	98.51	1.4546	1.6793	1.2959	-161.5691	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 3	7	2.96	2.2411		14	98.69	1.4962	1.7314	1.3158	-157.1752	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 4	7	1.73	1.1634		14	98.92	1.5506	1.4283	1.1951	-175.6831	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 5	7	2.10	1.3276		14	99.08	1.3897	1.3701	1.1705	-178.9859	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 6	7	0.71	0.4716		14	99.11	1.3329	1.0609	1.0300	-206.3745	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 7	7	1.53	0.9235		14	99.15	1.3961	1.2469	1.1166	-188.8543	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บน้ำออก	7	2.70	1.9447		14	98.40	3.6984	3.1446	1.7733	-116.5813	2.093	ปฏิเสธ H_0
	ผสม (แมงกานีส)	จุดเก็บที่ 1	7	0.80	0.9838		14	88.44	2.4958	2.0183	1.4207	-133.2679	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 2	7	1.98	2.5289		14	80.99	2.1541	2.2725	1.5075	-113.2285	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 3	7	2.77	1.9904		14	85.80	1.9956	1.9940	1.4121	-127.0221	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 4	7	1.98	1.6518		14	84.19	1.6676	1.6626	1.2894	-137.7206	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 5	7	2.01	1.5100		14	82.78	2.8306	2.4136	1.5536	-112.3197	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 6	7	1.78	0.6215		14	87.69	1.6488	1.3244	1.1508	-161.2683	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บที่ 7	7	1.72	0.7334		14	90.42	3.1331	2.3753	1.5412	-124.3285	2.093	ปฏิเสธ H_0
		จุดเก็บน้ำออก	7	4.50	2.2171		14	90.11	3.8723	3.3496	1.8302	-101.0520	2.093	ปฏิเสธ H_0

ภาคผนวก ฏ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

นิรามัย ไตรยวงศ์ และ ฉัตรเพชร ยศพล. (2557). **การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดินด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์.** การประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปี ครั้งที่ 26 สวสท.'57., หน้า 37-43

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนิรามัย ไตรยวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มกราคม 2529 เป็นบุตรคุณพ่อจรรยา ไตรยวงศ์ และคุณแม่สมพิศ ไตรยวงศ์ เริ่มศึกษาชั้นประถม ที่โรงเรียนเสลภูมิสามัคคี จังหวัดร้อยเอ็ด ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 3 ที่โรงเรียนเลิงนกทา จังหวัดยโสธร ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 ที่โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี และระดับอุดมศึกษา (ปริญญาตรี) ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) เมื่อปี พ.ศ. 2552 จากนั้นเริ่มทำงานที่บริษัท พราวเอเชีย จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม วิศวกรวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และวิศวกรโครงการเป็นเวลา 2 ปี และในปี พ.ศ. 2554 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยขณะศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนและวิจัยมาโดยตลอด และได้ทำงานที่หน่วยวิจัยและที่ปรึกษาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัย ได้แก่ การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี โครงการศึกษาความเหมาะสมและออกแบบรายละเอียดระบบรวบรวมและบำบัดน้ำเสีย และระบบระบายน้ำฝน โรงพยาบาลเทพรัตน์นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาแผนหลักระบบการจัดการมูลฝอย นครหลวงเวียงจันทน์ และการศึกษาความเหมาะสมระบบการจัดการมูลฝอยเมืองศรีสัตนาค นครหลวงเวียงจันทน์ เป็นต้น

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษาได้นำเสนอผลงานวิชาการในการประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปี ครั้งที่ 26 สวสท.'57 เรื่อง **"การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดินและเหล็กวาเลนซ์ศูนย์"**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี