

ศึกษาศักยภาพวัสดุสำหรับเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์เพื่อ
บำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

**Feasibility Study of Media for Permeable Reactive Barrier for Treatment of
Heavy Metal Contaminated in Groundwater**

สุทธิสา ยาอีด

Sutisa Yaeed

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**

2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

0

เลขที่	TD426	๘๗๓	๒๕๕๑	ร.	๒
Bib Key	312060				
	๖ ส.ค. ๒๕๕๒				

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ ศึกษาศักยภาพวัสดุสำหรับเพอร์มิตทีฟแอกทีฟแบรีเออร์เพื่อบำบัดโลหะหนัก
ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

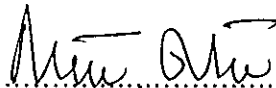
ผู้เขียน นางสาวสุทธิสา ยอียด
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

คณะกรรมการสอบ



.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัญญา ศรีสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



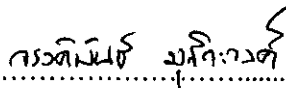
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิต เจลิมยานนท์)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิต เจลิมยานนท์)



.....กรรมการ
(ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเคมี



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรักษ์ ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ศึกษาศักยภาพวัสดุสำหรับเพอร์มิเอเบิลรีแอกทีฟไฟเบอร์เพื่อบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน
ผู้เขียน	นางสาวสุทธิสา ยาชิด
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

ในประเทศไทยมีรายงานหลายฉบับที่พบการปนเปื้อนของสังกะสีและตะกั่วในน้ำใต้ดิน ซึ่งหากเรามีความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการดูดซับ/การคายซับของ โลหะก็จะประโยชน์อย่างมาก ในการควบคุมสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับ ไอออนของสังกะสีและ ตะกั่วจากสารละลายน้ำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบ แบทช์ ใช้ในการศึกษาการดูดซับโดยวัสดุดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ผงตะไบเหล็ก คินลูกรัง และตะกอน จุลินทรีย์ โดยทำการศึกษาทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม คือ ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ใน อัตราส่วน 1:1 คินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 และผงตะไบเหล็กผสมตะกอน จุลินทรีย์และคินลูกรังในอัตราส่วน 1:1:1 ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษาคณสมบัติของวัสดุ พบว่า คินลูกรังมีพื้นที่ผิวสูงสุด รองลงมาคือตะกอนจุลินทรีย์ และผงตะไบเหล็กตามลำดับ และได้ศึกษา ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ โลหะหนัก (5, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร) และผลของพีเอช (4, 5, 6, 7 และ 8) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดของวัสดุดูดซับ พบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายโลหะหนักจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง โดยวัสดุผสมจะมีความสามารถในการ ดูดซับที่ดีกว่า โดยเฉพาะผงตะไบเหล็กกับตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถดูดซับปริมาณไอออน สังกะสีและตะกั่ว 5.07 และ 3.53 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมวัสดุดูดซับตามลำดับ จากการทำนาย ด้วยแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ และพีเอชที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด ลดลง การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ โดยทำการจำลองสถานการณ์การไหลพบว่า การใช้ วัสดุผสมกับทรายในสัดส่วน 0.5:0.5:1.0 (ผงตะไบเหล็ก:ตะกอนจุลินทรีย์:ทราย) โดยมีความหนา ของ reactive media เท่ากับ 50 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 153.94 ตารางเซนติเมตร ที่อัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที (Retention time 36.65 นาที) และ 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที (Retention time 17.10 นาที) พบว่าเพียงพอในการบำบัดสารละลายปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วที่ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีและตะกั่วได้ 95-99 % ที่พีเอช 6

Thesis Title Feasibility Study of Media for Reactive Barrier for Treatment of
 Heavy Metal Contaminated in Groundwater

Author Miss Sutisa Yaeed

Major Program Chemical Engineering

Academic Year 2008

Abstract

There are many reports on contamination of groundwater with lead and zinc in Thailand. It is important to understand the sorption/desorption mechanisms of metals in order to predict and control the migration of the contaminants in the environment. The experiments were divided into two parts. The batch experiments were used to study the adsorption of lead and zinc ions from aqueous solutions by six media: iron filing, laterite soil, activated sludge, 1:1 iron filing : activated sludge mixture, 1:1 laterite soil : activated sludge mixture, and 1:1:1 iron filing : laterite soil : activated sludge was studied in batch experiments at room temperature. BET surface areas of the media followed the order laterite soil > activated sludge > iron filing. The effect of initial metal concentrations (5, 20, 40, 80, 100 ppm) on the removal efficiency of the media was investigated. It was found that the removal efficiency of each media decreased with increasing of initial metal concentrations. The greatest reduction of lead and zinc was obtained by using mixture of iron filing and activated sludge. The experimental data were analyzed by Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacity (q_m) of lead and zinc ions from aqueous solutions from Langmuir adsorption isotherm were 5.07 and 3.53 mg-metal/g-adsorbent, respectively. The effect of pH (4, 5, 6, 7 and 8) on the removal efficiency of the media was investigated. It was found that the removal efficiency of each media slightly decreased with increasing of pH. The column experiments were used to study the mass ratio 0.5:0.5:1.0 iron filing : activated sludge : sand with 50 cm long and section area of 153.94 cm² reactive media at flow rate of 3.5 cm³/s (Retention time 36.65 min) and 7.5 cm³/s (Retention time 17.10 min) at initial metal concentrations of 100 ppm, pH 6. Under condition the reactive media could remove up to 95-99 % of total metal.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความกรุณาให้คำปรึกษา เสนอแนวทาง ในการวิจัยและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ มีความถูกต้องสมบูรณ์อย่างออกนอก จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เกษมพัฒนานนท์ ประธาน กรรมการที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท แมนเอโฟรสเซนฟูคส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกอนจุลินทรีย์ ในการทดลอง ตลอดจนการสนับสนุนอย่างดีเยี่ยมของ คุณสุทธิพงษ์ ชาญชัยกรรม ผู้จัดการโรงงาน และ คุณธิวาริ โอภิชากร ผู้จัดการฝ่ายทรัพยากรน้ำ รวมถึงพนักงานทุกท่านที่เกี่ยวข้องในการ จัดเตรียมวัสดุคิบและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีทุกครั้งที่ได้ไปติดต่อ

ขอขอบคุณ พี่พลวัตร คงสม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปลูกพืชกลศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทดลองและอำนวยความสะดวกต่างๆ และที่สำคัญ อย่างยิ่ง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนนักวิทยาศาสตร์และบุคลากรทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนความช่วยเหลือและคำแนะนำ ให้การวิจัยดำเนิน ไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนใน การทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ด้วยความเคารพรัก ที่ให้การสนับสนุนด้าน การเงินและความช่วยเหลือในทุกๆด้านเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่สิ น้องดี น้องไลลา และ เพื่อน ๆ คณะวิศวกรรมเคมีทุกคน ที่เป็นกำลังใจและแรงกระตุ้นให้มีความพยายามในการทำงานให้ สำเร็จลุล่วง โดยเฉพาะพี่บู๊ต สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือจนผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นอุปสรรค ต่างๆไปได้ด้วยดี ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ขึ้นได้

สุทธิสา ยาศึก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
คำย่อ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สาเหตุที่เลือกสังกะสีและตะกั่วในการทำวิจัย	2
1.5 สาเหตุที่เลือก ผงตะไบเหล็ก ตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรัง มาใช้ในการบำบัดโลหะหนัก	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำใต้ดิน	4
2.1.1 คุณลักษณะของแหล่งน้ำใต้ดิน	4
2.1.2 มาตรฐาน	5
2.1.3 การใช้น้ำใต้ดินของประเทศไทย	5
2.2 สังกะสี	6
2.3 ตะกั่ว	7
2.4 เฟอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรีเออร์	10
2.5 เภมณฑ์การเลือกวัสดุสำหรับสร้างเฟอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรีเออร์	12
2.6 เหล็ก	13
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ดินลูกรัง	13
2.8 ตะกอนจุลินทรีย์	14
2.9 การดูดติดผิว (Adsorption)	16
2.9.1 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption)	16
2.9.2 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption)	16
2.9.3 การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption)	17
2.9.4 ไอโซเทอมการดูดซับ	17
2.10 การทดลองแบบแบทช์	19
2.11 จลนศาสตร์การดูดซับ	20
2.12 การทดลองแบบสคัมภ์	21
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	26
3.1 วัสดุ	26
3.2 อุปกรณ์	28
3.3 วิธีการวิจัย	30
4. ผลและวิจารณ์	44
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 บทสรุป	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
รายการเอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์	78
ก-1 Adsorption capacity	78
ก-2 Adsorption isotherm	80
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สังกะสีและตะกั่ว	96
ประวัติผู้เขียน	102

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	8
2-2 เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค	9
2-3 สารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้ด้วย Zero-valent iron	15
3-1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองผลของความเข้มข้น	36
3-2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองผลของพีเอช	39
3-3 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบสคมภ์	42
4-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน	44
4-2 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของการดูดซับสังกะสี	48
4-3 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการดูดซับสังกะสี	48
4-4 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของการดูดซับตะกั่ว	49
4-5 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการดูดซับตะกั่ว	49
4-6 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนสังกะสี	54
4-7 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนสังกะสี	56
4-8 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนตะกั่ว	58
4-9 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนตะกั่ว	59
4-10 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนสังกะสี และตะกั่วในสารละลายผสม	60
4-11 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนสังกะสี และตะกั่วจากสารละลายผสม	62
4-12 ค่า Hydraulic conductivity ของวัสดุแต่ละชนิด	66
5-1 แสดงการประเมินค่าขั้นต้นในการออกแบบ Permeable Reactive Barrier	72

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1 แผนภาพของการติดตั้งเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรีเออร์	11
2-2 เพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรีเออร์ แบบ Continuous	11
2-3 เพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรีเออร์ แบบ Funnel-and-gate	12
3-1 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากบ่อบำบัดน้ำเสีย	26
3-2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ทำความสะอาดแล้ว	27
3-3 ดินลูกรัง	27
3-4 ผงตะไบเหล็ก	28
3-5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย	31
3-6 เครื่อง BET Surface Area	33
3-7 Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	33
3-8 เครื่องช่วยเขย่า	34
3-9 เครื่องวัดพีเอช	37
3-10 เครื่องเขย่า	37
3-11 อุปกรณ์การทดลองแบบ Constant Head Test	41
3-12 อุปกรณ์การทดลองแบบ Falling Head Test	41
3-13 อุปกรณ์การทดลองแบบสคมภ์	43
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของวัสดุดูดซับ กับระยะเวลาในการดูดซับ	45
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่ว วัสดุดูดซับ กับระยะเวลาในการดูดซับ	46
4-3 Pseudo-first order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6	47
4-4 Pseudo-second order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6	47
4-5 Pseudo-first order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6	48
4-6 Pseudo-second order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6	49
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของวัสดุดูดซับ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายป่นเป็อนสังกะสี	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	51
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายป้อนสังกะสีและตะกั่ว	52
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายป้อนสังกะสีและตะกั่ว	52
4-11 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็ก	54
4-12 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยตะกอนจุลินทรีย์	54
4-13 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	55
4-14 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	55
4-15 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็ก	56
4-16 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยตะกอนจุลินทรีย์	56
4-17 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	57
4-18 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	57
4-19 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยตะกอนจุลินทรีย์	58
4-20 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยดินลูกรัง	58
4-21 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์	59
4-22 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ในสารละลายผสม	61
4-23 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ในสารละลายผสม	61

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-24 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ในสารละลายผสม	61
4-25 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วโดยผงตะไบเหล็กในสารละลายผสม	62
4-26 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วโดยตะกอนจุลินทรีย์ในสารละลายผสม	62
4-27 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วโดยดินลูกรังในสารละลายผสม	62
4-28 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังในสารละลายผสม	63
4-29 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม	64
4-30 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม	64
4-31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีกับพีเอช ที่เปลี่ยนไปของผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี	65
4-32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนตะกั่วกับพีเอช ที่เปลี่ยนไปของผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว	65
4-33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนของโลหะกับเวลาที่อัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6	67
4-34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนของโลหะกับเวลาที่อัตราการไหล 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6	67
4-35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนของสังกะสีกับเวลาที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6	68
4-36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนของตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

5-1 แสดงการประเมินค่าชั้นดินในการออกแบบ Permeable Reactive Barrier

72

คำย่อ

PRB	=	Permeable Reactive Barrier
AAS	=	Flame Atomic Absorption Spectrophotometer
BET	=	Brunauer – Emmet - Teller
EPS	=	Extracellular polymeric substance
AS-P	=	Activated Sludge
MUR-P	=	Methane Upflow Reactor
CASS-N	=	Sludge System

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากแนวโน้มปริมาณมูลฝอยที่มากขึ้น เช่น ในกรุงเทพมหานครที่มีปริมาณมูลฝอยเพิ่มขึ้นจาก 3,000-7,000 ตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2547 เป็น 5,000-10,000 ตัน/วันในปี พ.ศ. 2548 ส่งผลให้มีน้ำชะมูลฝอยที่มากขึ้น ประกอบกับการปลดปล่อยสารพิษและน้ำชะจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่พื้นดินและซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินในที่สุด ทำให้พบการปนเปื้อนของสารพิษในน้ำบาดาลที่สูงกว่ามาตรฐานในพื้นที่หลายแห่งของประเทศไทย เช่นจากรายงานการตรวจสอบตัวอย่างน้ำประปาบาดาลบริเวณรอบแหล่งอุตสาหกรรมที่พบการปนเปื้อนของตะกั่ว และสังกะสีในปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำดื่มของไทย โดยพบสารตะกั่วสูงกว่ามาตรฐาน 4 เท่า และสังกะสีสูงกว่ามาตรฐานถึง 8 เท่า (<http://www.deqp.go.th/news/newsDetail.jsp?typeID=1&id=9421&languageID=th>) ทั้งนี้สารตะกั่วเป็นมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อเลือด ไต ระบบประสาทและระบบสืบพันธุ์ รวมทั้งยังส่งผลต่อการพัฒนาทางด้านสติปัญญาในเด็ก ส่วนสังกะสีจะทำให้ร่างกายขาดความสามารถในการดูดซึมวิตามินบางชนิดได้

การปนเปื้อนของสารมลพิษในแหล่งน้ำใต้ดินเป็นเรื่องสำคัญมาก เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในชุมชนที่อาศัยน้ำบาดาลจากแหล่งนี้เพื่อการอุปโภคบริโภค และเป็นการทำลายแหล่งทรัพยากรอันมีค่าอย่างถาวร ซึ่งทางกรีนพีซ (Green Peace) ก็พยายามเรียกร้องความรับผิดชอบในเรื่องนี้มาโดยตลอด แต่ในประเทศไทยการศึกษา วิจัย เพื่อบำบัดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินยังมีอยู่น้อย และยังไม่มีการศึกษาการใช้กระบวนการเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ซึ่งเริ่มเป็นที่ยอมรับในต่างประเทศว่าสามารถลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเลย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุสำหรับสร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ (Permeable reactive barrier) เพื่อบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ โดยวัสดุที่สนใจศึกษาได้แก่ผงตะไบเหล็กซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในกระบวนการเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ในต่างประเทศเปรียบเทียบกับวัสดุธรรมชาติคือ ดินลูกรัง และตะกอนจุลินทรีย์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์สำหรับติดตั้งในแหล่งที่เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุชนิดต่างๆ ในการบำบัด โลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด โลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน
3. ศึกษาสัดส่วนของวัสดุผสมที่เหมาะสมในการสร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการใช้ผงตะไบเหล็ก ตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรัง ทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม ในการดูดซับโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำสังเคราะห์ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำปนเปื้อนสังกะสี น้ำปนเปื้อนตะกั่ว และน้ำปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งกระทำโดยวิธีแบบแบทช์ ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยวิธี Atomic Absorption โดยปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ผลของพีเอช เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำของวัสดุทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม สำหรับน้ำปนเปื้อนแต่ละประเภท และผลของพีเอชที่มีต่อการบำบัด จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด โดยวัสดุผสมที่เหมาะสมกับทรายในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งกระทำโดยวิธีแบบสทมภ์ โดยทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) ของผงตะไบเหล็ก ตะกอนจุลินทรีย์ และทราย ด้วยการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (constant Head) ส่วนดินลูกรัง ศึกษาโดยการทดสอบด้วยวิธี Falling Head (ASTM D2434) จากนั้นทำการทดลองแบบสทมภ์ โดยเป็นการจำลองสถานการณ์การไหลของน้ำในภาคสนามให้มาไหลผ่าน Reactive media และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยวิธี Atomic Absorption ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์ต่อไป

1.4 สาเหตุที่เลือกสังกะสีและตะกั่วในการทำวิจัย

1. มีการรายงานการตรวจสอบตัวอย่างน้ำประปาบาดาลบริเวณรอบแหล่งอุตสาหกรรม พบว่ามีการปนเปื้อนของตะกั่ว และสังกะสีในปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำดื่ม
2. สังกะสีและตะกั่วเป็นสารพิษที่ถึงแม้จะมีการปนเปื้อนอยู่เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเกิดการสะสมในระยะยาวอาจส่งผลกระทบต่อระบบสำคัญภายในร่างกายดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

1.5 สาเหตุที่เลือก ผงตะไบเหล็ก ตะกอนจูลินทรีย์ และดินลูกรัง มาใช้ในการบำบัดโลหะหนัก

1. เพื่อศึกษาความสามารถของวัสดุต่างชนิดกันในการบำบัดโลหะหนัก
2. เป็นการศึกษาความเหมาะสมของวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นสำหรับใช้สร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์ โดยผงตะไบเหล็กหรือเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์เป็นวัสดุที่มีการใช้สร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ในขณะที่มีรายงานการใช้ตะกอนจูลินทรีย์และดินลูกรังในการบำบัดโลหะหนักแต่ยังไม่มีรายงานการใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์
3. ตะกอนจูลินทรีย์ที่ใช้ เป็นของเสียเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง ซึ่งเก็บมาจากบ่อบำบัดน้ำเสีย จำพวกเปลือกปลาเล็กซึ่งไม่สามารถขายหรือใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งหากมีอยู่ในบ่อบำบัดน้ำเสียในปริมาณมากหรือหมักหมมอยู่เป็นเวลานานจนเกิดการเน่าเสีย จะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในบ่อบำบัดเกินกว่าค่ามาตรฐาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดินด้วยผงตะไบเหล็ก ดินลูกรัง ตะกอนจูลินทรีย์ และวัสดุผสม
2. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน
3. ทราบสัดส่วนของวัสดุผสมที่เหมาะสมในการสร้างเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์
4. สามารถลดปริมาณของเสียโดยนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดิน (Ground Water) หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในชั้นดินบนพื้นผิวโลก โดยเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างของชั้นดินหรือหิน ซึ่งต้นกำเนิดของน้ำใต้ดินจะมาจากน้ำในบรรยากาศและน้ำผิวดินต่างๆ โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินทางกายภาพและทางชีววิทยาจะอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น มีความใส ปราศจากตะกอนความขุ่น ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากถูกรองด้วยชั้นของดิน แต่สำหรับคุณภาพของน้ำใต้ดินทางเคมีมักจะไม่น่าจะแน่นอน ส่วนมากมักจะมีแร่ธาตุและสารเคมีละลายปะปนอยู่ในน้ำที่มีปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน (เกรียงศักดิ์, 2536)

2.1.1 คุณลักษณะของแหล่งน้ำใต้ดิน

ชั้นดินหรือชั้นหินที่มีน้ำจืดอิ่มตัว และมีปริมาณน้ำมากพอที่จะนำขึ้นมาใช้ นิยมเรียกว่า ชั้นให้น้ำ โดยชั้นให้น้ำมีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ชั้นให้น้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifers) เป็นชั้นที่มักอยู่ใต้ผิวดินที่ระดับตื้น ระดับน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล เช่น ฤดูแล้งระดับน้ำจะอยู่ลึก ฤดูฝนระดับน้ำจะอยู่ตื้น
- ชั้นให้น้ำแบบปิด (Confined Aquifers) เป็นชั้นที่มักอยู่ใต้ผิวดินที่ระดับความลึกลงไปอีก โดยมีชั้นของดินหรือหินที่ซึมผ่านได้ยากปิดปกคลุมไว้ข้างบน ทำให้น้ำในชั้นนี้มี ความดัน ซึ่งมลพิษจากพื้นดินยากที่จะลงไปปนเปื้อนน้ำในชั้นนี้ได้ แต่อาจจะมีสารแร่ธาตุต่างๆ ได้ เนื่องจากน้ำในชั้นนี้อาจมีการซึมผ่านหินเกลือหรือพวกสนิมเหล็กได้ โดยระดับน้ำจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลมากนัก

ระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีความหมายว่า ระดับของน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมน้ำใต้ดินที่ไม่อาจจะซึมผ่านต่อไปได้ ระดับของน้ำใต้ดินจะไม่คงที่แน่นอน สามารถมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้ตามฤดูกาล เช่น ในฤดูฝนระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ใกล้ผิวดินมากกว่าในฤดูแล้งเนื่องจากน้ำใต้ดินมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากปริมาณของน้ำฝนที่ซึมลงสู่ชั้นดิน

คุณภาพน้ำใต้ดิน จะมีความแตกต่างกันระหว่างสถานที่หนึ่งกับอีกสถานที่หนึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของชุมชนที่อยู่รอบๆ พื้นและประเภทของชั้นดินหรือหินที่กักเก็บน้ำใต้ดินอยู่ทำให้ไม่

สามารถบอกได้ว่าพื้นที่ใดสามารถสูบน้ำขึ้นมาใช้บริโภคได้ทันทีหรือไม่ โดยปราศจากการบำบัด ให้สะอาดปลอดภัยเสียก่อน ดังนั้นขณะที่ทำการขุดสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินจำเป็นต้องทราบว่า คุณภาพของน้ำเป็นอย่างไร ถ้ามีคุณภาพไม่ดีก็ต้องทำการบำบัดให้เป็นน้ำสะอาดเสียก่อน

2.1.2 มาตรฐาน

มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคและน้ำบริโภคแสดงดังตารางที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ

2.1.3 การใช้น้ำใต้ดินของประเทศไทย

ภาครัฐและเอกชนได้ทำการเจาะและพัฒนาน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ การบริโภคอุปโภค อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้เพื่อการ บริโภคอุปโภค รองลงมาเพื่ออุตสาหกรรม ส่วนด้านเกษตรกรรมนั้นมีการสูบน้ำบาดาลเพื่อทำนา ปรัง ปลูกพืชผักสวนครัวและการเลี้ยงสัตว์ในบางพื้นที่ การใช้น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลเพื่อการ บริโภคอุปโภคของประชาชน ยกเว้นบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ทั้งหมดดำเนินการโดย หน่วยงานของรัฐ เช่น กรมทรัพยากรธรณี สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท กรมโยธาธิการ กรม อณามัย และกองอำนวยการกลางรักษาความปลอดภัยแห่งชาติ กองบัญชาการทหารสูงสุด (กรป. กลาง) เป็นต้น ในปัจจุบันมีบ่อน้ำบาดาลที่ใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคในอัตราวันละ 50 ลิตร/วัน/คน คาดว่ามีปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบน้ำขึ้นมาใช้เพื่อการบริโภคอุปโภคถึงวันละไม่น้อยกว่า 10 ล้านลูกบาศก์ เมตร นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานราชการและการประปาส่วนภูมิภาคสูบน้ำบาดาลเพื่อใช้ในกิจกรรม ประปาในเขตเมืองอีกเป็นจำนวนมาก ภาคเอกชนที่ดำเนินการเจาะน้ำบาดาลเพื่อการบริโภคอุปโภค ส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล น้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำสำคัญที่ใช้เพื่อการบริโภค อุปโภคมาเป็นเวลานานแล้ว เชื่อได้ว่าการใช้น้ำใต้ดินมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2450 ในปัจจุบันการใช้น้ำ บาดาลยังคงมีปริมาณที่สูงอยู่เช่นเดิม โดยมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลถึงวันละประมาณ 2.3 ล้านลูกบาศก์เมตร แยกเป็นน้ำเพื่อการบริโภคอุปโภควันละ 0.9 ล้านลูกบาศก์เมตร อุตสาหกรรมวันละประมาณ 1.4 ล้านลูกบาศก์เมตร มีเพียงเล็กน้อยที่ใช้ทาง เกษตรกรรม การใช้น้ำใต้ดินเพื่อเกษตรกรรมในพื้นที่ทั่วประเทศดำเนินการโดยทั้งภาครัฐและ เอกชน กรมชลประทานเป็นหน่วยงานหลักในการพัฒนาน้ำใต้ดินสำหรับเกษตรกรรม เช่น

โครงการนำไ้ดินเพื่อการชลประทานในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ได้มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลทั้งหมด 204 บ่อ และสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณปีละ 30 ล้านลูกบาศก์เมตร และปริมาณสูงสุดถึงปีละ 45 ล้านลูกบาศก์เมตร

แนวโน้มการพัฒนาไ้ดินในช่วงแผนพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 รัฐบาลมีแผนงานเร่งรัดให้ม้ิน้ำสะอาดในชนบทด้วยระบบประปา ดังนั้นความครอบคลุมด้วยน้ำสะอาดจากระบบประปาต่อประชากรจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น มากกว่าจากระบบน้ำบ่อสูบน้ำมือโยก ส่งผลให้มีการใช้น้ำไ้ดินเพื่ออุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้การเจาะบ่อเพื่อเกษตรกรรมขนาดย่อมจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการศึกษารายละเอียดศักยภาพน้ำไ้ดินของประเทศไทยในพื้นที่ต่างๆ และการศึกษาวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมน้ำไ้ดินจะทวีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการวางแผนพัฒนาและจัดการทรัพยากรน้ำไ้ดินของประเทศในอนาคต (http://www.pwa.co.th/document/performance_water.htm)

2.2 สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุประเภทโลหะ โดยธรรมชาติจะไม่อยู่ในรูปธาตุแต่จะถูกสกัดจากแร่ในรูปของ ZnO (<http://www.eco-usa.net/toxics/zinc.shtml>) สังกะสีมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกมา (<http://th.wikipedia.org/wiki/>) สังกะสีจะละลายปนอยู่ในน้ำในลักษณะของ Zn^{2+} , $ZnSO_4$ และ $ZnCl_2$ ในขณะที่เกิดการผุกร่อนของหิน สารประกอบเหล่านี้จะถูกพัดพาไปน้ำทั้งน้ำบนผิวโลกและน้ำไ้ดิน บางส่วนจะไปสู่ทะเลซึ่งสังกะสีที่อยู่ในทะเลจะอยู่ในลักษณะของ Zn^{2+} หรือ $ZnSO_4$ นี้จะเกิดการรวมตัวกับ Carbonate เกิดแร่ Smithsonite ขึ้น ส่วนในบริเวณทะเลลึกๆ ซึ่งมี S_2^- อยู่สูงก็จะเกิด ZnS นอกจากนี้แล้วปริมาณของสังกะสีจะมีอยู่ค่อนข้างสูงในบริเวณแหล่งฟอสเฟต ซึ่งมีต้นกำเนิดจาก Organic process ปริมาณของสังกะสีในน้ำทะเลเฉลี่ยประมาณ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจืดจะมีค่าประมาณ 1 – 200 ppb (<http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Zinc1/322.html>)

สังกะสีใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กชุบ โดยการไ้โลหะสังกะสีเป็นตัวเคลือบชุบเหล็กกล้า เช่น อุตสาหกรรมแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ข้อต่อท่อเหล็กชุบสังกะสี ลวดเหล็กชุบสังกะสี เป็นต้น ใช้ในอุตสาหกรรมทองเหลืองซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงทนต่อการผุกร่อน ใช้ขึ้นรูปหรือหล่อผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน ภาชนะและเครื่องประดับต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมโลหะสังกะสีผสม เช่น ผสมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ทำให้มีความแข็งแรงและทนต่อการผุกร่อนได้ดี นำมา

หล่อเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย และคงขนาดแม่นยำ จึงใช้มากในอุตสาหกรรมหล่อผลิตภัณฑ์ เช่น คาร์บูเรเตอร์ มือจับประตู บานพับประตู ของเด็กเล่น เป็นต้น ใช้ในอุตสาหกรรมสังกะสี ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของสังกะสีที่มีสภาพเป็นแข็งหรือผง ใช้ในอุตสาหกรรมยาง สี เซรามิก ยา เครื่องสำอาง และอาหารสัตว์ และใช้ในอุตสาหกรรมถ่านไฟฉาย (http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573)

2.3 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน (Transition) ที่พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ เป็นโลหะหนักที่มีความอ่อนตัว สามารถ ดัด รีด หรือตีได้ง่าย เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศ สีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา (<http://th.wikipedia.org/wiki/>) เชื้อต่อปฏิกิริยาเคมี ทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถนำมาผสมกับโลหะต่างๆ ได้หลายชนิด มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมโลหะบัดกรี โดยใช้ในรูปโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วในอัตราส่วนต่างๆ กัน โลหะบัดกรีใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้าหม้อน้ำรถยนต์ ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้โลหะตะกั่วในโรงชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสี ลูกแห่ลูกอวนที่ใช้ในอุตสาหกรรมประมง ใช้ในการทำกระดาษตะกั่ว ท่อน้ำ แผ่นตะกั่ว ตัวพิมพ์ กระสุนปืน สะพานไฟฟ้า ทำผนังกันรังสีในเครื่องหรือห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับปฏิกิริยาปริมาณ ใช้ตะกั่วในการทำสีและทำผงตะกั่วแดงตะกั่วเหลือง สำหรับเคลือบภาชนะต่างๆ (http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573)

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ โดยภาวะมลพิษดินที่มีสภาพเป็นกรดจะมีสารตะกั่วน้อยกว่าดินที่เป็นด่าง (<http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/monpit-a/lead.htm>) อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว และโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมการชุบโลหะ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจะใช้วิธีทางเคมีในการเปลี่ยนสารละลายของตะกั่วให้อยู่ในรูปของสารประกอบตะกั่วที่ไม่ละลายน้ำโดยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว หรือ โซดาไฟ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกในรูปของตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) และฟอสเฟสเพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกในรูปตะกั่วฟอสเฟส ($Pb_3(PO_4)_2$) นอกจากการตกผลึกทางเคมีแล้ว การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสามารถใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือสารประกอบเหล็ก การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) (กรมโรงงาน, 2548)

ตารางที่ 2-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค

(<http://www.waterindex.com/doc1-standard%20water%20in%20inderground%20p1.htm>)

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน		
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด	
ทางกายภาพ	1.สี (Colour)	ปลาตินัม-โคบอลต์	5	15	
	2.ความขุ่น(Turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20	
	3.ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	-	7.0-8.5	6.5-9.2	
ทางเคมี	4.เหล็ก (Fe)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.5	1.0	
	5.แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5	
	6.ทองแดง (Cu)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5	
	7.สังกะสี (Zn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 5.0	15.0	
	8.ซัลเฟต (SO ₄)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250	
	9.คลอไรด์ (Cl)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 250	600	
	10.ฟลูออไรด์ (F)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.7	1.0	
	11.ไนเตรด (NO ₃)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 45	45	
	12.ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 300	500	
	13.ความกระด้างถาวร	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250	
	14.ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 600	1,200	
	สารพิษ	15.สารหนู (As)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
		16.ไซยาไนด์ (CN)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.1
		17.ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
18.ปรอท (Hg)		มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.001	
19.แคดเมียม (Cd)		มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01	
20.ซีลีเนียม (Se)		มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01	
ทางแบคทีเรีย	21.แบคทีเรียที่ตรวจพบ โดยวิธีStandard plate count	โคโลนีต่อ ลบ.ซม.	ไม่เกินกว่า 500	-	
	22.แบคทีเรียที่ตรวจพบ โดยวิธีMost Probable Number (MPN)	เอ็ม.พี.เอ็น ต่อ 100 ลบ.ซม.	น้อยกว่า 2.2	-	
	23.อี. โคไล (E.coli)	-	ต้อง ไม่มีเลย	-	

ตารางที่ 2-2 เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค

(<http://www.waterindex.com/doc1-standard%20water%20parameter.htm>)

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพ น้ำดื่ม ของWHO (ปี 2527)	คุณภาพ น้ำบริโภค ในชนบท*	คุณภาพ น้ำประปา กรมอนามัย (ปี 2543)**
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5
สี (Color)	แพลตตินัม โคบอลท์	15	15	15
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	5	10	10
ปริมาณสารละลายทั้งหมดที่เหลือจากการระเหย (TDS)	mg/L (ppm)	1,000	1,000	1,000
ความกระด้าง (Hardness)	mg/L (ppm)	500	300	500
เหล็ก (Fe)	mg/L (ppm)	0.3	0.5	0.5
แมงกานีส (Mn)	mg/L (ppm)	0.1	0.3	0.3
ทองแดง (Cu)	mg/L (ppm)	1.0	1.0	1.0
สังกะสี (Zn)	mg/L (ppm)	5.0	5.0	3.0
ตะกั่ว (Pb)	mg/L (ppm)	0.05	0.05	0.03
โครเมียม (Cr)	mg/L (ppm)	0.05	0.05	0.05
แคดเมียม (Cd)	mg/L (ppm)	0.005	0.005	0.003
สารหนู (As)	mg/L (ppm)	0.05	0.05	0.01
ปรอท (Hg)	mg/L (ppm)	1.0	1.0	1.0
ซัลเฟต (SO ₄)	mg/L (ppm)	400	400	250
คลอไรด์ (Cl)	mg/L (ppm)	250	250	250
ไนเตรท (NO ₃ as N)	mg/L (ppm)	10	10	50
ฟลูออไรด์ (F)	mg/L (ppm)	1.5	1.0	0.7
คลอรีนอิสระตกค้าง (Residual Free Chlorine)	mg/L (ppm)	-	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5 ***
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total Coliform Bacteria)	mpm/100 ml	0	10	0
ฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Faecal coliform bacteria)	mpm/100 ml	0	0	0

* กำหนดโดยคณะกรรมการการบริหาร โครงการจัดให้มีน้ำสะอาดในชนบททั่วราชอาณาจักร

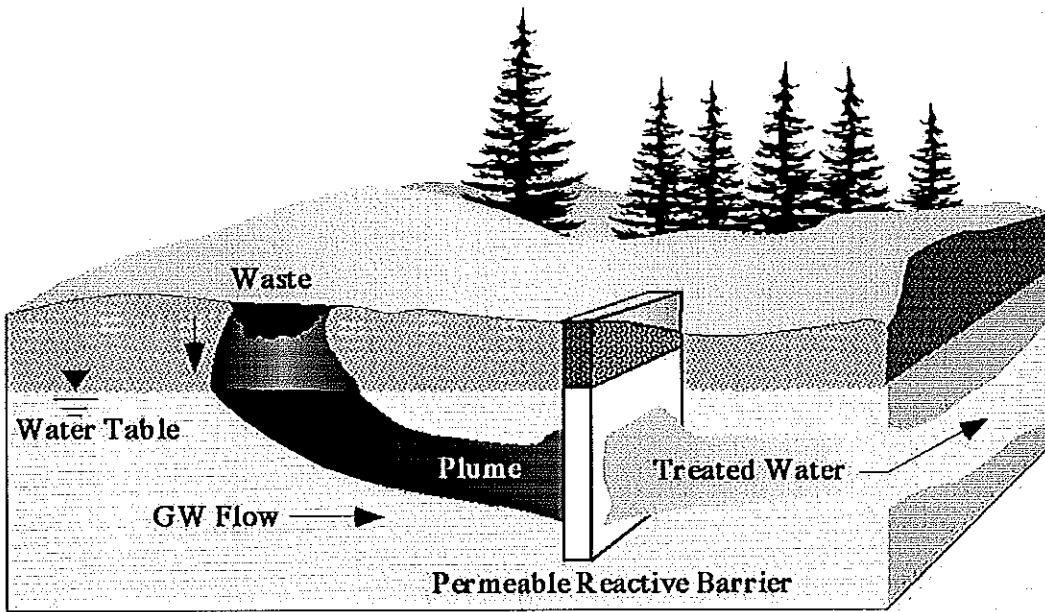
** ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปา ปี 2543

*** กำหนดให้มีปลายท่อ 0.2 - 0.5 mg/L ใช้ในระบบการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปา

2.4 เพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์

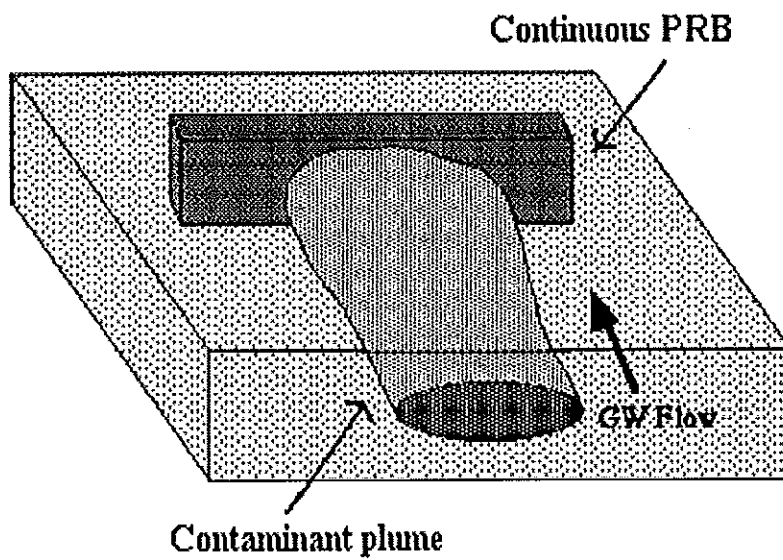
เพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ (Permeable Reactive Barriers) หรือพีอาร์บี (PRB) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เริ่มนิยมใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินในประเทศอเมริกา แคนาดา และยุโรป เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลกับสารปนเปื้อนหลายชนิด (Molfetta et al., 2006) ใช้กับชั้นน้ำใต้ดินที่เป็นชั้นให้น้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifers) มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดูแลบำรุงรักษาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่นิยมใช้ในอดีต เช่นเทคนิคสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาบำบัด (Pump and treat) โครงสร้างของ PRB ประกอบด้วยวัสดุ Reactive material ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้สารปนเปื้อนเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงหรือมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลงเมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านดั่งภาพประกอบที่ 2-1 PRB ที่ใช้บ่อยในภาคสนามได้แก่แบบ Continuous และแบบ Funnel-and-gate โครงสร้างของ PRB แบบ Continuous จะมีลักษณะเป็น Reactive zone ติดตั้งขวาง Contaminant plume (ภาพประกอบที่ 2-2) ในขณะที่ PRB แบบ Funnel-and-gate จะประกอบด้วย Permeable gate วางอยู่ระหว่างผนังสองด้านที่ป้องกันการซึมผ่าน โดย Plume ของการปนเปื้อนจะอยู่ระหว่าง Reactive barrier ดั่งภาพประกอบที่ 2-3 การเลือกระหว่าง 2 ทางเลือกนี้ขึ้นกับทั้งลักษณะธรณีวิทยาทางน้ำของแหล่งปนเปื้อนและราคาของ Reactive material ถ้าใช้ Reactive material ที่มีราคาสูงจะใช้กับโครงสร้างแบบ Funnel-and-gate เนื่องจากใช้วัสดุใน Reactive zone น้อย อย่างไรก็ตามถ้าใช้วัสดุที่มีราคาต่ำ เช่น Granular iron ควรเลือกใช้ตัวกันแบบ Continuous ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า (EPA/600/R-98/125, 1998)

ในการออกแบบ PRB ต้องมีความรู้เกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของแหล่งปนเปื้อน เช่น ข้อมูลทางธรณีวิทยา อัตราการไหลของน้ำและสมบัติของสารปนเปื้อน ประเด็นสำคัญที่ต้องตัดสินใจก่อนการติดตั้ง PRB คือ การเลือก Reactive material ที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุผสมก็ได้

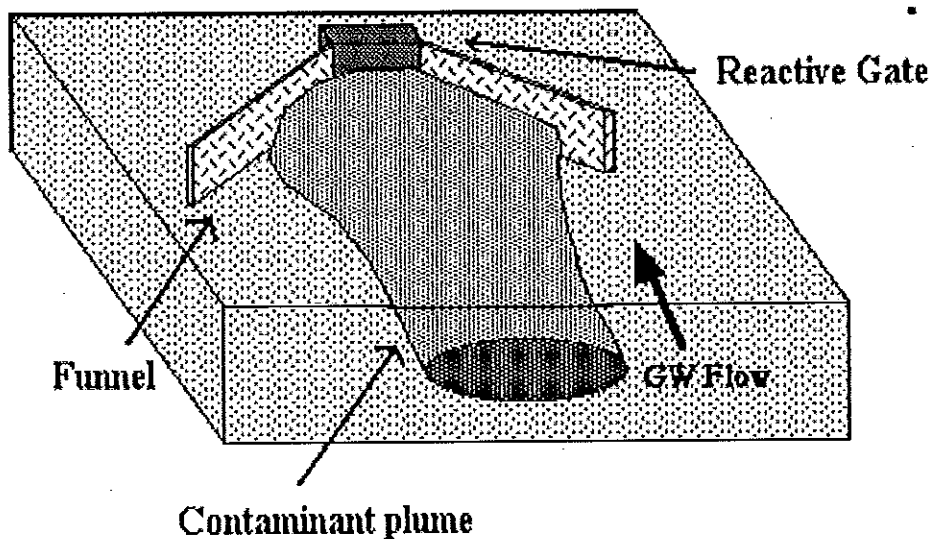


ภาพประกอบที่ 2-1 แผนภาพของการติดตั้งเพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์

(<http://livesite.newcastle.edu.au/cgmm/research/georemediation.page>)



ภาพประกอบที่ 2-2 เพอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ แบบ Continuous
(http://questor.qub.ac.uk/webpages/questortools/projects/I_BINDS/index.html)



ภาพประกอบที่ 2-3 เฟอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ แบบ Funnel-and-gate
 (http://questor.qub.ac.uk/webpages/questortools/projects/I_BINDS/index.html)

2.5 เกณฑ์การเลือกวัสดุสำหรับสร้างเฟอร์มีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์

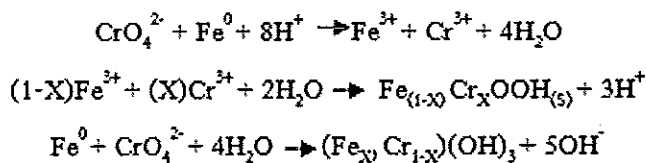
วัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (EPA/600/R-98/125, 1998)

- Reactivity คือการวัดสมรรถภาพของวัสดุ ซึ่งประเมินค่าโดย Residence time ที่ต้องการ หรือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา สิ่งที่ต้องการคือ Residence time ต่ำ และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงซึ่งความหนาของ Barrier ต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้
- Stability คือการวัดความ Active ของวัสดุเมื่อใช้ในระยะเวลาานาน เสถียรภาพการทำงานต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH อุณหภูมิ ความดัน และปัจจัยต่อต้านอื่นๆ
- Availability และ Cost คือต้องหาได้ง่าย มีปริมาณมากพอสำหรับโครงสร้างของ PRBs และมีราคาต่ำ
- Permeability จะต้องให้น้ำซึมผ่านได้
- Environmental compatibility ต้องไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนและไม่มีแหล่งของสารปนเปื้อนในตัว
- Safety การสัมผัสวัสดุต้องไม่ทำให้เกิดอันตรายกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

2.6 เหล็ก

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero-valent iron) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้ทำให้อมคุณสมบัติขึ้นหรือที่เรียกว่าเหล็กกล้า (วุฒิชัย, 2545) Zero-valent iron เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการจัดสร้าง PRB มากที่สุดเนื่องจากเป็นวัสดุ ราคาถูกที่หาซื้อได้ง่าย นอกจาก Granular zero-valent (elemental) iron ก็มีการใช้งานในรูปแบบอื่น เช่น Fe^{2+} ชุบด้วย Cu, Ni หรือ Pd เหล็กถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 3-3 (Junyapoon, 2005)

ตัวอย่างการใช้ Fe^0 ในการบำบัด Cr^{6+} (ในรูป CrO_4^{2-}) โดยการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน กลายเป็น Cr^{3+} (National Technical University of Athens, 2000) ดังนี้



2.7 ดินลูกรัง

ดินลูกรังจัดเป็น Skeletal soil ได้แก่ ดินที่มีเศษหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่าอยู่ในดินประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าโดยปริมาตรที่มีความลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตรจากผิวดิน เป็นได้ทั้งดินทราย ดินร่วนและดินเหนียว ดินลูกรังเป็นดินที่มีองค์ประกอบทางเคมีไม่เหมาะสมสำหรับการเกษตรกรรม เป็นดินต้น มีกรวด ลูกรังหรือเศษหินปะปนในระดับ ความลึกของบริเวณการเจริญของรากพืชทั่วไป เนื่องจากมีชั้นกรวดที่อัดตัวกันแน่น ทำให้เกิดความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นและการซึบซึมน้ำลดลง ในประเทศไทยมีดินลูกรังเป็นพื้นที่ประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ทั้งประเทศ ดินลูกรังเกิดจากการผุพังตามธรรมชาติของหินที่มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาสูง คือหินที่ประกอบด้วยแร่กลุ่มเฟลด์สปาร์ โปโอไทต์ และฮอร์เนเบลนด์ เช่น หินแกรนิต หินไนส์ หรือหินไรโอไลต์ ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเกิด ได้แก่ ภูมิประเทศที่มีความลาดเอียงปานกลางหรือต่ำ มีปริมาณน้ำฝนมากพอที่จะชะล้างเอาธาตุและอิออนอื่น ๆ ออกไป ดินลูกรังส่วนมากประกอบด้วย Secondary oxide of iron หรือ Aluminum

หรือทั้งสองอย่าง และมีซิลิกา แร่ควอทซ์ และแร่ Kaolinite มีลักษณะแข็ง มีสีของออกไซด์ คือ สีน้ำตาล สีแดง หรือสีน้ำตาลแดง โดยทั่วไปในดินลูกรังจะมีเหล็กอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 ยกเว้นบริเวณที่เป็นแหล่งแร่เหล็ก ซึ่งดินลูกรังรอบๆ อาจมีเหล็กสูงถึงร้อยละ 20-30 (คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำและการจัดการดิน, 2537)

2.8 ตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตมีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยสะสมไว้ที่บริเวณผิว และ/หรือภายในของเซลล์ องค์ประกอบที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นของโลหะในน้ำที่ทั้งส่วนประกอบและลักษณะเฉพาะของน้ำที่ทั้งและตะกอนจุลินทรีย์ การดูดซับของโลหะหนักบนผิวของตะกอนจุลินทรีย์มาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับหมู่ฟังก์ชัน เช่น คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิลและฟีนอลริกของ Extracellular polymeric substance (EPS) ซึ่งส่วนประกอบของตัวกลางมีความสำคัญต่อการเกิด EPS การเติมจุลินทรีย์ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่แตกต่างกันแสดงถึงการเปลี่ยนแปลง EPS ในขอบเขตของปริมาณโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์ ที่ C/N ต่ำ EPS คือ โปรตีน ในขณะที่ C/N สูง EPS คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อการดูดซับ (Yuncu et al., 2006)

Yuncu (2006) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของ C/N ต่อกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption mechanisms) ของโลหะหนัก 4 ชนิด คือ ทองแดง แคลเดียม สังกะสี และนิกเกิล โดยการทดลองใช้อัตราส่วน C/N เท่ากับ 9, 21 และ 43 พบว่ากระบวนการดูดซับโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การศึกษาไอโซเทอมพบว่าเมื่อ C/N เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับแคลเดียมเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงลดลง สำหรับสังกะสี ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดและต่ำสุดที่อัตราส่วน C/N เท่ากับ 21 และ 43 ตามลำดับ ส่วนนิกเกิลมีผลการทดลองกระจายจนไม่สามารถสรุปได้ และจากการศึกษากลไกการดูดซับพบว่า เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกลไกสำคัญไม่ใช่กลไกเดียวที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

ตารางที่ 2-3 สารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้ด้วย Zero-valent iron (Junyapoon, 2005)

Organic compounds		Inorganic compounds	
Methanes	Tetrachloromethane	Trace metals	Arsenic
	Trichloromethane		Cadmium
	Dichloromethane		Chromium
Ethanes	Hexachloroethane		Cobalt
	1,1,1-trichloroethane		Copper
	1,1,2-trichloroethane		Lead
	1,1-dichloroethane		Manganese
	1,2-dibromoethane		Nickel
Ethenes	Tetrachloroethene		Selenium
	Trichloroethene		Uranium
	<i>cis</i> -1,2-dichloroethene	Zinc	
	<i>trans</i> -1,2-dichloroethene	Anion contaminants	Nitrate
	1,1-dichloroethene		Phosphate
Vinyl chloride	Sulfate		
Propanes	1,2,3-trichloropropane		
	1,2-dichloropropane		
Aromatics	Benzene		
	Toluene		
	Ethylbenzene		
Others	Hexachlorobutadiene		
	Freon 113		
	<i>n</i> -nitrosodimethylamine		

2.9 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึง โมเลกุล หรือ คอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิว โดยทั่วไปมี 3 รูปแบบได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ ทางเคมี และการแลกเปลี่ยนประจุ (วุฒิชัย, 2545)

2.9.1 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล หรือที่เรียกกันว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ในที่นี้การดูดติดผิวของ โมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนผิวแต่จะ สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลายๆชั้นที่ผิวของ สารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพโดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นก็คือ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย

2.9.2 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดติดผิวทางเคมีเป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบ ทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่ง โมเลกุล และ โมเลกุลไม่สามารถ เคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้น โมเลกุลหนึ่งชั้นกำลังของสารดูดติด ผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับ ได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อน แก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะใช้กำจัด โมเลกุลของสารปนเปื้อน

2.9.3 การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption)

การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยนมักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (IonExchange) ก็รวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่า โมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนที่มี ประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ก็ยังมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้จะทราบว่า การดูดติดผิวมีรูปแบบที่สำคัญอยู่สามรูปแบบ แต่ก็เป็นการยากที่จะชี้เฉพาะเจาะจงลงไปว่า การดูดติดผิวของสารเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในสามรูปแบบนี้

2.9.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอม นิยมใช้มาอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วสารที่ถูกดูดซับ (sorbate) จะกระจายอยู่สองส่วน คือ ส่วนที่เหลืออยู่ในของไหล กับ ส่วนที่ถูกดูดเข้าไปในของแข็ง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม” (Isotherm)

สำหรับ ไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich ต่างกับ ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir ตรงสมมติฐานของความสัมพันธ์ ดังนี้

2.9.4.1 Langmuir adsorption isotherm

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวในตำแหน่งที่แน่นอน ไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (นัฐยา, 2545)

ข้อดีของการใช้สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์มาอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ ได้แก่ สมการแลงเมียร์เป็นสมการอย่างง่าย แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์ และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดคือ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอย่างอ่อนที่สามารถผันกลับได้ และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (โกวิทย์, 2551)

สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$q = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2)$$

โดย q = ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

q_m = ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

K_L = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Langmuir (L/mg)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e / q กับ C_e จะสามารถคำนวณค่า q_m และ K_L จากความชันเท่ากับ $1 / q_m$ และจุดตัดเท่ากับ $1 / K_L q_m$ ตามลำดับ (Langmuir, 1918)

2.9.4.2 Freundlich adsorption isotherm

ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้พลังงานของการดูดซับออกมาไม่คงที่ (พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวแบบเลขชี้กำลัง) และมีการรวมพื้นผิวที่ให้พลังงานการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน (โกวิทย์, 2551)

ข้อเสียของการใช้สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี (นัฐยา, 2545)

สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช ดังแสดงในสมการที่ 3

$$q = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

โดย K_F = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich ($\text{mg/g(L/mg)}^{1/n}$)

n = ค่าคงที่

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ จะสามารถคำนวณค่า n และ K_F จากความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดเท่ากับ $\log K_F$ ตามลำดับ (Weber et al., 1972)

2.10 การทดลองแบบแบทช์

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการที่โมเลกุลของของเหลวหรือแก๊สสัมผัสและเกาะติดกับพื้นผิวของของแข็ง โดยความสามารถในการดูดติดผิวจะขึ้นกับชนิดของวัสดุและสารละลายซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (นันทนิตย์, 2549)

ปริมาณไอออนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity, q) สามารถได้จากสมการที่ 5 (ชญากาศ, 2550)

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \quad (5)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg/L)

V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

W = ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ C_e สามารถหาได้ด้วยการนำค่า q และ C_e ไปพล็อตกราฟ โดยให้ q อยู่ในแกนตั้งและ C_e อยู่ในแกนนอน เรียกกราฟนี้ว่าไอโซเทอม (Isotherm) โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้กันได้แก่ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการที่ 1-2) และฟรุนด์ลิช (สมการที่ 3-4)

2.11 จลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับ ใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order

สมการ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (6)$$

อินทิเกรตสมการที่ 11 ที่สภาวะ $t=0$ ถึง $t>0$ ($q_t=0$ ถึง $q_t>0$) หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของ Pseudo-first order ดังสมการที่ 7

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (7)$$

โดย q_e = ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g) ที่เวลา t

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะสามารถคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo-first order (K_1) จากความชันของเส้นตรง (โกวิทย์, 2551)

สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 8

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 t} \quad (8)$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ 9

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (9)$$

อินทิเกรตสมการที่ 9 ที่เวลา $t=0$ ถึง t และ $q_t=0$ ถึง q_t ได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (10)$$

จัดรูปสมการที่ 10 ให้เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (11)$$

โดย k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชัน $1/q_e$ และสามารถคำนวณค่าคงที่ K_2 ได้จากจุดตัดแกนตั้ง (โกวิทย์, 2551)

2.12 การทดลองแบบสคัมภ์

2.12.1 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) (ธนิต, 2550)

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเป็นค่าที่มีผลโดยตรงกับการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบการพา ซึ่งการไหลซึมของของเหลวจะเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลและวัสดุที่ของไหลไหลผ่านด้วย

วิธีที่ทำให้เกิดการไหลของน้ำผ่านตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากการทำให้เกิดระดับน้ำที่แตกต่างกันระหว่างระดับน้ำที่ต้นน้ำ (ด้านที่น้ำไหลเข้า) และที่ท้ายน้ำ (ด้านที่น้ำไหลออก) ได้แก่ การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant head test), การทดสอบแบบค่าความดันน้ำแปรเปลี่ยน (Falling head test), การทดสอบแบบความดันต้นน้ำที่ลดลงและความดันท้ายน้ำที่เพิ่มขึ้น (Falling headwater-rising tailwater test), และการทดสอบแบบอัตราการไหลคงที่ (Constant rate of flow test) ในที่นี้จะขกกล่าวถึงการทดสอบแบบความดันคงที่ และการทดสอบแบบค่าความดันน้ำแปรเปลี่ยน

