

การกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม  
ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก



นาย วรพล ชมะโชติ

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

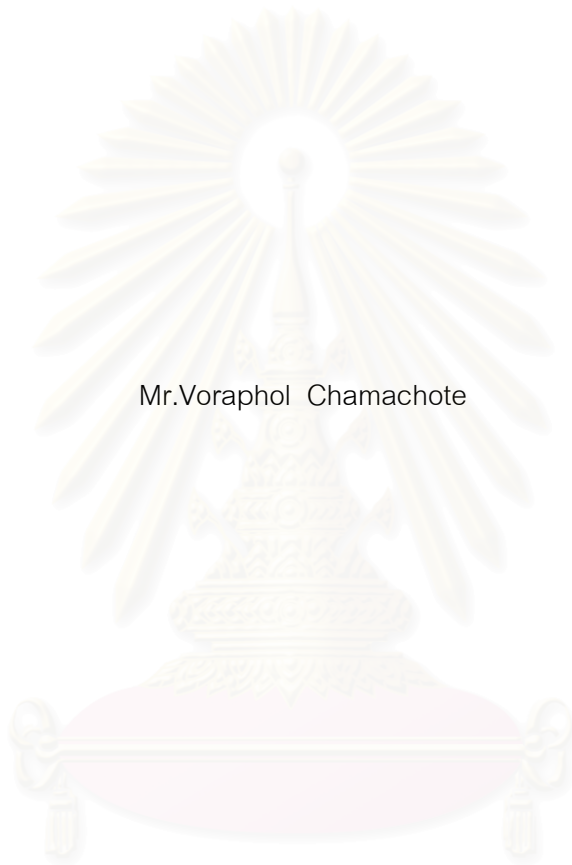
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE  
BY ELECTROKINETIC PROCESS

Mr.Voraphol Chamachote



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

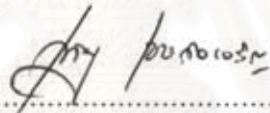
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก
โดย	นายวรพล ชมะโชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ตีรเอก ลาวันยศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โสธาทพันธุ์)

วรพล ชมะโชติ : การกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคไนติก. (REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE BY ELECTROKINETIC PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุธา ขาวเขียว, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 161 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคไนติก โดยใช้ถึงปฏิกรณ์จำลองที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ ภายในบรรจุกากตะกอนที่ปนเปื้อน และที่ปลายทั้งสองข้างมีแกรไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบ การกำจัดโลหะหนักจะใช้วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้าเพื่อให้โลหะหนักเคลื่อนที่จากกากตะกอนไปยังขั้วไฟฟ้า โดยในการทดลองจะปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักดังนี้ 1.) ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่า คือ 1, 1.5 และ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร 2.) ระยะเวลาการเกิดกระบวนการจะใช้เวลาดังแต่ 3, 5 และ 7 วัน 3.) กระบวนการไหลที่ขั้วบวกจะเปรียบเทียบกับของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำประปา และกรดอะซิติก จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักก่อนและหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคไนติก ซึ่งมีด้วยกัน 3 วิธี คือ หาปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีการสกัดตามลำดับชั้น จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อใช้น้ำประปาเป็นกระบวนการไหล ที่ค่าความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด รองลงมา คือ 1.5 และ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพ กล่าวคือ ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น และเมื่อเปลี่ยนกระบวนการไหลเป็นกรดอะซิติก โดยให้ค่าความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร เปรียบเทียบกับการทดลองที่มีกระบวนการไหลเป็นน้ำประปาที่ค่าความต่างศักย์เดียวกัน พบว่า การปรับเปลี่ยนมาใช้กรดอะซิติกทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า รูปแบบของโลหะหนักที่สามารถกำจัดได้ง่ายที่สุด คือ รูปแบบในชั้นที่ 1 ได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต รองลงมา คือ รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ส่วนรูปแบบที่กำจัดได้ยาก ได้แก่ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์ และรูปแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าหลังการทดลองค่าพีเอชของกากตะกอนเปลี่ยนไป กล่าวคือ ค่าพีเอชบริเวณใกล้ขั้วบวกจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากไฮดรอกซิลไอออน และบริเวณใกล้ขั้วลบค่าพีเอชจะต่ำลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในระหว่างการทดลองมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ทำให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... วรพล ชมะโชติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... น. น.....  
ปีการศึกษา 2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์.....



# # 4870615321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTROKINETIC PROCESS / SEQUENTIAL EXTRACTION / HEAVY METALS / SLUDGE

VORAPHOL CHAMACHOTE: REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER SLUDGE BY ELECTROKINETIC PROCESS. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASST.PROF. PICHAYA RACHADAWONG, PhD. 161 pp.

The objective of this research was to study heavy metals removal from industrial wastewater sludge by electrokinetic process. This study used laboratory scale reactor containing contaminated sludge. Both the anode and cathode were graphite electrodes. In the experiment electrical field was applied across sludge column transport in order to heavy metals toward the electrodes. Voltage was varied at 1, 1.5 and 2 v/cm. Reaction time was varied from 3 to 7 day. Tap water and acetic acid were used as process fluid. Afterwards, the quantity and fraction of heavy metals before and after treatment was analyzed by 3 methods. The first method was microwave digestion for totals metals, the second method was Waste Extraction Test (WET) and the third method was sequential extraction for fractionated metals. The removal efficiencies of heavy metals when tap water was used as process fluid at 2 v/cm flow rate have highest efficiencies. The efficiency decreases as the tap water flow rate decreases. Electric current have an effect to heavy metals removal. When process fluid was changed to acetic acid the removal efficiencies increase. This resulted of the water electrolysis reaction in the cathode was neutralized by acetic acid. Moreover, the removal efficiency of the fractions of heavy metals depends on their mobility as follows: water soluble > exchangeable > bounded to carbonate > bounded to Fe oxide and bounded to Mn oxide > bounded to organic matter and sulfide > residual. After the experiment, pH of sludge was changed because higher OH<sup>-</sup> near cathode, and higher H<sup>+</sup> near anode. Electrical current decreased with time because electrolysis reaction generated hydroxide precipitate, blocking transport of electron.

Department... Environmental Engineering ..Student's signature... VORAPHOL CHAMACHOTE  
 Field of study... Environmental Engineering ..Advisor's signature... S.O.  
 Academic year 2007 Co-advisor's signature... Pichaya R.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งสละเวลาคอยให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนทุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย และห้อง OECF

ขอขอบคุณ คุณศุภชัย ประสพโชค ผู้จัดการแผนกวิศวกรรม และคุณบุษบา วิศวกรสิ่งแวดล้อม บริษัท พี.ซี.ที.ที. จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอน คุณสมชาย และคุณธานินทร์ บริษัท สู่ชี ยูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แท่งแกรไฟต์

ขอขอบคุณคุณครูวันทนา คุณครูจันทวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการทำวิจัย และวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน พี่เอก พี่เอ๋ พี่ไธต พี่เอมมา พี่แป็บ พี่ฟูช พี่แมว มิ่ง บิว ตู๊กตา เส เมือง ดา อ่อง อาร์ จี๊เบ็ อ้อ ตัง เบิร์ต ออม บาส เอก พลอย อู๋ โบว์ และเพื่อนๆ ทุกคน

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย คุณปู่ คุณย่า น้องเอ็ม น้องอ้อฟ และน้องเหม้ม ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความหมายและแหล่งที่มาของโลหะหนัก.....	5
2.1.1 ความหมายของโลหะหนัก.....	5
2.1.2 แหล่งกำเนิดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม.....	5
2.2 การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ.....	6
2.2.1 การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ.....	6
2.2.2 การจางหายของโลหะหนักในแหล่งน้ำ.....	7
2.3 โลหะหนักในดินตะกอน.....	7
2.3.1 องค์ประกอบที่มีกำเนิดมาจากเปลือกโลก.....	7
2.3.2 น้ำ.....	8
2.3.3 กระบวนการทางชีวภาพ.....	11
2.3.4 บรรยากาศ.....	11
2.4 การศึกษาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน.....	12
2.4.1 การศึกษาในรูปปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบในกากตะกอน ด้วยวิธีการย่อยสลายหมด.....	12
2.4.2 การศึกษาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในกากตะกอน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับชั้น.....	12
2.5 การสกัดตามลำดับชั้น.....	13

	หน้า
2.6 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.....	15
2.6.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	15
2.6.2 ขั้วไฟฟ้า.....	18
2.6.3 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	19
2.6.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า.....	19
2.6.5 ค่าการนำไฟฟ้า.....	20
2.6.6 ชั้นไฟฟ้าคู่.....	20
2.7 กระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	22
2.7.1 ข้อดีของกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	22
2.7.2 ข้อเสียของกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	23
2.7.3 ผลของกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	23
2.8 หลักการของกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	23
2.8.1 กลไกการขนส่ง.....	24
2.8.2 ปฏิกริยาทางเคมีฟิสิกส์.....	28
2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 แผนการวิจัย.....	35
3.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักก่อนการกำจัด ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	35
3.1.2 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรไคนิติก.....	35
3.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักหลังการกำจัด ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	36
3.1.4 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	36
3.2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	38
3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	39
3.3.1 สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนัก.....	39
3.3.2 สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก.....	40



	หน้า
3.4 การเตรียมสารละลายเคมีและสารละลายมาตรฐาน.....	43
3.4.1 สารละลายเคมี.....	43
3.4.2 สารละลายมาตรฐาน.....	43
3.5 กากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.6 การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของกากตะกอน.....	46
3.7 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	46
3.7.1 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ.....	46
3.7.2 ขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	48
3.7.3 ขั้นตอนการสกัดตามลำดับชั้น.....	50
3.7.4 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	53
3.7.5 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักและการกระจายตัวของรูปแบบ ของโลหะหนักในกากตะกอนหลังการกำจัดด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรโคเนติก.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	55
4.1 ผลการการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักก่อน การกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	55
4.1.1 ผลการหาปริมาณโลหะหนักรวม (Total Metals) ทุกรูปแบบ ในกากตะกอนด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลาย ไมโครเวฟ (Microwave Digestion).....	55
4.1.2 ผลการหาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	56
4.1.3 ผลการหาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบใน กากตะกอนด้วยวิธีการสกัดตามลำดับชั้น .....	57
4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักในกากตะกอนหลังการกำจัด ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	59
4.2.1 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	59
4.2.2 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	66

4.2.3 กำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	72
4.2.4 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์.....	78
4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก...	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	161

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาหาค่าความต่างศักย์.....	38
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา.....	38
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการไหล.....	39
ตารางที่ 3.4 การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของกากตะกอน.....	46
ตารางที่ 3.5 สารที่ใช้สกัด ระยะเวลา พีเอช และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการสกัดตามลำดับขั้น.....	51
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบมาตรฐานโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กับผลการทดลอง ตามวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ .....	56
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบมาตรฐานโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กับผลการทดลองตามวิธี Waste Extraction Test (WET) .....	56
ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างกากตะกอนทั้ง 3 วิธี.....	58
ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดโดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	62
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	63
ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดโดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	68
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	69
ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดโดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	74
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	75
ตารางที่ 4.10 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดโดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์...80	80
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์.....	81

ตารางที่ ก.1	คุณสมบัติของกากตะกอนก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรโคเนติก.....	90
ตารางที่ ก.2	ปริมาณโลหะหนักรวมก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรโคเนติก.....	90
ตารางที่ ก.3	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	91
ตารางที่ ก.4	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	91
ตารางที่ ก.5	ปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	93
ตารางที่ ก.6	ปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	94
ตารางที่ ก.7	ปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	95
ตารางที่ ก.8	ปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก.....	96
ตารางที่ ก.9	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	97
ตารางที่ ก.10	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	98
ตารางที่ ก.11	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	99
ตารางที่ ก.12	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก.....	100
ตารางที่ ก.13	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	101
ตารางที่ ก.14	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	105

ตารางที่ ก.15	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	109
ตารางที่ ก.16	ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก.....	113



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดมีรอยต่อของเหลว.....	16
รูปที่ 2.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดไม่มีรอยต่อของเหลว.....	17
รูปที่ 2.3 ชั้นไฟฟ้าคู่ที่พื้นผิวอิเล็กโทรดเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกแต่อิเล็กโทรด.....	21
รูปที่ 2.4 กลไกการขนส่งและกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์.....	23
รูปที่ 2.5 กระบวนการไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิสของของเหลวข้ามผ่านกาทะกอน.....	25
รูปที่ 2.6 การจัดเรียงของไอออนภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในดินและความเร็ว ของน้ำในโพรงของเหลว.....	26
รูปที่ 2.7 กลไกอิเล็กโทรไมเกรชันข้ามผ่านดินภายใต้สนามไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 2.8 กระบวนการอิเล็กโทรฟรีซิส.....	27
รูปที่ 2.9 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าและกลไกการเคลื่อนที่.....	28
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิส.....	29
รูปที่ 3.1 แผนการทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกาทะกอนด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรโคเนติก.....	37
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และถังปฏิกรณ์จำลองสำหรับศึกษากระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	41
รูปที่ 3.3 ขนาดและชิ้นส่วนของถังปฏิกรณ์จำลองสำหรับศึกษากระบวนการ อิเล็กโทรโคเนติก.....	42
รูปที่ 3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน.....	44
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมกาทะกอน.....	45
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ.....	47
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	49
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสกัดตามลำดับขั้น.....	52
รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของกาทะกอนแต่ละส่วนที่ทำการแบ่ง.....	53
รูปที่ 3.10 การศึกษาค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการ เกิดกระบวนการ.....	54
รูปที่ 3.11 การศึกษากระบวนการไหล.....	55
รูปที่ 4.1 สัดส่วนรูปแบบของโลหะหนักแต่ละชนิดในกาทะกอนก่อนการกำจัด ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก.....	57
รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงปริมาณโลหะหนักที่หาได้จาก 3 วิธี.....	59

รูปที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	61
รูปที่ 4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ความต่างศักย์คงที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	64
รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	65
รูปที่ 4.6 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	67
รูปที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	70
รูปที่ 4.8 ค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	71
รูปที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	73
รูปที่ 4.10 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ความต่างศักย์คงที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	76
รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา.....	77
รูปที่ 4.12 ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5, 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ .....	79
รูปที่ 4.13 ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์.....	82
รูปที่ 4.14 ค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์.....	83

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันนี้ การพัฒนาทางเศรษฐกิจทำให้เกิดความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมมีมากขึ้น รวมทั้ง โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตแบตเตอรี่และโรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเหล่านี้ ทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและเคมีมักมีโลหะหนักสะสมอยู่ เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จะทำให้พีเอชเป็นกลางซึ่งโลหะหนักจะละลายน้ำได้น้อยและสะสมตัวอยู่ในกากตะกอน ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการบำบัดและจัดเก็บกากตะกอนที่เหมาะสม ขั้นตอนสุดท้ายของการกำจัดกากตะกอนคือการฝังกลบซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อม โดยความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในช่วงอันตรายหรือไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของโลหะหนักในกากตะกอน รูปแบบที่สำคัญได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ รูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลิไฟด์ โดยรูปแบบของโลหะหนักในกากตะกอนสามารถหาได้โดยใช้วิธีการสกัดตามลำดับขั้น ดังนั้น ข้อมูลด้านปริมาณและลักษณะของโลหะหนักจึงมีความจำเป็นต่อการเลือกแนวทางในการจัดการกากตะกอน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic Process) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง โดยใช้หลักการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้โลหะหนักเคลื่อนที่จากกากตะกอนไปยังขั้วไฟฟ้า โดยในการศึกษาจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (microwave digestion) วิธี Waste Extraction Test (WET) และจำแนกรูปแบบของโลหะ (fractionated) ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) โดยจะใช้ผลที่ได้จากการทดลองในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของโลหะหนักกับประสิทธิภาพในการกำจัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนและออกแบบการกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (total metals) ที่มีอยู่ในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้วิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (microwave digestion) กับวิธี Waste Extraction Test (WET) และจำแนกรูปแบบของโลหะ (fractionated) โดยใช้วิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกในการแยกโลหะหนักออกจากกากตะกอน
3. เพื่อประมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท พีซีทีที จำกัด จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นบริษัทผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (flexible printed circuits) กากตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะเก็บในส่วนของถังทำชั้น (thickener) โดยทำการศึกษามีโลหะหนัก 8 ชนิดได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) ซีลีเนียม (Se) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) สำหรับการทดลองในส่วน of กระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกจะใช้ถังปฏิกรณ์จำลองในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale reactor)
2. หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548
3. หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนในรูปปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบในกากตะกอนด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (microwave digestion) โดยใช้วิธีมาตรฐานที่ 3051 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US EPA, 2005)
4. หาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในกากตะกอน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) โดยใช้วิธีของ BCR (Bureau Communautaire de Référence หรือในชื่อภาษาอังกฤษเรียกว่า Community Bureau of Reference (Quevauviller, 2002)
5. ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก (electrokinetic) โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการเกิดกระบวนการ และกระบวนการไหล (processing Fluid) ที่ขั้วบวก (anode)
6. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของโลหะหนักกับประสิทธิภาพในการกำจัด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการและแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการกำจัดโลหะหนักในกากตะกอน
2. เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนและออกแบบการกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายและแหล่งที่มาของโลหะหนัก

##### 2.1.1 ความหมายของโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป และมีเลขอะตอม 23 – 92 อยู่ในคาบที่ 4 – 7 ตัวอย่างเช่น ปรอท แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม เหล็ก แมงกานีส ฯลฯ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (trace metals) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มทรานสิชัน (transition elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มของธาตุรีเพรสเซนต์ตีฟ (representative elements) คือตะกั่ว สารหนู พลวง และซีลีเนียม โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ และดินตะกอน เนื่องจากมีความคงตัว ไม่สลายตัวโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ทำให้บางส่วนสามารถสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ (Logan และ Feltz, 1985) ซึ่งผลทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไป การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำมีสาเหตุเกิดจากธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การผุพังของหิน และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ชุมชนเกษตรกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากปัจจัยร่วมทั้งสอง เช่น ในฤดูมรสุมน้ำฝนที่ไหลผ่านชุมชนโดยเฉพาะบริเวณที่มีการคมนาคมหนาแน่นจะมีปริมาณโลหะหนักในน้ำและดินตะกอนในบริเวณนั้นมาก แต่ทั้งนี้โลหะหนักที่พบในแหล่งน้ำส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ (Browne และ คณะ, 1982)

##### 2.1.2 แหล่งกำเนิดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

ภารดี (2541) กล่าวถึง แหล่งกำเนิดของโลหะหนักที่พบในสิ่งแวดล้อมมาจาก 7 แหล่งด้วยกัน คือ

1. การชะล้างจากแผ่นดิน โลหะหนักที่ได้จากแหล่งนี้ถือว่าเป็นค่าที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (background level) ของบริเวณนั้นๆ ซึ่งพบว่าพื้นที่ใดเป็นแหล่งแร่ของโลหะหนักก็จะพบว่าน้ำในบริเวณนั้น มีโลหะหนักชนิดนั้นๆ สูงด้วย

2. อุตสาหกรรมถลุงแร่โลหะ ในระหว่างการถลุงแร่จะมีโลหะหนักปนออกมากับน้ำทิ้งด้วยเสมอ

2. การใช้โลหะและสารประกอบโลหะในอุตสาหกรรม เช่น ใช้เกลือของโครเมียมในการฟอกหนัง ใช้สังกะสีในการทำท่อ เป็นต้น ก็เป็นที่มาของโลหะหนักสู่แหล่งน้ำ

4. การเผาไหม้เชื้อเพลิง การผลิตปูนซีเมนต์และอิฐบล็อก เชื้อเพลิงประเภทถ่าน น้ำมันจะมีโลหะหนักบางตัวสูง เช่น สารหนู สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล ในการผลิตซีเมนต์พบว่ามีการปล่อยโลหะหนัก สังกะสี ตะกั่ว และสารหนูด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณรอบๆ ที่มีสิ่งก่อสร้างประเภทอิฐจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ด้วยค่อนข้างสูง

5. โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น พบอโลหะมีเนียมจากโรงงานทำภาชนะพวกอโลหะมีเนียมและโรงงานอัลลอยด์ สารหนูจากโรงงานผลิตสารฆ่าแมลง แคดเมียมจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานทำสีและโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก โคโรเมียมจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานสีและสารฆ่าแมลง ตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่ โรงงานสี และโรงกลั่นน้ำมัน แมงกานีสจากโรงงานสี โรงงานผลิตแบตเตอรี่แห้ง และโรงงานอัลลอยด์ นิกเกิลจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานอัลลอยด์ พลวงจากโรงงานสี โรงย้อมสีและสารฆ่าแมลง เงินจากอุตสาหกรรมการผลิตและล้างฟิล์ม และโรงงานชุบโลหะ สังกะสีจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานทำสี เป็นต้น

6. ยวดยานพาหนะ เป็นแหล่งใหญ่ในการเกิดการสะสมตัวของตะกั่วในบรรยากาศ และในแหล่งชุมชน

7. การรั่วออกจากขยะ การรั่วของโลหะหนักจากขยะจะมีผลมากต่อแหล่งน้ำบนบกหรือบริเวณชายฝั่งทะเล

## 2.2 การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ

โลหะหนักชนิดต่าง ๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำสามารถสะสมตัวอยู่กับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน ฟีซ สัตว์น้ำ หรือของแข็งแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่าง ๆ กัน โลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมหรือการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกกล่าวรายละเอียดได้ดังนี้

### 2.2.1 การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ

โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำ มีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ(Dissolved) และอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย (suspended solid) ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารที่อยู่ในรูปสารแขวนลอย และในรูปที่ละลายน้ำที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในรูปสารแขวนลอยจะมีระยะเวลาที่อยู่ในน้ำ (residence time) ยาวนานกว่ารูปที่ละลายน้ำ และจากการที่น้ำมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาที่มีผลทำให้ตะกอนใต้น้ำลอยตัวขึ้น (resuspension) จึงมีทั้งการดูดซับ (adsorption) และการคาย (desorption) ของโลหะหนักระหว่างน้ำและตะกอน

## 2.2.2 การจางหายของโลหะหนักในแหล่งน้ำ

ผกา (2535) ได้กล่าวถึง การจางหายของโลหะหนักในแหล่งน้ำไว้ดังนี้คือ ปริมาณโลหะหนักจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เมื่อไหลลงสู่แหล่งน้ำนอกจากจะถูกทำให้เจือจางลงและกระจายออกไปแล้ว

ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักเหล่านี้ยังอาจลดลงได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

1. การตกผลึก (precipitation) ถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าค่าการละลายได้ (solubility) ของโลหะนั้นๆ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับไอออนลบในน้ำพวกคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ หรือคลอไรด์ จะทำให้เกิดการตกผลึกขึ้น อย่างไรก็ตามใน แหล่งน้ำที่มีภาวะมลพิษอันเนื่องมาจากในน้ำมีสารอินทรีย์อยู่มาก ทำให้น้ำในบริเวณนั้นมีออกซิเจนละลายอยู่น้อย โลหะหนักจำพวกสังกะสี ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และเงิน จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้น้อยมาก การตกผลึกก็จะเกิดขึ้นมาก นอกจากนี้ยังพบว่าสภาพที่เป็นด่าง การตกตะกอนของโลหะหนักเหล่านี้จะเกิดได้ดีขึ้นด้วย

2. การดูดซับ (adsorption) โลหะหนักในแหล่งน้ำสามารถถูกกำจัดโดยการดูดซับไว้ที่ผิวตะกอนในน้ำ เช่น พวกดิน แพลงก์ตอน สารประกอบเหล็ก และสารประกอบแมงกานีสีเอ็ม และพร้อมที่จะตกตะกอนลงมา

2. การดูดกลืน (absorption) และการแพร่ออกมาใหม่ (redistribution) ด้วยสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำเป็นกระบวนการทางชีววิทยาในการกำจัดโลหะหนัก เช่น พวกสัตว์ในดินจะไปช่วยเร่งให้อุณหภูมิต่าง ๆ ของทั้งโลหะหนักทำให้เกิดการรวมตัวกัน โดยวิธีการกินเข้าไปแล้วแพร่กระจายออกมาใหม่ด้วยการถ่ายออกมากับอุจจาระ หรือโดยการลอกคราบทิ้ง รวมทั้งพวกซากพืชและสัตว์ที่ตายในทะเล

## 2.3 โลหะหนักในดินตะกอน (กัลยา, 2544)

องค์ประกอบของดินตะกอนที่โลหะหนักอาจเข้าไปรวมอยู่ด้วย ตามแหล่งกำเนิดออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

### 2.3.1 องค์ประกอบที่มีกำเนิดมาจากเปลือกโลก (Lithogeneous Components)

ดินและหินเป็นแหล่งที่มาของโลหะหนักในดินตะกอนที่สำคัญ กล่าวคือ โลหะต่าง ๆ ที่อยู่ในดินตะกอนจะมาจากดินและหินซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของดินตะกอน โดยกระบวนการเกิดของดินตะกอนสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

กระบวนการเกิดดินตะกอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งเกิดจากการพัดพาของฝน ลม หรือหิมะ โดยเกิดการกัดเซาะหรือชะล้างพื้นดินหรือหินริมฝั่งแม่น้ำหรือบริเวณอื่น ๆ ที่น้ำไหลผ่าน เศษดินและหินก็จะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและถูกพัดพา (transport) โดยกระแสน้ำ ในระหว่างนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคและเกิดการทับถมของอนุภาคเหล่านั้น เกิดเป็นดินตะกอนที่สะสมอยู่ใต้ท้องน้ำ ดังนั้น องค์ประกอบต่าง ๆ ของดินและหินจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดินตะกอนด้วย

นอกจากนี้ กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ก็มีส่วนช่วยในการทำให้ดินและหินถูกแปรสภาพเป็นดินตะกอนได้เหมือนกัน เช่น ในการทำเหมืองแร่ หินที่ได้จากการขุดเจาะเหมืองแร่ ซึ่งไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ แต่มีปริมาณโลหะหนักค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหินทั่วไปจะถูกปล่อยทิ้ง เมื่อชะล้างลงในแหล่งน้ำก็จะเป็นต้นกำเนิดของดินตะกอนเช่นกัน ดังนั้น ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนท้องน้ำจึงขึ้นอยู่กับชนิดของหินหรือดิน และแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบด้วย

### 2.3.2 น้ำ (Hydrogenous formation)

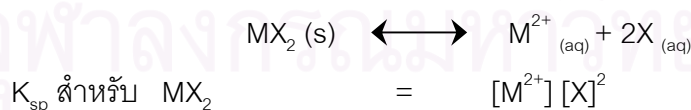
ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีกระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเปลี่ยนแปลงไป เช่น กระบวนการตกตะกอน (precipitation) การดูดซับ (adsorption) และแลกเปลี่ยนโลหะหนักที่อยู่ในน้ำกับอนุภาคของตะกอน

#### 1. การตกผลึกของโลหะหนัก (heavy metal precipitation)

ไอออนของโลหะหนักที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอออนลบ (anion) ในน้ำเกิดเป็นสารประกอบ ถ้าสารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นไม่ละลายน้ำก็จะตกตะกอนจมลงสู่พื้นท้องน้ำ ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การตกตะกอนของไอออนโลหะ มีดังนี้

#### ก. ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบที่เกิดขึ้น พิจารณาได้จากค่าคงที่ผลคูณของความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของไอออนในสารละลายที่อุณหภูมิใด ๆ ยกกำลังด้วยจำนวนโมลของไอออนนั้น (Solubility product constant,  $K_{sp}$ ) ดังนี้



เช่น  $K_{sp}$  สำหรับ  $PbCl_2 = [Pb^{2+}] [Cl^-]^2 = 1.7 \times 10^{-5}$

ถ้า  $[Pb^{2+}][Cl^-]^2 > 1.7 \times 10^{-5}$  ก็จะทำให้ตะกั่วคลอไรด์ ( $PbCl_2$ ) สามารถตกผลึกได้ จะเห็นได้ว่าโลหะไอออนที่อยู่ในน้ำจะสามารถตกผลึกได้หรือไม่จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนของโลหะนั้น ๆ กับความเข้มข้นและชนิดของไอออนลบ (anionic species) เช่น ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ซัลไฟด์ และอื่น ๆ

## ข. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidation – Reduction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน ภาวะที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะสามารถเป็นได้ทั้งตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ ขึ้นอยู่กับว่าธาตุนั้นเป็นตัวให้หรือรับอิเล็กตรอน และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายโลหะหนักคือ ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (redox potential,  $E_h$ ) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน 1 โมล จากตัวออกซิเดนต์ไปยังไฮโดรเจน ในสภาวะออกซิเดชัน ค่า  $E_h$  จะเป็นบวก และค่า  $E_h$  จะเป็นลบ เมื่ออยู่ในสภาวะรีดักชัน

## ค. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะในสารละลาย

ในแหล่งน้ำจะมีสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) จำนวนมาก ทั้งที่มาจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นของมนุษย์ ซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น คลอไรด์ ไบคาร์บอเนต ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต เป็นต้น ที่สามารถทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ (ligand) และรวมอยู่กับโลหะไอออนที่อยู่ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีทั้งประเภทที่ละลายน้ำได้และประเภทที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะไอออน ความเข้มข้นของลิแกนด์ และค่าความเป็นกรด – เบส

ดังนั้น ลิแกนด์ต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำจึงมีผลต่อการแพร่กระจายของโลหะหนักระหว่างของแข็ง (solid phase) กับน้ำ (aqueous phase) โดยที่โลหะหนักจะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับลิแกนด์ ถ้าหากโลหะหนักเกิดพันธะกับลิแกนด์แล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ก็จะมีการตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเพิ่มมากขึ้น

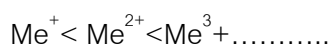
## 2. การแลกเปลี่ยนและการดูดซับไอออนบวก (cation exchange and adsorption)

โดยปกติโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ละลายอยู่ในน้ำภายใต้สภาวะปกติจะถูกดูดซับจากอนุภาคของแข็งต่าง ๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยอนุภาคดังกล่าวจะแย่งกับสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) จับกับโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ แล้วจมตัวลงสู่ท้องน้ำ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งเหล่านี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ในการควบคุมการละลายของโลหะหนักเข้าสู่ระบบน้ำธรรมชาติได้อีกด้วย

ไอออนของโลหะหนักหรือไอออนบวก แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการจับกับตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

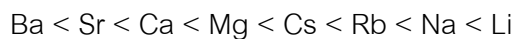
## ก. ผลของวาเลนซ์กับการเกิดน้ำผลึก (Valence and hydration effects)

ความสามารถของโลหะไอออนในการจับกับตัวแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโลหะไอออนนั้นมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น กล่าวคือ





และความสามารถในการจับกับอนุภาคของแข็งของไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อการเกิดการน้ำผลึก (Hydration) ของไอออนบวกนั้นลดลง เนื่องจากที่ไอออนบวกเกิดน้ำผลึกลดลง จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น เช่น โลหะอัลคาไลน์ (alkaline) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) มีลำดับความสามารถในการจับกับอนุภาคของแข็ง ดังนี้

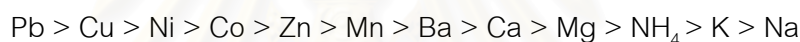


ข. ความเข้มข้นของสารละลาย (concentration of solution)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จำนวนไอออนบวกที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนก็จะมีมากขึ้น จึงทำให้ไอออนบวกจับกับผิวอนุภาคของแข็งได้มากขึ้นด้วย

ค. การแลกเปลี่ยนประจุบวกบนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (cation exchange on organic and inorganic substance)

สารอินทรีย์เลือกที่จะจับกับไอออนบวกที่มีประจุบวกสอง (divalent) มากกว่าพวกที่มีประจุบวกหนึ่ง (monovalent) และยังสามารถจับกับโลหะหนักได้ดีกว่าโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ดังนี้



ง. ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับไอออนบวกที่ถูกไฮโดรไลซ์ (reaction involving hydrolyzed cation)

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ไอออนบวกเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนบวกเหล่านั้นเกิดการแลกเปลี่ยนได้ดีขึ้น เนื่องจากการเกิดไฮดรอกซีคอมเพล็กซ์ เช่น  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{FeOH}^{2+}$  จะทำให้สารเหล่านี้ดูดซับกับอนุภาคของแข็งได้มากกว่าไอออนบวกอิสระ (free cation) เช่น  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$

จ. ปฏิกริยาที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวระหว่างตัวแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก (specific reaction between exchangers and cation)

เนื่องจากคุณสมบัติของตัวแลกเปลี่ยนที่อยู่ในอนุภาคของแข็งจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ละชนิดของดินตะกอนหรือแหล่งที่มาของดินตะกอน ดังนั้น ตะกอนในแต่ละแหล่งน้ำจึงมีความสามารถในการจับไอออนบวกได้แตกต่างกันไป โดยที่อัตราเร็วของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะขึ้นอยู่กับความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินตะกอน

### 2.3.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biogenous formation)

โลหะหนักที่อยู่ในดินตะกอนต้องน้ำส่วนหนึ่งจะมาจากกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์สาร เช่น การย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ ในพืชแต่ละชนิดจะมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบซึ่งปริมาณและชนิดของโลหะหนักในพืชแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกัน และพืชแต่ละชนิดจะมีความต้องการโลหะหนักในกระบวนการต่าง ๆ เช่น ในกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชต้องการโลหะหนักบางตัว เช่น แมงกานีส เหล็ก สังกะสี และวานาเดียม ในกระบวนการตรึงไนโตรเจนในรากพืช บางชนิดก็ต้องการเหล็ก โบรอน โมลิบดินัม และโคบอลต์ จึงทำให้พืชมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ และเมื่อพืชเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำหรือทับถมในแหล่งน้ำ เมื่อมีการย่อยสลายหรือถูกทับถมเป็นดินตะกอน โลหะหนักที่อยู่ในพืชเหล่านี้ก็จะถูกละลายและทับถมอยู่ในดินตะกอนต้องน้ำ

### 2.3.4 บรรยากาศ (Atmogenous formation)

โลหะหนักที่อยู่ในบรรยากาศนั้นมีหลายชนิด ซึ่งอาจมาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น ฝุ่นจากการระเบิดภูเขาไฟ ฝุ่นจากการถูกร่อนของหินและดิน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินและหิน ส่วนโลหะที่มาจากกิจกรรมมนุษย์ เช่น จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีการเติมโลหะหนักลงไป จากโรงงานที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก

โลหะหนักที่แพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศ หรือที่ถูกดูดซับอยู่บนอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ สามารถเคลื่อนย้ายลงสู่แหล่งน้ำบนผิวโลกได้เมื่อเกิดฝนตกหรือหิมะ โดยจะถูกชะล้างลงมาพร้อมกับฝนหรือหิมะ

Forstner and Wittman (1981) สรุปถึงการเคลื่อนย้าย (mobilization) โลหะหนักออกจากสารแขวนลอยในน้ำและตะกอนต้องน้ำว่ามีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะทางเคมีในน้ำ ดังนี้

ก. ความเข้มข้นของเกลือมากขึ้น เนื่องจากเกลือของโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลต์เอิร์ทสามารถแย่งกับไอออนบวกของโลหะหนักจับกับอนุภาคของแข็งในดินตะกอนได้ ดังนั้น หากในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นของเกลือของโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลต์เอิร์ทเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกลือของโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลต์เอิร์ทแย่งจับกับอนุภาคของแข็งแทนไอออนบวกของโลหะหนักมากขึ้น จึงทำให้ไอออนบวกของโลหะหนักที่เคยจับกับอนุภาคของแข็งในดินตะกอน ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนจึงลดลง

ข. การเปลี่ยนแปลงสภาวะของปฏิกิริยารีดอกซ์ หากในแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนลดลง จะทำให้โลหะหนักไฮดรอกไซด์ (ในดินตะกอน) ที่อยู่ในสภาวะที่ไม่ละลายน้ำ สามารถที่จะละลายน้ำได้บางส่วนหรืออาจจะละลายได้หมด ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนลดลง

ค. ค่าพีเอชเมื่อน้ำมีค่าพีเอชต่ำ จะมีผลทำให้ตะกอนของพวกโลหะคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์สามารถละลายในน้ำได้ จึงทำให้โลหะหนักที่จับอยู่กับคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ถูกเคลื่อนย้ายออกจากตะกอน

ง. ความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) ทั้งที่มาจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นของมนุษย์ หากในแหล่งน้ำมีสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถรวมกับไอออนของโลหะหนักแล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ ไอออนของโลหะหนักถูกเคลื่อนย้ายออกจากตะกอน แต่หากสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน รวมกับไอออนของโลหะหนักแล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเกิดการตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ ก็จะทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

กากตะกอนโดยทั่วไปมีองค์ประกอบต่าง ๆ กันออกไป องค์ประกอบสำคัญในกากตะกอนที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในกากตะกอน ได้แก่ องค์ประกอบของพวกคาร์บอเนต ออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก สารอินทรีย์ องค์ประกอบดังกล่าวเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพ redox potential ในกากตะกอน (Tessier และ คณะ, 1979) ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนเปลี่ยนแปลงไปด้วย

## 2.4 การศึกษาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน

การศึกษาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน นิยมศึกษาใน 2 ลักษณะ คือ

### 2.4.1 การศึกษาในรูปปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบในกากตะกอนด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (Microwave Digestion) (EPA Method 3051)

โดยทำการย่อยตัวอย่างกากตะกอนด้วยกรดเข้มข้นและสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) อย่างแรง เช่น  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HClO}_4$  เพื่อออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในกากตะกอนและ  $\text{HF}$  เพื่อทำลายพันธะของซิลิเกตในกากตะกอน เป็นต้น (Loon, 1985) การย่อยสลายสารด้วยการนำความร้อน โดยทั่วไปต้องใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงและในสารตัวอย่างบางชนิดอาจต้องใช้เวลามากกว่านี้ แต่ถ้าย่อยสลายด้วยวิธีย่อยสลายไมโครเวฟ สามารถทำได้สมบูรณ์ภายใน 5-15 นาที ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากกลไกที่แตกต่างกัน ภาชนะที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟหรือเตาไฟฟ้า นั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี จึงต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ภาชนะ แล้วถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ (conduction) ไปให้แก่สารละลายในภาชนะ ซึ่งการนำความร้อนในสารละลายก็เกิดได้ไม่ดีนัก นอกจากนี้ การระเหยที่ผิวหน้าของของเหลวจะทำให้สูญเสียความร้อนออกไปนอกภาชนะโดยการพา (convection) และการไหลบ้างเป็นส่วนน้อย ดังนั้น เมื่อมีการให้

ความร้อนโดยการนำจะมีเพียงส่วนน้อยของของเหลวที่มีอุณหภูมิเหนือจุดเดือดของสารละลาย ในทางตรงข้ามการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่สารละลาย พลังงานไมโครเวฟจะถูกถ่ายโอนโดยตรงไปยังทุกโมเลกุลของสารละลายเกือบพร้อมกันโดยไม่มี การให้ความร้อนแก่ภาชนะ ดังนั้น พลังงานความร้อนจะเข้าถึงสารละลายอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิของสารละลายจะถึงจุดเดือดอย่างรวดเร็ว ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างด้วยไมโครเวฟ คือ การนำความร้อนของกรดที่ใช้ ระยะเวลาคลายตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation time หมายถึง ระยะเวลาสำหรับการทำให้โมเลกุลในสารตัวอย่างกลับไปสู่ความไม่เป็นระเบียบประมาณร้อยละ 63) ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และปริมาณกรด

สำหรับวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ตามมาตรฐาน US EPA Method 3051 เป็นการย่อยสลายโดยใช้กรดเข้ามาช่วยในการย่อยสลาย ตะกอน สารที่ตกตะกอน ดิน และ น้ำมัน เพื่อวิเคราะห์หาธาตุหรือโลหะที่อยู่ในสารเหล่านั้น เช่น อะลูมิเนียม แคดเมียม ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว และ สังกะสี เป็นต้น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โลหะ Flame Atomic Absorption (FLAA), Graphite Furnace Atomic Absorption (GFAA), Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy (ICP-ES) และ Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICE-MS)

#### 2.4.2 การศึกษาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในกากตะกอน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential extraction)

โดยใช้สารสกัด (Extractant) ที่มีความจำเพาะในการสกัดโลหะในแต่ละรูปแบบ วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถแยกโลหะหนักที่มีอยู่ในรูป labile form ออกจาก residual phase และยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักในตะกอนอีกด้วย

Chester และ Voutsinou (1981) ทำการแยกโลหะหนักในดินตะกอนที่ศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Residual heavy metals เป็นโลหะหนักที่มีอยู่ใน crystal lattice ของโครงสร้างที่เป็น silicate matrix ในดินตะกอน จึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในสภาวะการรักรวมชาติ

2. Non-residual heavy metals เป็นโลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับอนุภาคของดินตะกอนในหลายรูปแบบ เช่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ในตะกอน อยู่ในรูปสารประกอบที่ละลายน้ำได้ หรือเป็นโลหะหนักที่เกิดการตกตะกอนลงสู่ดินตะกอนโดยตรง การจับตัวของโลหะหนักในรูปของ Non-residual กับดินตะกอน จะอยู่ในลักษณะที่ไม่แน่นอนเท่ากับโลหะหนักในรูป residual ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โลหะหนักที่อยู่ในรูปของ Non-residual จึง

สามารถเคลื่อนย้ายออกจากภาคตะกอนและเข้าสู่ระบบนิเวศได้ง่าย การศึกษาโลหะหนักในรูปของ Non-residual จึงบ่งบอกถึงภาวะการปนเปื้อนด้วยโลหะหนักที่มีสาเหตุมาจากการกระทำของมนุษย์ได้ดี

## 2.5 การสกัดตามลำดับขั้น (Sequential extraction)

การศึกษารูปแบบของโลหะหนักในดินตะกอนได้รับการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์โลหะในแต่ละรูปแบบมาอย่างต่อเนื่อง โดยเลือกใช้สารสกัด (extractant) และสภาวะต่างๆ ที่แตกต่างกันไป เช่น วิธีการสกัดตามลำดับขั้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการของ Tessier และ คณะ, (1979) ซึ่งทำการปรับปรุงและพัฒนาวิธีการแยกโลหะออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ดินและภาคตะกอน โดยแยกโลหะหนักในภาคตะกอนออกเป็น 6 รูปแบบ คือ

### 1. รูปแบบที่ละลายน้ำ (Water soluble Fraction)

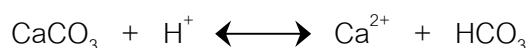
โลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ สามารถแยกโลหะหนักได้โดยใช้ Deionizer Water ในการแยก

### 2. รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable)

ได้แก่ โลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ในภาคตะกอน ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของอิออนในน้ำ สารสกัดที่ใช้ต้องมีความสามารถแย่งจับกับส่วนที่จะแลกเปลี่ยนอิออนได้ดีกว่าอิออนของโลหะ เช่น  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{OAc}$



2. รูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Bound to carbonate) ได้แก่ โลหะหนักที่รวมอยู่กับสารประกอบจำพวกคาร์บอเนต วัตถุประสงค์การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส ใช้  $\text{HOAc}/\text{NaOAc}$  หรือ complexing agent เป็นสารสกัด เพื่อให้  $\text{H}^+$  ในอะซิเตตไปจับกับคาร์บอเนตและปล่อยอิออนโลหะที่จับอยู่กับคาร์บอเนตอย่างหลวม ๆ ออกมา (Pickering, 1981)



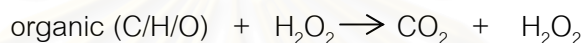


4. รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Bound to Fe oxide and Bound to Mn oxide)

สกัดด้วย Reducing agent เช่น hydroxylamine hydrochloride ( $\text{NH}_2\text{OHHCl}$ ), dithionite ( $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ), oxalate ( $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ) เพื่อรีดิวซ์ Fe (III) ไปเป็น Fe (II), Mn (III) และ Mn (IV) ไปเป็น Mn(II)

5. รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (Bound to organic matter and sulfide)

ได้แก่ โลหะหนักที่อยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ในภาคตะกอน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อสารอินทรีย์เหล่านี้เกิดการออกซิเดชัน หรือ Degradation โดยใช้ oxidizing agent เช่น hypochlorite ( $\text{OCI}$ ) หรือ  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  เป็นสารสกัด



6. รูปแบบที่เหลือ (residual)

ได้แก่ โลหะหนักที่จับยึดอยู่กับแร่ธาตุปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Primary and secondary minerals) ในโครงสร้างผลึกของแร่ในภาคตะกอนในการวิเคราะห์โลหะ รูปแบบดังกล่าวจึงต้องใช้กรดและสารออกซิไดซ์อย่างแรง เช่น HF และ  $\text{HClO}_4$  เพื่อทำลายโครงสร้าง ซิลิเกตและสารอินทรีย์ในภาคตะกอน

หลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น คือการใช้สารสกัดซึ่งเป็นสารเคมีหลายชนิดในการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ละลายอยู่ในตัวอย่างตามแต่ระดับขั้นของการสกัด สิ่งที่ต้องทราบโดยทั่วไปคือ ในโลหะชนิดต่างๆ ที่ผ่านขั้นต่างๆ ของการสกัดแยกวิธีนี้ มักหมายถึงผลที่มาจากปัจจัยของการทดลองหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง องค์ประกอบทางเคมีของระบบตัวอย่างนั้น เมื่อสิ้นสุดการสกัดแยกในทุกขั้นตอน นำน้ำที่ได้จากการสกัดแต่ละขั้นวัดค่าพีเอช และวิเคราะห์หาสารประกอบของโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2.6 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า (ลาวัลย์, 2543)

### 2.6.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell)

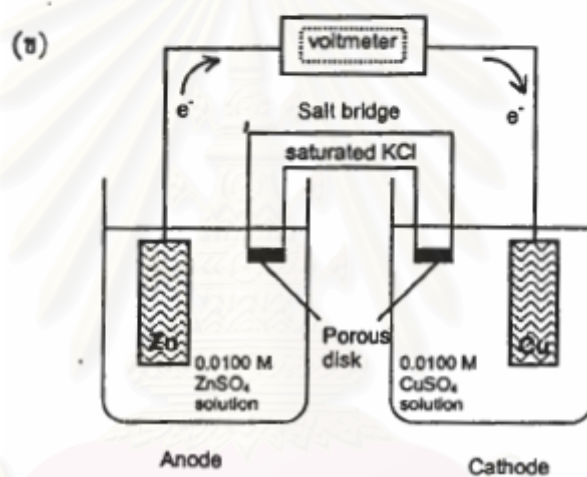
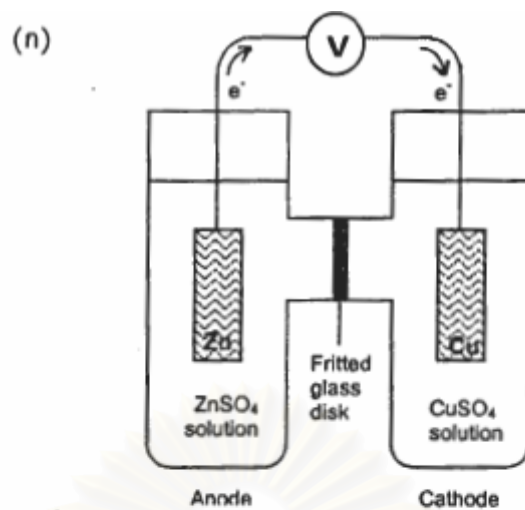
เซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell) คือ วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (electrode) สองขั้วจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแอโนด (anode) หรือครึ่งเซลล์แอโนดิก (anodic half cell) และอีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแคโทด (cathode) หรือ ครึ่งเซลล์แคโทดิก (cathodic half cell) ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าทั่วไปประกอบด้วย

1. สารละลายตัวอย่าง หรือสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์หรือศึกษาอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

2. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าและออกจากเซลล์เคมีไฟฟ้า โดยทั่วไปอิเล็กโทรดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวนำไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (electronic conductor) ซึ่งเป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้า และตัวนำไฟฟ้าอิเล็กโทรไลติก (electrolytic conductor) ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้

2. รอยต่อของเหลว (Liquid junction) เป็นส่วนทำหน้าที่แยกสารละลายในขั้วแอโนดและขั้วแคโทดออกจากกันโดยการนำวัสดุพอร์ซเลนมาถักขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง ดังรูปที่ 2.1 (ก) หรือ การแยกภาชนะที่บรรจุแต่ละครึ่งเซลล์ ดังรูปที่ 2.1 (ข) เรียกเซลล์ที่มีรอยต่อของเหลวแบบนี้ว่า “เซลล์มีรอยต่อของเหลว” (cell with liquid junction)

4. สะพานเกลือ (Salt bridge) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดในเซลล์มีรอยต่อของเหลว โดยทั่วไปนิยมใช้แท่งแก้วรูปตัวยูบรรจุสารละลายโปรแตสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิ่มตัวดังรูปที่ 2.1 (ข) เซลล์เคมีไฟฟ้าที่จัดแบบไม่มีส่วนประกอบของรอยต่อของเหลวและสะพานเกลือ ดังรูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) เรียกว่า เซลล์ไม่มีรอยต่อของเหลว (cell without liquid junction)

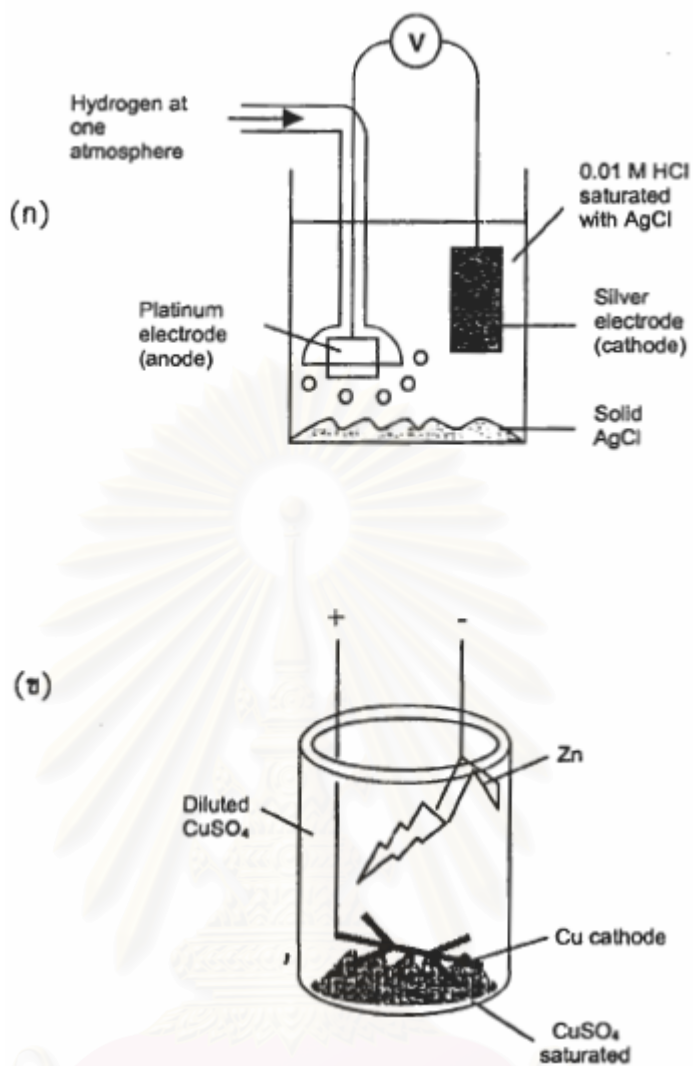


รูปที่ 2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดมีรอยต่อของเหลว (ลาวัลย์, 2543)

(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรัน

(ข) ต่อกันสารละลายด้วยสะพานเกลือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดไม่มีรอยต่อของเหลว (ลาวัวลีย์, 2543)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

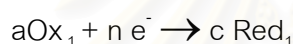
## 2.6.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ในการจัดการวิเคราะห์หนึ่งๆ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อยสองขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

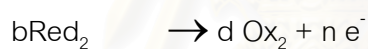
ขั้วแอโนด หรือครึ่งเซลล์แอโนดิก เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เป็นขั้วสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือสารละลายตัวอย่าง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วนี้จะไหลผ่านไปยังวงจรมานอกที่ทำหน้าที่วัดแล้วผ่านเข้าไปยังขั้วแคโทด

ขั้วแคโทด หรือครึ่งเซลล์แคโทดิก เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น โดยการรับอิเล็กตรอนจากวงจรมานอกผ่านเข้ามาทางอิเล็กโทรด

**ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



**ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



### วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามส่วนประกอบที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า คือขั้วไฟฟ้าโลหะ (metal electrodes) และขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (membrane electrodes)

วัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น ไททาเนียม แพลตินัม เหล็ก อลูมิเนียมและแกรไฟต์ เป็นต้น

#### *เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)*

เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญคือ โครเมียม ซึ่งจะมีตั้งแต่ 11% ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว เหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้งานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก เพราะเป็น

เหล็กกล้าที่มีความเหนียวหยุ่นและสามารถแต่งขึ้นรูปโดยวิธีกลึงไสได้ดี ส่วนใหญ่ใช้งานในด้านวิศวกรรมเคมีเนื่องจากทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้

### แกรไฟต์ (Graphite)

เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ อะตอมของแกรไฟต์จะจัดตัวเป็นระนาบเป็นชั้นๆ อะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นจะอยู่ที่มุมของรูป regular hexagon การยึดกันระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยโควาเลนต์บอนด์ แต่ปิดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415Å ซึ่งสั้นพอสมควรจึงทำให้เชื่อว่าอะตอมคาร์บอนน่าจะยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะบอนด์ แกรไฟต์มีลักษณะที่บดและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย นำไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอมแต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย

### 2.6.3 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential, E)

คำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่า ศักย์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้อย่างชัดเจนก็เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน โคนสัญญาของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น

### 2.6.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ หมายความว่ามีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ เพราะฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมป์ และทางไฟฟ้าเคมีมักแทนด้วยโวลต์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า(emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ}(W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์}$$

### 2.6.5 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ความต้านทานกระแสไฟฟ้า ในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นตามสมการ

$$R = \frac{L}{C \times A}$$

เมื่อ	R	เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโอห์ม
	L	เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
	C	เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโมห์หรือซีเมน
	A	เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยตารางเซนติเมตร

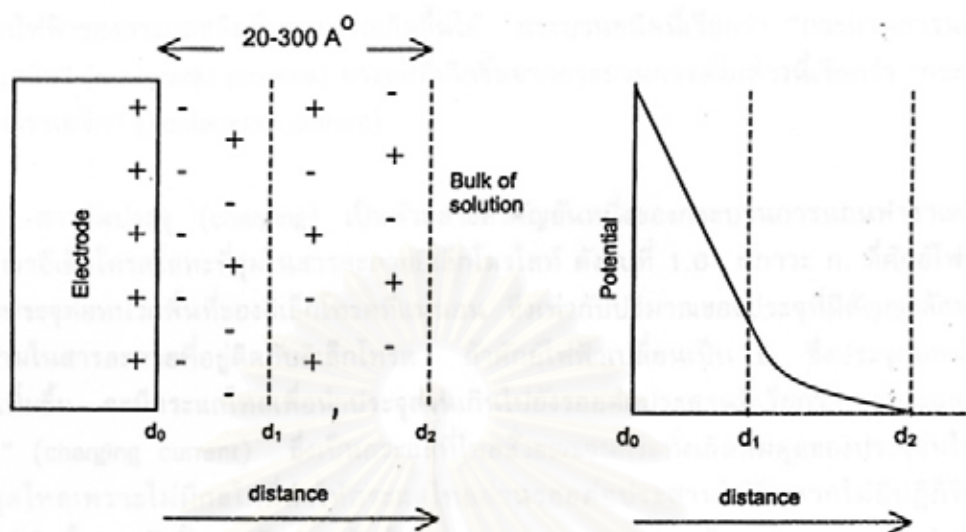
### 2.6.6 ชั้นไฟฟ้าคู่ (Electrical Double Layer)

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ การวัดเชิงเคมีไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กโทรดสามารถให้หรือรับอิเล็กตรอนจากสปีชีส์ที่อยู่ในชั้นของสารละลายที่อยู่ติดกับอิเล็กโทรดเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การพิจารณาโครงสร้างของสารละลายที่ติดอยู่กับอิเล็กโทรดในเวลาชั่วขณะ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกครั้งแรกกับอิเล็กโทรด เวลาชั่วครู่หลังการให้ศักย์ไฟฟ้าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสที่จะลดลงต่อมาอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์

ถ้าไม่มีสปีชีส์ที่มีฤทธิ์ (active species) อยู่ที่ผิวของอิเล็กโทรด กระแสชนิดนี้เป็นกระแสอัดประจุ (charging current) ที่สร้างส่วนเกิน (หรือส่วนขาดแคลน) ของประจุลบที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดทั้งสองจากการเคลื่อนที่เชิงไอออนิกของสารละลายที่ติดอยู่กับอิเล็กโทรดชั่วขณะนั้น ซึ่งต้องการประจุตรงกันข้าม ผลเช่นนี้แสดงในรูปที่ 2.3 ที่เห็นพื้นผิวของอิเล็กโทรดโลหะมีส่วนเกินของประจุบวก เนื่องจากการให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกกับขั้วนี้

ชั้นของสารละลายที่อัดประจุบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดแบบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชั้นด้านในที่อัดแน่น (compact Inner Layer) จากช่วง  $d_0$  ถึง  $d_1$  บริเวณนี้ศักย์ไฟฟ้าลดลงเชิงเส้นตรงตามระยะทางจากพื้นผิวอิเล็กโทรด และชั้นการแพร่ (diffuse Layer) จากช่วง  $d_1$  ถึง  $d_2$  ที่ศักย์ไฟฟ้าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล การจัดเรียงตัวของประจุที่พื้นผิวอิเล็กโทรดและสารละลายที่ติดอยู่กับพื้นผิวแบบนี้ เรียกว่า “ชั้นไฟฟ้าคู่” (electrical Double Layer)





รูปที่ 2.3 ชั้นไฟฟ้าคู่ที่พื้นผิวอิเล็กโทรดเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกแต่อิเล็กโทรด (ลาวัลย์, 2543)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.7 กระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก (electrokinetic Processing) (Sharma และ Reddy, 2004)

กระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก (electrokinetic processing) หรือชื่อเรียกอื่นๆ ได้แก่ electromigration, electrochemical decontamination, electroreclamation เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าในการกำจัดโลหะหนักจากดิน กากตะกอน ไม้และสารประกอบอื่น ๆ ที่ปนเปื้อน เทคโนโลยีนี้เป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าข้ามผ่านดินที่ปนเปื้อนที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วลบ เนื่องจากความหลากหลายของกระบวนการ สิ่งปนเปื้อนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก กระบวนการนี้จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว ที่ฝังอยู่ใต้ดินและเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าจะถูกจัดในบ่อเก็บสะสม (reservoirs) และมีระยะห่างระหว่างขั้วที่แน่นอน

ขั้วไฟฟ้ามี 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) ขั้วบวกจะดึงดูดสิ่งปนเปื้อนที่มีประจุเป็นลบ ส่วนขั้วลบจะดึงดูดสิ่งปนเปื้อนที่มีประจุเป็นบวก ในขณะที่บำบัดน้ำจะถูกฉีดไปที่บ่อเก็บสะสม การย้ายสิ่งปนเปื้อนออกสามารถทำได้โดยการสูบน้ำที่ปนเปื้อนในบ่อโดยการชุบไฟฟ้า (electroplating) การตกตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า การย้ายสิ่งปนเปื้อนออกจากดินสามารถใช้สารละลายอย่างเช่น กรดอ่อน สารลดแรงตึงผิว สารประกอบเชิงซ้อน ที่บ่อเก็บสะสม ขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วลบบางอาจจะวางในแนวขนานกันได้

เทคนิคนี้สามารถใช้บำบัดดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ใช้ได้ทั้งดินที่อิ่มน้ำ (saturated) และดินที่ไม่อิ่มน้ำ (unsaturated soils) ใช้บำบัดสิ่งปนเปื้อนได้หลายชนิด เช่น โลหะหนัก กัมมันตภาพรังสี และสารอินทรีย์ปนเปื้อน

### 2.7.1 ข้อดีของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก

1. สามารถนำไปใช้กับดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำและดินที่ต่างชนิดกัน (heterogeneous soils)
2. สามารถนำไปใช้สำหรับโลหะปนเปื้อนที่สามารถแยกได้ด้วยการไหลของกระแส (induced flow)
3. มีความยืดหยุ่น (flexible) ใช้ได้ทั้งเทคโนโลยี in-situ และ ex-situ
4. ปรับให้เหมาะสมกับสิ่งปนเปื้อนในสถานที่พิเศษ

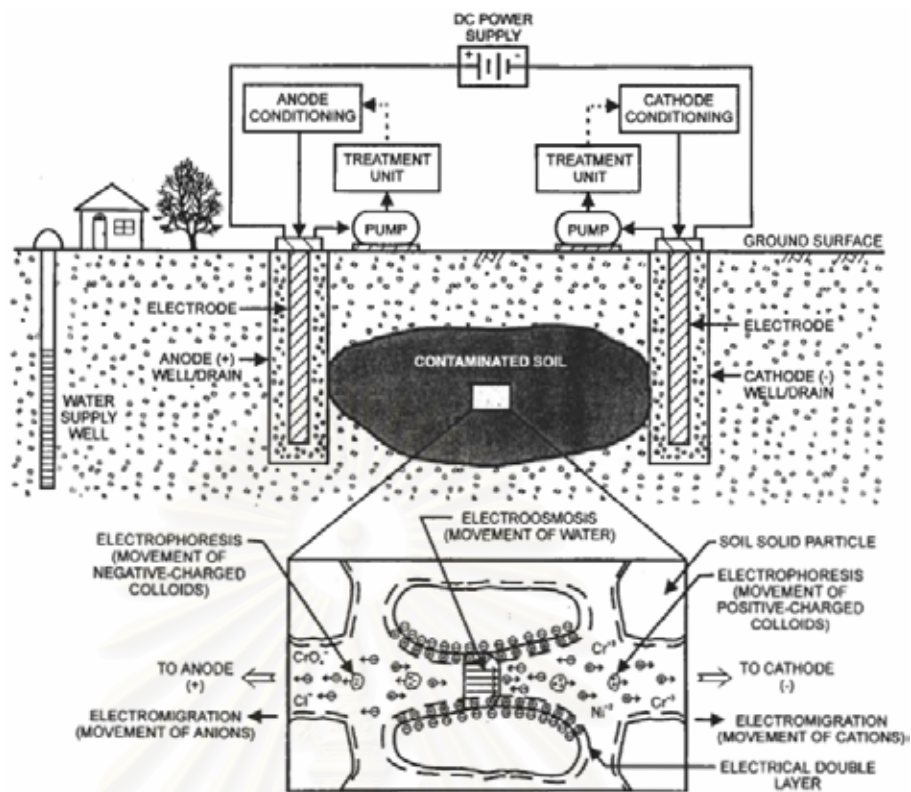


Figure 13.19 In-situ electrokinetic remediation.

รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการขนส่งและกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ (Sharma และ Reddy, 2004)

### 2.7.2 ข้อเสียของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก

1. ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสใกล้ขั้วไฟฟ้า อาจจะเปลี่ยนค่าพีเอช ของดินจากขั้วบวก ไปขั้วลบ
2. เกิดสภาวะกรดและการย่อยสลายกักร่อนที่ขั้วบวก

### 2.7.3 ผลของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก

1. กรดที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกจะเคลื่อนที่ข้ามผานดินและเกิดการคายสิ่งปนเปื้อนจาก พื้นผิวของอนุภาคดิน ( surface soil)
2. ทำให้เกิดอิเล็กโทรไมเกรชั่นของไอออนที่มีอยู่ในโพรงของเหลว (pore fluid) และ นำไอออนไปยังขั้วไฟฟ้าตรงข้าม
3. สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดอิเล็กโทรออสโมซิส ซึ่งจะชะล้าง(flushing) สิ่งปนเปื้อนต่างๆ

## 2.8 หลักการของกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติก

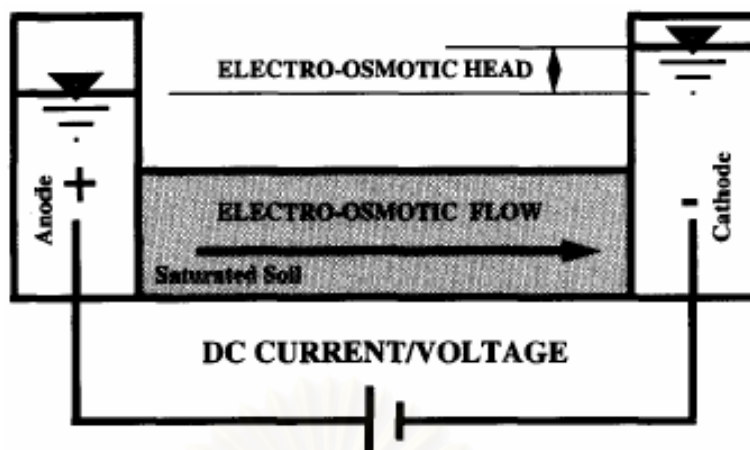
กระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกเป็นการประยุกต์ใช้ศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดการขนส่ง (transport) ของน้ำและสิ่งปนเปื้อน กลไกการขนส่งหลักประกอบด้วย อิเล็กโทรออสโมซิส (electroosmosis) อิเล็กโทรไมเกรชัน (electromigration) อิเล็กโทรโฟรีซิส (electrophoresis) และการแพร่ (diffusion) กลไกการขนส่งเหล่านี้เป็นผลมาจากกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis) การดูดซับ-การคาย (adsorption-desorption) การตกผลึกและการละลาย (precipitation-Dissolution) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction)

### 2.8.1 กลไกการขนส่ง (Transport and removal of contaminants)

#### 1. อิเล็กโทรออสโมซิส (electroosmosis)

อิเล็กโทรออสโมซิส คือ การขนส่งหรือการเคลื่อนที่ของน้ำและความชื้นภายใต้สนามไฟฟ้า ในตัวกลางที่ปนเปื้อนจากขั้วบวก (Anode) ไปยังขั้วลบ (cathode) ปฏิกิริยาของสิ่งปนเปื้อนในโพรงของเหลวกับประจุลบที่พื้นผิวดินเป็นผลทำให้เกิดการจัดเรียงไอออน ดังรูปที่ 2.6 ประจุลบที่มีมากในดินเป็นผลทำให้เกิดการดึงดูดของประจุบวกใกล้พื้นผิว ขณะที่ความเป็นกลางของประจุในโพรงของเหลวถูกรักษาไว้โดย equivalent concentration ของไอออนบวกและไอออนลบ เมื่อสนามไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นไอออนบวกมีมากใกล้พื้นผิวดินจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ เป็นผลทำให้เกิดการไหลของน้ำและเรียกการไหลนี้ว่า “อิเล็กโทรออสโมซิส” ส่วนความหนาของชั้นไอออนบวกเรียกว่า double layer

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิสของของเหลวข้ามผ่านกากตะกอน  
(Sharma และ Reddy, 2004)

ในระหว่างการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคไนติกภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลของน้ำประจวบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ zeta potential ของดินจะเป็นผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำใน double layer

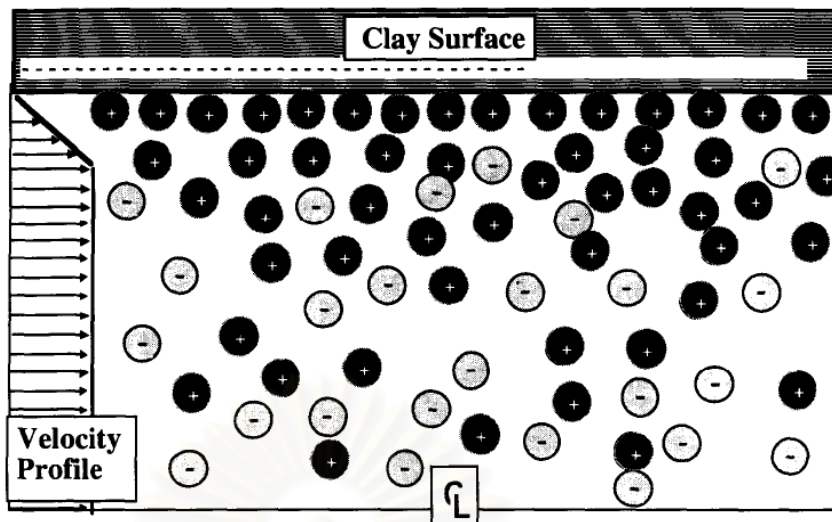
zeta potential หมายถึงศักย์ระหว่างส่วนที่อยู่นิ่ง (stationary) และส่วนเคลื่อนที่ได้ของ double layer ที่ล้อมรอบอนุภาคดิน เมื่อ zeta potential มีค่าติดลบ (negative) การไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ และเมื่อ zeta potential มีค่าเป็นบวกการไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ย้อนกลับไปยังขั้วบวก (positive) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าสิ่งปนเปื้อนมีความเข้มข้นสูงมาก การขนส่งสิ่งปนเปื้อนโดยการออสโมซิสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนืด(viscosity) ความเข้มข้นของไอออน อุณหภูมิ และความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน

ปริมาณของน้ำที่เคลื่อนย้ายต่อหน่วยเวลา( $Q_e$ ) โดยการไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิสสามารถบอกปริมาณโดยใช้สมการ Helmholtz

$$Q_e = K_e I_e A$$

เมื่อ	$Q_e$	=	การไหลแบบอิเล็กโทรออสโมซิส (มล. /วัน)
	$K_e$	=	electroosmosis permeability (ซ.ม. <sup>2</sup> /โวลต์ วินาที)
	$I_e$	=	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์ /ซม.)
	$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของดิน (ซ.ม. <sup>2</sup> )

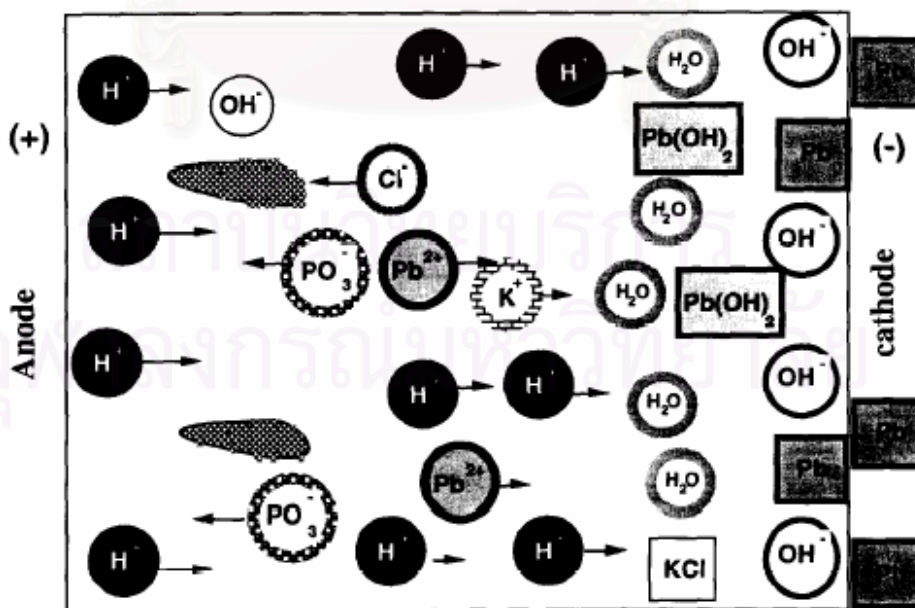




รูปที่ 2.6 แสดงการจัดเรียงของไอออนภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในดินและความเร็วของน้ำในโพรงของเหลว (Sharma และ Reddy, 2004)

2. อิเล็กโทรไมเกรชัน (electromigration)

อิเล็กโทรไมเกรชัน คือ การใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ (40-100 mA) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ ไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้ามกับประจุนั้นๆ โดยไอออนประจุบวก (cation) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วประจุลบ (cathode) และไอออนประจุลบ (anion) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วประจุบวก (anode) ทำให้ไอออนมีความเข้มข้นขึ้นในบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการอิเล็กโทรไมเกรชันข้ามผ่านดินภายใต้สนามไฟฟ้า (Sharma และ Reddy, 2004)



ในระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก อิเล็กโทรไมเกรชันอาจจะมีอิทธิพลต่อกลไกการขนส่งสำหรับไอออนและชนิดของประจุโดยอัตราอิเล็กโทรไมเกรชันเป็นฟังก์ชันของ Ionic mobility valence of specious และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

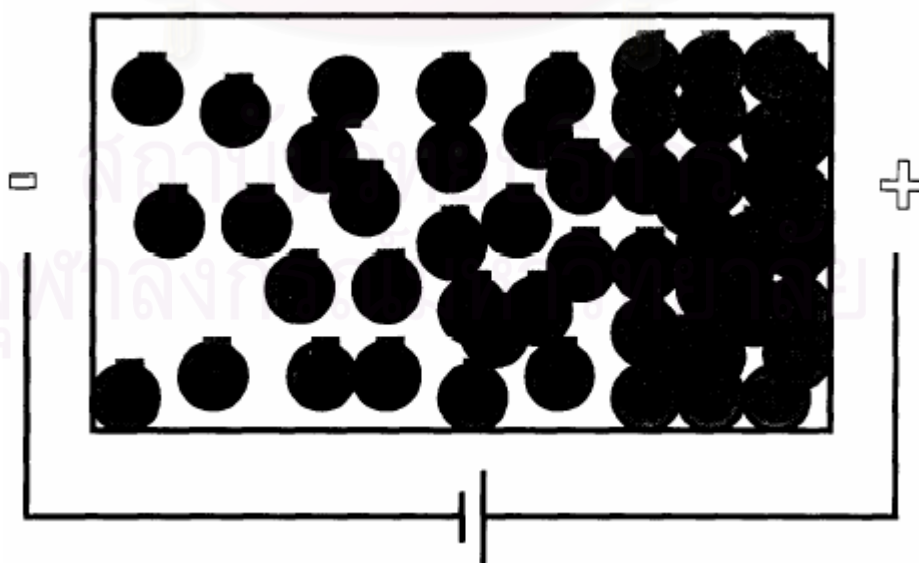
ความเร็วของไอออนในสารละลาย ( $V_{xi}$ ) ในระหว่างอิเล็กโทรไมเกรชันสามารถหาได้จากสมการ Lindgren

$$V_{xi} = \frac{I v_i}{A} \frac{P_w}{T O}$$

เมื่อ	$I$	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	$V_i$	=	ความเร็วของไอออน (ion velocity)
	$A$	=	พื้นที่หน้าตัด (เมตร <sup>2</sup> )
	$P_w$	=	pore water resistivity
	$T$	=	tortuosity
	$O$	=	volumetric moisture content (cm <sup>3</sup> )

## 2. อิเล็กโทรไฟรีซิส (electrophoresis)

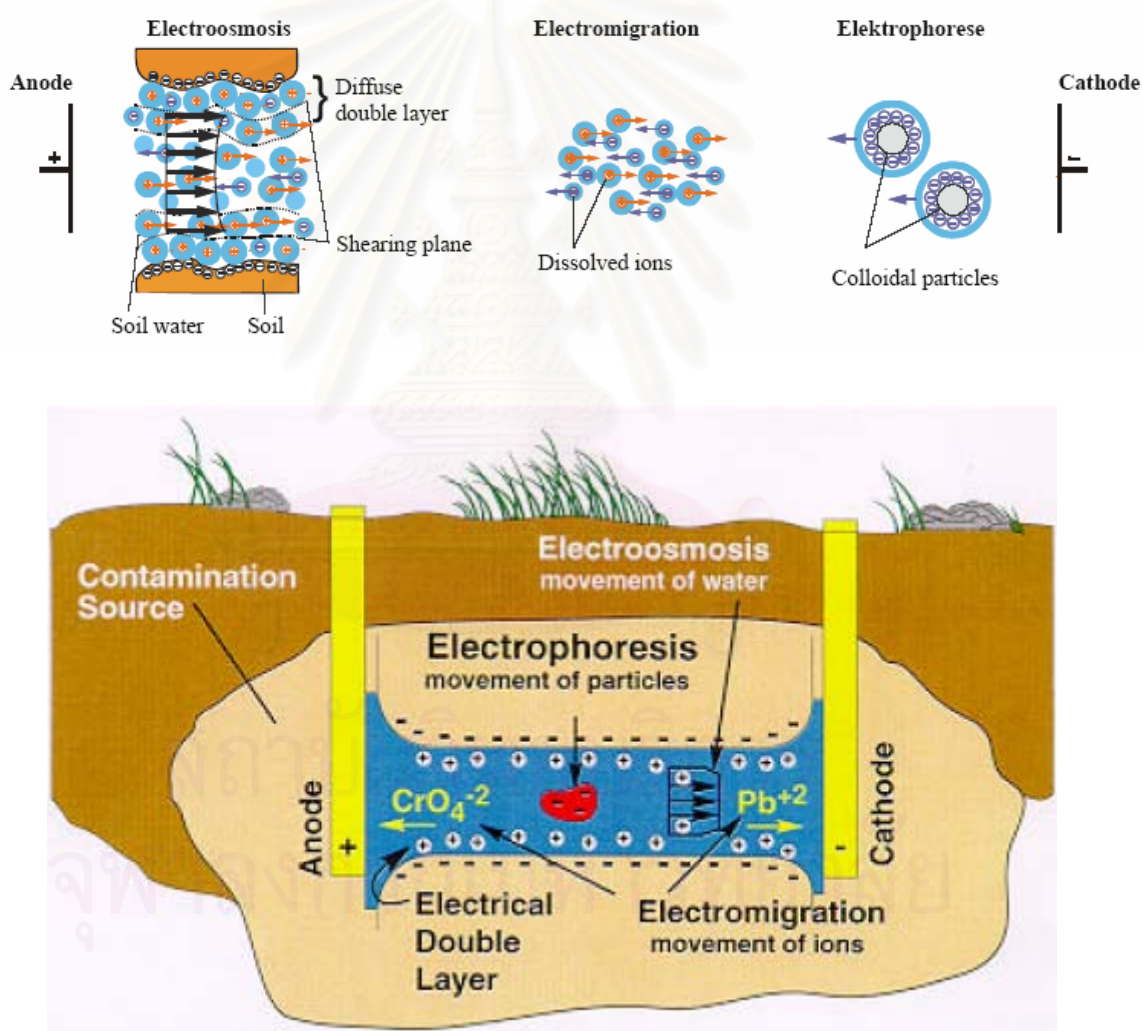
อิเล็กโทรไฟรีซิส คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุหรือคอลลอยด์ในสนามไฟฟ้าไปยังขั้วตรงข้ามคล้ายกับอิเล็กโทรไมเกรชัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้อาจไม่เกิดขึ้นถ้าดินมีความหนาแน่นมาก ซึ่งเป็นการยับยั้งการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์



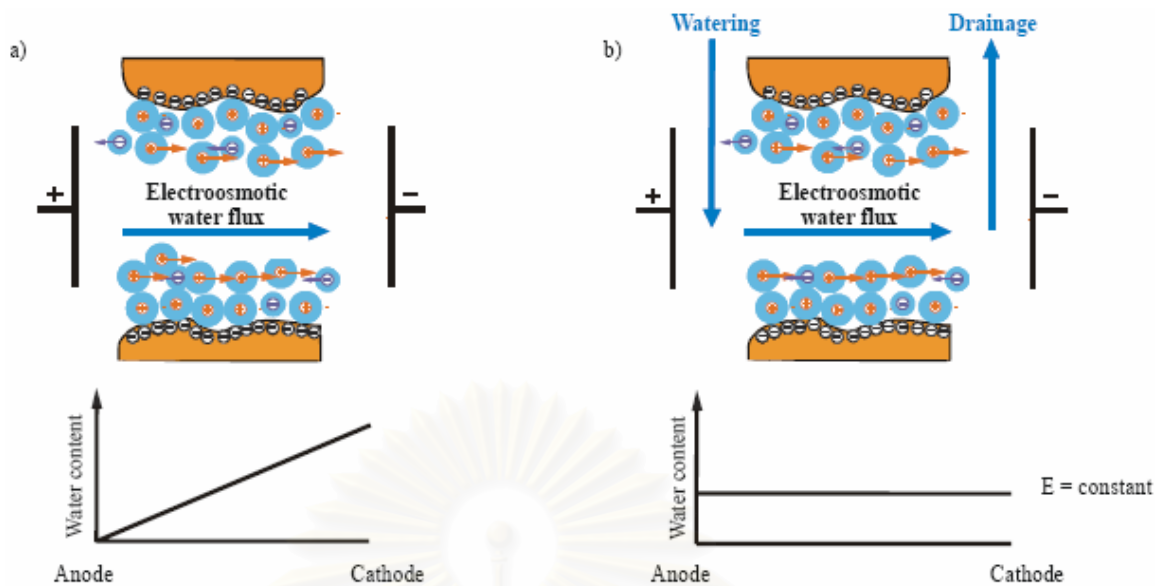
รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการอิเล็กโทรไฟรีซิส (Sharma และ Reddy, 2004)

#### 4. การแพร่ (diffusion)

การแพร่ คือ การกระจายสิ่งปนเปื้อน เนื่องจาก concentration gradient การแพร่ขึ้นกับ ความพรุน (porosity) ความคดเคี้ยว (tortuosity) ของตัวกลางที่มีรูพรุน และความเข้มข้นของ รูปแบบสิ่งปนเปื้อน ในระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรไดนามิกการแพร่จะเกิดได้ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรไมเกรชัน



รูปที่ 2.9 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าและกลไกการเคลื่อนที่ (Transport and removal of contaminants) ซึ่งประกอบด้วยกลไกหลัก 3 กลไก (Sharma และ Reddy, 2004)



รูปที่ 2.10 แสดงการเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรออสโมซิส

(Sharma และ Reddy, 2004)

ก. เมื่อไม่มีการระบายน้ำ

ข. เมื่อมีการรักษาระดับน้ำโดยการเติมน้ำและระบายน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้ electric field strength คงที่

### 2.8.2 ปฏิกริยาทางเคมีฟิสิกส์

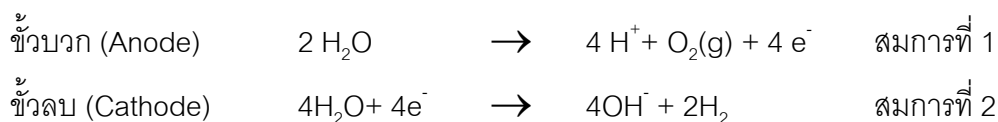
#### 1. ปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

เมื่อสนามไฟฟ้าถูกใช้ ปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิสจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบ ที่ขั้วบวก (anode) จะมีไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เกิดขึ้น ปฏิกริยาที่ขั้วลบจะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ )

ปฏิกริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก(anode) ทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ตามสมการที่ 1 ไฮโดรเจนไอออนทำให้เกิดกรดและเกิดการเคลื่อนที่ของกรดไปยังขั้วลบ (cathode)

ปฏิกริยารีดักชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ตามสมการที่ 2 ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเบสไปยังขั้วบวก (anode)

จากสมการทั้งสอง การขนส่งของ  $H^+$  จะเกิดเป็น 2 เท่าของ  $OH^-$  ดังนั้น การเคลื่อนที่ของกรดจะมีอัตราเร็วกว่าเบส



ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะรีดอกซ์ของโพรงน้ำ มีกรดเกิดขึ้นจากการสร้าง  $\text{H}^+$  ไอออนที่ขั้วบวก และเกิดเบสจากการสร้าง  $\text{OH}^-$  ที่ขั้วลบ พีเอชที่ขั้วบวกจะลดลงเหลือประมาณ 2 ขณะที่ขั้วลบ พีเอชจะสูงขึ้นประมาณ 12 ซึ่งแปรตามกระแสที่ใช้  $\text{H}^+$  ไอออนจะเคลื่อนไปสู่ขั้วลบและ  $\text{OH}^-$  จะเคลื่อนไปสู่ขั้วบวก

การเคลื่อนที่ของ  $\text{H}^+$  ดีกว่า  $\text{OH}^-$  เพราะรัศมีของไอออนเล็กกว่าเป็นสาเหตุที่กรดไม่เกรซัน ได้เร็วกว่าเป็น 2 เท่าของเบส ขอบเขตของการไม่เกรซันของกรดขึ้นกับปริมาณบัฟเฟอร์ของดิน ถ้าปริมาณบัฟเฟอร์ต่ำ เช่น ดินขาว (kaolinite) การไม่เกรซันของกรดจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายใน ขณะที่ปริมาณบัฟเฟอร์สูง เช่น glacial till ถ้า  $\text{H}^+$  ถูกใช้หมดจนเป็นกลาง กรด (acid front) จะคาย (desorb) และละลายไอออนบวก (cation) เช่น นิเกิล(Ni) และ แคดเมียม (Cd) จากผิวดิน เพิ่มการกำจัดไอออนบวก ถ้าสิ่งปนเปื้อนเป็นประจุลบ (anionic) เช่น  $[\text{Cr}(\text{VI})]$  จะเพิ่มการดูดซับ และขัดขวางการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ค่าพีเอชถูกเปลี่ยน โดยการไม่เกรซันของกรดและเบส

## 2. การดูดซับ-การคาย (Adsorption – Desorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการแบ่งแยกของสารละลายปนเปื้อนจากโพรงของเหลว (pore Fluid) ไปยังผิวดิน อย่างไรก็ตาม การดูดซับนี้ขึ้นกับค่าพีเอชของดิน ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า PZC (point of zero charge) การดูดซับของไอออนบวกจะสำคัญ เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า PZC การดูดซับของไอออนลบจะสำคัญ การดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งปนเปื้อน (anionic และ cationic) ชนิดของดิน พื้นที่ผิวของดิน ประจุผิวดิน ความเข้มข้นของ cationic species สารอินทรีย์ คาร์บอนในดิน และลักษณะของโพรงของเหลว

การคายออก (Desorption) จะตรงข้ามกับการดูดซับ เป็นการแบ่งแยกสิ่งปนเปื้อนจากผิวดินไปยังโพรงของเหลว ถ้าพีเอชของโพรงน้ำต่ำกว่า PZC การคายออกของประจุลบจะสำคัญ เมื่อพีเอช สูงกว่า PZC การดูดซับของประจุลบจะเกิดขึ้น เมื่อใช้สนามไฟฟ้าในดินที่มีปริมาณ บัฟเฟอร์ต่ำ (low buffering soils) ค่าพีเอชจะลดลงที่ขั้วบวกระหว่างเกิดอิเล็กโทรไลซิสและ ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นที่ขั้วลบ การดูดซับไอออนบวกและการคายไอออนลบจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ การดูดซับไอออนลบและการคายไอออนบวกจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวก

## 2. การตกผลึกและการละลาย (Precipitation-Dissolution)

ในระหว่างการใช้สนามไฟฟ้าค่าพีเอชของดินจะเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาการตกผลึกและการละลายจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช การตกผลึกจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนของไอออนเท่ากันหรือมีค่าการละลายมากเกินไปของของแข็งนั้น

การละลายจะตรงข้ามกับการตกผลึกเพราะพีเอชเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลอง สิ่งปนเปื้อนอาจเกิดการตกผลึกหรือการละลายขึ้นอยู่กับสภาวะการปนเปื้อน เมื่อสิ่งปนเปื้อนตกผลึก พวกมันจะขัดขวางการถูกแยกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก อย่างไรก็ตาม ถ้าสิ่งปนเปื้อนละลายจะแยกได้ง่ายขึ้น

## 4. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายที่ขั้วบวกจากการออกซิเดชัน (oxidation) และอิเล็กตรอนจะถูกผลึกในขั้วลบจากการรีดักชัน (reduction) โกลด์ขั้วลบโลหะประจุลบจะถูกรีดิวซ์และตกตะกอน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน ธาตุที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะสามารถเป็นได้ทั้งตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ขึ้นอยู่กับว่าธาตุนั้นเป็นตัวให้หรือรับอิเล็กตรอน และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายโลหะหนักคือ ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (redox potential,  $E_h$ ) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน 1 โมล จากตัวออกซิเดนต์ไปยังไฮโดรเจน ในสภาวะออกซิเดชัน ค่า  $E_h$  จะเป็นบวก และค่า  $E_h$  จะเป็นลบ เมื่ออยู่ในสภาวะรีดักชัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim, Woong, และ Ben (2002) ได้ศึกษาใช้กระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกสำหรับแยกโลหะหนักเป็นพิษออกจาก tailing soils โดยการศึกษาให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพในการแยกรูปแบบโลหะหนัก ซึ่งพิสูจน์โดยใช้ขั้นตอนการสกัดแบบต่าง ๆ ที่ประกอบด้วย การสกัดตามลำดับขั้น การย่อยสลายทั้งหมด และการสกัดด้วยไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มอล นำ tailing soils ไปวิเคราะห์หาค่าทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น การกระจายของขนาดอนุภาค (particle size distribution) องค์ประกอบของแร่ธาตุหลัก และปริมาณโลหะหนักที่สนใจในรูปแบบต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของวิธีอิเล็กโทรโคเนติกได้ผลร้อยละ 90 สำหรับรูปแบบที่เคลื่อนที่ง่าย และน้อยกว่าร้อยละ 20 หรือไม่เคลื่อนที่สำหรับรูปแบบที่เคลื่อนที่ยาก

Kim และคณะ(2002) การศึกษานี้ให้ความสนใจกับความเป็นไปได้ของกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกในการแยกโลหะหนักออกจากกากตะกอน และประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งไม่มีชีวิต (เคมีฟิสิกส์) และสิ่งมีชีวิต (ภายในเซลล์และภายนอกเซลล์) โดยใช้รูปแบบของโลหะหนักในขั้นตอนการวิเคราะห์ ถึงแม้ว่ากากตะกอนที่ใช้ถูกนำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล แต่ในกากตะกอนมีโลหะหนักที่สนใจปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง (Cd = 6.8 mg/kg, Cr = 115.6 mg/kg, Cu = 338.7 mg/kg และ Pb = 62.8 mg/kg) ประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักขึ้นอยู่กับรูปแบบเฉพาะ (Speciation) ในกากตะกอน โดยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกมีประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต (abiotic) ได้มากกว่าร้อยละ 70 สำหรับรูปแบบที่เคลื่อนที่ได้ง่าย และมีการยึดเกาะของพันธะแบบหลวม ได้แก่ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (bound to carbonate) และน้อยกว่าร้อยละ 35 สำหรับรูปแบบที่มีการยึดเกาะแข็งแรง ได้แก่ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (bound to organic matter and sulfide) และรูปแบบกาก (residual) ในกรณีของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต (biotic) ประสิทธิภาพในการแยกของรูปแบบภายนอกเซลล์ (extra cellular) มากกว่ารูปแบบภายในเซลล์ (intra cellular) เล็กน้อย

Yuan และ Weng (2003) ได้ทำการศึกษาการแยกน้ำออกจากกากตะกอน โดยกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีค่าความชื้นเริ่มต้น 87.8% และตรวจสอบผลของช่วงเวลาที่เกิดกระบวนการและค่าความต่างศักย์ต่อการแยกน้ำออกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง 2.5- 5 โวลต์ต่อเซนติเมตร เหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของชั้นน้ำในกากตะกอนสำหรับช่วงเวลา 4 – 41 ชั่วโมง ภายหลังจากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของกากตะกอนใกล้ขั้วบวก



มีค่าประมาณ 2.4-6.6 และที่ขั้วลบมีค่าประมาณ 8.7-10.7 ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 41 ชั่วโมงค่าความขึ้นลดลงเหลือ 62.6% ผลสรุปคือ การเพิ่มค่าความต่างศักย์หรือเวลา ในการเกิดกระบวนการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำ

Virkutyte และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาผลของการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกที่กระแสไฟฟ้า 0.15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ต่อรูปแบบของโลหะหนักใน กากตะกอนจากระบบไร้อากาศที่มีทองแดงปนเปื้อนอยู่ โดยความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น เท่ากับ 1000 มก/กก ของกากตะกอนเปียก ให้สภาวะกรดของกากตะกอน (ค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.2 ในที่บรจุจากตะกอน) ด้วยความตั้งใจที่จะทำให้เกิดการคาย (desorb) รูปแบบของทองแดง ได้แก่ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (bound to organic matter and sulfide) และ รูปแบบกาก (residual) แต่ไม่เป็นผลในการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ ในขณะที่ปริมาณ ทองแดงที่วัดจากรูปแบบการเคลื่อนที่ได้ง่าย (รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่ กับคาร์บอเนต) ซึ่งสภาวะกรดมีผล จากผลดังกล่าว จึงมีความต้องการที่จะให้รูปแบบที่จับอยู่กับ สารอินทรีย์และซัลไฟด์ (bound to organic matter and sulfide) และรูปแบบกาก (residual) เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น โดยใช้ EDTA ซึ่งเป็น chelating agent ( $\text{Cu}^{2+} : \text{EDTA}^{4-}$  อัตราส่วน 1.2: 1) โดย มันจะช่วยรั้งกั้นทองแดงในกากตะกอน โดยจากการทดลองพบว่า รูปแบบที่เคลื่อนที่มาก สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

Wang และ คณะ (2005) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไคเนติก ในการ แยกโลหะหนักออกจากกากตะกอน โดยทำให้กากตะกอนมีสภาวะเป็นกรดและการปรับค่าพีเอช ในห้องบรจุขั้วลบและศึกษาอิทธิพลของกากตะกอนในสภาวะกรดต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ลักษณะของกากตะกอน หลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกพบว่ามีค่าความขึ้น เท่ากับ  $76.8 \pm 1.4\%$ , ปริมาณของแข็งระเหยเท่ากับ  $65 \pm 0.2\%$  ของของแข็งทั้งหมด อิทธิพลของ สภาวะกรดของกากตะกอนต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของ โลหะหนักขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะหนักในกากตะกอน กล่าวคือ soluble > exchangeable > adsorbed > bound to organics/sulfides > bound to carbonate > residual และจากการ ทดลองพบว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง โดย ประสิทธิภาพในการแยก Zn 95%, Cu 96%, Ni 90%, Cr 68%, As 31%, และ Pb 19%และ ปริมาณโลหะหนักหลังพบว่าไม่เกินขอบเขตที่ US EPA กำหนด

Yuan และWeng (2006) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกสำหรับแยกโลหะหนัก (Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) ในภาคตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม การทดลองกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกจะถูกเหนี่ยวนำด้วยศักย์ไฟฟ้า  $1.25 \text{ V cm}^{-1}$  ด้วยกระบวนการไหลของน้ำประปา (TW) โซเดียมโดดีซิลซัลเฟต (SDS) และกรดซิตริก (CA) เป็นเวลา 5 วัน ผลการทดลองประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักสำหรับ EK-TW, EK-SDS และ EK-CA มีค่า 11.2-60%, 37.2-76.5% และ 42.4-78% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการแยก  $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cr}$  ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับชั้น พบว่า รูปแบบของโลหะหนักในภาคตะกอน หลังกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกได้รับผลจากชนิดของเหลวที่ใช้ในกระบวนการ โดยรูปแบบของโลหะหนักถูกเปลี่ยนจากชนิดที่สกัดได้ยากไปเป็นรูปแบบที่สกัดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ ก่อนจะนำภาคตะกอนไปใช้ซ้ำ (reused) สามารถนำไปประเมินความเสี่ยงของรูปแบบของโลหะหนักในการเคลื่อนที่สู่สิ่งแวดล้อม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งหมดและโลหะในรูปแบบต่างๆ ซึ่งแผนการทดลองสำหรับงานวิจัยจะมีขั้นตอนดังนี้

##### 3.1.1 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก จะดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบจำลองที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ ภายในบรรจุกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักและที่ปลายทั้งสองข้างมีแกรไฟต์ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบ การทดลองกำจัดโลหะหนักจะใช้วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้โลหะหนักเคลื่อนที่จากกากตะกอนไปยังขั้วไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักดังนี้

1. ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า จะทำการปรับเปลี่ยน 3 ค่า คือ 1 โวลต์/เซนติเมตร 1.5 โวลต์/เซนติเมตร และ 2 โวลต์/เซนติเมตร
2. ระยะเวลาการเกิดกระบวนการจะใช้เวลาตั้งแต่ 3, 5 และ 7 วัน
3. กระบวนการไหล (Processing fluid) ที่ขั้วบวก (anode) จะเปรียบเทียบระหว่างของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำประปาและกรดอะซิติก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักก่อนการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก 8 ชนิดได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) ซีลีเนียม (Se) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีอยู่มากในกากตะกอนตัวอย่างโดยมีวิธีการวิเคราะห์ 3 วิธีดังนี้

1. หาปริมาณโลหะหนักรวม (Total Metals) ทุกรูปแบบของโลหะหนักแต่ละชนิดในกากตะกอนด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (Microwave Digestion) โดยใช้วิธีมาตรฐานที่ 3051 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US EPA, 2005)
2. หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548
3. หาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในกากตะกอนด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential Extraction) โดยใช้วิธีของ BCR (Bureau Communautaire de Référence)

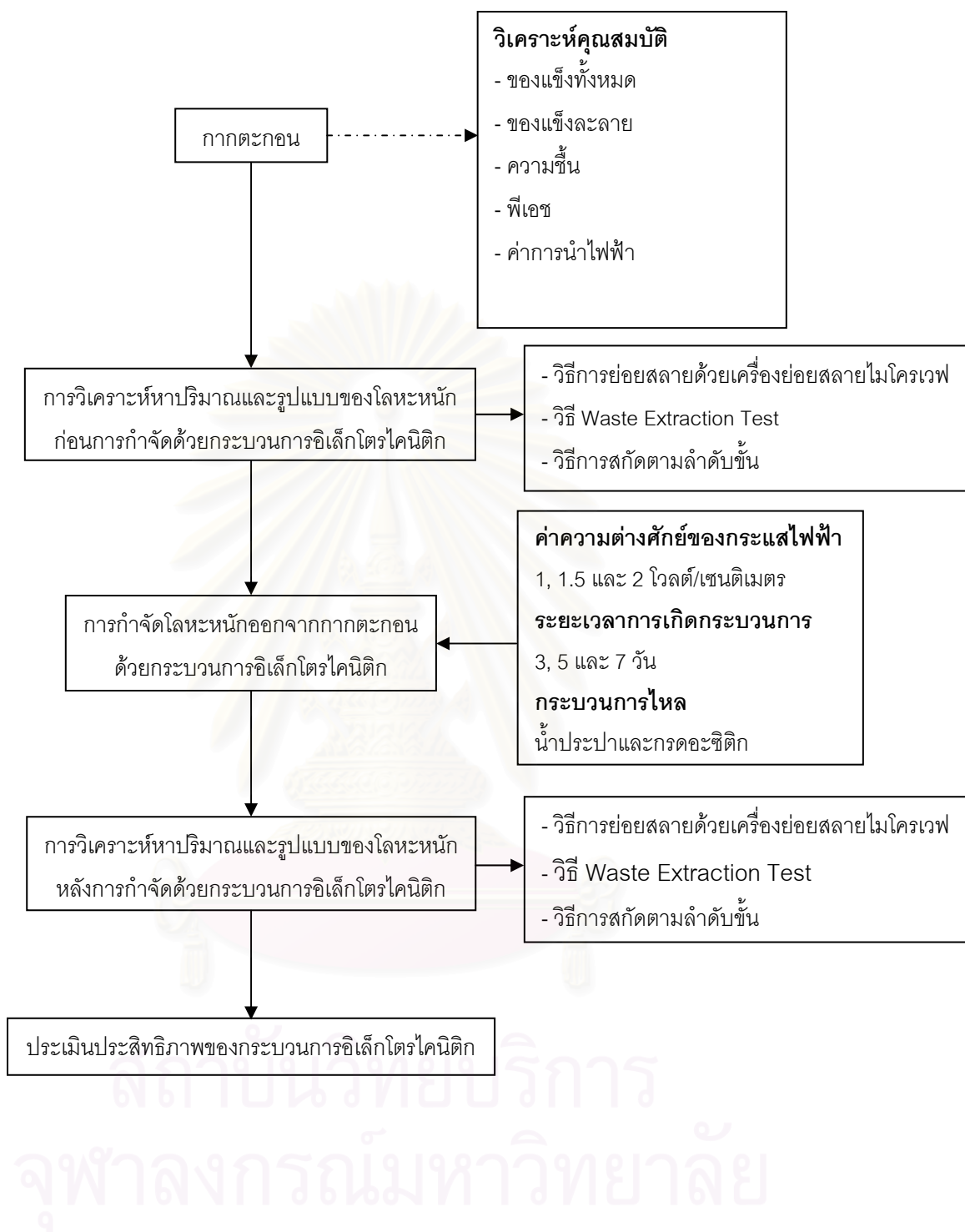
### 3.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

หลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกจะทำการแบ่งกากตะกอนเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ตามระยะจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ (ส่วนที่ 1-3) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของรูปแบบโลหะหนัก โดยนำกากตะกอนไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโลหะหนักรวม หาปริมาณโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction)

### 3.1.4 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

นำค่าปริมาณโลหะหนักที่ได้ก่อนและหลังการกำจัดมาหา % ประสิทธิภาพ

$$\text{ประสิทธิภาพ(\%)} = \frac{(\text{ปริมาณโลหะหนักก่อนกำจัด} - \text{ปริมาณโลหะหนักหลังกำจัด}) \times 100}{\text{ปริมาณโลหะหนักก่อนกำจัด}}$$



รูปที่ 3.1 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลติก

### 3.2 ตัวแปรที่ทำกรวิเคราะห์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

1. การศึกษาหาความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาหาค่าความต่างศักย์

ตัวแปรอิสระ (ความต่างศักย์)	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1.) 1 โวลต์/เซนติเมตร 2.) 1.5 โวลต์/เซนติเมตร 3.) 2 โวลต์/เซนติเมตร	1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 3. ความชื้น	1. ปริมาณโลหะหนัก 2. รูปแบบของโลหะหนัก 3. พีเอช 4. กระแสไฟฟ้า

2. การศึกษาระยะเวลาการเกิดกระบวนการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

ตัวแปรอิสระ (ระยะเวลา)	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1.) 3 วัน 2.) 5 วัน 3.) 7 วัน	1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 3. ความชื้น	1. ปริมาณโลหะหนัก 2. รูปแบบของโลหะหนัก 3. พีเอช 4. กระแสไฟฟ้า



3. การศึกษากระบวนการไหลที่ชั่ววอกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

### ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการไหล

ตัวแปรอิสระ (ระยะเวลา)	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1. น้ำประปา 2. กรดอะซิติก	1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 3. ความชื้น	1. ปริมาณโลหะหนัก 2. รูปแบบของโลหะหนัก 3. พีเอช 4. กระแสไฟฟ้า

### 3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

#### 3.3.1 สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนัก

##### ก. เครื่องมือและอุปกรณ์

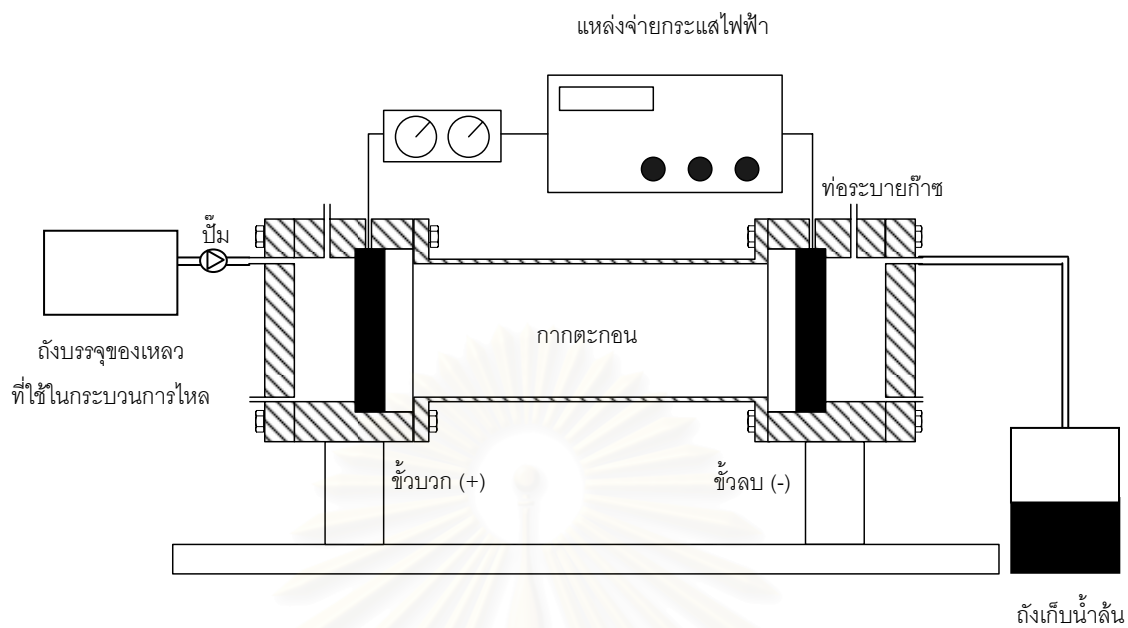
1. เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer) : Jobin yvon, Horiba
2. เครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) : Ethos sel , Milestone
3. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) : Denver Instrument, model 215
4. เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductivity) : Hach, Sension 5
5. เครื่องเขย่า (Horizontal shaker)
6. กระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน : Whatman
7. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digits Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204
8. เครื่องแก้ว
9. ครกเซรามิค
10. เตาอบ (Drying Oven)
11. ขวดโพลีเอทิลีน ขนาด 30 มิลลิลิตร
12. หลอดหมุนเหวี่ยง (Centrifuge tube) ทำจากโพลีคาร์บอนเนตขนาด 50 มิลลิลิตร
13. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
14. ตะแกรงคัดขนาด 0.1 มิลลิเมตร (Sieve shaker)

**ข. สารเคมี :** สารเคมีที่ใช้เป็นสารเคมีในระดับการวิเคราะห์ (Analytical grade)

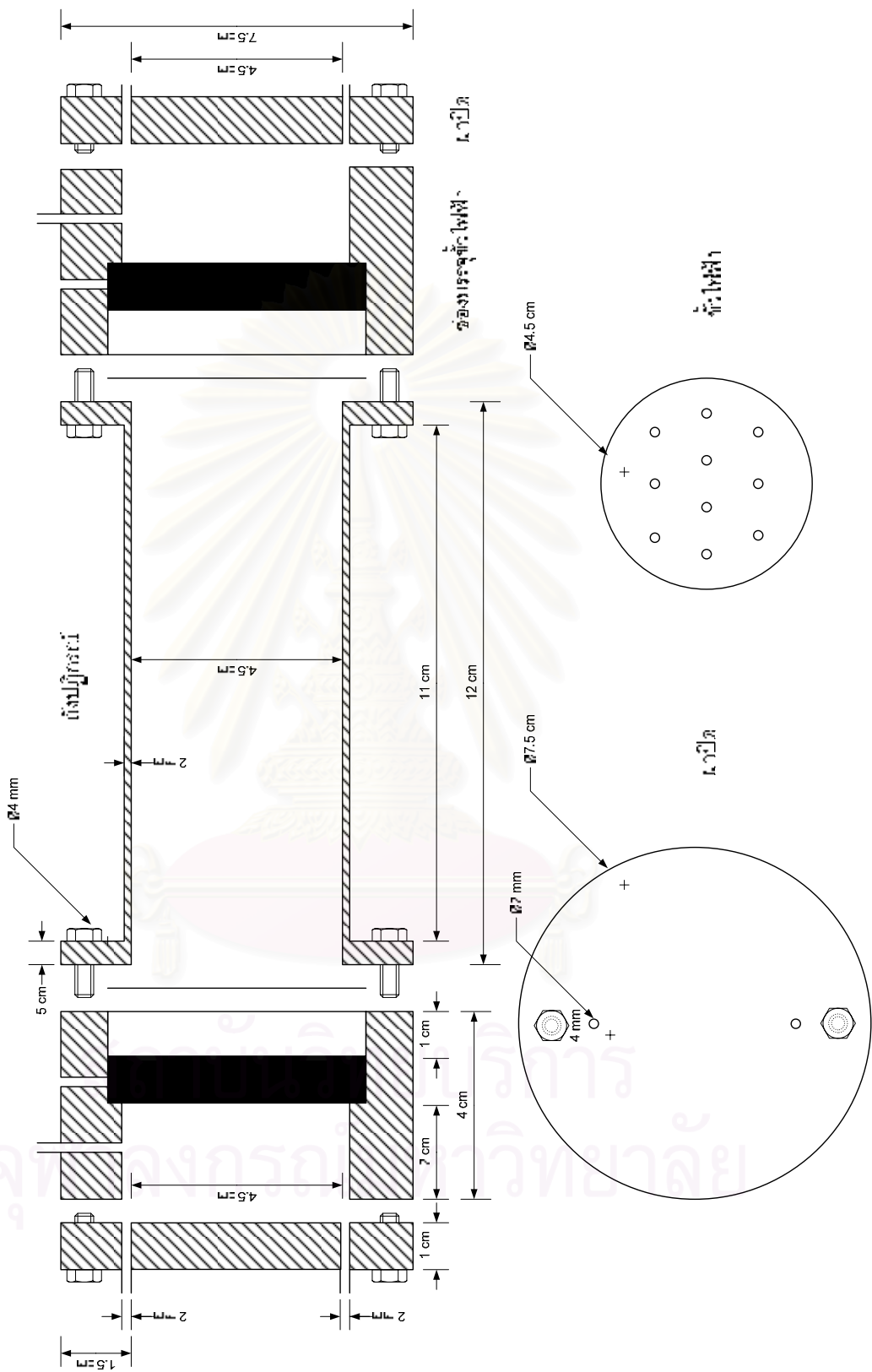
1. น้ำกลั่น
2. กรดไนตริกเข้มข้น ( $\text{HNO}_3$ , 65%)
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 30% โดยน้ำหนัก)
4. กรดอะซิติก (Glacial acetic acid), ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 100% โดยน้ำหนัก)
5. ไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  99% โดยน้ำหนัก)
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8.8 โมล/ลิตร ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
7. แอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ , 96% โดยน้ำหนัก)
8. กรดซिटริก ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
10. สารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มก./ล. ของโลหะหนัก 8 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) ซีลีเนียม (Se) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn)

### 3.3.2 สำหรับการทดลองกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

1. ขั้วไฟฟ้า (electrodes) มี 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) ใช้แกรไฟต์ (graphite) เป็นขั้วไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร มีเจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1.74 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ความต้านทานไฟฟ้า 700 ไมโครโอมxเมตร
2. ท่อทรงกระบอกสำหรับบรรจุกากตะกอน (cylinder of sewage sludge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร ทำจากอะคริลิก
3. ช่องบรรจุขั้วบวก (anode chamber) และช่องบรรจุขั้วลบ (cathode chamber) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตร
4. เครื่องสูบสารเคมี (peristaltic pump) ทำให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษา ระดับของเหลวในช่องบรรจุขั้วไฟฟ้า อัตราการสูบ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที
5. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ GW, INSTEK ซึ่งให้ความต่างศักย์สูงสุด 60 โวลต์



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์และถังปฏิกรณ์จำลองสำหรับศึกษากระบวนการอิเล็กโทรไคนิติก



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดและชิ้นส่วนของดั่งปฏิกรณ์จำลองสำหรับศึกษากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

### 3.4 การเตรียมสารละลายเคมีและสารละลายมาตรฐาน

ภาชนะ เครื่องแก้ว ก่อนใช้ทำความสะอาดโดยแช่ในกรดไนตริก 10% โดยปริมาตร เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นก่อนนำไปใช้งาน

#### 3.4.1 สารละลายเคมี

1. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 0.11 โมลาร์ ที่พีเอช 7

นำกรดอะซิติก 1 โมลาร์ที่เตรียมไว้มา 250 มิลลิลิตร ไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร จะได้กรดอะซิติก 0.11 โมล/ลิตร

2. ไฮดรอกซีลามีเน่ ไฮโดรคลอไรด์ ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) 0.5 โมลาร์ ที่พีเอช 1.5

ละลายไฮโดรแอมโมเนียมคลอไรด์ (Hydroxylammonium Chloride) 33.75 กรัม ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตรแล้วย้ายสารละลายลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร จากนั้นใช้ไปเปิดเติมกรดอะซิติกเข้มข้น 2 โมล/ลิตร ในปริมาณ 25 มิลลิลิตร แล้วน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร เตรียมในวันที่จะทำการสกัดแยก

3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30% โดยน้ำหนัก ที่พีเอช 2

นำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8.8 โมลาร์มาปรับ pH เป็น 2 ด้วยกรดไนตริก

3. แอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1.0 โมลาร์ ที่พีเอช 2

ละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 77.08 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้มีค่าประมาณ  $2.0 \pm 0.1$  ด้วยกรดอะซิติกแล้วน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

#### 3.4.2 สารละลายมาตรฐาน

1. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 1 โมลาร์

เตรียมโดยเติมกรดอะซิติก (Glacial acetic acid) 25 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่น 0.5 ลิตร ลงในขวด volumetric flask ขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

2. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 2 โมลาร์

เตรียมโดยเติมกรดอะซิติก 2.8 มิลลิลิตร ลงในขวด volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร

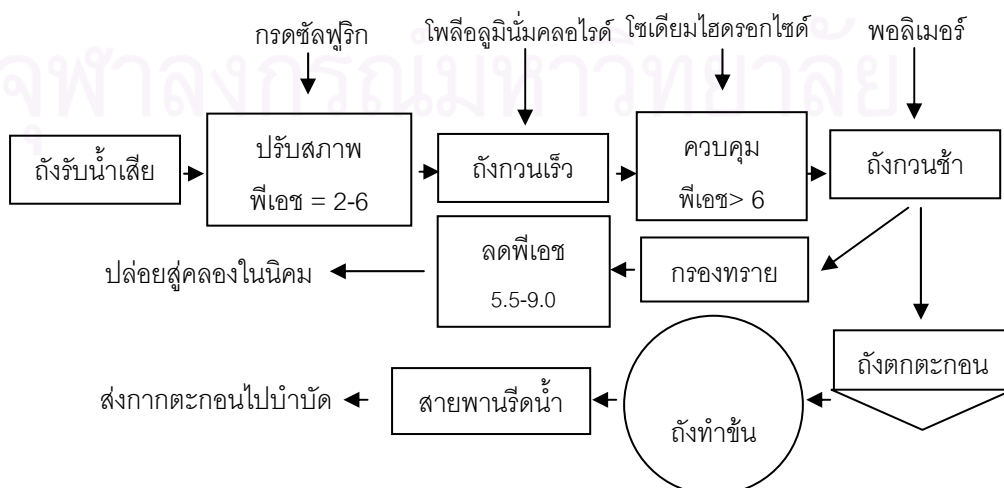
### 3.5 กากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

กากตะกอนที่ใช้เป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากบริษัท พีซีทีที จำกัด จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นบริษัทผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (flexible printed circuits) โดยกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะเก็บในส่วนของถังทำชั้น (thickener)

#### 3.5.1 การกำจัดโลหะหนักออกจากร้างน้ำเสียของโรงงานและจุดเก็บตัวอย่าง

กระบวนการกำจัดโลหะหนักของโรงงานนี้ เป็นกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ โดยน้ำเสียจะถูกปรับสภาพให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 2-6 ด้วยการเติมกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หลังจากนั้นจะเติม PAC (Poly Aluminum Chloride) เพื่อช่วยให้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น โดยควบคุมพีเอช ให้มีค่า  $\geq 6$  ด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อให้เกิดสารประกอบโลหะหนัก หลังจากนั้นจะทำให้สารประกอบของโลหะหนักตกตะกอนด้วยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ ก่อนผ่านเข้าสู่การทำชั้น (thickener) เพื่อเป็นการแยกตะกอนของสารประกอบของโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยตะกอนจะถูกส่งไปยังเครื่องรีดตะกอน จากนั้น น้ำเสียที่ถูกแยกตะกอนจะถูกนำไปผ่านชั้นกรองทรายเพื่อกรองตะกอนบางส่วนของสารประกอบของโลหะหนักที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำเสีย และ ลดค่าพีเอช (pH drop) เป็นการปรับสภาพน้ำเสียด้วยการเติมกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5-9.0 ก่อนปล่อยลงสู่คลองในนิคม โดยมีปริมาณน้ำเสียออกจากระบบ 600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีปริมาณกากตะกอน 60 ตันต่อเดือน

ในการทดลองนี้จะทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนจากถังทำชั้น โดยจะทำการเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2549 กากตะกอนที่เก็บจากถังทำชั้นมีค่าความชื้นประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 แสดงระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท พีซีทีที จำกัด



### 3.5.2 การเตรียมกากตะกอนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

การเตรียมกากตะกอนมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยนำกากตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยครก เซรามิค แล้วนำไปผ่านเครื่องคัดขนาด 0.1 มิลลิเมตร (sieve shaker) เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenized) เก็บรักษาในขวดพลาสติก ในตู้ดูดความชื้น ที่อุณหภูมิห้อง

### 3.5.3 การเตรียมกากตะกอนเพื่อใช้ในการทดลอง

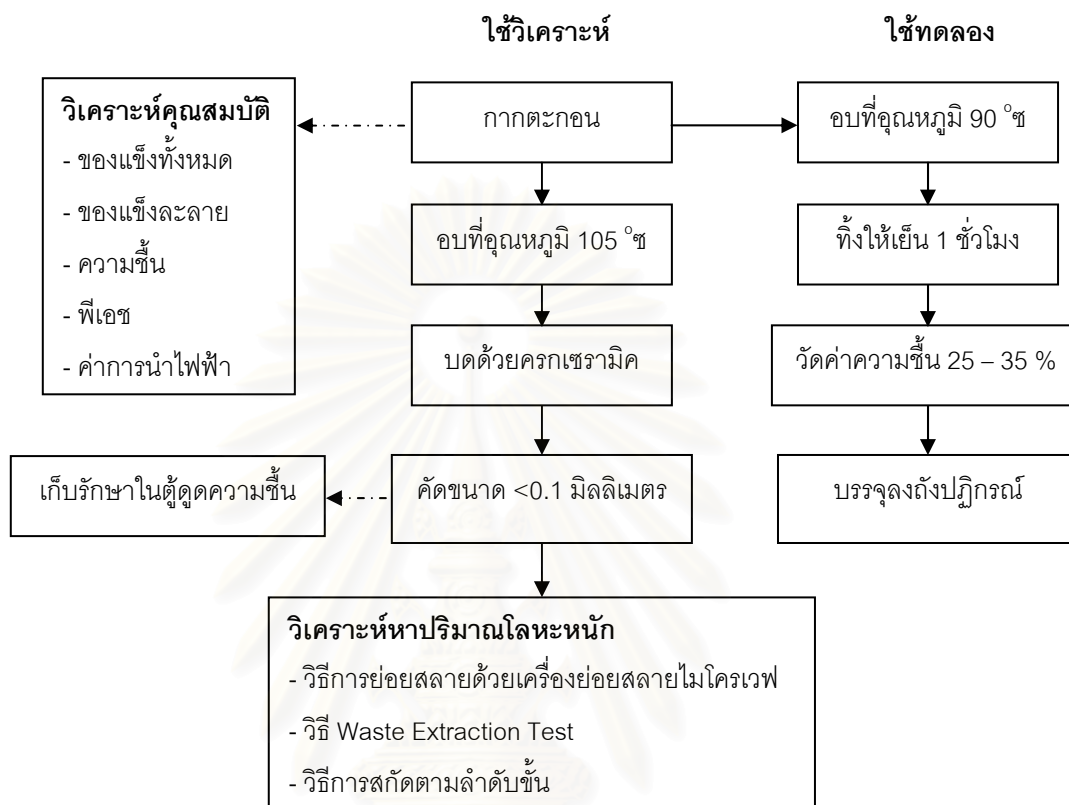
มีวัตถุประสงค์เพื่อให้กากตะกอนมีค่าความชื้นที่เหมาะสมกับการทดลอง โดยนำกากตะกอน 500 มิลลิกรัม ใส่ภาชนะแก้วขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 4 ซม. แล้วนำไประเหยน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นใช้เวลาอีก 2 ชั่วโมง วัดค่าความชื้นให้อยู่ในช่วง 25 -35 % ก่อนนำเข้าบรรจุลงในถังปฏิกรณ์

### 3.5.4 การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของกากตะกอน

มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบลักษณะสมบัติของกากตะกอนที่จะใช้ทำการทดลอง โดยทำการวัดค่าต่าง ๆ ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งละลาย ความชื้น พีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

### ตารางที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของกากตะกอน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด	อบที่อุณหภูมิ 105 °C
2. ของแข็งละลาย	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
3. ความชื้น	อบที่อุณหภูมิ 105 °C
4. พีเอช	เครื่องพีเอชมิเตอร์
5. ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมกากตะกอน

### 3.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

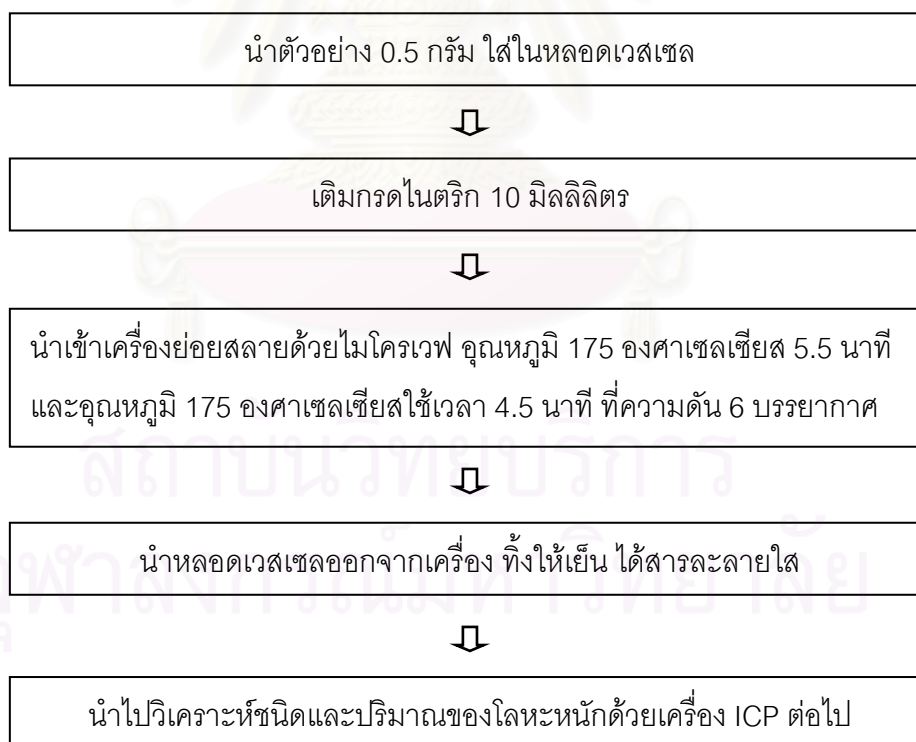
การทดลองที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างกากตะกอน

#### 3.6.1 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (METHOD 3051)

นำกากตะกอนมาทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานที่ 3051 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency: US EPA) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างดังกล่าวด้วยเครื่อง ICP

ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ สรุปดังรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. นำตัวอย่างกากตะกอนที่ต้องการย่อยสลายปริมาณ 0.5 กรัม (หลังจากนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 104 °ซ ในหลอดเวสเซล (vessel tube)
2. เติมน้ำในตริก 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดเวสเซล (vessel tube) ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ กำหนดช่วงอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ระยะเวลาย่อยสลาย 5.5 นาที และช่วงอุณหภูมิ 175-180 องศาเซลเซียสใช้เวลา 4.5 นาที ที่ความดัน 6 บรรยากาศ
3. เมื่อครบกำหนดนำหลอดเวสเซล (Vessel tube) ออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็นลง จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากอิออน (Deionized Water) ให้เป็น 50 มิลลิลิตร และใส่ในขวดพลาสติกที่เตรียมไว้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP



**รูปที่ 3.6** แผนผังแสดงขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟตามวิธีมาตรฐาน 3051 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency: US EPA)

### 3.6.2 ขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พิจารณาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนว่ามีปริมาณเกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 หรือไม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (sodium citrate) 0.2 โมลาร์ ที่พีเอช  $5.0 \pm 0.1$  เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในวิธี WET (WET extraction solution) โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดซิตริก (citric acid) ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอช ให้เป็น 5.0 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 นอร์มอล สารละลายกรดซิตริก (citric acid) สามารถเตรียมได้โดยนำเอา analytical grade citric acid ไปละลายในน้ำปราศจากไอออน

2. นำ 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน

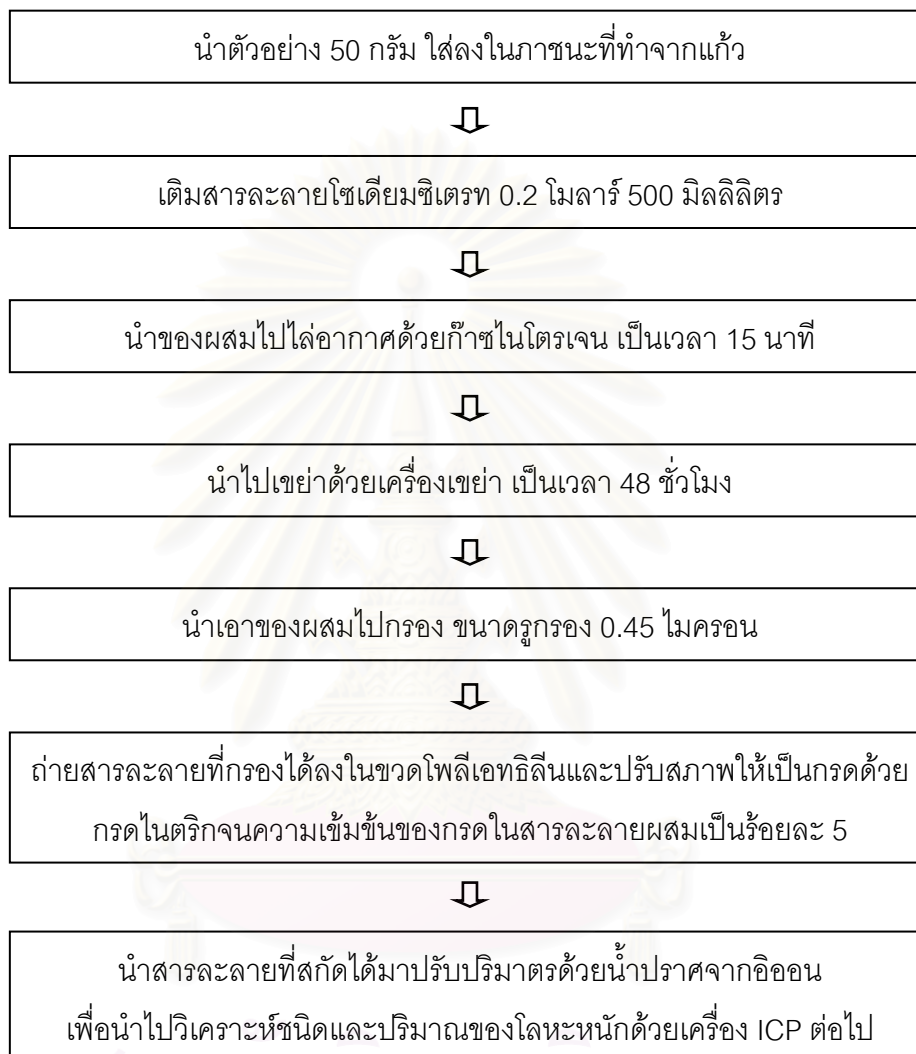
3. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปใส่ภาชนะด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไปและป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบ สามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็ก อาจต้องปั่นด้วยแรงเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง  $10,000 \times G$  ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

5. ถ่ายสารละลายที่กรองได้จากลงในขวดโพลีเอทิลีนและปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสมเป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง) และใส่ในขวดพลาสติกที่เตรียมไว้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ต่อไป

หมายเหตุ ด้วยข้อจำกัดในเรื่องขนาดของถังปฏิกรณ์ มีความสามารถในการบรรจุกากตะกอนได้ 500 กรัม ซึ่งหลังการบำบัดได้แบ่งกากตะกอนออกเป็น 3 ส่วน เมื่อนำกากตะกอนแต่ละส่วนมาใช้ในการทดลอง พบว่าหลังนำกากตะกอนไปอบแห้ง มีปริมาณกากตะกอนไม่ถึง 50 กรัม

ในการทดลองจึงทำการลดปริมาณกากตะกอนโดยใช้อัตราส่วนเดิม กล่าวคือ กากตะกอนลดปริมาณลงเหลือ 5 กรัมและน้ำสกัดเหลือ 50 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

### 3.6.3 ขั้นตอนการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential Extraction) ด้วยวิธีของ BCR (Bureau Communautaire de Référence) หรือในชื่อภาษาอังกฤษว่า Community Bureau of Reference (Quevauviller, 2002)

ในการสกัดแต่ละขั้น ใช้ตัวอย่าง 1 กรัม หลังจากอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยครกเซรามิค แล้วนำไปผ่านเครื่องคัดขนาด 0.1 มิลลิเมตร (Sieve shaker) เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenized) เก็บรักษาในขวดพลาสติก ในตู้ดูดความชื้น ที่อุณหภูมิห้อง โดยมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 การสกัดสำหรับรูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Exchangeable and Bound to carbonate)

ตัวอย่างจะถูกสกัดด้วยกรดอะซิติก (HOAc) 0.11 โมลาร์ ที่พีเอช 7 โดยใช้ 40 มิลลิลิตร กับตัวอย่าง 1 กรัม ในหลอดหมุนเหวี่ยงนำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

แยกสารละลายออกจากตัวอย่างด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วเทชั้นน้ำใสผ่านกระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ในหลอดพลาสติกแล้วนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง 15 นาที เพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้าง

ขั้นที่ 2 การสกัดสำหรับรูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Bound to Fe oxide and Bound to Mn oxide)

นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) 0.5 โมลาร์ ที่พีเอช 1.5 โดยใช้ 40 มิลลิลิตรที่เพิ่งเตรียมกับตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 1 ในหลอดหมุนเหวี่ยงเดิม เขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

แยกสารละลายออกจากตัวอย่างด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วเทชั้นน้ำใสผ่านกระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ในหลอดพลาสติกแล้วนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง 15 นาที เพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้าง

ขั้นที่ 3 การสกัดสำหรับรูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (Bound to organic matter and sulfide)

นำตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาสกัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30% ที่พีเอช 2 โดยใช้ 10 มิลลิลิตร กับตัวอย่างที่เหลือจากขั้นที่ 2 ในหลอดหมุนเหวี่ยงเดิมเขย่าและย้ายใส่ใน



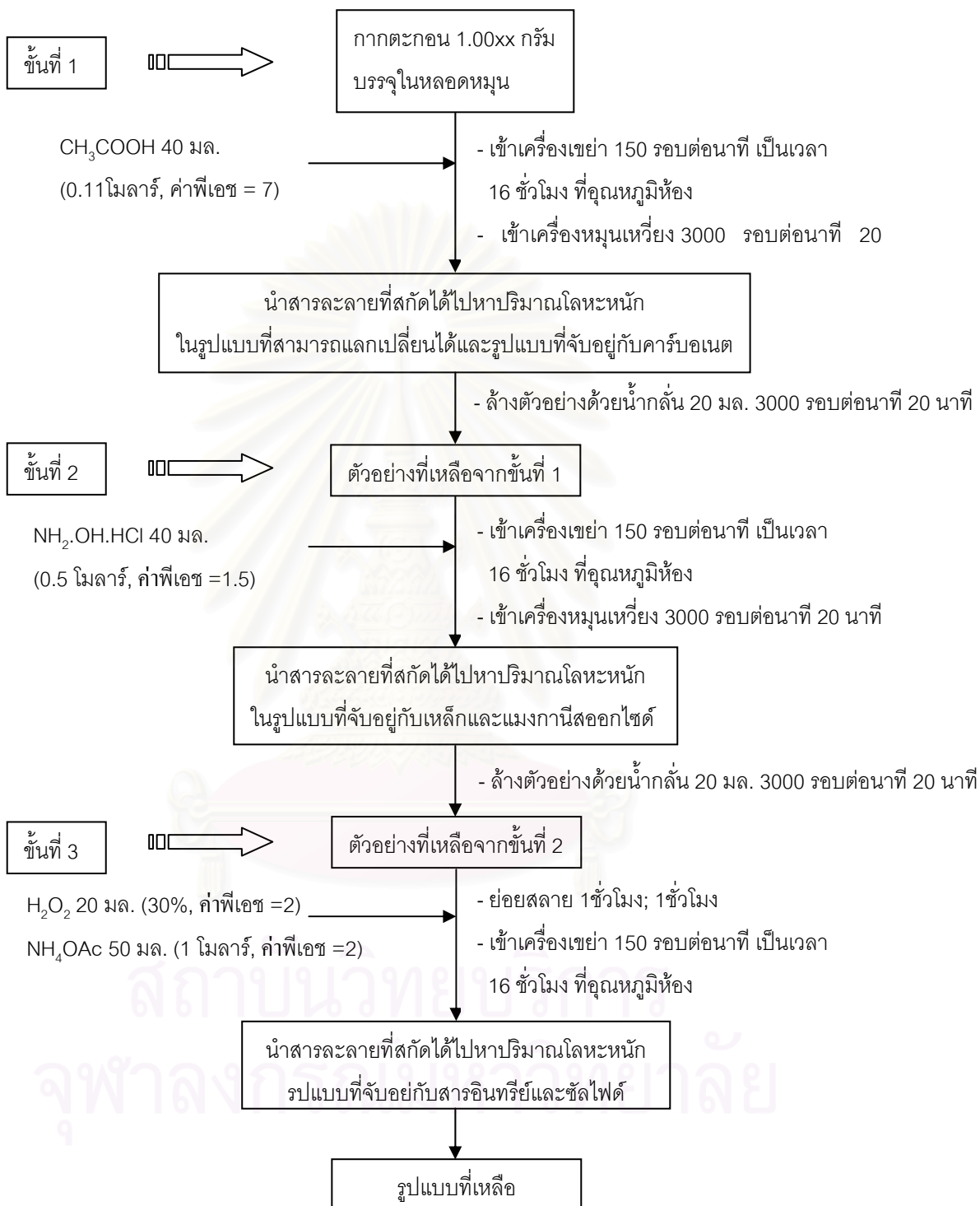
บีกเกอร์ขนาด 30 มิลลิลิตร ย่อยสลายต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่  $85 \pm 2$  °ซ โดยใช้ hot plate และเมื่อปริมาตรลดลงเหลือ 1 มิลลิลิตร จึงเพิ่มสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $85 \pm 2$  °ซ ย่อยสลายต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนปริมาตรเหลือ 1 มิลลิลิตร จากนั้นใส่สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1.0 โมลาร์ ที่พีเอช 2 โดยใช้ 50 มิลลิลิตรในขณะที่ตัวอย่างเย็นและเป็ยกขึ้น เขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

แยกสารละลายออกจากตัวอย่างด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วเทชั้นน้ำใสผ่านกระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ในหลอดพลาสติกแล้วนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง 15 นาที เพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้าง

**ตารางที่ 3.5** แสดงสารที่ใช้สกัด ระยะเวลา พีเอช และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการสกัดตามลำดับขั้น

รูปแบบของโลหะหนัก	สารที่ใช้สกัด	สภาวะของการสกัด	
		เวลา	อุณหภูมิ (°ซ)
1. รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอน	กรดอะซิติก 40 มิลลิลิตร (0.11 โมลาร์, พีเอช = 7)	16 ชั่วโมง	อุณหภูมิห้อง*
2. รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์	ไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ 40 มิลลิลิตร (0.5 โมลาร์, พีเอช = 1.5)	16 ชั่วโมง	อุณหภูมิห้อง
3. รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิลิตร (30%, พีเอช = 2) แอมโมเนียมอะซิเตต 50 มิลลิลิตร (1 โมลาร์, พีเอช = 2)	1 ชั่วโมง; 1 ชั่วโมง; 16 ชั่วโมง	อุณหภูมิห้อง; $85 \pm 2$ °ซ; อุณหภูมิห้อง

\*หมายเหตุ ปกติอุณหภูมิในการสกัดปกติจะอยู่  $20-25$  °ซ หรือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งปกติแล้วสภาวะอุณหภูมิห้องทดลองโดยทั่วไปมีผลต่อการสกัดโลหะหนักน้อยมาก (Hlavay และคณะ, 2004)



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential Extraction)

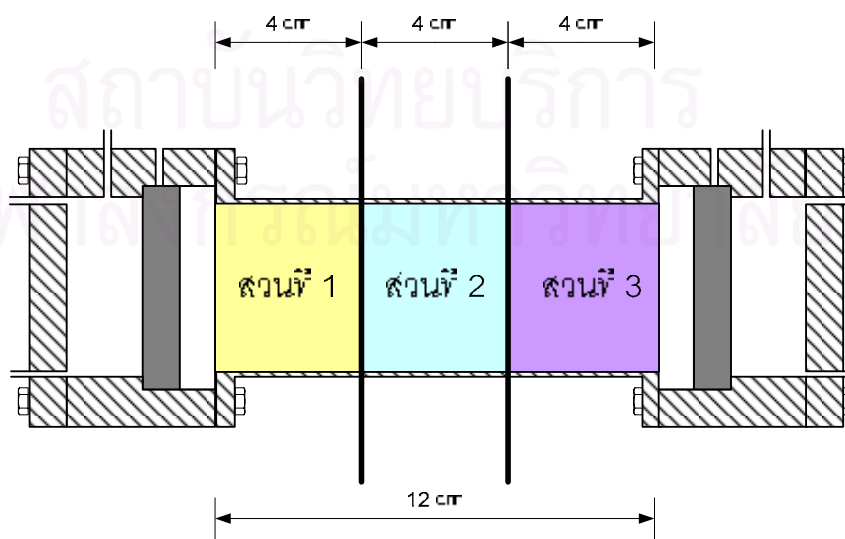
## การทดลองที่ 2 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

### 3.6.4 การทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

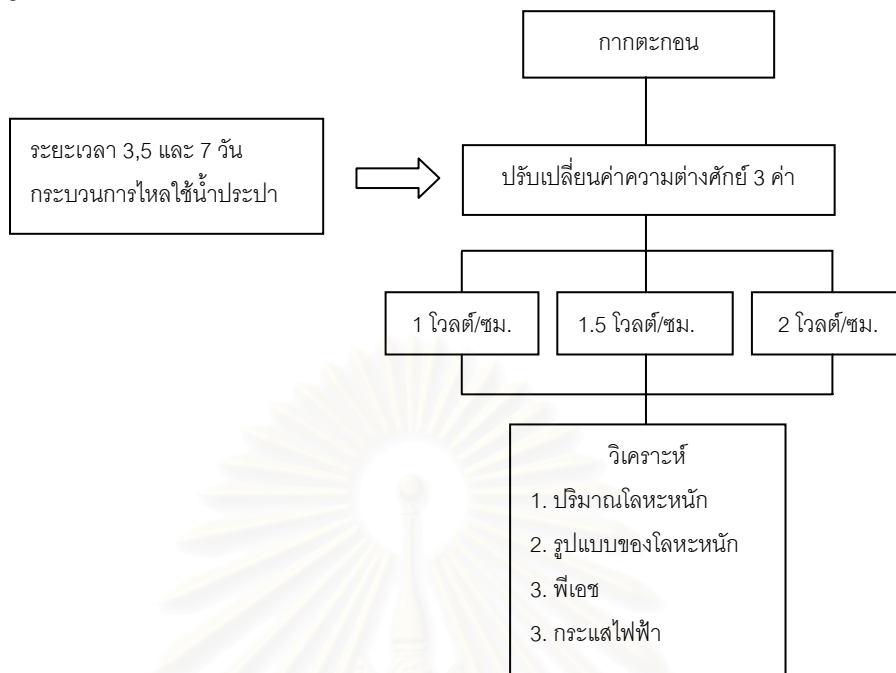
1. ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า จะทำการปรับเปลี่ยน 3 ค่า คือ 1 โวลต์/เซนติเมตร 1.5 โวลต์/เซนติเมตร และ 2 โวลต์/เซนติเมตร
2. ระยะเวลาการเกิดกระบวนการจะใช้เวลาตั้งแต่ 3, 5 และ 7 วัน
3. กระบวนการไหล (Processing Fluid) ที่ขั้วบวก (Anode) จะเปรียบเทียบระหว่างของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำประปาและกรดอะซิติก

### 3.6.5 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

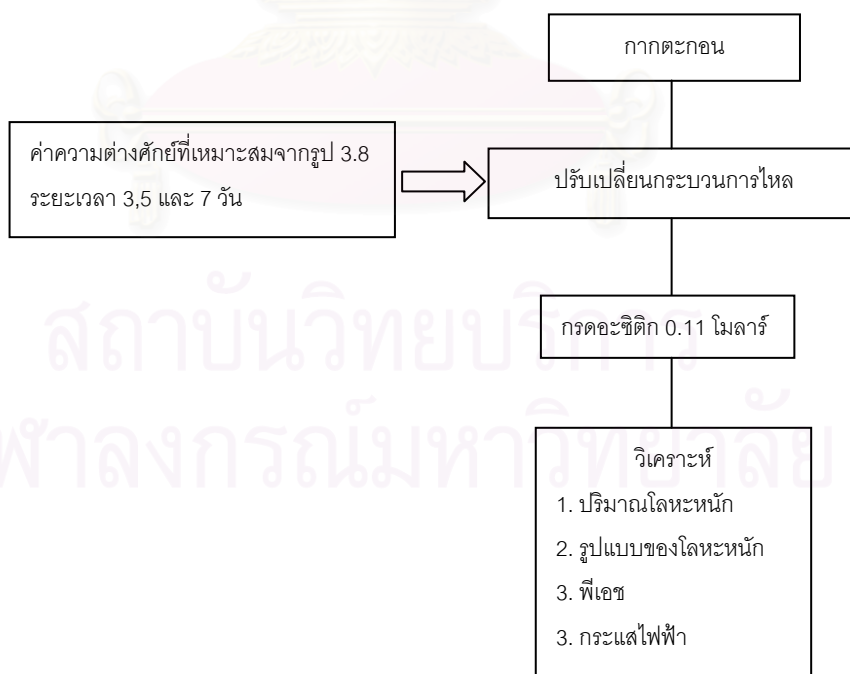
หลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกจะทำการแบ่งกากตะกอนเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กันตามระยะจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ (ส่วนที่ 1-3) โดยมีตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโลหะหนักรวมทุกรูปแบบในกากตะกอนด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (microwave digestion) หาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในดินตะกอน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential extraction) และวิธี Waste Extraction Test (WET)



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของกากตะกอนแต่ละส่วนที่ทำการแบ่ง



รูปที่ 3.10 การศึกษาค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาการเกิดกระบวนการ



รูปที่ 3.11 แผนผังการศึกษากระบวนการไหล

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัท พีซีทีที จำกัด จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นบริษัทผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (Flexible printed circuits) โดยกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะเก็บในส่วนของถังทำชั้น (thickener)

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม มีดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักก่อนการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนกากตะกอน พบว่ามีโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง 8 ชนิดได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) ซีลีเนียม (Se) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) โดยมีผลการทดลองดังนี้

##### 4.1.1 ผลการหาปริมาณโลหะหนักรวม (Total Metals) ทุกรูปแบบในกากตะกอนด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

ปริมาณโลหะหนักรวมในกากตะกอนก่อนการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าปริมาณเกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (แสดงไว้ในตารางที่ 4.1) อยู่ 5 ชนิดได้แก่ ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และ ซีลีเนียม (Se) โดยมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 9842, 4132.67, 352.15, 1570 และ 213 มก./กก. ตามลำดับ จึงถือได้ว่าเป็นของเสียที่จัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย ซึ่งโลหะดังกล่าวมีปริมาณสูงเนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตแผงวงจรไฟฟ้าใช้โลหะหนักเหล่านี้ในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการเคลือบผิว ชั้นส่วนของแผงวงจร รวมไปถึงการเตรียมชิ้นงานด้วยการล้างทำความสะอาด นอกจากนี้ยังพบ เหล็ก (Fe) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) โดยมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 728.67, 544.60 และ 592.67 มก./กก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กับผลการทดลองตามวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

โลหะ ปริมาณ	ทองแดง (Cu)	แคดเมียม (Cd)	นิกเกิล (Ni)	ตะกั่ว (Pb)	ซีลีเนียม (Se)	เหล็ก (Fe)	วาเนเดียม (V)	สังกะสี (Zn)
ผล	9842.00	352.15	4132.67	1570.00	213.00	728.67	544.60	592.67
มาตรฐาน	2500	100	2000	1000	100	ไม่ระบุ	2400	5000

#### 4.1.2 ผลการหาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

ปริมาณโลหะหนักที่หาได้จากวิธี Waste Extraction Test (WET) พบว่ามีปริมาณเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด (แสดงไว้ในตารางที่ 4.2) อยู่ 4 ชนิดได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) โดยมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 57.10, 2.98, 25.04 และ 10.58 มก./ลิตร. ตามลำดับ จึงถือได้ว่าเป็นของเสียที่จัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย นอกจากนี้ยังพบ ซีลีเนียม (Se) เหล็ก (Fe) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) โดยมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 0.64, 2.07, 3.26 และ 0.82 มก./ลิตร. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กับผลการทดลองตามวิธี Waste Extraction Test (WET) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

โลหะ ปริมาณ	ทองแดง (Cu)	แคดเมียม (Cd)	นิกเกิล (Ni)	ตะกั่ว (Pb)	ซีลีเนียม (Se)	เหล็ก (Fe)	วาเนเดียม (V)	สังกะสี (Zn)
ผล	57.10	2.98	25.04	10.58	0.64	2.07	3.26	0.82
มาตรฐาน	25	1	20	5	1	ไม่ระบุ	24	250



#### 4.1.3 ผลการหาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในภาคตะกอนด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential Extraction)

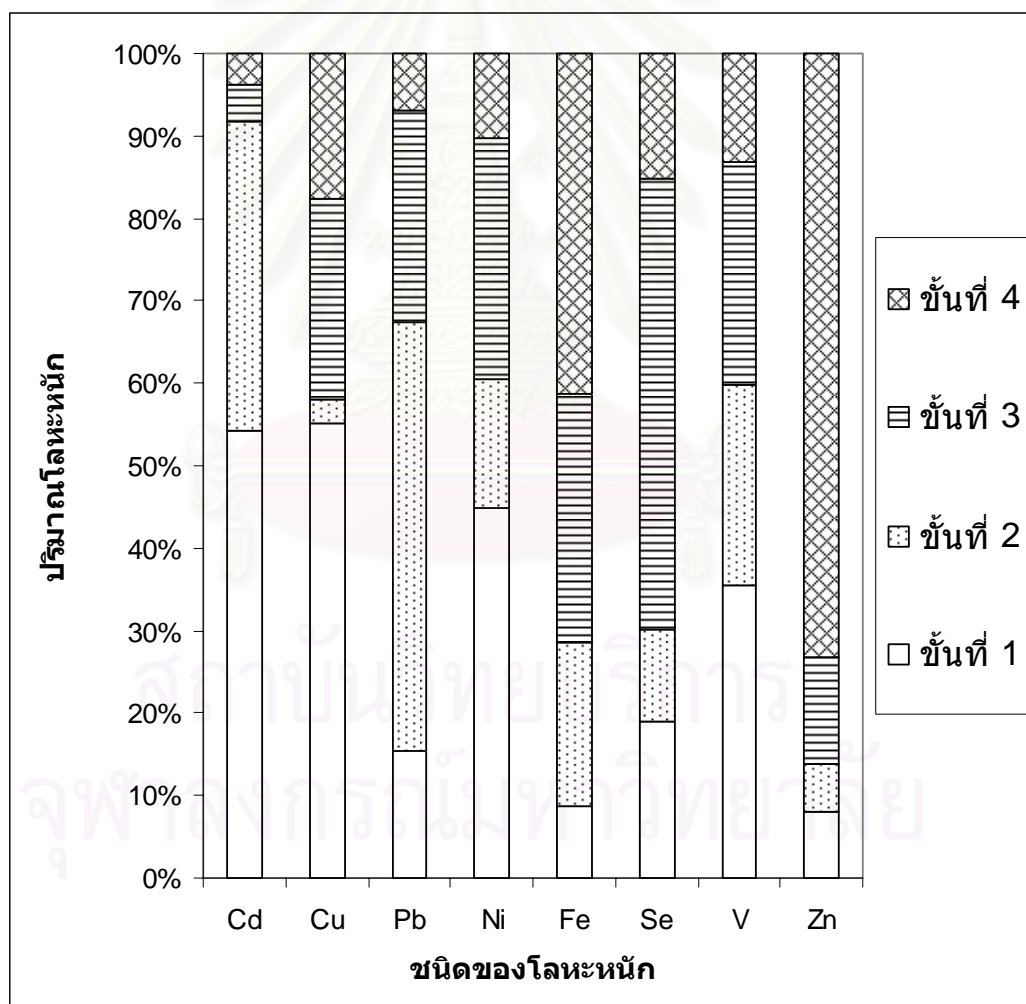
ผลจากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนทั้ง 4 ขั้นตอนที่มีความหมายดังนี้

ขั้นที่ 1 คือ รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต

ขั้นที่ 2 คือ รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (หรือรูปแบบออกไซด์)

ขั้นที่ 3 คือ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์

ขั้นที่ 4 คือ รูปแบบที่เหลือ



รูปที่ 4.1 แสดงสัดส่วนรูปแบบของโลหะหนักแต่ละชนิดในภาคตะกอนก่อนการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

จากผลการทดลองดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าโลหะหนักที่มีปริมาณมากในชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการชะละลายและอ็อกซอนของโลหะหนักมีความสามารถในการเคลื่อนที่ง่ายสุด โลหะหนักที่มีปริมาณมากในชั้นที่ 1 นี้ ได้แก่ ทองแดง (Cu) มีปริมาณร้อยละ 55 แคดเมียม (Cd) มีปริมาณร้อยละ 54 นิกเกิล (Ni) มีปริมาณร้อยละ 44 และวานาเดียม (V) มีปริมาณร้อยละ 35

ชั้นที่ 2 หรือ รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ พบว่า ตะกั่ว (Pb) มีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 52 รองลงมาคือ แคดเมียม (Cd) ปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 37

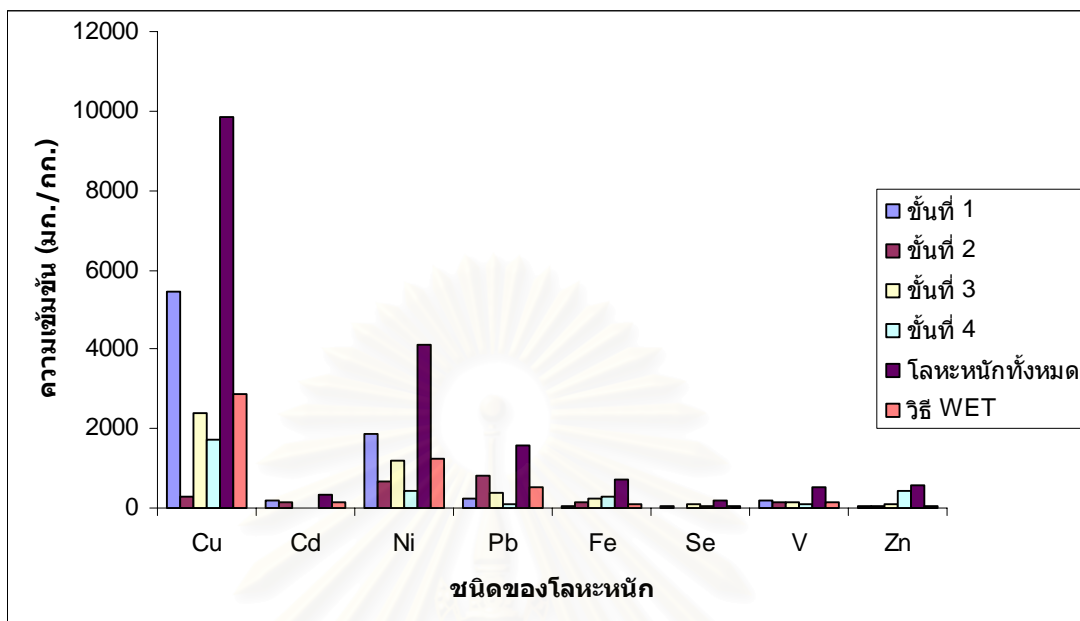
ชั้นที่ 3 หรือ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ พบว่า ซีลีเนียม (Se) มีปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 54

ชั้นที่ 4 หรือ รูปแบบที่เหลือ พบว่า สังกะสี (Zn) มีปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 73 รองลงมาคือ เหล็ก (Fe) ปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 41

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างกากตะกอนทั้ง 3 วิธี

วิธีการ ชนิดโลหะ	Total		วิธี WET			วิธีสกัดตามลำดับชั้น			
	มก./กก.		มก./กก.	มก./ลิตร		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4
	ผล	มาตรฐาน	ผล	ผล	มาตรฐาน	ผล	ผล	ผล	ผล
ทองแดง (Cu)	9842.00	2500	2854.87	57.10	25	5431.87	277.87	2390.90	1741.37
แคดเมียม	352.15	100	149.09	2.98	1	190.79	132.40	15.45	13.51
นิกเกิล (Ni)	4132.67	2000	1251.87	25.04	20	1850.67	653.07	1201.50	427.43
ตะกั่ว (Pb)	1570.00	1000	529.00	10.58	5	241.60	816.40	403.50	108.50
เหล็ก (Fe)	728.67	ไม่ระบุ	103.73	0.64	ไม่ระบุ	63.47	144.00	221.00	300.20
ซีลีเนียม (Se)	213.00	100	32.07	2.07	1	40.40	23.73	116.75	32.12
วานาเดียม (V)	544.60	2400	163.00	3.26	24	193.00	132.27	147.00	72.33
สังกะสี (Zn)	592.67	5000	41.00	0.82	250	47.00	34.67	76.50	434.50

จากตารางที่ 4.3 นำสร้างกราฟแสดงปริมาณของโลหะแต่ละชนิดแต่ละวิธีการได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงปริมาณโลหะหนักที่หาได้จาก 3 วิธี

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักในกากตะกอนหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก โดยมีผลการทดลองหลังการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกเป็นดังนี้

4.2.1 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

##### 4.2.1.1 ปริมาณโลหะหนักและประสิทธิภาพการกำจัด

###### 1) ปริมาณโลหะหนักรวม

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิออนของโลหะหนักซึ่งมีประจุเป็นบวกเคลื่อนที่จากโครงสร้างเดิมที่จับอยู่กับกากตะกอนไปยังขั้วลบ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดจากปริมาณโลหะหนักรวมพบว่า ทองแดง (Cu) มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเนื่องจากทองแดงมีส่วนของรูปแบบในชั้นที่ 1 สูงมากดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูปแบบดังกล่าวสามารถถูกกำจัดได้ง่าย ประสิทธิภาพใน

การกำจัดปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบจึงสูงตามไปด้วย โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เมื่อพิจารณาถึงมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่ง ปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (แสดงไว้ในตารางที่ 4.1) พบว่าหลังการกำจัดโลหะหนัก 5 ชนิดที่เกินมาตรฐานได้แก่ ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และ ซีลีเนียม (Se) มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียวคือ ตะกั่ว (Pb) ที่ผ่านมาตรฐาน คือปริมาณหลังการกำจัดลดลง เหลือ 954.31 มก./กก. แต่ต้องใช้ระยะเวลาถึง 7 วัน

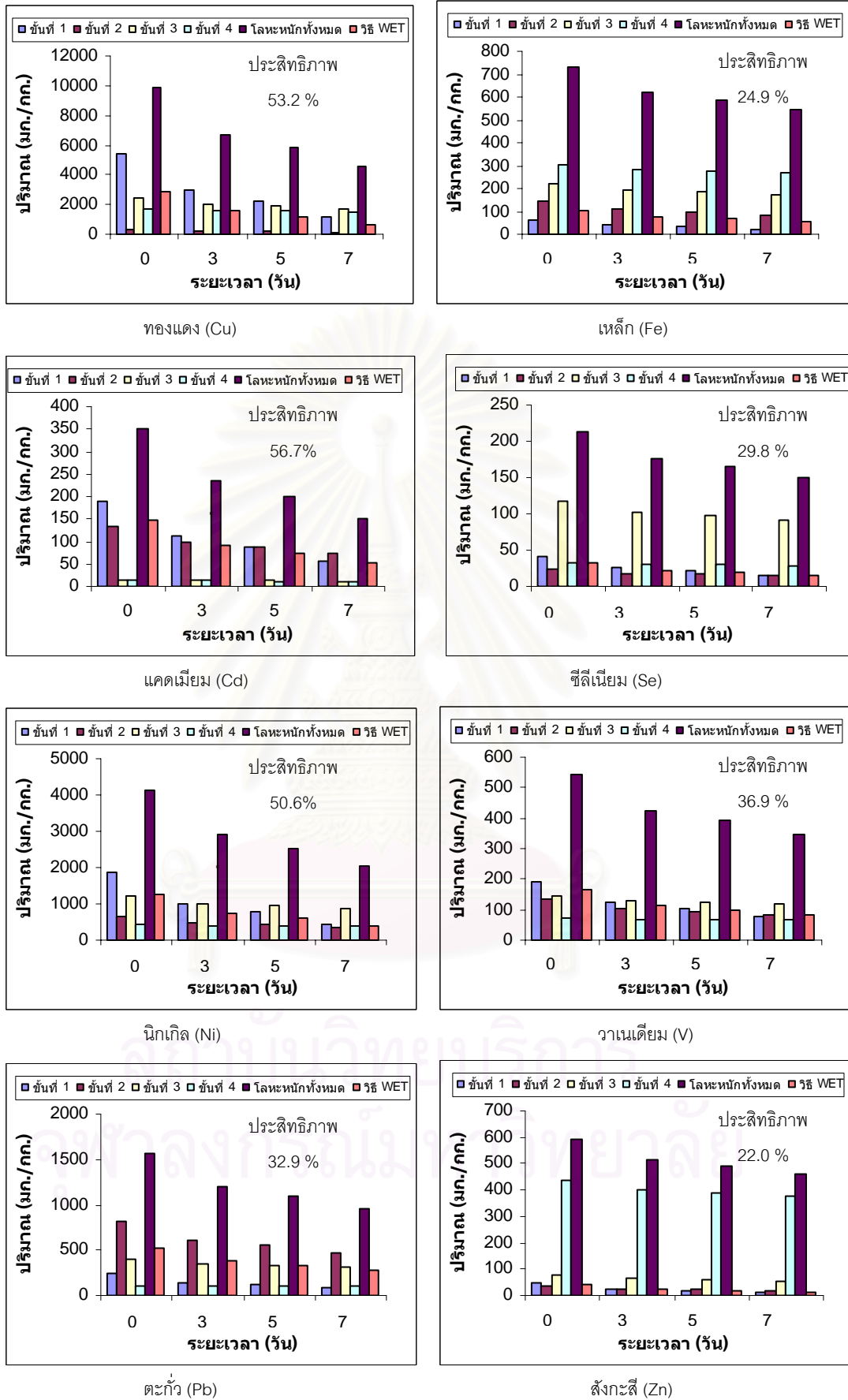
### 2) วิธี Waste Extraction Test (WET)

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีโลหะหนัก เพียง 2 ชนิดที่ผ่านมาตรฐาน ได้แก่ นิกเกิล (Ni) มีปริมาณหลังการกำจัดลดลงเหลือ 14.873 มก./ลิตร ใช้ระยะเวลา 3 วัน และทองแดง (Cu) ลดลงเหลือ 23.576 มก./ลิตร ที่ระยะเวลา 5 วัน

### 3) วิธีการสกัดตามลำดับชั้น

พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแต่ละรูปแบบนั้นมีความยากง่ายไม่ เท่ากัน กล่าวคือ ชั้นที่ 1 (รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอน) มีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นอื่นๆ รองลงมาคือ ชั้นที่ 2 (รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์) ชั้นที่ 3 (รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และ ซัลไฟด์) และชั้นที่ 4 (รูปแบบที่เหลือ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคไนติกที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด โดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะหนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	110.66	86.62	55.37	2933.21	2183.61	1209.13	144.96	115.97	78.28	1017.87	768.03	443.23
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	97.65	87.22	73.66	197.98	174.01	142.86	612.30	551.07	471.47	469.39	414.29	342.66
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	13.20	12.52	11.65	2009.02	1894.46	1745.52	347.46	330.65	308.79	1013.77	957.45	884.23
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	12.52	12.23	11.84	1602.30	1560.58	1506.34	100.97	98.70	95.77	394.04	384.02	371.00
ทั้งหมด (มก./กก.)	234.03	198.59	152.52	6742.51	5812.66	4603.86	1205.68	1096.39	954.31	2895.06	2523.78	2041.12
WET (มก./กก.)	91.65	74.42	52.02	1565.59	1178.81	676.00	378.63	333.52	274.87	743.63	591.16	392.95
WET (มก./ลิตร)	1.833	1.488	1.040	31.312	23.576	13.520	7.573	6.670	5.497	14.873	11.823	7.859
ชนิดโลหะหนัก	เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	39.35	32.11	22.71	25.45	20.97	15.14	125.93	105.58	79.14	26.03	19.64	11.34
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	109.80	99.54	86.20	18.24	16.60	14.46	103.33	94.65	83.37	24.92	21.99	18.19
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	191.84	183.09	171.72	101.75	97.25	91.40	129.14	123.78	116.81	64.55	60.96	56.30
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	280.40	274.45	266.73	30.05	29.43	28.63	67.94	66.62	64.91	400.55	390.37	377.13
ทั้งหมด (มก./กก.)	621.38	589.20	547.36	175.50	164.25	149.63	426.33	390.63	344.22	516.05	492.97	462.96
WET (มก./กก.)	74.57	65.83	54.46	21.85	18.78	14.80	114.63	100.12	81.25	25.48	20.82	14.76
WET (มก./ลิตร)	1.491	1.317	1.089	0.437	0.376	0.296	2.293	2.002	1.625	0.510	0.416	0.295

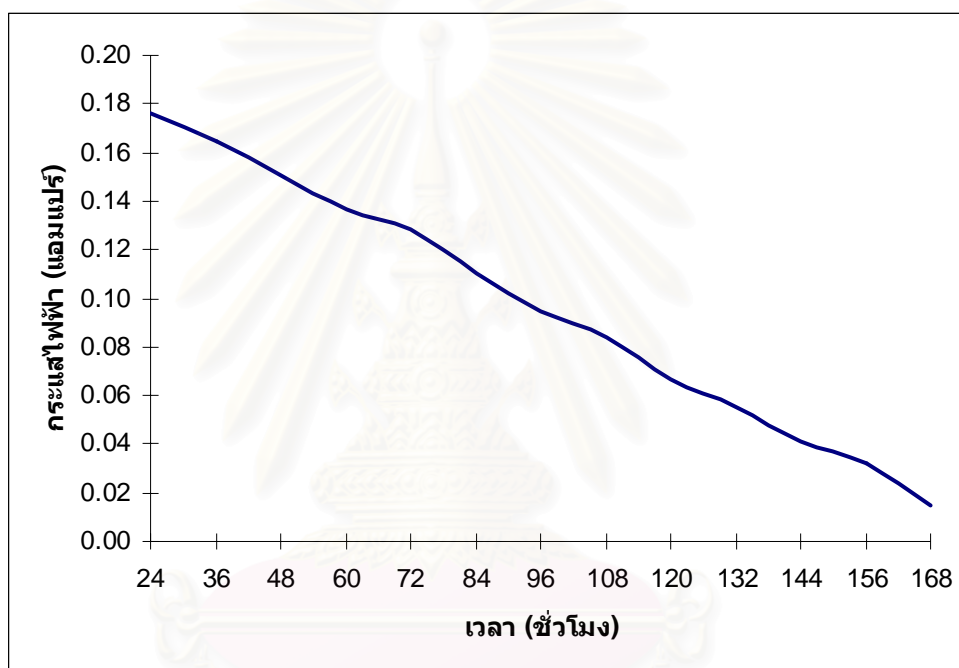


ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะ หนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)			เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ชั้นที่ 1 (%)	42.0	54.6	71.0	46.0	59.8	77.7	40.0	52.0	67.7	45.0	58.5	76.1	38.0	49.4	64.6	37.0	48.1	62.9	35.0	48.1	59.3	45.1	58.6	76.6
ชั้นที่ 2 (%)	26.3	34.1	44.4	28.8	37.4	48.7	25.0	32.5	42.3	28.1	36.6	47.6	23.8	30.9	40.3	23.3	30.2	39.6	21.9	30.2	37.2	28.3	36.8	48.3
ชั้นที่ 3 (%)	14.6	19.0	24.8	16.0	20.8	27.0	13.9	18.1	23.5	15.6	20.3	26.4	13.2	17.2	22.4	12.9	16.7	21.8	12.2	16.7	20.7	15.7	20.4	26.8
ชั้นที่ 4 (%)	7.2	9.4	12.0	8.0	10.4	13.5	6.8	8.9	11.2	7.8	10.1	13.1	6.5	8.5	11.0	6.2	8.1	10.0	5.9	8.1	9.5	7.8	10.1	13.1
ทั้งหมด (%)	33.5	43.6	56.7	31.5	40.9	53.2	23.2	30.2	39.2	29.9	38.9	50.6	14.7	19.1	24.9	17.6	22.9	29.8	21.8	22.9	36.9	13.0	16.9	22.0
WET (%)	35.6	46.2	60.1	45.2	58.7	76.3	28.4	37.0	48.1	40.6	52.8	68.6	28.2	36.6	47.8	32.0	41.5	54.3	29.7	41.5	50.3	38.0	49.4	64.6

#### 4.2.1.2 ค่ากระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.4 เมื่อให้ความต่างศักย์คงที่ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากในระหว่างการทดลองที่ขั้วบวกและขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส โดยที่ขั้วลบจะเกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ขึ้นเมื่อโลหะในภาชนะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ไอออนของโลหะหนักจะไปเกาะกับขั้วลบ และบางส่วนก็จะไปจับกับไฮดรอกซิลไอออน เกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ค่าความต้านทานสูงขึ้น) ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง

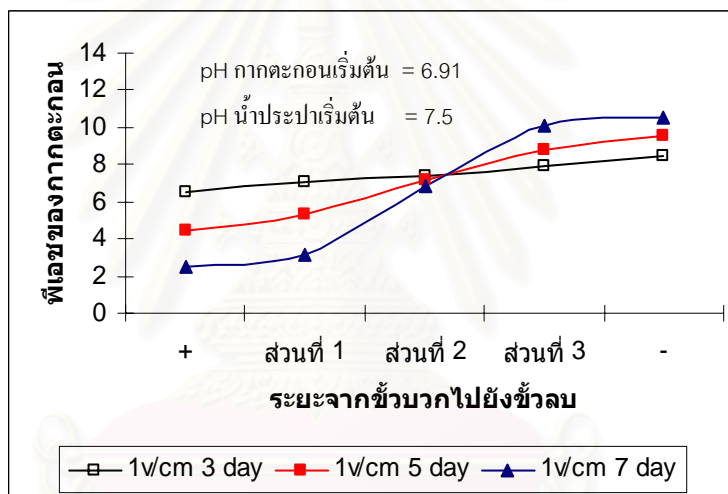


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงระยะเวลาที่ 3, 5, และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 0.128, 0.067 และ 0.015 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนักที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน

#### 4.2.1.3 ค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตได้ว่าค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วบวกจะลดลงจากเริ่มต้นที่ 7.5 ลดลงเหลือ 6.5 ถึง 2.5 เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ไฮโดรเจนไอออนนี้ทำให้เกิดสภาวะกรดและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วบวกคือกากตะกอนส่วนที่ 1 มีค่าพีเอชลดลงไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.1 ถึง 3.2 ในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วลบจะเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 7.5 เพิ่มขึ้นเป็น 8.5 ถึง 10.5 เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้เกิดเบสและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วลบคือกากตะกอนส่วนที่ 3 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.9 ถึง 10.1



รูปที่ 4.5 แสดงค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ผลของค่าพีเอชนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก กล่าวคือ กากตะกอนส่วนที่ 1 (ส่วนที่อยู่ใกล้ขั้วบวก) ที่มีค่าพีเอชต่ำ ซึ่งสภาพของกากตะกอนเป็นกรดมีความสามารถในการคายโลหะหนักได้ดี เนื่องจากสภาวะกรดนี้ช่วยลดความแข็งแรงของรูปแบบของโลหะหนัก

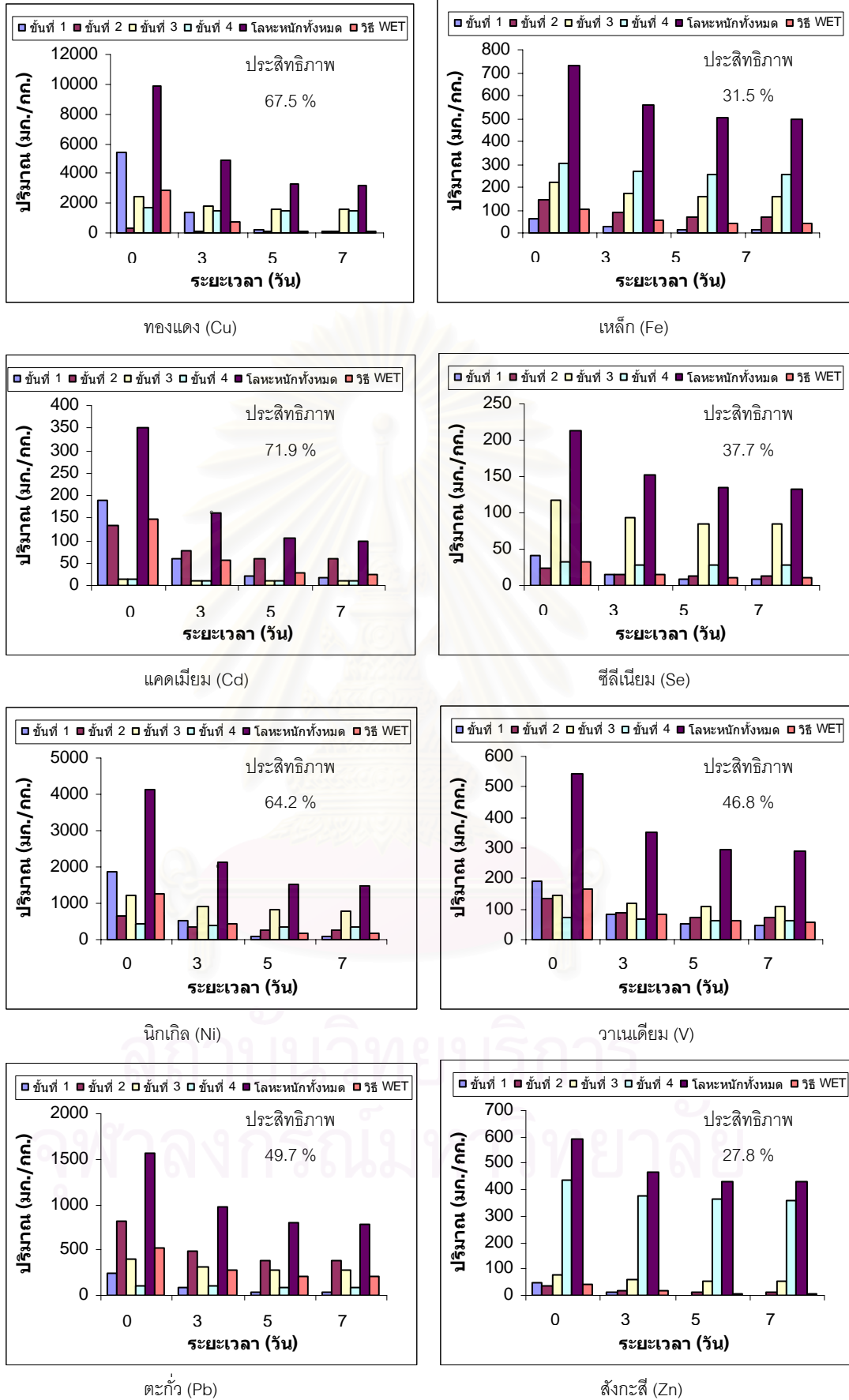
4.2.2 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

#### 4.2.2.1 ปริมาณโลหะหนักและประสิทธิภาพการกำจัด

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะสังเกตได้ว่า ปริมาณโลหะหนักในการทดลองนี้ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ปริมาณโลหะหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 5 วันแรกเท่านั้น แต่หลังจาก 5 วันไปแล้วปริมาณจะโลหะหนักลดลงน้อยมาก โดยสังเกตได้จากแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.6 ระหว่างระยะเวลา 5 วันและ 7 วันที่เป็นสาเหตุนี้ เนื่องจากการปรับค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจาก 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็น 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้น และทำให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรกของการทดลอง ส่งผลให้การกำจัดเร็วกว่าค่าความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่หลังจาก 5 วัน ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักก็จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ทำให้ที่ขั้วลบเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตัน (Clogging) ส่งผลให้ออกอนโลหะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น

ปริมาณโลหะหนักรวม จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาถึงมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (แสดงไว้ในตารางที่ 4.1) พบว่ามีโลหะที่ผ่านมาตรฐานดังนี้ นิกเกิล (Ni) 1532.36 มก./กก. ที่ระยะเวลา 5 วัน แคดเมียม (Cd) 99.00 มก./กก. ที่ระยะเวลา 7 วัน และตะกั่ว (Pb) 981.19 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน

ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีโลหะหนักที่ผ่านมาตรฐานดังนี้ ทองแดง (Cu) 15.422 มก./ลิตร ที่ระยะเวลา 3 วัน นิกเกิล (Ni) 8.609 มก./ลิตรที่ระยะเวลา 3 วัน ตะกั่ว (Pb) 4.261 มก./ลิตร ที่ระยะเวลา 5 วัน และ แคดเมียม (Cd) 0.568 มก./ลิตร ที่ระยะเวลา 5 วัน



รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด โดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะหนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	61.28	22.43	19.06	1393.49	181.98	76.98	85.41	38.55	34.49	504.68	100.89	65.89
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	76.23	59.38	57.92	148.75	110.02	106.66	486.53	387.57	378.99	356.21	267.15	259.43
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	11.81	10.72	10.62	1773.70	1588.54	1572.49	312.92	285.75	283.40	898.08	807.05	799.17
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	11.92	11.44	11.40	1516.60	1449.17	1443.33	96.32	92.67	92.35	373.46	357.27	355.87
ทั้งหมด (มก./กก.)	161.24	103.96	99.00	4832.55	3329.71	3199.47	981.19	804.54	789.23	2132.43	1532.36	1480.36
WET (มก./กก.)	56.25	28.40	25.99	771.12	146.00	91.82	285.97	213.06	206.74	430.44	184.02	162.66
WET (มก./ลิตร)	1.125	0.568	0.520	15.422	2.920	1.836	5.719	4.261	4.135	8.609	3.680	3.253
ชนิดโลหะหนัก	เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	24.49	12.79	11.78	16.24	8.99	8.36	84.14	51.27	48.42	12.91	2.58	1.69
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	88.73	72.14	70.71	14.86	12.20	11.97	85.50	71.48	70.26	18.91	14.18	13.77
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	173.87	159.73	158.51	92.51	85.24	84.61	118.13	109.47	108.71	57.18	51.39	50.88
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	268.19	258.59	257.76	28.78	27.78	27.70	65.23	63.10	62.91	379.64	363.18	361.75
ทั้งหมด (มก./กก.)	555.28	503.26	498.75	152.39	134.21	132.64	353.00	295.31	290.30	468.63	431.33	428.09
WET (มก./กก.)	56.61	42.47	41.24	15.55	10.60	10.17	84.82	61.37	59.34	15.91	8.38	7.73
WET (มก./ลิตร)	1.132	0.849	0.825	0.311	0.212	0.203	1.696	1.227	1.187	0.318	0.168	0.155



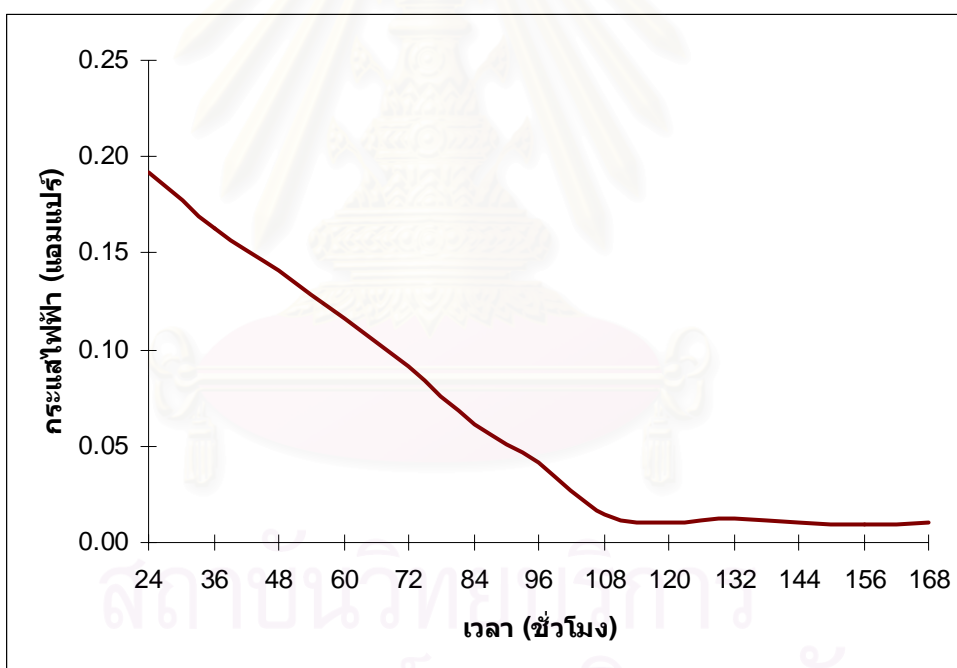
ตารางที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก กำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะ หนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)			เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ขั้นที่ 1 (%)	67.9	88.2	90.0	74.4	96.7	98.6	64.8	84.0	85.7	72.7	94.5	96.4	61.8	79.7	81.3	60.1	77.7	79.2	56.7	73.5	75.0	73.3	94.4	96.3
ขั้นที่ 2 (%)	42.4	55.1	56.3	46.6	60.4	61.6	40.4	52.5	53.6	45.5	59.1	60.3	38.6	49.9	50.9	37.9	48.4	49.4	35.6	45.9	46.8	46.2	58.9	60.1
ขั้นที่ 3 (%)	23.7	30.6	31.2	25.8	33.6	34.2	22.5	29.2	29.7	25.3	32.8	33.5	21.4	27.7	28.2	20.9	27.0	27.5	19.8	25.5	26.0	25.6	32.7	33.4
ขั้นที่ 4 (%)	11.4	15.4	15.7	12.9	16.7	17.0	10.7	14.7	15.0	12.5	16.4	16.8	10.5	13.9	14.2	9.5	13.7	14.0	9.1	12.9	13.2	12.5	16.4	16.8
ทั้งหมด (%)	54.2	70.5	71.9	50.9	66.2	67.5	37.5	48.8	49.7	48.4	62.9	64.2	23.8	30.9	31.5	28.5	37.0	37.7	35.3	45.8	46.8	21.0	27.3	27.8
WET (%)	57.5	74.7	76.2	73.0	94.9	96.8	46.0	59.7	60.9	65.6	85.3	87.0	45.7	59.0	60.2	51.9	66.8	68.2	48.1	62.3	63.6	61.9	79.4	81.0

#### 4.2.2.2 ค่ากระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.7 เมื่อให้ความต่างศักย์คงที่ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้น แต่หลังจากระยะเวลา 5 วัน ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ก็จะคงที่เหลือประมาณ 0.01 แอมแปร์

เนื่องจากการปรับค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจาก 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็น 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรกของการทดลอง ส่งผลให้การกำจัดเร็วกว่าค่าความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่หลังจาก 5 วัน ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักก็จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ทำให้ขั้วลบเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตัน(Clogging) ส่งผลให้อิออนโลหะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น

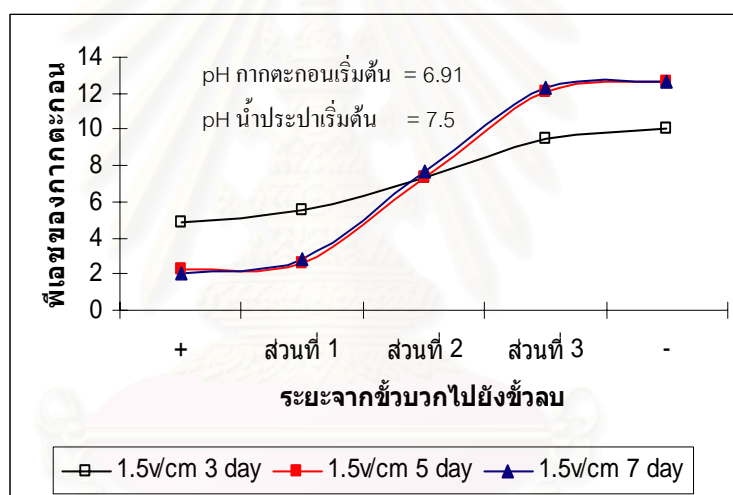


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงระยะเวลาที่ 3, 5, และ 7 วัน มีค่า เท่ากับ 0.092, 0.011 และ 0.010 แอมแปร์ ตามลำดับ

#### 4.2.2.3 ค่าพีเอชของกากตะกอน

จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่าค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วบวกจะลดลงจากเริ่มต้นที่ 7.5 ลดลงเหลือ 4.9 ถึง 2.0 เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ไฮโดรเจนไอออนนี้ทำให้เกิดสภาวะกรดและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วบวกคือกากตะกอนส่วนที่ 1 มีค่าพีเอชลดลงไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 ถึง 2.8 ในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วลบจะเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 7.5 เพิ่มขึ้นเป็น 10.1 ถึง 12.7 เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้เกิดเบสและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วลบคือกากตะกอนส่วนที่ 3 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 9.5 ถึง 12.3



รูปที่ 4.8 แสดงค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

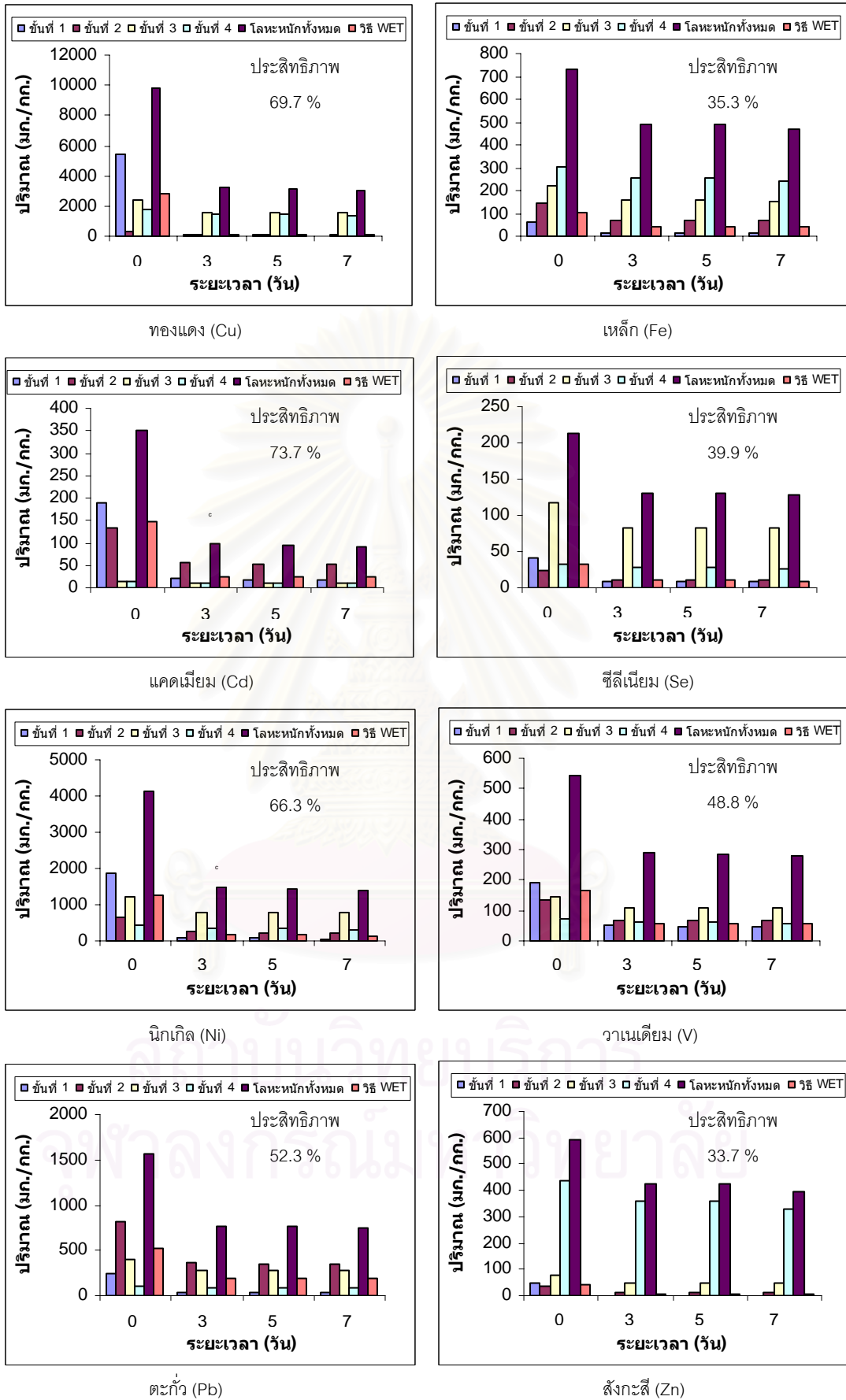
4.2.3 กำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

#### 4.2.3.1 ปริมาณโลหะหนักและประสิทธิภาพการกำจัด

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรและ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะสังเกตได้ว่า ปริมาณโลหะหนักในการทดลองนี้ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ปริมาณโลหะหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 3 วันแรกเท่านั้น แต่หลังจาก 3 วันไปแล้วปริมาณโลหะหนักลดลงน้อยมาก เนื่องจากการปรับค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้นเป็น 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง ส่งผลให้การกำจัดเร็วกว่าค่าความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรและ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่หลังจาก 3 วัน ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักก็จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ทำให้ที่ขั้วลบเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนักทำให้เกิดการตัน (Clogging) ส่งผลให้อิออนโลหะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น

ปริมาณโลหะหนักรวม จากตารางที่ 4.8 พบว่ามีโลหะหนักที่ผ่านมาตรฐานดังนี้ นิกเกิล (Ni) 1461.15 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน แคดเมียม (Cd) 97.24 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน และตะกั่ว (Pb) 766.99 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน

ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่ามีโลหะหนักทุกชนิดที่ผ่านมาตรฐาน



รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด โดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะหนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	20.74	19.04	18.18	129.48	76.46	49.68	36.52	34.47	33.43	83.39	65.72	56.79
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	54.76	53.99	53.60	99.42	97.63	96.73	360.49	355.93	353.62	242.78	238.67	236.60
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	10.42	10.37	10.34	1537.86	1529.33	1525.03	278.32	277.06	276.43	782.14	777.95	775.83
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	11.31	11.29	10.45	1430.72	1427.61	1312.16	91.67	91.50	85.07	352.84	352.09	324.24
ทั้งหมด (มก./กก.)	97.24	94.69	92.58	3197.49	3131.04	2983.60	766.99	758.96	748.56	1461.15	1434.43	1393.46
WET (มก./กก.)	25.25	24.02	23.39	114.45	87.05	73.21	198.50	195.20	193.53	163.08	152.19	146.70
WET (มก./ลิตร)	0.505	0.480	0.468	2.289	1.741	1.464	3.970	3.904	3.871	3.262	3.044	2.934
ชนิดโลหะหนัก	เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	12.29	11.78	11.52	8.68	8.36	8.20	49.84	48.40	47.68	2.13	1.68	1.45
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	67.60	66.84	66.45	11.47	11.35	11.29	67.64	66.99	66.66	12.89	12.67	12.56
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	155.86	155.21	154.88	83.25	82.91	82.74	107.09	106.70	106.49	49.80	49.53	49.40
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	255.96	255.52	238.45	27.51	27.46	25.68	62.52	62.42	58.58	358.67	357.92	329.60
ทั้งหมด (มก./กก.)	491.72	489.35	471.31	130.91	130.09	127.91	287.09	284.50	279.41	423.49	421.80	393.01
WET (มก./กก.)	39.95	39.31	38.99	10.08	9.86	9.75	58.74	57.70	57.17	7.51	7.18	7.01
WET (มก./ลิตร)	0.799	0.786	0.780	0.202	0.197	0.195	1.175	1.154	1.143	0.150	0.144	0.140



