

การเก็บกลับคืนโลหะไอออนด้วยกระบวนการซีเมนเตชันโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

นางสาวอรุณวรรณ เต้าทิพย์ภูมิรักษ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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



RECOVERY OF METAL IONS BY CEMENTATION PROCESS USING IRON/ALUMINIUM
SUBSTRATE

Miss Arunwan Tottippumiruk



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering
Department of Mining and Petroleum Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเก็บกลับคืนโลหะไอออนด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน

โดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

โดย

นางสาวอรุณวรรณ เต้าทิพย์ภูมิรักษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภางค์ จุฬาลักษณ์านุกุล)



1245960946

อรุณวรรณ เต้าทิพย์ภูมิรักษ์ : การเก็บกลับคืนโลหะไอออนด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน โดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม. (RECOVERY OF METAL IONS BY CEMENTATION PROCESS USING IRON/ALUMINIUM SUBSTRATE) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ดาววัลย์ วิวรรณนะเดช, 79 หน้า.

กระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรม นอกจากจะให้ผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ยังมีการปลดปล่อยของเสียออกมาในรูปแบบต่างๆ ทั้งผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-products) และของเสียที่จำเป็นต้องจัดการหรือบำบัดอย่างถูกวิธี ก่อนที่จะมีการปลดปล่อยออกสู่ธรรมชาติต่อไป การนำของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ หรือแยกสกัดโลหะกลับมาใช้ประโยชน์ (Metal Recovery) เป็นอีกแนวทางหนึ่งของการลดปริมาณของเสียควบคู่กับการอนุรักษ์ทรัพยากรแร่

กระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation Process) เป็นหนึ่งในกระบวนการโลหวิทยาการละลาย (Hydrometallurgical Process) ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียและเก็บกลับคืนทรัพยากรแร่จากของเสียอุตสาหกรรม

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลาย ด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน ควบคู่กับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ส่งเสริมระหว่างคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กของ Fe และการเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีของ Al

ผลการศึกษาพบว่า การทดลองที่สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม เปอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยของอนุภาคเหล็กมีค่า 8.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ได้กับโลหะอะลูมิเนียม เปอร์เซ็นต์การเก็บกลับคืนของโลหะทองแดงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES มีค่าเป็น 99.1 และ 98.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน อนุภาคของเหล็กที่มีอยู่ในตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของโลหะทองแดง ทำหน้าที่เป็นเพียงตัวช่วยในการแยกตัวอย่างโดยอาศัยคุณสมบัติที่มีอยู่ในตัวของเหล็ก คือ คุณสมบัติทางแม่เหล็ก หลังจากกระบวนการเก็บกลับคืนเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรธรณี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556



1245960946

5470458021 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: IRON/ALUMINIUM CO-SUBSTRATE / BIMETALLIC PARTICLES / COPPER CEMENTATION

ARUNWAN TOTTIPPUMIRUK: RECOVERY OF METAL IONS BY CEMENTATION PROCESS USING IRON/ALUMINIUM SUBSTRATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. DAWAN WIWATTANADATE,, Ph.D., 79 pp.

Many processes in industry produce not only their desirable products, but also by-products and wastes needed well management or disposal. Utilization or recovery of mineral resource from these wastes is one way to reduce wastes in line with conservation of mineral resources.

Cementation process is a hydrometallurgical process widely used for waste water treatment and/or mineral resource recovery from industrial wastes.

In the present study, recovery of copper ions by cementation together with electrochemical processes using synthetic Fe/Al Co-substrate was investigated upon combination of Fe magnetic property and Al reducing property.

The study found that 1 M FeCl₂.4H₂O, 1.6 M NaCl and 0.04 M HCl at Contact time 3 hours was the optimal condition to synthesize the Fe/Al Co-substrate when compared with other conditions. The Fe/Al Co-substrate also showed that iron was coated on aluminium surface by means of XRD analysis and provided the adsorbed amount of Fe with 8.2% by means of ICP-OES. Such Fe/Al Co-substrate was used for copper cementation. Percent recovery of aluminium powder and the Fe/Al Co-substrate were demonstrated. The series of experiment were 98.6 and 99.1%, respectively. Hence, there was no significant impact of iron on the cementation process. After the cementation, these metals ,namely: copper iron and aluminium, could be easily separated each other by using the magnetic property.



Department: Mining and Petroleum Engineering
 Student's Signature
 Advisor's Signature

Field of Study: Georesources Engineering

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยพลังงาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการซีเมนเตชัน และโลหวิทยาการละลายที่มีประโยชน์ยิ่ง ตลอดจนให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ภู่วิจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตั้งแต่การนำเสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์แล้วเสร็จ

ขอขอบคุณ คุณพงษ์ รุ่งเจริญ และคุณอุทิศ ทองกลิ้ง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีในการศึกษาและวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมี รวมถึงคำแนะนำในการเตรียมสารตัวอย่างและขั้นตอนการนำไปวิเคราะห์ ตลอดจน คุณธัญวิษณุ เกื้อกุลฤทธิวงศ์ ที่ให้คำแนะนำด้านเทคนิคในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ตลอดจนการพิสูจน์อักษรทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีขำนะ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณศิริลักษณ์ แสงละออ อธิการภาควิชาฯ ที่อำนวยความสะดวกในการจัดซื้ออุปกรณ์และสารเคมีสำหรับทำวิจัย รวมถึงอำนวยความสะดวกด้านเอกสารการขออนุมัติต่างๆ

บุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบหาแนวทางเบื้องต้นในการทดลองขณะทำการทดลองอยู่ที่ประเทศญี่ปุ่น

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการผลักดัน สนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตวิธีการวิจัย.....	2
1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	2
บทที่ 2.....	4
2.1 กระบวนการกำจัดโลหะหนัก.....	4
2.1.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process).....	4
2.1.2 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process).....	7
2.1.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Process).....	10
2.1.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation).....	12
2.1.3.2 กระบวนการเมมเบรน (Osmosis).....	12
2.1.3.2.1 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis, RO).....	12
2.2 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดง (Copper Recovery).....	15
2.3 ระบบการจัดการกากอุตสาหกรรม.....	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3.....	22
3.1 การจัดเตรียมสารเคมีและเครื่องมือ.....	22
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	22



1245960946

3.1.2 สารเคมี	23
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม	24
3.2.1 เตรียมสารละลายเหล็กไอออน	24
3.2.2 หาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม	24
3.3 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วม	26
3.4 การสรุปและอภิปรายผลการวิจัย	28
บทที่ 4	29
4.1 การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม	29
4.2 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วม	51
บทที่ 5	53
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
รายการอ้างอิง	55
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก	59
ภาคผนวก ข	62
ภาคผนวก ค	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	79



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารร้าย ราช ยีสต์ และแบคทีเรียที่สามารถดูดซับโลหะหนัก.....	8
ตารางที่ 2.2 ของเสียที่มีการจัดแบ่งประเภทอุตสาหกรรม	15



1245960946

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการสกัดด้วยเฟสของแข็ง.....	5
รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงกระบวนการดูดซับทางชีวภาพของโลหะหนัก	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเรซินแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่มีขี้และส่วนที่ไม่มีขี้	10
รูปที่ 2.4 กระบวนการ (ก) Osmosis (ข) Reverse Osmosis	12
รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดเกลือแร่ต่างๆ ของระบบ RO.....	12
รูปที่ 2.6 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ RO	13
รูปที่ 2.7 Tubular module	13
รูปที่ 2.8 Spiral wound Module.....	14
รูปที่ 2.9 การจัดการของเสียอุตสาหกรรม.....	16
รูปที่ 3.1 Inductively Coupled Plasma optical emission spectrometer (ICP-OES).....	22
รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD).....	23
รูปที่ 4.1 กระบวนการดูดซับบริเวณผิวของโลหะอะลูมิเนียมเมื่อทำปฏิกิริยาสารละลายเหล็ก.....	30
รูปที่ 4.2 การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl	31
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียม (Al powder).....	32
รูปที่ 4.4 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง (ก) ชุดการทดลองที่ 1 (ข) ชุดการทดลองที่ 2	32
รูปที่ 4.5 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง (ก) ชุดการทดลองที่ 1 (ข) ชุดการทดลองที่ 2	33
รูปที่ 4.6 X-Ray pattern ของโลหะอะลูมิเนียม (Al powder)	34
รูปที่ 4.7 X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1.....	35



รูปที่ 4.8	X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2.....	36
รูปที่ 4.9	X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1.....	37
รูปที่ 4.10	X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2.....	38
รูปที่ 4.11	สารละลายของอนุภาคเหล็กที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง (บน) และผ่านการกรองแล้ว (ล่าง).....	39
รูปที่ 4.12	เปรียบเทียบ X-ray pattern ระหว่างโลหะอะลูมิเนียม (Al powder) กับตัวกลางร่วม เหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) ช่วงความเข้มฟลัก 20-23.....	41
รูปที่ 4.13	ตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ได้ภายใต้สภาวะการทดลองแตกต่างกัน.....	42
รูปที่ 4.14	ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.01 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง.....	43
รูปที่ 4.15	ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง (ก) ชุดการทดลองที่ 1 (ข) ชุดการทดลองที่ 2.....	43
รูปที่ 4.16	ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง (ก) ชุดการทดลองที่ 1 (ข) ชุดการทดลองที่ 2.....	44
รูปที่ 4.17	X-Ray pattern ของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1.....	45



รูปที่ 4.18	X-Ray pattern ของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2	46
รูปที่ 4.19	X-Ray pattern ของ ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1	47
รูปที่ 4.20	X-Ray pattern ของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2	48
รูปที่ 4.21	X-Ray pattern ของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl ₂ .4H ₂ O, 1.6M NaCl และ 0.01 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1	49
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (M) กับปริมาณการ ดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียม (%).....	50
รูปที่ 4.23	ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard Electrode Potemstial, E ⁰) ของโลหะทองแดงเหล็ก สังกะสี และอะลูมิเนียม	51
รูปที่ 4.24	เปรียบเทียบปริมาณการเก็บกลับคืนของโลหะทองและสังกะสีเมื่อใช้โลหะ อะลูมิเนียมและ ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม	52



1245960946

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 3.1	การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate).....	25
แผนภูมิที่ 3.2	การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยตัวกลางร่วม เหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate)	27



1245960946

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

กระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรม นอกจากจะให้ผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้ว ยังมีการปลดปล่อยของเสียออกมาในรูปแบบต่างๆ ทั้งผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-products) และของเสียที่จำเป็นต้องจัดการหรือบำบัดอย่างถูกวิธี ก่อนที่จะมีการปลดปล่อยออกสู่ธรรมชาติต่อไป การนำของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ หรือแยกสกัดโลหะกลับมาใช้ประโยชน์ (Metal Recovery) เป็นอีกแนวทางหนึ่งของการลดปริมาณของเสียควบคู่กับการอนุรักษ์ทรัพยากรแร่

มีการศึกษาวิธีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเหล่านี้หลายวิธีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี หรือทาง ชีวภาพ ตัวอย่างได้แก่ การสะเทิน การตกตะกอน การตกผลึก การแยกสกัดด้วยตัวทำละลาย การลอยแยก การแลกเปลี่ยนไอออน เคมีไฟฟ้า (การรีดิวซ์โลหะไอออนให้เป็นโลหะ) การดูดซับบนตัวกลางต่างๆ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของหลายๆปัจจัย เช่น ชนิดของของเสียที่ต้องการบำบัด งบประมาณที่ใช้ในการบำบัด รวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัด เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการนำโลหวิทยาการละลาย (Hydrometallurgical Methods) มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับเคมีไฟฟ้า เพื่อนำกลับคืนโลหะไอออน ในรูปของโลหะที่ถูกดูดซับบนตัวกลางโลหะที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์หรือมีศักยภาพในการจ่ายอิเล็กตรอน สูงกว่าโลหะไอออนที่ต้องการนำกลับคืน ซึ่งนิยมเรียก กระบวนการซีเมนต์ชัน (Cementation Process) โดยที่ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้เองและจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในสภาวะที่สารละลายมีลักษณะเป็นเนื้อผสม (Amin, El-Ashtoukhy, & Abdelwahab, 2007; Karavasteva, 2005, 2009; Power & Ritchie, 1976; Robertson, Jeffrey, Zhang, & Ho, 2005)

นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาพบว่า การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al จะมีข้อได้เปรียบจากการรวมคุณสมบัติเด่นของโลหะทั้งสองชนิด กล่าวคือ ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนที่ดีของโลหะอะลูมิเนียม และความสามารถในการเป็นแม่เหล็กที่ดีของเหล็ก ซึ่งนอกจากการเก็บกลับคืนโลหะไอออนได้ดีแล้ว ยังสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ดูดซับบนตัวกลางออกจากสารละลายได้สะดวกโดยอาศัยคุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็กของตัวกลางร่วม อีกทั้งวิธีการนี้ยังเป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยาก สามารถใช้อุปกรณ์ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมมากสำหรับการวิเคราะห์โลหะไอออนปริมาณน้อยๆให้มีความแม่นยำสูงขึ้น



1245960946

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลาย ด้วยกระบวนการซีเมนต์ชัน ควบคู่กับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์สังเคราะห์ระหว่างคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กของ Fe และการเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีของ Al

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการเก็บกลับคืนอออนทองแดงจากสารละลายด้วยกระบวนการซีเมนต์ชันโดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al โดยกำหนดวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1.2.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม Fe/Al

1.2.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเก็บกลับคืนทองแดงจากสารละลายโดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al ที่สังเคราะห์ได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลการศึกษาที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ ไปประยุกต์ใช้เพื่อเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากน้ำเสียหรือกระบวนการอื่นๆ ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์ทองแดงในสารละลายเจือจางหรือสารละลายที่มีอออนมลทินหลากหลายชนิด นอกจากนี้ยังอาจนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกับโลหะทองแดงได้

1.4 ขอบเขตวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการเก็บกลับคืนอออนทองแดงจากสารละลายด้วยกระบวนการซีเมนต์ชันโดยใช้ตัวกลางร่วม Fe/Al โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.4.1 ตัวกลางร่วม Fe/Al ที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นตัวกลางที่สังเคราะห์ขึ้นอย่างง่ายโดยใช้ผงอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับสารละลายเหล็กคลอไรด์

1.4.2 สารละลายทองแดงที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นสารละลายที่สังเคราะห์ขึ้นโดยควบคุมความเข้มข้นอออนทองแดงตามแผนการศึกษา

1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย

- 1) สังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) โดยอาศัยปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็ก (Fe^{2+}) บนผิวของผงโลหะอะลูมิเนียม (Al powder) ในสถานะที่เป็นกรด
- 2) วิเคราะห์หาปริมาณ Fe บนพื้นผิว Al ด้วย ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) และ XRD (X-ray Diffractometer)
- 3) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา



- 4) นำตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลาย CuCl_2 ด้วยกระบวนการซีเมนต์ชัน
- 5) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดง
- 6) อภิปรายและสรุปผลการวิจัย



1245960946

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยกระบวนการซีเมนเตชันโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกำจัดโลหะหนัก

กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยทั่วไปสามารถจำแนกเป็น 3 ประเภท คือ กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process) กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process) และ กระบวนการทางเคมี (Chemical Process) ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป

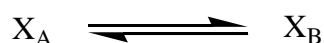
2.1.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process)

การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางกายภาพ ที่นิยมใช้ ได้แก่

1) การแยกสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

เป็นการถ่ายเทสารประกอบหนึ่งตัวหรือมากกว่า จากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ซึ่งทั้งสองเฟสต้องไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้แก่ การแยกสกัดด้วยเฟสของเหลว (liquid-liquid extraction) การสกัดของแข็งด้วยของเหลว (liquid-solid extraction) และการสกัดด้วยเฟสของแข็ง (solid phase extraction)

สมการการกระจายตัวของสารระหว่างสองเฟสที่ภาวะสมดุลคือ



$$\text{Chemical Equilibrium } K_D = \frac{[X]_B}{[X]_A}$$

K_D คือ ค่าคงที่สมดุลของการกระจายตัว (partition co-efficient)

$[X]_B$ คือ ความเข้มข้นของสารในเฟส B

$[X]_A$ คือ ความเข้มข้นของสารในเฟส A

2) การแยกสกัดด้วยเฟสของแข็ง (Solid Phase Extraction, SPE)

เป็นการนำสารที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากสารละลาย โดยนำเฟสของแข็งมาดูดซับสารที่ต้องการวิเคราะห์อาศัยหลักการที่อ่อนในสารละลายถูกดูดซับอยู่บนผิวของเฟสของแข็งด้วยกลไกการดูดซับ เช่น การดูดซับ (Adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) และการเกิดสาร



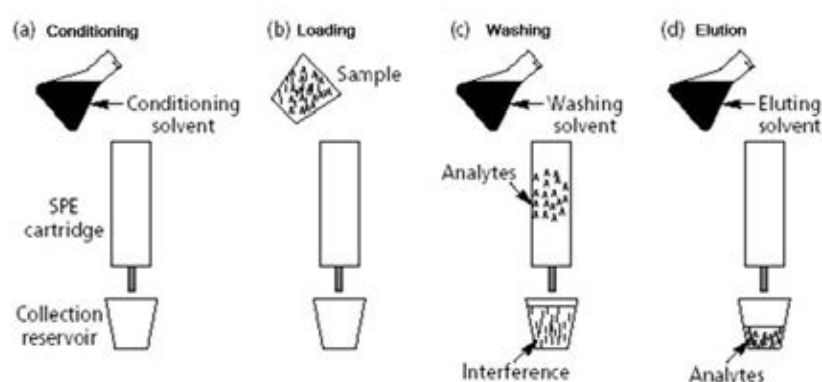
1245960946

เชิงซ้อน (Complexation) แล้วชะสารออกในภายหลังด้วยตัวชะที่เหมาะสมในปริมาณที่น้อยกว่า ปริมาตรของตัวทำละลายเดิม ทำให้สารละลายที่ได้มีความเข้มข้นสูงขึ้น

การสกัดด้วยเฟสของแข็งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดตัวรบกวนต่อการวิเคราะห์โดยการดูดซับ เฉพาะสารที่ต้องการวิเคราะห์ แยกออกจากตัวรบกวนต่าง ๆ และ/หรือ นำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นของ สารละลาย โดยการชะออกจากเฟสของแข็งด้วยปริมาตรตัวทำละลายที่น้อยกว่าปริมาตรที่นำมาสกัด อาศัยหลักการที่มีโมลของสารเท่าเดิม แต่มีตัวทำละลายลดลง จะทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงตรวจวัด ปริมาณสารได้แม่นยำมากขึ้น

ขั้นตอนการสกัดด้วยเฟสของแข็งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1 คือ

- เตรียมสารตัวอย่างและเฟสของแข็ง (conditioning)
- การนำสารตัวอย่างเข้าสู่เฟสของแข็ง (loading adsorption)
- การล้างตัวรบกวน (washing)
- การชะ (elution)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการแยกสกัดด้วยเฟสของแข็ง

การแยกสกัดด้วยเฟสของแข็ง โดยทั่วไปมีอยู่หลายวิธี เช่น การแยกสกัดผ่านคาร์ทีจน์ (SPE cartridge) การแยกสกัดผ่านแผ่นดิสก์ (SPE disk) การแยกสกัดผ่านคอลัมน์ (SPE column) และการแยกสกัดแบบแบทช์ (SPE batch) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป

ค่าที่สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพการแยกสกัด ได้แก่เปอร์เซ็นต์การแยกสกัด (% extraction) เปอร์เซ็นต์การได้กลับ (% recovery) และประสิทธิภาพของการเพิ่มความเข้มข้นโดยใช้ อัตราส่วนการเพิ่มความเข้มข้น (pre-concentration ratio)

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัด

$$\% \text{ extraction} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นในสารละลายก่อนการสกัด
 C_f คือ ความเข้มข้นในสารละลายหลังการสกัด

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การได้กลับ

$$\% \text{ recovery} = \frac{N_i}{N_f} \times 100$$

เมื่อ N_i คือ โมลก่อนสกัด
 N_f คือ โมลหลังสกัด

การคำนวณอัตราส่วนการเพิ่มความเข้มข้น

$$\text{Preconcentration ratio} = \frac{C_i}{C_f}$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นในสารละลายก่อนการสกัด
 C_f คือ ความเข้มข้นในสารละลายหลังการสกัด



1245960946

2.1.2 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process)

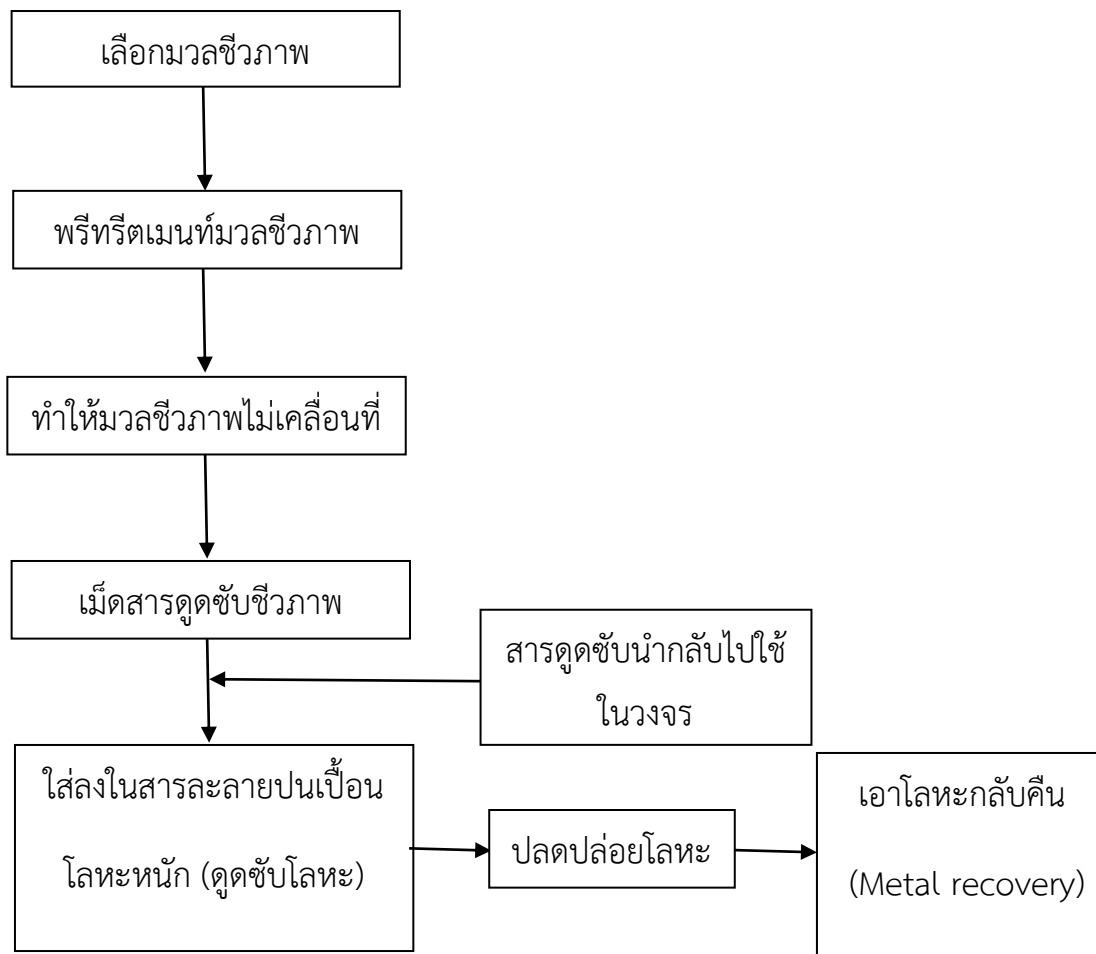
การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ที่นิยมใช้ ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) คือ การดูดซับโลหะหนักด้วยมวลชีวภาพ เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนักหรือกลุ่มของโลหะหนักที่มีประจุกับเซลล์ของจุลินทรีย์ (อัญชูลี เลิศสงคราม, 2554) วิธีการนี้มีข้อดีในเรื่องของ ค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ กากตะกอนที่เกิดจากวิธีทางเคมีชีวภาพ การเพิ่มสารอาหาร และสารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังสามารถดึงเอาโลหะออกจากสารดูดซับนั้นได้โดยกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ

กลไกที่ทำให้โลหะหนักจับกับจุลินทรีย์ที่มีชีวิต มีหลายวิธีแตกต่างกันออกไป ซึ่งกลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับชีวภาพสามารถจำแนกได้โดยใช้เกณฑ์ต่างๆ เช่น

- กลไกที่จัดอยู่บนพื้นฐานเมตาบอลิซึมของเซลล์
- กลไกที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับกระบวนการสร้างและสลาย (metabolism)
- กลไกที่อยู่บนพื้นฐานของกลุ่มที่ถูกดูดซับซึ่งจัดว่าเป็นการสะสมในเซลล์/การตกตะกอนนอกเซลล์ (intracellular accumulation/extracellular precipitation)
- การสะสม/การตกตะกอนบนผิวหน้าเซลล์ (cell surface sorption/precipitation)
- การสะสมภายในเซลล์ (intracellular accumulation) อีออนที่ถูกดูดซับจะถูกส่งผ่านเยื่อ (membrane)
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยจุลินทรีย์ เช่น การเกิดออกซิไดซ์ การรีดิวซ์ การเติมหรือเอาออกของหมู่เมทิล โดยโลหะหนักจะยึดจับกับจุลินทรีย์ด้วยสารเชิงซ้อนนอกเซลล์ (extracellular complexation) ดังแสดงใน รูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงกระบวนการดูดซับทางชีวภาพของโลหะหนัก (อัญชูลี เลิศสงคราม, 2554)

ชนิดของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.1 ชนิดของสาหร่าย รา ยีสต์ และแบคทีเรียที่สามารถดูดซับโลหะหนัก (Alluri et al., 2007)

ชนิดของสาหร่าย ราและยีสต์	โลหะหนักที่ถูกดูดซับ
<u>สาหร่าย</u>	
<i>Chlorella emersonii</i>	แคดเมียม
<i>Sargassum muticum</i>	แคดเมียม
<i>Ascophyllum sargassum</i>	ตะกั่ว แคดเมียม
<i>Ulva reticulata</i>	ทองแดง (Cu (III))
Brown sea weeds	โครเมียม
<i>Ecklonia species</i>	ทองแดง (Cu (III))
<u>รา</u>	
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	นิกเกิล (Ni (II)) ตะกั่ว (Pb (III))
<i>Aspergillus niger</i>	แคดเมียม
<i>Aspergillus fumigatus</i>	เออร์เนียม (Ur (VI))
<i>Aspergillus terreus</i>	ทองแดง
<i>Penicillium chrysogenum</i>	ทอง
<u>ยีสต์</u>	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	ยูเรเนียม แคดเมียม เมทิลเมอคูรี
<i>Kluyveromyces fragilis</i>	ปรอท (Hg (II)) แคดเมียม
<u>แบคทีเรีย</u>	
<i>Bacillus polymyxa</i>	ทองแดง
<i>Bacillus coagulans</i>	โครเมียม (Cr (VI))
<i>Eschereria coli</i>	ปรอท ทองแดง โครเมียม นิกเกิล
<i>Pseudomonas species</i>	โครเมียม (Cr (VI)) ทองแดง (Cu (III)) แคดเมียม (Cd (II)) นิกเกิล (Ni (II))



1245960946

2.1.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Process)

การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางเคมี ที่นิยมใช้ ได้แก่ การดูดซับบนพื้นผิวตัวกลาง (Adsorption onto different adsorbents) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวกลาง (P.Pradthana, 2008) คือ การสะสมตัวของสารที่ละลายอยู่ในสารละลายไว้ในบริเวณพื้นผิว (Surface) หรือระหว่างผิวหน้า Interface (เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว 2 ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2) การดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอย จะถูกกำจัดออกจากสารละลายและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากสารละลายไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล จึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในสารละลาย จะเหลือน้อย เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ ในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

- **การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)** เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนออกมาค่อนข้างน้อย และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น) multilayer)

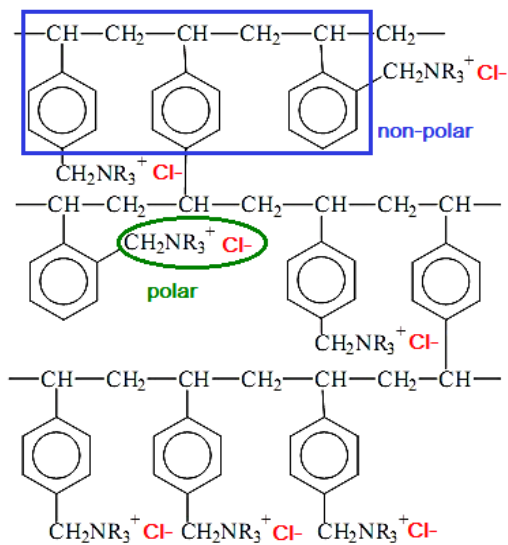
- **การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)** เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นในรูปแบบอื่น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก กล่าวคือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

1) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

เป็นการตรึงไอออนที่ต้องการบนเรซิน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่พัฒนาให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง โดยมีโครงสร้างแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่มีประจุ (Non-polar) กับส่วนที่มีประจุ (Polar) ดังรูปที่ 2.3



1245960946



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเรซินแบ่งเป็น 2 ส่วน
คือส่วนที่มีประจุและส่วนที่ไม่มีประจุ
(สำนักงานบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม, 2551)



1245960946

2.1.3.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

โลหะหนักจากของเสียอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปของสารละลาย การกำจัดโลหะหนักเหล่านี้นิยมทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นของแข็ง จากนั้นทำให้อนุภาคของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถกรองแยกออกจากสารละลายหรือของเสียชนิดอื่นที่ไม่ตกตะกอน

โลหะหนักที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม ฯลฯ การตกตะกอนของโลหะหนักอาจตกตะกอนร่วมกับไอออนประจุลบอื่นได้ เช่น ซัลไฟด์ (S^{2-}) ซึ่งเป็นโลหะที่มีความสามารถในการละลายน้ำ จึงมีการใช้ Na_2S หรือ $NaHS$ มาทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก แต่ข้อเสียของการตกตะกอนโลหะหนักร่วมกับซัลไฟด์ คือ ตะกอนมีขนาดเล็ก ทำให้การตกตะกอนเป็นไปได้ยาก อีกทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดก๊าซ

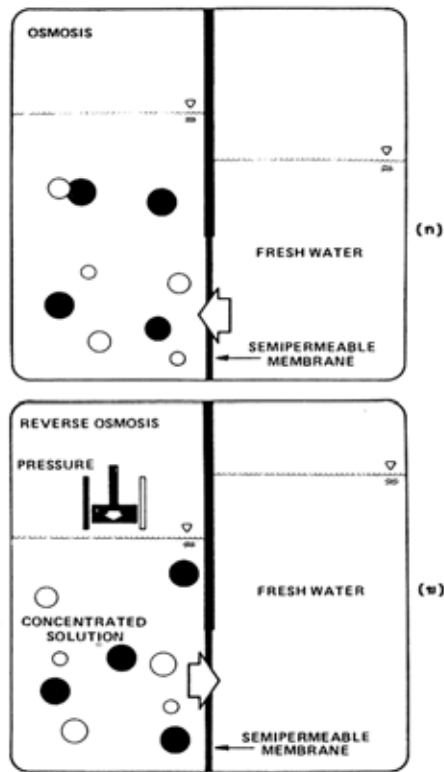
2.1.3.2 กระบวนการเมมเบรน (Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) คือ การเคลื่อนที่ของตัวทำละลายผ่านเยื่อเมมเบรนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่า เมื่อปล่อยให้ตัวทำละลายมีการไหลจนกระทั่งถึงจุดสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายจะมีค่าเท่ากัน ระดับความแตกต่างของความเข้มข้นดังกล่าวเรียกว่า แรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากระทำต่อสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า การไหลจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับธรรมชาติ เรียกกระบวนการนี้ว่า ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

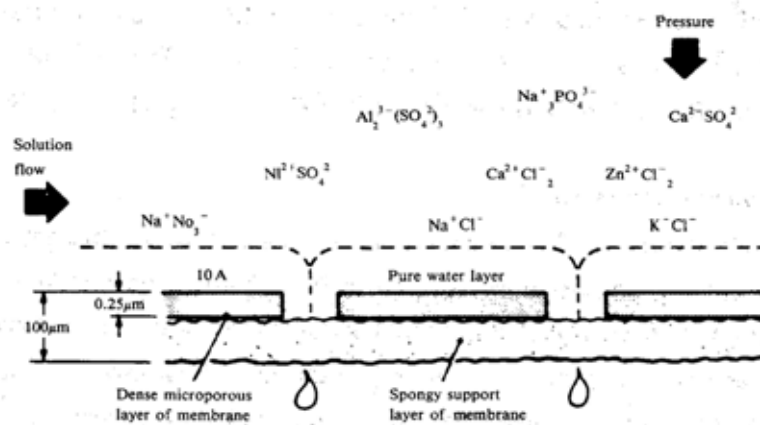
2.1.3.2.1 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis, RO)

มีกลไกการทำงาน 2 อย่าง คือ กลไกการกำจัดเกลือ (ไอออนต่างๆ) และกำจัดสารอินทรีย์ แผ่นเมมเบรนประกอบด้วย 2 ชั้น ชั้นบนอยู่ติดกับฝั่งน้ำดิบ กระจายอยู่ทั่ว ชั้นนี้ทำหน้าที่กำจัดเกลือแร่และสารอินทรีย์ ส่วนชั้นล่างซึ่งมีเนื้อพรุนและหนากว่ามาก ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับและขนส่งน้ำบริสุทธิ์ออกไปด้านนอก



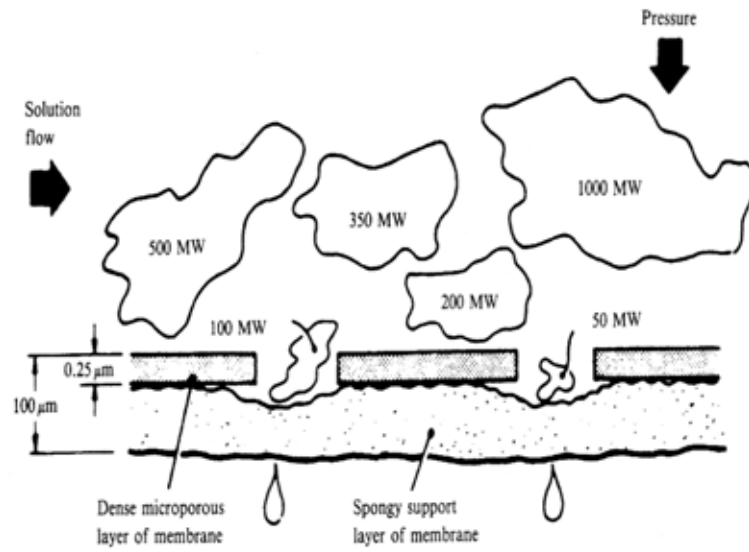


รูปที่ 2.4 (ก) Osmosis (ข) Reverse Osmosis
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

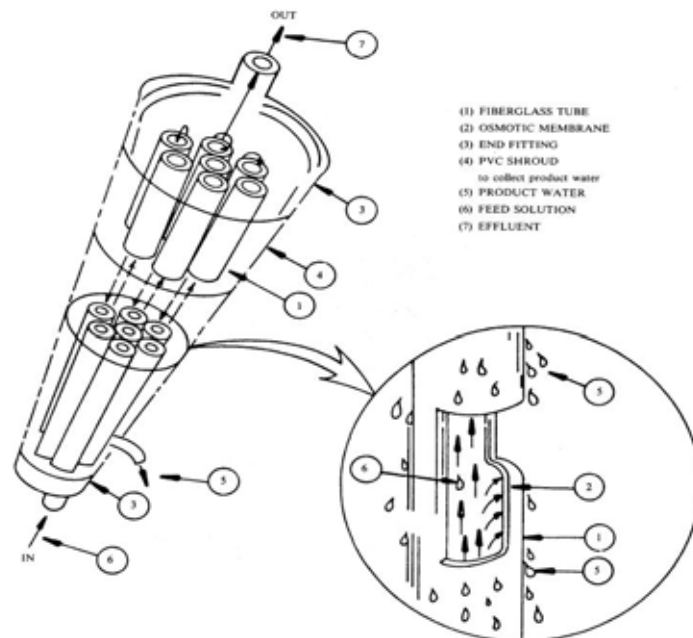


รูปที่ 2.5 กลไกการกำจัดเกลือแร่ต่างๆ ของระบบ RO
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

กลไกการกำจัดเกลือแร่ อีออนในน้ำดิบจะถูกผลักให้อยู่ห่างจากผิวเมมเบรน อีออนที่มีประจุต่ำจะถูกผลักน้อยสุด จึงอยู่ใกล้เมมเบรนมากที่สุด ทำให้ผ่านเมมเบรนได้ง่าย

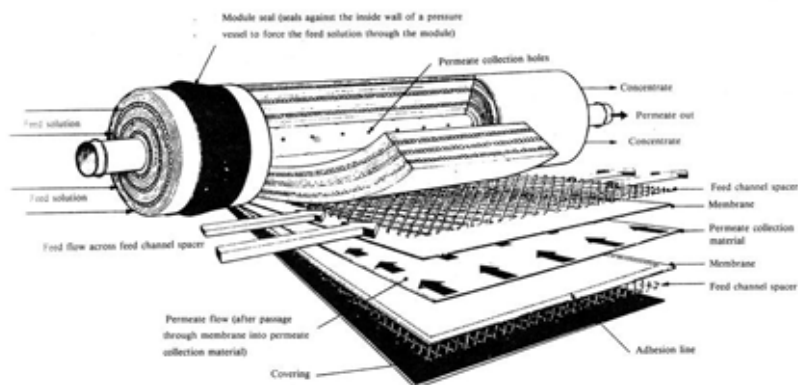


รูปที่ 2.6 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ RO
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 2.7 Tubular module (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)





รูปที่ 2.8 Spiral wound Module (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในปัจจุบันมีทั้งที่เป็นสารสังเคราะห์ (Synthetic Membranes) หรือมาจากธรรมชาติ อาจมีลักษณะเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ แต่ลักษณะที่สำคัญที่สุด คือ จะต้องมีความสมบัติในการเลือกผ่านสาร ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี

2.2 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดง (Copper Recovery)

โลหะทองแดง (Cu) เป็นโลหะพื้นฐานชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและใช้มากในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ หม้อน้ำรถยนต์ อาวุธยุทธภัณฑ์ เหมืองภูเขาป่นและเหมืองถุตราต่างๆ การใช้ผลผลิตจากอุตสาหกรรมแต่ก่อนเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผน หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่เลิกใช้จะถูกทิ้งรวมกับขยะอื่นๆ ทั้งขยะพิษ ขยะกัมมันตรังสี และขยะอันตรายที่ระเบิดได้

สำหรับขยะพิษจากสารเคมี หรือโลหะหนักอันตรายนั้นจะต้องกำจัดด้วยวิธีพิเศษ โลหะทองแดงได้กลายเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่เป็นปัญหาใหญ่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ถ้าหากไม่มีการบำบัดหรือการจัดการที่ดี นอกจากของเสียประเภทโลหะหนักแล้ว ยังมีของเสียที่มีการจัดแบ่งประเภทอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2.4

ประเภทอุตสาหกรรม	ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมอันตราย
กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid)	กรดกำมะถัน (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO_3) กรดฟอสเฟอริก (H_2PO_4) กรดอนินทรีย์อื่นๆ
กรดอินทรีย์ (Organic Acid)	กรดอะซีติก (CH_3COOH) กรดฟอร์มิก ($HCOOH$) กรดอินทรีย์อื่นๆ
ด่าง (Alkalis)	โซดาไฟ (NaOH) แอมโมเนีย (NH_3) โซเดียม คาร์บอเนต (Na_2CO_3) ต่างประเภทอื่นๆ
สารประกอบโลหะหนัก (Heavy Metal Compounds)	เกลือ เกลือเป็นพิษ (Hg, As, Ca, Pb, Cr) ฯลฯ โลหะอื่นๆ
สารประกอบอนินทรีย์ ของแข็ง	แอสเบสตอส (Asbestos) เศษโลหะ (Slag) ตะกอน (Silt)
สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds)	กากสารเคมีที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Oxidizing agents) รีดิวซ์เอเจนท์ (Reducing agents) ตัวทำ ละลาย (Solvent) อื่นๆ
วัสดุโพลีเมอร์ (Polymer Materials)	อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ซีเลทเรซิน (Chelate Resin) โพลียูรีเทนเรซิน (Polyurethane Resin) ยาง ลาเทกซ์ (Latex Rubber) อื่นๆ
เชื้อเพลิง น้ำมัน ไข (Fuel, Oil and Grease)	น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (น้ำมันเครื่องใช้แล้ว จาระบีใช้ แล้ว ฯลฯ) ตัวทำละลายคลอรีเนเตด (Chlorinated solvent ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride) อื่นๆ

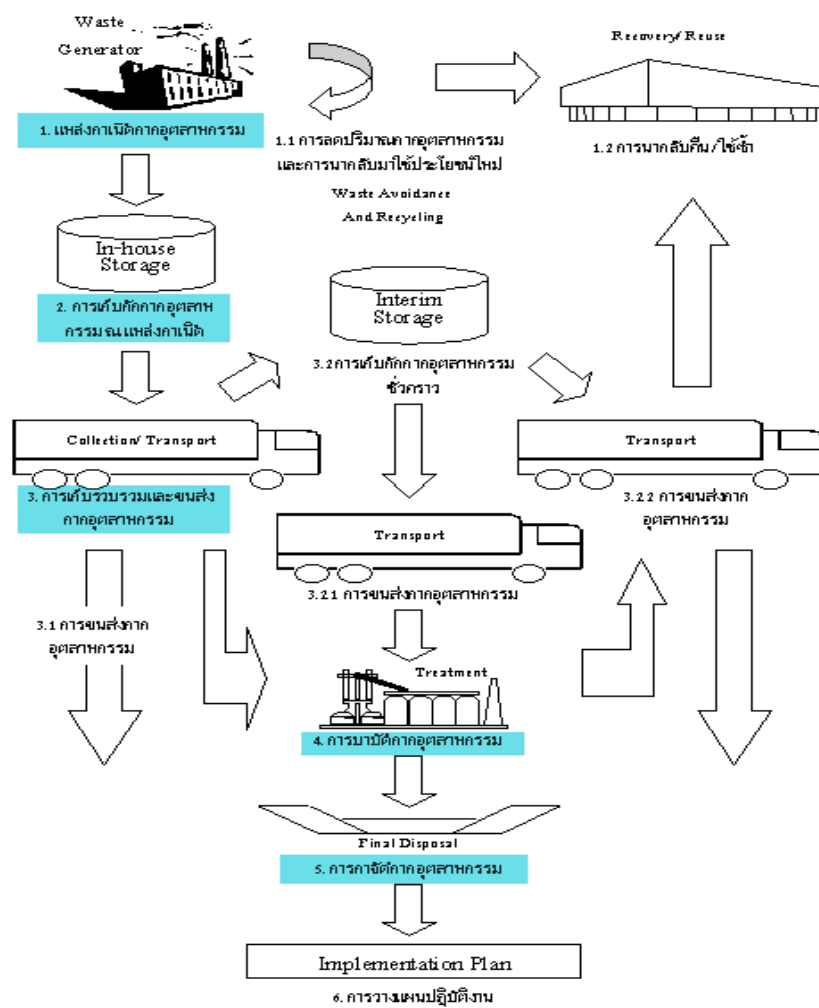
ตารางที่ 2.2 ของเสียที่มีการจัดแบ่งประเภทอุตสาหกรรม
(ธีระศักดิ์ พงษ์พานาไกร, 2549)



1245960946

2.3 ระบบการจัดการกากอุตสาหกรรม

- แหล่งกำเนิดกากอุตสาหกรรม
- การเก็บกักกากอุตสาหกรรม ณ แหล่งกำเนิด
- การเก็บรวบรวมและขนส่งกากอุตสาหกรรม
- การบำบัดกากอุตสาหกรรม
- การกำจัดกากอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 การจัดการของเสียอุตสาหกรรม (ธีระศักดิ์ พงษ์พานาไกร, 2549)

1245960946

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงและโลหะอโลหะชนิดอื่นๆ สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของของเสียที่ต้องการบำบัด งบประมาณที่ใช้ในการบำบัด รีเอเจนต์และอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้น จึงมีผู้เสนอวิธีวิเคราะห์การเก็บกลับคืนโลหะอโลหะดังกล่าวโดยใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

ในปี 1981 Prabhat, K. และ Srinivasa, R. (Sahoo & Srinivasa Rao, 1982) เสนอวิธีวิเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนที่มีองค์ประกอบของสังกะสี (Zn) 18% ทองแดง (Cu) 3.5% และตะกั่ว (Pb) 9% ในสารละลายคลอไรด์ (FeCl_3) โดยเก็บกลับคืนโลหะทองแดงด้วยโลหะอะลูมิเนียม (Al) ผลการศึกษาพบว่า สามารถเก็บกลับคืนโลหะทองแดงได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง pH 2.06 และอัตราการไหลของแก๊ส (Gas flow rate) 33-50 m/s ส่วนโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลายก็สามารถเก็บกลับคืนโดยกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสมอื่นๆต่อไป

ในปี 2000 Makhloufi, L., Saidani, B. และ Hammache, H.(L. Makhloufi, Saidani, & Hammache, 2000) เสนอวิธีวิเคราะห์ตะกั่ว (Pb) ในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรด (Acidic aqueous solutions) โดยผ่านกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation) ที่มีผงเหล็ก (Fe) เป็นตัวดูดซับ โดยใช้ Rotating iron disc ข้อดีของวิธีนี้คือ ง่ายต่อการใช้งาน ข้อเสียคือ มีเพียงโลหะบางชนิดเท่านั้นที่เก็บกลับคืนได้ด้วยวิธีนี้ (Fouletier, Mathieu, Noual, & Winand, 1980; Kenna, Ritchie, & Singh, 1990; L. d. Makhloufi, 1987; Power & Ritchie, 1976)

ในปี 2007 Djoudi, W., Aissani-Benissad, F. และ Bourouina-Bacha, S.(Djoudi, Aissani-Benissad, & Bourouina-Bacha, 2007) เสนอวิธีวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บกลับคืนทองแดง (Cu) ด้วยกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation) จากการวิเคราะห์ผลที่ได้ทางสถิติ (The second-order central composite rotatable design: CCRD) พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง (Initial copper concentration) ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และอัตราการไหลของแก๊ส (Flow rate) ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแตกต่างกันไป โดยที่อัตราการไหลของแก๊สเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส การเก็บกลับคืนทองแดงจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกัน สารละลายมีสภาวะเป็นกรดมากเกินไป กระบวนการซีเมนเตชันจะเกิดได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากเกิดการดูดซับของไฮโดรเจนบนผิวโลหะ การรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นน้อยลง และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสให้สูงขึ้น การเก็บกลับคืนทองแดงจะสูงขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อทำการทดลองที่สภาวะเหมาะสมที่คัดเลือกจากการทดลองสามารถเก็บกลับคืนทองแดงได้ 99.6 %



ในปี 2008 Alorro, R. D.(Alorro, Mitani, Hiroyoshi, Ito, & Tsunekawa, 2008) และคณะ เสนอวิธีการวิเคราะห์และเก็บกลับคืนโลหะหนักที่มีอยู่ในขยะชุมชน (Municipal solid waste molten fly ash; MSW) ก่อนการฝังกลบ (landfilling) เนื่องจากของเสียดังกล่าวถูกจัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย (Hazardous waste) โดยการศึกษา Carrier-in-pulp (CIP) ที่มีผงอ็อน (Fe Powder) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นวิธีใหม่ทาง Hydrometallurgy ที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เพื่อเก็บกลับคืน ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แตกต่างกันไปตั้งแต่ 1-5 kmol/m³ ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถสกัดโลหะหนักทั้งสี่ชนิดได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ เก็บกลับคืนตะกั่วได้ถึง 96.3 เปอร์เซ็นต์ และทองแดงได้ถึง 94.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วิธีนี้ไม่สามารถเก็บกลับคืนสังกะสีและแคดเมียมได้ดีนัก

ในปี 2009 Guoxin, H.(Guoxin, Zhengxia, Jianju, & Yanhong, 2009) และคณะ เสนอวิธีวิเคราะห์ผลของการใช้ตัวเคลือบที่มีการผสมระหว่างอะลูมิเนียม (Al) กับเหล็ก (Fe) เคลือบบนผิวโลหะทองแดง (Cu) ผ่านกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation) โดยการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็ก (Microstructure) จากตัวอย่างภาพตัดขวาง (The cross section of specimen) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่ต่อเข้ากับเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrophotometer (EDS)) และศึกษาความสามารถในการชน (Corrosion Resistance) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่ต่อเข้ากับเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) จากการวิเคราะห์พบว่า ความหนาของวัสดุที่ใช้เคลือบ (Al-Fe Coating) มีสัมพันธ์กับอุณหภูมิในช่วง 730-900 °C นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณของอะลูมิเนียมและเหล็ก ที่ผสมลงไป ในวัสดุที่ใช้เคลือบด้วย ปริมาณดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 7.65-4.0%, 2.0-0.5% ตามลำดับ ในชั้นของวัสดุที่ใช้เคลือบ (The coating layer) ที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมส่งผลดีต่อการป้องกันการผุกร่อนที่เกิดจากธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ใช้เคลือบ

ในปี 2007 Zhike, W., Donghui, C. และ Liang, C.(Wang, Chen, & Chen, 2007) เสนอวิธีวิเคราะห์การเก็บกลับคืนทองคำจากสารละลายไทโอไซยาเนตโดยใช้ผงเหล็ก (The gold cementation from thiocyanate solutions by irons powder) เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บกลับคืนทองคำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ความเข้มข้นของไทโอไซยาเนต (Thiocyanate concentration) ความเข้มข้นของทองคำ (Gold concentration) อัตราส่วนระหว่างผงเหล็กและทองคำ (Iron/Gold mass ratio) อุณหภูมิ (Temperature) อัตราเร็วของการกวน (Stirring speed) และปริมาณของเหล็กอ็อนในสารละลาย (Presence of iron in solutions) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของความดันแก๊ส (Gas atmosphere) ในกระบวนการเกิดซีเมนเตชันของทองคำด้วย ในกระบวนการอุตสาหกรรมมีการใช้รีเอเจนต์อย่างหลากหลายเพื่อนำมาใช้ในการเก็บกลับคืนทองคำ



เช่น ไทโอยูเรีย (Thiourea) ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) คลอไรด์ (Chloride) ไอโอดีน (Iodine) และไทโอไซยาเนต (Thiocyanide) เป็นต้น ไทโอไซเนตเป็นรีเอเจนต์ที่มีการใช้อย่างหลากหลายมากที่สุด เนื่องจากไม่มีอันตรายและทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่มีความเสถียร (Barbosa-Filho & Monhemius, 1994; Barbosa & Monhemius, 1989; Broadhurst & du Perez, 1993; Kholmogorov, Kononova, Pashkov, & Kononov, 2002) แต่ยังคงมีข้อเสียคือ ไทโอไซยาเนตสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะประจุบวกได้ง่าย จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบส อัตราเร็วของการกวนความเข้มข้นของทองคำ อัตราส่วนระหว่างผงเหล็กและทองคำ ความดันแก๊ส และปริมาณของเหล็กไอออนในสารละลายมีผลต่อการเก็บกลับคืนทองคำเป็นอย่างมาก กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มค่าของปัจจัยเหล่านี้ ทำให้การได้คืนทองคำ (Gold recovery) มากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของไทโอไซยาเนตมีผลต่อกระบวนการเก็บกลับคืนไม่มากนัก ปฏิริยาดังกล่าวเป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง มีค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) 9.3 kJ/mol อีกทั้งยังพบว่า การใช้แก๊สไนโตรเจนในปฏิริยาทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของการเก็บกลับคืนมีค่ามากกว่าเมื่อไม่มีการใช้แก๊สไนโตรเจน

ในปี 2008 Saha, B., Chakraborty, S. และ Das, G. (Saha, Chakraborty, & Das, 2008) เสนอวิธีการใช้ Trimesic acid (TMA) เคลือบบนผิวของโลหะอะลูมิเนียม เพื่อเก็บกลับคืน Fe^{2+} และ Fe^{3+} จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} มีค่า 26.6 mg/g และ 8.4 mg/g ตามลำดับ TMA ที่ถูกเคลือบด้วยโลหะอะลูมิเนียมสามารถเลือกจับกับ Fe^{3+} ได้มากกว่า ปฏิริยานี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในสภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง (pH ~1.5) ในขณะที่อุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี 2010 Noubactep, C. (Noubactep, 2010) เสนอวิธีการวิเคราะห์โลหะหนักโดยอาศัยกระบวนการทางซีเมนต์ชัน (Cementation) ซึ่งเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) ปฏิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้เองในสภาวะที่สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (A spontaneous heterogeneous reaction) และเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวของโลหะ โลหะที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจะตกตะกอนในสารละลายแล้วถูกแทนที่ด้วยโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) สูงกว่าตาม Electromotive series อาจเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Contact reduction หรือ Metal Displacement เนื่องจากมีหลักการที่ไม่ยุ่งยาก ดูแลควบคุมได้ง่าย และใช้พลังงานในการเกิดปฏิริยาดำ (A low energy consumption) ดังนั้น กระบวนการนี้จึงมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการนำมาใช้เพื่อเก็บกลับคืนโลหะหนัก ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของ อลูมิเนียม (Al), สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) ต่อปรอทไอออน (Hg^{2+}) ในสารละลาย พบว่าไอออนมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวให้

อิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้อาจมีการใช้วิธีอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอ็อนได้ เช่น การใช้อ็อนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก การผสมอ็อนกับโลหะชนิดอื่น (Bimetallic System)

ในปี 2011 Bo Yang, A.B. และคณะ (Yang et al., 2011) เสนอวิธีวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบในสารละลายคลอไรด์ (Aqueous chloroorganic compounds) ด้วยวิธีไฮโดรเดคลอรีเนชัน (Hydrodechlorination; HDC) โดยใช้โลหะผสมระหว่างแพลเลเดียม (Pd-Based bimetallic materials) กับโลหะชนิดอื่น ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) อลูมิเนียม (Al) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) ดีบุก (Sn) และทองแดง (Cu) ผ่านการเตรียมโดยกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation) เพื่อศึกษาอิทธิพลของโลหะเหล่านี้ต่อ 2-chlorobiphenyl (2-PCB) จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES, SEM, XRD และ BET พบว่า ในสภาวะที่เป็นกรด (Acidic solution) โลหะผสม (Bimetals) ให้ผลที่แตกต่างกันออกไป อนุภาคของแพลเลเดียม/อลูมิเนียม (Pd/Al) มีผลทำให้เสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด การใช้อลูมิเนียมเป็นสารตั้งต้น (Al substrate) มีข้อดี คือ อลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบเห็นและหาได้โดยทั่วไป นำมาจัดการและกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย อีกทั้งยังมีอิเล็กตรอนวงนอกเป็นศูนย์ (Zero-valent aluminium) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับการใช้เหล็กเป็นสารตั้งต้น (Fe substrate)

ในปี 2011 Nizamettin, D. และ Asim, K. (Demirkıran & KÜNKÜL, 2011) เสนอวิธีวิเคราะห์คอปเปอร์อ็อนในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) โดยใช้อนุภาคของอลูมิเนียมเป็นตัวรับอิเล็กตรอนผ่านกระบวนการทางซีเมนเตชัน (Cementation) เปรียบเทียบกับกระบวนการทางเคมีอื่นๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนอ็อน (Ion Exchange) การตกผลึก (Crystallization) อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) เป็นต้น รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส (pH) อัตราเร็วของการกวน (Stirring Speed) และอุณหภูมิ (Temperature) ในการวิเคราะห์ที่ได้สภาวะที่ทำให้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการซีเมนเตชัน (Maximum Cementation Yield) สูงสุด ดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของคอปเปอร์อ็อน (Initial copper ion) 0.025 mol/L ค่าความเป็นกรด-เบส 1.0 อัตราเร็วของการกวน 450 r/min และอุณหภูมิ 353 K เมื่อนำมาคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) มีค่าเป็น 36.8 kJ/mol



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในการศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะอ็อน ด้วยกระบวนการซีเมนต์ชั้นโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมนี้ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 3.1 การจัดเตรียมสารเคมีและเครื่องมือ
- 3.2 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate)
- 3.3 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) เปรียบเทียบกับการใช้ตัวกลางอะลูมิเนียม (Al substrate)
- 3.4 การสรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงาน

3.1 การจัดเตรียมสารเคมีและเครื่องมือ

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ยี่ห้อ JOBINYVON HORIBA, รุ่น JY 2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- 2) X-ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ BRUKER, รุ่น D8 advance ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่อง Inductively Coupled Plasma optical emission spectrometer (ICP-OES)



รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

- 3) เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ METTLER TOLEDO, รุ่น PB303-S)
- 4) เครื่องกวน (ยี่ห้อ Clifton, รุ่น CERASTIR)

3.1.2 สารเคมี

สารเคมีทุกชนิดเป็น AR grade ใช้ในการทดลองโดยไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์อีก ได้แก่

- 1) Iron (II) chloride tetrahydrate
Phenolphthalein ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Merck)
- 2) Iron (III) chloride anhydrous Silver nitrate
(FeCl_3 , Merck)
- 3) Copper (II) chloride dehydrated
(CuCl_2 , Merck)
- 4) Zinc chloride (97.8%)
(ZnCl_2 , Ajex Finechem)
- 5) Fine aluminium powder ($D_{50} = 90\mu\text{m}$)
- 6) Sodium Chloride
(NaCl , Ajex Finechem)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 2) กรวยแก้ว
- 3) แก้วคน
- 4) ขวดกำหนดปริมาตร
- 5) ขวดน้ำกลั่น
- 6) ขวดพลาสติก
- 7) ขวดรูปชมพู่
- 8) ซ้อนตักสาร
- 9) แท่งแก้วคน
- 10) ปีกเกอร์
- 11) ปิเปต
- 12) ลูกยาง
- 13) หลอดหยด

3.2 การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

3.2.1 เตรียมสารละลายเหล็กไอออน

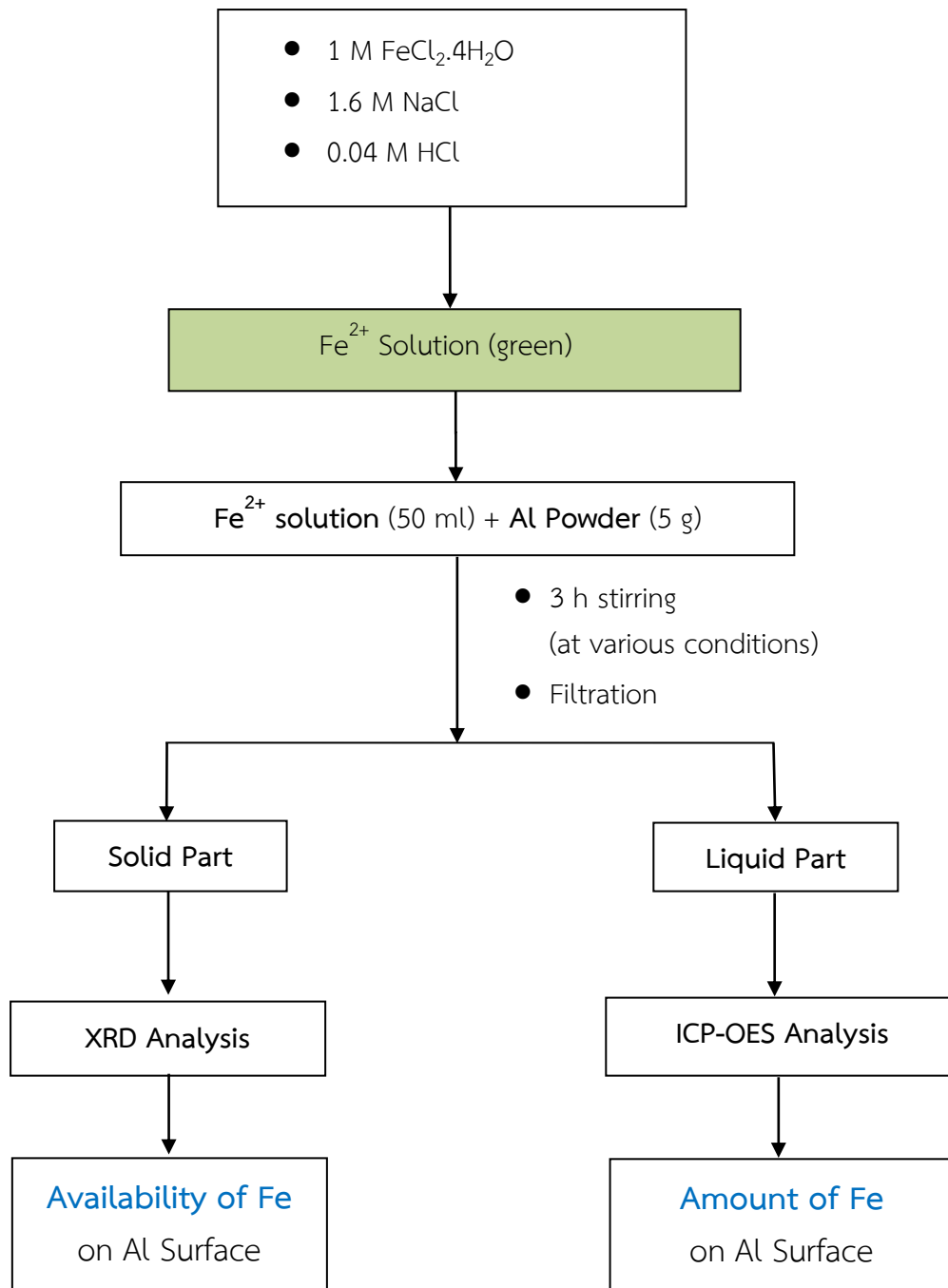
โดยชั่ง 1M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ปริมาตร 49.70 กรัม, 1.6M NaCl (23.38 กรัม) และตวง 0.04M HCl (1.0 ml) ผสมกันในขวดปริมาตรขนาด 250 ml ปรับปริมาตรด้วย DI water จะได้สารละลายเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) สีเขียว สำหรับใช้ในการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม

3.2.2 หาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม

โดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ และอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา



ดูแผนภูมิที่ 3.1 ประกอบ



แผนภูมิที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม

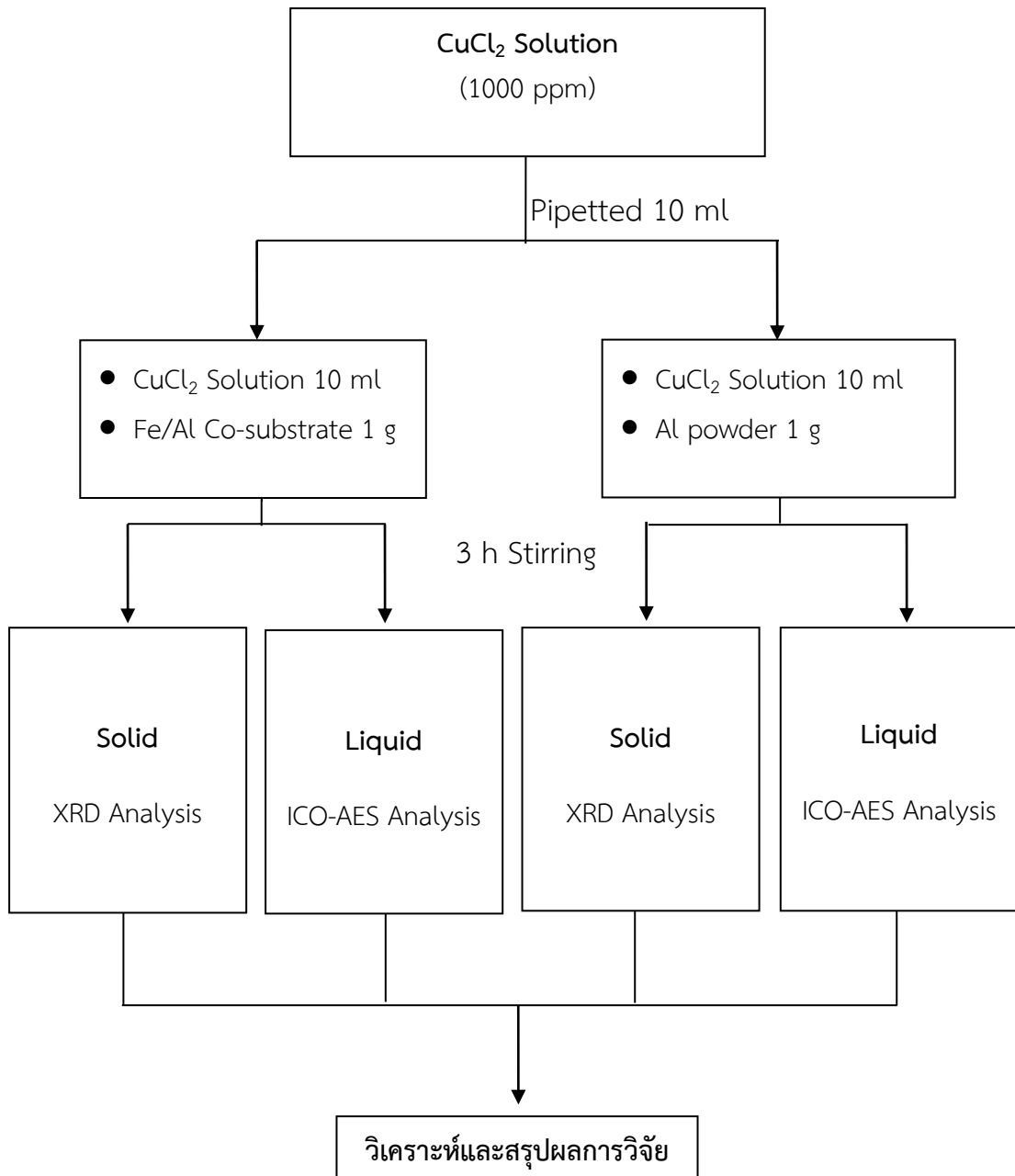


3.3 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วม

เตรียมสารละลายคอปเปอร์เข้มข้น 1000 ppm จาก CuCl_2 50 มิลลิกรัม

- 1) ปิเปตสารละลายคอปเปอร์ 50 ml ลงในขวดรูปชมพู่ ที่มีตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) 1 กรัม บรรจุอยู่ ปิดภาชนะให้แน่น แล้วใช้ parafilm ปิดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันการสูญเสียสารละลายขณะนำไปเขย่า
- 2) เขย่าสารละลายหรือกวนด้วย Magnetic Stirrer เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) นำสารละลายที่เขย่าเสร็จแล้วมากรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการกรองไปแช่ไว้ในตู้อบที่มีการปรับอุณหภูมิ 80-100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะ โดยใช้ X-ray Diffraction (XRD) และเครื่อง Inductively coupled plasma Optical Emission spectroscopy (ICP-OES)
- 5) ทำเช่นเดียวกับข้อ 1) – 4) แต่ใช้ Al Powder แทนตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม
- 6) เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกลับคืนทองแดงระหว่าง Al powder กับ Fe/Al Co-substrate





แผนภูมิที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเก็บกลับคืนโลหะทองแดง

3.4 การสรุปและอภิปรายผลการวิจัย

สรุปและอภิปรายผลการวิจัยจากข้อมูลที่ได้เกี่ยวกับสภาวะ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โลหะ ดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) แล้วนำโลหะดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม ที่ สภาวะที่ดีที่สุดมาใช้ในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดง



บทที่ 4

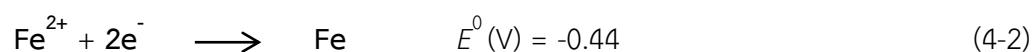
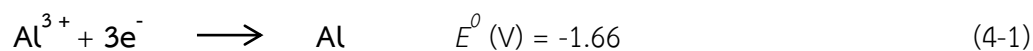
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายด้วยกระบวนการซีเมนต์ชันโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) เป็นการทดลองเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ ซึ่งได้ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 31 กรกฎาคม 2556 โดยแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate)
2. การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) ที่สังเคราะห์ได้ เปรียบเทียบกับกรณีใช้ตัวกลางอะลูมิเนียม

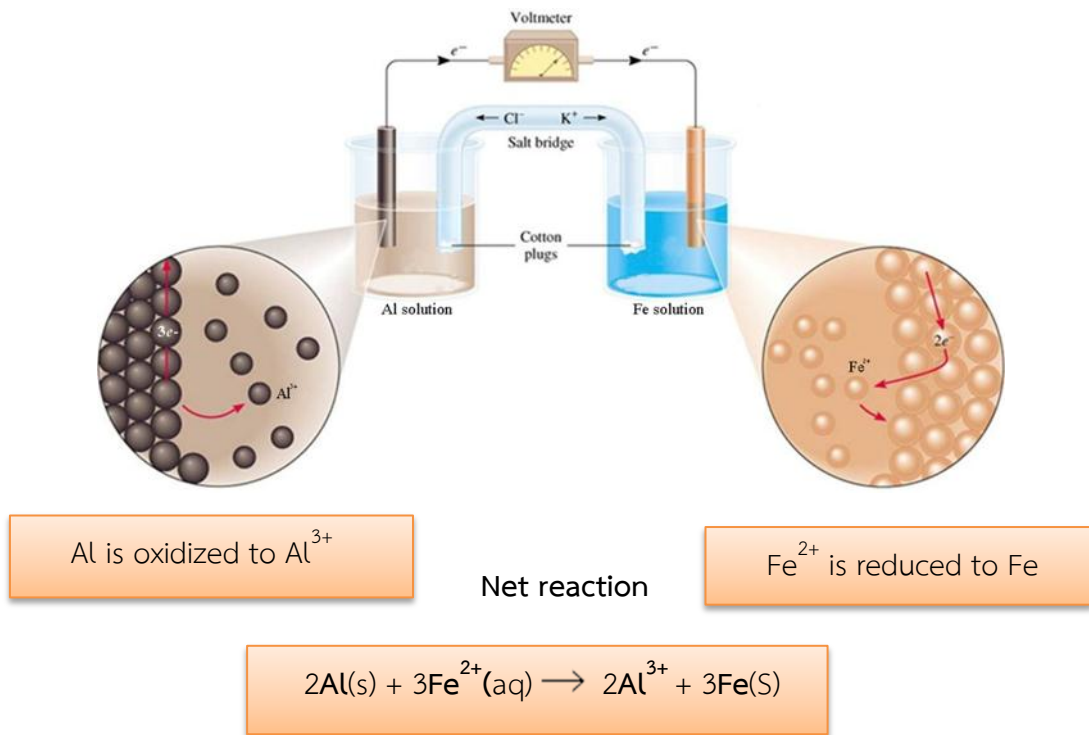
4.1 การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

การทดลองเพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของอนุภาคเหล็ก (Fe) บนผิวของโลหะอะลูมิเนียม (Al powder) เมื่อพิจารณาศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard electrode potential, E^0) ของโลหะทั้งสองชนิดตามสมการที่ (4-1) และ (4-2) ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous reaction)



การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยอาศัยกระบวนการทางซีเมนต์ชัน เป็นหนึ่งในกระบวนการทางโลหวิทยาการละลาย (Hydrometallurgical method) อาจเรียก กระบวนการซีเมนต์ชัน ว่า Contact reduction หรือ Metal Displacement (Noubactep, 2010) ซึ่งเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) โลหะที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน ในที่นี้คือเหล็ก โดยที่ Fe^{2+} ions ในสารละลายจะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็กตกตะกอนแยกจากสารละลายมาเกาะบนผิวโลหะอะลูมิเนียมซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า (เป็นบวกมากกว่า)

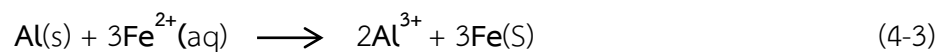




รูปที่ 4.1 กระบวนการดูดซับบริเวณผิวของโลหะอะลูมิเนียม

เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริออน

จากรูปที่ 4.1 เป็นตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับเหล็ก อะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดจ่ายอิเล็กตรอนให้กับอ็อกซิเดชันเหล็ก ในขณะที่เหล็กทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดรับอิเล็กตรอน (Oxidizing agent) มีการลดลงของเลขออกซิเดชัน จากบวกสองเป็นศูนย์หรือมีสถานะเป็นของแข็ง (solid) นั่นเอง เมื่อรวมสมการทั้งสองเป็นสมการรีดอกซ์ (Redox reaction) จะได้ดังสมการที่ 4-3 คือ



สำหรับการวิจัยนี้ ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างผงอะลูมิเนียม กับ Fe^{2+} ions (สารละลายสีเขียว ได้จากการผสม 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl) ภายใต้สภาวะนี้ พบว่า สารละลายมีค่าความเป็นกรดมากเกินไป ส่งผลให้มีแก๊สเกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยา เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมละลายในกรด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว ช่วงที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาของ Fe^{2+} ควรมีค่า pH 2 - 3 (Saha et al., 2008)



รูปที่ 4.2 แสดงการเกิดก๊าซขณะสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl

ผู้วิจัยจึงได้นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มาปรับค่า pH ของสารละลาย ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็ก ทำการทดลองภายใต้สภาวะเดิมโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (contact time) 1.5 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง อย่างละ 2 ชุดการทดลอง ทำการเก็บของแข็งและสารละลายที่ได้วิเคราะห์ด้วย XRD และ ICP-OES ตามลำดับ

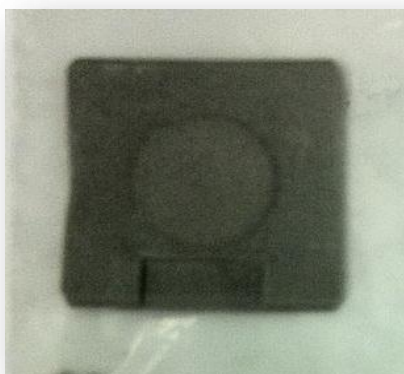
จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES การทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1.5 และ 3 ชั่วโมง ปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมสามารถเกิดขึ้นได้ดี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ดังสมการ (4-4)

$$\text{adsorbed Fe}(\%) = \frac{\text{Fe}_{\text{initial}} - \text{Fe}_{\text{final}}}{\text{Fe}_{\text{initial}}} \times 100 \quad (4-4)$$

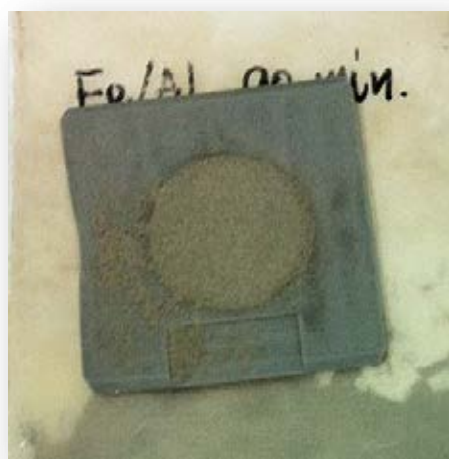
เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยกรณีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 และ 3 ชั่วโมง มีค่าเป็น 9.4 และ 9.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การทำการทดลองที่สภาวะนี้ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ได้ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมมากนัก สังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ย

อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยา ทำให้มี Fe^{2+} บางส่วนเปลี่ยนเป็น Fe^{3+} (สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลอมแดง) ไม่ตรงตามจุดประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้ ส่งผลให้สภาวะนี้เป็นสภาวะที่ยังไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ตัวดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

ส่วนของแข็งที่สังเคราะห์ได้ซึ่งเป็นตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ขึ้นมีอนุภาคของเหล็กมาเกาะอยู่ในลักษณะของ Bimetallic particle ที่ประกอบด้วย อะลูมิเนียมเป็นโลหะหลัก (Core metal) และเหล็กเป็นโลหะรอง (Secondary metal) เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ได้ X-ray pattern ของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมและ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ แต่ในความเข้มข้นที่ต่ำมาก เนื่องจากเกิดการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมน้อย นอกจากนี้ยังพบ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ อยู่จำนวนหนึ่งด้วย ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากการเปลี่ยนฟอร์มบางส่วนของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Ferric นั่นเอง



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียม (Al powder)



(ก)

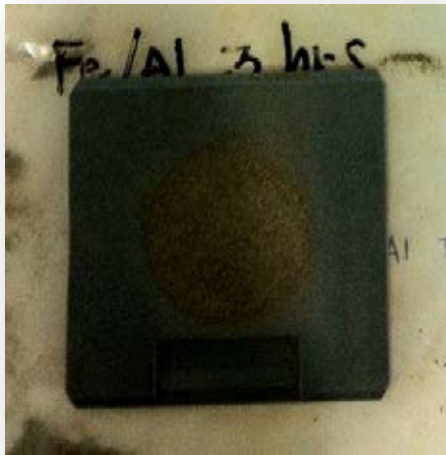


(ข)

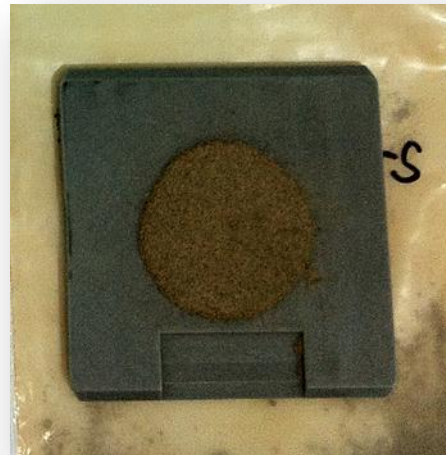
รูปที่ 4.4 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม สังเคราะห์ภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง

(ก) ชุดการทดลองที่ 1

(ข) ชุดการทดลองที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6M NaCl และ 0.4 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง

(ก) ชุดการทดลองที่ 1

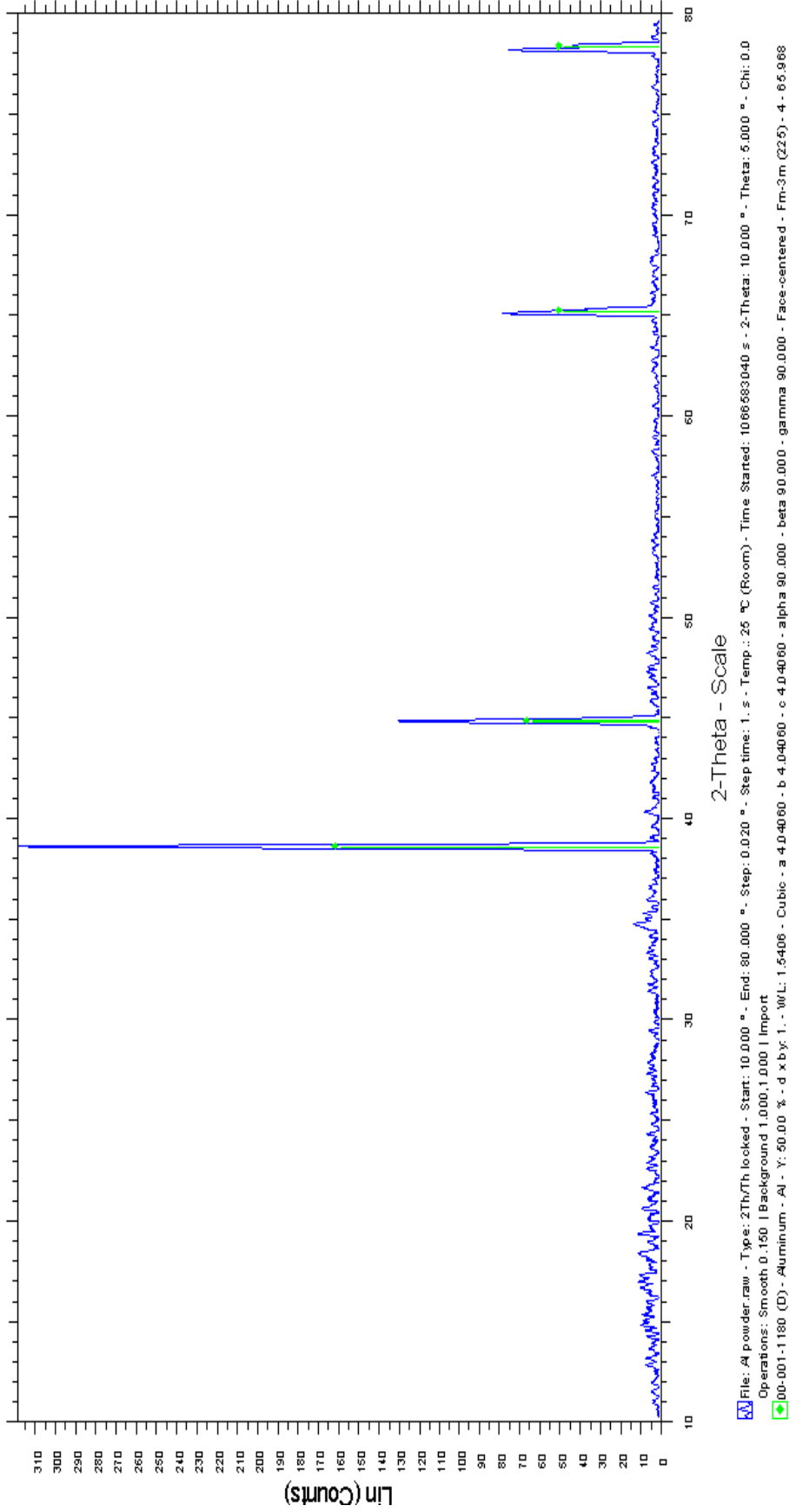
(ข) ชุดการทดลองที่ 2



1245960946

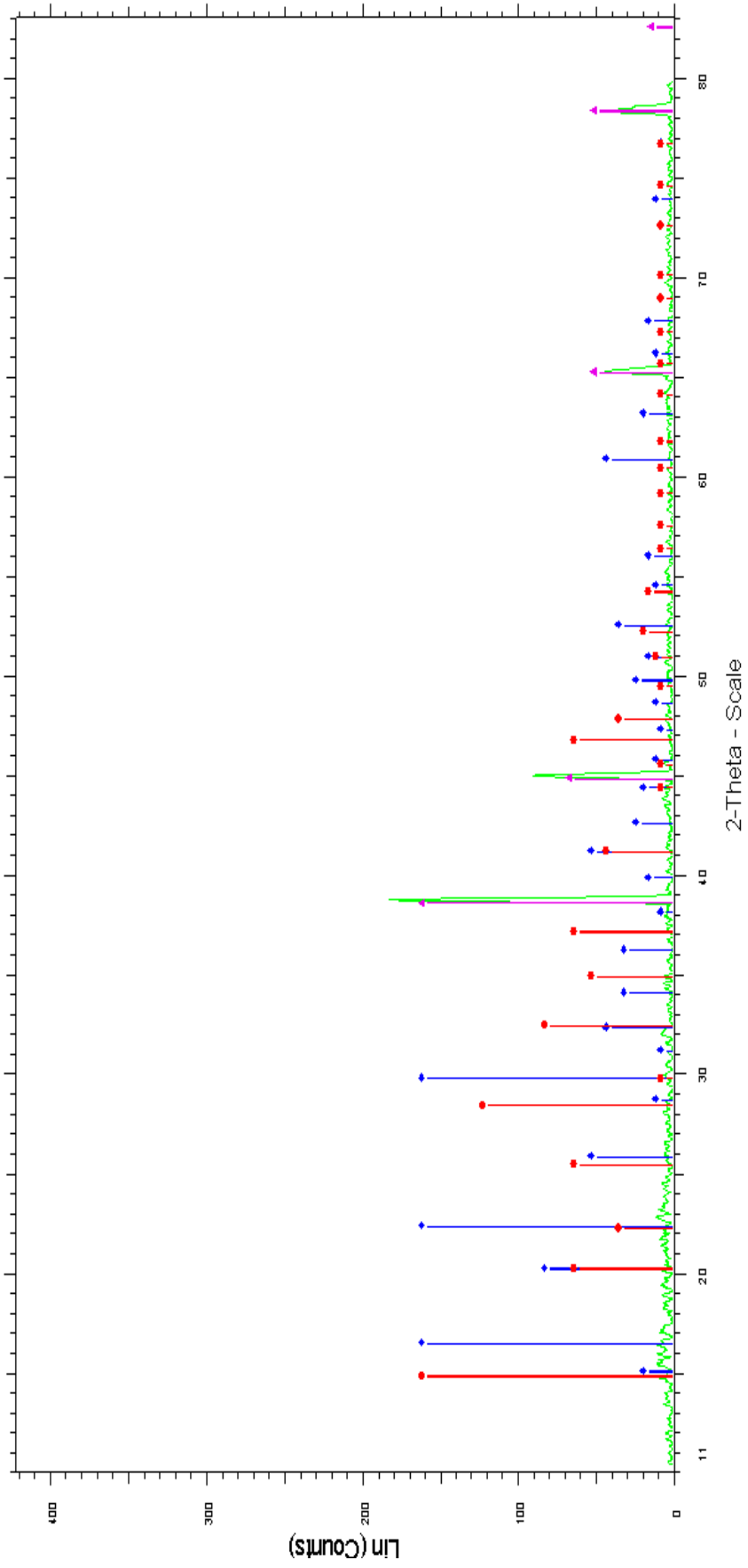


1245960946



รูปที่ 4.6 X-Ray pattern ของโลหะอะลูมิเนียม (Al powder)

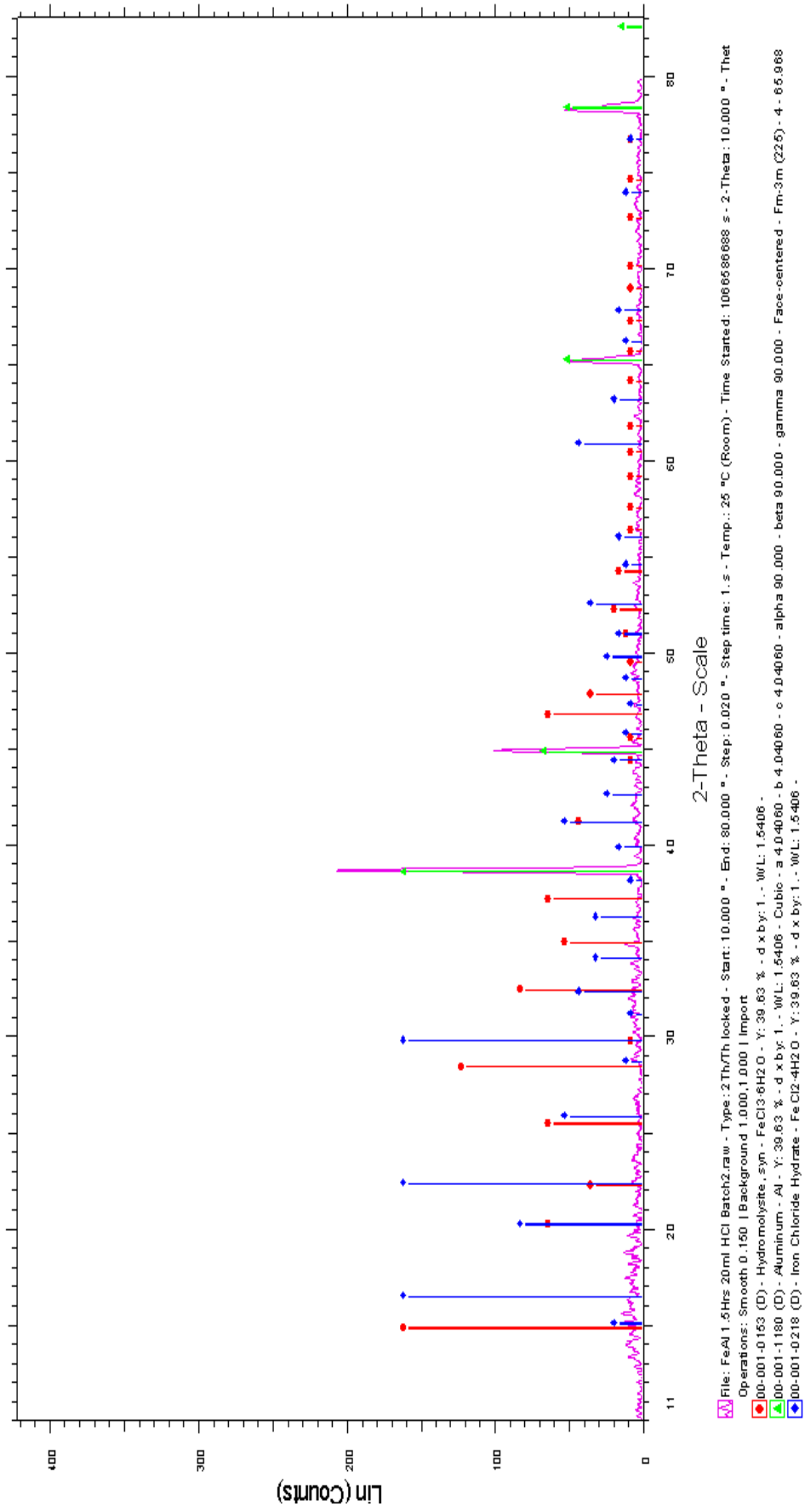
1245960946



File: FeAl 1.5Hrs 20ml HCl Batch1.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 1066683040 s - 2-Theta: 10.000 ° - Theta
Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000 | Import
00-001-0163 (D) - Hydromolysite.svm - FeCl3·6H2O - Y: 39.63 % - d x by: 1 - W/L: 1.5406 -
00-001-1180 (D) - Aluminum - Al - Y: 39.63 % - d x by: 1 - W/L: 1.5406 - Cubic - a 4.04060 - b 4.04060 - c 4.04060 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 65.968
00-001-0310 (M) - Iron Chloride Hexahydrate - FeCl3·6H2O - Y: 39.63 % - d x by: 1 - W/L: 1.5406

รูปที่ 4.7 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

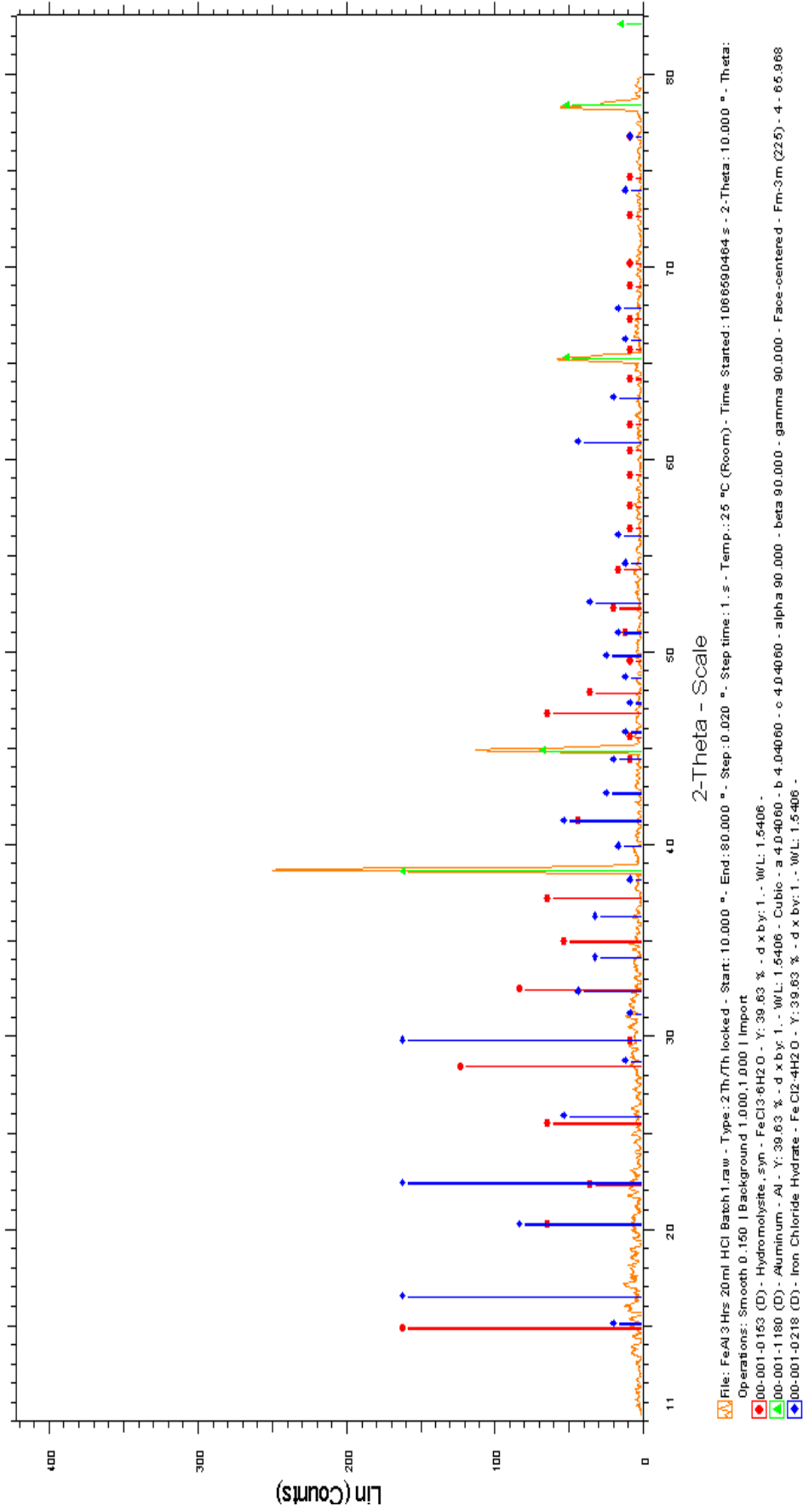
และ 0.4 M HCl Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.8 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.4 M HCl Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2

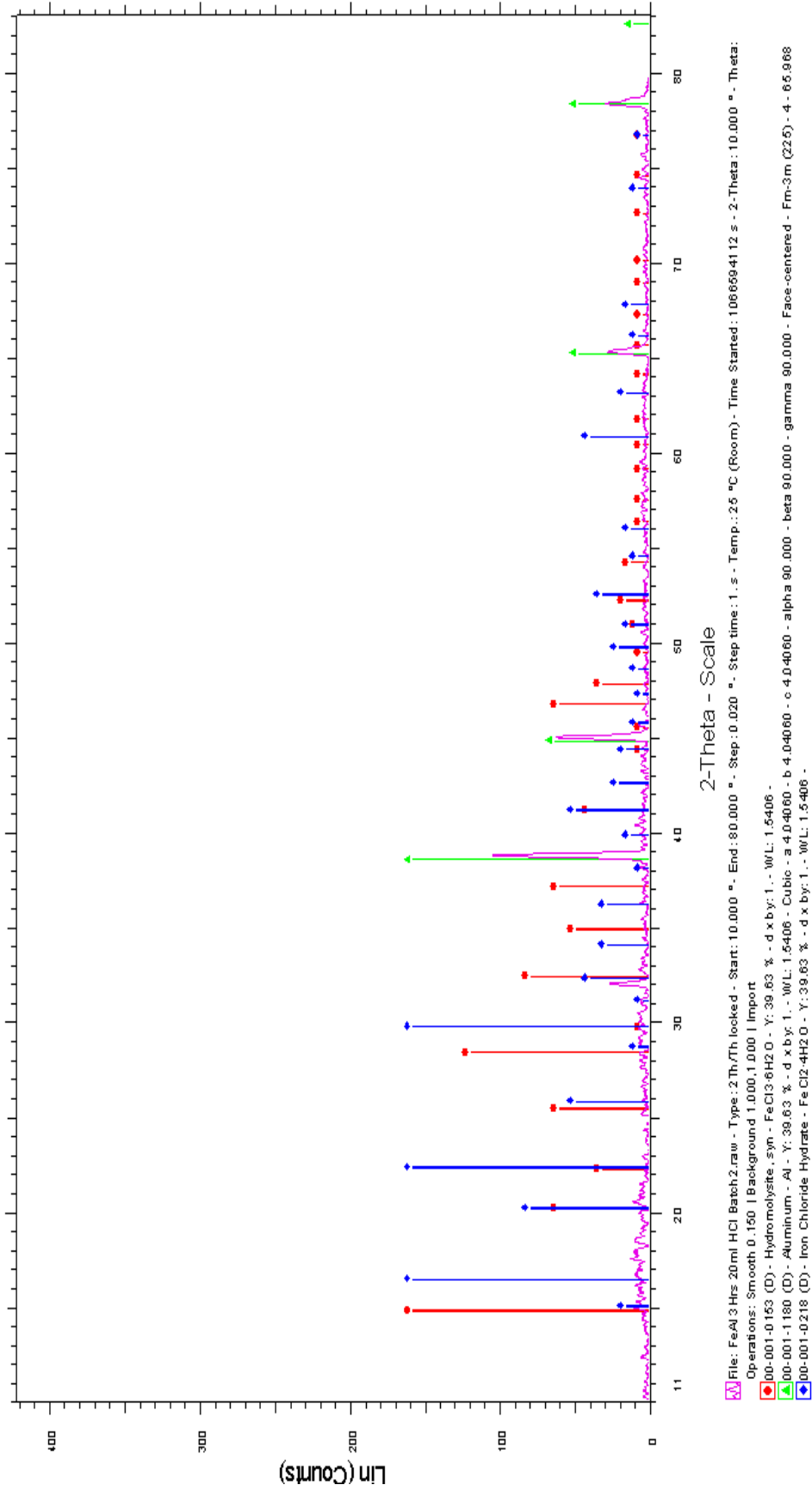
1245960946



รูปที่ 4.9 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.4 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1

1245960946



รูปที่ 4.10 X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.4 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2

กรดไฮโดรคลอริกที่มากเกินไปพอดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับโลหะอะลูมิเนียมแทนสารละลาย Fe^{2+} แต่อย่างไรก็ตาม HCl และ NaCl ที่เติมลงไปในปฏิกิริยามีความสำคัญในการมีส่วนช่วยทำให้ออนุภาคของเหล็ก (Ferrous) ดูดซับบนผิวของอะลูมิเนียมได้ดีขึ้น เนื่องจากโดยปกติแล้ว ที่บริเวณผิวของอะลูมิเนียมจะมีชั้นของออกไซด์ (Oxide layer) ปกคลุมอยู่ ออกไซด์เหล่านี้สามารถขัดขวางการดูดซับของอนุภาคของเหล็กในปฏิกิริยาได้ (M.Ito & K.Sukegawa, 2006) ดังนั้นการลดความเข้มข้นของกรดคือปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้การดูดซับของ Fe^{2+} เกิดได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.11 สารละลายของอนุภาคเหล็กที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง (บน) และผ่านการกรองแล้ว (ล่าง)

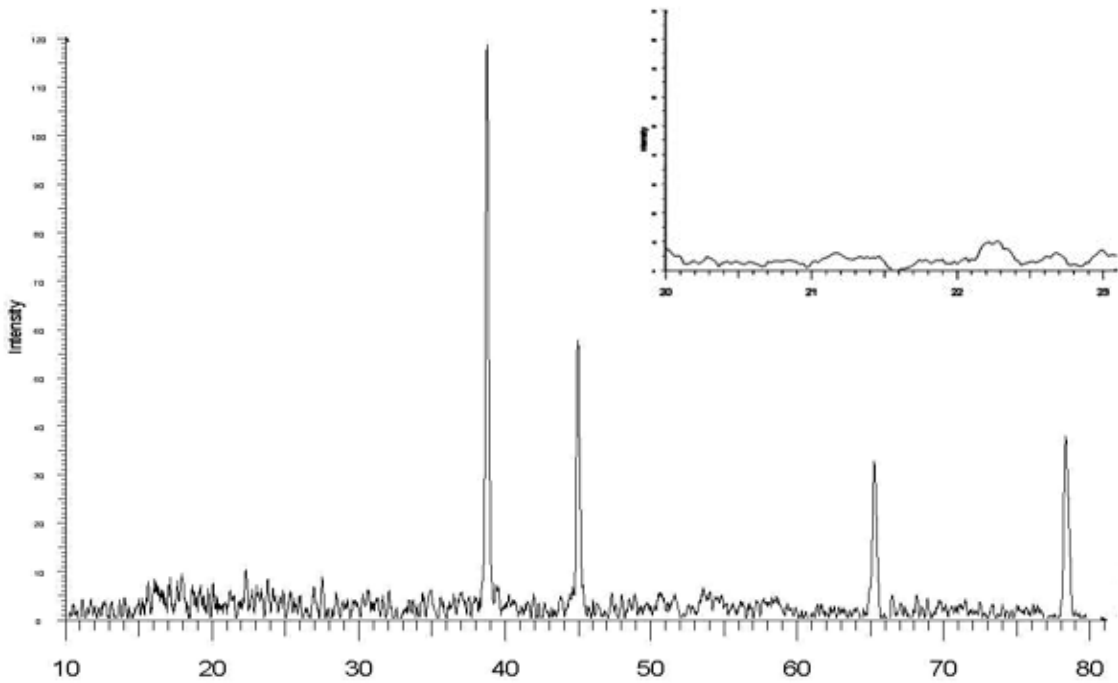
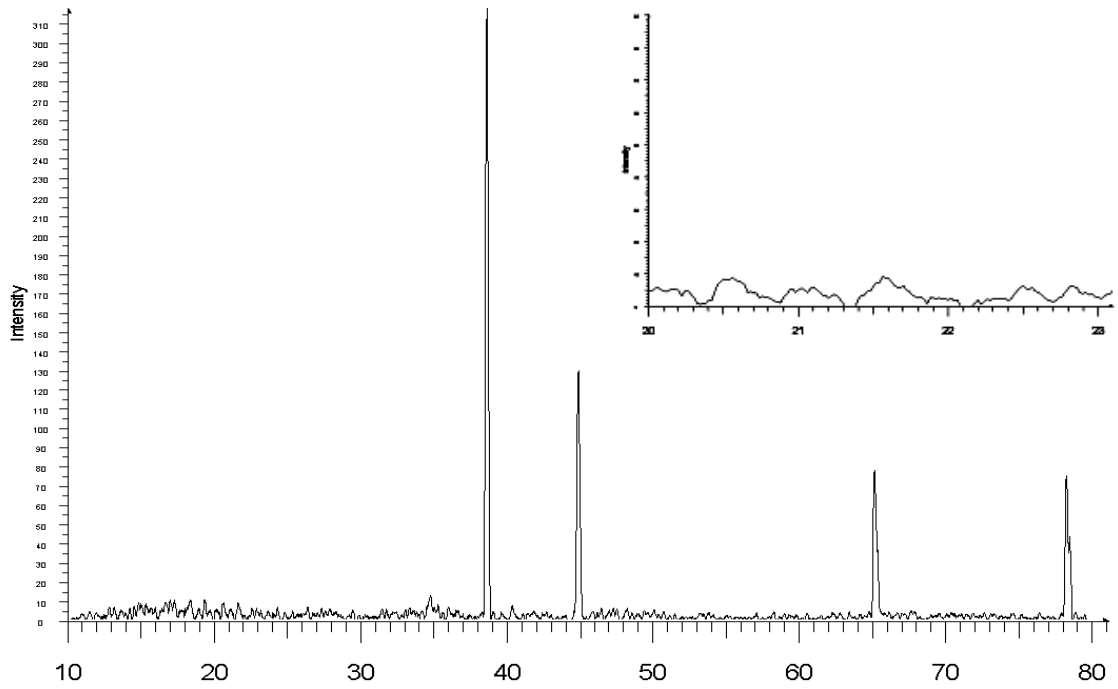
การทดลองที่สภาวะ 1 M $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1.5 และ 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES ปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมสามารถเกิดขึ้นได้ดี อีกทั้งยังเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) อย่างเห็นได้ชัด

เมื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยกรณีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 และ 3.0 ชั่วโมง มีค่าเป็น 7.4 และ 8.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การใช้ระยะเวลา 3.0 ชั่วโมง ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอนุภาคเหล็กดีกว่า 1.5 ชั่วโมง ดังนั้น จึงสรุปผลได้ว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม คือ 3.0 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง XRD ได้ X-ray pattern ของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมและ $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ แต่ในความเข้มข้นที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมน้อย เช่นเดียวกับกรณีที่ทำการทดลองที่สภาวะ 1 M $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.01 M HCl ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3.0 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) เช่นกัน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมที่สภาวะนี้เกิดขึ้นได้ไม่ตีมากนัก ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพียง 1.2 เปอร์เซ็นต์

ผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับความเข้ม (Intensity) พีคที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD ของอะลูมิเนียมที่ลดลงมีสหสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียม โดยการเปรียบเทียบความเข้มพีคของอะลูมิเนียม (Al powder) เพียงอย่างเดียว (Intensity = 320) กับความเข้มพีคของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Intensity = 120) เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะเห็นว่า ความเข้มพีคของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องมาจากเกิดการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียม ถ้าความเข้มพีคของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมลดลงมากเมื่อเทียบกับความเข้มพีคของอะลูมิเนียม แสดงว่าเกิดการดูดซับของอนุภาคเหล็กได้มาก ถ้าความเข้มพีคของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมลดลงน้อยเมื่อเทียบกับความเข้มพีคของอะลูมิเนียม แสดงว่าเกิดการดูดซับของอนุภาคเหล็กได้น้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบ X-ray pattern ระหว่างโลหะอะลูมิเนียม (Al powder) กับตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม ความเข้มพีคในช่วง 20-23 องศาสารประกอบของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.12





รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบ X-ray pattern ระหว่างโลหะอะลูมิเนียม (Al powder) กับตัวกลาง
ร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) ความเข้มฟิวด์ในช่วง 20-23



1245960946

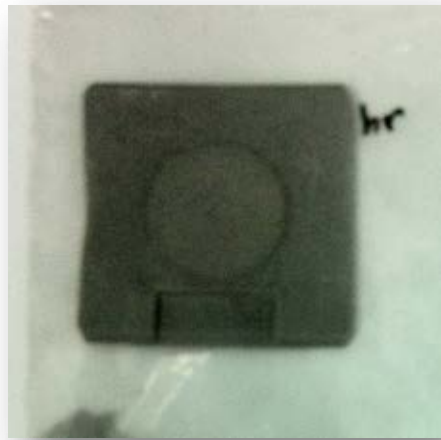
กล่าวโดยสรุป ในการทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Contact time) 1.5 และ 3.0 ชั่วโมง ปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมสามารถเกิดได้ดีเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปในปฏิกิริยา ส่งผลให้ Fe^{2+} บางส่วน เปลี่ยนฟอร์มไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่ยังไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ตัวดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

ในการทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.01 M HCl ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3.0 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมที่สภาวะนี้เกิดขึ้นได้ไม่ดีมากนัก

ในขณะที่การทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl เป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) อย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมที่สภาวะนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้ดีเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ



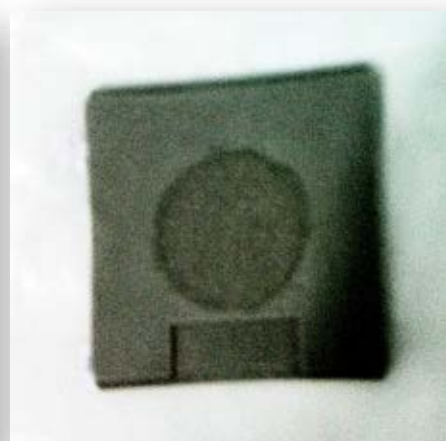
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ภายใต้สภาวะการทดลองแตกต่างกัน



รูปที่ 4.14 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6M NaCl และ 0.01 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง



(ก)

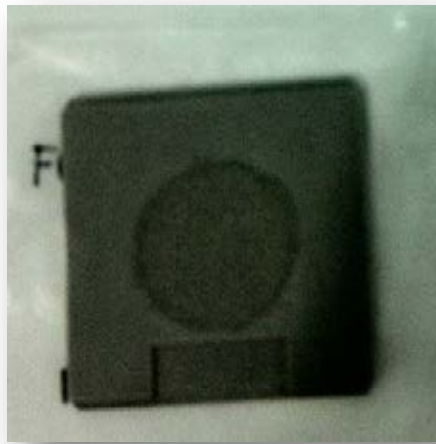


(ข)

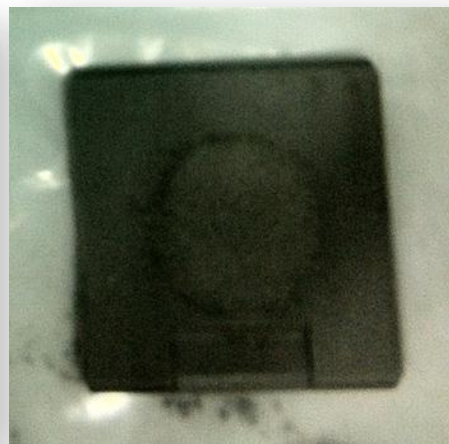
รูปที่ 4.15 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 1.5 ชั่วโมง

(ก) ชุดการทดลองที่ 1

(ข) ชุดการทดลองที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6M NaCl และ 0.04 M HCl, Contact time 3.0 ชั่วโมง

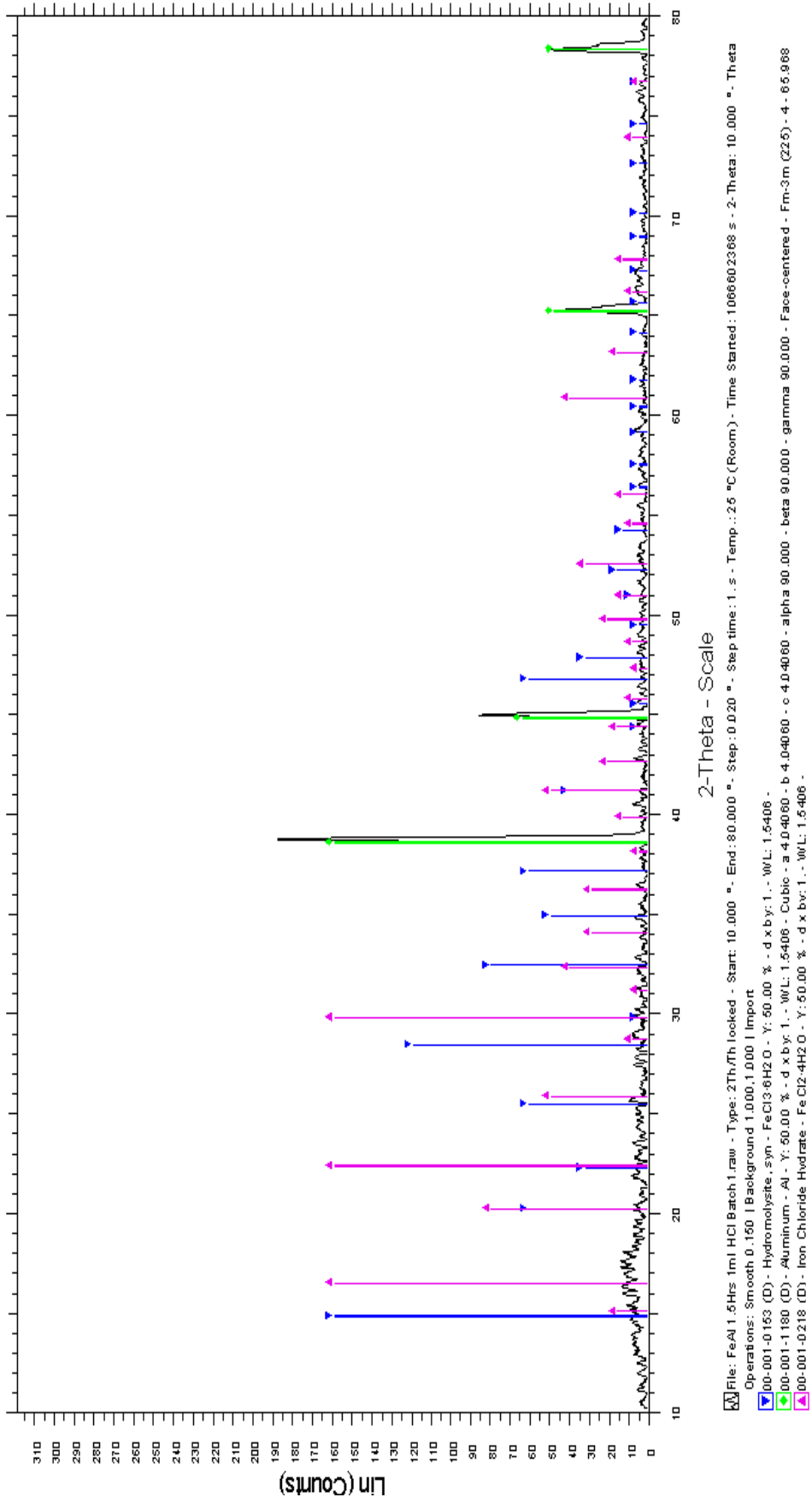
(ก) ชุดข้อมูลที่ 1

(ข) ชุดข้อมูลที่ 2



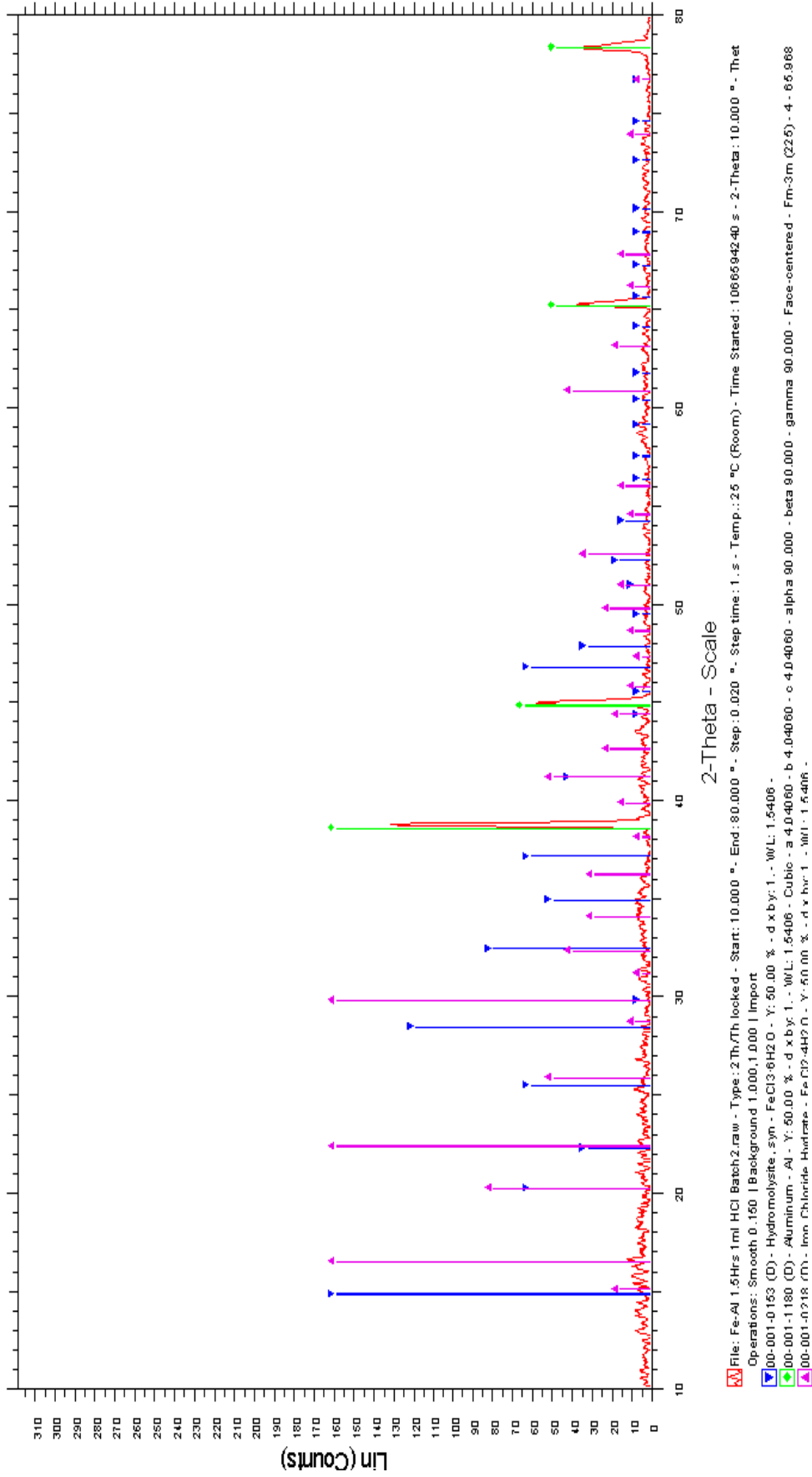
1245960946

1245960946



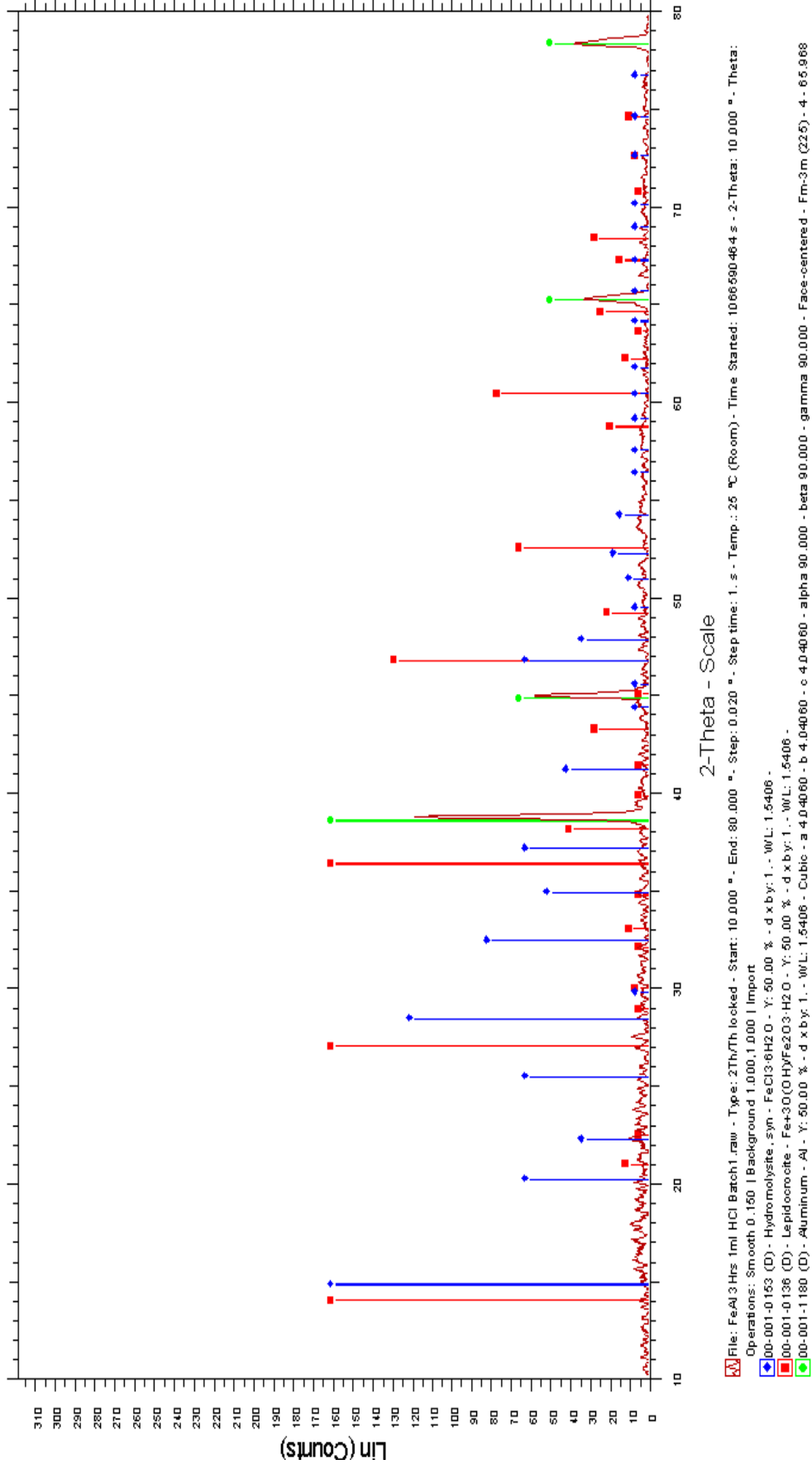
รูปที่ 4.17 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.04 M HCl Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1



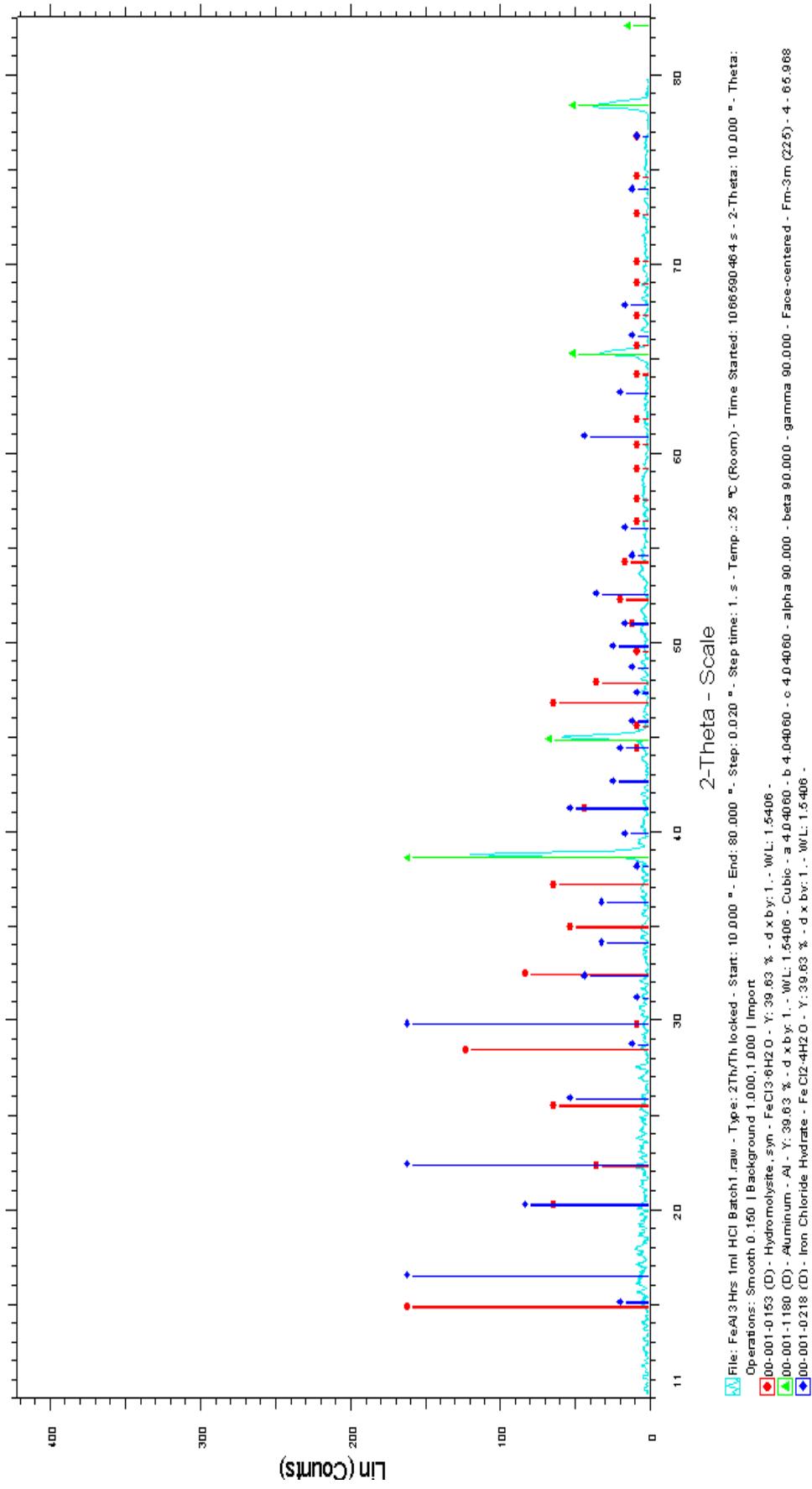
รูปที่ 4.18 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.04 M HCl Contact time 1.5 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2



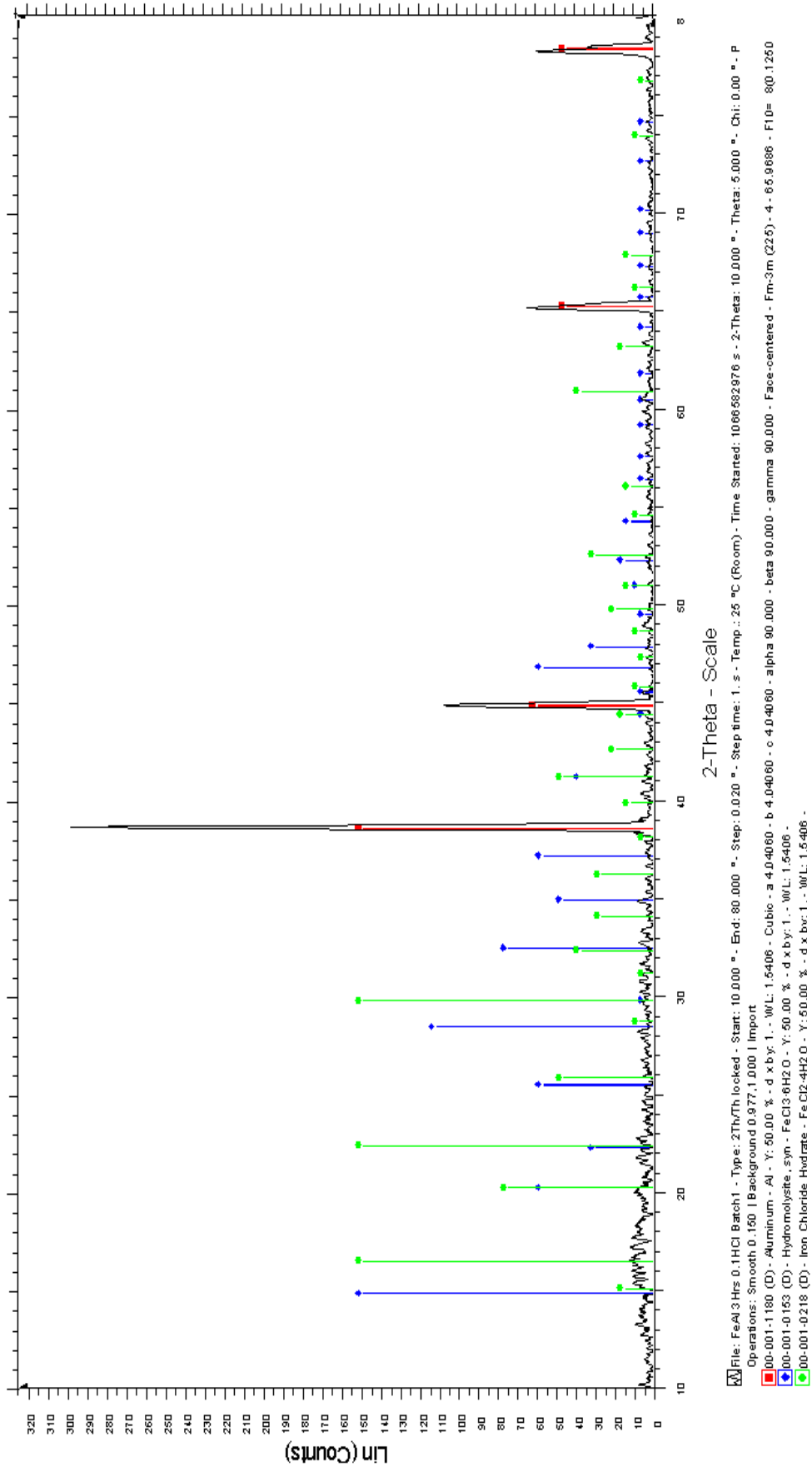
รูปที่ 4.19 X-Ray pattern ของตัวร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂.4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.04 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.20 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 MFeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.04 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2



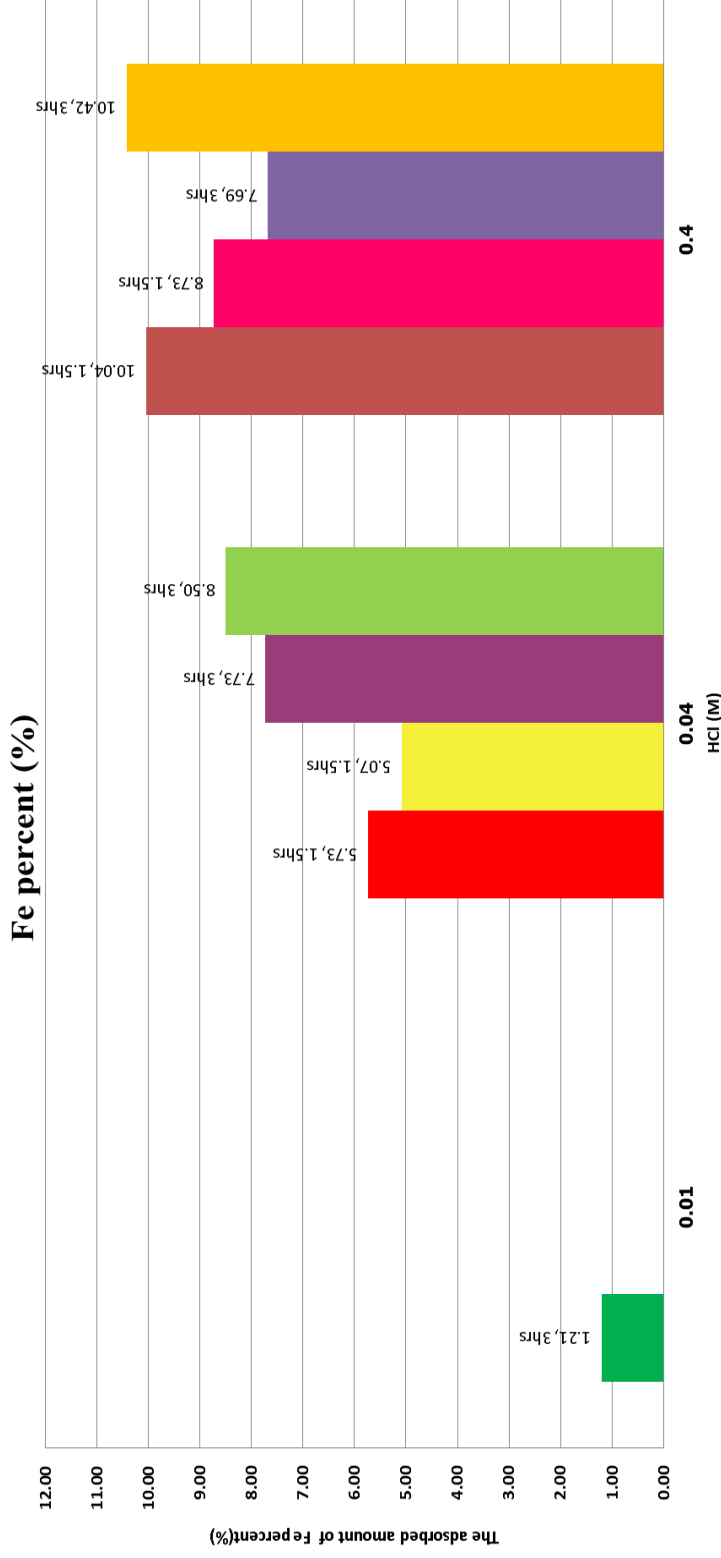
รูปที่ 4.21 X-Ray pattern ของตัวรวมเหล็ก/อะลูมิเนียมภายใต้สภาวะ 1 M FeCl₂·4H₂O, 1.6 M NaCl

และ 0.01 M HCl Contact time 3.0 ชั่วโมง



1245960946

The correlation between HCl (ml) and the adsorbed amounts of

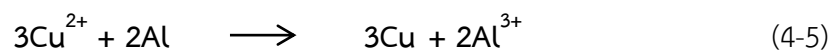


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (M) กับปริมาณการดูดซับของอนุภาค

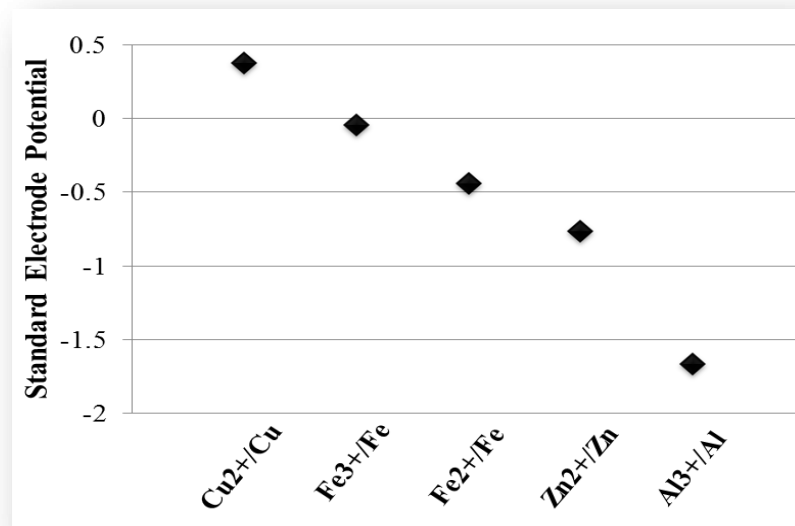
เหล็กบนผิวของโพลีอะลูมิเนียม (%)

4.2 การเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วม

กระบวนการซีเมนต์ชันเพื่อเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกรด (pH 3.65) โดยการเตรียมสารละลาย $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 g/L 50 ml ในขวดปริมาตร ปิเปตสารละลายที่เตรียมลงในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม 1 กรัม จากสถานะการทดลองที่เหมาะสมในขั้นตอนของการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม กรองสารด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.42) ก่อนการนำวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เมื่อพิจารณาศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard Electrode Potemntial, E^0) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการที่ 4-5

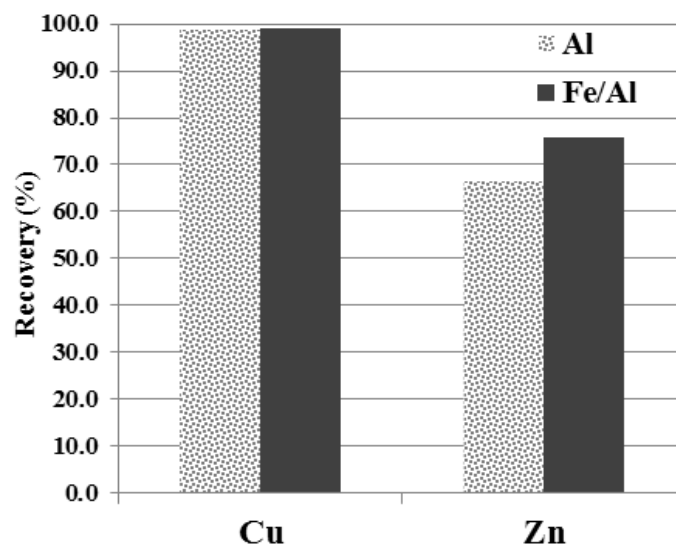


ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยการเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ได้ กับ ตัวกลางโลหะอะลูมิเนียม เพื่อตรวจสอบว่า การใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงได้หรือไม่ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES พบเปอร์เซ็นต์การเก็บกลับคืน มีค่าเป็น 99.1 และ 98.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่า อนุภาคเหล็กบนตัวกลางร่วมไม่มีผลต่อการเก็บกลับคืนของโลหะทองแดง เป็นเพียงตัวช่วยในการแยกตัวอย่างหลังจากกระบวนการเก็บกลับคืนเสร็จสิ้นแล้ว โดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก



รูปที่ 4.23 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard Electrode Potemntial, E^0) ของโลหะทองแดง เหล็ก สังกะสี และอะลูมิเนียม

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนชนิดของโลหะ จากโลหะทองแดง เป็นสังกะสี จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เมื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเก็บกลับคืนของโลหะสังกะสีของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมกับโลหะอะลูมิเนียม มีค่าเป็น 75.9 และ 66.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่ต่างกันนัก แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่ได้ทำการทดลองในขั้นต่อไป



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบปริมาณการเก็บกลับคืนของโลหะทองและสังกะสีเมื่อใช้โลหะอะลูมิเนียมและตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) ในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงผ่านกระบวนการซีเมนเตชัน ตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเด่นของโลหะสองชนิดร่วมกัน กล่าวคือความสามารถในการเป็นตัวรีดิวซ์ (ให้อิเลคตรอน) ที่ดีของโลหะอะลูมิเนียมและความเป็นแม่เหล็กที่ดีของเหล็ก ขั้นตอนของการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม และการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ขึ้น

ในขั้นตอนของการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม สภาวะเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวโลหะอะลูมิเนียมได้ดี คือ การสังเคราะห์ที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Contact time) 1.5 กับ 3.0 ชั่วโมง แล้ว เปรอร์เซ็นต์การดูดซับของอนุภาคเหล็กเฉลี่ยมีค่าเป็น 7.4 และ 8.2 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น การทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.04 M HCl ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3. ชั่วโมง จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวกลางร่วม Fe/Al อีกทั้งที่ยังไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) อย่างเห็นได้ชัด

เปอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยของอนุภาคเหล็กมีค่า 8.2 เปรอร์เซ็นต์ ในขณะที่การทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.4 M HCl การดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมสามารถเกิดได้ดีเช่นเดียวกัน เปรอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยของอนุภาคเหล็กที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 และ 3 ชั่วโมง มีค่าเป็น 9.4 และ 9.1 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปในปฏิกิริยา ส่งผลให้ Fe^{2+} บางส่วน เปลี่ยนฟอร์มไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เปลี่ยนจากสารละลายสีเขียวเป็นสารละลายสีน้ำตาลอมแดง ซึ่งเป็นสีของสารละลายที่เกิดจาก Ferric ไม่ตรงตามจุดประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้ และการทดลองที่สภาวะ 1 M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.6 M NaCl และ 0.01 M HCl ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3.0 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนฟอร์มของ Fe^{2+} ไปอยู่ในรูปของ Fe^{3+} ได้สารละลายสีเขียว (Green solution) แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาการดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมที่สภาวะนี้เกิดขึ้นได้ไม่ดีมากนัก เปรอร์เซ็นต์การดูดซับเฉลี่ยของอนุภาคเหล็กมีค่าเพียง 1.2 เปรอร์เซ็นต์ ด้วย



เหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้ทั้ง 2 สถานะนี้เป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ตัวดูดซับร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม

สำหรับขั้นตอนของการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงของตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ได้กับโลหะอะลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เปอร์เซ็นต์การเก็บกลับคืนของโลหะทองแดง มีค่าเป็น 99.1 และ 98.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ขึ้น อนุภาคของเหล็กที่มีอยู่ในตัวกลางร่วมไม่มีผลต่อการเก็บกลับคืนของโลหะทองแดงแต่อย่างใด เป็นเพียงตัวช่วยในการแยกตัวอย่างโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก หลังจากกระบวนการเก็บกลับคืนเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้อย่างนี้ ทั้งขั้นตอนของการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม (Fe/Al Co-substrate) และขั้นตอนการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงโดยใช้ตัวกลางร่วมที่สังเคราะห์ได้ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องกวนชนิดใช้สนามแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ในการทำปฏิกิริยาของสาร แต่คาดว่าหากใช้เครื่องเขย่า (Shaker) จะเหมาะสมมากกว่า

สามารถนำผลการศึกษานี้ไปปรับปรุงเพื่อเก็บกลับคืนโลหะทองแดงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในขั้นตอนของการการสังเคราะห์ตัวกลางร่วมเหล็ก/อะลูมิเนียม เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับของอนุภาคเหล็กบนผิวของโลหะอะลูมิเนียมมากยิ่งขึ้น

แนวทางในการศึกษาต่อของการทำวิจัยในครั้งนี้อย่างนี้คือ นำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับโลหะทองแดง ที่มีในน้ำเสียหรือของเสียชนิดอื่น ๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมหรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโลหะชนิดนั้น ๆ



รายการอ้างอิง

- ธีระศักดิ์ พงษ์พานาไกร. (2549). การจัดการของเสียอุตสาหกรรม. จาก www2.diw.go.th/km/ppt%5C4%20สค.49.pp
- เพ็ญศรี. (2552). เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า (4 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สำนักงานบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม. (2551). การจัดการของเสียอุตสาหกรรม. จาก www2.diw.go.th/iwmb/paper.asp
- อัญชูลี เลิศสงคราม. (2554). การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. 3(18), 17-22. จาก www.gpo.or.th/rdi/RDINEWSYR18No3?RDINewsYR18No3.pdf.com

ภาษาอังกฤษ

- Alluri , H. K., Ronda, S. R., Settalluri, V. S., Bondili, J. S., Suryanarayana, V., & Venkateshwar, P. (2007). Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. *African Journal of Biotechnology*, 6(25), 2924-2931.
- Alorro, R. D., Mitani, S., Hiroyoshi, N., Ito, M., & Tsunekawa, M. (2008). Recovery of heavy metals from MSW molten fly ash by carrier-in-pulp method: Fe powder as carrier. *Minerals Engineering*, 21(15), 1094-1101. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.005>
- Amin, N. K., El-Ashtouky, E. S. Z., & Abdelwahab, O. (2007). Rate of cadmium ions removal from dilute solutions by cementation on zinc using a rotating fixed bed reactor. *Hydrometallurgy*, 89(3-4), 224-232. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.07.007>
- Barbosa-Filho, O., & Monhemius, A. J. (1994). Iodide—thiocyanate leaching system for gold *Hydrometallurgy '94* (pp. 425-440): Springer Netherlands.
- Barbosa, O., & Monhemius, A. (1989). Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores. *Precious Metals'89*, 307-339.



1245960946

- Broadhurst, J. L., & du Perez, J. G. H. (1993). A thermodynamic study of the dissolution of gold in an acidic aqueous thiocyanate medium using iron (III) sulphate as an oxidant. *Hydrometallurgy*, 32(3), 317-344. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X\(93\)90045-F](http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X(93)90045-F)
- Demirkıran, N., & KÜNkÜL, A. (2011). Recovering of copper with metallic aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(12), 2778-2782. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61123-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61123-0)
- Djoudi, W., Aissani-Benissad, F., & Bourouina-Bacha, S. (2007). Optimization of copper cementation process by iron using central composite design experiments. *Chemical Engineering Journal*, 133(1-3), 1-6. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.033>
- Fouletier, Mathieu, Noual, & Winand. (1980). *Les applications de l'électrochimie à l'hydrométallurgie: Texte imprimé*. [S.l.].
- Guoxin, H., Zhengxia, X., Jianju, L., & Yanhong, L. (2009). Microstructure and corrosion resistance of simultaneous Al-Fe coating on copper by pack cementation. *Surface and Coatings Technology*, 203(22), 3392-3397. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.031>
- Karavasteva, M. (2005). Kinetics and deposit morphology of copper cementation onto zinc, iron and aluminium. *Hydrometallurgy*, 76(1-2), 149-152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.003>
- Karavasteva, M. (2009). The effect of nonylphenylpolyethylene glycol on the kinetics and morphology of silver cemented using zinc, iron, copper and aluminum. *Hydrometallurgy*, 95(3-4), 337-340. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.07.005>
- Kenna, C. C., Ritchie, I. M., & Singh, P. (1990). The cementation of gold by iron from cyanide solutions. *Hydrometallurgy*, 23(2-3), 263-279. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X\(90\)90009-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X(90)90009-Q)
- Kholmogorov, A. G., Kononova, O. N., Pashkov, G. L., & Kononov, Y. S. (2002). Thiocyanate solutions in gold technology. *Hydrometallurgy*, 64(1), 43-48. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00005-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00005-1)
- M.Ito, & K.Sukegawa. (2006). Preparation of Fe/Al composite for metals recovery. *Prof. of MMIJ spring meeting*, 179.
- Makhloufi, L., Saidani, B., & Hammache, H. (2000). Removal of lead ions from acidic aqueous solutions by cementation on iron. *Water Research*, 34(9), 2517-2524. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00405-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00405-4)



- Makhloufi, L. d. (1987). *Cémentation électrochimique de l'argent par le plomb en solution aqueuse concentrée de chlorure de sodium*. sn, sl. Available from <http://worldcat.org/z-wcorg/> database.
- Noubactep, C. (2010). Elemental metals for environmental remediation: Learning from cementation process. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 1170–1174. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.085>
- P.Pradthana. (2008). Adsorption Process. Retrieved from <http://pradthana.wordpress.com/author/pradthana/>
- Power, G., & Ritchie, I. (1976). A contribution to the theory of cementation (metal displacement) reactions. *Australian Journal of Chemistry*, 29(4), 699–709. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/CH9760699>
- Robertson, S., Jeffrey, M., Zhang, H., & Ho, E. (2005). An introductory electrochemical approach to studying hydrometallurgical reactions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 36(3), 313–325. doi: 10.1007/s11663-005-0061-9
- Saha, B., Chakraborty, S., & Das, G. (2008). A comparative metal ion adsorption study by trimesic acid coated alumina: A potent adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*, 323(1), 26–32. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.04.010>
- Sahoo, P. K., & Srinivasa Rao, K. (1982). Cementation of copper from complex sulphide leach liquor. *Hydrometallurgy*, 8(3), 223–229. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X\(82\)90002-0](http://dx.doi.org/10.1016/0304-386X(82)90002-0)
- Wang, Z., Chen, D., & Chen, L. (2007). Gold cementation from thiocyanate solutions by iron powder. *Minerals Engineering*, 20(6), 581–590. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2006.12.009>
- Yang, B., Deng, S., Yu, G., Zhang, H., Wu, J., & Zhuo, Q. (2011). Bimetallic Pd/Al particles for highly efficient hydrodechlorination of 2-chlorobiphenyl in acidic aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1–2), 76–83. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.001>



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ศักย์มาตรฐานของสสารละลายในน้ำที่ 25 °C และศักย์ฟอร์มอล เทียบกับ SHE

(เพ็ญศรี ทองนพเก้า, 2552)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์มาตรฐาน E° (V)	ศักย์ฟอร์มอล E°' (V)
$F_2(g) + 2H^+ + 2e^- = 2HF$	3.06	
$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	2.07	
$S_2O_8^{2-} + 2e^- = 2SO_4^{2-}$	2.01	
$Ag_2 + e^- = Ag^+$	2.00	
$Co^{3+} + e^- = Co^{2+}$	1.84	
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	1.77	
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- = MnO_2(s) + 2H_2O$	1.70	
$Ce^{4+} + e^- = Ce^{3+} (1 M HClO_4)$	1.70	1.44, 1F H ₂ SO ₄ ; 1.28, 1F HCl
$Ce^{4+} + e^- = Ce^{3+}$	1.61	
$H_5IO_6 + H^+ + 2e^- = IO_3^- + 3H_2O$	1.60	
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e^- = 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59	
$2BrO_3^- + 12H^+ + 10e^- = Br_2 + 6H_2O$	1.52	
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- = Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51	
$PbO_2 + 2H^+ + 2e^- = Pb^{2+} + 2H_2O$	1.455	
$Cl_2 + 2e^- = 2Cl^-$	1.36	
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- = 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33	
$Tl^{3+} + 2e^- = Tl^+$	1.28	0.77, F HCl
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23	1.24, 1F HClO ₄
$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	1.229	
$2IO_3^- + 12H^+ + 10e^- = I_2 + 6H_2O$	1.20	
$3Br_2(l) + 2e^- = 2Br_3^-$	1.096	
$2ICl_2 + 2e^- = I_2 + 4Cl^-$	1.06	
$VO_2^+ + 2H^+ + e^- = VO^{2+} + H_2O$	1.00	1.02, 1F HCl, HClO ₄
$HNO_2 + H^+ + e^- = NO(g) + H_2O$	1.00	
$NO_3^- + 3H^+ + 2e^- = HNO_2 + H_2O$	0.94	0.92, 1F HNO ₃
$2Hg^{2+} + 2e^- = Hg_2^{2+}$	0.92	0.907, 1F HClO ₄



1245960946

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์มาตรฐาน	ศักย์ฟอร์มอล
	E° (V)	
$\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- + \text{e}^- = \text{CuI}$	0.86	
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	0.799	0.228, 1F HCl; 0.792, 1F HClO ₄
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- = 2\text{Hg}$	0.789	0.776, 1F HClO ₄ ; 0.674, 1F H ₂ SO ₄
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	0.771	0.700, 1F HCl; 0.68 1F H ₂ SO ₄
$\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2(\text{quinone}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_4(\text{OH})_2$	0.699	
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2$	0.695	
$2\text{HgCl}_2 + 2\text{e}^- = \text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{Cl}^-$	0.63	
$\text{Hg}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- = 2\text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$	0.615	
$\text{Sb}_2\text{O}_5 + 6\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{SbO}^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	0.581	
$\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{HAsO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0.559	0.577, 1F HCl, HClO ₄
$\text{I}_3^- + 2\text{e}^- = 3\text{I}^-$	0.536	
$\text{I}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{I}^-$	0.5355	
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- = \text{Cu}$	0.521	
$\text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = \text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.45	
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + \text{e}^- = \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36	0.71, 1F HCl; 0.72, 1F HClO ₄
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	0.337	
$\text{VO}^{2+} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{V}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.337	
$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.334	
$\text{BiO}^+ + 2\text{H}^+ + 3\text{e}^- = \text{Bi} + \text{H}_2\text{O}$	0.32	
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	0.268	0.242 sat'd KCl; 0.334, 0.1F KCl
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- = \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.222	0.228 1F KCl
$\text{SbO}^+ + 2\text{H}^+ + 3\text{e}^- = \text{Sb} + \text{H}_2\text{O}$	0.212	
$\text{CuCl}_3^{2-} + \text{e}^- = \text{Cu} + 3\text{Cl}^-$	0.178	
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0.17	
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- = \text{Cu}^+$	0.153	
$\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- = \text{Sn}^{2+}$	0.151	0.14, 1F HCl
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{S}(\text{g})$	0.141	
$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.10	0.04, 1F H ₂ SO ₄
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- = 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.08	



1245960946

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์มาตรฐาน E° (V)	ศักย์ฟอร์มอล $E^{o'}$ (V)
$\text{AgBr}(s) + e^- = \text{Ag} + \text{Br}^-$	0.0713	
$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2(g)$	0.0000	-0.005, 1F HCl, HClO_4
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126	-0.14, 1F HClO_4 ; -0.29, 1F H_2SO_4
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.136	-0.16, 1F HClO_4
$\text{AgI}(s) + e^- = \text{Ag} + \text{I}^-$	-0.151	
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.25	
$\text{V}^{3+} + e^- = \text{V}^{2+}$	-0.255	-0.21, 1F HClO_4
$\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$	-0.277	
$\text{Ag}(\text{CN})_2^- + e^- = \text{Ag} + 2\text{CN}^-$	-0.31	
$\text{PbSO}_4(s) + 2e^- = \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0.356	
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403	
$\text{Cr}^{3+} + e^- = \text{Cr}^{2+}$	-0.41	
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440	
$2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + e^- = \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-0.49	
$\text{H}_3\text{PO}_3 + 2\text{H}^+ + e^- = \text{H}_3\text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-0.499	
$\text{U}^{4+} + e^- = \text{U}^{3+}$	-0.607	
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.763	
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- = \text{Cr}$	-0.913	
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- = \text{Mn}$	-1.18	
$\text{Zr}^{4+} + 4e^- = \text{Zr}$	-1.539	
$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.66	
$\text{Th}^{4+} + 4e^- = \text{Th}$	-1.899	
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.37	
$\text{La}^{3+} + 2e^- = \text{La}$	-2.522	
$\text{Na}^+ + 2e^- = \text{Na}$	-2.714	
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- = \text{Ca}$	-2.87	
$\text{Sr}^{2+} + 2e^- = \text{Sr}$	-2.9	
$\text{K}^+ + 2e^- = \text{K}$	-2.925	
$\text{Li}^+ + 2e^- = \text{Li}$	-3.045	



ภาคผนวก ข

1. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical analysis)

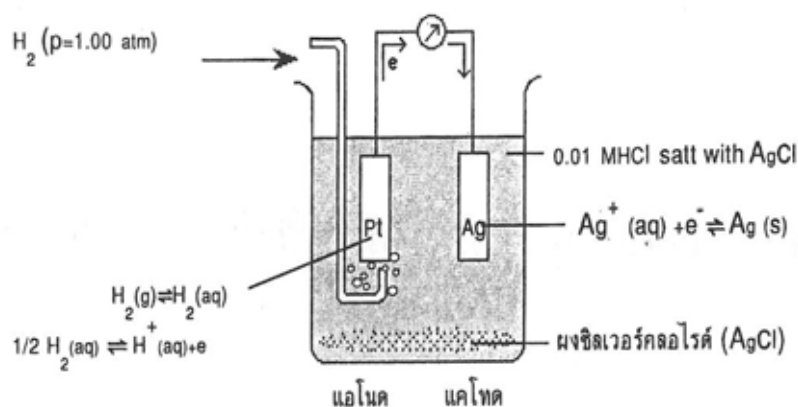
การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพแก้ว, 2552) ประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อยที่สุด 3 ส่วน คือ ส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถนำกระแสได้ ส่วนของขั้วไฟฟ้า (electrode) ซึ่งเป็นตัวนำที่ต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์การวัดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และส่วนสุดท้าย คือ อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นศักย์หรือกระแส

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน ดังรูปที่ 2.8 หรือต่างกัน ดังรูปที่ 2.9 ก็ได้ ขั้วไฟฟ้า 1 ขั้วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นเพียงครึ่งเซลล์ (half-cell) ของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ แต่ครึ่งเซลล์ต้องเกิดปฏิกิริยารับหรือคายอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำในการรับหรือส่งอิเล็กตรอนนั้น เพื่อให้รู้ถึงหน้าที่ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น (คายอิเล็กตรอน) เรียกเป็น ขั้วแอโนด และขั้วไฟฟ้าของอีกครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นเป็น ขั้วแคโทด

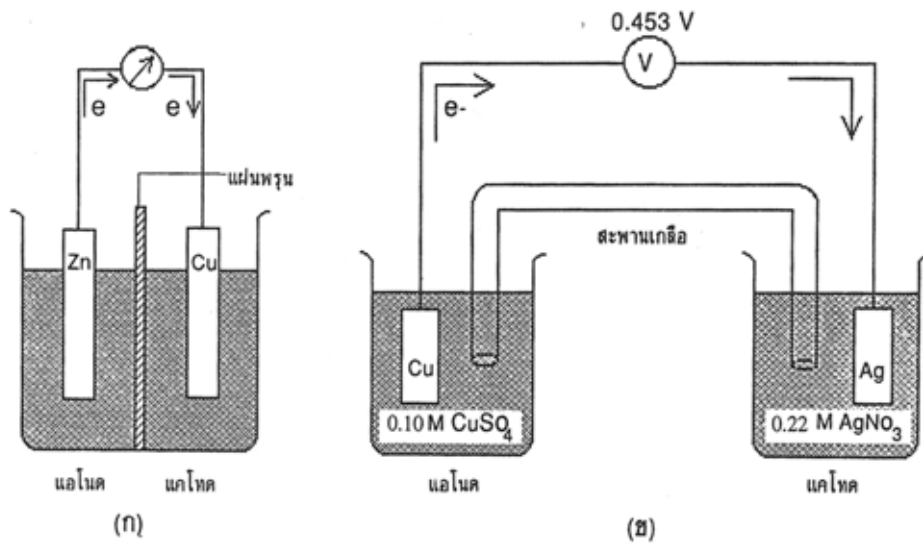
ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพแก้ว, 2552)



การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยมีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเก้า, 2552)

- (ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุณ
(ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ

รูปที่ 2.9 เป็นการจัดเซลล์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เรียกว่า การจัดเซลล์เคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cells with liquid junction) แต่ละขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เหมือนกัน โดยอาจจะต่างกันที่ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือที่ความเข้มข้น หรือต่างทั้งชนิดและความเข้มข้นของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์ การแยกแต่ละครึ่งเซลล์ออกจากกันสามารถทำได้หลายวิธี ที่ยกตัวอย่างในรูป 2.9 (ก) เป็นการใช่วัสดุพรุณ เช่น โยแก้ว และรูปที่ 2.2 (ข) เป็นการแยกภาชนะของแต่ละครึ่งเซลล์ และเชื่อมด้วยแท่งแก้วบรรจุสารละลายเข้มข้น เช่น KCl (โพแทสเซียมคลอไรด์) แท่งแก้วนี้เรียกว่า สะพานเกลือ การแยกสารละลายด้วยสะพานเกลือในเชิงวิเคราะห์มีข้อดีกว่าการใช่วัสดุโยแก้ว เพราะช่วยลดค่าศักย์ที่รอยต่อสารละลายได้

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์แกลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

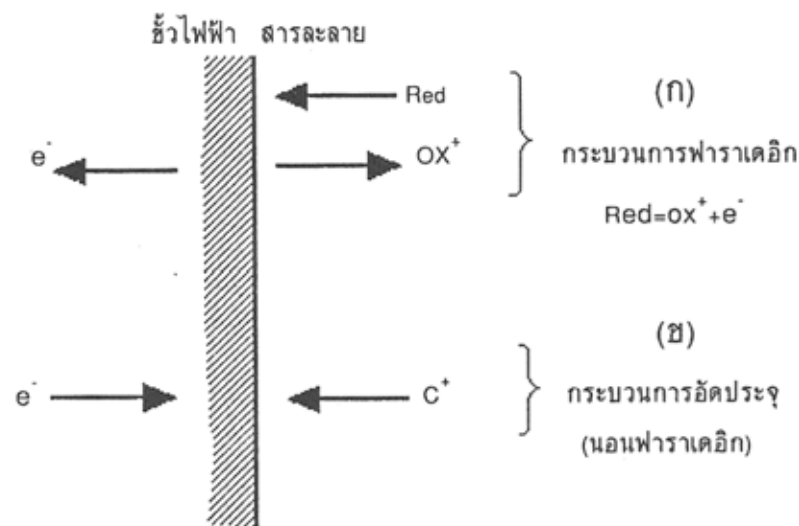
เซลล์แกลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ซึ่งทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ในทางการค้าตัวอย่างของเซลล์แกลวานิก คือ แบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น สำหรับการใชเซลล์แกลวานิกในการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุล (equilibrium constant) ของปฏิกิริยาที่เซลล์

เซลล์อิเล็กโทรไลต์ เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็น

การแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์อะลูมิเนียม การเกาะของโลหะเงินหรือทองบนขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ในด้านการวิเคราะห์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น

1.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ไม่ว่าอ็อนของสารอิเล็กโทรไลต์ จะถูกนำพาจากสารละลายมายังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ด้วยกลไกที่ได้กล่าวมาแล้วก็ตาม กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ตรงผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวาลละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปได้ในอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนี้คือ

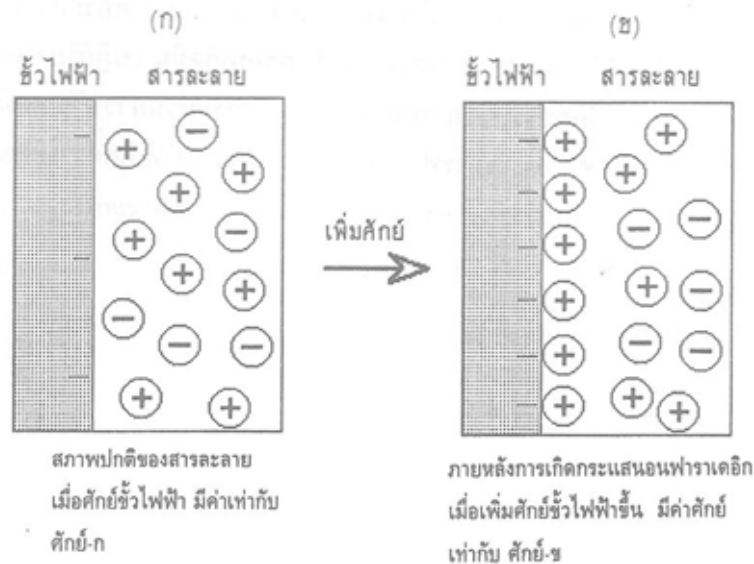


รูปแบบแสดงกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพแก้ว, 2552)

ถ้าอ็อนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลาย กับผิวหน้าขั้วไฟฟ้า และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า “กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process)” ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการฟาราเดอิกที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้ เรียกว่าเกิด กระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

ถ้าอ็อนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงบริเวณรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่เป็นเพียงชั่วขณะเดียวที่ไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า “กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic process)” กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic current)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นอยู่กับสถานะของการวิเคราะห์ว่า มีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้า ดังในรูปที่ 2.11



ตัวอย่างการอัดกระแสไฟฟ้าในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเก้า, 2552)

เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งสมมติให้เท่ากับ $-ก$ เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติการปรับสมดุลของไอออนในสารละลายทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลาย และที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลายมาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆในสารละลายมีการกระจายตัวสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.7 (ข) สมมติให้เท่ากับศักย์ $-ข$ ซึ่งมีความมากกว่า $-ก$ จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสถานะที่เหมาะสมพอจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการที่เปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้ โดย

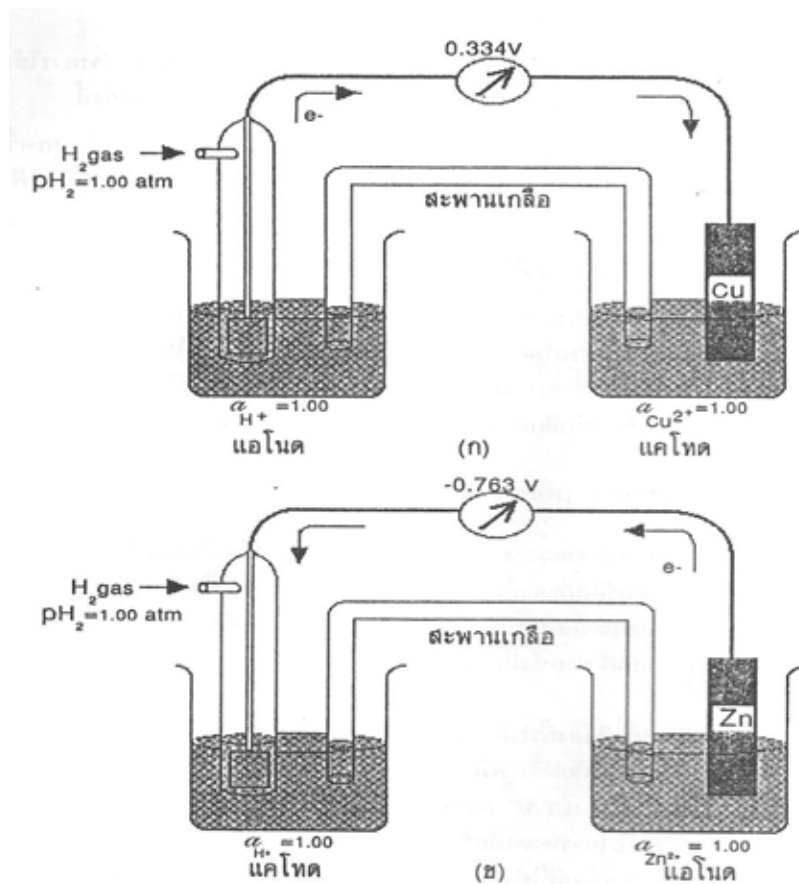
1. ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้
2. ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่ถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารตีโพลาริเซอร์ และขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วตีโพลาริซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรถ่ายต่อเนื่องและสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจรถ่าย บ่งบอกถึงการดำเนินไปของกระบวนการฟาราเดอิกของขั้วไฟฟ้า ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของวงจรถ่ายขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยาการรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชัน ขั้วไฟฟ้าถูกโพลาริซ์ทำให้กระแสในวงจรถ่ายลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไปจำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรถ่ายนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรถ่ายนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential or overvoltage)

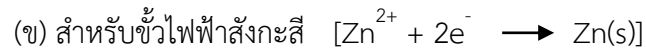
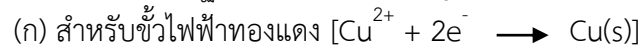
1.2 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential, E)

ค่าศักย์ไฟฟ้าของวงจรถ่ายเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆเป็นค่าศักย์สัมพันธ์ซึ่งนำมาหาค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ต่อเมื่อรู้ศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหรือเมื่อศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงอาจกำหนดเป็นค่าจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ว่า ค่าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

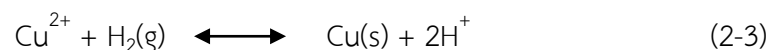
การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้อย่างชัดเจน ก็เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าในความหมายเดียวกันโดยสัญลักษณ์ของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าที่ตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า ในวงจรถ่ายเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ค่าผลลัพท์ศักย์ของวงจรถ่ายถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ที่ได้ ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรถ่ายเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบแกลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกัน ถ้าผลลัพท์ศักย์ของวงจรถ่ายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์กลับทำหน้าที่เป็นแอโนด



นิยามของค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพแก้ว, 2552)

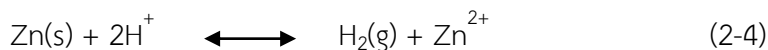


เปรียบเทียบตัวอย่างเซลล์เคมีไฟฟ้าในรูปที่ 2.12 (ก) กับรูปที่ 2.12 (ข) ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ในรูปที่ 2.12 (ก) คือแท่งทองแดงจุ่มอยู่ในสารละลาย Cu^{2+} มีแอคติวิตีเท่ากับ 1.00 ผลลัพธ์ศักย์ของวงจรมหาหน้าปัดมีค่าเท่ากับ 0.334 V ซึ่งอธิบายได้ว่า ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่เป็นแท่งทองแดงมีค่า +0.334 V เทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจน (SHE) โดยแท่งทองแดงทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยารวมของเซลล์เขียนได้ดังนี้



ผลลัพธ์ศักย์บนหน้าปัดของวงจรมหาหน้าปัดในรูปที่ 2.12 (ข) ซึ่งที่แท่งสังกะสีเป็นขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์กลับเป็น -0.763 V ซึ่งหมายความว่า ศักย์ขั้วไฟฟ้าของแท่งสังกะสีเท่ากับ -0.763 V เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจน (SHE) โดยแท่งสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดของเซลล์กัลวานิก (หรือถ้าต้องการให้แท่งสังกะสี ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด จำเป็นต้องให้พลังงานไฟฟ้า

จากภายนอกให้มีความศักย์มากกว่า -0.763 V และเซลล์เป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์) ปฏิกิริยาของเซลล์เขียนได้ดังนี้



จากตัวอย่างศักย์ขั้วไฟฟ้าของแท่งทองแดง และแท่งสังกะสี เขียนเรียงลำดับได้ดังนี้

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์	ศักย์ขั้วไฟฟ้า
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu(s)}$	+0.334
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0.000
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn(s)}$	-0.763

ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่แสดง บอกให้รู้ถึงความแรงของไอออนในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอน(ออกซิไดซ์เอเจนต์) ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้เป็น $\text{Cu}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Zn}^{2+}$

การเรียงลำดับเปรียบเทียบศักย์ขั้วไฟฟ้าได้นี้ เพราะสารละลายของทุกครึ่งเซลล์ในรูปที่ 2.12 (ก) และรูปที่ 2.12 (ข) มีแอคติวิตีของไอออนเท่ากับหนึ่งเหมือนกันหมด ในที่นี้อาจกล่าวได้ว่า ศักย์ขั้วไฟฟ้าแท่งทองแดงและแท่งสังกะสีเป็นศักย์มาตรฐานของแต่ละขั้วไฟฟ้า(Standard electrode potential) ถ้าแอคติวิตีของไอออนของแต่ละครึ่งเซลล์ข้างต้นไม่เท่ากัน และไม่เท่ากับหนึ่ง ศักย์ที่ได้ย่อมแปรเปลี่ยนไปจากนี้ และเป็นไปตามสมการเนิร์นสต์ (Nernst Equation)

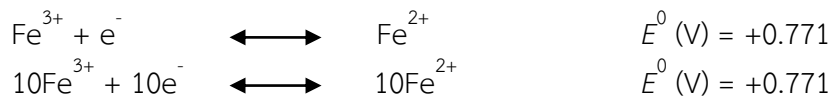


1.3 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard electrode potential, E^0)

ถ้าขั้วไฟฟ้าหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วไฮโดรเจน และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์จุ่มอยู่ มีแอคติวิตีเป็นหนึ่ง ศักย์เซลล์ของวงจร ถือได้ว่าเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือ ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต่างๆที่หาได้ด้วยวิธีนี้ มีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกัน และเทียบไปถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์จากสถานะที่แอคติวิตีเป็นหนึ่งไปสู่สถานะที่แอคติวิตีสอดคล้อง เมื่อเทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ E^0

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าหนึ่งของวงจรต้องเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนเสมอ
2. ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์จึงอาจถือเป็นศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (relative reduction potential)
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า เป็นตัวเลขที่ไม่ผันแปรไปตามจำนวนโมลที่ใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์



การปรับสมดุลของปฏิกิริยา ไม่ทำให้ค่า E^0 เปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้การแสดงสมการเนิสต์ต่างกันโดยกรณีแรก สมการเนิสต์เขียนเป็น

$$E = 0.771 - \frac{0.0592}{1} \log \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Fe}^{3+}]}$$

ส่วนกรณีหลัง การแสดงสมการเนิสต์เป็น

$$E = 0.771 - \frac{0.0592}{1} \log \frac{[\text{Fe}^{2+}]^{10}}{[\text{Fe}^{3+}]^{10}}$$

แม้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยสมการเนิสต์เหมือนกัน การแสดงค่าของ E^0 ต้องบ่งบอกอุณหภูมิด้วยเสมอ

4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าแปรตามอุณหภูมิ การแสดงค่าของ E^0 ต้องบ่งบอกอุณหภูมิด้วยเสมอ



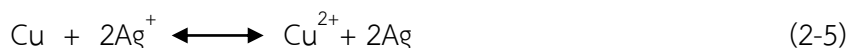
1245960946

5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ประกอบด้วยตัวเลขที่กำกับด้วยเครื่องหมายบวกหรือลบ ทั้งค่าของตัวเลขและเครื่องหมายต่างแสดงความหมายของศักย์มาตรฐานที่ต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก แสดงถึงความสม่าเสมอของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ครึ่งเซลล์ เมื่อเทียบกับครึ่งเซลล์ที่มีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกันเครื่องหมายลบ บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของครึ่งเซลล์ และขั้วไฟฟ้าที่ศึกษา ทำหน้าที่เป็นแอโนด

ปฏิกิริยา	E° ที่ 25° ซ, V
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+ 1.510
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+ 1.359
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s})$	+ 0.799
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+ 0.771
$\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{I}^-$	+ 0.536
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	+ 0.337
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^-$	+ 0.222
$\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	+ 0.017
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0.000
$\text{AgI}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{I}^-$	- 0.151
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{s})$	- 0.403
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{s})$	- 0.763

ตัวอย่างศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า

สำหรับค่าตัวเลขของศักย์มาตรฐาน บอกความหมายของความแรงการเกิดปฏิกิริยาที่ครึ่งเซลล์ (เทียบในเครื่องหมายที่เหมือนกัน) ดูจากตารางที่ 3 เปรียบเทียบระหว่างค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ที่ครึ่งเซลล์ประกอบด้วยไอออนซิลเวอร์(Ag^+) กับที่ครึ่งเซลล์ประกอบด้วยไอออนคอปเปอร์(Cu^{2+}) ซึ่งแสดงค่า E° ตามตารางเท่ากับ +0.799 V และ +0.337 V ตามลำดับอธิบายได้ว่า Ag^+ มีความหมายในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า Cu^{2+} ถ้าจุ่มแท่งโลหะทองแดง (Cu) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลงในสารละลายของไอออนซิลเวอร์ ย่อมเกิดการพอกพูนของโลหะเงินบนแท่งทองแดง ดังสมการ



แต่ถ้ากลับกัน โดยจุ่มแท่งโลหะเงินลงในสารละลายของไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ไม่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ Cu^{2+} มีความแรงของการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า Ag^+ เป็นต้น

2. การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

โลหะหนักที่พบจากกระบวนการกำจัดของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปของสารละลาย การกำจัดโลหะหนักเหล่านี้จำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกของแข็ง โดยการให้อิออนประจุบวกและลบรวมกันเป็นตะกอนของของแข็ง จากนั้นทำให้ผลึกของของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำหรือของเสียชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือวิธีการกรอง

โลหะหนักที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม ฯลฯ การตกตะกอนของโลหะหนักอาจตกตะกอนผลึกร่วมกับอิออนประจุลบอื่นได้ เช่น ซัลไฟด์ (S^{2-}) ซึ่งเป็นโลหะที่มีความสามารถในการละลายน้ำ จึงมีการใช้ Na_2S หรือ $NaHS$ มาทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก แต่ข้อเสียของการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักร่วมกับซัลไฟด์ คือ ตะกอนมีขนาดเล็ก ทำให้การตกตะกอนเป็นไปได้ยาก อีกทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดก๊าซ



ภาคผนวก ค

1. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดของเสียอุตสาหกรรม

ของเสียอุตสาหกรรม พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 ได้ให้นิยามคำว่า ของเสีย หมายถึง ขยะมูลฝอย สิ่งปฏิกูล น้ำเสีย อากาศเสีย มลพิษ หรือ วัตถุอันตรายอื่นใด ซึ่งถูกปล่อยทิ้งหรือมีที่มาจากแหล่งกำเนิดมลพิษรวมทั้งกากตะกอน หรือสิ่งตกค้าง จากสิ่ง เหล่านั้น ทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ

พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 กำหนดคำนิยามของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 หมาย ความว่า สิ่งของที่ไม่ ใช้แล้วหรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงาน รวมถึงของเสีย จากวัตถุดิบ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อม คุณภาพ และน้ำทิ้งที่ มีองค์ประกอบหรือมีคุณลักษณะที่เป็นอันตราย

1.1 แหล่งกำเนิดของเสียอุตสาหกรรม

ของเสียอุตสาหกรรมเกิดจากการประกอบกิจการทางอุตสาหกรรมภายในโรงงาน โดยไม่ รวมถึงสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตราย จากสำนักงาน บ้านพักอาศัย และโรง อาหารในบริเวณโรงงาน กากกัมมันตรังสี มูลฝอยตามพระราชบัญญัติสาธารณสุข และน้ำเสียที่ส่งไป บำบัดนอกโรงงานทางท่อส่ง

1.2 การจัดการของเสียอุตสาหกรรม (สำนักงานบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม, 2551)

1.2.1 การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (reuse/recycle/recovery) การนำกลับมา ใช้ประโยชน์ใหม่สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

- 1) เป็นวัตถุดิบทดแทน (use as raw material substitution) หมายถึง วัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณลักษณะหรือคุณสมบัติเหมาะสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ทดแทนในกระบวนการผลิตของโรงงาน
- 2) ส่งกลับผู้ขายเพื่อกำจัด (return to original producer for disposal) หมายถึง การส่งกลับผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วให้แก่โรงงาน ผู้ผลิต เพื่อนำไปบำบัด หรือกำจัด หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่
- 3) ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำกลับไปบรรจุใหม่ หรือใช้ซ้ำ (reuse container; to be refilled) หมายถึงการส่งภาชนะบรรจุคืนโรงงานผู้ผลิตเพื่อนำ กลับไปบรรจุใหม่หรือใช้ซ้ำ
- 4) นำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีอื่นๆ (other reuse methods) หมายถึง การนำ กลับไปใช้ซ้ำด้วยวิธีอื่นๆ ที่ไม่ใช่กรณีเป็นวัตถุดิบทดแทนหรือนำกลับไป บรรจุใหม่



1245960946

- 5) เป็นเชื้อเพลิงทดแทน (use as fuel substitution or burn for energy recovery) หมายถึง การนำของเสียที่มีค่าความร้อนและมีสภาพเหมาะสมไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์
- 6) ทำเชื้อเพลิงผสม (fuel blending) หมายถึง การนำเอาวัสดุที่ไม่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการปรับคุณภาพ หรือผสมกันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์
- 7) เผาเพื่อเอาพลังงาน (burn for energy recovery)
- 8) เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (use as co-material in cement kiln or rotary kiln) ให้ระบุผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ วัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผา ปูนซีเมนต์ จะต้องมีส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียม อะลูมินา เหล็ก หรือซิลิกา
- 9) เข้ากระบวนการนำตัวทำละลายกลับมาใหม่ (solvent reclamation /regeneration) หมายถึงการนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทตัวทำละลายเพื่อ กลั่นและนำกลับมาใช้ใหม่
- 10) เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใหม่ (reclamation/regeneration of metal and metal compounds) หมายถึง การนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของโลหะมาผ่านกระบวนการสกัดหรือนำโลหะกลับมาใช้ใหม่
- 11) เข้ากระบวนการคืนสภาพกรด/ด่าง (acid/base regeneration)
- 12) เข้ากระบวนการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst regeneration)

1.2.2 การบำบัด (treatment) สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

- 1) บำบัดด้วยวิธีชีวภาพ (biological treatment) หมายถึง การบำบัดโดยใช้วิธีระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) การหมัก (composting) ระบบบ่อฝัง (stabilization pond) เป็นต้น
- 2) บำบัดด้วยวิธีทางเคมี (chemical treatment) หมายถึง การบำบัด โดยใช้วิธีการปรับค่า ความเป็นกรดต่างและทำให้เป็นกลาง (neutralization and pH adjustment) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน (oxidation / reduction reactions) การแยกด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การตกตะกอน (precipitation) การทำลายสารประกอบฮาโลเจน (dehalogenation) เป็นต้น



- 3) บำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ (physical treatment) หมายถึง การบำบัดโดยใช้วิธีการเหวี่ยงแยก (centrifugation) การกลั่นแยกด้วยไอน้ำ (steam distillation and steam stripping) การกรองผ่านตัวกรองหลายชั้น (multi-media filtration) การทำระเหย (evaporation) การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickening) การแยกด้วยเครื่องแยกน้ำและน้ำมัน (oil/water separator or coalescence separator)
- 4) บำบัดด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ (physico-chemical treatment) หมายถึง การดูดซับด้วยถ่าน กัมมันต์ (activated carbon adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การกรองรีดน้ำ (filter press, dewatering, vacuum filtration and belt-press filtration) การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid/liquid extraction) เป็นต้น
- 5) บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ (physico-chemical treatment of wastewater) หมายถึง การนำเอาวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเหลว (liquid waste or aqueous waste) หรือน้ำเสีย (wastewater) ไปบำบัดทางเคมีหรือกายภาพเพื่อทำลายฤทธิ์
- 6) เข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวม (direct discharge to central wastewater treatment plant)
- 7) ปรับเสถียรด้วยวิธีทางเคมี (chemical stabilization)
- 8) ปรับเสถียร/ตรึงทางเคมีโดยใช้ซีเมนต์หรือวัสดุ pozzolanic (chemical fixation using cementitious and/or pozzolanic material) หมายถึงการบำบัดด้วยวิธีการตรึงด้วยสารเคมี (chemical fixation) การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยสารประสาน (pozzolanic and cement base solidification)
- 9) เผาทำลายในเตาเผาขยะทั่วไป (burn for destruction) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่
- 10) เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย (burn for destruction in hazardous waste incinerator)
- 11) เผาทำลายร่วมในเตาเผาปูนซีเมนต์ (co-incineration in cement kiln) หมายถึง การนำวัสดุที่ไม่ใช่แล้วซึ่งไม่มีคุณลักษณะหรือคุณสมบัติเป็นวัตถุอันตรายหรือเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับใช้เผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปเผาทำลายในเตาเผาปูนซีเมนต์ก่อนส่งไปเผาทำลายในเตาเผาปูนซีเมนต์



1245960946

1.2.3 การกำจัด (disposal) สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

- 1) ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น
- 2) ฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill) หมายถึง การฝังกลบวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายที่อยู่ในรูปที่คงตัว (เสถียร) ไปฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบ secured landfill โดยไม่ต้องนำไปปรับเสถียรก่อน
- 3) ฝังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำการปรับเสถียรหรือทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว (secured landfill of stabilized and/or solidified wastes) หมายถึง การนำเอาวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายที่ผ่านการปรับเสถียรเพื่อทำลายฤทธิ์และให้อยู่ในรูปที่คงตัวแล้วไปฝังกลบในหลุม ฝังกลบแบบ secured landfill

1.3 การจำแนกประเภทของเสียอุตสาหกรรม

ของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง สิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงาน รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1) ของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย (industrial hazardous waste) หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง เช่นสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารพิษ หรือสารที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปนที่เป็นสารอันตราย เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ และหากไม่มีการ จัดการให้ถูกต้องตามหลักวิชาการก็จะสามารถก่อให้เกิดผลกระทบหรือภาวะความเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมหรือก่อให้เกิดความเจ็บป่วยแก่ชีวิตมนุษย์ได้

2) ของเสียอุตสาหกรรมไม่เป็นอันตราย (industrial non hazardous waste) หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่ไม่ปนเปื้อนสารอันตราย หรือของเสียที่มีสภาพเสถียรหรือคงตัว ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบหรือภาวะความเป็นพิษอย่างรุนแรงแก่สิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันได้มีการกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของเสียอุตสาหกรรม โดยของเสียอุตสาหกรรมจะถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ ตามประเภทการประกอบกิจการอุตสาหกรรม ดังตาราง และจะใช้ตัวเลข 6 หลัก เพื่อระบุถึงประเภทของเสียอุตสาหกรรม

ตัวเลข 6 หลักนั้น ประกอบไปด้วย ตัวเลข 2 หลักแรก แสดงถึงของเสียอุตสาหกรรมเกิดจากประเภทการประกอบกิจการอุตสาหกรรมใด ตัวเลข 2 หลักกลาง แสดงถึง กระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการอุตสาหกรรมนั้นๆ และตัวเลข 2 หลักสุดท้าย แสดงถึง ลักษณะเฉพาะของของเสียอุตสาหกรรมนั้นๆ เช่น สถานะทางกายภาพ สถานะทางเคมี เป็นต้น ทั้งนี้ ประเภทหรือชนิดของกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นอาจเป็นของเสียอันตราย (industrial hazardous waste) ของเสียที่ไม่เป็นของเสียอันตราย (industrial non hazardous waste) ก็ได้ ดังนั้น การกำหนดรหัสของเสียจึงใช้อักษรภาษาอังกฤษกำกับ โดยจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ รหัสของเสียที่ไม่เป็นของเสียอันตราย (non hazardous waste) คือรหัสที่เป็นเลข 6 หลักและไม่มีอักษร ภาษาอังกฤษกำกับ รหัสของเสียอันตราย (Hazardous waste) คือรหัสที่เป็นเลข 6 หลักที่มีอักษร ภาษาอังกฤษ “HA” กำกับ (Hazardous waste – Absolute entry) โดยของเสียในกลุ่มนี้เป็นของเสียที่มีความเป็นอันตรายและไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหรือความเข้มข้นของสารอันตรายที่เป็นองค์ประกอบของของเสียนั้นๆ หรือมีความเป็นอันตรายอย่างแท้จริง และรหัสของเสียที่เป็นของเสียอันตรายแต่อาจไม่เป็นของเสียอันตรายก็ได้ คือรหัสที่เป็นเลข 6 หลักที่มีอักษรภาษาอังกฤษ “HM” กำกับ (Hazardous waste – Mirror entry) ซึ่งของเสียดังกล่าวอาจเป็นหรือไม่เป็นของเสียอันตรายก็ได้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและความเข้มข้นของสารอันตรายหรือสารพิษในของเสียนั้นๆ ทั้งนี้ หากพิจารณาแล้วของเสียดังกล่าวไม่เป็นของเสียอันตราย ของเสียนั้นๆ จะจัดอยู่ในรหัสของเสียที่ไม่เป็นอันตราย



หมวด	ประเภทของการประกอบกิจการอุตสาหกรรม
01	ของเสียจากการสำรวจ การทำเหมืองแร่ การทำเหมืองหินและการปรับสภาพแร่ ธาตุโดยวิธีกายภาพและเคมี (wastes resulting from exploration ,mining, quarrying, physical and chemical treatment of minerals)
02	ของเสียจากการเกษตรกรรม การเพาะปลูกพืชสวน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การทำ ป่าไม้ การล่าสัตว์ การประมง การแปรรูปอาหารต่างๆ (wastes from agriculture, horticulture, aquaculture, forestry, hunting and fishing, food preparation and processing)
03	ของเสียจากกระบวนการผลิตไม้ และการผลิตแผ่นไม้ เครื่องเรือน เชื้อ กระดาษ หรือกระดาษแข็ง (wastes from wood processing and the production of panels and furniture, pulp, paper and cardboard)
04	ของเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องหนัง ขนสัตว์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ (wastes from the leather, fur and textile industries)
05	ของเสียจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม การแยกก๊าซธรรมชาติ และ กระบวนการบำบัด ถ่านหินโดยการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (wastes from petroleum refining, natural gas purification and pyrolytic treatment of coal)
06	ของเสียจากกระบวนการผลิตสารอนินทรีย์ต่างๆ (wastes from inorganic chemical processes)
07	ของเสียจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่างๆ(wastes from organic chemical processes)
08	ของเสียจากการผลิต การผสมตามสูตร การจัดส่ง และการใช้งานของสี สาร เคลือบเงา สารเคลือบผิว กาว สารติดผนังและหมึกพิมพ์ (wastes from the manufacture, formulation, supply and use (MFSU) of coatings (paints, varnishes and vitreous enamels), adhesives, sealant and printing inks)
09	ของเสียจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพ (wastes from the photographic industry)
10	ของเสียจากกระบวนการใช้ความร้อน(Wastes from thermal processes)

ตารางการจำแนกของเสียอุตสาหกรรมตามประเภทกิจการอุตสาหกรรม



1245960946

ตารางต่อ

หมวด	ประเภทของการประกอบกิจการอุตสาหกรรม
11	ของเสียจากการปรับสภาพผิวโลหะและวัสดุต่างๆ ด้วยวิธีเคมี รวมทั้งการชุบเคลือบผิว และของเสียจากกระบวนการ(non-ferrous hydro-metallurgy wastes from chemical surface treatment and coating of metals and other materials, non-ferrous hydro-metallurgy)
12	ของเสียจากการตัดแต่ง และปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติกด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือเชิงกล(wastes from shaping and physical and mechanical surface treatment of metals and plastics)
13	ของเสียประเภท น้ำมันและเชื้อเพลิงเหลว ไม่รวมน้ำมันที่บริโภคได้ (oil wastes and wastes of liquid fuels(except edible oils))
14	ของเสียที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ สารทำความเย็น สารขับเคลื่อน ไม่รวมของเสียรหัส 07 และ08(waste of organic solvents, refrigerants and propellants)
15	ของเสียประเภทบรรจุภัณฑ์ วัสดุดูดซับ ผ้าสำหรับเช็ด วัสดุตัวกรอง และชุดป้องกัน(packaging waste, absorbents, wiping cloths, filter materials and protective clothing not otherwise specified)
16	ของเสียประเภทต่างๆ ที่ไม่ได้ระบุในรหัสอื่น (wastes not otherwise specified in the list)
17	ของเสียจากงานก่อสร้างและการรื้อทำลายสิ่งก่อสร้าง(รวมถึงดินที่ขุดจากพื้นที่ปนเปื้อน) (construction and demolition wastes(including excavated soil from contaminated sites)
18	ของเสียจากการสาธารณสุขสำหรับมนุษย์และสัตว์ รวมถึงการวิจัยทางด้านสาธารณสุข (wastes from human or animal health care and/or related research)
19	ของเสียจากโรงปรับคุณภาพของเสีย โรงบำบัดน้ำเสีย โรงผลิตน้ำประปา และโรงผลิตน้ำใช้ อุตสาหกรรม(wastes from waste management facilities, off-site waste water treatment plants and the preparation of water intended for human consumption and water for industrial use)



1245960946

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรุณวรรณ เต้าทิพย์ภูมิรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 เมื่อสำเร็จการศึกษา ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 จนถึงปัจจุบัน



1245960946



1245960946