2.12.1.1 การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant head test)

เป็นการทดสอบที่เหมาะสมกับวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านค่อนข้างสูง เช่นทราย โดยในการทดสอบนั้นน้ำจะไหลผ่านตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราการไหลคงที่ เนื่องจากระดับน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำถูกกำหนดให้คงที่ สามารถทำการหาค่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้น โดยวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างในช่วงเวลาหนึ่งๆแล้วคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจากสมการที่ 12

$$K = \frac{Q}{\left(\frac{\Delta H}{L}\right)A} \quad (12)$$

เมื่อ

- Q = อัตราการไหล = $V_w/\Delta t$ (cm^3/s)
- V_w = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินในเวลา Δt
- ΔH = ความแตกต่างของความดันของน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำ (cm)
- L = ความสูงของ media (cm)
- A = พื้นที่หน้าตัดของ media (cm^2)

ข้อดีของการทดสอบแบบความดันคงที่คือ ความง่ายในการทดลอง ส่วนข้อเสียของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือ การเพิ่มความดันให้สูงไม่สามารถทำได้โดยง่าย ทำให้ไม่สามารถทดสอบกับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำได้ เช่น ดินเหนียว เนื่องจากต้องใช้เวลาาน

2.12.1.2 การทดสอบแบบค่าความดันแปรเปลี่ยน (Falling head test)

การทดสอบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ เช่น ดินเหนียว ในการทดสอบนั้นระดับน้ำที่ต้นน้ำจะลดลงเรื่อยๆ (ค่าความดันแปรเปลี่ยน) เมื่อน้ำไหลผ่านลงไป ในตัวอย่าง โดยค่าความดันที่ท้ายน้ำจะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ การหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านทำได้โดยการนำค่าความดันน้ำที่ต้นน้ำที่เวลาต่างๆกันไปแทนค่าในสมการที่ (13) โดยสมการนี้จะใช้ค่า Head ของน้ำสองค่าที่เวลาต่างกันสองเวลา

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln\left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}\right) \quad (13)$$

เมื่อ

- a = พื้นที่หน้าตัดของ standpipe
- ΔH_1 = ความแตกต่างของความดันของน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำที่เวลา t_1 (cm)
- ΔH_2 = ความแตกต่างของความดันของน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำที่เวลา t_2 (cm)
- Δt = $t_2 - t_1$

ข้อดีของการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยนคือ การติดตั้งและประกอบเครื่องมือทำได้โดยง่าย และที่ต้นน้ำสามารถใช้ปั๊มลมเพิ่มความดันได้ ทำให้สามารถทดสอบกับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำได้ ข้อเสียคือ เนื่องจากค่าความดันที่แปรเปลี่ยนอาจทำให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้

12.12.2 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column test)

การทดลองแบบสดมภ์เป็นการจำลองสถานการณ์การไหลของน้ำในภาคสนามให้มาไหลผ่าน Reactive media เพื่อทดสอบความสามารถในการบำบัดสารละลายปนเปื้อนไอออนของโลหะหนัก ซึ่งจะต้องมีการนำ Reactive media มาทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) เสียก่อนเพื่อให้ทราบสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองแบบสดมภ์

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บริษัท DuPont ได้พัฒนา PRB สำหรับบำบัดน้ำใต้ดินปนเปื้อนโลหะโดยเน้นที่แบเรียมและสังกะสีซึ่งเกิดจากการฝังกลบขยะจากกระบวนการผลิตเม็ดสี Lithopone ($\text{BaSO}_4 \cdot \text{ZnS}$) ที่ Newport, Delaware Superfund site ซึ่งจากกระบวนการสามารถลดค่าใช้จ่ายจากเดิม \$17,000,000 เหลือเพียง \$5,000,000 โดยศึกษาศักยภาพวัสดุสำหรับสร้าง PRB โดยการทดลองแบบแบตช์ วัสดุที่ศึกษาได้แก่ Zero-valent iron, Iron sulfide, Steel-process mill scale และ Steel slag พบว่าการใช้ Zero-valent iron ให้ผลดีที่สุดโดยสามารถลดสังกะสีจาก 1,000 ppb เหลือน้อยกว่า 10 ppb (มาตรฐานคือ 120 ppb) แต่ไม่สามารถลดปริมาณแมงกานีสได้ และในบางครั้งปริมาณของแมงกานีสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าการเติม MgCO_3 สามารถช่วยลดปริมาณแมงกานีสได้ โดยสรุปทางบริษัทเลือกใช้วัสดุซึ่งเป็นส่วนผสมของ ทราาย:ยิปซัม:เหล็ก: MgCO_3 ในสัดส่วน 100:20:5:5 (Wilkens et al., 2000)

Maji et al. (2008) ศึกษาการกำจัดสารหนูจากจากน้ำใต้ดินโดยการดูดซับบนดินลูกรัง โดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์และแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูในตัวอย่างทดลองคือ 0.33 ppm สภาวะที่ดีที่สุดซึ่งดินลูกรังสามารถกำจัดสารหนูได้ถึง 98% คือใช้ดินลูกรัง 20 g/L เวลาที่เข้าสู่สมดุลคือ 30 นาที จลนพลศาสตร์ของการกำจัดสารหนูโดยดินลูกรังเป็นแบบ Pseudo-second-order reaction ในการศึกษาแบบสดมภ์จะใช้อัตราการไหลที่ $1.49 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ ความสูงของคอลัมน์ 10 cm ค่า Breakthrough และ Exhaust time เป็น 6.75 ชั่วโมงและ 19.0 ชั่วโมงตามลำดับ ความสูงของ Adsorption zone เป็น 9.85 cm สามารถใช้ NaOH (1 M) ในการ Regenerate ตัวดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Munro et al. (2004) แนะนำการใช้ BauxsolTM ซึ่งได้จาก Seawater-neutralized red mud เป็นวัสดุสำหรับ PRB โดยสามารถกำจัดโลหะหนักที่ภาระบรรทุกมากกว่า 1000 meq/kg ได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ BauxsolTM มีองค์ประกอบของ hematite, boehmite, gibbsite, sodalite, quartz, cancrinite, brucite, calcite, diaspore, ferrihydrite, gypsum, hydrocalumite, hydrotalcite, p-aluminohydrocalcite, portlandite, minor aragonite และเกลือแร่อื่นๆ เล็กน้อย แต่ BauxsolTM มีค่า Hydraulic conductivity ต่ำ แต่ถ้าผสมกับทรายก็จะช่วยให้ค่า Hydraulic conductivity สูงขึ้น จึงเลือกใช้สัดส่วน ทราย: BauxsolTM เป็น 75: 25 ทำการทดลองแบบสดมภ์โดยบรรจุวัสดุสูง 130 mm ได้ค่า Hydraulic conductivity $3.06 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

ชญาภาส (2550) ศึกษาการใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับไอออนสังกะสี โดยศึกษาตะกอน 3 ชนิด 2 ชนิดแรก คือ Activated Sludge (AS-P) และ Methane Upflow Reactor (MUR-P)

ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ Cyclic Activated Sludge System (CASS-N) ได้จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จะนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C บดและแยกขนาดให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 106-150 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีสูงถึง 97-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า K_F ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 214, 184 และ 205 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ

วรรณิและคณะ (2540) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวัสดุชีวมวลจากโรงงานผลิตอาหารด้วยวิธีการดูดซับ ซึ่งโลหะที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สังกะสี, นิกเกิล, ตะกั่ว และแคดเมียม นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการนำกลับมาดูดซับโลหะหนักใหม่ของวัสดุชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าวัสดุชีวมวลที่มีลักษณะเป็นผงมีความสามารถในการกำจัดโลหะต่างๆ ตามลำดับดังนี้คือ สังกะสี > ตะกั่ว > นิกเกิล > แคดเมียม โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้สูงถึง 20.24 มิลลิกรัมของโลหะสังกะสีต่อกรัมของวัสดุชีวมวล และสำหรับวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดมีความสามารถในการดูดซับโลหะต่างๆ ตามลำดับดังนี้คือตะกั่ว > สังกะสี > นิกเกิล > แคดเมียม โดยดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 16.21 มิลลิกรัมของโลหะตะกั่วต่อกรัมของวัสดุชีวมวล นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดขนาดแตกต่างกัน มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไม่เท่ากัน โดยพบว่าวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดซึ่งมีขนาดเล็กสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าขนาดใหญ่ และจากการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ด โดยการชะด้วย 0.6 N ของกรดไฮโดรคลอริก จะเห็นได้ว่าหลังจากที่วัสดุชีวมวลถูกชะแล้วสามารถดูดซับโลหะหนักได้เช่นเดิม โดยมีประสิทธิภาพการชะล้างสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์

วุฒิชัย (2545) ศึกษาการกำจัด เฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก โดยได้ทำการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบแบดจ์จะใช้ในการศึกษาผลของพีเอช ผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล จากผลการทดลองพบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ ส่วนการดูดซับของนิกเกิลบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากการกักร่อนของผงตะไบเหล็กเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชสูง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลคือ พีเอช 6 โดย

สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ผงตะไบเหล็ก 1 กรัมเหล็กต่อลิตรน้ำเสียได้ 100% และ 49% ตามลำดับ ถ้าเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลสูงขึ้น ในขณะที่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลต่ำลง การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ในการศึกษาผลของอัตราส่วน โดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทรายที่ 8/8, 10/8 และ 12/8 (กรัมเหล็ก/กรัมทราย) และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลที่ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน โดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย 8/8, 10/8 และ 12/8 (กรัมเหล็ก/กรัมทราย) ที่ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลได้ลดลงคือ 14.6 9.5 และ 5.3 (มิลลิกรัมนิกเกิล/กรัมผงตะไบเหล็ก) 22.1 13.1 และ 7.9 (มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนท์โครเมียม/กรัมผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน โดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย 8/8 (กรัมเหล็ก/กรัมทราย) ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลได้เพิ่มขึ้นคือ 6.8 10.0 และ 14.6 (มิลลิกรัมนิกเกิล/กรัมผงตะไบเหล็ก) 10.5 17.5 และ 22.1 (มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนท์โครเมียม/กรัมผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ

ภูมิทัศน์และคณะ (2550) ศึกษาการดูดซับไอออนโพแทสเซียม และสังกะสีโดยใช้ถ้ำแกลบ โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผา ขนาดของถ้ำแกลบ pH ของสารละลาย และอุณหภูมิของสารละลาย พบว่าถ้ำแกลบสามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้ดีที่สุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีขนาดเล็กกว่า 180 ไมโครเมตร ในสารละลาย pH เท่ากับ 6.5 และมีอุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส สำหรับไอออนโพแทสเซียมพบว่าถ้ำแกลบไม่สามารถดูดซับได้นอกจากนั้นยังพบว่าการปล่อยไอออนโพแทสเซียมออกสู่สารละลาย 1.15 มิลลิกรัมต่อกรัม แกลบมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดอะซิติกและโซเดียม-คลอไรด์ และมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัสดุคืบ

3.1.1.1 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากที่ได้จากบ่อน้ำบาดน้ำเสียของบริษัทแมนเอ ไฟรล เซนฟูคส์ จำกัด ดังภาพประกอบที่ 3-1 และ 3-2

3.1.1.2 ดินตุร้งได้จากดินบริเวณเชิงเขาทองส ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ดังภาพประกอบที่ 3-3

3.1.1.3 ผงตะไบเหล็กจากร้านกลิ้งเหล็ก ดังภาพประกอบที่ 3-4

3.1.1.4 น้ำกลั่น



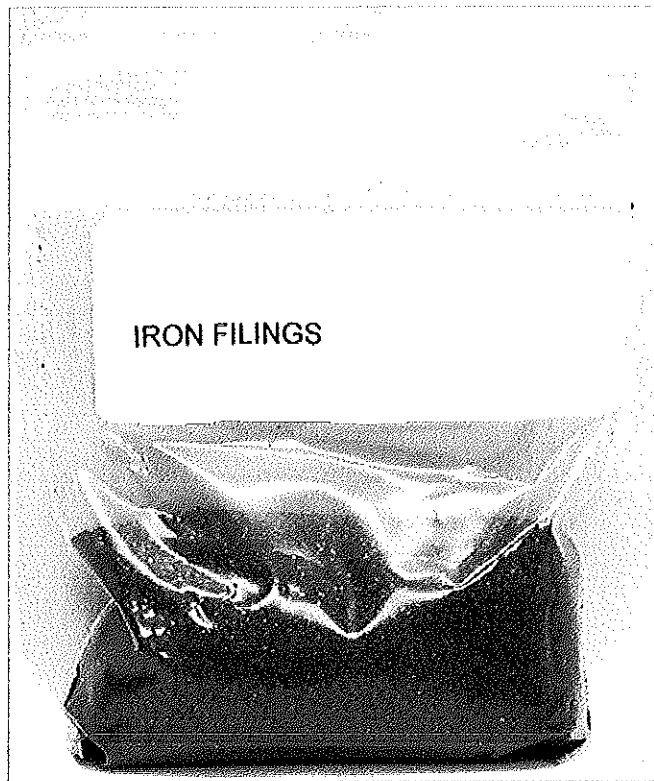
ภาพประกอบที่ 3-1 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย



ภาพประกอบที่ 3-2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ทำความสะอาดแล้ว



ภาพประกอบที่ 3-3 ดินลูกรัง



ภาพประกอบที่ 3-4 ผงตะไบเหล็ก

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
- 3.1.2.2 ตะกั่วคลอไรด์ ($PbCl_2$)
- 3.1.2.3 กรดไนตริก (HNO_3)
- 3.1.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคูลซึบ
 - 3.2.1.1 ตู้อบไปฟ้า (Memmert 600)
 - 3.2.1.2 ตะแกรงร้อนเบอร์ 10
 - 3.2.1.3 โถดูดความชื้น
 - 3.2.1.4 เครื่อง BET Surface Area Analyzer (SA3100)

3.2.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองแบบเบบท์

3.2.2.1 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 3 ตำแหน่ง (NETTLER TOLEDO)

3.2.2.2 เครื่องเขย่า (Memmert 400)

3.2.2.3 เครื่องช่วยเขย่า (VORTEX GENIE 2)

3.2.2.3 เครื่องวัดพีเอช

3.2.2.4 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS, PERKIN ELMER Analyst 100)

3.2.3 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบสคัมภ์

3.2.3.1 ชุดทดลองหาค่า Hydraulic conductivity แบบ Constant Head ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประกอบด้วย

- ครอบกวดสอบการซึมผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.55 เซนติเมตร สูง 24 เซนติเมตร เจาะรูด้านข้าง 2 รู ระยะห่าง 10.24 เซนติเมตร สำหรับต่อเข้ากับสายยางจากหลอดวัดระดับน้ำ
- ฐานด้านบนของครอบกวด ทำจากแผ่นสแตนเลส เจาะรู 3 รู เพื่อยึดกับตัวครอบกวดสอบ เจาะ 2 รู สำหรับใส่สกรูใส่อากาศ และหัววาล์ว
- นี้อดบีค 3 ตัว
- กระดาษกรองและ Porous Stone 2 แผ่น
- สายยางและหลอดวัดระดับน้ำ 2 หลอด

3.2.3.2 ชุดทดลองหาค่า Hydraulic conductivity แบบ Falling Head ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประกอบด้วย

- คอลัมน์สแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.29 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น โดยชั้นแรกมีความสูงประมาณ 11.62 เซนติเมตร สำหรับใส่วัสดุทดสอบ ชั้นที่สองมีความสูง 5.5 เซนติเมตร สำหรับใส่สารละลาย
- ฐานด้านล่างและบนของคอลัมน์ทำจากแผ่นสแตนเลสที่เจาะรูทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นที่อยู่ด้านล่างเจาะตรงกลางเพื่อใส่หางปลาทองเหลือง 1 ตัว เพื่อให้ น้ำเข้าหรือออก และแผ่นที่เป็นฐานด้านบนเจาะ 2 รู สำหรับใส่หัววาล์วทองเหลืองและหางปลาทองเหลือง
- แท่งเหล็กสำหรับ ยึด 4 อัน พร้อมนี้อดบีค 8 ตัว

- O – ring 2 อัน
- เยื่อกรอง (Geotextile) 1 แผ่น
- สายยางและท่อแก้ว Standpipe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 เซนติเมตร ยาวประมาณ 220 เซนติเมตร

3.2.3.3 ชุดทดลองแบบสคัมภ์ (Column Test)

- กอลัมน์อะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร
- ฐานด้านล่างและบนของคอลัมน์ทำจากอะคริลิกใสที่เจาะรูทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น โดยเจาะตรงกลางเพื่อใส่หางปลาทองเหลืองด้านละ 1 ตัวเพื่อให้น้ำเข้าหรือออก
- แท่งเหล็กสำหรับ ยึด 4 อัน พร้อมน็อตยึด 12 ตัว
- O – ring 2 อัน
- เยื่อกรอง (Geotextile) 2 แผ่น
- สายยางซิลิโคน
- Peristaltic pump

3.2.3.4 นาฬิกาจับเวลา

3.2.3.5 กระบอกดวงขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.3.5 บีเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร

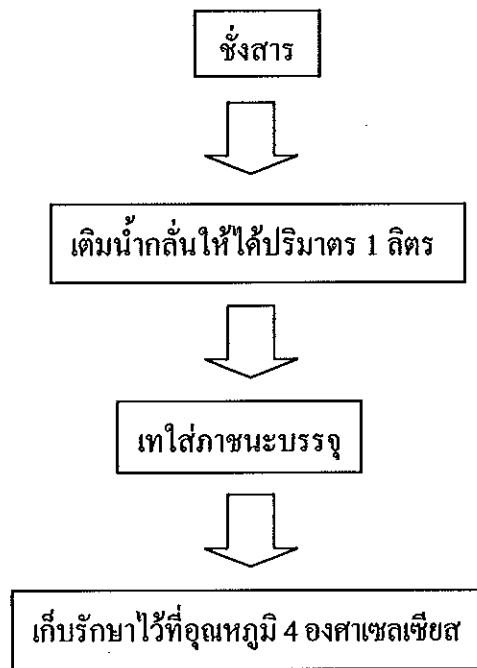
3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์

เตรียมสารละลายของน้ำปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของสังกะสีและตะกั่ว โดยละลายสังกะสีและตะกั่วที่อยู่ในรูป $ZnCl_2$ และ $PbCl_2$ ในน้ำกลั่น สารละลายดังกล่าวจะถูกเก็บรักษาไว้ในที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ (ภาพประกอบที่ 3-5)

น้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ประเภท ได้แก่

- น้ำปนเปื้อนสังกะสี
- น้ำปนเปื้อนตะกั่ว
- น้ำปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว



ภาพประกอบที่ 3-5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

3.3.2 การเตรียมวัสดุปลูก

3.3.2.1 การเตรียมดินปลูก

3.3.2.1.1 นำดินสำหรับเป็นตัวอย่างทดลองไปอบในตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.1.2 นำดินที่ผ่านการอบแล้วมาร้อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4

3.3.2.1.3 ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปเก็บไว้ในโถสุกความชื้นเพื่อใช้ในการทดลอง

3.3.2.2 การเตรียมตะกอนจุลินทรีย์

3.3.2.2.1 นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากบ่อบำบัดน้ำเสียมาล้างด้วยน้ำกลั่น โดยนำมาเขย่าล้างด้วยความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3.2.2.2 นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3.3.2.2.3 แยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน ให้ได้อนุภาคที่มีขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร

3.3.2.2.4 นำไปเก็บไว้ในโถสุกความชื้นเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกในการทดลอง

3.3.2.3 การเตรียมผงตะไบเหล็ก

3.3.2.3.2 นำผงตะไบเหล็ก ไปอบในตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.1.2 แยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน ให้ได้อนุภาคที่มีขนาด 1.00-1.76 มิลลิเมตร (ตะแกรงร่อนเบอร์ 10-16)

3.3.2.1.3 นำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

3.3.2.4 การเตรียมทราย

3.3.2.4.1 นำทรายสำหรับเป็นตัวอย่างทดลองไปอบในตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.4.2 นำทรายที่ผ่านการอบแล้วมาร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 10

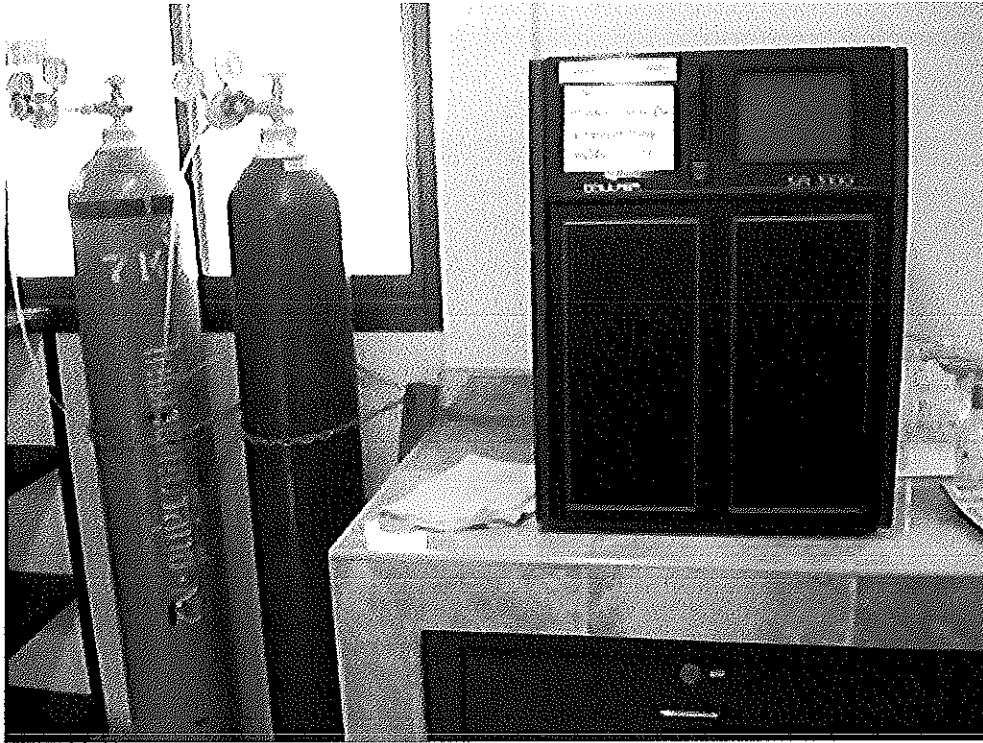
3.3.2.4.3 นำทรายที่ล้างตะแกรงเบอร์ 10 ไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

3.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

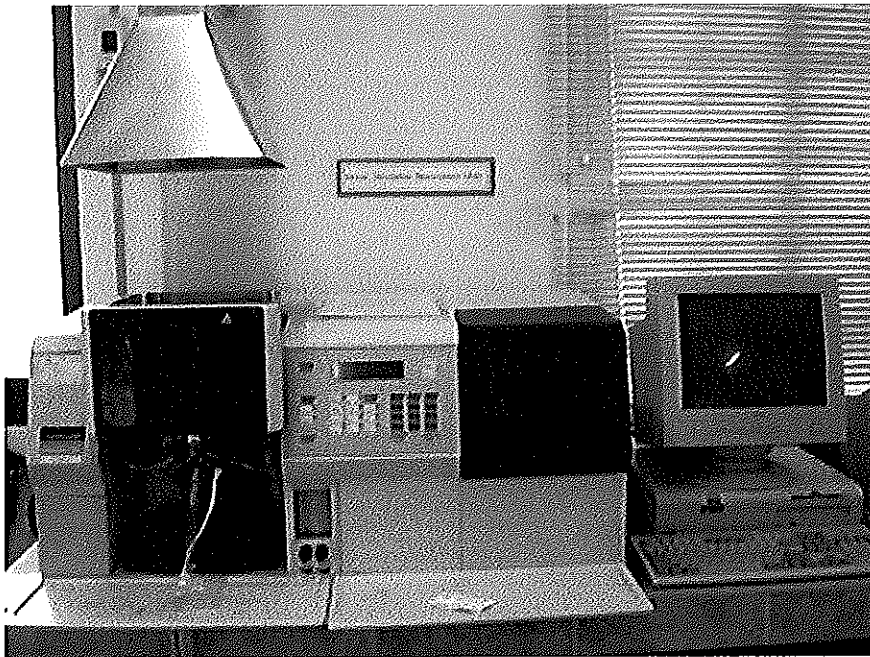
ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ 4 ชนิด ได้แก่ ผงตะไบเหล็ก คินลูกรัง และตะกอนจุลินทรีย์ คุณสมบัติที่สนใจ ได้แก่

3.3.3.1 พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET Surface Area ซึ่งใช้หลักการ Nitrogen adsorption โดยวิธีของ Brunauer – Emmet - Teller (BET) (ภาพประกอบที่ 3-6)

3.3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในวัสดุก่อนการบำบัด (EPA/600/R-98/125, 1998) โดยนำวัสดุมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (ภาพประกอบที่ 3-7) โดยก่อนฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ ต้องเขย่าให้ตัวอย่างเข้ากันดีเพื่อให้ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนอยู่กระจายอย่างทั่วถึงกันด้วยเครื่อง Vortex Mixer (ภาพประกอบที่ 3-8)



ภาพประกอบที่ 3-6 เครื่อง Nitrogen adsorption



ภาพประกอบที่ 3-7 Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)



ภาพประกอบที่ 3-8 เครื่องช่วยเขย่า

การทดลองแบบเบตซ์

3.3.4 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลย์ (Equilibrium time)

ทดลองหาเวลาเข้าสู่สมดุลของการบำบัดน้ำปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วสังเคราะห์โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ชนิด ค้างชั้นตอนต่อไปนี

3.3.4.1 เตรียมสารละลายปนเปื้อนสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 1 ลิตร

3.3.4.2 ปรับพีเอชเป็น 6 ในตอนเริ่มบำบัด ด้วยกรดไนตริกหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่จะไม่มี การควบคุมพีเอชระหว่างการบำบัด

3.3.4.3 นำวัสดุดูดซับปริมาณ 16 กรัมใส่ในตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้

3.3.4.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมงจนถึงสิ้นสุดที่เวลา 24 ชั่วโมง

3.3.4.5 นำสารละลายไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C

3.3.4.6 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง AAS โดยก่อนฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ ต้องเขย่าให้ตัวอย่างเข้ากันดีเพื่อให้ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนอยู่กระจายอย่างทั่วถึงกันด้วยเครื่อง Vortex Mixer

3.3.4.7 ทำการทดลองตามขั้นตอนดังกล่าว 3 ซ้ำสำหรับวัสดุแต่ละชนิด

3.3.4.8 ทำการทดลองตามขั้นตอน 3.4.1 ถึง 3.4.6 โดยเปลี่ยนเป็นน้ำปนเปื้อนไอออนของตะกั่ว

ผลจากการทดลองที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับของแต่ละวัสดุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารปนเปื้อนของวัสดุดูดซับกับเวลา

3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุโดยการทดลองแบบแบทช์

ทำการทดลองแบบแบทช์โดยใช้ Reactive media 6 ประเภทดังนี้

- ผงตะไบเหล็ก
- ตะกอนจุลินทรีย์
- ดินลูกรัง
- ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก
- ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก
- ดินลูกรังผสมผงตะไบเหล็กและตะกอนจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก

3.3.5.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

ทำการทดลองแบบแบทช์โดยใช้ Reactive media 6 ประเภท เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป สภาวะที่ศึกษาคงแสดงในตารางที่ 2-1

3.3.5.1.1 เตรียมสารละลายปนเปื้อนสังกะสี ความเข้มข้น 5, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 300 มิลลิลิตร

3.3.5.1.2 ปรับพีเอชเป็น 6 ด้วยเครื่องวัด (ภาพประกอบที่ 3-9) ในตอนเริ่มบำบัด ด้วยกรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.5.1.3 นำวัสดุดูดซับปริมาณ 8 กรัมใส่ในน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้

3.3.5.1.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (ภาพประกอบที่ 3-10) ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลา 24 ชั่วโมง (เวลาสมดุล)

3.3.5.1.5 นำสารละลายไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C

3.3.5.1.6 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง AAS โดยก่อนฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ ต้องเขย่าให้ตัวอย่างเข้ากันดีเพื่อให้ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนอยู่กระจายอย่างทั่วถึงกันด้วยเครื่อง Vortex Mixer

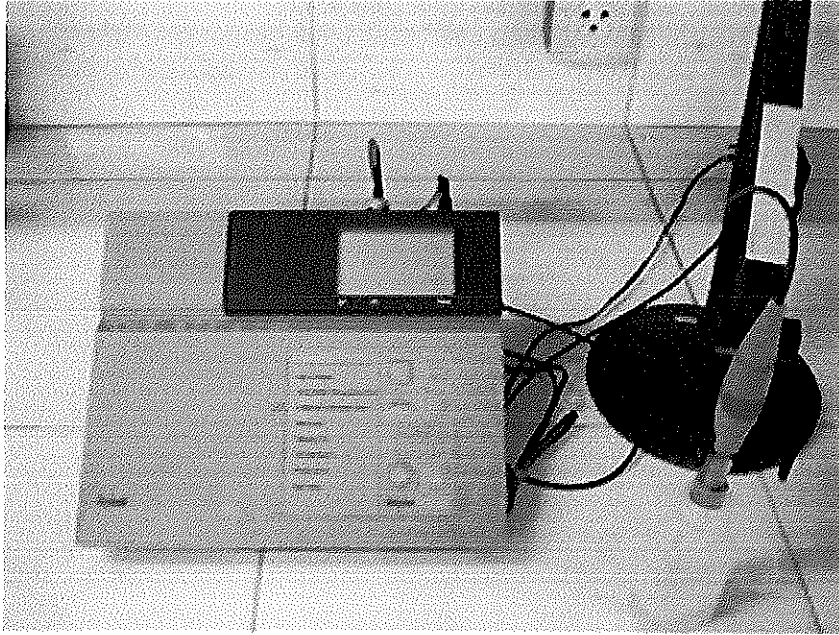
3.3.5.1.7 ทำการทดลองตามขั้นตอนดังกล่าว 3 ชั่วโมงหนึ่งความเข้มข้นสำหรับวัสดุดูดซับแต่ละชนิด

3.3.5.1.8 ทำการทดลองตามขั้นตอน 3.3.5.1.1 ถึง 3.3.5.1.7 โดยเปลี่ยนเป็นน้ำปนเปื้อนไอออนของตะกั่ว และ น้ำปนเปื้อนไอออนของสังกะสีและตะกั่ว

ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปหาปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ จากนั้นนำค่าที่ได้ศึกษา Adsorption Isotherm เพื่อพิจารณาสมการที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองผลของความเข้มข้น

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นของสังกะสี	5, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นของตะกั่ว	5, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
3. ความเข้มข้นของสารละลายผสม	5, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเร็วรอบของการเขย่า	160 รอบ/นาที
2. ปริมาณของวัสดุดูดซับ	8 กรัม
3. ขนาดของวัสดุดูดซับ	1.0 - 1.76 มิลลิเมตร
4. พีเอช	6
ตัวแปรตาม	
1. ความเข้มข้นของสังกะสีหลังการบำบัด	
2. ความเข้มข้นของตะกั่วหลังการบำบัด	



ภาพประกอบที่ 3-9 เครื่องวัดพีเอช



ภาพประกอบที่ 3-10 เครื่องเขย่า

3.3.5.2 ศึกษา Adsorption Isotherm

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ C_e สามารถหาได้โดยการนำค่า q และ C_e ไปพล็อตกราฟ โดยให้ q อยู่ในแกนตั้งและ C_e อยู่ในแกนนอน เรียกกราฟนี้ว่าไอโซเทอม (Isotherm) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในตอน 3.4 จะถูกนำไปพื้ต่กับสมการ ไอโซเทอมของการดูดซับ โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้กันได้แก่ ไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ ไอออนสังกะสีและตะกั่วของวัสดุดูดซับทั้ง 6 ชนิด โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในการบ่งบอกสมการที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า

3.3.5.3 ศึกษาผลของพีเอช

จากการศึกษา Adsorption Isotherm จะทราบว่าวัสดุประเภทใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดด้วยวัสดุประเภทนั้น ช่วงค่าพีเอชที่สนใจอยู่ในช่วง 4-8 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.5.3.1 เตรียมสารละลายปนเปื้อนสังกะสี ความเข้มข้น 5, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 300 มิลลิลิตร

3.3.5.3.2 ปรับพีเอชเป็น 4 ในตอนเริ่มบำบัด ด้วยกรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.5.3.3 นำวัสดุดูดซับปริมาณ 8 กรัมใส่น้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้

3.3.5.3.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลา 24 ชั่วโมง

3.3.5.3.5 นำไปกรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C

3.3.5.3.6 นำไปวิเคราะห์หาปริมาณ ไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง AAS โดยก่อนฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ ต้องเขย่าให้ตัวอย่างเข้ากันดีเพื่อให้ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนอยู่กระจายอย่างทั่วถึงกันด้วยเครื่อง Vortex Mixer

3.3.5.3.7 ทำการทดลองตามขั้นตอนดังกล่าว 3 ซ้ำต่อหนึ่งความเข้มข้น

3.3.5.3.8 เปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 5, 7 และ 8

3.3.5.3.9 ทำการทดลองตามขั้นตอน 3.3.5.1.1 ถึง 3.3.5.1.8 โดยเปลี่ยนเป็นสารละลายปนเปื้อน ไอออนของตะกั่ว และ สารละลายปนเปื้อน ไอออนของสังกะสีและตะกั่ว

ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปหาปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ จากนั้นนำค่าที่ได้ของพีเอชต่างๆ ไปเปรียบเทียบโดย Adsorption Isotherm ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองผลของพีเอช

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นของสังกะสี	5, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นของตะกั่ว	5, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
3. พีเอช	4, 5, 7 และ 8
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเร็วรอบของการเขย่า	160 รอบ/นาที
2. ปริมาณของวัสดุดูดซับ	8 กรัม
3. ขนาดของวัสดุดูดซับ	1.00-1.76 มิลลิเมตร
ตัวแปรตาม	
1. ความเข้มข้นของสังกะสีหลังการบำบัด	
2. ความเข้มข้นของตะกั่วหลังการบำบัด	

การทดลองแบบแบบสดมภ์

3.3.6 การหาค่า Hydraulic conductivity

ในการสร้าง PRB นอกจากประสิทธิภาพในการบำบัดแล้ว ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยส่วนใหญ่โครงสร้างของ PRB จึงประกอบด้วยทรายเพื่อให้มีการซึมผ่านที่ดี ในการทดลองนี้ทำการหาค่า K ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด

สำหรับค่า K ของ ผงตะไบเหล็ก ตะกอนจุลินทรีย์ และทราย ศึกษาโดยการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Constant Head) ส่วนดินลูกรังศึกษาโดยการทดสอบด้วยวิธี Falling Head

3.3.6.1 การทดลองหาค่า K แบบ Constant Head (ภาพประกอบที่ 3-11)

3.3.6.1.1 วางกระดาดกรองและ Porous Stone ที่กั้นกระบอกทดสอบ

3.3.6.1.2 บรรจุตัวอย่างจนถึงระดับปากกระบอก

3.3.6.1.3 ปิดทับด้วยกระดาดกรองอีก 1 แผ่น และยึดด้วยน็อต 3 ตัว

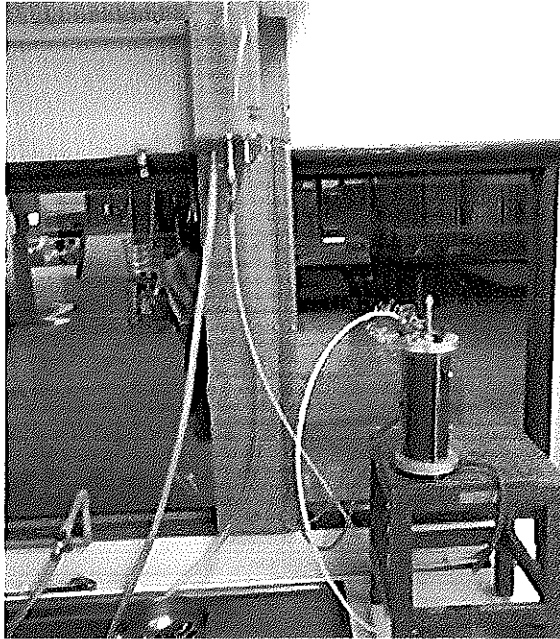
3.3.6.1.4 คำนวณหาหน้าผกดินในกระบอกทดสอบ

3.3.6.1.5 ต่อสายยางจากหลอดวัดระดับน้ำ เข้าทางด้านข้างกระบอกทดสอบ

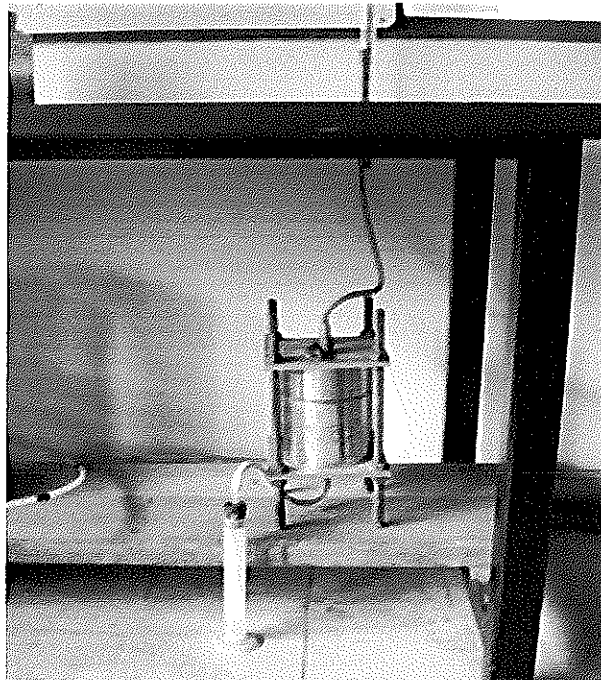
3.3.6.1.6 ต่อสายยาง Latex อีกเส้นหนึ่งที่ฐานกระบอกทดสอบด้านล่างสำหรับรองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินเข้าสู่ภาชนะรองรับ

- 3.3.6.1.7 เปิดน้ำไล่อากาศและให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำก่อนการทดสอบ โดยการไหลของน้ำให้เป็นการไหลแบบต่อเนื่อง และ คงที่
- 3.3.6.1.8 จดบันทึกปริมาณน้ำที่ล้น เวลาที่ผ่านไป และผลต่างระหว่างหลอดระดับน้ำทั้งสอง
- 3.3.6.1.9 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า K ตามสมการที่ 6
- 3.3.6.2 การทดลองหาค่า K แบบ Falling Head (ภาพประกอบที่ 3-12)
- 3.3.6.2.1 ยึดฐานสแตนเลสกับเสาเหล็กทั้ง 4 มุมด้วยน็อตยึด
- 3.3.6.2.2 วาง O – ring 1 อัน บนฐานสแตนเลสที่กรึงแล้ว จากนั้นวาง (Geotextile) 1 แผ่น
- 3.3.6.2.3 วางคอลัมน์สำหรับใส่ตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างบรรจุลงไปให้เต็มแบบไม่ต้องบดอัด
- 3.3.6.2.4 วางคอลัมน์เปล่าสำหรับใส่สารละลายไว้ด้านบนแล้วจึงวาง O – ring อีก 1 ชั้นบนปากคอลัมน์ด้านบน
- 3.3.6.2.5 วางฐานปิดด้านบนยึดด้วยน็อต 4 ตัว
- 3.3.6.2.6 ต่อปลายสายยาง Latex ด้านหนึ่งเข้ากับหางปลาทองเหลืองที่ฐานด้านบน และปลายสายยางอีกด้านเข้ากับท่อ Standpipe ด้านล่างตามลำดับ
- 3.3.6.2.7 ต่อสายยาง Latex อีกเส้นหนึ่งของฐาน Mode ด้านล่างสำหรับรองรับน้ำที่ไหล ออกจากตัวอย่างดินเข้าสู่ภาชนะรองรับ (กระบอกตวง)
- 3.3.6.2.8 ใส่น้ำกลั่นให้เต็มปริมาตรของคอลัมน์เปล่า จากนั้นปิดวาล์วหางปลาทองเหลืองแล้วเติมน้ำกลั่นจากปลายท่อ Standpipe ด้านบนให้เห็นระดับความสูงของน้ำในท่อ Standpipe
- 3.3.6.2.9 เติมน้ำกลั่นจนตัวอย่างดินอิมตัวด้วยน้ำก่อนการทดลอง
- 3.3.6.2.10 อ่านค่าระดับความสูงของน้ำบน Standpipe และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน แล้วนำข้อมูลไปคำนวณหาค่า K ตามสมการที่ 7

สำหรับการทดลองทุกสภาวะในงานวิจัยนี้จะทำซ้ำ 3 ครั้งและค่าที่แสดงจะเป็นค่าเฉลี่ย



ภาพประกอบที่ 3-11 อุปกรณ์การทดลองแบบ Constant Head Test



ภาพประกอบที่ 3-12 อุปกรณ์การทดลองแบบ Falling Head Test

3.3.6.3 การทดลองแบบสคมภ์ (Column Test) (ภาพประกอบที่ 3-13)

3.3.6.3.1 ซึ่ฐานอะคริลิกกับเสาเหล็กทั้ง 4 มุมด้วยน็อตยึด

3.3.6.3.2 วาง O – ring 1 อัน บนฐานอะคริลิกที่กรึงแล้ว จากนั้นวาง Geotextile 1 แผ่น

3.3.6.3.3 วางคอลัมน์สำหรับใส่ reactive media แล้วนำวัสดุผสมกับทรายในสัดส่วนที่เหมาะสมบรรจุลงไปให้เต็มแบบไม่ต้องบดอัด

3.3.6.3.4 Geotextile 1 แผ่น จากนั้นวาง O – ring อีก 1 ชั้นบนปากคอลัมน์ด้านบน

3.3.6.3.5 วางฐานปิดด้านบนยึดด้วยน็อต 4 ตัว

3.3.6.3.6 ต่อปลายสายยางซิลิโคนด้านหนึ่งเข้ากับหางปลาทองเหลืองที่ฐานด้านหนึ่งและปลายสายยางอีกด้านเข้ากับท่อ peristaltic pump

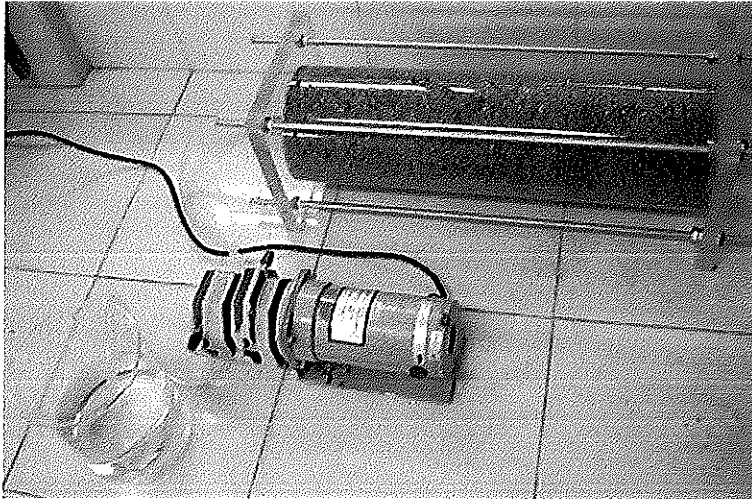
3.3.6.3.7 ป้อนน้ำปนเปื้อน ไอออน โลหะหนักสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมไว้ผ่านคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

3.3.6.3.8 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.6.3.9 ทำการทดลองซ้ำ 3.3.6.3.1 ถึง 3.3.6.2.8 แต่เปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3-3 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแบบสคมภ์

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1.อัตราการไหลของน้ำปนเปื้อน ไอออนสังกะสี	3.5 และ 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที
2.อัตราการไหลของน้ำปนเปื้อน ไอออนตะกั่ว	3.5 และ 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นของสังกะสี	100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นของตะกั่ว	100 มิลลิกรัม/ลิตร
3. ปริมาณของวัสดุดูดซับ	5,000 กรัม
4. ขนาดของวัสดุดูดซับ	2.0 - 1.76 มิลลิเมตร
5. พีเอช	6
ตัวแปรตาม	
1. ความเข้มข้นของสังกะสีหลังการบำบัด	
2. ความเข้มข้นของตะกั่วหลังการบำบัด	



ภาพประกอบที่ 3-13 อุปกรณ์การทดลองแบบสคมภ์

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ โดยคุณสมบัติที่สนใจ ได้แก่ พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET surface area และปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในวัสดุก่อนการบำบัด ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer พบว่าดินลูกรังมี Total surface area สูงที่สุด รองลงมาคือตะกอนจูลินทรีย์ และผงตะไบเหล็ก ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ผิวในระดับ Micropore ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีค่าเป็นศูนย์ ส่วนในระดับ Mesopore และ Macropore มีค่าดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน

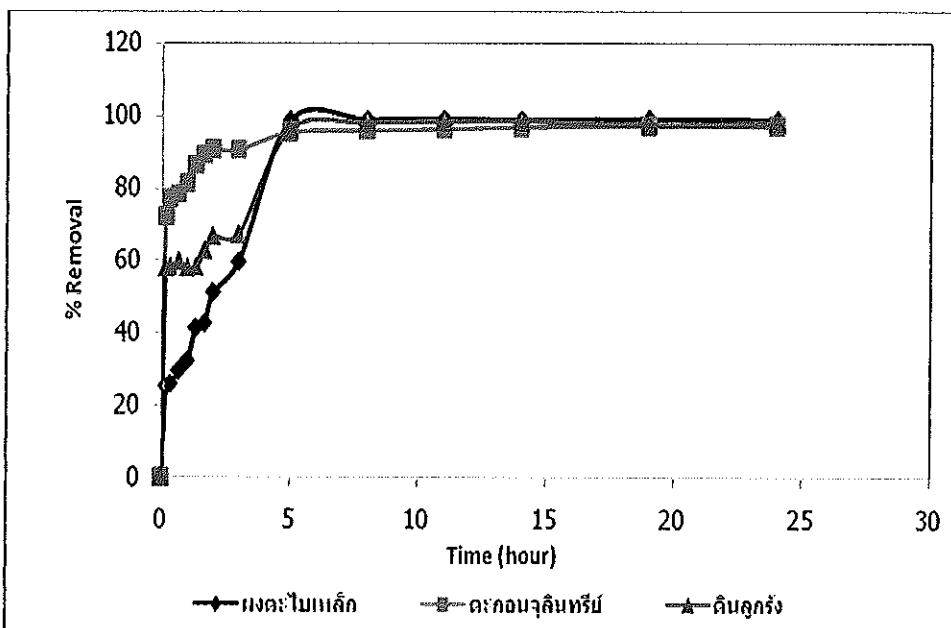
คุณสมบัติของวัสดุ	ผงตะไบเหล็ก	ตะกอนจูลินทรีย์	ดินลูกรัง
Total surface area (m ² /g)	0.112	13.512	22.235
Micropore surface area (m ² /g)	0.000	0.000	0.000
Mesopore surface area (m ² /g)	0.0525	8.807	5.701
Macropore surface area (m ² /g)	0.0595	4.705	16.534
Micropore volumn (ml/g)	0.00000	0.00000	0.00000
Mesopore volumn (ml/g)	0.00105	0.02060	0.02473
Macropore volumn (ml/g)	0.00119	0.01083	0.07172

พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของวัสดุถูกจัดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณการดูดซับ โดยเฉพาะรูพรุนขนาด Micro (จรรยา และคณะ, 2551) ซึ่งจากการวิเคราะห์วัสดุทั้ง 3 ชนิดไม่พบรูพรุนในระดับ Micro ดังนั้นวัสดุที่มีพื้นที่ที่เป็นรูพรุนขนาด Meso มากกว่าจึงน่าจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในแง่ของการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาด Macro จะมีผลต่อการดูดซับของวัสดุไม่มากนัก

ส่วนปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในวัสดุก่อนการบำบัดนั้นพบว่าเป็นศูนย์เมื่อนำไปเขย่าล้างด้วยน้ำกลั่น โดยเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การเลือกวัสดุสำหรับสร้าง เพอร์มิเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์ คือต้องไม่มีสารปนเปื้อนนี้อะไรอยู่ภายในตัวของวัสดุ (EPA/600/R-98/125, 1998)

4.2 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time)

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการกำจัด ไอออนของสังกะสี ในน้ำปนเปื้อนสังกะสี โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณวัสดุที่ใช้ 8 กรัม พีเอช 6 เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการบำบัด พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนของสังกะสีสำหรับวัสดุแต่ละชนิด เป็นดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-1

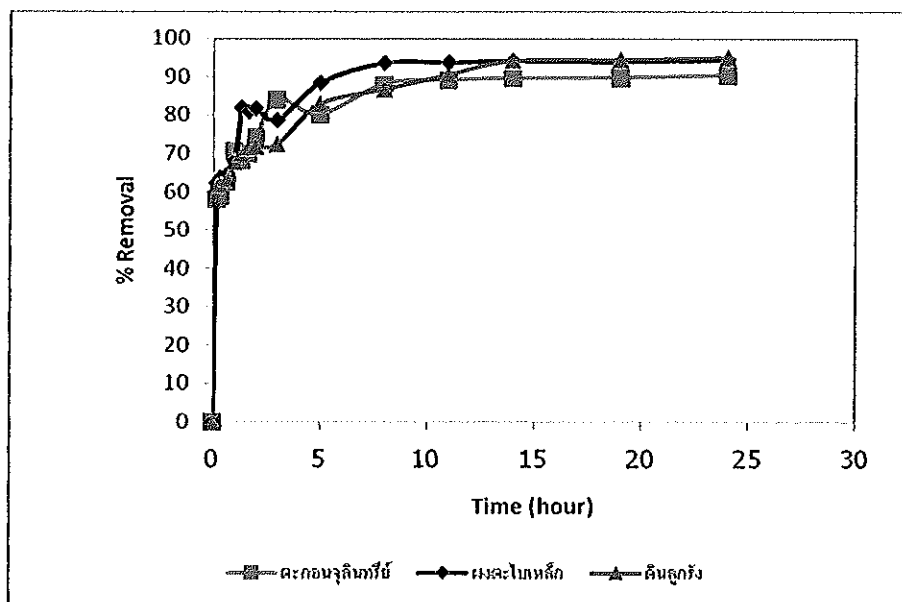


ภาพประกอบที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของวัสดุคู่ชับกับ ระยะเวลาในการดูดซับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีสำหรับวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือการบำบัดไอออนสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นในเวลาถัดมา จนเข้าสู่สมดุลที่เวลา 5-8 ชั่วโมง โดยตะกอนจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้รวดเร็วกว่าดินลูกรังและผงตะไพบเหล็กตามลำดับ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้ง 3 น่าจะใช้กลไกการดูดซับในการกำจัดไอออนสังกะสี ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ที่มีรูพรุนแบบ Mesopore มากกว่าวัสดุอื่นๆ จึงสามารถดูดซับสังกะสีได้รวดเร็วกว่าวัสดุอื่นๆ แต่เมื่อเข้าสู่สถานะสมดุล วัสดุทั้งสามสามารถกำจัดไอออนสังกะสีได้ใกล้เคียงกัน คือประมาณเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุทั้งสามชนิดในปริมาณที่ใส่ไป 8 กรัม ยังมีความสามารถในการบำบัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นสูงกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร ได้นั่นเอง

สำหรับระยะเวลาในการบำบัดไอออนของตะกั่วในน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณวัสดุที่ใช้ 8 กรัม พบว่าจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 10-15 ชั่วโมง (ภาพประกอบที่ 4-2)

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแน่นอนว่าได้เก็บตัวอย่างที่เวลาสมดุลแล้วจริงๆ ผู้ทดลองจึงทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 24 ชั่วโมงหลังการบำบัด สำหรับการทดลองแบบเบทช์ในชุดทดลองต่อไป

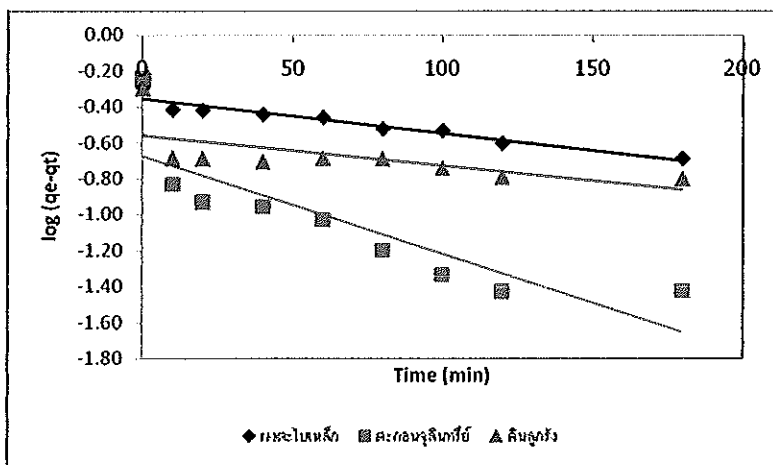


ภาพประกอบที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่ว วัสดุดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับ

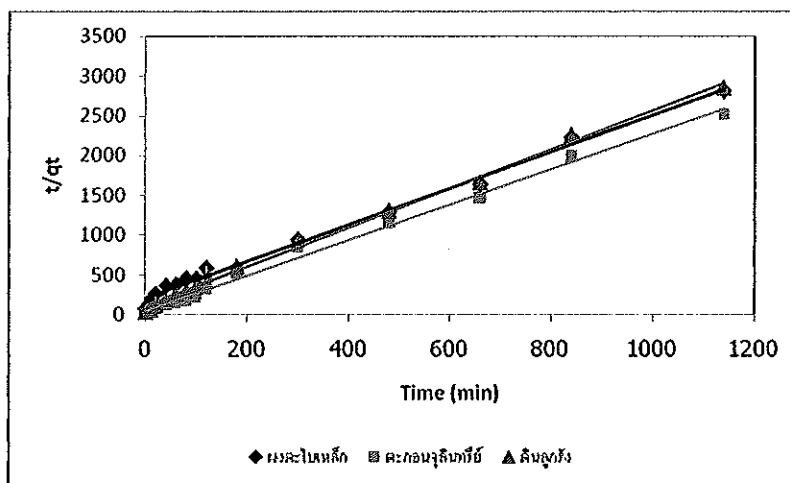
4.3 จลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับ ใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order

ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ Pseudo-second order (ภาพประกอบที่ 4-4 และ 4-6) มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo-first order (ภาพประกอบที่ 4-3 และ 4-5) ดังนั้นการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว ของผงตะไบเหล็ก ดินลูกรัง และตะกอนจุลินทรีย์ เป็นไปตาม Pseudo-second order



ภาพประกอบที่ 4-3 Pseudo-first order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



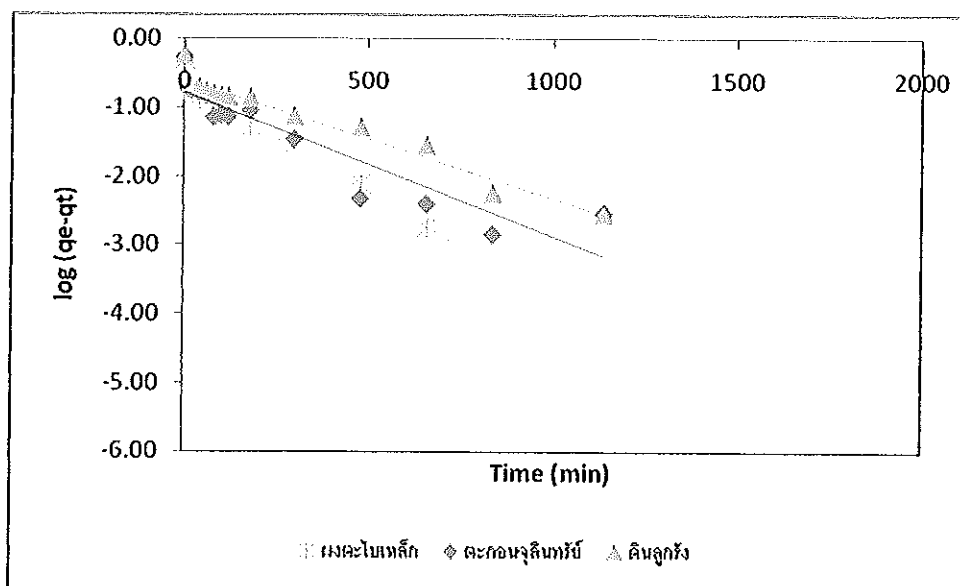
ภาพประกอบที่ 4-4 Pseudo-second order ของการดูดซับสังกะสี ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

ตารางที่ 4-2 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของการดูดซับสังกะสี

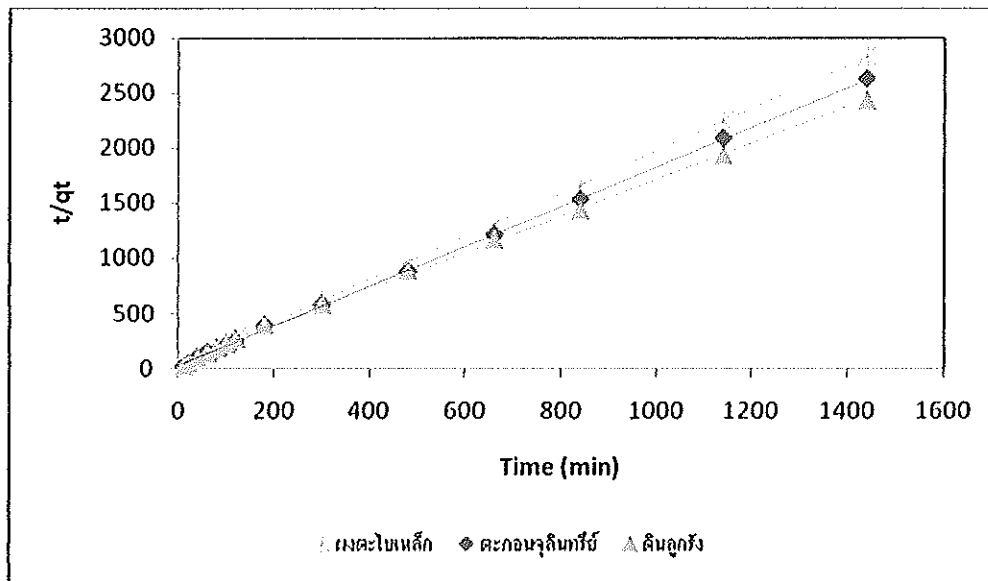
วัสดุดูดซับ	q_c (cal) [mg/g]	q_c (exp) [mg/g]	k_1 [min ⁻¹]	R^2
ผงตะไบเหล็ก	0.4396	0.5130	0.0044	0.9273
ตะกอนจุลินทรีย์	0.2742	0.5360	0.0039	0.4301
ดินลูกรัง	0.2110	0.5060	0.0124	0.7224

ตารางที่ 4-3 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการดูดซับสังกะสี

วัสดุดูดซับ	q_c (cal) [mg/g]	q_c (exp) [mg/g]	K_2 [g/mg-min]	R^2
ผงตะไบเหล็ก	0.2163	0.5130	0.1027	0.9932
ตะกอนจุลินทรีย์	0.4215	0.5360	0.1078	0.9946
ดินลูกรัง	0.3457	0.5060	0.0727	0.9947



ภาพประกอบที่ 4-5 Pseudo-first order ของการดูดซับตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-6 Pseudo-second order ของการดูดซับตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

ตารางที่ 4-4 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของการดูดซับตะกั่ว

วัสดุดูดซับ	q_e (cal) [mg/g]	q_e (exp) [mg/g]	k_1 [min ⁻¹]	R^2
ผงตะไบเหล็ก	0.2276	0.5070	0.0071	0.9675
ตะกอนจุลินทรีย์	0.1668	0.5480	0.0048	0.8571
คินลูกรัง	0.2613	0.5910	0.0039	0.9517

ตารางที่ 4-5 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการดูดซับตะกั่ว

วัสดุดูดซับ	q_e (cal) [mg/g]	q_e (exp) [mg/g]	K_2 [g/mg-min]	R^2
ผงตะไบเหล็ก	0.5070	0.5070	0.1051	0.9998
ตะกอนจุลินทรีย์	0.5480	0.5480	0.1031	0.9997
คินลูกรัง	0.5910	0.5910	0.0533	0.9988

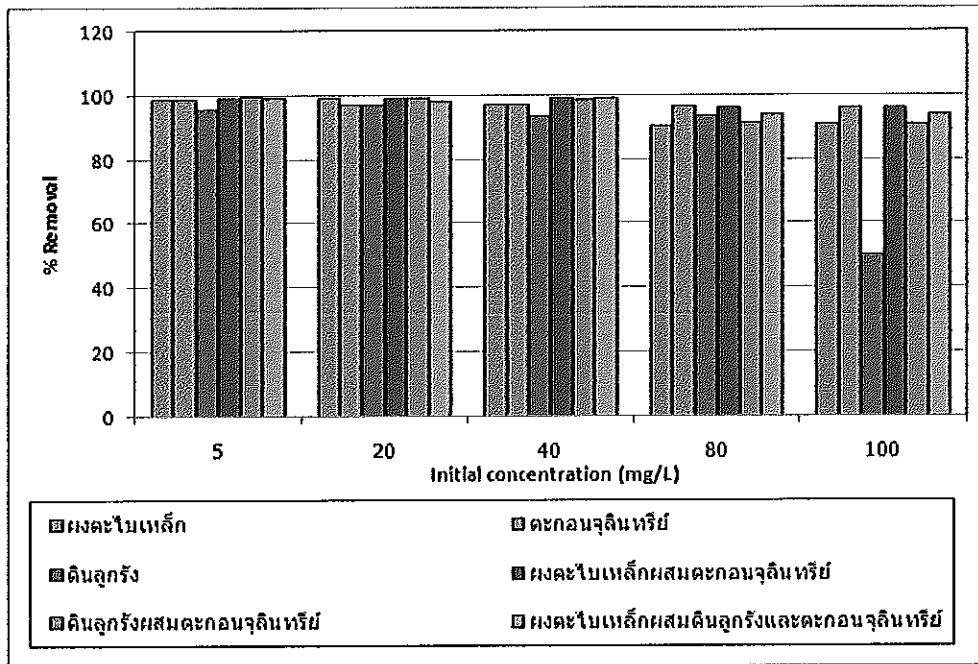
4.4 ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุโดยการทดลองแบบแบทช์

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

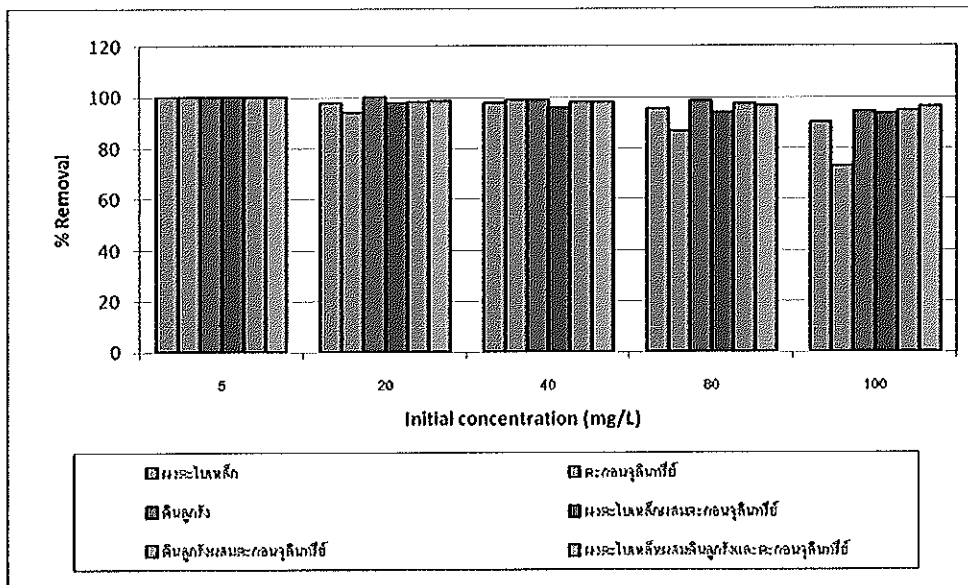
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด ไอออนสังกะสีจากสารละลายสังกะสี (ภาพประกอบที่ 3-7) ไอออนตะกั่วจากสารละลายตะกั่ว (ภาพประกอบที่ 3-8) ไอออนสังกะสีจากสารละลายผสม (ภาพประกอบที่ 3-9) และ ไอออนตะกั่วจากสารละลายผสม (ภาพประกอบที่ 3-10) โดยวัสดุทั้ง 6 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักของแต่ละวัสดุจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยเห็นได้อย่างเด่นชัดสำหรับดินลูกรังในการดูดซับ ไอออนของสังกะสีทั้งในสารละลายปนเปื้อนสังกะสีและในสารละลายผสม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของชยาภาส (2550) ที่ศึกษาการดูดซับไอออนสังกะสีโดยตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย 3 ระบบ ซึ่งพบว่าปริมาณการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ส่วนวัสดุประเภทอื่นจะใกล้เคียงกันมากและลดลงอย่างไม่เด่นชัด

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัด ไอออนตะกั่วของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด พบว่าจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยเห็นได้อย่างเด่นชัดสำหรับตะกอนจุลินทรีย์ในการดูดซับ ไอออนในสารละลายปนเปื้อนตะกั่ว ส่วนวัสดุประเภทอื่นจะใกล้เคียงกันมากและไม่ลดลงอย่างเด่นชัด แต่สำหรับในสารละลายผสม วัสดุเกือบทุกประเภทจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด ไอออนตะกั่วลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น ยกเว้นผงตะไบเหล็กที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด ไอออนตะกั่วลดลงน้อยมาก

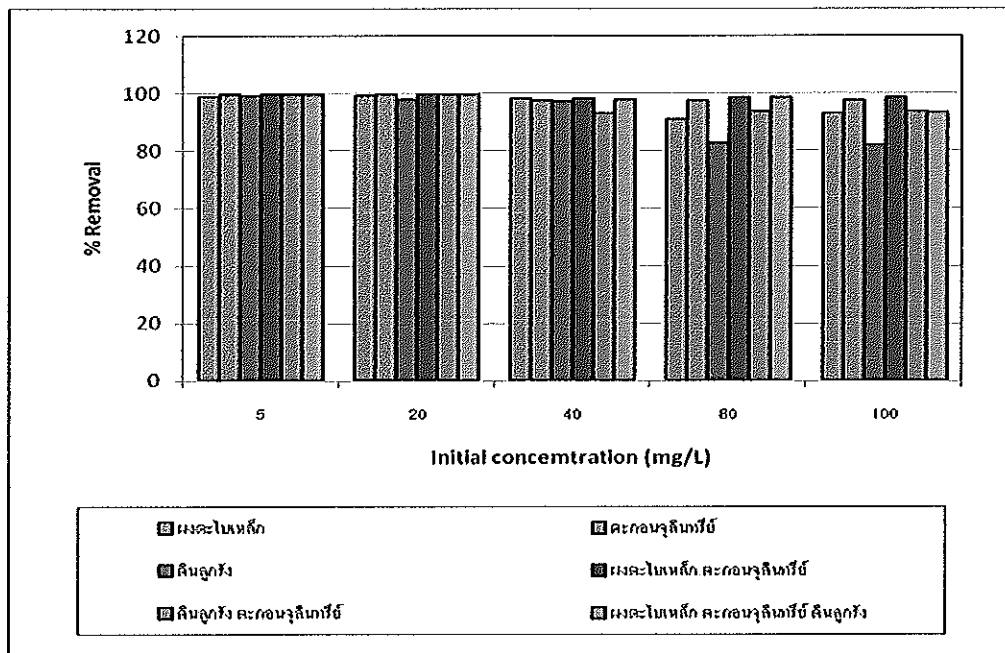
วัสดุทั้ง 6 ชนิดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำๆ ไม่ต่างกันนัก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักขึ้นจนถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะสำหรับวัสดุที่เห็นการลดลงอย่างไม่เด่นชัดซึ่งเกิดจากปริมาณวัสดุดูดซับที่มีมากเกินไป ทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ยาก



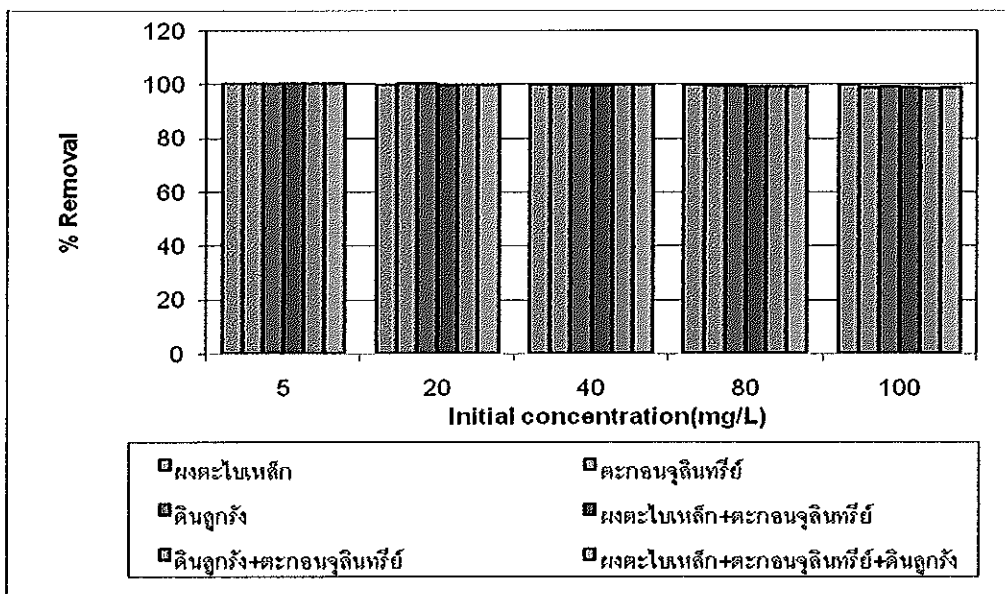
ภาพประกอบที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของวัสดุคูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนตะกั่วของวัสดุคูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของวัสดุคู่ช้กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนตะกั่วของวัสดุคู่ช้กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในสารละลายผสม พีเอช 6

ค่า Adsorption capacity ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆในสารละลายสังกะสี (ตารางภาคผนวก ก-1.1) สารละลายตะกั่ว (ตารางภาคผนวก ก-1.2) และสารละลายสังกะสีผสมตะกั่ว (ตารางภาคผนวก ก-1.3 และ ก-1.4) พบว่า Adsorption capacity ของโลหะหนักสำหรับแต่ละวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของชยาภาส (2550) ที่ศึกษาการดูดซับไอออนสังกะสีโดยตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย 3 ระบบ ซึ่งพบว่า Adsorption capacity ของไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับที่ให้ค่า Adsorption capacity สูงที่สุดในการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายแบบเดี่ยวและผสม ส่วนดินลูกรัง Adsorption capacity จะสูงที่สุดในการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายแบบเดี่ยว แต่ในสารละลายแบบผสม การใช้ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์จะให้ค่า Adsorption capacity ที่สูงกว่า

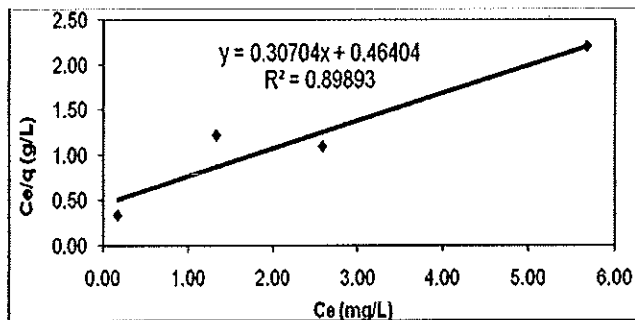
4.4.2 การศึกษา Adsorption Isotherm

Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีจากสารละลายสังกะสี โดยวัสดุชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir แสดงในตารางที่ 4-6 พบว่าผงตะไบเหล็ก ตะกอนจุลินทรีย์ ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ สามารถใช้สมการการดูดซับของ Langmuir ในการทำนายผลการทดลองได้ (ภาพประกอบที่ 4-11 ถึง 4-14)

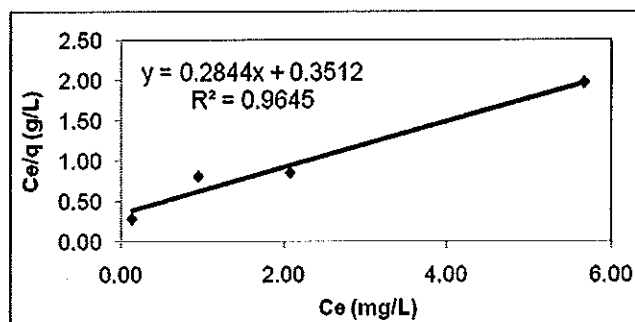
เมื่อพิจารณาระหว่าง ผงตะไบเหล็ก ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ จะพบว่าดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์จะมีค่า q_m และ K_L สูงที่สุด บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าผงตะไบเหล็ก และผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และเมื่อพิจารณาจากค่า Total surface area ซึ่งดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์จะมีค่า Total surface area สูงกว่าผงตะไบเหล็ก ก็สนับสนุนข้อมูลที่ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนสังกะสีดีกว่าผงตะไบเหล็ก และผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์

ตารางที่ 4-6 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนสังกะสี
ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

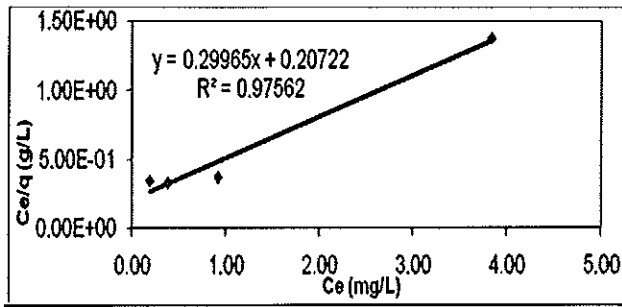
ชนิดของวัสดุ	q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2
ผงตะไบเหล็ก	3.26	0.66	0.90
ตะกอนจุลินทรีย์	3.52	0.81	0.96
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	3.34	0.44	0.98
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	4.22	0.97	0.83



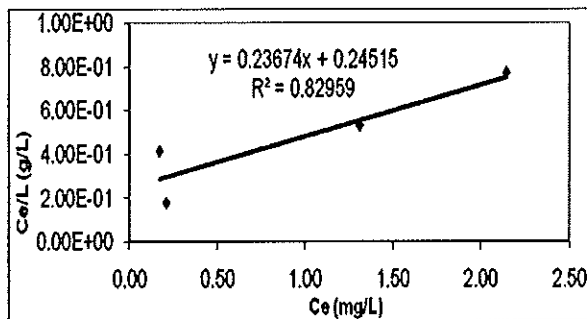
ภาพประกอบที่ 4-11 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย
ผงตะไบเหล็ก ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-12 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย
ตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-13 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย ผงตะไประลอกผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



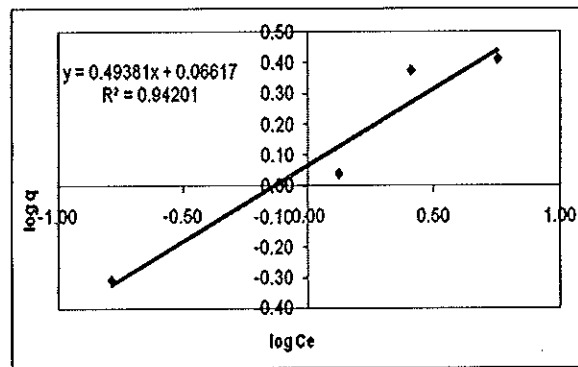
ภาพประกอบที่ 4-14 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

ภาพประกอบที่ 4-15 ถึง 4-18 แสดง Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสีจากสารละลายสังกะสีโดยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของ สมการ Freundlich แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่าผงตะไประลอก ตะกอนจุลินทรีย์ ผงตะไประลอกผสม ตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ สามารถใช้สมการการดูดซับของ Freundlich ในการทำนายผลการทดลองได้ เช่นเดียวกับการใช้สมการของ Langmuir

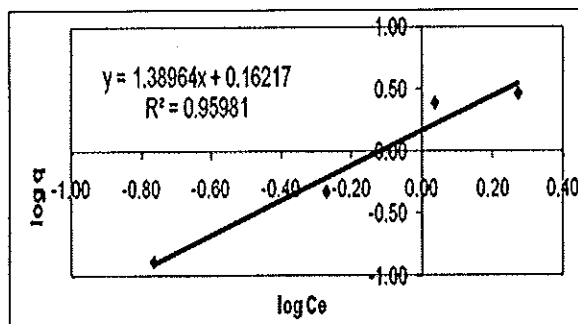
ถ้าพิจารณาจากค่า K_F ของวัสดุแต่ละชนิดจะพบว่าสำหรับวัสดุดูดซับแบบเดี่ยว ตะกอน จุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีได้สูงสุด รองลงมาคือ ผงตะไประลอก ส่วน วัสดุดูดซับแบบผสม ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมา คือผงตะไประลอกผสมตะกอนจุลินทรีย์

ตารางที่ 4-7 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนสังกะสี
ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

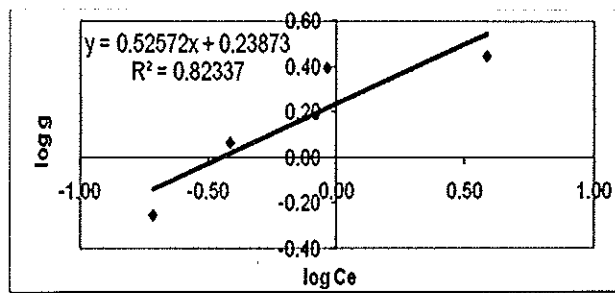
ชนิดของวัสดุ	K_F	n	R^2
ผงตะไบเหล็ก	1.16	2.03	0.94
ตะกอนจุลินทรีย์	1.45	0.72	0.96
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	1.73	1.90	0.82
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	1.93	1.63	0.80



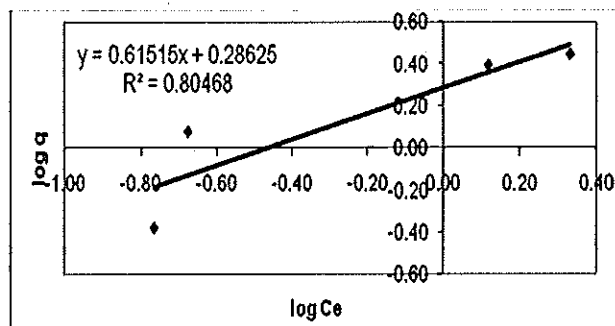
ภาพประกอบที่ 4-15 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย
ผงตะไบเหล็ก ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-16 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย
ตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-17 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

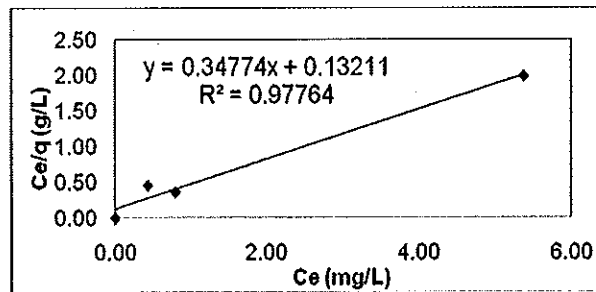


ภาพประกอบที่ 4-18 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์

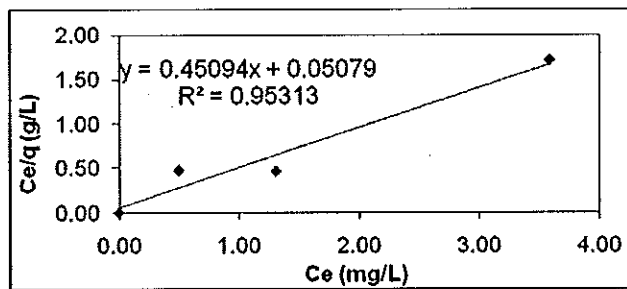
ภาพประกอบที่ 4-19 ถึง 4-20 แสดง Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายตะกั่วโดยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรัง สามารถใช้สมการของ Langmuir ในการทำนายผลได้ดี โดยตะกอนจุลินทรีย์มีค่า q_m สูงกว่า ดินลูกรัง จึงมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สูงกว่า

ตารางที่ 4-8 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนตะกั่ว
ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

ชนิดของวัสดุ	q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2
ตะกอนจุลินทรีย์	2.88	2.63	0.98
ดินถูกรัง	2.22	8.88	0.95



ภาพประกอบที่ 4-19 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดย
ตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



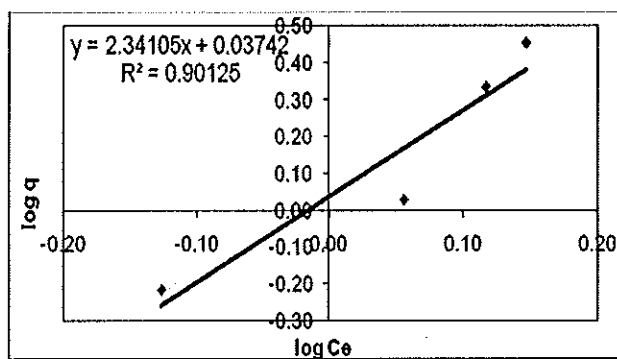
ภาพประกอบที่ 4-20 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดย
ดินถูกรัง ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

ภาพประกอบที่ 4-21 แสดง Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว จากสารละลายตะกั่วโดยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich แสดงในตารางที่ 4-9 พบว่า ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง สามารถใช้สมการของ Freundlich ในการทำนายผลได้ดี

เมื่อพิจารณาในภาพรวม Langmuir Adsorption Isotherm เหมาะสำหรับการทำนายการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับแบบเดี่ยว ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงกว่าดินลูกรัง ส่วน Freundlich Adsorption Isotherm เหมาะสำหรับอธิบายการดูดซับด้วยวัสดุแบบผสมมากกว่า โดยเฉพาะผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง ให้ค่า R^2 ถึง 0.90

ตารางที่ 4-9 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนตะกั่ว ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

ชนิดของวัสดุ	K_F	n	R^2
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง	1.090	0.427	0.90

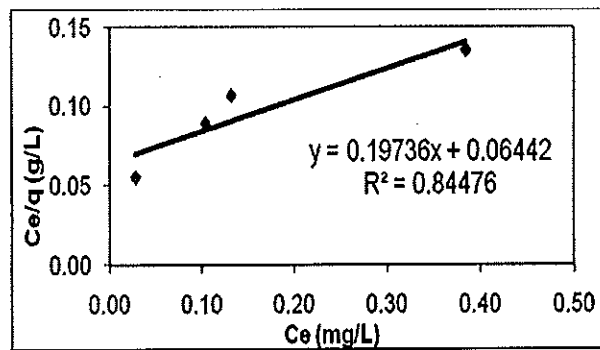


ภาพประกอบที่ 4-21 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

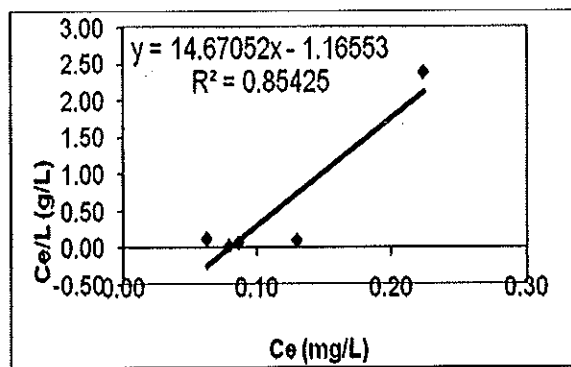
ภาพประกอบที่ 4-22 ถึง 4-24 แสดง Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีจากสารละลายผสม และภาพประกอบที่ 4-25 ถึง 4-27 แสดง Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายผสม โดยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir แสดงในตารางที่ 4-10 พบว่าสามารถใช้ Langmuir Adsorption Isotherm ทำนายการดูดซับตะกั่วของวัสดุแบบเดี่ยวได้ดีกว่าวัสดุแบบผสม แต่ใช้ทำนายการดูดซับสังกะสีของวัสดุแบบผสมได้ดีกว่าวัสดุแบบเดี่ยว สำหรับวัสดุแบบเดี่ยวผงตะไบเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีและตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมาคือดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้นี้ต่างจากการบำบัดสารละลายโลหะหนักแบบเดี่ยวๆ ที่ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าวัสดุทั้งสอง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการกำจัดไอออนโลหะหนักจากสารละลายแบบเดี่ยวๆ กลไกการดูดซับมีผลมากกว่ากลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ผงตะไบเหล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวต่ำจึงมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ในการกำจัดไอออนโลหะหนักจากสารละลายผสม ผงตะไบเหล็กซึ่งมีกลไกในการแลกเปลี่ยนไอออนเด่นกว่ากลไกการดูดซับจึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนน่าจะมีผลน้อย ส่วนวัสดุแบบผสม ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์จะมีความประสิทธิภาพดีที่สุด

ตารางที่ 4-10 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir ของการดูดซับไอออนสังกะสีและตะกั่วในสารละลายผสม พีเอช 6

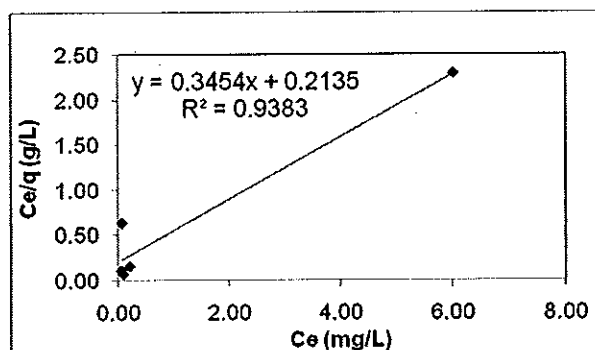
ชนิดของวัสดุ	q_m (mg/g)		K_L (L/g)		R^2	
	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb
ผงตะไบเหล็ก	2.67	3.21	0.56	5.40	0.65	0.84
ตะกอนจุลินทรีย์	1.80	1.26	11.41	26.91	0.58	0.83
ดินลูกรัง	2.13	3.30	9.62	5.45	0.75	0.81
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	5.07	3.53	3.06	2.43	0.85	0.76
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	0.07	3.26	-12.59	3.44	0.85	0.71
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง	2.86	3.58	7.08	2.24	0.94	0.64



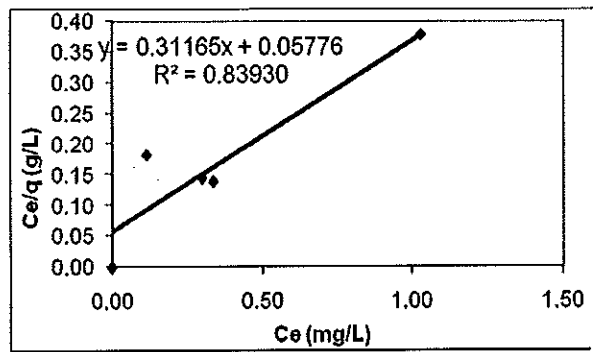
ภาพประกอบที่ 4-22 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไคร่เหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



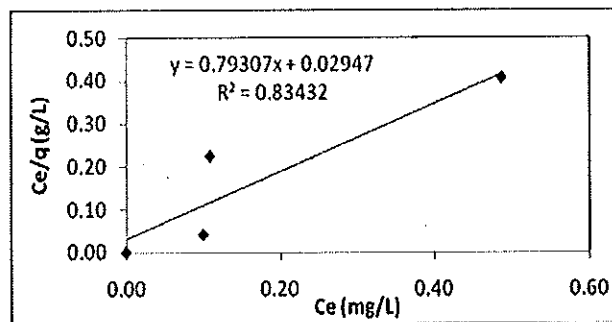
ภาพประกอบที่ 4-23 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



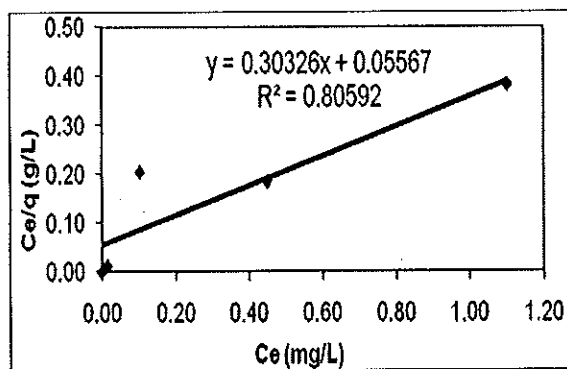
ภาพประกอบที่ 4-24 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยผงตะไคร่เหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-25 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-26 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6

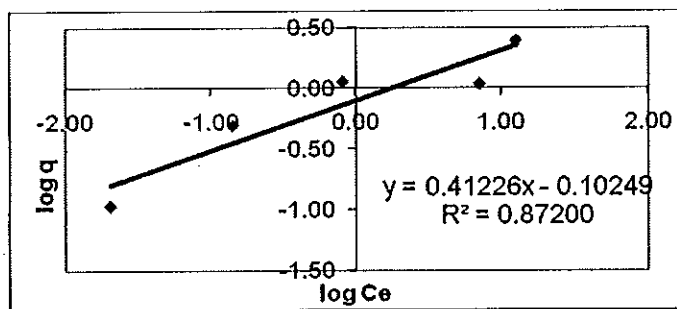


ภาพประกอบที่ 4-27 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดยดินลูกรัง ในสารละลายผสม พีเอช 6

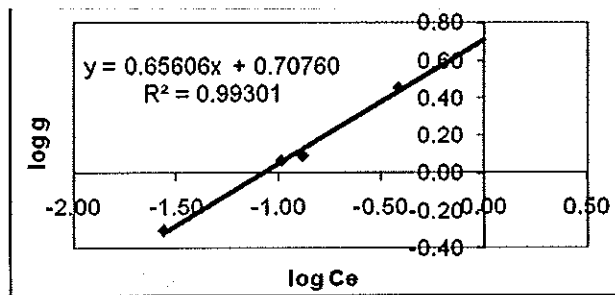
ภาพประกอบที่ 4-28 แสดง Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีจากสารละลายผสม และภาพประกอบที่ 4-29 ถึง 4-30 แสดง Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนตะกั่วจากสารละลายผสม โดยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich แสดงในตารางที่ 4-11 จะเห็นว่าค่า R^2 ของสมการ Langmuir จะมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า จึงใช้ผลที่ทำนายจากสมการของ Langmuir

ตารางที่ 4-11 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich ของการดูดซับไอออนสังกะสีและตะกั่วจากสารละลายผสม ทีเอช 6

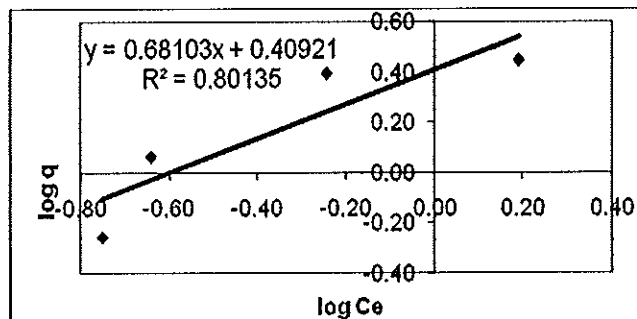
ชนิดของวัสดุดูดซับ	K_F		n		R^2	
	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb
ผงตะไบเหล็ก	1.08	3.52	3.46	1.54	0.48	0.74
ตะกอนจุลินทรีย์	3.99	2.19	1.07	1.54	0.48	0.21
ดินลูกรัง	0.79	2.30	2.43	3.07	0.87	0.39
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	5.10	2.57	1.52	1.47	0.99	0.80
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	9.33	2.26	3.46	2.92	0.13	0.31
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง	1.46	2.42	2.22	1.88	0.49	0.40



ภาพประกอบที่ 4-28 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดยดินลูกรัง ในสารละลายผสม ทีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-29 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสีโดย ผงตะไประลอกผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



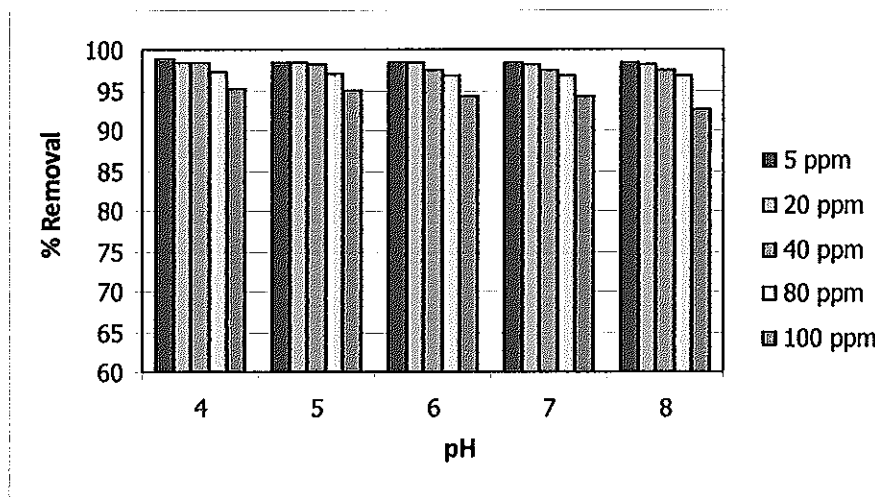
ภาพประกอบที่ 4-30 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดย ผงตะไประลอกผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6

4.3.3 ผลของพีเอช

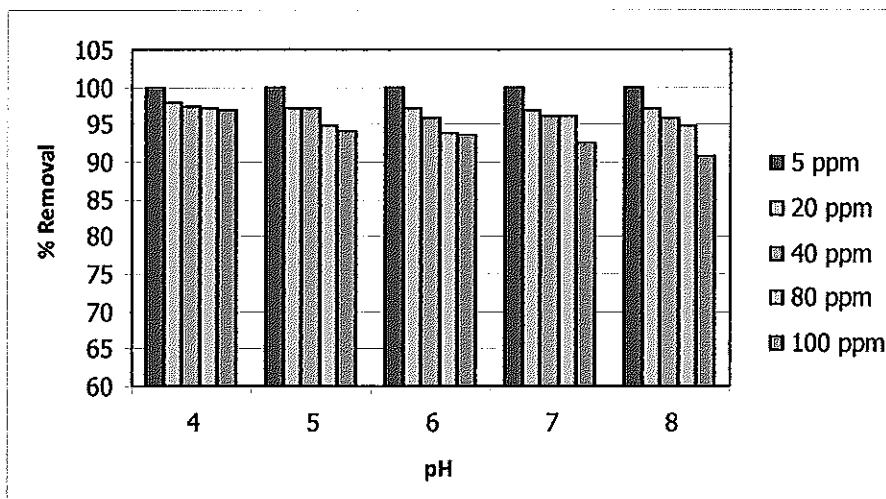
จากการศึกษา Adsorption Isotherm จะได้ว่า ผงตะไประลอกผสมตะกอนจุลินทรีย์ เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด จากการใช้ Langmuir Adsorption Isotherm ในการทำนาย จึงเป็นวัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการบำบัดสารประเภท โลหะหนัก

พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น % Removal ของทั้งสังกะสีและตะกั่วมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการใช้วัสดุดูดซับที่มากเกินไปจึงไม่เห็นอิทธิพลของพีเอชอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-31 และ ภาพประกอบที่ 4-32 ซึ่งจากการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไประลอก ของวุฒิชัย (2545) โดยได้ทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อใช้ในการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและ

นิกเกิล โดยทำการศึกษาที่พีเอช 4, 5, 6 และ 7 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 30 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร จากการทดลองพบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น



ภาพประกอบที่ 4-31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีกับพีเอชที่เปลี่ยนไปของผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี



ภาพประกอบที่ 4-32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนตะกั่วกับพีเอชที่เปลี่ยนไปของผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว

4.4 การหาค่า Hydraulic conductivity โดยการทดลองแบบแบบสดมภ์

จากการทดลองหาค่า K ของวัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-12 ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างเพอร์มิเอเบิลรีแอกทีฟแบเรอร์ซึ่งโดยส่วนใหญ่โครงสร้างของ PRB จึงประกอบด้วยทรายเพื่อให้มีค่าการซึมผ่านที่ดี

ตารางที่ 4-12 ค่า Hydraulic conductivity ของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุดูดซับ	ค่า K (cm/s)
ตะกอนจุลินทรีย์	1.046
ผงตะไบเหล็ก	0.821
ทราย	8.747×10^{-3}
ดินลูกรัง	5.33×10^{-5}

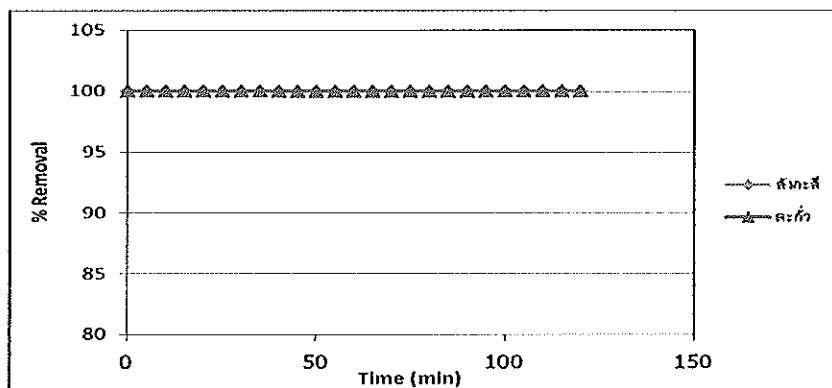
จะเห็นได้ว่าหากเลือกใช้วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งแบบเดี่ยวๆจะไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็น reactive media อันเนื่องมาจาก ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุที่มีค่า K สูงสุดและมากเกินไปที่จะทำให้ น้ำที่ไหลผ่านมีระยะเวลาในการสัมผัสกับ reactive media ได้อย่างเพียงพอ เช่นเดียวกับการเลือกใช้ ผงตะไบเหล็ก ซึ่งมีค่า K ที่สูงเช่นเดียวกัน สำหรับดินลูกรังซึ่งเป็นดินที่มีดินเหนียวผสมอยู่ เมื่อดิน อิ่มตัวไปด้วยน้ำจะทำให้ค่าการยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำลงและอัดตัวแน่นขึ้น ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้เป็น reactive media

ทราย เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการดูดซับต่ำ แต่จะเป็นตัวที่ช่วยเสริมให้ค่าการซึมผ่านของ น้ำดีขึ้นได้ ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการทดลองหาค่า K โดยไม่มีการบดอัด ดังนั้น หากนำวัสดุไปทำ การทดลองแบบมีการบดอาจทำให้ได้ค่า K ที่เปลี่ยนไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพิจารณาถึงการนำไปใช้ งานเป็นหลัก

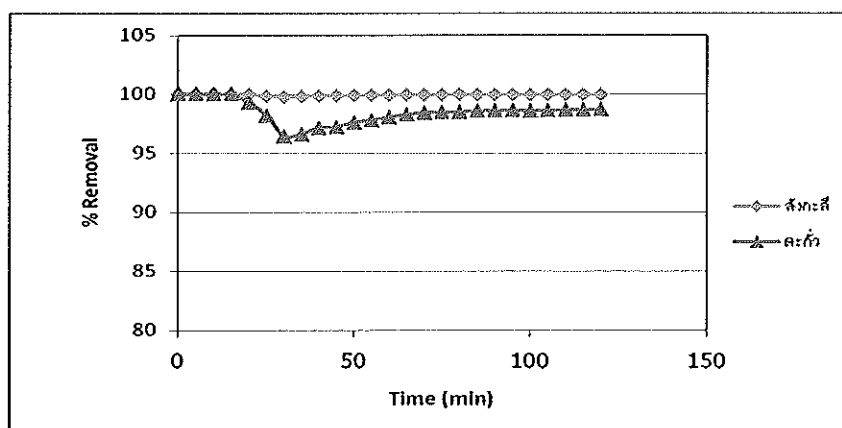
4.5 การทดลองแบบสดมภ์ (Column Test)

จากการศึกษา Adsorption Isotherm พบว่าผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุที่มี ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดี โดยเฉพาะในสารละลายผสม ซึ่งเป็นลักษณะของน้ำใต้ดิน คือมีการ ปนเปื้อนของสารมากกว่า 1 ชนิดประกอบกับการศึกษาค่า Hydraulic conductivity ซึ่งจะเห็นได้ว่า

การใช้วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสม จึงนำผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ มาผสมกับทรายในสัดส่วน 1:0.5:0.5 (ทราย:ผงตะไบเหล็ก:ตะกอนจุลินทรีย์) แล้วทำการจำลองสถานการณ์การไหลพบว่า การใช้วัสดุผสมกับทรายดังกล่าวโดยมีความหนาของ reactive media เท่ากับ 50 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 152.94 ตารางเซนติเมตร ที่อัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (Retention time 36 นาที) และ 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (Retention time 16 นาที) พบว่าเพียงพอในการบำบัดสารละลายปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีและตะกั่วได้ 95-99 % (ภาพประกอบที่ 4-33 และ 4-34)

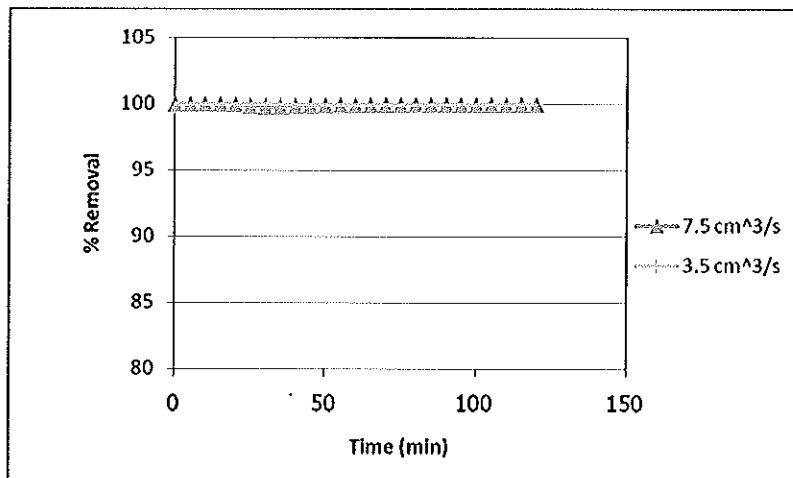


ภาพประกอบที่ 4-33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนของโลหะกับเวลาที่อัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เลข 6

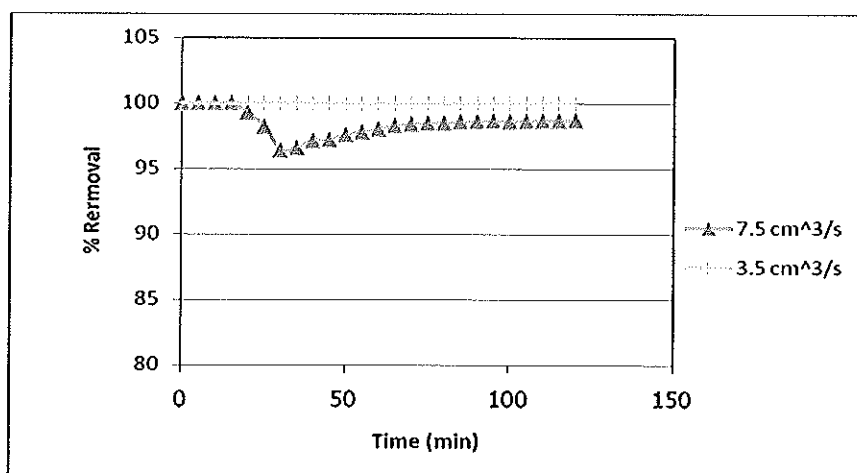


ภาพประกอบที่ 4-34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนของโลหะกับเวลาที่อัตราการไหล 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เลข 6

จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดสังกะสีของ reactive media จะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเวลาที่สารปนเปื้อนสัมผัสกับ reactive media ลดลง แต่สำหรับสารปนเปื้อน ไอออนของตะกั่วพบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ reactive media จะลดลงมากกว่าสารละลายสังกะสีอยู่เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า reactive media ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีดีกว่าการบำบัดตะกั่วเล็กน้อย (ภาพประกอบที่ 4-33 และ 4-34)



ภาพประกอบที่ 4-35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนของสังกะสีกับเวลาที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6



ภาพประกอบที่ 4-36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนของตะกั่วกับเวลาที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

1. จากการทดลองแบบเบตซ์แสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิดเดียวกันหากใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนต่างชนิดจะให้ผลของการดูดซับได้ต่างกัน สำหรับสารละลายปนเปื้อนไอออนสังกะสี ในการใช้ Langmuir Adsorption Isotherm ทำนายผลการทดลอง พบว่าคินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์จะมีค่า q_m และ K_L สูงที่สุด บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าผงตะไบเหล็ก และผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และในการใช้ Freundlich Adsorption Isotherm ทำนายผลการทดลอง พบว่าเมื่อพิจารณาจากค่า K_F ของวัสดุแต่ละชนิดจะพบว่าสำหรับวัสดุดูดซับแบบเดี่ยวตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีได้ดีกว่า ผงตะไบเหล็ก และคินลูกรังตามลำดับ ส่วนวัสดุดูดซับแบบผสม คินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และคินลูกรัง ซึ่งมีประสิทธิภาพรองลงมาและใกล้เคียงกัน

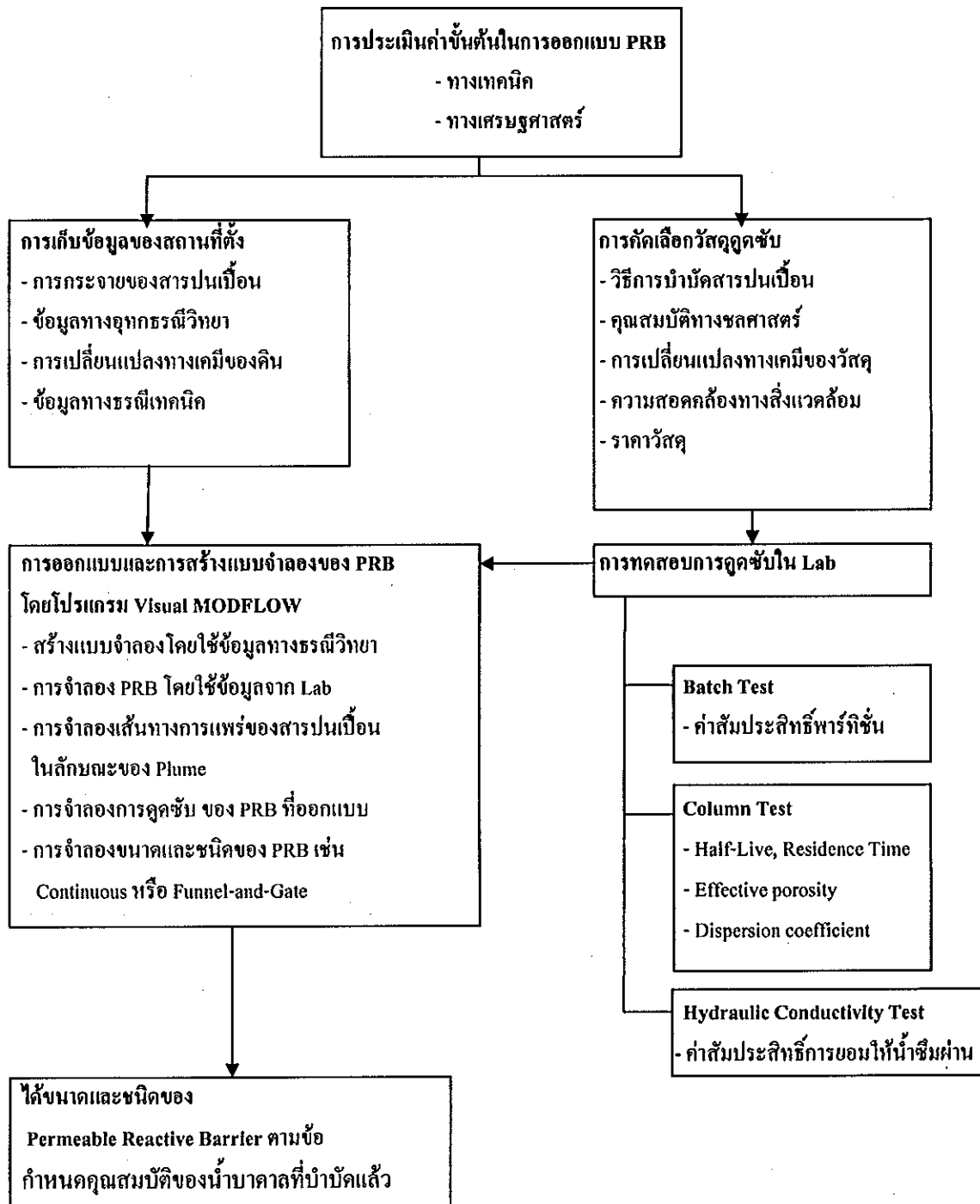
สำหรับสารละลายปนเปื้อนไอออนของตะกั่ว Langmuir Adsorption Isotherm เหมาะสำหรับการทำนายการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับแบบเดี่ยว ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงสุด รองลงมาคือ คินลูกรัง และผงตะไบเหล็ก ตามลำดับ ส่วน Freundlich Adsorption Isotherm เหมาะสำหรับอธิบายการดูดซับด้วยวัสดุแบบผสมมากกว่า ซึ่งผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และคินลูกรัง มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วมากที่สุด รองลงมาคือ คินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ และผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ตามลำดับ และสำหรับสารละลายปนเปื้อนไอออนของสังกะสีและตะกั่ว พบว่าสามารถใช้ Langmuir Adsorption Isotherm ทำนายการดูดซับตะกั่วของวัสดุแบบเดี่ยวได้ดีกว่าวัสดุแบบผสม แต่ใช้ทำนายการดูดซับสังกะสีของวัสดุแบบผสมได้ดีกว่าวัสดุแบบเดี่ยว สำหรับวัสดุแบบเดี่ยวผงตะไบเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีและตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมาคือคินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ตามลำดับ

2. ผลจากการใช้สารละลายปนเปื้อนไอออนของโลหะหนักแบบผสม จะแตกต่างจากการใช้สารละลายโลหะหนักแบบเดี่ยวๆ ในการบำบัด กล่าวคือ สารละลายปนเปื้อนไอออนของสังกะสีและสารละลายปนเปื้อนไอออนของตะกั่ว ตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าผงตะไบเหล็กและดินลูกรัง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการกำจัดไอออนโลหะหนักจากสารละลายแบบเดี่ยวๆ กลไกการดูดซับมีผลมากกว่ากลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ผงตะไบเหล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวต่ำจึงมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ในการกำจัดไอออนโลหะหนักจากสารละลายผสม ผงตะไบเหล็กซึ่งมีกลไกในการแลกเปลี่ยนไอออนเด่นกว่ากลไกการดูดซับจึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนน่าจะมีผลน้อย ส่วนวัสดุแบบผสม ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

3. การเลือกใช้วัสดุจะต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งได้จากการทดลองแบบแบตช์ และค่า Hydraulic conductivity ประกอบกันไปเพื่อใช้ในการเลือกวัสดุและการปรับสัดส่วนให้เหมาะสมกับการนำไปศึกษาการจำลองสถานการณ์การไหลจริง ซึ่งยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ดังนั้นในขั้นต้นจึงสรุปได้ว่า การใช้วัสดุดูดซับแบบเดี่ยวอย่างใดอย่างหนึ่งจะไม่เหมาะสำหรับใช้เป็น reactive media เนื่องจากมีค่า Hydraulic conductivity (K) ที่สูงเกินกว่าที่จะทำให้น้ำที่ไหลผ่านมีระยะเวลาในการสัมผัสกับ reactive media ได้อย่างเพียงพอ ซึ่งระยะเวลาในการสัมผัสกับ reactive media เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนทุกชนิด ซึ่งจากการทดลองโดยนำผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์มาผสมกับทรายในสัดส่วน 1:0.5:0.5 (ทราย:ผงตะไบเหล็ก:ตะกอนจุลินทรีย์) แล้วทำการจำลองสถานการณ์การไหลพบว่า การใช้วัสดุผสมกับทรายดังกล่าวโดยมีความหนาของ reactive media เท่ากับ 50 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 153.94 ตารางเซนติเมตร ที่อัตราการไหล 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (Retention time 36.65 นาที) และ 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (Retention time 17.10 นาที) พบว่าเพียงพอในการบำบัดสารละลายปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีและตะกั่วได้ 95-99 % ที่พีเอช 6

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา ควรทำการศึกษาในช่วงระยะเวลา 0-180 นาทีแรกของการบำบัด สามารถสังเกตได้ในขั้นการทดลองหาเวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. สัดส่วนของวัสดุผสมที่จะนำไปใช้เป็น reactive media ในการสร้างเพอร์มิเอเบิลรีแอกทีฟแบรียเออร์ มีผลต่อค่าการซึมผ่านของน้ำใต้ดิน จึงควรมีการศึกษาเกี่ยวกับ สัดส่วนของวัสดุผสมที่จะนำไปใช้เป็น reactive media สำหรับการนำไปใช้จริง
3. การศึกษาทดลองในขั้นตอนดังได้ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เป็นเพียงส่วนหนึ่งสำหรับการประเมินขั้นตอนในการออกแบบเพื่อสร้าง Permeable Reactive Barrier ซึ่งต้องมีการประเมินทั้งในทางเทคนิคและในทางเศรษฐศาสตร์ เกี่ยวกับการเก็บข้อมูลของสถานที่ตั้ง และการคัดเลือกวัสดุดูดซับ ซึ่งในขั้นตอนของการคัดเลือกวัสดุดูดซับจะต้องมีการทดสอบการดูดซับที่สนใจในระดับห้องปฏิบัติการเสียก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยการทำ Batch Test, Column Test และ Hydraulic Conductivity Test แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปประกอบกับข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ตั้ง เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและการสร้างแบบจำลองของ Permeable Reactive Barrier โดยโปรแกรม Visual MODFLOW เพื่อให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับขนาดและชนิดของ Permeable Reactive Barrier ตามข้อกำหนดคุณสมบัติของน้ำบาดาลที่บำบัดแล้ว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 5-1



ภาพประกอบที่ 5-1 แสดงการประเมินค่าขั้นต้นในการออกแบบ Permeable Reactive Barrier

รายการเอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2536. วิศวกรรมประปา.

โกวิทย์ ปิยะมังกลา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์โพธิมงคลกุล และฉัฐรส คงสมภักดิ์. 2551. จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานหุบโลหะโดยใช้ไคโดซานเรซิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 18, ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2551

คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำและการจัดการดิน. 2537. การจัดการดินลูกรัง. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ชญาภาส ทับทอง. 2550. การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. คำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ.

นันทนิตย์ เจริญไธสง. 2549. ศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนด์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกั้นซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ณัฐยา พูนสุวรรณ. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ภูมิพัฒน์. (2550). การดูดซับโพแทสเซียมไอออนและสังกะสีโดยใช้ถ่านแกลบ.

<http://www2.intania.com/node/194>

วุฒิชัย ทิวพงษ์. 2545. การกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรณิ์ ดันกิตยานนท์, จันจนา พยุวงศ์, ทยุติ ศิริเจน, วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2540. การดูดซับโลหะหนักบนกากชีวมวลเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 ณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23-25 ตุลาคม 2540.

EPA/600/R-98/125. 1998. Permeable reactive barrier, Technology for contaminant remediation. United States Environmental Protection Agency.

Junyapoon, S. 2005. Use of zero-valent iron for wastewater treatment. KMITL Sci. Tech. J. 5: 587-595.

Maji, S.K., Pal, A. and Pal, T. 2008. Arsenic removal from real-life groundwater by adsorption on laterite soil. J. Hazard. Mater. 151: 811-820.

Molfetta, A.D. and Sethi, R. 2006. Chemshell excavation of a permeable reactive barrier. Environ. Geol. 50: 361-369.

Munro, L.D., Clark, M.W and McConchie, D. 2004. A BauxsolTM-based permeable reactive barrier for the treatment of acid rock drainage. Mine Water and the Environment. 23: 183-194.

National Technical University of Athens. 2000. Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers used for the Remediation of Contaminated Groundwater.

Yuncu, B., Sanin, D.F. and Yetis, U. 2006. An investigation of heavy metal biosorption in relation to C/N ratio of activated sludge. Journal of Hazardous Materials. 137: 990-997.

Wilkens, J.A., Butler, P.B., Kahl, W.R., Scrivner, N.C. 2000. Permeable Reactive Barrier for Metals Treatment at the Newport, DE Superfund Site.

http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenter-uploads/libs/html/1261/Groundwater/water_resource/subsurface_water.htm (accessed February 22, 2008)

http://questor.qub.ac.uk/webpages/questortools/projects/I_BINDS/index.html
(accessed July 20, 2008)

<http://www.dcep.go.th/news/newsDetail.jsp?typeID=1&id=9421&languageID=th>
(accessed February 20, 2008)

<http://www.waterindex.com/doc1-standard%20water%20in%20inderground%20p1.htm>
(accessed February 25, 2008)

http://www.pwa.co.th/document/performance_water.htm (accessed February 20, 2008)

<http://www.waterindex.com/doc1-standard%20water%20parameter.htm> (accessed April 2, 2008)

<http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Zinc1/322.html> (accessed May 20, 2008)

http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573 (accessed May 20, 2008)

<http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/monpit-a/lead.htm> (accessed May 20, 2008)

http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573 (June 20, 2008)

<http://livesite.newcastle.edu.au/cgmm/research/georemediation.page> (accessed July 20, 2008)

<http://www2.intania.com/node/194> (Accessed on March 1, 2008)

<http://www.eco-usa.net/toxics/zinc.shtml> (accessed April 2, 2008)

<http://th.wikipedia.org/wiki/> (accessed May 20, 2008)

<http://th.wikipedia.org/wiki/> (accessed February 20, 2008)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 Adsorption capacity

ตารางภาคผนวก ก-1.1 Adsorption capacity ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับไอออน
สังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

ชนิดของวัสดุดูดซับ	Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ)				
	5 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm	100 ppm
ผงตะไบเหล็ก	0.123	0.492	1.092	2.360	2.573
ตะกอนจูลินทรีย์	0.131	0.474	1.181	2.434	2.883
ดินลูกรัง	0.115	0.502	1.157	2.272	2.460
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจูลินทรีย์	0.125	0.557	1.158	2.476	2.845
ดินลูกรังผสมตะกอนจูลินทรีย์	0.115	0.417	1.194	2.476	2.783
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจูลินทรีย์ และดินลูกรัง	0.132	0.458	1.143	2.478	2.826

ตารางภาคผนวก ก-1.2 Adsorption capacity ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับไอออน
ตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

ชนิดของวัสดุดูดซับ	Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ)				
	5 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm	100 ppm
ผงตะไบเหล็ก	0.106	0.510	1.013	2.175	2.732
ตะกอนจูลินทรีย์	0.128	0.430	0.929	2.157	2.697
ดินลูกรัง	0.122	0.575	1.060	2.100	2.860
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจูลินทรีย์	0.128	0.564	1.007	2.166	2.841
ดินลูกรังผสมตะกอนจูลินทรีย์	0.127	0.572	1.021	2.194	2.836
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจูลินทรีย์ และดินลูกรัง	0.119	0.609	1.069	2.163	2.843

ตารางภาคผนวก ก-1.3 Adsorption capacity ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับไอออน
สังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายผสม พีเอช 6

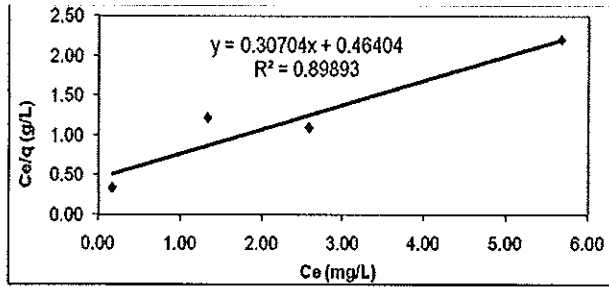
ชนิดของวัสดุดูดซับ	Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ)				
	5 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm	100 ppm
ผงตะไบเหล็ก	0.098	0.497	1.183	1.207	2.635
ตะกอนจุลินทรีย์	0.102	0.508	1.171	1.266	2.856
ดินลูกรัง	0.108	0.499	1.136	1.085	2.468
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	0.097	0.497	1.165	1.235	2.839
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	0.094	0.500	1.190	1.263	2.854
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรัง	0.099	0.511	1.169	1.301	2.622

ตารางภาคผนวก ก-1.4 Adsorption capacity ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับไอออน
ตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายผสม พีเอช 6

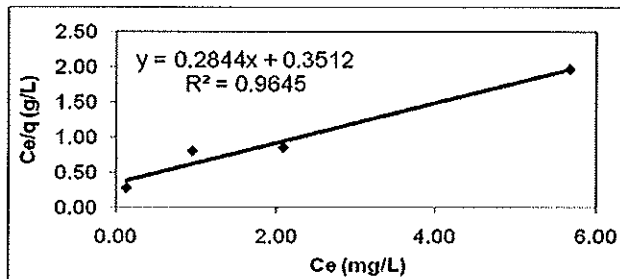
ชนิดของวัสดุดูดซับ	Adsorption capacity (มิลลิกรัม/กรัมของวัสดุดูดซับ)				
	5 ppm	20 ppm	40 ppm	80 ppm	100 ppm
ผงตะไบเหล็ก	0.121	0.632	1.088	2.430	2.718
ตะกอนจุลินทรีย์	0.146	0.487	1.201	2.465	2.903
ดินลูกรัง	0.139	0.509	1.195	2.423	2.884
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์	0.147	0.557	1.163	2.487	2.916
ดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์	0.145	0.417	1.199	2.510	2.801
ผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ และดินลูกรัง	0.136	0.462	1.145	2.501	2.871

ภาคผนวก ก-2 Adsorption Isotherm

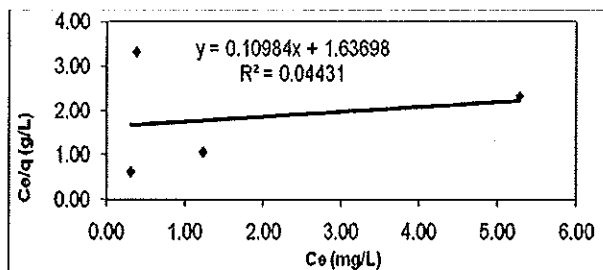
1. ไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิด ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



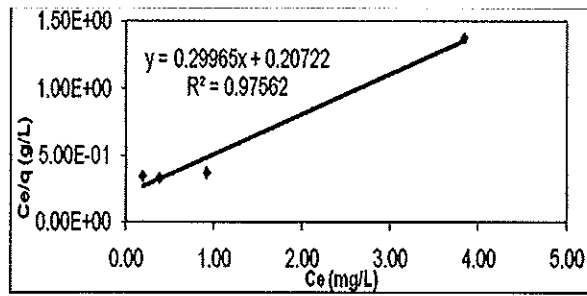
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.1 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



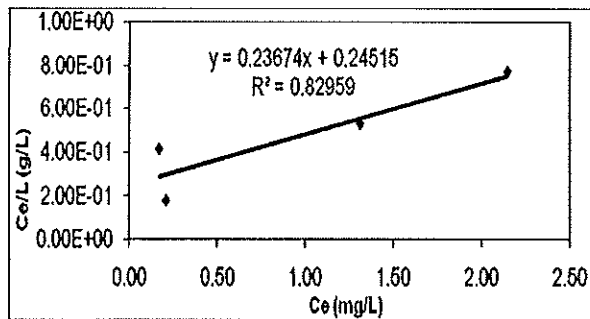
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.2 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



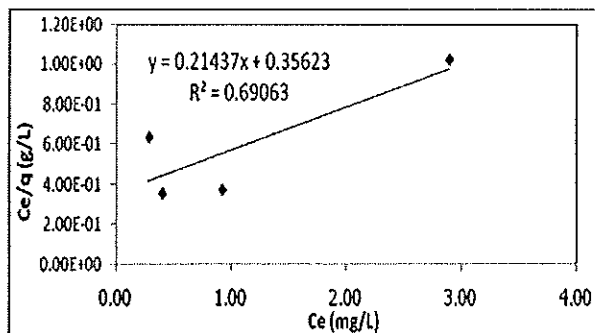
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.3 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรัง ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



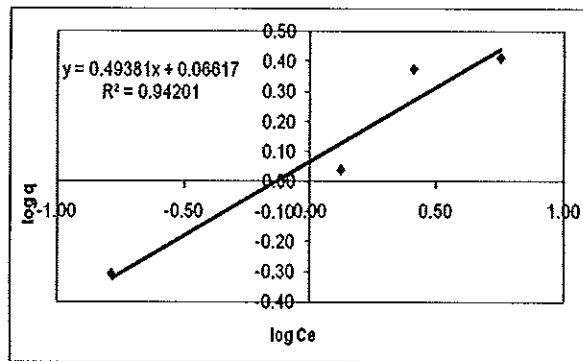
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.4 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



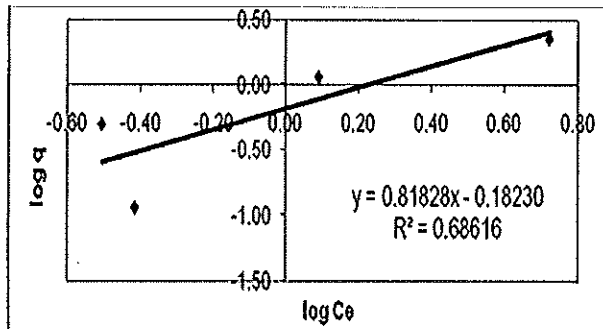
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.5 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสี โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



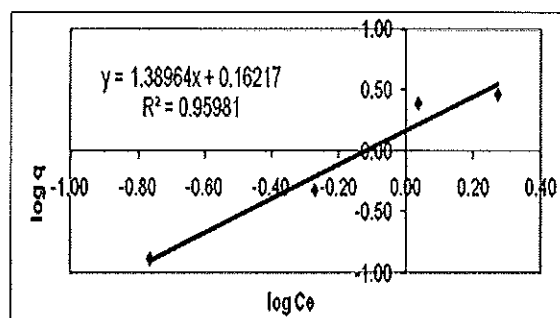
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.6 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับ ไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



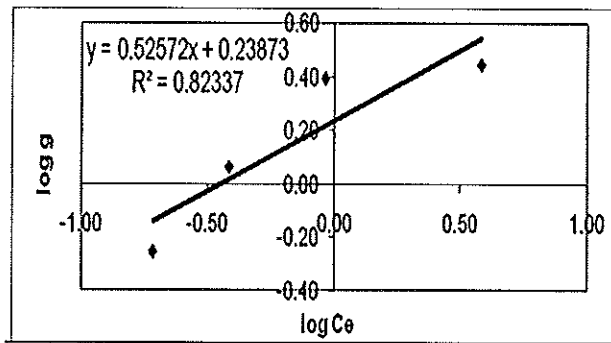
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.7 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



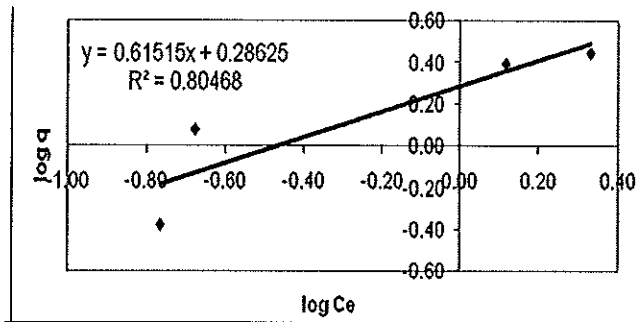
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.8 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรัง ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



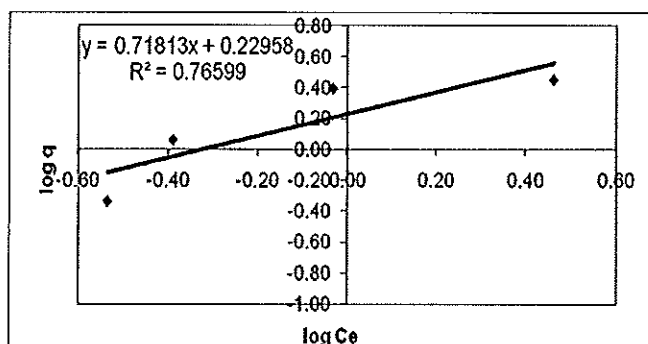
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.9 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6



ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.10 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

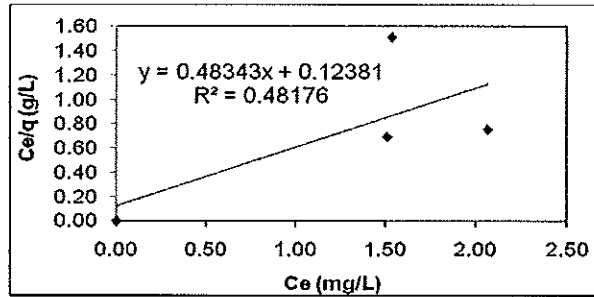


ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.11 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

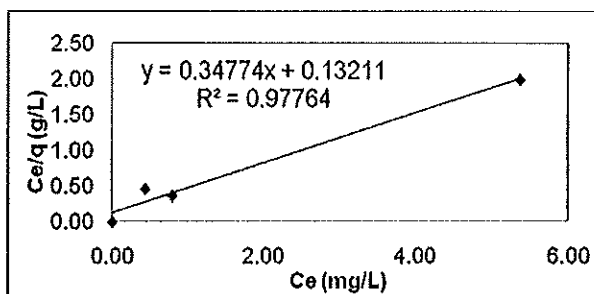


ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.12 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์และดินลูกรัง ในสารละลายสังกะสี พีเอช 6

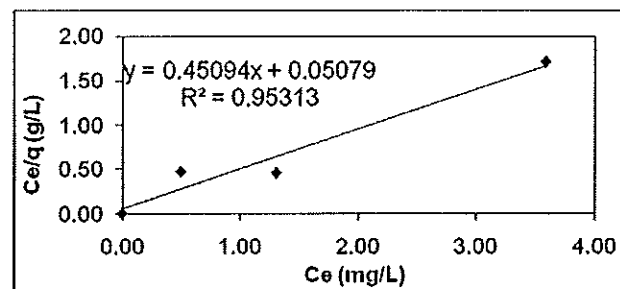
2. ไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิดในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



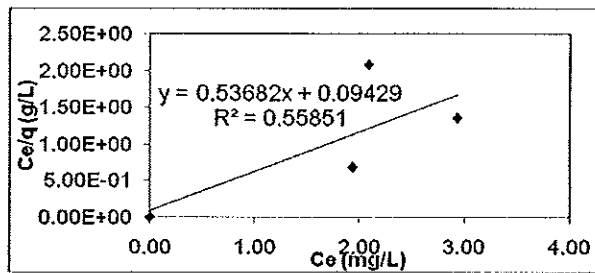
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.13 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



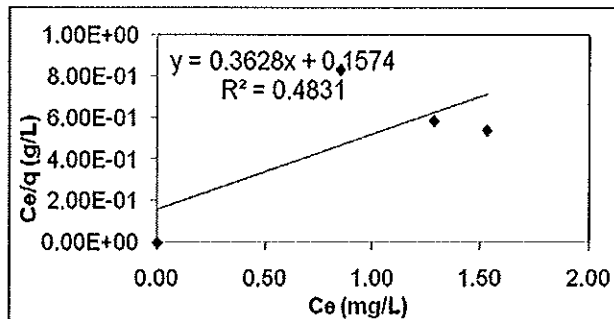
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.14 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



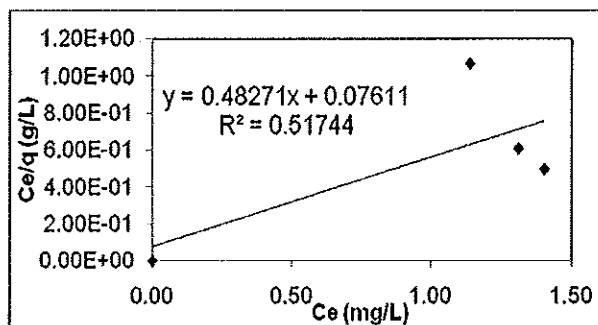
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.15 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรัง ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



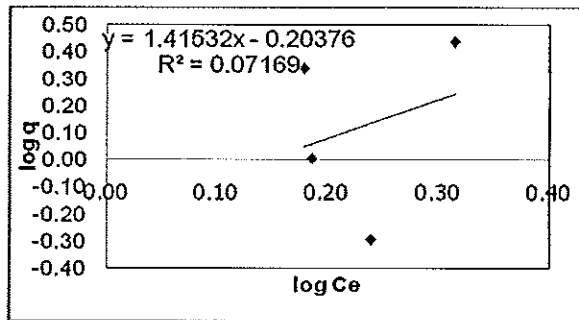
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.16 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



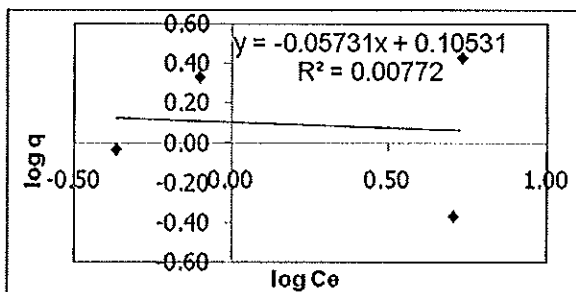
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.17 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



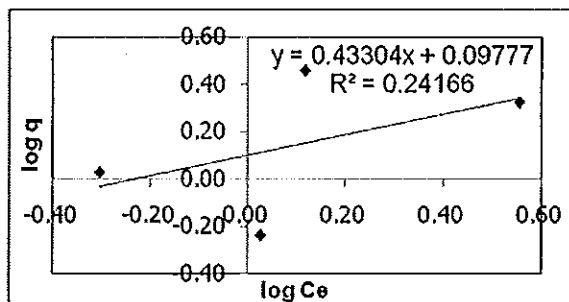
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.18 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



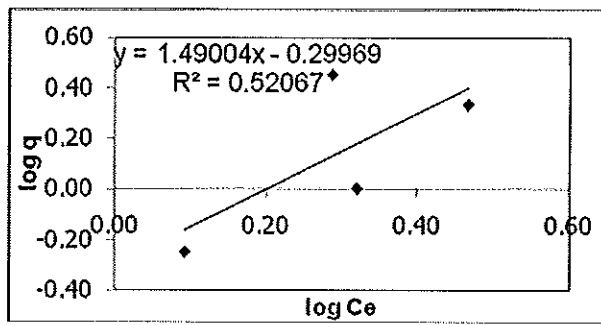
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.19 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบ่เหล็ก ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



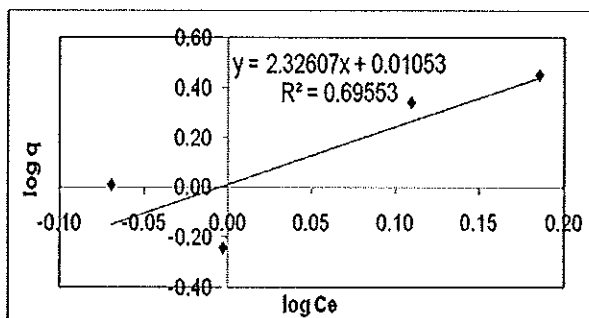
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.20 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



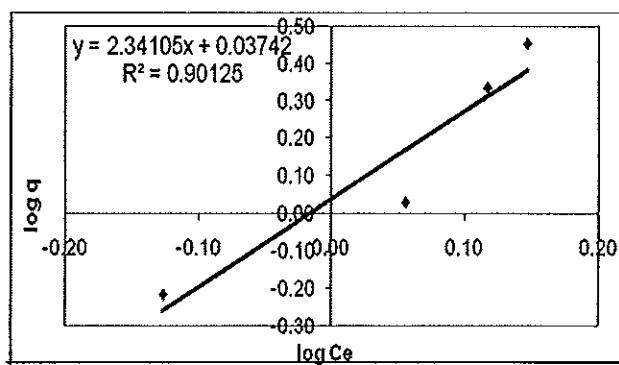
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.21 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินถุกร้าง ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6



ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.22 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

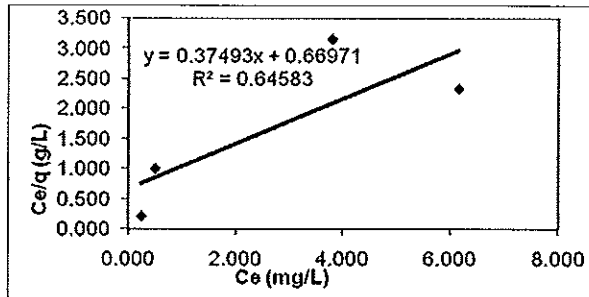


ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.23 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

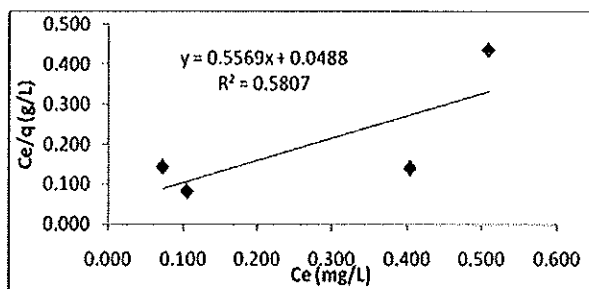


ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.24 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายตะกั่ว พีเอช 6

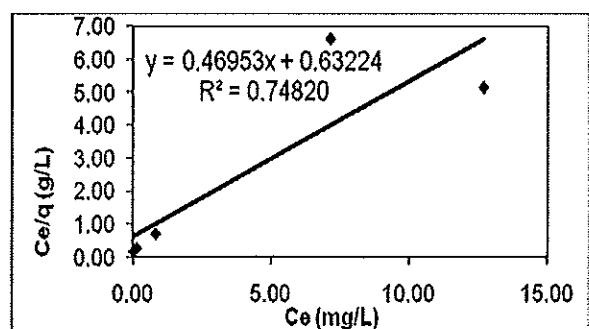
3. ไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิดในสารละลายผสม พีเอช 6



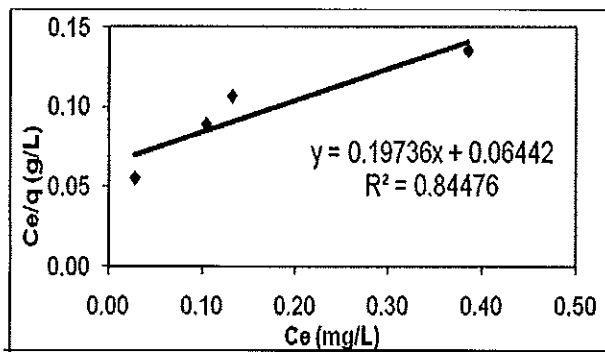
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.25 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายผสม พีเอช 6



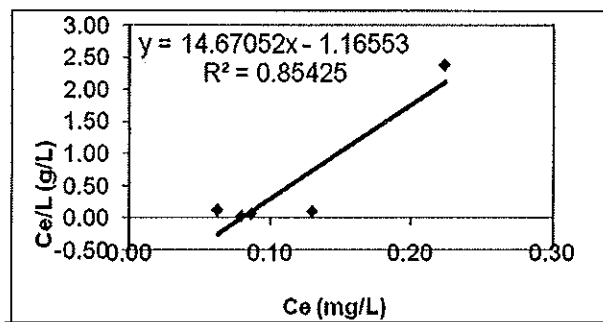
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.26 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



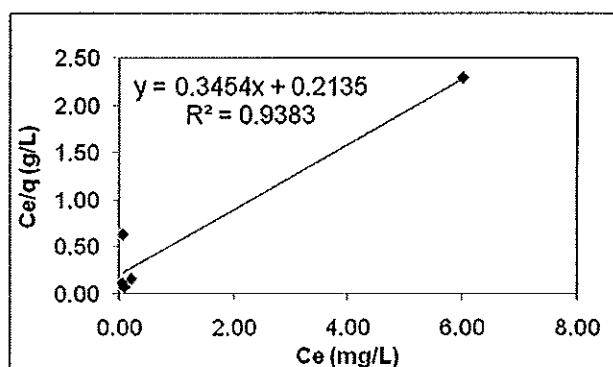
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.27 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรัง ในสารละลายผสม พีเอช 6



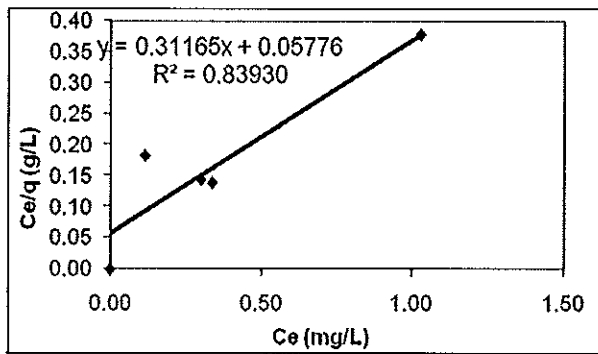
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.28 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



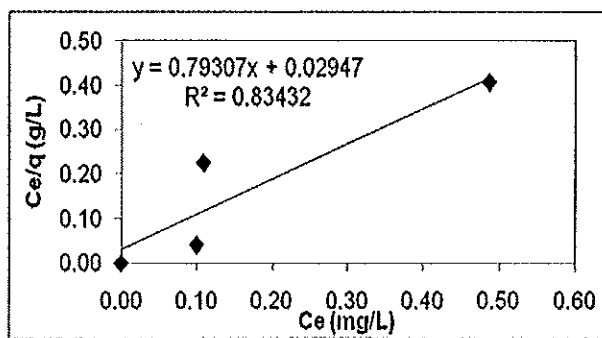
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.29 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



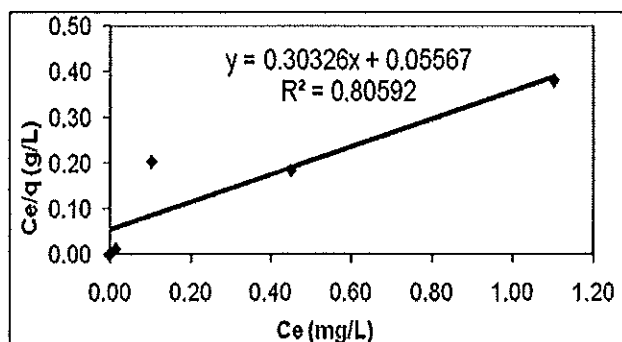
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.30 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



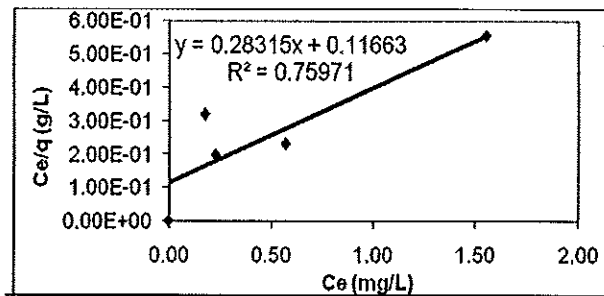
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.31 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายผสม พีเอช 6



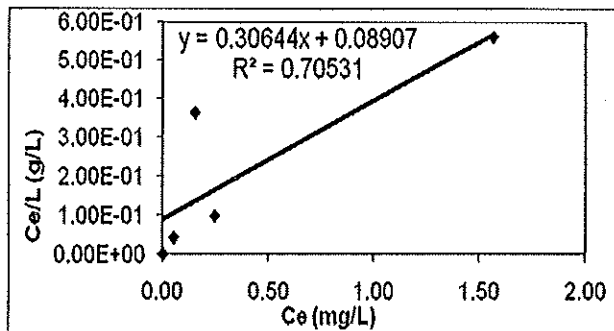
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.32 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



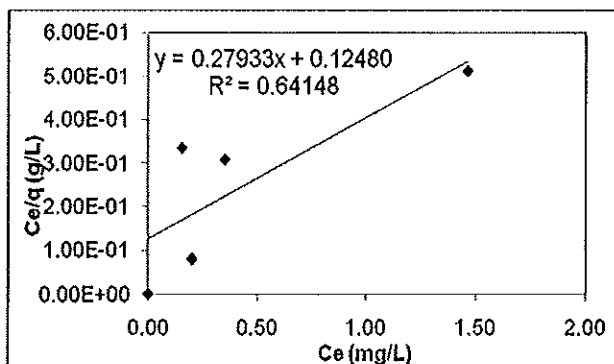
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.33 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยคินลูกรัง ในสารละลายผสม พีเอช 6



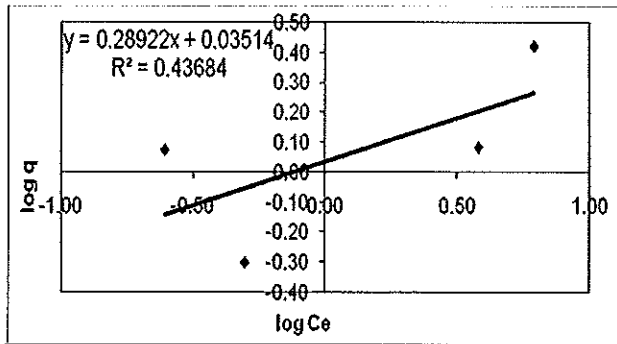
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.34 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



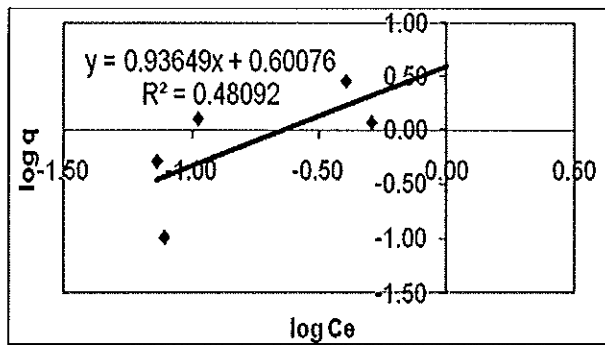
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.35 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



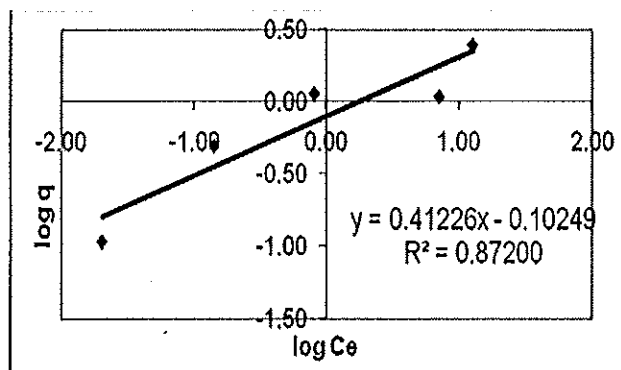
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.36 Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไบเหล็กดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



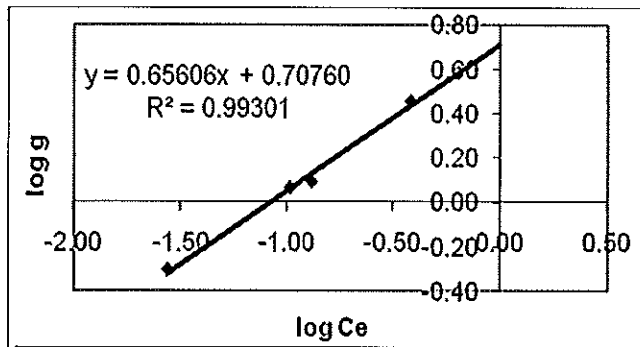
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.37 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็ก ในสารละลายผสม พีเอช 6



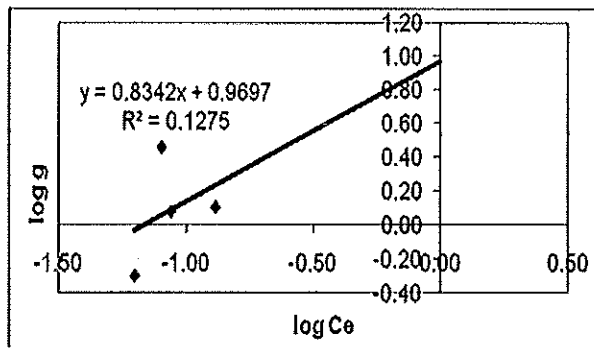
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.38 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



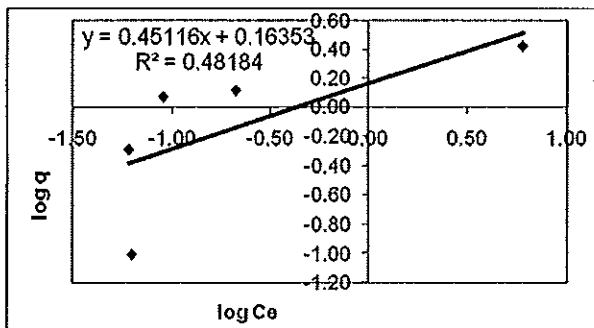
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.39 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรัง ในสารละลายผสม พีเอช 6



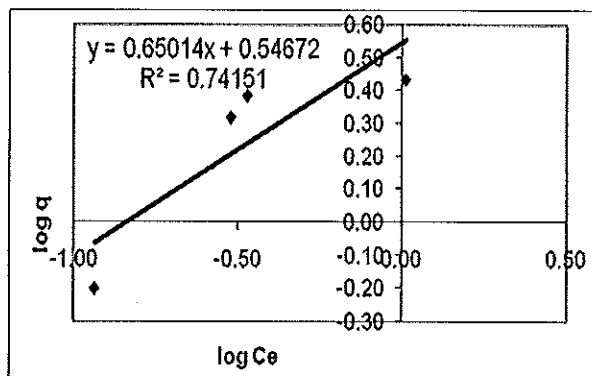
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.40 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



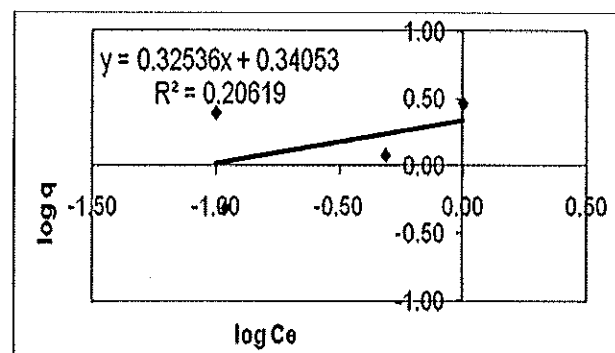
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.41 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



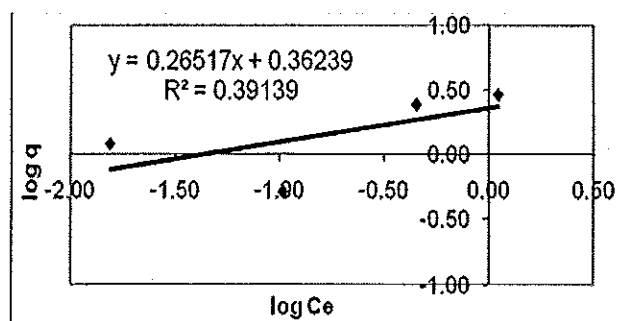
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.42 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี โดยผงตะไบผสมเหล็กดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



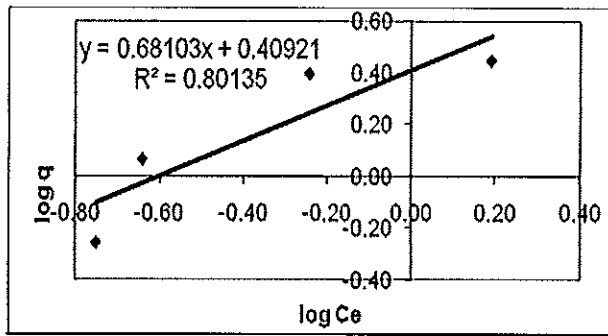
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.43 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไคร้แห้ง ในสารละลายผสม พีเอช 6



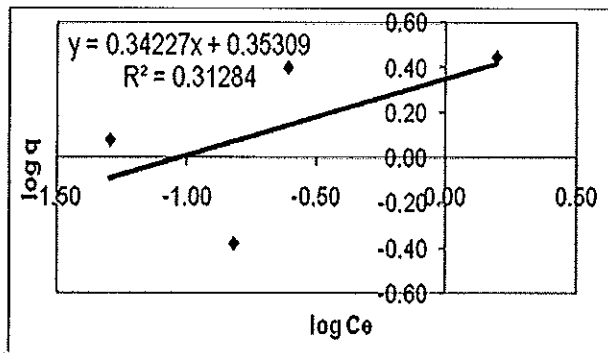
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.44 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



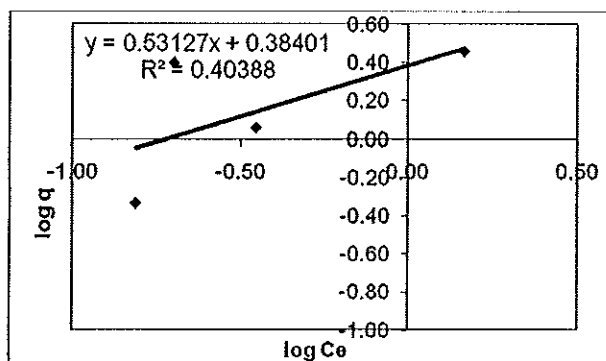
ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.45 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรัง ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.46 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไเปเหล็กผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.47 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยดินลูกรังผสมตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6



ภาพประกอบภาคผนวก ก-2.48 Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยผงตะไเปเหล็กผสมดินลูกรังและตะกอนจุลินทรีย์ ในสารละลายผสม พีเอช 6

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สังกะสีและตะกั่ว

1. การวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี (Zn) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

วิธีวิเคราะห์

(ก) Flame Atomic Absorption

(I) กรณีวัดปริมาณ Zn โดยตรง

1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม

2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption

3.วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Zn ที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2

4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Zn ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

(II) กรณีที่จำเป็นต้องทำให้ตัวอย่างเข้มข้นขึ้น (concentrate) หรือแยกสังกะสีให้ใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) วิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

-การสกัดด้วยสาร DDTC

1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดด้วยสาร DDTC

2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption

3.วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Zn ที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2

4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Zn ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

-การสกัดด้วยสาร APDC

1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดด้วยสาร APDC

2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption

3.วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Zn ที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2

4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Zn ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

ข้อควรระวัง

วิธี Flame Atomic Absorption นั้น Zn จะมีสภาพไวสูงมาก จึงได้รับการรบกวนจากส่วนประกอบอื่นน้อย ส่วนใหญ่แล้วจะสามารถวัดปริมาณ Zn ได้โดยการฉีดเข้าเครื่องโดยตรง เนื่องจากในสารเคมี ตัวทำละลาย รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทเครื่องแก้ว ต้องมีการตรวจสอบดูว่า ไม่มี Zn ละลายออกมาหรือมีการปนเปื้อน

(ข) Graphite Furnace Atomic Absorption

- 1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม
- 2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียม (10-50 มคก.) เข้าไปยัง Electric Heating Furnace ของเครื่อง Graphite Furnace Atomic Absorption (เพื่อทำให้ตัวอย่างแตกตัวกลายเป็นอะตอม (Atomizer) ผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน)
 - ขั้นทำให้แห้ง (Drying Stage) ($100-120^{\circ}\text{C}$, 30-40 วินาที)
 - ขั้นเผาให้เป็นเถ้า (Ashing Stage) ($600-1000^{\circ}\text{C}$, 30-40 วินาที)
 - ขั้นทำให้เกิดเป็นอะตอม (Atomization Stage) ($2200-2700^{\circ}\text{C}$, 3-6 วินาที)
- 3.วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Zn ที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2
- 4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Zn ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

ข้อควรระวัง

วิธี Graphite Furnace Atomic Absorption นั้น Zn จะมีสภาพไวสูงมาก จึงได้รับการรบกวนจากส่วนประกอบอื่นน้อย ส่วนใหญ่แล้วจะสามารถวัดปริมาณ Zn ได้โดยการฉีดเข้าเครื่องโดยตรง

(ค) ICP Emission Spectral Analysis

- 1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม
- 2.เติมสารละลาย Internal standard 1 มกค./มล. ในอัตราส่วน 1 มล.ต่อตัวอย่าง 100 มล. (Internal standard ที่ใช้ได้แก่ Yttrium (89), Indium (115), Bismus (209))

3. ถังสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าไปใน Inductively Coupled Plasma

4. วัดค่า Ion Count ณ.ค่า Mass/จำนวนประจุ, (m/z) ของไอออน Zn และไอออนของ Internal standard โดยการหาอัตราส่วนเพื่อวัดปริมาณ Zn

2. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว (Pb)

วิธีวิเคราะห์

(ก) Flame Atomic Absorption กรณีนี้จำเป็นต้องทำให้ตัวอย่างเข้มข้นขึ้น โดยการแยก Pb ให้ใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย วิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

(I) การสกัดด้วยสาร DDTC

1. เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดด้วยสาร DDTC
2. ถังสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption
3. วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Pb ที่ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2
4. กำหนดค่าความเข้มข้นของ Pb ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

(II) การสกัดด้วยสาร APDC

1. เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดด้วยสาร APDC
2. ถังสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าเครื่อง Flame Atomic Absorption
3. วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Pb ที่ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2
4. กำหนดค่าความเข้มข้นของ Pb ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

ข้อควรระวัง

กรณีตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่ จะไม่ใช้วิธีการย่อยสลาย Pb ด้วยกรด HNO_3 และ H_2SO_4 เพราะปฏิกิริยาเกิด $PbSO_4$ ซึ่งละลายน้ำได้ยาก นอกจากนี้ Pb ยังสามารถตกตะกอนร่วมกับ $CaSO_4$ และ $BaSO_4$ ได้ง่าย

ในกรณีวิเคราะห์ Pb ที่มีปริมาณน้อย ต้องระมัดระวังการปนเปื้อน Pb จากสารเคมีที่ใช้ในการเตรียม และการสูญหายในระหว่างการวิเคราะห์เป็นพิเศษ

(จ) Graphite Furnace Atomic Absorption

1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม

2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียม (10-50 มคล.) เข้าไปยัง Electric Heating Furnace ของเครื่อง Graphite Furnace Atomic Absorption (เพื่อทำให้ตัวอย่างแตกตัวกลายเป็นอะตอม (Atomizer) ผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน)

- ขั้นทำให้แห้ง (Drying Stage) (100-120° ซ, 30-40 วินาที)

- ขั้นเผาให้เป็นเถ้า (Ashing Stage) (600-1000° ซ, 30-40 วินาที)

- ขั้นทำให้เกิดเป็นอะตอม (Atomization Stage) (2200-2700° ซ, 3-6 วินาที)

3.วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ Pb ที่ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตร โดยใช้ Air+ก๊าซ C_2H_2

4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Pb ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

ข้อควรระวัง

วิธีนี้ได้รับผลกระทบจากกรดและเกลือได้ง่าย ดังนั้นควรเลือกใช้วิธีนี้กับตัวอย่างที่มีผลกระทบน้อย

(ค) ICP Emission Spectral Analysis

1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม

2.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าไปใน Inductively Coupled Plasma

3.วัดค่า Emission Strength ของ Pb ที่ความยาวคลื่น 220.351 นาโนเมตร

4.คำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Pb ในตัวอย่าง จากกราฟของสารละลายมาตรฐาน (Calibration Curve)

(ง) ICP Mass Spectrometry

- 1.เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่เหมาะสม
- 2.เติมสารละลาย Internal standard 1 มก./มล. ในอัตราส่วน 1 มล.ต่อตัวอย่าง 100 มล.
(Internal standard ที่ใช้ได้แก่ Yttrium(89), Indium (115), Bismus(209))
- 3.ฉีดสารละลายที่ได้จากการเตรียมเข้าไปใน Inductively Coupled Plasma
- 4.วัดค่า Ion Count ณ.ค่า Mass/จำนวนประจุ, (m/z) ของไอออน Pb และไอออนของ Internal standard โดยการหาอัตราส่วนเพื่อวัดปริมาณ Pb

วิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์โลหะหนัก**(ก) การชะละลายส่วนที่เป็นโลหะ (Elutriation)**

(I) การต้มเคี่ยวด้วยกรด HNO_3 หรือ HCl ใช้กับตัวอย่างที่แทบจะไม่มี ความขุ่น

- 1.ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 100 มล.
- 2.เติมกรด HNO_3 หรือ HCl 5 มล. ต้มให้เดือดประมาณ 10 นาที
- 3.ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น

(II) การย่อยสลายด้วยกรด HNO_3 หรือ HCl ใช้กับตัวอย่างที่มีสารแขวนลอย

อินทรีย์ เช่น ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ ซัลไฟด์ ฟอสเฟต

- 1.ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 100 มล.
- 2.เติมกรด HNO_3 หรือ HCl 5 มล.
- 3.ให้ความร้อนจนปริมาตรของของเหลวเหลือประมาณ 15 มล.(ส่วนที่ไม่ละลายน้ำให้กรองแยกด้วยกระดาษกรอง 5C แล้วล้างด้วยน้ำอุ่น)
- 4.ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น

(ข) การย่อยสลายสารอินทรีย์

(I) การย่อยสลายด้วยกรด HNO_3 และ H_2SO_4 เป็นวิธีย่อยสลายมาตรฐานที่ใช้ได้กับตัวอย่างหลายชนิด แต่สำหรับวิธีนี้สารละลายที่ได้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ฉีดใน Flame Atomic Absorption และ ICP Emission Spectral Analysis เนื่องจากกรด H_2SO_4 เหลือตกค้างอยู่

- 1.ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 100 มล.
- 2.เติมกรด HNO_3 5-10 มล.

3.ให้ความร้อนบนเตาไฟฟ้า (Hot Plate) จนปริมาตรของของเหลวเหลือประมาณ 10 มล.

4.เติมกรด HNO_3 และกรด H_2SO_4 (1:1) 10 มล.

5.ให้ความร้อนจนเกิดควันสีขาวของ H_2SO_4

6.ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วกรองส่วนที่ไม่ละลายออก

7.ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น

8.กรณีสารอินทรีย์ย่อยสลายไม่เพียงพอให้เติมกรด HNO_3 อีก 10 มล.แล้วทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3

(II) การย่อยสลายด้วยกรด HNO_3 และ HClO_4 ใช้ในกรณีที่ตัวอย่างประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ยาก วิธีนี้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีและการใช้วิธีนี้ต้องระมัดระวังให้มากเพราะอาจเกิดการระเบิดขึ้นได้ ซึ่งข้อควรระวังที่จำเป็นมีดังนี้ ควรย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด HNO_3 เสียก่อนเพื่อทำลายสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย

-การเติม HClO_4 ต้องเติมในสารละลายที่อุณหภูมิลดต่ำลงแล้ว

-ควรให้มีกรด HNO_3 อยู่ด้วยขณะย่อยสลายด้วยความร้อน

-อย่าปล่อยให้สารตัวอย่างระเหยจนกระทั่งแห้งแข็ง

1.ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 100 มล.

2.เติมกรด HNO_3 5-10 มล.

3.ให้ความร้อนบนเตาไฟฟ้า (Hot Plate) จนปริมาตรของของเหลวเหลือประมาณ 10 มล.

4.เติม

5.ค่อยๆเติมกรด HClO_4 10 มล. ลงไปที่ตะกอน

6.ให้ความร้อนจนเกิดควันสีขาวของ HClO_4

7.ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วกรองส่วนที่ไม่ละลายออก

8.ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล. ด้วยน้ำกลั่น

9.กรณีสารอินทรีย์ย่อยสลายไม่เพียงพอให้เติมกรด HNO_3 อีก 5 มล.แล้วทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุทธิสา ยาอีค
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120090

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (กระบวนการ)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2550

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สุทธิสา ยาอีค, สกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ธนิต เถлимยานนท์. การดูดซับ ไอออนของสังกะสีและตะกั่วจากสารละลายน้ำด้วยวัสดุดูดซับแบบเดี่ยวและแบบผสม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา, ชลบุรี, 20-21 ตุลาคม 2551.