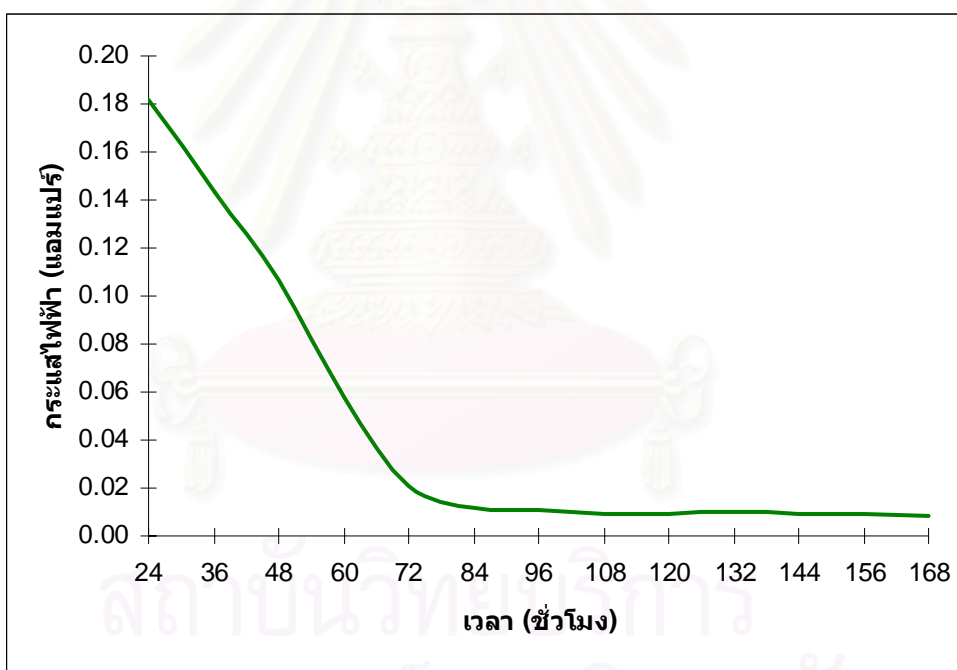
ตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชนิดโลหะ หนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)			เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ขั้นที่ 1 (%)	89.1	90.0	90.5	97.6	98.6	99.1	84.9	85.7	86.1	95.5	96.4	96.9	80.5	81.3	81.7	78.4	79.2	79.6	74.2	75.0	75.4	92.9	93.9	94.2
ขั้นที่ 2 (%)	58.6	59.2	59.5	64.2	64.8	65.2	55.8	56.4	56.7	62.8	63.4	63.8	53.0	53.5	53.8	51.5	52.0	52.3	48.8	49.3	49.5	62.6	63.3	63.6
ขั้นที่ 3 (%)	32.5	32.9	33.0	35.7	36.0	36.2	31.0	31.3	31.5	34.9	35.2	35.4	29.4	29.7	29.9	28.7	29.0	29.1	27.1	27.4	27.5	34.8	35.2	35.3
ขั้นที่ 4 (%)	16.4	16.5	22.7	17.7	17.9	24.6	15.6	15.8	21.7	17.5	17.7	24.2	14.8	14.9	20.6	14.6	14.7	20.3	13.8	13.9	19.2	17.7	17.9	24.5
ทั้งหมด (%)	72.4	73.1	73.7	67.5	68.2	69.7	51.1	51.7	52.3	64.6	65.3	66.3	32.5	32.8	35.3	38.5	38.9	39.9	47.3	47.8	48.8	28.6	28.9	33.7
WET (%)	76.6	77.4	77.8	96.0	96.9	97.4	62.5	63.1	63.4	87.0	87.8	88.3	61.4	62.0	62.4	68.5	69.2	69.5	63.9	64.6	64.9	81.5	82.3	82.8

#### 4.2.3.2 ค่ากระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.10 เมื่อให้ความต่างศักย์คงที่ที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก แต่หลังจากระยะเวลา 3 วัน ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ก็จะคงที่เหลือประมาณ 0.01 แอมแปร์

เนื่องจากการปรับค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้นเป็น 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง ส่งผลให้การกำจัดเร็วกว่าค่าความต่างศักย์ที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรและ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร แต่หลังจาก 3 วัน ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักก็จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ทำให้ที่ขั้วลบเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตัน (Clogging) ส่งผลให้อิออนโลหะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น

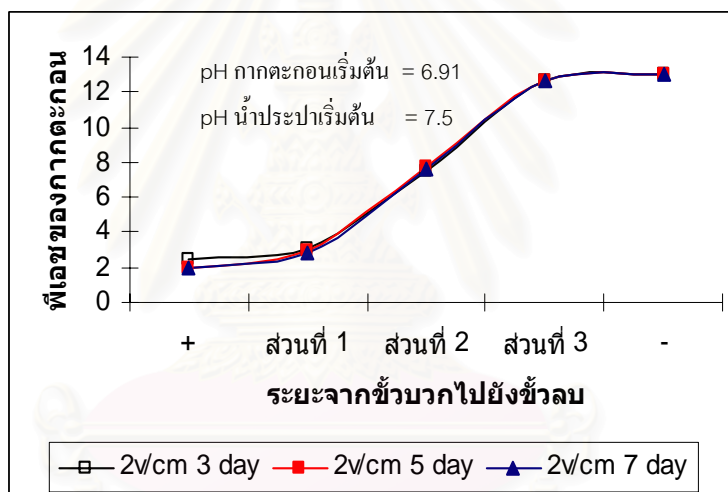


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงระยะเวลาที่ 3, 5, และ 7 วัน มีค่า เท่ากับ 0.021, 0.010 และ 0.009 แอมแปร์ ตามลำดับ

#### 4.2.3.3 ค่าพีเอชของกากตะกอน

จากรูปที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่าค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วบวกจะลดลงจากเริ่มต้นที่ 7.5 ลดลงเหลือ 2.5 ถึง 2 เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ไฮโดรเจนไอออนนี้ทำให้เกิดสภาวะกรดและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วบวกคือกากตะกอนส่วนที่ 1 มีค่าพีเอชลดลงไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.1 ถึง 2.8 ในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำประปาที่ขั้วลบจะเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 7.5 เพิ่มขึ้นเป็น 13 เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้เกิดเบสและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วลบคือกากตะกอนส่วนที่ 3 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 12.6



รูปที่ 4.11 แสดงค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

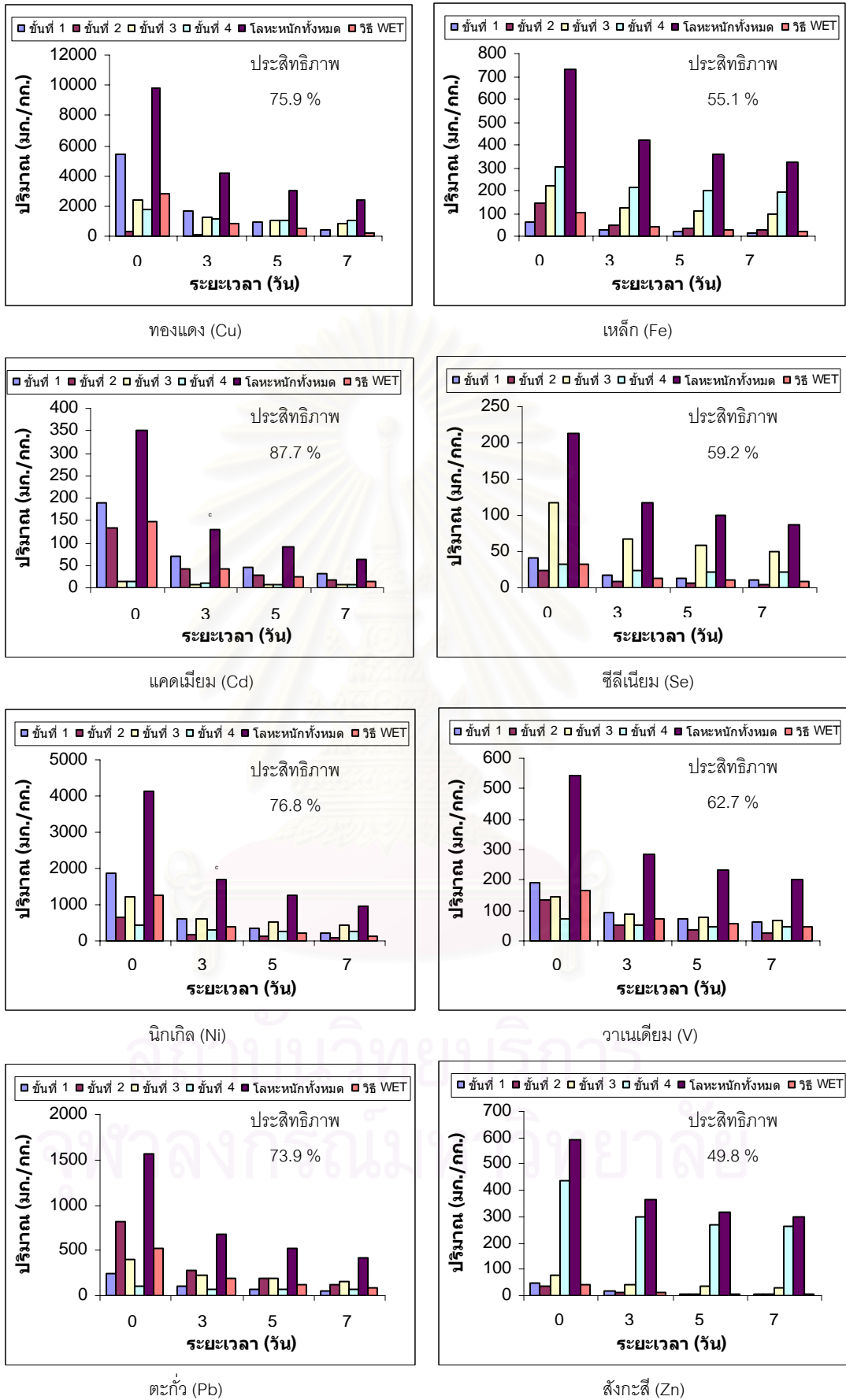
4.2.4 กำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

#### 4.2.4.1 ปริมาณโลหะหนักและประสิทธิภาพการกำจัด

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองโดยปรับเปลี่ยนกระบวนการไหลระหว่างน้ำประปา กับกรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ โดยให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น สังเกตได้จากการเปรียบเทียบกราฟแผนภูมิแท่งระหว่างรูปที่ 4.12 กับรูปที่ 4.6 พบว่าหลังจากระยะเวลา 5 วัน กระบวนการไหลที่ใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ มีความสามารถทำให้ปริมาณโลหะหนักลดลงอย่างต่อเนื่อง และในทุกช่วงของเวลาที่ 3, 5 และ 7 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักก็สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไหลที่ใช้น้ำประปา

ปริมาณโลหะหนักรวม จากตารางที่ 4.10 พบว่ามีโลหะหนักที่ผ่านมาตรฐานดังนี้ ทองแดง (Cu) 2375.87 มก./กก. ที่ระยะเวลา 7 วัน นิกเกิล (Ni) 1702.09 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน แคดเมียม (Cd) 89.57 มก./กก. ที่ระยะเวลา 5 วัน ตะกั่ว (Pb) 671.60 มก./กก. ที่ระยะเวลา 3 วัน

ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) จากตารางที่ 4.10 พบว่ามีโลหะหนักทุกชนิดที่ผ่านมาตรฐาน



รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลติก ที่ความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 3, 5 และ 7 วัน กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด โดยกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

ชนิดโลหะหนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	70.82	46.82	32.43	1665.09	911.73	459.72	97.49	68.67	51.37	597.22	346.52	196.11
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	41.57	27.12	17.83	76.29	45.66	26.95	273.05	184.68	126.66	185.62	113.73	69.21
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	8.37	7.03	6.02	1229.23	1012.07	851.20	224.29	190.00	164.30	625.97	517.94	437.74
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	9.44	8.61	8.33	1187.49	1074.19	1038.00	76.77	70.23	68.07	293.29	265.81	256.99
ทั้งหมด (มก./กก.)	130.21	89.57	64.61	4158.09	3043.65	2375.87	671.60	513.58	410.40	1702.09	1244.01	960.05
WET (มก./กก.)	43.70	24.47	12.63	870.69	478.70	243.33	185.27	126.67	89.02	391.42	230.13	132.66
WET (มก./ลิตร)	0.874	0.489	0.253	17.414	9.574	4.867	3.705	2.533	1.780	7.828	4.603	2.653
ชนิดโลหะหนัก	เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	ระยะเวลา	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ชั้นที่ 1 (มก./กก.)	27.66	20.50	16.20	18.26	13.83	11.18	93.83	73.85	61.86	15.27	8.86	5.02
ชั้นที่ 2 (มก./กก.)	51.18	35.77	25.46	8.69	6.17	4.46	51.30	37.46	27.96	9.85	6.04	3.67
ชั้นที่ 3 (มก./กก.)	125.99	107.68	93.92	67.40	57.85	50.67	86.98	75.29	66.48	39.86	32.98	27.87
ชั้นที่ 4 (มก./กก.)	215.00	197.39	191.50	23.14	21.28	20.66	52.75	48.69	47.30	298.14	270.21	261.24
ทั้งหมด (มก./กก.)	419.84	361.34	327.08	117.49	99.13	86.96	284.86	235.29	203.60	363.12	318.09	297.80
WET (มก./กก.)	39.42	28.14	20.83	13.47	10.00	7.82	72.56	55.65	44.91	12.56	7.45	4.34
WET (มก./ลิตร)	0.788	0.563	0.417	0.269	0.200	0.156	1.451	1.113	0.898	0.251	0.149	0.087

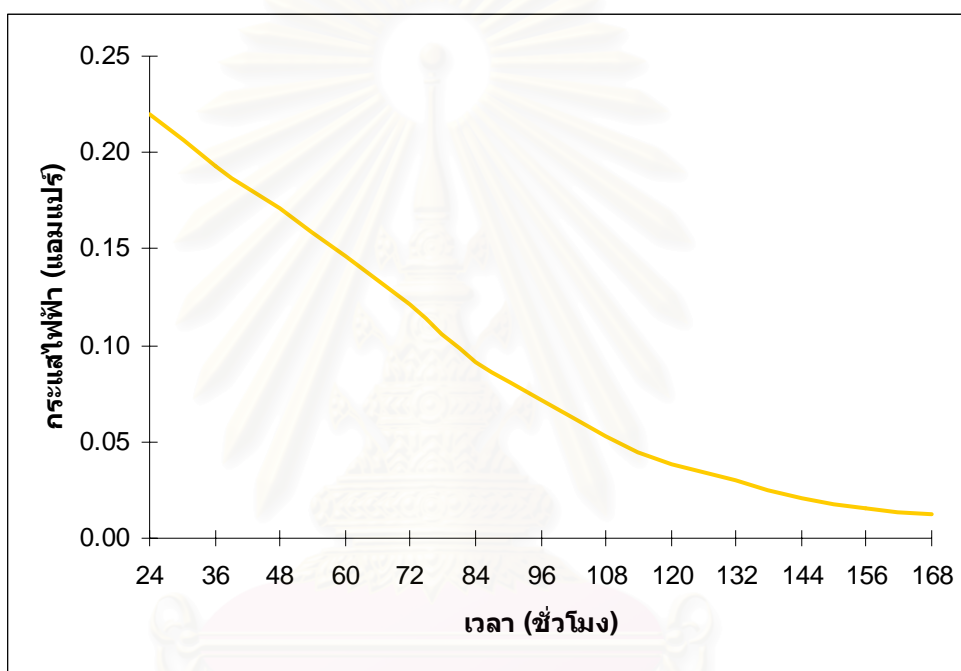


ตารางที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักกำหนดความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

ชนิดโลหะ หนัก	แคดเมียม (Cd)			ทองแดง (Cu)			ตะกั่ว (Pb)			นิกเกิล (Ni)			เหล็ก (Fe)			ซีลีเนียม (Se)			วานาเดียม (V)			สังกะสี (Zn)		
	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ชั้นที่ 1 (%)	62.9	75.5	83.0	69.3	83.2	91.5	59.6	71.6	78.7	67.7	81.3	89.4	56.4	67.7	74.5	54.8	65.8	72.3	51.6	61.9	68.1	67.7	81.3	89.4
ชั้นที่ 2 (%)	68.6	79.5	86.5	72.5	83.6	90.3	66.6	77.4	84.5	71.6	82.6	89.4	64.5	75.2	82.3	63.4	74.0	81.2	61.2	71.7	78.9	71.6	82.6	89.4
ชั้นที่ 3 (%)	45.8	54.5	61.0	48.6	57.7	64.4	44.4	52.9	59.3	47.9	56.9	63.6	43.0	51.3	57.5	42.3	50.5	56.6	40.8	48.8	54.8	47.9	56.9	63.6
ชั้นที่ 4 (%)	30.1	36.3	38.3	31.8	38.3	40.4	29.2	35.3	37.3	31.4	37.8	39.9	28.4	34.2	36.2	27.9	33.7	35.7	27.1	32.7	34.6	31.4	37.8	39.9
ทั้งหมด (%)	63.0	74.6	81.7	57.8	69.1	75.9	57.2	67.3	73.9	58.8	69.9	76.8	42.4	50.4	55.1	44.8	53.5	59.2	47.8	56.9	62.7	38.8	46.4	49.8
WET (%)	65.2	77.1	84.5	69.5	83.2	91.5	65.0	76.1	83.2	68.7	81.6	89.4	62.0	72.9	79.9	58.0	68.8	75.6	55.5	65.9	72.4	69.4	81.8	89.4

#### 4.2.4.2 ค่ากระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.10 เมื่อให้ความต่างศักย์คงที่ที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากกรดอะซิติกจะยับยั้งการเกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และช่วยลดการขัดขวางของตะกอนไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดีขึ้น (ค่าความต้านทานสูงขึ้น) ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง และไอออนของโลหะหนักเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ดีขึ้น

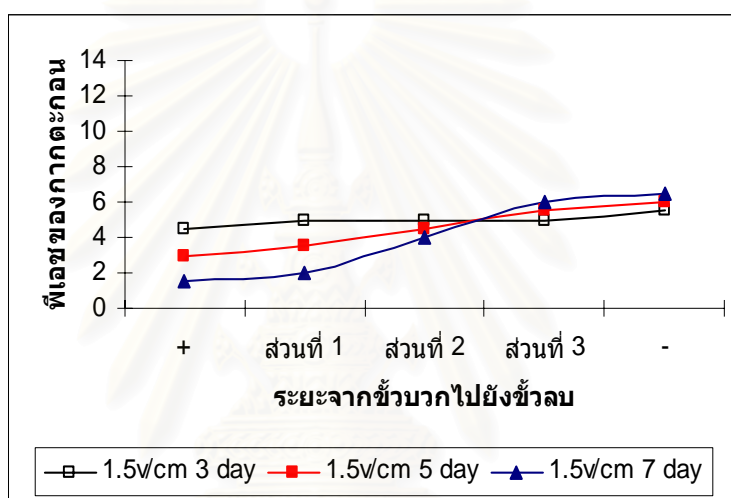


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงระยะเวลาที่ 3, 5, และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 0.122, 0.039 และ 0.012 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนักที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน

#### 4.2.4.3 ค่าพีเอชของกากตะกอน

จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่าค่าพีเอชของกรดอะซิติกที่ขั้วบวกจะลดลงจากเริ่มต้นที่ 7 ลดลงเหลือ 4.5 ถึง 1.5 เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ไฮโดรเจนไอออนนี้ทำให้เกิดสภาวะกรดและส่งผลให้กากตะกอนบริเวณใกล้ขั้วบวกคือกากตะกอนส่วนที่ 1 มีค่าพีเอชลดลงไปด้วยโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ถึง 2 ในขณะที่ค่าพีเอชของกรดอะซิติกที่ขั้วลบจะเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 7 เพิ่มขึ้นเป็น 5.5 ถึง 6.5 โดยกรดอะซิติกจะยับยั้งการเกิดไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้ค่าพีเอชของกากตะกอนมีค่าต่ำในทุกๆช่วง



รูปที่ 4.14 แสดงค่าพีเอชของกากตะกอนและบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ความต่างศักย์คงที่ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ใช้กรดอะซิติก 0.1 โมลาร์

#### 4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข.2) จะคำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้าและค่าน้ำประปา ไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็น การทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยแค่ไหน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการฝังกลบและการทดลองทางกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก หากใช้ที่ค่าความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าสูงมาก 3434.76 บาทต่อตัน และค่าน้ำประปา 957.60 บาทต่อตัน รวมเป็นค่าใช้จ่าย 4,392.63 บาทต่อตัน ในขณะที่ทางโรงงานได้เสียค่าใช้จ่ายในการจ้างบริษัทบำบัดและฝังกลบ 2,375 บาทต่อตัน (ไม่รวมค่าขนส่ง) แม้กระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก แต่ถ้าพิจารณาในด้านคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมแล้ว งานวิจัยนี้ให้ประโยชน์อย่างมาก เพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ซึ่งแนวทางนี้ในต่างประเทศให้ความสนใจมาก ซึ่งคาดว่าแนวทางนี้น่าจะเป็นที่สนใจของประเทศไทยมากขึ้น การลงทุนแม้ว่าจะต้องเสียค่าใช้จ่าย แต่เป็นการลงทุนที่คุ้มค่า และมีประโยชน์ระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม และในต่างประเทศได้มีการนำโลหะที่แยกได้ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งทำให้เกิดผลตอบแทนที่คุ้มค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนก่อนการกำจัดมีค่าดังนี้ แคดเมียม 352.15 มก./กก. ทองแดง 9842.00 มก./กก. ตะกั่ว 1570.00 มก./กก. นิกเกิล 4132.67 มก./กก. เหล็ก 728.67 มก./กก. ซีลีเนียม 213.00 มก./กก. วาเนเดียม 544.60 มก./กก. และสังกะสี 592.67 มก./กก.

2. ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้น้ำประปาเป็นกระบวนการไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ หากพิจารณาที่ระยะเวลาในการกำจัดที่ 7 วัน พบว่า ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักรวม มีค่าดังนี้ แคดเมียม 56.7 % ทองแดง 53.2 % ตะกั่ว 39.2 % นิกเกิล 50.6 % เหล็ก 24.9 % ซีลีเนียม 29.8 % วาเนเดียม 36.9 % และสังกะสี 22.0 %

ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักรวม มีค่าดังนี้ แคดเมียม 71.9 % ทองแดง 67.5 % ตะกั่ว 49.7 % นิกเกิล 64.2 % เหล็ก 31.5 % ซีลีเนียม 37.7 % วาเนเดียม 46.8 % และสังกะสี 27.8 %

ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักรวม มีค่าดังนี้ แคดเมียม 73.7 % ทองแดง 69.7% ตะกั่ว 52.3 % นิกเกิล 66.3 % เหล็ก 35.3 % ซีลีเนียม 39.9 % วาเนเดียม 48.8 % และสังกะสี 33.7 %

จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสูงขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักรวมขึ้นอยู่กับรูปแบบของโลหะหนักชนิดนั้นๆ ในกากตะกอน กล่าวคือ หากมีรูปแบบในชั้นที่ 1 ได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนेट ในสัดส่วนที่มากกว่ารูปแบบอื่นก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงตามไปด้วย

3. ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด หากพิจารณาที่ระยะเวลาในการกำจัดที่ 7 วัน พบว่า ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด มีค่าดังนี้ แคดเมียม 152.52 มก./กก. ทองแดง 4603.86 มก./กก. ตะกั่ว 954.31 มก./กก. นิกเกิล 2041.12 มก./กก. เหล็ก 547.36 มก./กก. ซีลีเนียม 149.63 มก./กก. วาเนเดียม 344.22 มก./กก. และสังกะสี 462.96 มก./กก.

ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด มีค่าดังนี้ แคดเมียม 99.00 มก./กก. ทองแดง 3199.47 มก./กก. ตะกั่ว 789.23 มก./กก. นิกเกิล 1480.36 มก./กก.

เหล็ก 498.75 มก./กก. ซีลีเนียม 132.64 มก./กก. วาเนเดียม 290.30 มก./กก. และสังกะสี 428.09 มก./กก.

ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. ปริมาณโลหะหนักหลังการกำจัด มีค่าดังนี้ แคดเมียม 92.58 มก./กก. ทองแดง 2983.60 มก./กก. ตะกั่ว 748.56 มก./กก. นิกเกิล 1393.46 มก./กก. เหล็ก 471.31 มก./กก. ซีลีเนียม 127.91 มก./กก. วาเนเดียม 279.41 มก./กก. และสังกะสี 393.01 มก./กก.

4. ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจะลดลงตามระยะเวลาในการเกิดกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกที่เพิ่มขึ้น ตลอดระยะเวลา 7 วัน เมื่อให้ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. แต่ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. และ 2 โวลต์/ซม. อัตราการลดลงของปริมาณโลหะหนักจะช้าลงที่ระยะเวลา 5 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์เป็นผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ที่ขั้วลบเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้น ตะกอนเหล่านี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตัน (Clogging) ส่งผลให้อิออนโลหะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ยากขึ้น

5. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด โดยปรับเปลี่ยนกระบวนการไหลเป็นกรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร กับกระบวนการไหลที่ใช้ น้ำประปาที่ความต่างศักย์เดียวกัน พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของน้ำในขั้วลบ ถูกทำให้เป็นกลางโดยกรดอะซิติก โดยมีประสิทธิภาพดังนี้ แคดเมียม 81.7 % ทองแดง 75.9 % ตะกั่ว 73.9 % นิกเกิล 76.8 % เหล็ก 55.1 % ซีลีเนียม 59.2 % วาเนเดียม 62.7 % และสังกะสี 49.8 %

6. รูปแบบของโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ รูปแบบในชั้นที่ 1 ได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนेट รองลงมา คือ รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ส่วนรูปแบบที่กำจัดได้ยาก ได้แก่ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์ และรูปแบบอื่น ๆ

7. ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในระหว่างการทดลองมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ทำให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลง



8. หลังการทดลองค่าพีเอชของกากตะกอนเปลี่ยนไป โดยกากตะกอนที่ใกล้ขั้วบวก จะมีค่าต่ำลงอยู่ในช่วง 2.8-7.1 ซึ่งเป็นผลมาจากกรดที่ถูกสร้างขึ้นที่ขั้วบวกเคลื่อนที่ข้ามผ่าน กากตะกอน และค่าพีเอชของกากตะกอนใกล้ขั้วลบจะมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าในช่วง 7.9-10.1 ซึ่งเป็นผลมาจากไฮดรอกซิลไอออน (OH<sup>-</sup>) ที่ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของน้ำ

9. หากใช้ที่ค่าความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 3434.76 บาทต่อตัน และค่าน้ำประปา 957.60 บาทต่อตัน รวมเป็นค่าใช้จ่าย 4,392.63 บาทต่อตัน โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เสนอให้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนด้วย กระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก โดยปรับเปลี่ยนของเหลวที่ใช้เป็นกระบวนการไหลชนิดอื่น ๆ เพิ่มขึ้น เช่น สารลดแรงตึงผิว กรดผลไม้
2. เสนอให้มีการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่หลาย ๆ ค่า และวัดค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้า
3. เสนอให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เพิ่มขนาด ขั้วไฟฟ้า หรือเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้า
4. เสนอให้มีการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสไป วิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการวิจัยเรื่องของพลังงาน
5. เสนอให้นำกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกไปใช้กับพื้นที่จริง ในบริเวณพื้นที่ที่มีดิน ปนเปื้อนโลหะหนัก เหมือนแร่ และลานตากกากตะกอน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กัลยา รัตนสุทธิพงษ์. 2544. การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนและต้นแสมขาวบริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548.

ราชกิจจานุเบกษา 123 (25 มกราคม 2549): 44-54.

ผกา สุขเกษม. 2535. ผลกระทบของโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิตและหลักการในการวิเคราะห์โลหะปริมาณน้อย. เอกสารประกอบการฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

ภาวดี คะลา. 2541. ศักยภาพของแม่น้ำเพชรบุรีต่อการรองรับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลาวัลย์ ศรีพงษ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.  
นครปฐม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาษาอังกฤษ

- Browne, F.X., Orr, J.B., Grizzard T.J., and Weand B.L. Water pollution 6(1982): 755 – 763.
- Chester, R., and Voutsinou, F.G. The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediment. Marine Pollution Bull 12 (1981): 84-91
- Hlavay, J., Prohaaska, T., Weisz, M., Wenzel, W.W., and Stinger G. J. Determination of trace elements bound to soils and sediment fractions (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem 76 (2004): 415–442.
- Kim, S.O., Moon, S.H., Kim, K.W., and Yun, S.T. Pilot scale study on the ex situ electrokinetic removal of heavy metals from municipal wastewater sludges. Water Research 36 (2002):4765–4774.
- Kim, S.O., Moon, S.H., and Ben, D.S. Evaluation of Electrokinetic Removal of Heavy Metals from Tailing Soils. Journal of Environmental Engineering (2002).
- Logan, T.J., and Feltz R.E. Plant uptake of cadmium from acid extracted anaerobically digested sewage. J. Environ. Qual. 14 (1985): 495 – 550.
- Loon, J. C. V. Selected methods of trace metal analysis (1985). John Wiley&Sons, New York, U.S.A.
- Quevauviller, P. Single and sequential extraction procedures. Methodologies in soil and sediment fractionation studies (2002). European commission, DG Research, Belgium
- Sharma, H.D., and Reddy, K. R. Site remediation, waste containment and emerging waste management technologies. Geoenvironmental engineering (2004): 432-441.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem. 51(1979): 844–851.
- U.S. Environmental Protection Agency. Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Sw-846 manual [online]. Available from: <http://www.epa.gov> [2005, February 2].

- Virkutyte, J., Hullebusch, E.V., Sillanpa, M., and Lens, P. Copper and trace element fractionation in electrokinetically treated methanogenic anaerobic granular sludge. Environmental Pollution 138 (2005):517-528.
- Wang, J.Y., Zhang, D.S., Stabnikova, O., and Tay, J.H. Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge. Journal of Hazardous Materials B124 (2005): 139–146.
- Yuan, C., and Weng C.H. Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient. Advances in Environmental Research 7 (2003):727–732.
- Yuan, C., and Weng C.H. Electrokinetic enhancement removal of heavy metals from industrial wastewater sludge. Chemosphere 65 (2006): 88–96.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 แสดงคุณสมบัติของกากตะกอนก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

คุณสมบัติ	ของแข็งทั้งหมด (%)	ของแข็งละลาย (กรัม/ลิตร)	ความชื้น(%)	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)
ครั้งที่ 1	36.59	7.41	63.41	6.89	13.02
ครั้งที่ 2	38.46	6.21	61.54	6.91	13.09
ครั้งที่ 3	37.57	6.01	62.43	6.94	13.10
เฉลี่ย	37.54	6.54	62.46	6.91	13.07

ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณโลหะหนักรวมก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

โลหะหนัก	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วานาเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	98.39	9838.96	3.49	349.11	41.30	4129.63	15.67	1566.96	2.10	209.96	7.26	725.63	5.42	541.56	5.90	589.63
ครั้งที่ 2	98.18	9818.00	3.48	348.15	41.09	4108.67	15.46	1546.00	2.19	219.00	7.25	724.67	5.01	500.60	6.09	608.67
ครั้งที่ 3	98.69	9869.04	3.59	359.19	41.60	4159.71	15.97	1597.04	2.10	210.04	7.36	735.71	5.92	591.64	5.80	579.71
เฉลี่ย	98.42	9842.00	3.52	352.15	41.33	4132.67	15.70	1570.00	2.13	213.00	7.29	728.67	5.45	544.60	5.93	592.67



ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) ก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลติก

โลหะหนัก	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วานาเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	56.36	2817.80	2.24	112.02	24.30	1214.80	9.84	491.93	0.50	25.00	1.33	66.66	2.52	125.93	0.04	0.08
ครั้งที่ 2	57.52	2875.87	3.00	150.09	25.46	1272.87	11.00	550.00	1.06	53.07	2.49	124.73	3.28	164.00	0.62	1.24
ครั้งที่ 3	57.42	2870.94	3.70	185.16	25.36	1267.94	10.90	545.07	0.36	18.14	2.40	119.80	3.98	199.07	0.57	1.14
เฉลี่ย	57.10	2854.87	2.98	149.09	25.04	1251.87	10.58	529.00	0.64	32.07	2.07	103.73	3.26	163.00	0.82	41

ตารางที่ ก.4 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลติก

ชั้นที่ 1	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วานาเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	54.46	5445.99	2.05	204.91	18.65	1864.79	2.56	255.72	0.55	54.52	0.78	77.59	2.07	207.12	0.61	61.12
ครั้งที่ 2	53.98	5397.87	1.77	176.79	18.17	1816.67	2.08	207.60	0.36	36.40	0.49	49.47	1.59	159.00	0.43	43.00
ครั้งที่ 3	54.52	5451.75	1.91	190.67	18.71	1870.55	2.61	261.48	0.30	30.28	0.63	63.35	2.13	212.88	0.37	36.88
เฉลี่ย	54.32	5431.87	1.91	190.79	18.51	1850.67	2.42	241.60	0.40	40.40	0.63	63.47	1.93	193.00	0.47	47.00

ชั้นที่ 2	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วานาเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	2.61	260.74	1.15	115.27	6.36	635.94	7.99	799.27	0.07	6.60	1.27	126.87	1.15	115.14	0.18	17.54
ครั้งที่ 2	2.89	288.87	1.43	143.40	6.64	664.07	8.27	827.40	0.35	34.73	1.55	155.00	1.43	143.27	0.46	45.67
ครั้งที่ 3	2.84	284.00	1.39	138.53	6.59	659.20	8.23	822.53	0.30	29.86	1.50	150.13	1.38	138.40	0.41	40.80
เฉลี่ย	2.78	277.87	1.32	132.40	6.53	653.07	8.16	816.40	0.24	23.73	1.44	144.00	1.32	132.27	0.35	34.67

ชั้นที่ 3	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วานาเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	23.98	2398.04	0.23	22.59	12.09	1208.64	4.11	410.64	1.24	123.89	2.28	228.14	1.54	154.14	0.84	83.64
ครั้งที่ 2	23.69	2368.90	0.13	13.45	11.80	1179.50	3.82	381.50	0.95	94.75	1.99	199.00	1.25	125.00	0.65	64.50
ครั้งที่ 3	24.06	2405.76	0.10	10.31	12.16	1216.36	4.18	418.36	1.32	131.61	2.36	235.86	1.62	161.86	0.81	81.36
เฉลี่ย	23.91	2390.90	0.15	15.45	12.02	1201.50	4.04	403.50	1.17	116.75	2.21	221.00	1.47	147.00	0.77	76.50

ชั้นที่ 4	ทองแดง (Cu)		แคดเมียม (Cd)		นิกเกิล (Ni)		ตะกั่ว (Pb)		ซีลีเนียม (Se)		เหล็ก (Fe)		วาเนเดียม (V)		สังกะสี (Zn)	
	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.	มก./ลิตร	มก./กก.
ครั้งที่ 1	17.34	1734.20	0.06	6.34	4.20	420.26	1.01	101.33	0.25	24.95	2.93	293.03	0.65	65.16	4.27	427.33
ครั้งที่ 2	17.62	1762.37	0.15	14.51	4.48	448.43	1.30	129.50	0.53	53.12	3.21	321.20	0.73	73.33	4.56	455.50
ครั้งที่ 3	17.28	1727.54	0.20	19.68	4.14	413.60	0.95	94.67	0.18	18.29	2.86	286.37	0.79	78.50	4.21	420.67
เฉลี่ย	17.41	1741.37	0.14	13.51	4.27	427.43	1.09	108.50	0.32	32.12	3.00	300.20	0.72	72.33	4.35	434.50

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 แสดงปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	2.36	2.00	1.53	67.44	58.14	46.05	12.07	10.98	9.55	28.97	25.26	20.42
ส่วนที่ 2	2.35	1.99	1.54	67.43	58.13	46.06	12.06	10.97	9.56	28.96	25.25	20.43
ส่วนที่ 3	2.32	1.96	1.50	67.40	58.10	46.01	12.03	10.94	9.52	28.93	25.21	20.39
เฉลี่ย	2.34	1.99	1.53	67.43	58.13	46.04	12.06	10.96	9.54	28.95	25.24	20.41
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	6.23	5.91	5.48	1.77	1.66	1.50	4.28	3.92	3.45	5.18	4.95	4.64
ส่วนที่ 2	6.22	5.90	5.49	1.76	1.65	1.51	4.27	3.91	3.46	5.17	4.94	4.65
ส่วนที่ 3	6.19	5.87	5.45	1.73	1.62	1.47	4.24	3.88	3.42	5.14	4.90	4.60
เฉลี่ย	6.21	5.89	5.47	1.76	1.64	1.50	4.26	3.91	3.44	5.16	4.93	4.63

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	235.78	200.34	153.27	6744.26	5814.41	4604.61	1207.43	1098.14	955.06	2896.81	2525.53	2041.87
ส่วนที่ 2	234.78	199.34	154.27	6743.26	5813.41	4605.61	1206.43	1097.14	956.06	2895.81	2524.53	2042.87
ส่วนที่ 3	231.53	196.09	150.02	6740.01	5810.16	4601.36	1203.18	1093.89	951.81	2892.56	2521.28	2038.62
เฉลี่ย	234.03	198.59	152.52	6742.51	5812.66	4603.86	1205.68	1096.39	954.31	2895.06	2523.78	2041.12
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วานาเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	623.13	590.95	548.11	177.25	166.00	150.38	428.08	392.38	344.97	517.80	494.72	463.71
ส่วนที่ 2	622.13	589.95	549.11	176.25	165.00	151.38	427.08	391.38	345.97	516.80	493.72	464.71
ส่วนที่ 3	618.88	586.70	544.86	173.00	161.75	147.13	423.83	388.13	341.72	513.55	490.47	460.46
เฉลี่ย	621.38	589.20	547.36	175.50	164.25	149.63	426.33	390.63	344.22	516.05	492.97	462.96

ตารางที่ ก.6 แสดงปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.620	1.015	0.965	48.333	33.272	31.970	9.819	8.020	7.867	21.332	15.299	14.779
ส่วนที่ 2	1.630	1.047	0.998	48.343	33.305	32.002	9.829	8.053	7.900	21.342	15.331	14.811
ส่วนที่ 3	1.587	1.057	1.008	48.301	33.315	32.012	9.787	8.063	7.910	21.299	15.341	14.821
เฉลี่ย	1.612	1.040	0.990	48.326	33.297	31.995	9.812	8.045	7.892	21.324	15.324	14.804
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	5.560	5.008	4.963	1.531	1.317	1.301	3.538	2.928	2.878	4.694	4.288	4.256
ส่วนที่ 2	5.570	5.040	4.995	1.541	1.350	1.334	3.548	2.961	2.911	4.704	4.321	4.288
ส่วนที่ 3	5.528	5.050	5.005	1.499	1.360	1.344	3.505	2.971	2.921	4.661	4.331	4.298
เฉลี่ย	5.553	5.033	4.988	1.524	1.342	1.326	3.530	2.953	2.903	4.686	4.313	4.281



โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	161.99	101.46	96.50	4833.3	3327.21	3196.97	981.94	802.04	786.73	2133.18	1529.86	1477.86
ส่วนที่ 2	162.99	104.71	99.75	4834.3	3330.46	3200.22	982.94	805.29	789.98	2134.18	1533.11	1481.11
ส่วนที่ 3	158.74	105.71	100.75	4830.05	3331.46	3201.22	978.69	806.29	790.98	2129.93	1534.11	1482.11
เฉลี่ย	161.24	103.96	99	4832.55	3329.71	3199.47	981.19	804.54	789.23	2132.43	1532.36	1480.36
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	556.03	500.76	496.25	153.14	131.71	130.14	353.75	292.81	287.80	469.38	428.83	425.59
ส่วนที่ 2	557.03	504.01	499.50	154.14	134.96	133.39	354.75	296.06	291.05	470.38	432.08	428.84
ส่วนที่ 3	552.78	505.01	500.50	149.89	135.96	134.39	350.50	297.06	292.05	466.13	433.08	429.84
เฉลี่ย	555.28	503.26	498.75	152.39	134.21	132.64	353.00	295.31	290.30	468.63	431.33	428.09

ตารางที่ ก.7 แสดงปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.947	0.922	0.901	31.950	31.285	29.811	7.645	7.565	7.461	14.587	14.319	13.910
ส่วนที่ 2	0.980	0.954	0.933	31.982	31.318	29.844	7.677	7.597	7.493	14.619	14.352	13.942
ส่วนที่ 3	0.990	0.964	0.943	31.992	31.328	29.854	7.687	7.607	7.503	14.629	14.362	13.952
เฉลี่ย	0.972	0.947	0.926	31.975	31.310	29.836	7.670	7.590	7.486	14.612	14.344	13.935
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	4.892	4.869	4.688	1.284	1.276	1.254	2.846	2.820	2.769	4.210	4.193	3.905
ส่วนที่ 2	4.925	4.901	4.721	1.317	1.308	1.287	2.878	2.853	2.802	4.242	4.226	3.938
ส่วนที่ 3	4.935	4.911	4.731	1.327	1.318	1.297	2.888	2.863	2.812	4.252	4.236	3.948
เฉลี่ย	4.917	4.894	4.713	1.309	1.301	1.279	2.871	2.845	2.794	4.235	4.218	3.930

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	94.74	92.19	90.08	3194.99	3128.54	2981.10	764.49	756.46	746.06	1458.65	1431.93	1477.86
ส่วนที่ 2	97.99	95.44	93.33	3198.24	3131.79	2984.35	767.74	759.71	749.31	1461.90	1435.18	1481.11
ส่วนที่ 3	98.99	96.44	94.33	3199.24	3132.79	2985.35	768.74	760.71	750.31	1462.90	1436.18	1482.11
เฉลี่ย	97.24	94.69	92.58	3197.49	3131.04	2983.60	766.99	758.96	748.56	1461.15	1434.43	1480.36
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	489.22	486.85	468.81	128.41	127.59	125.41	284.59	282.00	276.91	420.99	419.30	390.51
ส่วนที่ 2	492.47	490.10	472.06	131.66	130.84	128.66	287.84	285.25	280.16	424.24	422.55	393.76
ส่วนที่ 3	493.47	491.10	473.06	132.66	131.84	129.66	288.84	286.25	281.16	425.24	423.55	394.76
เฉลี่ย	491.72	489.35	471.31	130.91	130.09	127.91	287.09	284.50	279.41	423.49	421.80	393.01

ตารางที่ ก.8 แสดงปริมาณโลหะหนักรวมหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.320	0.913	0.654	41.598	30.454	23.766	6.734	5.153	4.112	17.038	12.458	9.608
ส่วนที่ 2	1.310	0.903	0.664	41.588	30.444	23.776	6.724	5.143	4.122	17.028	12.448	9.618
ส่วนที่ 3	1.277	0.871	0.621	41.556	30.412	23.734	6.691	5.111	4.079	16.996	12.415	9.576
เฉลี่ย	1.302	0.896	0.646	41.581	30.437	23.759	6.716	5.136	4.104	17.021	12.440	9.601
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	4.216	3.631	3.278	1.192	1.009	0.877	2.866	2.370	2.044	3.649	3.198	2.986
ส่วนที่ 2	4.206	3.621	3.288	1.182	0.999	0.887	2.856	2.360	2.054	3.639	3.188	2.996
ส่วนที่ 3	4.173	3.588	3.246	1.150	0.966	0.845	2.824	2.328	2.011	3.606	3.156	2.953
เฉลี่ย	4.198	3.613	3.271	1.175	0.991	0.870	2.849	2.353	2.036	3.631	3.181	2.978

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	131.96	91.32	65.36	4159.84	3045.4	2376.62	673.35	515.33	411.15	1703.84	1245.76	960.80
ส่วนที่ 2	130.96	90.32	66.36	4158.84	3044.4	2377.62	672.35	514.33	412.15	1702.84	1244.76	961.80
ส่วนที่ 3	127.71	87.07	62.11	4155.59	3041.15	2373.37	669.10	511.08	407.90	1699.59	1241.51	957.55
เฉลี่ย	130.21	89.57	64.61	4158.09	3043.65	2375.87	671.6	513.58	410.4	1702.09	1244.01	960.05
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	421.59	363.09	327.83	119.24	100.88	87.71	286.61	237.04	204.35	364.87	319.84	298.55
ส่วนที่ 2	420.59	362.09	328.83	118.24	99.88	88.71	285.61	236.04	205.35	363.87	318.84	299.55
ส่วนที่ 3	417.34	358.84	324.58	114.99	96.63	84.46	282.36	232.79	201.10	360.62	315.59	295.30
เฉลี่ย	419.84	361.34	327.08	117.49	99.13	86.96	284.86	235.29	203.60	363.12	318.09	297.8

ตารางที่ ก.9 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) หลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.868	1.523	1.055	31.347	23.611	13.535	7.608	6.705	5.512	14.908	11.858	7.874
ส่วนที่ 2	1.848	1.503	1.075	31.327	23.591	13.555	7.588	6.685	5.532	14.888	11.838	7.894
ส่วนที่ 3	1.783	1.438	0.990	31.262	23.526	13.470	7.523	6.620	5.447	14.823	11.773	7.809
เฉลี่ย	1.833	1.488	1.040	31.312	23.576	13.520	7.573	6.670	5.497	14.873	11.823	7.859
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.526	1.352	1.104	0.472	0.411	0.311	2.328	2.037	1.640	0.545	0.451	0.310
ส่วนที่ 2	1.506	1.332	1.124	0.452	0.391	0.331	2.308	2.017	1.660	0.525	0.431	0.330
ส่วนที่ 3	1.441	1.267	1.039	0.387	0.326	0.246	2.243	1.952	1.575	0.460	0.366	0.245
เฉลี่ย	1.491	1.317	1.089	0.437	0.376	0.296	2.293	2.002	1.625	0.510	0.416	0.295



โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	93.40	76.17	52.77	1567.34	1180.56	676.75	380.38	335.27	275.62	745.38	592.91	393.70
ส่วนที่ 2	92.40	75.17	53.77	1566.34	1179.56	677.75	379.38	334.27	276.62	744.38	591.91	394.70
ส่วนที่ 3	89.15	71.92	49.52	1563.09	1176.31	673.50	376.13	331.02	272.37	741.13	588.66	390.45
เฉลี่ย	91.65	74.42	52.02	1565.59	1178.81	676.00	378.63	333.52	274.87	743.63	591.16	392.95
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	76.32	67.58	55.21	23.60	20.53	15.55	116.38	101.87	82.00	27.23	22.57	15.51
ส่วนที่ 2	75.32	66.58	56.21	22.60	19.53	16.55	115.38	100.87	83.00	26.23	21.57	16.51
ส่วนที่ 3	72.07	63.33	51.96	19.35	16.28	12.30	112.13	97.62	78.75	22.98	18.32	12.26
เฉลี่ย	74.57	65.83	54.46	21.85	18.78	14.80	114.63	100.12	81.25	25.48	20.82	14.76

ตารางที่ ก.10 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) หลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.140	0.518	0.470	15.437	2.870	1.786	5.734	4.211	4.085	8.624	3.630	3.203
ส่วนที่ 2	1.160	0.583	0.535	15.457	2.935	1.851	5.754	4.276	4.150	8.644	3.695	3.268
ส่วนที่ 3	1.075	0.603	0.555	15.372	2.955	1.871	5.669	4.296	4.170	8.559	3.715	3.288
เฉลี่ย	1.125	0.568	0.520	15.422	2.920	1.836	5.719	4.261	4.135	8.609	3.680	3.253
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.147	0.799	0.775	0.326	0.162	0.153	1.711	1.177	1.137	0.333	0.118	0.105
ส่วนที่ 2	1.167	0.864	0.840	0.346	0.227	0.218	1.731	1.242	1.202	0.353	0.183	0.170
ส่วนที่ 3	1.082	0.884	0.860	0.261	0.247	0.238	1.646	1.262	1.222	0.268	0.203	0.190
เฉลี่ย	1.132	0.849	0.825	0.311	0.212	0.203	1.696	1.227	1.187	0.318	0.168	0.155

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	57.00	25.90	23.49	771.87	143.50	89.32	286.72	210.56	204.24	431.19	181.52	160.16
ส่วนที่ 2	58.00	29.15	26.74	772.87	146.75	92.57	287.72	213.81	207.49	432.19	184.77	163.41
ส่วนที่ 3	53.75	30.15	27.74	768.62	147.75	93.57	283.47	214.81	208.49	427.94	185.77	164.41
เฉลี่ย	56.25	28.40	25.99	771.12	146.00	91.82	285.97	213.06	206.74	430.44	184.02	162.66
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วานาเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	57.36	39.97	38.74	16.30	8.10	7.67	85.57	58.87	56.84	16.66	5.88	5.23
ส่วนที่ 2	58.36	43.22	41.99	17.30	11.35	10.92	86.57	62.12	60.09	17.66	9.13	8.48
ส่วนที่ 3	54.11	44.22	42.99	13.05	12.35	11.92	82.32	63.12	61.09	13.41	10.13	9.48
เฉลี่ย	56.61	42.47	41.24	15.55	10.60	10.17	84.82	61.37	59.34	15.91	8.38	7.73

ตารางที่ ก.11 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) หลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.455	0.430	0.418	2.239	1.691	1.414	3.920	3.854	3.821	3.212	2.994	2.884
ส่วนที่ 2	0.520	0.495	0.483	2.304	1.756	1.479	3.985	3.919	3.886	3.277	3.059	2.949
ส่วนที่ 3	0.540	0.515	0.503	2.324	1.776	1.499	4.005	3.939	3.906	3.297	3.079	2.969
เฉลี่ย	0.505	0.480	0.468	2.289	1.741	1.464	3.970	3.904	3.871	3.262	3.044	2.934
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.749	0.736	0.730	0.152	0.147	0.145	1.125	1.104	1.093	0.100	0.094	0.090
ส่วนที่ 2	0.814	0.801	0.795	0.217	0.212	0.210	1.190	1.169	1.158	0.165	0.159	0.155
ส่วนที่ 3	0.834	0.821	0.815	0.237	0.232	0.230	1.210	1.189	1.178	0.185	0.179	0.175
เฉลี่ย	0.799	0.786	0.780	0.202	0.197	0.195	1.175	1.154	1.143	0.150	0.144	0.140

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	22.75	21.52	20.89	111.95	84.55	70.71	196.00	192.70	191.03	160.58	149.69	144.20
ส่วนที่ 2	26.00	24.77	24.14	115.20	87.80	73.96	199.25	195.95	194.28	163.83	152.94	147.45
ส่วนที่ 3	27.00	25.77	25.14	116.20	88.80	74.96	200.25	196.95	195.28	164.83	153.94	148.45
เฉลี่ย	25.25	24.02	23.39	114.45	87.05	73.21	198.50	195.20	193.53	163.08	152.19	146.70
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	37.45	36.81	36.49	7.58	7.36	7.25	56.24	55.20	54.67	5.01	4.68	4.51
ส่วนที่ 2	40.70	40.06	39.74	10.83	10.61	10.50	59.49	58.45	57.92	8.26	7.93	7.76
ส่วนที่ 3	41.70	41.06	40.74	11.83	11.61	11.50	60.49	59.45	58.92	9.26	8.93	8.76
เฉลี่ย	39.95	39.31	38.99	10.08	9.86	9.75	58.74	57.70	57.17	7.51	7.18	7.01

ตารางที่ ก.12 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test (WET) หลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.909	0.524	0.268	17.449	9.609	4.882	3.740	2.568	1.795	7.863	4.638	2.668
ส่วนที่ 2	0.889	0.504	0.288	17.429	9.589	4.902	3.720	2.548	1.815	7.843	4.618	2.688
ส่วนที่ 3	0.824	0.439	0.203	17.364	9.524	4.817	3.655	2.483	1.730	7.778	4.553	2.603
เฉลี่ย	0.874	0.489	0.253	17.414	9.574	4.867	3.705	2.533	1.780	7.828	4.603	2.653
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.823	0.598	0.432	0.304	0.235	0.171	1.486	1.148	0.913	0.286	0.184	0.102
ส่วนที่ 2	0.803	0.578	0.452	0.284	0.215	0.191	1.466	1.128	0.933	0.266	0.164	0.122
ส่วนที่ 3	0.738	0.513	0.367	0.219	0.150	0.106	1.401	1.063	0.848	0.201	0.099	0.037
เฉลี่ย	0.788	0.563	0.417	0.269	0.200	0.156	1.451	1.113	0.898	0.251	0.149	0.087

โลหะหนัก	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	45.45	26.22	13.38	872.44	480.45	244.08	187.02	128.42	89.77	393.17	231.88	133.41
ส่วนที่ 2	44.45	25.22	14.38	871.44	479.45	245.08	186.02	127.42	90.77	392.17	230.88	134.41
ส่วนที่ 3	41.20	21.97	10.13	868.19	476.20	240.83	182.77	124.17	86.52	388.92	227.63	130.16
เฉลี่ย	43.70	24.47	12.63	870.69	478.70	243.33	185.27	126.67	89.02	391.42	230.13	132.66
โลหะหนัก	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	41.17	29.89	21.58	15.22	11.75	8.57	74.31	57.40	45.66	14.31	9.20	5.09
ส่วนที่ 2	40.17	28.89	22.58	14.22	10.75	9.57	73.31	56.40	46.66	13.31	8.20	6.09
ส่วนที่ 3	36.92	25.64	18.33	10.97	7.50	5.32	70.06	53.15	42.41	10.06	4.95	1.84
เฉลี่ย	39.42	28.14	20.83	13.47	10.00	7.82	72.56	55.65	44.91	12.56	7.45	4.34



ตารางที่ ก.13 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับขั้นหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.124	0.884	0.561	29.350	21.854	12.099	1.467	1.177	0.790	10.196	7.698	4.440
ส่วนที่ 2	1.114	0.874	0.571	29.340	21.844	12.109	1.457	1.167	0.800	10.186	7.688	4.450
ส่วนที่ 3	1.082	0.841	0.529	29.307	21.811	12.066	1.425	1.135	0.758	10.154	7.655	4.407
เฉลี่ย	1.107	0.866	0.554	29.332	21.836	12.091	1.450	1.160	0.783	10.179	7.680	4.432
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.411	0.339	0.235	0.272	0.227	0.159	1.277	1.073	0.799	0.278	0.214	0.121
ส่วนที่ 2	0.401	0.329	0.245	0.262	0.217	0.169	1.267	1.063	0.809	0.268	0.204	0.131
ส่วนที่ 3	0.369	0.296	0.202	0.230	0.185	0.126	1.234	1.031	0.766	0.235	0.171	0.088
เฉลี่ย	0.394	0.321	0.227	0.255	0.210	0.151	1.259	1.056	0.791	0.260	0.196	0.113

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	112.41	88.37	56.12	2934.96	2185.36	1209.88	146.71	117.72	79.03	1019.62	769.78	443.98
ส่วนที่ 2	111.41	87.37	57.12	2933.96	2184.36	1210.88	145.71	116.72	80.03	1018.62	768.78	444.98
ส่วนที่ 3	108.16	84.12	52.87	2930.71	2181.11	1206.63	142.46	113.47	75.78	1015.37	765.53	440.73
เฉลี่ย	110.66	86.62	55.37	2933.21	2183.61	1209.13	144.96	115.97	78.28	1017.87	768.03	443.23
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	41.10	33.86	23.46	27.20	22.72	15.89	127.68	107.33	79.89	27.78	21.39	12.09
ส่วนที่ 2	40.10	32.86	24.46	26.20	21.72	16.89	126.68	106.33	80.89	26.78	20.39	13.09
ส่วนที่ 3	36.85	29.61	20.21	22.95	18.47	12.64	123.43	103.08	76.64	23.53	17.14	8.84
เฉลี่ย	39.35	32.11	22.71	25.45	20.97	15.14	125.93	105.58	79.14	26.03	19.64	11.34

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.994	0.890	0.744	1.997	1.758	1.436	6.141	5.528	4.722	4.711	4.160	3.434
ส่วนที่ 2	0.984	0.880	0.754	1.987	1.748	1.446	6.131	5.518	4.732	4.701	4.150	3.444
ส่วนที่ 3	0.952	0.847	0.712	1.955	1.715	1.404	6.098	5.486	4.690	4.669	4.118	3.402
เฉลี่ย	0.977	0.872	0.737	1.980	1.740	1.429	6.123	5.511	4.715	4.694	4.143	3.427
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.116	1.013	0.870	0.200	0.184	0.152	1.051	0.964	0.841	0.267	0.237	0.189
ส่วนที่ 2	1.106	1.003	0.880	0.190	0.174	0.162	1.041	0.954	0.851	0.257	0.227	0.199
ส่วนที่ 3	1.073	0.970	0.837	0.157	0.141	0.120	1.008	0.922	0.809	0.224	0.195	0.157
เฉลี่ย	1.098	0.995	0.862	0.182	0.166	0.145	1.033	0.947	0.834	0.249	0.220	0.182

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	99.40	88.97	74.41	199.73	175.76	143.61	614.05	552.82	472.22	471.14	416.04	343.41
ส่วนที่ 2	98.40	87.97	75.41	198.73	174.76	144.61	613.05	551.82	473.22	470.14	415.04	344.41
ส่วนที่ 3	95.15	84.72	71.16	195.48	171.51	140.36	609.80	548.57	468.97	466.89	411.79	340.16
เฉลี่ย	97.65	87.22	73.66	197.98	174.01	142.86	612.30	551.07	471.47	469.39	414.29	342.66
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วานาเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	111.55	101.29	86.95	19.99	18.35	15.21	105.08	96.40	84.12	26.67	23.74	18.94
ส่วนที่ 2	110.55	100.29	87.95	18.99	17.35	16.21	104.08	95.40	85.12	25.67	22.74	19.94
ส่วนที่ 3	107.30	97.04	83.70	15.74	14.10	11.96	100.83	92.15	80.87	22.42	19.49	15.69
เฉลี่ย	109.80	99.54	86.20	18.24	16.60	14.46	103.33	94.65	83.37	24.92	21.99	18.19

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.150	0.143	0.124	20.108	18.962	17.463	3.492	3.324	3.095	10.155	9.592	8.850
ส่วนที่ 2	0.140	0.133	0.134	20.098	18.952	17.473	3.482	3.314	3.105	10.145	9.582	8.860
ส่วนที่ 3	0.107	0.100	0.092	20.065	18.920	17.430	3.450	3.282	3.063	10.113	9.550	8.817
เฉลี่ย	0.132	0.125	0.117	20.090	18.945	17.455	3.475	3.307	3.088	10.138	9.575	8.842
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.936	1.848	1.725	1.035	0.990	0.922	1.309	1.255	1.176	0.663	0.627	0.571
ส่วนที่ 2	1.926	1.838	1.735	1.025	0.980	0.932	1.299	1.245	1.186	0.653	0.617	0.581
ส่วนที่ 3	1.893	1.806	1.692	0.993	0.948	0.889	1.266	1.213	1.143	0.621	0.585	0.538
เฉลี่ย	1.918	1.831	1.717	1.018	0.973	0.914	1.291	1.238	1.168	0.646	0.610	0.563

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	14.95	14.27	12.40	2010.77	1896.21	1746.27	349.21	332.40	309.54	1015.52	959.20	884.98
ส่วนที่ 2	13.95	13.27	13.40	2009.77	1895.21	1747.27	348.21	331.40	310.54	1014.52	958.20	885.98
ส่วนที่ 3	10.70	10.02	9.15	2006.52	1891.96	1743.02	344.96	328.15	306.29	1011.27	954.95	881.73
เฉลี่ย	13.20	12.52	11.65	2009.02	1894.46	1745.52	347.46	330.65	308.79	1013.77	957.45	884.23
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	193.59	184.84	172.47	103.50	99.00	92.15	130.89	125.53	117.56	66.30	62.71	57.05
ส่วนที่ 2	192.59	183.84	173.47	102.50	98.00	93.15	129.89	124.53	118.56	65.30	61.71	58.05
ส่วนที่ 3	189.34	180.59	169.22	99.25	94.75	88.90	126.64	121.28	114.31	62.05	58.46	53.80
เฉลี่ย	191.84	183.09	171.72	101.75	97.25	91.40	129.14	123.78	116.81	64.55	60.96	56.30

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.143	0.140	0.126	16.041	15.623	15.071	1.027	1.005	0.965	3.958	3.858	3.718
ส่วนที่ 2	0.133	0.130	0.136	16.031	15.613	15.081	1.017	0.995	0.975	3.948	3.848	3.728
ส่วนที่ 3	0.100	0.097	0.093	15.998	15.581	15.038	0.985	0.962	0.933	3.915	3.815	3.685
เฉลี่ย	0.125	0.122	0.118	16.023	15.606	15.063	1.010	0.987	0.958	3.940	3.840	3.710
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	2.822	2.762	2.675	0.318	0.312	0.294	0.697	0.684	0.657	4.023	3.921	3.779
ส่วนที่ 2	2.812	2.752	2.685	0.308	0.302	0.304	0.687	0.674	0.667	4.013	3.911	3.789
ส่วนที่ 3	2.779	2.720	2.642	0.276	0.269	0.261	0.654	0.641	0.624	3.981	3.879	3.746
เฉลี่ย	2.804	2.745	2.667	0.301	0.294	0.286	0.679	0.666	0.649	4.006	3.904	3.771



ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	14.27	13.98	12.59	1604.05	1562.33	1507.09	102.72	100.45	96.52	395.79	385.77	371.75
ส่วนที่ 2	13.27	12.98	13.59	1603.05	1561.33	1508.09	101.72	99.45	97.52	394.79	384.77	372.75
ส่วนที่ 3	10.02	9.73	9.34	1599.80	1558.08	1503.84	98.47	96.20	93.27	391.54	381.52	368.50
เฉลี่ย	12.52	12.23	11.84	1602.30	1560.58	1506.34	100.97	98.70	95.77	394.04	384.02	371.00
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วานาเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	282.15	276.20	267.48	31.80	31.18	29.38	69.69	68.37	65.66	402.30	392.12	377.88
ส่วนที่ 2	281.15	275.20	268.48	30.80	30.18	30.38	68.69	67.37	66.66	401.30	391.12	378.88
ส่วนที่ 3	277.90	271.95	264.23	27.55	26.93	26.13	65.44	64.12	62.41	398.05	387.87	374.63
เฉลี่ย	280.40	274.45	266.73	30.05	29.43	28.63	67.94	66.62	64.91	400.55	390.37	377.13

ตารางที่ ก.14 แสดงปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับขั้นหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.620	0.199	0.166	13.942	1.795	0.745	0.862	0.361	0.320	5.054	0.984	0.634
ส่วนที่ 2	0.630	0.232	0.198	13.952	1.827	0.777	0.872	0.393	0.352	5.064	1.016	0.666
ส่วนที่ 3	0.588	0.242	0.208	13.910	1.837	0.787	0.829	0.403	0.362	5.022	1.026	0.676
เฉลี่ย	0.613	0.224	0.191	13.935	1.820	0.770	0.854	0.386	0.345	5.047	1.009	0.659
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.252	0.103	0.093	0.170	0.065	0.059	0.849	0.488	0.459	0.137	0.001	0.004
ส่วนที่ 2	0.262	0.135	0.125	0.180	0.097	0.091	0.859	0.520	0.492	0.147	0.033	0.022
ส่วนที่ 3	0.220	0.145	0.135	0.137	0.107	0.101	0.816	0.530	0.502	0.104	0.043	0.024
เฉลี่ย	0.245	0.128	0.118	0.162	0.090	0.084	0.841	0.513	0.484	0.129	0.026	0.017

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ส่วนที่ 1	62.03	19.93	16.56	1394.24	179.48	74.48	86.16	36.05	31.99	505.43	98.39	63.39
ส่วนที่ 2	63.03	23.18	19.81	1395.24	182.73	77.73	87.16	39.30	35.24	506.43	101.64	66.64
ส่วนที่ 3	58.78	24.18	20.81	1390.99	183.73	78.73	82.91	40.30	36.24	502.18	102.64	67.64
เฉลี่ย	61.28	22.43	19.06	1393.49	181.98	76.98	85.41	38.55	34.49	504.68	100.89	65.89
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ส่วนที่ 1	25.24	10.29	9.28	16.99	6.49	5.86	84.89	48.77	45.92	13.66	0.08	0.44
ส่วนที่ 2	26.24	13.54	12.53	17.99	9.74	9.11	85.89	52.02	49.17	14.66	3.33	2.19
ส่วนที่ 3	21.99	14.54	13.53	13.74	10.74	10.11	81.64	53.02	50.17	10.41	4.33	2.44
เฉลี่ย	24.49	12.79	11.78	16.24	8.99	8.36	84.14	51.27	48.42	12.91	2.58	1.69

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.770	0.569	0.554	1.495	1.075	1.042	4.873	3.851	3.765	3.570	2.647	2.569
ส่วนที่ 2	0.780	0.601	0.587	1.505	1.108	1.074	4.883	3.883	3.797	3.580	2.679	2.602
ส่วนที่ 3	0.737	0.611	0.597	1.463	1.118	1.084	4.840	3.893	3.807	3.537	2.689	2.612
เฉลี่ย	0.762	0.594	0.579	1.488	1.100	1.067	4.865	3.876	3.790	3.562	2.672	2.594
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.895	0.696	0.682	0.156	0.097	0.095	0.863	0.690	0.678	0.197	0.117	0.113
ส่วนที่ 2	0.905	0.729	0.715	0.166	0.130	0.127	0.873	0.722	0.710	0.207	0.149	0.145
ส่วนที่ 3	0.862	0.739	0.725	0.124	0.140	0.137	0.830	0.732	0.720	0.164	0.159	0.155
เฉลี่ย	0.887	0.721	0.707	0.149	0.122	0.120	0.855	0.715	0.703	0.189	0.142	0.138

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	76.98	56.88	55.42	149.50	107.52	104.16	487.28	385.07	376.49	356.96	264.65	256.93
ส่วนที่ 2	77.98	60.13	58.67	150.50	110.77	107.41	488.28	388.32	379.74	357.96	267.90	260.18
ส่วนที่ 3	73.73	61.13	59.67	146.25	111.77	108.41	484.03	389.32	380.74	353.71	268.90	261.18
เฉลี่ย	76.23	59.38	57.92	148.75	110.02	106.66	486.53	387.57	378.99	356.21	267.15	259.43
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	89.48	69.64	68.21	15.61	9.70	9.47	86.25	68.98	67.76	19.66	11.68	11.27
ส่วนที่ 2	90.48	72.89	71.46	16.61	12.95	12.72	87.25	72.23	71.01	20.66	14.93	14.52
ส่วนที่ 3	86.23	73.89	72.46	12.36	13.95	13.72	83.00	73.23	72.01	16.41	15.93	15.52
เฉลี่ย	88.73	72.14	70.71	14.86	12.20	11.97	85.50	71.48	70.26	18.91	14.18	13.77

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.126	0.082	0.081	17.745	15.860	15.700	3.137	2.833	2.809	8.988	8.046	7.967
ส่วนที่ 2	0.136	0.115	0.114	17.755	15.893	15.732	3.147	2.865	2.842	8.998	8.078	7.999
ส่วนที่ 3	0.093	0.125	0.124	17.712	15.903	15.742	3.104	2.875	2.852	8.956	8.088	8.009
เฉลี่ย	0.118	0.107	0.106	17.737	15.885	15.725	3.129	2.858	2.834	8.981	8.071	7.992
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.746	1.572	1.560	0.933	0.827	0.821	1.189	1.070	1.062	0.579	0.489	0.484
ส่วนที่ 2	1.756	1.605	1.593	0.943	0.860	0.854	1.199	1.102	1.095	0.589	0.521	0.516
ส่วนที่ 3	1.714	1.615	1.603	0.900	0.870	0.864	1.156	1.112	1.105	0.547	0.531	0.526
เฉลี่ย	1.739	1.597	1.585	0.925	0.852	0.846	1.181	1.095	1.087	0.572	0.514	0.509

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	12.56	8.22	8.12	1774.45	1586.04	1569.99	313.67	283.25	280.90	898.83	804.55	796.67
ส่วนที่ 2	13.56	11.47	11.37	1775.45	1589.29	1573.24	314.67	286.50	284.15	899.83	807.80	799.92
ส่วนที่ 3	9.31	12.47	12.37	1771.20	1590.29	1574.24	310.42	287.50	285.15	895.58	808.80	800.92
เฉลี่ย	11.81	10.72	10.62	1773.70	1588.54	1572.49	312.92	285.75	283.40	898.08	807.05	799.17
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	174.62	157.23	156.01	93.26	82.74	82.11	118.88	106.97	106.21	57.93	48.89	48.38
ส่วนที่ 2	175.62	160.48	159.26	94.26	85.99	85.36	119.88	110.22	109.46	58.93	52.14	51.63
ส่วนที่ 3	171.37	161.48	160.26	90.01	86.99	86.36	115.63	111.22	110.46	54.68	53.14	52.63
เฉลี่ย	173.87	159.73	158.51	92.51	85.24	84.61	118.13	109.47	108.71	57.18	51.39	50.88



ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.127	0.089	0.089	15.174	14.467	14.408	0.971	0.902	0.899	3.742	3.548	3.534
ส่วนที่ 2	0.137	0.122	0.122	15.184	14.499	14.441	0.981	0.934	0.931	3.752	3.580	3.566
ส่วนที่ 3	0.094	0.132	0.132	15.141	14.509	14.451	0.938	0.944	0.941	3.710	3.590	3.576
เฉลี่ย	0.119	0.114	0.114	15.166	14.492	14.433	0.963	0.927	0.924	3.735	3.573	3.559
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	2.689	2.561	2.553	0.295	0.253	0.252	0.660	0.606	0.604	3.804	3.607	3.593
ส่วนที่ 2	2.699	2.593	2.585	0.305	0.285	0.285	0.670	0.639	0.637	3.814	3.639	3.625
ส่วนที่ 3	2.657	2.603	2.595	0.263	0.295	0.295	0.627	0.649	0.647	3.771	3.649	3.635
เฉลี่ย	2.682	2.586	2.578	0.288	0.278	0.277	0.652	0.631	0.629	3.796	3.632	3.618

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	12.67	8.94	8.90	1517.35	1446.67	1440.83	97.07	90.17	89.85	374.21	354.77	353.37
ส่วนที่ 2	13.67	12.19	12.15	1518.35	1449.92	1444.08	98.07	93.42	93.10	375.21	358.02	356.62
ส่วนที่ 3	9.42	13.19	13.15	1514.10	1450.92	1445.08	93.82	94.42	94.10	370.96	359.02	357.62
เฉลี่ย	11.92	11.44	11.40	1516.60	1449.17	1443.33	96.32	92.67	92.35	373.46	357.27	355.87
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	268.94	256.09	255.26	29.53	25.28	25.20	65.98	60.60	60.41	380.39	360.68	359.25
ส่วนที่ 2	269.94	259.34	258.51	30.53	28.53	28.45	66.98	63.85	63.66	381.39	363.93	362.50
ส่วนที่ 3	265.69	260.34	259.51	26.28	29.53	29.45	62.73	64.85	64.66	377.14	364.93	363.50
เฉลี่ย	268.19	258.59	257.76	28.78	27.78	27.70	65.23	63.10	62.91	379.64	363.18	361.75

ตารางที่ ก.15 แสดงปริมาณ โลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้นหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้น้ำประปา

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.182	0.165	0.157	1.270	0.740	0.472	0.340	0.320	0.309	0.809	0.632	0.543
ส่วนที่ 2	0.215	0.198	0.189	1.302	0.772	0.504	0.373	0.352	0.342	0.841	0.665	0.575
ส่วนที่ 3	0.225	0.208	0.199	1.312	0.782	0.514	0.383	0.362	0.352	0.851	0.675	0.585
เฉลี่ย	0.207	0.190	0.182	1.295	0.765	0.497	0.365	0.345	0.334	0.834	0.657	0.568
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.098	0.093	0.090	0.062	0.059	0.057	0.473	0.459	0.452	0.014	0.009	0.007
ส่วนที่ 2	0.130	0.125	0.123	0.094	0.091	0.090	0.506	0.492	0.484	0.024	0.019	0.017
ส่วนที่ 3	0.140	0.135	0.133	0.104	0.101	0.100	0.516	0.502	0.494	0.026	0.022	0.020
เฉลี่ย	0.123	0.118	0.115	0.087	0.084	0.082	0.498	0.484	0.477	0.021	0.017	0.015

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ส่วนที่ 1	18.24	16.54	15.68	126.98	73.96	47.18	34.02	31.97	30.93	80.89	63.22	54.29
ส่วนที่ 2	21.49	19.79	18.93	130.23	77.21	50.43	37.27	35.22	34.18	84.14	66.47	57.54
ส่วนที่ 3	22.49	20.79	19.93	131.23	78.21	51.43	38.27	36.22	35.18	85.14	67.47	58.54
เฉลี่ย	20.74	19.04	18.18	129.48	76.46	49.68	36.52	34.47	33.43	83.39	65.72	56.79
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5	7
ส่วนที่ 1	9.79	9.28	9.02	6.18	5.86	5.70	47.34	45.90	45.18	1.38	0.93	0.70
ส่วนที่ 2	13.04	12.53	12.27	9.43	9.11	8.95	50.59	49.15	48.43	2.38	1.93	1.70
ส่วนที่ 3	14.04	13.53	13.27	10.43	10.11	9.95	51.59	50.15	49.43	2.63	2.18	1.95
เฉลี่ย	12.29	11.78	11.52	8.68	8.36	8.20	49.84	48.40	47.68	2.13	1.68	1.45

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.523	0.515	0.511	0.969	0.951	0.942	3.580	3.534	3.511	2.403	2.362	2.341
ส่วนที่ 2	0.555	0.547	0.544	1.002	0.984	0.975	3.612	3.567	3.544	2.435	2.394	2.374
ส่วนที่ 3	0.565	0.557	0.554	1.012	0.994	0.985	3.622	3.577	3.554	2.445	2.404	2.384
เฉลี่ย	0.548	0.540	0.536	0.994	0.976	0.967	3.605	3.559	3.536	2.428	2.387	2.366
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.651	0.643	0.640	0.090	0.089	0.088	0.651	0.645	0.642	0.104	0.102	0.101
ส่วนที่ 2	0.684	0.676	0.672	0.122	0.121	0.120	0.684	0.677	0.674	0.136	0.134	0.133
ส่วนที่ 3	0.694	0.686	0.682	0.132	0.131	0.130	0.694	0.687	0.684	0.146	0.144	0.143
เฉลี่ย	0.676	0.668	0.665	0.115	0.114	0.113	0.676	0.670	0.667	0.129	0.127	0.126

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	52.26	51.49	51.10	96.92	95.13	94.23	357.99	353.43	351.12	240.28	236.17	234.10
ส่วนที่ 2	55.51	54.74	54.35	100.17	98.38	97.48	361.24	356.68	354.37	243.53	239.42	237.35
ส่วนที่ 3	56.51	55.74	55.35	101.17	99.38	98.48	362.24	357.68	355.37	244.53	240.42	238.35
เฉลี่ย	54.76	53.99	53.60	99.42	97.63	96.73	360.49	355.93	353.62	242.78	238.67	236.60
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	65.10	64.34	63.95	8.97	8.85	8.79	65.14	64.49	64.16	10.39	10.17	10.06
ส่วนที่ 2	68.35	67.59	67.20	12.22	12.10	12.04	68.39	67.74	67.41	13.64	13.42	13.31
ส่วนที่ 3	69.35	68.59	68.20	13.22	13.10	13.04	69.39	68.74	68.41	14.64	14.42	14.31
เฉลี่ย	67.60	66.84	66.45	11.47	11.35	11.29	67.64	66.99	66.66	12.89	12.67	12.56

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.079	0.079	0.078	15.354	15.268	15.225	2.758	2.746	2.739	7.796	7.755	7.733
ส่วนที่ 2	0.112	0.111	0.111	15.386	15.301	15.258	2.791	2.778	2.772	7.829	7.787	7.766
ส่วนที่ 3	0.122	0.121	0.121	15.396	15.311	15.268	2.801	2.788	2.782	7.839	7.797	7.776
เฉลี่ย	0.104	0.104	0.103	15.379	15.293	15.250	2.783	2.771	2.764	7.821	7.780	7.758
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.534	1.527	1.524	0.808	0.804	0.802	1.046	1.042	1.040	0.473	0.470	0.469
ส่วนที่ 2	1.566	1.560	1.556	0.840	0.837	0.835	1.078	1.075	1.072	0.506	0.503	0.502
ส่วนที่ 3	1.576	1.570	1.566	0.850	0.847	0.845	1.088	1.085	1.082	0.516	0.513	0.512
เฉลี่ย	1.559	1.552	1.549	0.833	0.829	0.827	1.071	1.067	1.065	0.498	0.495	0.494



ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	7.92	7.87	7.84	1535.36	1526.83	1522.53	275.82	274.56	273.93	779.64	775.45	773.33
ส่วนที่ 2	11.17	11.12	11.09	1538.61	1530.08	1525.78	279.07	277.81	277.18	782.89	778.70	776.58
ส่วนที่ 3	12.17	12.12	12.09	1539.61	1531.08	1526.78	280.07	278.81	278.18	783.89	779.70	777.58
เฉลี่ย	10.42	10.37	10.34	1537.86	1529.33	1525.03	278.32	277.06	276.43	782.14	777.95	775.83
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	153.36	152.71	152.38	80.75	80.41	80.24	104.59	104.20	103.99	47.30	47.03	46.90
ส่วนที่ 2	156.61	155.96	155.63	84.00	83.66	83.49	107.84	107.45	107.24	50.55	50.28	50.15
ส่วนที่ 3	157.61	156.96	156.63	85.00	84.66	84.49	108.84	108.45	108.24	51.55	51.28	51.15
เฉลี่ย	155.86	155.21	154.88	83.25	82.91	82.74	107.09	106.70	106.49	49.80	49.53	49.40

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.088	0.088	0.080	14.282	14.251	13.097	0.892	0.890	0.826	3.503	3.496	3.217
ส่วนที่ 2	0.121	0.120	0.112	14.315	14.284	13.129	0.924	0.923	0.858	3.536	3.528	3.250
ส่วนที่ 3	0.131	0.130	0.122	14.325	14.294	13.139	0.934	0.933	0.868	3.546	3.538	3.260
เฉลี่ย	0.113	0.113	0.105	14.307	14.276	13.122	0.917	0.915	0.851	3.528	3.521	3.242
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	2.535	2.530	2.360	0.250	0.250	0.232	0.600	0.599	0.561	3.562	3.554	3.271
ส่วนที่ 2	2.567	2.563	2.392	0.283	0.282	0.264	0.633	0.632	0.593	3.594	3.587	3.304
ส่วนที่ 3	2.577	2.573	2.402	0.293	0.292	0.274	0.643	0.642	0.603	3.604	3.597	3.314
เฉลี่ย	2.560	2.555	2.385	0.275	0.275	0.257	0.625	0.624	0.586	3.587	3.579	3.296

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	8.81	8.79	7.95	1428.22	1425.11	1309.66	89.17	89.00	82.57	350.34	349.59	321.74
ส่วนที่ 2	12.06	12.04	11.20	1431.47	1428.36	1312.91	92.42	92.25	85.82	353.59	352.84	324.99
ส่วนที่ 3	13.06	13.04	12.20	1432.47	1429.36	1313.91	93.42	93.25	86.82	354.59	353.84	325.99
เฉลี่ย	11.31	11.29	10.45	1430.72	1427.61	1312.16	91.67	91.50	85.07	352.84	352.09	324.24
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	253.46	253.02	235.95	25.01	24.96	23.18	60.02	59.92	56.08	356.17	355.42	327.10
ส่วนที่ 2	256.71	256.27	239.20	28.26	28.21	26.43	63.27	63.17	59.33	359.42	358.67	330.35
ส่วนที่ 3	257.71	257.27	240.20	29.26	29.21	27.43	64.27	64.17	60.33	360.42	359.67	331.35
เฉลี่ย	255.96	255.52	238.45	27.51	27.46	25.68	62.52	62.42	58.58	358.67	357.92	329.60

ตารางที่ ก.16 แสดงปริมาณ โลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้นหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก ที่ความต่างศักย์ 1.5 โวลต์/ซม. กระบวนการไหลใช้กรดอะซิติก

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.726	0.486	0.332	16.668	9.135	4.605	0.992	0.704	0.521	5.990	3.483	1.969
ส่วนที่ 2	0.716	0.476	0.342	16.658	9.125	4.615	0.982	0.694	0.531	5.980	3.473	1.979
ส่วนที่ 3	0.683	0.443	0.299	16.626	9.092	4.572	0.950	0.662	0.489	5.947	3.440	1.936
เฉลี่ย	0.708	0.468	0.324	16.651	9.117	4.597	0.975	0.687	0.514	5.972	3.465	1.961
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.294	0.223	0.170	0.200	0.156	0.119	0.956	0.756	0.626	0.170	0.106	0.058
ส่วนที่ 2	0.284	0.213	0.180	0.190	0.146	0.129	0.946	0.746	0.636	0.160	0.096	0.068
ส่วนที่ 3	0.252	0.180	0.137	0.158	0.113	0.087	0.913	0.714	0.594	0.128	0.064	0.025
เฉลี่ย	0.277	0.205	0.162	0.183	0.138	0.112	0.938	0.739	0.619	0.153	0.089	0.050

ชั้นที่ 1	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	72.57	48.57	33.18	1666.84	913.48	460.47	99.24	70.42	52.12	598.97	348.27	196.86
ส่วนที่ 2	71.57	47.57	34.18	1665.84	912.48	461.47	98.24	69.42	53.12	597.97	347.27	197.86
ส่วนที่ 3	68.32	44.32	29.93	1662.59	909.23	457.22	94.99	66.17	48.87	594.72	344.02	193.61
เฉลี่ย	70.82	46.82	32.43	1665.09	911.73	459.72	97.49	68.67	51.37	597.22	346.52	196.11
ชั้นที่ 1	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	29.41	22.25	16.95	20.01	15.58	11.93	95.58	75.60	62.61	17.02	10.61	5.77
ส่วนที่ 2	28.41	21.25	17.95	19.01	14.58	12.93	94.58	74.60	63.61	16.02	9.61	6.77
ส่วนที่ 3	25.16	18.00	13.70	15.76	11.33	8.68	91.33	71.35	59.36	12.77	6.36	2.52
เฉลี่ย	27.66	20.50	16.20	18.26	13.83	11.18	93.83	73.85	61.86	15.27	8.86	5.02

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.433	0.289	0.186	0.780	0.474	0.277	2.748	1.864	1.274	1.874	1.155	0.700
ส่วนที่ 2	0.423	0.279	0.196	0.770	0.464	0.287	2.738	1.854	1.284	1.864	1.145	0.710
ส่วนที่ 3	0.391	0.246	0.153	0.738	0.432	0.245	2.706	1.822	1.242	1.831	1.112	0.667
เฉลี่ย	0.416	0.271	0.178	0.763	0.457	0.270	2.731	1.847	1.267	1.856	1.137	0.692
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.529	0.375	0.262	0.104	0.079	0.052	0.531	0.392	0.287	0.116	0.078	0.044
ส่วนที่ 2	0.519	0.365	0.272	0.094	0.069	0.062	0.521	0.382	0.297	0.106	0.068	0.054
ส่วนที่ 3	0.487	0.333	0.230	0.062	0.037	0.020	0.488	0.350	0.255	0.074	0.035	0.012
เฉลี่ย	0.512	0.358	0.255	0.087	0.062	0.045	0.513	0.375	0.280	0.099	0.060	0.037

ชั้นที่ 2	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	43.32	28.87	18.58	78.04	47.41	27.7	274.8	186.43	127.41	187.37	115.48	69.96
ส่วนที่ 2	42.32	27.87	19.58	77.04	46.41	28.7	273.8	185.43	128.41	186.37	114.48	70.96
ส่วนที่ 3	39.07	24.62	15.33	73.79	43.16	24.45	270.55	182.18	124.16	183.12	111.23	66.71
เฉลี่ย	41.57	27.12	17.83	76.29	45.66	26.95	273.05	184.68	126.66	185.62	113.73	69.21
ชั้นที่ 2	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	52.93	37.52	26.21	10.44	7.92	5.21	53.05	39.21	28.71	11.6	7.79	4.42
ส่วนที่ 2	51.93	36.52	27.21	9.44	6.92	6.21	52.05	38.21	29.71	10.6	6.79	5.42
ส่วนที่ 3	48.68	33.27	22.96	6.19	3.67	1.96	48.8	34.96	25.46	7.35	3.54	1.17
เฉลี่ย	51.18	35.77	25.46	8.69	6.17	4.46	51.3	37.46	27.96	9.85	6.04	3.67



ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.101	0.088	0.068	12.310	10.138	8.520	2.260	1.918	1.651	6.277	5.197	4.385
ส่วนที่ 2	0.091	0.078	0.078	12.300	10.128	8.530	2.250	1.908	1.661	6.267	5.187	4.395
ส่วนที่ 3	0.059	0.045	0.035	12.267	10.096	8.487	2.218	1.875	1.618	6.235	5.154	4.352
เฉลี่ย	0.084	0.070	0.060	12.292	10.121	8.512	2.243	1.900	1.643	6.260	5.179	4.377
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	1.277	1.094	0.947	0.692	0.596	0.514	0.887	0.770	0.672	0.416	0.347	0.286
ส่วนที่ 2	1.267	1.084	0.957	0.682	0.586	0.524	0.877	0.760	0.682	0.406	0.337	0.296
ส่วนที่ 3	1.235	1.052	0.914	0.649	0.554	0.482	0.845	0.728	0.640	0.374	0.305	0.254
เฉลี่ย	1.260	1.077	0.939	0.674	0.579	0.507	0.870	0.753	0.665	0.399	0.330	0.279

ชั้นที่ 3	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	10.12	8.78	6.77	1230.98	1013.82	851.95	226.04	191.75	165.05	627.72	519.69	438.49
ส่วนที่ 2	9.12	7.78	7.77	1229.98	1012.82	852.95	225.04	190.75	166.05	626.72	518.69	439.49
ส่วนที่ 3	5.87	4.53	3.52	1226.73	1009.57	848.7	221.79	187.5	161.8	623.47	515.44	435.24
เฉลี่ย	8.37	7.03	6.02	1229.23	1012.07	851.2	224.29	190	164.3	625.97	517.94	437.74
ชั้นที่ 3	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	127.74	109.43	94.67	69.15	59.6	51.42	88.73	77.04	67.23	41.61	34.73	28.62
ส่วนที่ 2	126.74	108.43	95.67	68.15	58.6	52.42	87.73	76.04	68.23	40.61	33.73	29.62
ส่วนที่ 3	123.49	105.18	91.42	64.9	55.35	48.17	84.48	72.79	63.98	37.36	30.48	25.37
เฉลี่ย	125.99	107.68	93.92	67.4	57.85	50.67	86.98	75.29	66.48	39.86	32.98	27.87

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./ล.)			ทองแดง (Cu) (มก./ล.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./ล.)			นิกเกิล (Ni) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	0.112	0.104	0.091	11.892	10.759	10.388	0.785	0.720	0.688	2.950	2.676	2.577
ส่วนที่ 2	0.102	0.094	0.101	11.882	10.749	10.398	0.775	0.710	0.698	2.940	2.666	2.587
ส่วนที่ 3	0.069	0.061	0.058	11.850	10.717	10.355	0.743	0.677	0.656	2.908	2.633	2.545
เฉลี่ย	0.094	0.086	0.083	11.875	10.742	10.380	0.768	0.702	0.681	2.933	2.658	2.570
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./ล.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./ล.)			วานาเดียม (V) (มก./ล.)			สังกะสี (Zn) (มก./ล.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	2.168	1.991	1.923	0.249	0.230	0.214	0.545	0.504	0.481	2.999	2.720	2.620
ส่วนที่ 2	2.158	1.981	1.933	0.239	0.220	0.224	0.535	0.494	0.491	2.989	2.710	2.630
ส่วนที่ 3	2.125	1.949	1.890	0.206	0.188	0.182	0.503	0.462	0.448	2.956	2.677	2.587
เฉลี่ย	2.150	1.974	1.915	0.231	0.213	0.207	0.528	0.487	0.473	2.981	2.702	2.612

ชั้นที่ 4	แคดเมียม (Cd) (มก./กก.)			ทองแดง (Cu) (มก./กก.)			ตะกั่ว (Pb) (มก./กก.)			นิกเกิล (Ni) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	11.19	10.36	9.08	1189.24	1075.94	1038.75	78.52	71.98	68.82	295.04	267.56	257.74
ส่วนที่ 2	10.19	9.36	10.08	1188.24	1074.94	1039.75	77.52	70.98	69.82	294.04	266.56	258.74
ส่วนที่ 3	6.94	6.11	5.83	1184.99	1071.69	1035.50	74.27	67.73	65.57	290.79	263.31	254.49
เฉลี่ย	9.44	8.61	8.33	1187.49	1074.19	1038.00	76.77	70.23	68.07	293.29	265.81	256.99
ชั้นที่ 4	เหล็ก (Fe) (มก./กก.)			ซีลีเนียม (Se) (มก./กก.)			วาเนเดียม (V) (มก./กก.)			สังกะสี (Zn) (มก./กก.)		
	วัน	3	5	7	3	5	7	3	5	7	3	5
ส่วนที่ 1	216.75	199.14	192.25	24.89	23.03	21.41	54.50	50.44	48.05	299.89	271.96	261.99
ส่วนที่ 2	215.75	198.14	193.25	23.89	22.03	22.41	53.50	49.44	49.05	298.89	270.96	262.99
ส่วนที่ 3	212.50	194.89	189.00	20.64	18.78	18.16	50.25	46.19	44.80	295.64	267.71	258.74
เฉลี่ย	215.00	197.39	191.50	23.14	21.28	20.66	52.75	48.69	47.30	298.14	270.21	261.24



ภาคผนวก ข.

รายการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 วิธีการเปลี่ยนหน่วยของปริมาณโลหะหนักจาก มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ข.1.1 ปริมาณโลหะหนักรวม

<u>วิธีทำ</u>	ปริมาณน้ำสกัด	=	50	มิลลิลิตร
	ปริมาณกากตะกอน	=	0.5	กรัม
		=	$\frac{0.5}{100}$	= 0.0005 กิโลกรัม
	น้ำสกัดต่อกากตะกอน	=	$\frac{50}{0.0005}$	= 100,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
<u>ตัวอย่าง</u>	ปริมาณทองแดง	=	98.42	มิลลิกรัมต่อลิตร
		=	$\frac{98.42}{1000}$	= 0.9842 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$
	∴ ปริมาณทองแดง	=	0.9842 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$	X 100,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
		=	9842	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ข.1.2 ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธี Waste Extraction Test

<u>วิธีทำ</u>	ปริมาณน้ำสกัด	=	500	มิลลิลิตร
	ปริมาณกากตะกอน	=	50	กรัม
		=	$\frac{50}{1000}$	= 0.05 กิโลกรัม
	น้ำสกัดต่อกากตะกอน	=	$\frac{500}{0.05}$	= 10,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
<u>ตัวอย่าง</u>	ปริมาณทองแดง	=	57.10	มิลลิกรัมต่อลิตร
		=	$\frac{57.10}{1000}$	= 0.0571 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$
	∴ ปริมาณทองแดง	=	0.0571 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$	X 10,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
		=	571	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ก่อนนำไปวัดปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ได้ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า

$$\begin{aligned} \therefore \text{ปริมาณทองแดง} &= 571 \times 5 \\ &= 2855 \text{ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม} \end{aligned}$$

ข.1.3 ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ในชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และ ชั้นที่ 3

<u>วิธีทำ</u>	ปริมาณน้ำสกัด	=	40	มิลลิลิตร (ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2)
	ปริมาณน้ำสกัด	=	50	มิลลิลิตร (ชั้นที่ 3)
	ก่อนนำไปวัดปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ได้ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น	=	100	มิลลิลิตร
	ปริมาณกากตะกอน	=	1	กรัม
		=	$\frac{1}{1000}$	= 0.001 กิโลกรัม
	น้ำสกัดต่อกากตะกอน	=	$\frac{100}{0.001}$	= 100,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
<u>ตัวอย่าง</u>	ปริมาณทองแดง	=	54.32	มิลลิกรัมต่อลิตร
		=	$\frac{54.32}{1000}$	= 0.05432 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$
	∴ ปริมาณทองแดง	=	0.05432 $\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}}$	X 100,000 $\frac{\text{มิลลิลิตร}}{\text{กิโลกรัม}}$
		=	5432	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ข.1.4 ปริมาณโลหะหนักที่หาจากวิธีการสกัดตามลำดับชั้น ในชั้นที่ 4

วิธีทำ หาได้จากปริมาณโลหะหนักรวม – (ชั้นที่ 1 + ชั้นที่ 2 + ชั้นที่ 3)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ข.2 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติกมีค่าใช้จ่ายหลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ โดยเฉพาะเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า เครื่องสูบลำแสงเคมี พีเอชมิเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า และสารเคมี ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ถ้าจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริง ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณกากตะกอนที่ต้องการบำบัด โดยมีค่าใช้จ่ายดังนี้

### ข.2.1 ค่าไฟฟ้า

คำนวณจากราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลาการทำงานของเครื่อง (ชั่วโมง)} \\ &= \text{ความต่างศักย์ (โวลต์)} \times \text{กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)} \\ &\quad \times \text{เวลาการทำงานของเครื่อง (ชั่วโมง)} \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรโคเนติก

ความต่างศักย์ (โวลต์/ซม.)	คุณระยะห่าง ระหว่างขั้ว 12 ซม.	กระแสไฟฟ้า สูงสุด (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)		
				3 วัน	5 วัน	7 วัน
1 (น้ำประปา)	12	0.176	2.11	0.15	0.25	0.35
1.5 (น้ำประปา)	18	0.192	3.46	0.25	0.42	0.58
2 (น้ำประปา)	24	0.182	4.37	0.31	0.52	0.73
1.5 (กรดอะซิติก)	18	0.220	3.96	0.29	0.48	0.67

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากการใช้พลังงานในการบำบัด คุณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย ในที่นี้จะคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงประเภทที่ 6 สถานที่ราชการไม่หวังผลกำไร ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่าหน่วย/หน่วย}) + (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{FT}) \\ &\quad + \text{vat 7\%} \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณหาค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อ 0.5 กก.			พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อ 1 ตัน			ค่าไฟฟ้า บาท ต่อ 1 ตัน		
3 วัน	5 วัน	7 วัน	3 วัน	5 วัน	7 วัน	3 วัน	5 วัน	7 วัน
0.15	0.25	0.35	303.84	506.40	708.96	897.69	1496.15	2094.61
0.25	0.42	0.58	498.24	830.40	1162.56	1472.04	2453.40	3434.76
0.31	0.52	0.73	629.28	1048.80	1468.32	1859.20	3098.66	4338.13
0.29	0.48	0.67	570.24	950.40	1330.56	1684.76	2807.94	3931.12

## ข.2.1 ค่าน้ำประปา

คำนวณจากอัตราการสูบของเครื่องสูบน้ำสารเคมี	=	0.5	มิลลิลิตรต่อนาที
1 ชั่วโมง จะต้องใช้น้ำประปา	=	$0.5 \times 60$	= 30 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
1 วัน จะต้องใช้น้ำประปา	=	$30 \times 24$	= 720 มิลลิลิตรต่อวัน
3 วัน จะต้องใช้น้ำประปา	=	$720 \times 3$	= 2,160 มิลลิลิตร
5 วัน จะต้องใช้น้ำประปา	=	$720 \times 5$	= 3,600 มิลลิลิตร
7 วัน จะต้องใช้น้ำประปา	=	$720 \times 7$	= 5,040 มิลลิลิตร

อัตราค่าน้ำประปาของการประปานครหลวง ประเภทที่ 2 ธุรกิจ ราชการ รัฐวิสาหกิจ  
อุตสาหกรรม และอื่นๆ ราคา 9.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ต่อภาคตะกอน 0.5 กิโลกรัม

2,160 มิลลิลิตร = 0.0216 ลูกบาศก์เมตร ค่าน้ำประปา =  $0.0216 \times 9.5 = 0.21$  บาท

3,600 มิลลิลิตร = 0.0360 ลูกบาศก์เมตร ค่าน้ำประปา =  $0.0360 \times 9.5 = 0.34$  บาท

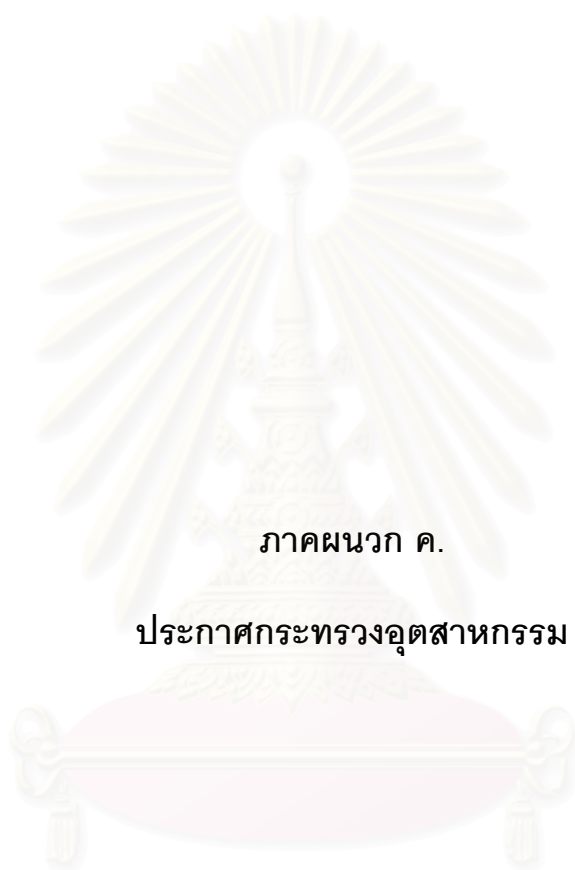
5,040 มิลลิลิตร = 0.0504 ลูกบาศก์เมตร ค่าน้ำประปา =  $0.0504 \times 9.5 = 0.48$  บาท

ถ้าคิดตะกอน 1 ตัน จะคิดเป็นเงิน

3 วัน ราคาค่าน้ำประปา =  $(0.21/0.5) \times 1000 = 410.40$  บาท

5 วัน ราคาค่าน้ำประปา =  $(0.34/0.5) \times 1000 = 684.00$  บาท

7 วัน ราคาค่าน้ำประปา =  $(0.48/0.5) \times 1000 = 957.60$  บาท



ภาคผนวก ค.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม  
เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

พ.ศ. ๒๕๔๘

ภาคผนวกที่ 2

ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

ข้อ 1 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

1.1 เป็นของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารละลายที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่า 24 % โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือ Pensky-Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-93-79หรือ D-93-80 หรือการวัดด้วยเครื่องมือ Setaflash Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-3278-78

1.2 เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสี หรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลุกเป็นไฟจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่องที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

1.3 เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้ ให้นำมาถึงวัสดุหรือของผสมใด ๆ ที่บรรจุอยู่ในถังบรรจุที่มีความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสัมบูรณ์ มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D-323

1.4 เป็นสารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ซึ่งสามารถไปกระตุ้นให้เกิดการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ขึ้นได้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก chlorate permanganate inorganic peroxide และ nitrate

ข้อ 2 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

2.1 เป็นสารละลาย (Aqueous solution) ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดด้วย pH-meter ตามวิธีทดสอบของ USEPA Method 9040

2.2 เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตร ต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการใช้วิธีทดสอบของ NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

ข้อ 3 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

3.1 เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและอย่างรุนแรงโดยไม่มีภาวะระเบิดเกิดขึ้น

3.2 เป็นสารซึ่งทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

3.3 เป็นสารซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะได้ของผสมที่จะระเบิดได้

3.4 เป็นสารซึ่งเมื่อผสมกับน้ำ จะทำให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.5 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ เมื่อตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว สามารถก่อให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.6 เป็นสารซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อนในที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรงได้

3.7 เป็นสารซึ่งสามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ ในสภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) จะมีปฏิกิริยารุนแรง

ข้อ 4 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

4.1 เป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือสิ่งแวดล้อม เพราะมีคุณสมบัติของความ เป็นสารก่อมะเร็ง สารพิษแบบเฉียบพลัน สารพิษแบบเรื้อรัง สารที่มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม เช่น สารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามบัญชีรายชื่อใน กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2A และกลุ่มที่ 2B ของ International Agency for Research on Cancer เป็นต้น

4.2 เป็นสารที่มีค่าความเป็นพิษ ดังต่อไปนี้ เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD50 น้อยกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม เมื่อใช้หนู (Rat) เป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC50 น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วนในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้ กระดาษเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า acute dermal LD50 น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่ง กิโลกรัม ทั้งนี้ ค่า LD50 หมายถึง ค่า(ปริมาณ)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal dosage) ที่ทำให้ สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD50 มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของสารพิษ ต่อน้ำหนักตัวสัตว์ทดลองหนึ่งกิโลกรัม และค่า LC50 หมายถึง ค่า(ความเข้มข้น)เฉลี่ยของ สารพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไป

ครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LC50 มีหน่วยเป็นส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของสารพิษต่อล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

4.3 เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC50 น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมด เท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) กับ ปลา fathead minnows (*Pimephales promelas*) ปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) หรือ ปลา golden shiners (*Notemigonus crysoleucas*) ตามที่กำหนดใน Part 800 ของ the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (16th Edition)," American Public Health Association, 1985

4.4 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของสารที่ระบุข้างล่างนี้ ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งหรือปริมาณรวมของสารทั้งหมด มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก

- 4.4.1 2-Acetylaminofluorene (2-AAF)
- 4.4.2 Acrylonitrile
- 4.4.3 4-Aminodiphenyl
- 4.4.4 Benzidine and its salts
- 4.4.5 bis (Chloromethyl) ether (BCME)
- 4.4.6 Methyl chloromethyl ether
- 4.4.7 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP)
- 4.4.8 3,3'-Dichlorobenzidine and its salts (DCB)
- 4.4.9 4-Dimethylaminoazobenzene (DAB)
- 4.4.10 Ethyleneimine (EL)
- 4.4.11 alpha-Naphthylamine (1-NA)
- 4.4.12 beta-Naphthylamine (2-NA)
- 4.4.13 4-Nitrobiphenyl (4-NBP)
- 4.4.14 N-Nitrosodimethylamine (DMN)
- 4.4.15 beta-Propiolactone (BPL)
- 4.4.16 Vinyl chloride (VCM)

ข้อ 5 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ที่กำหนดไว้ดังนี้

5.1 เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLIC) ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้



แอนติโมนี และ/หรือสารประกอบแอนติโมนี (Antimony and/or antimony compounds)	500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู (Arsenic and/or arsenic compounds)	500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แร่ใยหินหรือแอสเบสตอส (Asbestos)	1.0	(ร้อยละ)
แบเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม (ยกเว้นแบไรท์และแบเรียมซัลเฟต) (Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate))	10,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or beryllium compounds)	75	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and/or cadmium compounds)	100	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Chromium (VI) compounds)	500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนต์ (Chromium and/or chromium (III) compounds)	2,500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โคบอลต์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลต์ (Cobalt and/or cobalt compounds)	8,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง (Copper and/or copper compounds)	2,500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts)	18,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or lead compounds)	1,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท (Mercury and/or mercury compounds)	20	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โมลิบดีนัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดีนัม (ไม่รวมโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์) (Molybdenum and/or molybdenum compounds; excluding molybdenum disulfide)	3,500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
นิกเกิล และ/หรือสารประกอบนิกเกิล (Nickel and/or nickel compounds)	2,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



ซีลีเนียม และ/หรือสารประกอบซีลีเนียม (Selenium and/or selenium compounds)	100	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน (Silver and/or silver compounds)	500	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทาลเลียม และ/หรือสารประกอบทาลเลียม (Thallium and/or thallium compounds)	700	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
วานาเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	2,400	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	5,000	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แอลดริน (Aldrin)	1.4	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คลอเดน (Chlordane)	2.5	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	1.0	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	100	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีลดริน (Dieldrin)	8.0	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไดออกซิน (Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.01	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เอนดริน (Endrin)	0.2	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เฮปตาคลออร์ (Heptachlor)	4.7	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คีโปน (Kepone)	21	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Lead compounds, organic)	13	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ลินเดน (Lindane)	4.0	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เมททอกซีคลออร์ (Methoxychlor)	100	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไมเร็กซ์ (Mirex)	21	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	17	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	50	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	5	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	2,040	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ซิลเว็กซ์ (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	10	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(หมายเหตุ – ค่าที่กำหนดของสารอินทรีย์ เป็นค่าที่วัดเป็นความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ)

- ในกรณีของแอสเบสตอสและโลหะธาตุ ค่าที่กำหนดไว้ให้ใช้กับสารที่อยู่ในสภาพร่วนเป็นผงละเอียดเท่านั้น ทั้งนี้ แอสเบสตอส จะรวมถึง chrysotile amosite crocidolite tremolite anthophyllite และ actinolite)

5.2 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู (Arsenic and/or arsenic compounds)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม (ยกเว้นแบไรท์และแบเรียมซัลเฟต) (Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate)	100	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or beryllium compounds)	0.75	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and/or cadmium compounds)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Chromium (VI) compounds)	5	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนท์ (Chromium and/or chromium (III) compounds)	5	มิลลิกรัมต่อลิตร
โคบอลท์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลท์ (Cobalt and/or cobalt compounds)	80	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง (Copper and/or copper compounds)	25	มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts)	180	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or lead compounds)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท (Mercury and/or mercury compounds)	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
โมลิบดีนัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดีนัม (ไม่รวมโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์)	350	มิลลิกรัมต่อลิตร

นิกเกิล และ/หรือสารประกอบนิกเกิล (Nickel and/or nickel compounds)	20	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม และ/หรือสารประกอบซีลีเนียม (Selenium and/or selenium compounds)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน (Silver and/or silver compounds)	5	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทาลเลียม และ/หรือสารประกอบทาลเลียม (Thallium and/or thallium compounds)	7.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
วานาเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	24	มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	250	มิลลิกรัมต่อลิตร
แอลดริน (Aldrin)	0.14	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	0.1	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีลด์ริน (Dieldrin)	0.8	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไดออกซิน (Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.001	มิลลิกรัมต่อลิตร
เอนดริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลออร์ (Heptachlor)	0.47	มิลลิกรัมต่อลิตร
คีโปน (Kepone)	2.1	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทอกซีคลออร์ (Methoxychlor)	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไมเร็กซ์ (Mirex)	2.1	มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	1.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	204	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซิลเว็กซ์ (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

(หมายเหตุ – ค่าที่กำหนดของสารอนินทรีย์ เป็นค่าที่วัดเป็นความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ)

5.3 การทดสอบสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration) ของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกินค่า TTLC ในข้อ 5.1 แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ของสารนั้นที่กำหนดในข้อ 5.2 หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

ข้อ 6 การหาค่าความเข้มข้นทั้งหมด การสกัดสาร และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด ให้ใช้วิธี ดังต่อไปนี้

6.1 ในการเตรียมตัวอย่างสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่ต้องการทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Total Concentration) หรือปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable Concentration) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

6.1.1 ชนิดที่ 1 – สำหรับสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้จะต้องนำไปร่อน หรือไปบดเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานก่อนนำไปวิเคราะห์ หากตัวอย่างมีวัสดุที่ไม่สามารถบดได้ และร่อนไม่ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ และเป็นวัสดุที่ปนเปื้อนมาไม่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะเดิมของสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ให้แยกออกแล้วทิ้งเสีย ส่วนที่เหลือของตัวอย่างให้นำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ก่อนจะนำไปรวมและผสมกันอย่างทั่วถึงกับส่วนของตัวอย่างที่ไม่ต้องผ่านการบด เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

6.1.2 ชนิดที่ 2 – สำหรับสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวที่สามารถนำไปกรองได้ โดยมีองค์ประกอบของของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักจะต้องทำการกรองตัวอย่างเพื่อแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยการกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน จากนั้นทำการวัดปริมาณของส่วนที่กรองได้และเก็บไว้ โดยส่วนนี้จะถือว่าเป็น Initial Filtrate ส่วนของแข็งที่แยกได้จะนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (สิ่งแปลกปลอมจะถูกแยกทิ้งไป) และนำไปผสมกับของแข็งที่ผ่านตะแกรงโดยไม่ต้องบด ซึ่งส่วนที่เป็นของแข็งนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีในข้อ 6.4 โดย สัดส่วนของน้ำสกัด (extraction solution) ที่ใช้ คือ 10 มิลลิลิตรของน้ำสกัดต่อหนึ่งกรัมของของแข็ง เมื่อเสร็จสิ้นการสกัดแล้ว สารละลายที่สกัดได้จะถูกนำไปกรองและไปผสมกับ Initial Filtrate อย่างทั่วถึงก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีในข้อ 6.5.2

6.1.3 ชนิดที่ 3 – สำหรับสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นกากตะกอน (sludge) เลน (slurry) หรือเป็นน้ำมัน (oily) น้ำมันดิน (tarry) หรือ resinous material ที่ไม่



สามารถกรองหรือบดได้ หลังจากแยกสิ่งแปลกปลอมออกแล้ว ตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป

6.1.4 หากจำเป็นต้องมีการตากแห้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง หรือองค์ประกอบของแข็งก่อนทำการร่อน บด หรือแยกสิ่งแปลกปลอมออก หรือได้มีการทำให้ของเสียนั้นแห้งก่อนทำการวิเคราะห์จะต้องทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไป และต้องบันทึกสภาพของการทำให้แห้งไว้ด้วย

6.1.5 ให้ใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ในการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นในกรณีที่เป็นการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 มิลลิเมตร

6.2 สำหรับสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีลักษณะเป็นของเหลว หรือมีของแข็งที่ไม่ละลายน้ำปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จะไม่ต้องนำมาสกัดโดยวิธี Waste Extraction Test (WET) แต่สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าของสารต่างๆ ได้โดยตรง และจะถือว่าเป็นของเสียนั้นๆ ก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของสารใดๆ มีค่ามากกว่าค่า TTLC ที่กำหนดไว้สำหรับสารนั้น

อย่างไรก็ตาม หากค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของสารนั้น มีค่าน้อยกว่าค่า TTLC แต่มากกว่า ค่า STLC เมื่อคิดเป็นความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องนำตัวอย่างของเหลวนั้นมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์ หาค่าของสารนั้น โดยจะถือว่าเป็นของเสียนั้นๆ ก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในของเหลวที่ผ่านการกรองมีค่ามากกว่าค่า STLC ที่ระบุไว้สำหรับสารนั้น

6.3 ให้ใช้ สารละลาย 0.2 M sodium citrate ที่ pH 5.0 ± 0.1 เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในวิธี WET (WET extraction solution) โดยเตรียมจากการนำสารละลาย citric acid ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วย สารละลาย 4.0 N NaOH สารละลาย citric acid สามารถเตรียมได้โดยนำเอา analytical grade citric acid ไปละลายใน deionized water สำหรับการวิเคราะห์หาค่าเฮกซาวาเลนทโครเมียม (chromium (VI)) ให้ใช้ deionized water เป็นน้ำสกัด

6.4 การสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

6.4.1 นำ 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัด ควรผ่านการล้าง (rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลาย nitric acid ซึ่งสามารถ

เตรียมได้จากการนำเอา nitric acid solution มาผสมกับ deionized water ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร)

6.4.2 เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปใส่ อากาศด้วย ก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และ นำไปเขย่าโดยใช้ table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor ซึ่งสามารถทำให้ ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมงสำหรับการวิเคราะห์หาค่าสารที่ระเหยได้ง่าย เช่น trichloroethylene จะต้องทำการไล่ออก อากาศและออกซิเจนออกจากน้ำสกัด ก่อนที่จะเติมลงในตัวอย่าง เพื่อหลีกเลี่ยงการระเหยของสาร นั้น

6.4.3 จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจไปปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรู กรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบ สามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็ก อาจต้อง centrifuged ที่ความเร็วรอบถึง 10,000 x G ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

6.4.4 ชนิดของแผ่นกรองที่ใช้ ควรมีองค์ประกอบของโลหะหนัก ฟลูออไรด์ และ สารอินทรีย์ที่สามารถชะออกมาได้ในปริมาณที่น้อยมาก

6.4.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็น ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ใน method 1310 ใน Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," SW-846, 3rd edition, U.S. Environmental Protection Agency, 1986

6.4.6 ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส

6.4.7 ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 6.4.3 ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรด ไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 6.4.3 ผสมกับกรด ไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)

6.4.8 ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาค่าของสารอินทรีย์อันตรายด้วย หรือต้อง การวิเคราะห์หาค่าของสารอินทรีย์อันตรายเท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 6.4.3 ลง ในขวดแก้ว ยกเว้นถ้าเป็นการวิเคราะห์หาฟลูออไรด์ ควรใช้ขวดโพลีเอทิลีน กรณีที่เป็น การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตรายและฟลูออไรด์ ห้ามทำการปรับสภาพให้เป็นกรด แต่ต้องนำไปแช่ แข็งทันที จนกว่าจะมีการนำไปวิเคราะห์ เว้นแต่ว่าจะทำการวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง



6.4.9 ก่อนทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารเป้าหมาย เพื่อที่จะหาว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (extractable concentration; EC) ในตัวอย่างมีค่ามากกว่าค่า STLC ของสารนั้นหรือไม่ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ในข้อ 6.5.2

6.5 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตราย (Total Concentration) ให้ใช้วิธีที่กำหนดดังนี้

6.5.1 สำหรับโลหะและสารประกอบ ให้ใช้วิธีสกัดที่กำหนดไว้ใน Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," SW-846, 2nd edition, U.S. Environmental Protection Agency, 1982 ดังนี้คือ

6.5.1.1 Method 3050 สำหรับโลหะและสารประกอบทุกตัว ยกเว้นโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

6.5.1.2 Method 3060 สำหรับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

6.5.2 สำหรับ สารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายอื่นๆ ยกเว้นสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (organic lead compounds) ให้ใช้วิธีที่กำหนดไว้ใน Chapter Two, "Choosing the Correct Procedure" ใน "Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," EPA Publication SW-846, Third Edition and Updates

6.5.3 สำหรับ สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (organic lead compounds) ให้ใช้วิธีที่กำหนดไว้ในภาคผนวกที่ 11 ของ California Code of Regulations, Title 22 Social Security, Division 4.5 Environmental Health Standards for the Management of Hazardous Waste, Chapter 11 Identification and Listing of Hazardous Waste

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วรพล ชมะโชติ เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย