

การนำกลับทงจากของเสียของการถลุงทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

นางสาววาณี หมอดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

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.

GOLD RECOVERY FROM WASTE OF GOLD REFINERY BY ELECTROCHEMICAL
METHOD

Miss Vanee Mohdee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การนำกลับทองคำของเสียจากการถลุงทองด้วยวิธี
เคมีไฟฟ้า

โดย

นางสาววาณี หมอดี

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต)

วาณี หมอดี : การนำกลับทองจากของเสียของการถลุงทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า. (GOLD RECOVERY FROM WASTE OF GOLD REFINERY BY ELECTROCHEMICAL METHOD) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.เก็จวลี พฤกษาทร, 102 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายและการนำกลับทองจากของเสียของกระบวนการถลุงทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษามี 2 ส่วน คือ ตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย (กรดซัลฟูริก กรดไนตริก ไฮโอยูเรียและกรดกำดทอง) ความเข้มข้นของตัวทำละลาย (0.5 ถึง 4 M) และร้อยละตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย (0.25 - 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และตัวแปรที่มีผลต่อการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (31.85 - 318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และชนิดของขั้วอิเล็กโทรด (ขั้วคาร์บอน ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วทองแดง) พบว่า สารละลายกรดกำดทองสามารถชะละลายทองได้สูงถึงร้อยละ 41 รองลงมาคือสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายทองได้ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนระหว่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 100 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยร้อยละที่เหมาะสมระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถชะละลายทองได้ทั้งหมด เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการชะละลายมานำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าพบว่า สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรให้ค่าร้อยละการนำกลับทองสูงสุดที่ร้อยละ 89.87 ± 10.63 ด้วยขั้วคาร์บอนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดกำดทองให้ค่าร้อยละการนำกลับทองร้อยละ 36.65 ± 5.08 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 63.70 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้งนี้ขั้วคาร์บอนให้ค่าการนำกลับทองที่สูงที่สุด รองลงมาคือขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมและขั้วทองแดง ตามลำดับ

ภาควิชา:เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออนิสิต.....
 สาขาวิชา:เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....
 ปีการศึกษา2554.....

5272529123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : GOLD RECOVERY / LEACHING OF GOLD / GOLD REFINERY WASTE

VANEE MOHDEE : GOLD RECOVERY FROM WASTE OF GOLD REFINERY
BY ELECTROCHEMICAL METHOD. ADVISOR : ASSOC. PROF. KEJVALEE
PRUKSATHORN, Ph.D., 102 pp.

This work aims to determine the optimum condition to recovery gold from waste of gold refinery by electrochemical method. Parameter effects for leaching process were solvents type (H_2SO_4 , HNO_3 , Thiourea and Aqua regia), solvent concentrations (0.5 - 4 M) and percentage of solid per solvent (0.25-3.0 %wt./vol). The effects of current density (31.85 A/m^2 - 318.47 A/m^2) and electrodes type (Carbon, Stainless steel and Copper) were also investigated in gold recovery by electrochemical method. The results showed that aqua regia and 4 M of H_2SO_4 could leach gold up to 41% wt. and 30% wt., respectively. At optimum condition, 0.25 %wt./vol could leach all of gold in waste. The solution was used to study in electrochemical part. The current density had an effect on gold recovery. In 4 M of H_2SO_4 electrolyte, the percentages of gold recovery was 89.87 ± 10.63 by carbon electrode while the used of aqua regia as an electrolyte, the percentages of gold recovery was 36.65 ± 5.08 at the current density of 31.85 and 63.70 A/m^2 respectively. Moreover, carbon electrode showed higher efficiency than stainless steel electrode and copper electrode for gold recovery in this study.

Department : ..Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study : ..Chemical Technology..... Advisor's Signature

Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคลากรหลายฝ่ายและทางภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาในด้านต่างๆ และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ อบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่ง

ขอขอบคุณ Gold Field Refinery Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างของเสียและเครื่องมือวิเคราะห์ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และข้าราชการภาควิชาเคมีเทคนิคและภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่และน้องทุกคน ที่คอยห่วงใยและให้กำลังใจตลอดการศึกษาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ท่อง.....	4
2.2 กระบวนการสกัดทอง.....	5
2.3 การหลอมแร่ด้วยฟลักซ์.....	9
2.4 การวิเคราะห์ทอง.....	9
2.5 กระบวนการชะละลาย.....	10
2.5.1 การชะละลายโลหะหนักออกจากตะกอน.....	13
2.5.1.1 การชะละลายทองด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.....	15
2.5.2 จลนพลศาสตร์ของการชะละลาย.....	16
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.....	17
2.6.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	18
2.6.1.1 ขั้วไฟฟ้า.....	18
2.6.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	18
2.6.1.3 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	18

บทที่	หน้า
2.6.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ชั่วไฟฟ้า.....	19
2.6.2.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า.....	19
2.6.2.2 ตัวแปรชั่วไฟฟ้า.....	19
2.6.2.3 ตัวแปรภายนอก.....	20
2.7 การถ่ายโอนมวลในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	20
2.8 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	21
2.9 ไส้คลิกโวลแทมเมตรี.....	22
2.10 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า.....	23
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	29
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	30
3.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะในตัวอย่างของเสีย.....	30
3.3.1.1 เทคนิควิเคราะห์หาปริมาณธาตุ.....	30
3.3.1.2 เทคนิคการย่อยด้วยไมโครเวฟ.....	30
3.3.2 การชะละลายตัวอย่างของเสีย.....	32
3.3.2.1 ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย.....	32
3.3.2.2 ศึกษาผลของการให้ความร้อนตัวอย่างของเสีย.....	33
3.3.2.3 ศึกษาผลของออกซิเจนที่มีต่อค่าร้อยละการชะละลาย.....	33
เมื่อใช้สารละลายไทโอยูเรียเป็นตัวทำละลาย.....	33
3.3.2.4 ศึกษาผลของอัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย.....	34
3.3.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายทอง.....	34
3.3.4 การนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	35
3.3.4.1 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยา โดยเทคนิค.....	35
ไส้คลิกโวลแทมเมตรี.....	35
3.3.4.2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการนำกลับทอง.....	36
3.3.4.3 ศึกษาผลของชนิดชั่วไฟฟ้าในการนำกลับทอง.....	37

บทที่	หน้า
3.3.4.4	ศึกษาผลของขนาดขั้วไฟฟ้าในการนำกลับทอง..... 38
3.3.5	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าหลังเกิดปฏิกิริยา.....
	การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิค EDS..... 38
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 40
4.1	การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะในตัวอย่างของเสีย..... 40
4.1.1	เทคนิควิเคราะห์หาปริมาณธาตุ..... 40
4.1.2	เทคนิคการย่อยด้วยไมโครเวฟ..... 40
4.2	การชะละลายโลหะจากตัวอย่างของเสีย..... 42
4.2.1	ผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย..... 42
4.2.2	ผลของการให้ความร้อนตัวอย่างของเสีย..... 43
4.2.3	ผลของออกซิเจนต่อร้อยละการชะละลายด้วยสารละลายไทโอยูเรีย..... 44
4.2.4	ผลของอัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย..... 45
4.3	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายทอง..... 46
4.4	การนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า..... 51
4.4.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี..... 51
4.4.2	ผลของชนิดไฟฟ้า..... 54
4.4.3	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า..... 57
4.4.4	ผลของขนาดขั้วไฟฟ้า..... 61
4.4.5	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค EDS..... 63
4.5	ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์..... 70
4.5.1	การชะละลายทองจากตัวอย่างของเสีย..... 70
4.5.2	การนำกลับทองจากตัวอย่างของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า..... 72
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 75
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 75
5.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัย..... 76
	รายการอ้างอิง..... 77

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	82
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
3.1	ภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างของเสียด้วยเทคนิคไมโครเวฟ.....	32
4.1	องค์ประกอบในตัวอย่างของเสียจากกระบวนการสกัดทอง.....	41
4.2	ค่า k ของปฏิกิริยาการชะละลายทองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	50
4.3	ปริมาณธาตุบนขั้วคาร์บอนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	65
4.4	ปริมาณธาตุบนขั้วทองแดงก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	67
4.5	ปริมาณธาตุบนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า...	69
4.6	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยกรดไนตริก.....	70
4.7	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยกรดซัลฟูริก.....	70
4.8	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยไทโอยูเรีย.....	71
4.9	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยกรดกัดทอง.....	71
4.10	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการนำกลับทองจากตัวอย่างด้วยกรดซัลฟูริก.....	72
4.11	การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการนำกลับทองจากตัวอย่างด้วยกรดกัดทอง.....	73
ข1	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้.....	88
ข2	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้เปรียบเทียบกับตัวอย่าง ที่ให้ความร้อนก่อนนำไปชะละลาย.....	89
ข3	ผลของออกซิเจนต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้.....	90
ข4	ผลของอัตราส่วนต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้.....	91
ข5	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริก..... เข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	92
ข6	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทอง..... เป็นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์.....	93
ข7	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริก..... เข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	94
ข8	ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริก..... เข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	95

ตาราง	หน้า
ข9	ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 96
ข10	ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์... 97
ข11	ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกรด..... ซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 98
ข12	ผลของขนาดขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกรด..... ซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 99
ข13	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณธาตุบนขั้วคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยา... การพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยมีสารละลายกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 100
ข14	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณธาตุบนขั้วคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยา การพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยมีสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 101

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ปริมาณความต้องการทองแบ่งตามประเภทการใช้งานในปี 2007.....	4
2.2	กระบวนการสกัดทอง.....	6
2.3	กระบวนการสกัดทองแบบ Wolhwill Electrolytic Process.....	7
2.4	กระบวนการสกัดทองแบบ Wolhwill Electrolytic Process เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา.....	8
2.5	กระบวนการชะละลายแบบ Heap leaching.....	11
2.6	กระบวนการนำกลับโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	13
2.7	กลไกการถ่ายโอนมวลสารแต่ละกระบวนการ.....	21
2.8	ลักษณะกระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	22
2.9	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	23
2.10	แผนวงจรแสดงกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาแข่งขันแบบขนาน.....	24
3.1	ชุดอุปกรณ์การทดลองหาค่าทางจลนพลศาสตร์.....	35
3.2	เซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	35
3.3	เซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับการนำกลับทอง.....	36
4.1	ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่มีต่อค่าร้อยละการชะละลายทอง.....	43
4.2	ผลของการให้ความร้อนต่อค่าร้อยละการชะละลายทอง.....	44
4.3	ผลของการเติมออกซิเจนต่อค่าร้อยละการชะละลายทองด้วย..... สารละลายไทโอยูเรีย.....	45
4.4	อัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย.....	46
4.5	ร้อยละการชะละลายทองที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 4 โมลต่อลิตร.....	48
4.6	แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียมของการชะละลายทอง ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
4.7	ความเข้มข้นของทองในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	50
4.8	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทอง.....	

รูปที่	หน้า
	ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... 52
4.9	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทอง..... ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดกำดทอง (ก) ทำการตรวจกราดค่าศักย์ไฟฟ้า ในช่วง -0.502 ถึง +2.0 โวลต์เทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน (SHE) (ข) ขยาย แกนค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง 1.0 ถึง 1.5 โวลต์..... 53
4.10	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 54
4.11	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วทองแดง โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 55
4.12	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วคาร์บอนโดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 55
4.13	ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทอง โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร.... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 56
4.14	ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 57
4.15	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทอง..... โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก..... เข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 58
4.16	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า..... โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก..... เข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 59
4.17	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทอง..... โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดกำดทอง.....

รูปที่	หน้า
	เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 60
4.18	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทอง..... โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทอง..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 60
4.19	ขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการนำกลับทอง โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร..... เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 62
4.19	ขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลาย..... ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์..... 62
4.21	รูปทางสัณฐานวิทยาของขั้วคาร์บอน (ก) ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูน..... ด้วยไฟฟ้า (ข) หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลาย..... กรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ค) หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูน..... ด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 64
4.22	รูปทางสัณฐานวิทยาของขั้วทองแดง (ก) ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูน..... ด้วยไฟฟ้า (ข) หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลาย..... กรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 66
4.23	รูปทางสัณฐานวิทยาของขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม (ก) ก่อนเกิดปฏิกิริยา..... การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (ข) หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า..... เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์. 68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทอง ถูกนำมาใช้เป็นทุนสำรองทางการเงินของประเทศ ใช้ประโยชน์เป็นเครื่องประดับ อัญมณี การแพทย์ ทันตกรรม และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยในอุตสาหกรรมการสกัดทองนั้นสามารถทำได้หลายวิธี [1] ดังนี้ 1.) Miller Chlorination Process เป็นวิธีเก่าแก่และใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมถลุงทองขนาดใหญ่ ใช้ในการกำจัดเงินและโลหะชนิดอื่นออกจากทอง ทำได้โดยการผ่านแก๊สคลอรีนลงในแร่ทองหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ซึ่งโลหะชนิดอื่นรวมทั้งเงินจะถูกกำจัดออกไปในรูปของสารประกอบคลอรีน (chlorinated compound) กระบวนการนี้จะเสร็จสมบูรณ์เมื่อเกิดไอสีม่วงของทองคลอไรด์ขึ้น วิธีนี้สามารถได้ทองที่มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.6 ถึง 99.7 ซึ่งโลหะแพลทินัมไม่ถูกกำจัดออกไปด้วย ดังนั้น จึงต้องมีขั้นตอนเพิ่มเติมในการสกัดแยกทองออกมา 2.) Wohlwill Electrolytic Process วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการถลุงทอง ซึ่งเป็นวิธีเคมีไฟฟ้า โดยทองที่ไม่บริสุทธิ์จะเกิดการสลายตัวด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดในสารละลายไฮโดรคลอริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งวิธีนี้จะได้ทองบริสุทธิ์พอกพูนที่ขั้วแคโทดสูงถึงร้อยละ 99.99 ส่วนเงินและแพลทินัมที่ไม่ละลายรวมถึงทองที่ยังเหลือตกค้างอยู่ในปริมาณเล็กน้อยจะอยู่ในรูปของกากตะกอน (Slime) ที่ขั้วแอโนด 3.) Chemical Refining Process วิธีนี้สามารถสกัดได้ทองที่มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.99 โดยใช้สารละลายกรดกัดทอง (Aqua Regia) ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นและกรดไนตริกเข้มข้นในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 สามารถละลายทองเป็นเกลือของทองคลอไรด์ได้ ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ วัสดุที่นำมาสกัดต้องมีปริมาณเงินอยู่เท่ากับ หรือ น้อยกว่าร้อยละ 10

ของเสียที่เกิดจากการถลุงทองจากแร่ด้วยวิธีต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น หรือจากขั้นตอนการผลิตอัญมณีโดยทั่วไปยังคงมีทองตกค้างอยู่ด้วยบางส่วน ดังนั้นถ้าสามารถนำกลับทองจากของเสียนี้ได้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้อุตสาหกรรมการสกัดทอง โดยวิธีนำกลับทองนั้นมีหลายวิธี เช่น การรีดักชันด้วยแก๊ส (Gaseous reduction) การตกตะกอน (Precipitation) การชะละลายและแยกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical method) ซึ่งวิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical method) เป็นวิธีที่สามารถแยกทองได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ความบริสุทธิ์สูง

การชะละลายเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวทำละลายนำมาสัมผัสกับวัสดุหนึ่งๆ ซึ่งประกอบด้วยโลหะมีค่า ตัวทำละลายอาจมีความเป็นกรดหรือเบส สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถชะละลายโลหะส่วนใหญ่ได้ ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายโดยทั่วไปจะถูกควบคุมเพื่อให้กระบวนการชะละลายของโลหะที่ต้องการเกิดได้ดี ซึ่งในขั้นตอนการชะละลายนี้จะได้โลหะออกมาในรูปไอออนของโลหะในสารละลาย จากนั้น ใช้วิธีเคมีไฟฟ้าเพื่อนำกลับโลหะและทำให้โลหะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยใช้การพอกพูนของโลหะที่ต้องการที่ขั้วแคโทด ส่วนโลหะชนิดอื่นจะละลายอยู่ในสารละลายหรือแข่งขันกันเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด ซึ่งสามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการแยกโลหะที่ต้องการที่มีความบริสุทธิ์สูง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการนำกลับทองจากของเสียของการสกัดทองด้วยวิธีการชะละลายและวิธีเคมีไฟฟ้า โดยจะเกิดการพอกพูนของทองที่ขั้วแคโทด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายและการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าจากของเสียของกระบวนการสกัดทอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายทองจากกากของเสียของกระบวนการสกัดทองที่ได้มาจากโรงงาน Gold Field Refinery Co., Ltd. โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลายทองซึ่งประกอบด้วย ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย และอัตราส่วนระหว่างของเสียต่อตัวทำละลาย และศึกษาการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและชนิดของขั้วไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำกลับทองออกจากของเสียของการสกัดทองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. เป็นแนวทางสำหรับการนำของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีแอมโมเนียมาใช้ในการเกิดประโยชน์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. วิเคราะห์องค์ประกอบของเสียจากการสกัดทองด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และหาปริมาณทองในของเสียโดยการย่อยด้วยเทคนิคไมโครเวฟ (Microwave Digestion Technique)
3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองจากของเสียของการสกัดทองโดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ
 - 3.1 ภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการชะละลายโดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ดังนี้
 - ชนิดของตัวทำละลาย
 - ความเข้มข้นของตัวทำละลาย
 - อัตราส่วนของของแข็งต่อปริมาตรตัวทำละลาย
 - 3.2 ภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการนำกลับด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ดังนี้
 - ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
 - ชนิดของขั้วไฟฟ้า
4. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

มนุษย์รู้จักทองมาตั้งแต่ประมาณ 5,000 ปี ทองเป็นความหมายแห่งความมั่งคั่ง เป็นโลหะที่มีความเหนียว (Ductility) และความสามารถในการขึ้นรูป (Malleability) ทองได้รับความนิยมสูงสุดในวงการเครื่องประดับ เพราะเป็นโลหะมีค่าชนิดเดียวที่มีคุณสมบัติพื้นฐาน 4 ประการ คือ

1. งดงามมันวาว (Lustre) ด้วยสีที่สวยงามตามธรรมชาติ ทองสามารถเปลี่ยนเฉดสีได้โดยการนำทองไปผสมกับโลหะมีค่าชนิดอื่นๆ สามารถช่วยเพิ่มความงดงามให้แก่ทองได้อีกทางหนึ่ง
2. คงทน (Durable) ทองคำไม่ขึ้นสนิม ไม่หมอง และไม่ผุกร่อน
3. หายาก (Rarity) ทองเป็นแร่ที่หายาก กว่าจะได้ทองคำมาหนึ่งออนซ์ (31.167 gram) ต้องถลุงก้อนแร่ที่มีทองอยู่เป็นจำนวนหลายตัน และต้องขุดเหมืองลึกลงไปหลายสิบลเมตร จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง เป็นเหตุให้ทองมีราคาแพงตามต้นทุนในการผลิต
4. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Reuseable) ทองมีความเหนียวและอ่อนนิ่มสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการทำให้บริสุทธิ์ (purified) ด้วยการหลอมได้อีกโดยนับครั้งไม่ถ้วน

การเกิดของทอง ได้มีการแบ่งการเกิดของแร่ทองออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะที่พบในธรรมชาติ ดังนี้

- แบบปฐมภูมิ คือกระบวนการทางธรณีวิทยา มีการผสมทางธรรมชาติจากน้ำแร่ร้อน ผสมกับสารละลายพวกซิลิกา ทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ทองในหินต่างๆ เช่น หินอัคนี หินชั้น และหินแปร มีการพบการฝังตัวของแร่ทองในหิน หรือสายแร่ที่แทรกอยู่ในหิน ซึ่งส่วนใหญ่จะมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า
- แบบทุติยภูมิหรือลานแร่ คือการที่หินที่มีแร่ทองแบบปฐมภูมิเกิดการสึกกร่อน และถูกน้ำพัดพาไปสะสมตัวในที่แห่งใหม่ เช่น ตามเชิงเขา ลำห้วย หรือในตะกอนกรวดทรายในลำน้ำ

2.2 กระบวนการสกัดทอง [1]

ทอง เป็นโลหะมีค่าที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเฉพาะแร่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัดทอง โดยทั่วไปยังคงมีทองตกค้างอยู่ด้วยบางส่วน ดังนั้นถ้าสามารถนำกลับทองจากเศษแร่ (slag) นี้ได้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้อุตสาหกรรมสกัดทองได้ โดยเฉพาะแร่ที่เกิดขึ้นนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) เศษแร่ปฐมภูมิ จัดเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดทอง โดยเศษแร่ปฐมภูมินี้ยังคงมีปริมาณทองปะปนอยู่ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 2) เศษแร่ทุติยภูมิ เป็นเศษแร่ได้จากการหลอมเศษแร่ปฐมภูมิ เศษแร่ชนิดนี้มีทองปะปนอยู่ประมาณ 200 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 การหลอมแร่ด้วยฟลักซ์ (Smelting with flux) [1, 3]

จุดประสงค์ในการหลอมแร่ (Smelting) คือ เพื่อกำจัดโลหะชนิดอื่นๆ และสิ่งเจือปนต่างๆ ออกเพื่อให้ได้แท่งของโลหะทอง หรือ เงินในปริมาณมากกว่าร้อยละ 95 โดยการหลอมแร่นี้ทำได้ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของแร่ทั้งหมดที่เป็นส่วนประกอบ โดยส่วนมาก อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส แร่ทองและเงินที่หลอมเหลวจะรวมตัวกันอยู่ในรูปอัลลอยด์และจมลงสู่ด้านล่างของเตาหลอมเหลว ส่วนสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งมีทองและเงินบางส่วนปะปนอยู่ด้วยนั้นรวมเรียกว่า เศษแร่ (Slag) จะลอยอยู่ด้านบน ซึ่งฟลักซ์ที่เติมลงไปนี้จะทำหน้าที่จับสิ่งเจือปนต่างๆ เหล่านี้ ออก ฟลักซ์ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่คือ ซิลิกา เนื่องจากซิลิกามีความสามารถในการละลายออกไซด์ของโลหะโดยส่วนมากได้ โดยที่โลหะออกไซด์จะทำลายซิลิกาแลตทิซและเข้าไปอยู่ในโครงสร้างตาข่ายของซิลิกา ทำให้โครงสร้างของซิลิกาเปลี่ยนไป ซิลิกามีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงถึง 1,723 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดเป็นเศษแร่ที่มีความหนืดสูง ดังนั้น จึงมีการเติมโซเดียมและโบรอนออกไซด์ เช่น โซเดียมโบเรต หรือ บอแรกซ์ (Borax , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เพื่อลดจุดหลอมเหลวและความหนืด ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ซิลิกา-โซเดียมโบเรตผสมกันเป็นฟลักซ์

2.4 การวิเคราะห์ทอง (Fire assay) [3]

การวิเคราะห์ทองด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำให้สามารถนำกลับโลหะมีค่าจากสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ ได้ในปริมาณสูงที่สุด เช่น การนำกลับโลหะจากแร่ ดิน หิน เป็นต้น สามารถวัดความเข้มข้นของทองได้ถึง 0.1 กรัมต่อตัน โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในปริมาณ 50 กรัมต่อตันได้ ในการวิเคราะห์จะทำการผสมตัวอย่างดินที่มีขนาดละเอียด (ร้อยละ 80-90 ที่มีขนาด < 75 ไมโครเมตร) กับตะกั่วออกไซด์ (PbO) และฟลักซ์ (โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) บอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) และซิลิกา (SiO_2)) จากนั้นจึงนำเข้าหลอมที่มีฟลักซ์อยู่ด้วยนี้เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และทำการเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-40 นาที หรือจนกว่าการหลอมจะสมบูรณ์ นำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ขึ้นกับเกรดของโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้น้ำหนัก 10-30 กรัมในการวิเคราะห์ การเพิ่มความแม่นยำของการวิเคราะห์ สามารถทำได้โดยการใช้อย่างในปริมาณมากขึ้นถึง 150 กรัม แต่ปริมาณทองและเงินที่ได้จะต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ตะกั่วจะรวมตัวเกิดเป็นอัลลอยด์ของทอง-เงิน-ตะกั่ว โดยอัลลอยด์ที่เกิดขึ้นนี้จะแยกตัวจากเศษแร่ (Slag) ซึ่งประกอบด้วยโลหะพื้นฐานชนิดต่างๆ และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากนั้นจึงทำการแยกตะกั่วออกจากโลหะมีค่าต่อไป (Cupellation)

การกำจัดตะกั่วสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส จะได้โลหะมีค่าที่มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็ก (Prill) จากนั้นทำการละลายเงินในสารละลายกรดไนตริก (Parted) หรือละลายด้วยสารละลายกรดกำดทอง และวิเคราะห์หาปริมาณทองและเงินด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) หรือเทคนิค Inductively coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES หรือ ICP) โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer จะให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าสำหรับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของทองและเงินน้อย ซีดต่ำสุดของการตรวจวัดทองด้วยเทคนิค ICP คือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (ppb) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer แต่เทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer มีแนวโน้มถูกรบกวนจากโลหะชนิดอื่นมากกว่า

2.5 กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) [3, 4]

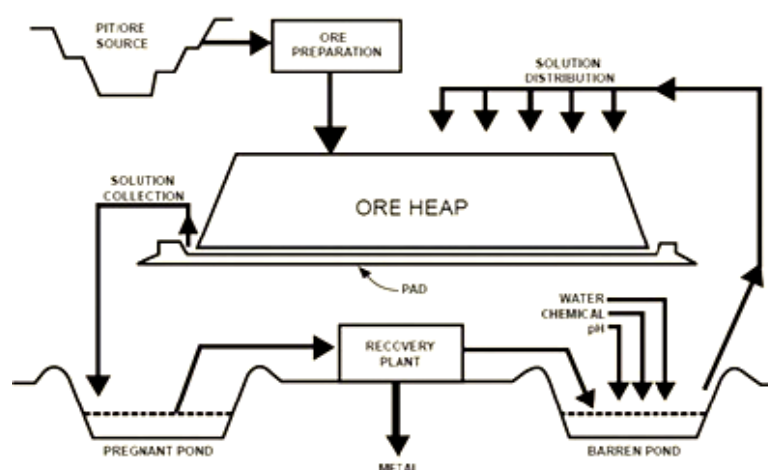
กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นส่วนหนึ่งในสาขาวิชาการสกัดโลหะ (Extractive metallurgy) เป็นการนำกลับโลหะมีค่าจากสินแร่ธรรมชาติ โดยการทำให้โลหะอยู่ในสถานะของเหลว แบ่งเป็น 3 กระบวนการ คือ กระบวนการชะละลาย (Leaching) การทำให้สารละลายเข้มข้นและทำให้บริสุทธิ์ (Concentration and Purification) และการนำกลับโลหะ (Metal recovery)

1. กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย (Lixiviant) นำมาสัมผัสกับวัสดุหนึ่งๆ ซึ่งประกอบด้วยโลหะมีค่า โดยตัวทำละลายอาจมีความเป็นกรดหรือเบส สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถชะละลายโลหะส่วนใหญ่ได้ ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายโดยทั่วไปจะถูกควบคุมเพื่อให้กระบวนการชะละลายของโลหะที่ต้องการเกิดได้ดี รวมถึงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องทำการควบคุมด้วย ซึ่งในขั้นตอนการชะละลายนี้จะได้โลหะออกมาในรูปไอออนของโลหะในสารละลาย เทคนิคการชะละลายพื้นฐานได้แก่ In-situ leaching, Heap leaching และ Vat leaching

- In-situ leaching หรือ Solution mining สามารถทำได้โดยการขุดเจาะในบริเวณที่มีสินแร่ธรรมชาติสะสมอยู่ โดยมักใช้วิธีระเบิดหรือการฉีดด้วยน้ำเพื่อทำให้เกิดรอยแตก

เพื่อผ่านสารละลายลงไป สารละลายที่ใช้ในการชะละลายจะถูกส่งลงไปนอกระบบแยก ซึ่งทำให้สารละลายและสินแร่สัมผัสกัน สารละลายผสมที่ได้จะถูกเก็บเข้ามาและส่งต่อไปในกระบวนการต่อไป

- Heap leaching เทคนิคนี้สามารถทำได้โดยการนำสินแร่ที่ผ่านการบดแล้วนำไปกองรวมกันแล้วฉีดพ่นสารละลายจากด้านบนลงด้านล่างให้ทั่ว และปล่อยให้สารละลายที่ได้ไหลลงมาทางด้านล่าง โดยออกแบบให้สารละลายไหลไปรวมกันที่บ่อพัก (Sump) สารละลายที่ได้จากขั้นตอนนี้ (Pregnant leach solution) เป็นสารละลายที่เต็มไปด้วยโลหะที่ต้องการอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะถูส่งไปใช้ในกระบวนการต่อไป โดยแผนผังของกระบวนการชะละลายแบบ Heap leaching แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการชะละลายแบบ Heap leaching [5]

- Vat leaching โดยปกติแล้วจะทำการลดขนาดของอนุภาคและแบ่งแร่ออกเป็นหมวดหมู่เพื่อนำมาสัมผัสกับสารละลายที่ใช้สกัดในถังขนาดใหญ่ ภายในถังมีการติดตั้งใบพัดเพื่อทวนให้ของแข็งไม่ตกตะกอน และเพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว หลังจากการทำ Vat leaching แล้ว สารละลายที่ได้จากขั้นตอนนี้ที่เต็มไปด้วยโลหะที่ต้องการ (pregnant solution) จะถูกแยกออกจากกันก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป

- เทคนิคการสกัดอื่นๆ (Other leaching techniques) ในบางกรณีนี้ต้องการกระบวนการสกัดแบบจำเพาะ เนื่องจากธรรมชาติของวัสดุเอง เทคนิคเหล่านี้ครอบคลุมถึงการสกัดโดยการใช้ความดัน (Autoclave) และความเข้มข้นของตัวทำละลาย

2. การทำให้สารละลายเข้มข้นและทำให้บริสุทธิ์ (Solution concentration and purification) หลังจากผ่านกระบวนการชะละลายแล้ว โดยปกติสารละลายที่ผ่านการสกัดแล้วต้องผ่านกระบวนการนำกลับโลหะ ซึ่งโลหะที่ไม่ต้องการบางชนิดอาจถูกชะละลายอยู่ในสารละลายในระหว่างการชะละลาย ดังนั้น สารละลายต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์เพื่อกำจัดโลหะที่ไม่ต้องการ กระบวนการที่ใช้ในการทำให้สารละลายเข้มข้นและการทำให้บริสุทธิ์ ได้แก่ การตกตะกอน (Precipitation) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

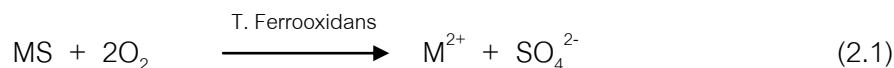
3. การนำกลับโลหะ (Metal recovery) เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการโลหวิทยา โลหะที่เหมาะสมต่อการขายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบโดยส่วนใหญ่ผลิตขึ้นโดยตรงจากกระบวนการนำกลับโลหะ แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องมีการสกัด (Refining) เพื่อให้ได้โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง การนำกลับโลหะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) การลดปริมาณแก๊ส (Gaseous reduction) และการตกตะกอน (Precipitation)

- การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) กระบวนการ Electrowinning และ Electrorefining เป็นกระบวนการที่ใช้ในการนำกลับโลหะ (นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการถลุงแร่) และทำให้โลหะมีความบริสุทธิ์มากขึ้นตามลำดับ โดยโลหะจะเกิดการพอกพูน (Electrodeposition) ที่ขั้วแคโทด ส่วนโลหะชนิดอื่นจะละลายอยู่ในสารละลายในรูปของไอออนหรือแข่งขันกันเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด โดยหากสามารถควบคุมค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่ต้องการให้เกิดการพอกพูนให้มีค่าตามต้องการได้ จะทำให้การแยกสารเกิดได้อย่างสมบูรณ์

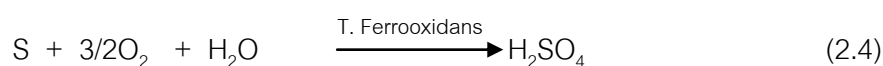
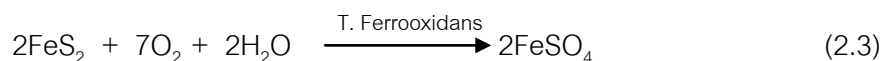
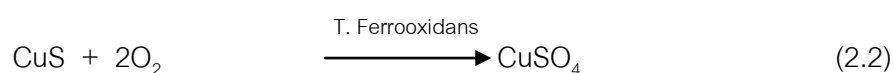
- การตกตะกอน (Precipitation) ในการตกตะกอนประกอบด้วยการเติมรีเอเจนท์ การระเหยน้ำออก การปรับค่าความเป็นกรด-เบส หรือการปรับอุณหภูมิ และการทำให้สารนั้นๆ อยู่ในภาวะเกินขีดจำกัดของการละลาย

รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการชะละลายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบัดแล้วด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเพื่อนำกลับโลหะทองแดง จากนั้นชะละลายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนเป็นส่วนประกอบเพื่อนำกลับโลหะแพลเลเดียม แล้วจึงชะละลายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อด้วยสารละลายไซยาไนด์เพื่อนำกลับโลหะทองและเงิน กรองสารละลายที่ได้ จากนั้นดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แล้วนำไปเผา จะได้โลหะมีค่าในสถานะของแข็ง

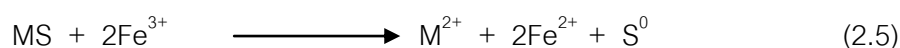
- แบบทางตรง (Direct process) โดยเปลี่ยนจากโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายให้อยู่ในรูปโลหะซัลเฟตที่สามารถละลายได้ ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.1)



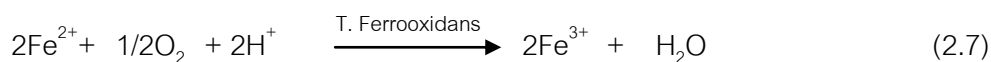
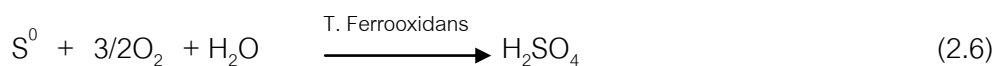
ตัวอย่างปฏิกิริยาการชะละลายโลหะทองแดงและเหล็กด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยเกิดกรดซัลฟูริกขึ้นในปฏิกิริยาแสดงดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.2) ถึง (2.4)



- แบบทางอ้อม (Indirect process) ในขั้นแรกโลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยไอออนทรี (Fe³⁺) ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.5)

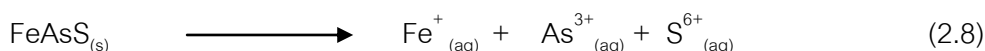


จากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และไอออนทู (Fe²⁺) ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.6) และ (2.7) จากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาที่ (2.5) ต่อเนื่องกันไป



โดยวิธีนี้จะเกิดกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยา ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ซึ่งช่วยในการชะละลายของโลหะได้อีกทางหนึ่ง

2.5.1.1 การชะละลายทองด้วยกระบวนการทางชีวภาพ แบคทีเรียที่สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์และเฟอร์รัสได้ที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ Thiobacillus สามารถใช้ในการชะละลายทองได้ โดยในขั้นแรก แบคทีเรียจะสลายพันธะของแร่ Arsenopyrite (FeAsS) โดยการออกซิไดส์ซัลเฟอร์และโลหะ ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.8)



ในขั้นตอนที่สอง แบคทีเรียจะออกซิไดส์ไอออนหนู (Fe^{2+}) เป็นไอออนทรี (Fe^{3+}) ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.9)



จากนั้น แบคทีเรียจะออกซิไดส์โลหะ โดยแร่ซัลไฟด์ที่ล้อมรอบทองจะละลายออกมา จึงทำให้ทองสามารถถูกชะละลายได้มากขึ้นและทองจะถูกแยกออกมาจากสินแร่และสามารถนำกลับได้ในกระบวนการต่อไป

2. กระบวนการทางเคมี [4]

เป็นกระบวนการชะละลายโลหะด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายไฮดรอกไซด์ เช่น แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นต้น โดยที่สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถชะละลายโลหะเป็นส่วนมากได้ ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายคือ

- ชนิดของกรด สารละลายกรดที่นิยมใช้ในการชะละลายคือ กรดซัลฟูริก เนื่องจากมีราคาถูกและง่ายในการกรองแยก และกรดเกลือ เช่น กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก สามารถชะละลายได้ดีกว่ากรดอินทรีย์

- ปริมาณกรด โดยปริมาณของสารละลายกรดที่ใช้ในการชะละลายขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอน โดยเฉพาะค่าปริมาณสารแห้ง (Dry matter) ของตะกอน ซึ่งถ้าปริมาณสารแห้งมีค่ามาก ปริมาณสารละลายกรดที่ใช้ก็มากขึ้นด้วย

- ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง โดยมีช่วงที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-2

- ปริมาณของตะกอน การชะละลายของโลหะจะมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณของตะกอนเพิ่มมากขึ้น
 - เวลาในการสัมผัส เวลาที่ใช้ในการสัมผัสขึ้นกับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส ชนิดของกรดและโลหะในตะกอน
 - ชนิดและความเข้มข้นของโลหะ โลหะจะสามารถชะละลายได้ง่ายขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะในตะกอนเพิ่มมากขึ้น โดยที่โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสถานะของโลหะที่อยู่ในตะกอน โลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์จะมีพันธะในการยึดเกาะกันน้อย จึงสามารถละลายได้ง่ายและรวดเร็วกว่าโลหะที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน
 - ความชื้นในตะกอน ตะกอนที่ผ่านการตกตะกอนเป็นเวลานาน ความชื้นภายในตะกอนจะระเหยออกไป ทำให้อนุภาคภายในตะกอนอยู่ชิดกันมากขึ้น ตะกอนมีความเสถียรมากขึ้น ค่าการละลายจึงลดลง
 - ขนาดอนุภาคของตะกอน ตะกอนที่มีขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับกรดน้อย ทำให้ชะละลายได้น้อยกว่าตะกอนขนาดเล็ก
 - อุณหภูมิ การชะละลายส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การชะละลายจะเพิ่มขึ้น
- เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการละลายไม่เท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของสมการทางจลนพลศาสตร์ของตัวแปรในการละลายของโลหะหนักออกจากตะกอนสามารถบอกผลกระทบที่มีต่อการละลายได้ดียิ่งขึ้น

2.5.2 จลนพลศาสตร์ของการชะละลาย [4]

ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบของของแข็งกับของเหลวไม่เหมือนและไม่ต่างสักทีเดียวกับกระบวนการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอน (Gasification of carbon) หรือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกไซด์ของโลหะ (Reduction of metal oxides) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอาจถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่เข้าและออกบริเวณผิวของของแข็ง หรือถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็ง หรือถูกควบคุมจากทั้งสองขั้นตอนดังกล่าวพร้อมกัน ปฏิกิริยาที่ถูกควบคุมโดยขั้นตอนของการแพร่ อัตราการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการกวนสารเคมี แต่ถ้าปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีการกวนสารเคมีจะไม่มีผลต่อการละลาย โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นขององค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

โดยปกติในการชะละลายสินแร่โลหะให้ออกมาอยู่ในรูปของของเหลว สินแร่ที่นำมาชะละลายควรบดให้ละเอียดก่อน เพื่อให้สามารถชะละลายโลหะออกมาได้ดี ปฏิริยาการชะละลายโดยส่วนใหญ่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

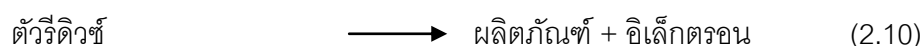
1. การละลายพื้นฐาน (Simple dissolution) โดยธรรมชาติ อัตราการเกิดปฏิริยาจะมีค่าสูงสุดและถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ (Diffusion controlled) อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิริยาจะแตกต่างกันไปเมื่อเป็นสารประกอบออกไซด์ต่างชนิดกัน

2. การละลายร่วมกับการเกิดปฏิริยาออกซิเดชัน (Dissolution combined with oxidation) เมื่อความเข้มข้นของไอออนต่ำ การชะละลายจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ของสารบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Diffusion controlling) แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนสูง ซึ่งเป็นภาวะที่ใช้ในอุตสาหกรรม การเกิดปฏิริยารีดักชันของออกซิเจนจะเป็นตัวควบคุมในขั้นตอนนี้ (Chemical reaction control) อัตราการเกิดปฏิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความดันย่อยของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการเกิดปฏิริยาของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิริยาในสารละลาย โดยเหล็กทำหน้าที่จ่ายและรับอิเล็กตรอนกับอากาศ

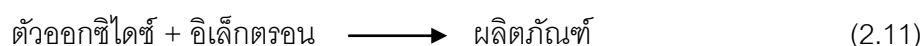
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) [8]

ปฏิริยาในกระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นปฏิริยาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิริยารีดอกซ์ หรือปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยมีสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ปฏิริยารีดอกซ์แบ่งเป็น 2 ครั้ง ปฏิริยา คือ ครั้งปฏิริยารีดักชัน (ปฏิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และครั้งปฏิริยาออกซิเดชัน (ปฏิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) สมการการเกิดปฏิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

ปฏิริยาออกซิเดชัน :

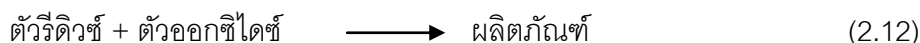


ปฏิริยารีดักชัน :



เมื่อรวมครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยคูณจำนวนอิเล็กตรอนให้เท่ากันจะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์ดังนี้

ปฏิกิริยารีดอกซ์ :



2.6.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า

ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

2.6.1.1 **ขั้วไฟฟ้า (Electrode)** ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบ ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก โดยสามารถแบ่งขั้วไฟฟ้าตามหน้าที่และการใช้งานได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ในเซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดอิเล็กโทรไลติก เป็นขั้วไฟฟ้าที่ต้องการให้เกิดการพอกพูนของโลหะ โดยการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในสารละลายอันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง จะมีผลต่อค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้

- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ในเซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดอิเล็กโทรไลติก โดยที่ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้ามืดเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาริเซชันในอุดมคติ (Idea nonpolarization)

- ขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ซึ่งในบางเทคนิควิเคราะห์จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว เช่น เทคนิคโวลแทมเมตรี

2.6.1.2 **สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)** ทำหน้าที่ ส่งผ่านไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลายหรือเรียกว่า ตัวนำทางไอออน (Ionic conductor) ไอออนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านไอออนระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยสมบัติของสารอิเล็กโทรไลต์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยา ได้แก่ ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ

2.6.1.3 **เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง** ในระบบอิเล็กโทรไลซิส เนื่องจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองจึงจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นตัวป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ โดยกระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดัน

ให้อิเล็กตรอนในสายไฟเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของตัวออกซิไดซ์ในสารละลายจะถ่ายโอนเข้าสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยารีดักชันแก้อิเล็กตรอน สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลหรือไอออนของตัวรีดิวซ์ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบ

2.6.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

2.6.2.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า (Electrical parameters) ได้แก่

1. ศักย์ไฟฟ้า (Potential, E) ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อทิศทางการเกิดปฏิกิริยา โดยพิจารณาในรูปผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วกับค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ชนิดเดียวกัน โดยชนิดขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ส่วนมาก ได้แก่ ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (Standard hydrogen electrode, SHE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะ คือ เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์เป็นศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานคาโลเมล (Standard calomel electrode, SCE) มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.245 V/SHE ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานเงิน-เงินคลอไรด์ (Silver-silver chloride electrode) มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 0.222 V/SHE และขั้วไฟฟ้ามาตรฐานเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรีซัลเฟต (Mercury-mercury sulfate electrode) มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น -0.573 V/SHE เป็นต้น

2. ความเข้มกระแสไฟฟ้า หรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current, I หรือ current density, i) มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าศักย์ไฟฟ้า หรือชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ

3. ประจุ (Charge) หรือปริมาณไฟฟ้า (Quantity of electricity, Q) เป็นความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาซึ่งแสดงถึงปริมาณของสารที่เกิดขึ้นโดยปริมาณของสารที่เกิดขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณของประจุตามกฎของฟาราเดย์

4. ตัวแปรสารละลาย (Solution variables) ได้แก่ สมบัติของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาและการทำงานของระบบ เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) สารอื่น ๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย

2.6.2.2 ตัวแปรขั้วไฟฟ้า (Electrode parameter) ได้แก่

- ธรรมชาติของปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย เนื่องจากการกระจายตัว

ของประจุที่บริเวณดังกล่าวแตกต่างจากบริเวณที่ห่างออกมาจากขั้วไฟฟ้า (Bulk solution) ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันของขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความสามารถในการแบ่งแยกประจุทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้าและความยากง่ายของการถ่ายโอนประจุเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า โดยหลักการการทำงานของขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหรือรับอิเล็กตรอนของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารเคมีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- พื้นที่ผิว ลักษณะ รูปร่างและขนาดของขั้วไฟฟ้า หากขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสารละลายในเซลล์ จะส่งผลทำให้สารละลายในเซลล์เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง และความเข้มข้นของสารในบริเวณที่ห่างออกจากขั้วเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ช่วยปรับปริมาณประจุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ของขั้วไฟฟ้าต่ำลงอีกด้วย

2.6.2.3 ตัวแปรภายนอก (External parameters) ได้แก่

- อุณหภูมิ มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- ความดัน มีผลต่อระบบที่เป็นแก๊ส
- เวลา มีผลต่อปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยา

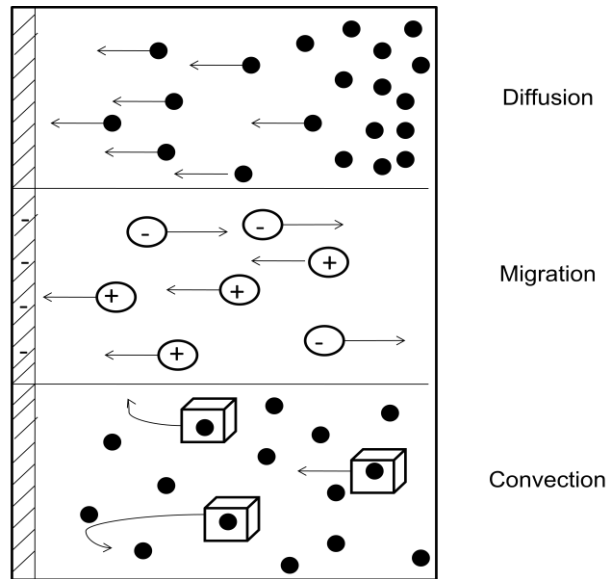
2.7 การถ่ายโอนมวลในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Transport Phenomena) [9]

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น โดยไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการเคลื่อนย้ายหรือถูกนำพามายังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ก่อนจะเกิดการส่งผ่านประจุหรืออิเล็กตรอนผ่านรอยต่อระหว่างสารละลายและขั้วไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายไปที่ผิวของขั้วไฟฟ้าสามารถเกิดได้ 3 กลไก ดังนี้

- การแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ จนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย (concentration gradient) โดยอัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของไอออน

- การไมเกรชัน (Migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลาย โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบหรือขั้วแคโทด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกหรือขั้วแอโนด

- การพา (Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย หรือจากกลไกภายนอก เช่น การกวนสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย การถ่ายโอนมวลสารแต่ละกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2.7

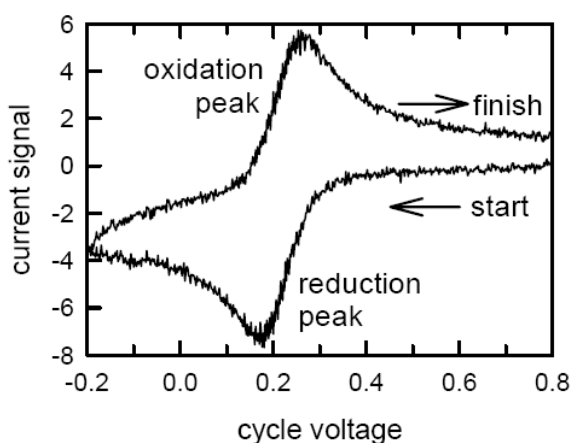


รูปที่ 2.7 กลไกการถ่ายโอนมวลสารแต่ละกระบวนการ [9]

2.8 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) [8, 10]

เป็นกระบวนการเคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์ที่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการพอกพูนของโลหะบนชิ้นงานที่ต้องการ โดยใช้สารละลายที่มีไอออนของโลหะที่ต้องการเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และให้ชิ้นงานที่ต้องการพอกพูนอยู่ที่ขั้วแคโทด หรือขั้วลบ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะบนผิวหน้าชิ้นงาน ส่วนขั้วแอโนด หรือขั้วบวก อาจเป็นขั้วละลาย (Dissolved anode) ที่เป็นโลหะชนิดเดียวกันกับที่ต้องการพอกพูนบนชิ้นงานเพื่อให้ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คงที่ โดยที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะที่เป็นขั้วละลายเป็นไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควรทำให้ขั้วแอโนดอยู่ในภาวะการเกิดปฏิกิริยาตลอดเวลา (Active) ซึ่งสามารถทำได้โดยให้ขั้วแอโนดมีพื้นที่ผิวมาก หรืออาจใช้ขั้วที่ไม่ละลาย (Inert anode) และมีความเสถียรสูง ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการควบคุมความเข้มข้นของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้คงที่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเกิดเป็นแก๊สออกซิเจน ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดใน

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งมีลักษณะเป็นพีค และเมื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าลงด้วยอัตราเร็วเท่าเดิมกระแสไฟฟ้าก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงค่าต่ำสุด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันซึ่งมีลักษณะเป็นพีคในทิศทางตรงข้ามกับพีคแรก ลักษณะของไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จะมีลักษณะที่สมมาตรกันดังแสดงในรูปที่ 2.9 แต่ถ้าปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้จะไม่เกิดพีค และถ้าปฏิกิริยาผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะพีคที่เกิดขึ้นจะไม่สมมาตรกัน ข้อดีของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี คือ สามารถบอกกลไกการเกิดปฏิกิริยา ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชัน และสามารถบอกถึงการดูดซับของสารต่างๆ บนพื้นผิวขั้วอิเล็กโทรดได้อีกด้วย จากข้อมูลที่ได้เหล่านี้สามารถใช้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ และยังสามารถระบุชนิดของสารต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายได้อีกด้วย



รูปที่ 2.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน [11]

2.10 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) [10]

ประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีไฟฟ้า นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า เนื่องจากระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้น กระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.13 โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสามารถบอกประสิทธิภาพของปฏิกิริยาที่เกิดบนขั้วอิเล็กโทรด แต่ไม่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของเซลล์เคมีไฟฟ้าทั้งระบบ โดยค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของขั้วแคโทดและแอโนดไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน

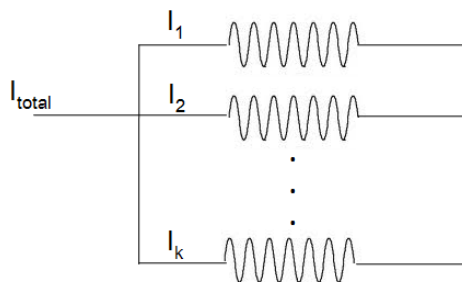
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2.13)$$

ซึ่งมวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีสามารถคำนวณได้ตามกฎของฟาราเดย์ โดยจำนวนประจุที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาในการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14)

$$\int_0^t I dt = mnF \quad (2.14)$$

โดยที่	Q	คือ	จำนวนประจุ (คูลอมบ์)
	I	คือ	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	t	คือ	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)
	m	คือ	จำนวนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไป (กรัมโมล)
	n	คือ	จำนวนอิเล็กตรอน (อิกวิวาเลนซ์ต่อกรัมโมล)
	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96500 คูลอมบ์ต่ออิกวิวาเลนซ์)

ในกรณีที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีหลายปฏิกิริยาเกิดแข่งขันกันบนขั้วอิเล็กโทรด โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเหล่านี้เกิดการแข่งขันแบบขนาน ดังรูปที่ 2.10 จากรูปแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาถูกใช้ในปฏิกิริยาอื่นด้วย นั่นคือ ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ามักมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาเดียวที่ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง



รูปที่ 2.10 แผงวงจรแสดงกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาแข่งขันแบบขนาน [10]

โดยที่ I_{total} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด
 I_k คือ กระแสไฟฟ้าปริมาณ k (แอมแปร์) ที่ใช้ในปฏิกิริยา
 เมื่อ $I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_k$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elorza-Rodriguez และคณะ [12] ศึกษาการแยกทองและเงินออกจากแหล่งแร่ pyritic refractory ประเทศเม็กซิโก ในสารละลายกรดโดยใช้ไอโซนก่อนสารละลายไซยาไนด์ (Cyanidation) โดยในการให้ไอโซนจะให้โดยตรง คือ ให้ในสารละลายของแร่ และให้ทางอ้อม คือ ให้สัมผัสกับไอโซนอิมมิตัวในน้ำสามครั้งก่อนทำการแยก พบว่า การให้ไอโซนทางอ้อมไม่มีผลต่อการแยกสำหรับตัวอย่างแร่ที่มีไฟรตร้อยละ 68 แต่การให้ไอโซนโดยตรงจะช่วยลดเวลาที่ใช้สารละลายไซยาไนด์ จาก 40 เป็น 24 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างแร่ที่มีไฟรตร้อยละ 38 การให้ไอโซนทางอ้อมให้ประสิทธิภาพการแยกทองและเงินสูงขึ้นจากร้อยละ 53 เป็นร้อยละ 88 และจากร้อยละ 26 เป็นร้อยละ 78 ตามลำดับ

Breuer และคณะ [13] ศึกษากระบวนการชะละลายทองและทองแดงโดยใช้สารละลายที่มีไอออนของ $Cu(CN)_2^{2-}$ พบว่าอัตราการชะละลายทองในสารละลายที่มีไอออนของ $Cu(CN)_2^{2-}$ ที่อิมมิตัวด้วยอากาศช้ากว่าในสารละลายไซยาไนด์ แต่การชะละลายของทองแดงที่เมื่อทองแดงเป็นอัลลอยด์กับทอง สำหรับการชะละลายของ Chalcocite (Cu_2S) ในสารละลายไซยาไนด์พบว่า ไอออนซัลไฟด์ที่ละลายออกมาส่งผลต่อการชะละลายทอง ทำให้การชะละลายทองในสารละลายที่มีไอออนของ $Cu(CN)_2^{2-}$ ที่อิมมิตัวด้วยอากาศเร็วกว่าในสารละลายไซยาไนด์

Shen และ Xue [14] ศึกษาเทคนิคการสกัดด้วยกรดและใช้ตัวสกัดอินทรีย์คือ 2-hydroxy-4-sec-octanoyl diphenyl-ketoxime ในสารละลายคีโรซีน เพื่อสกัดไอออนแพลเลเดียม (Pd(II)) ไอออนทอง (Au(III)) และไอออนแพลทินัม (Pt(IV)) และตามด้วยการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกในการสกัดทองและแพลทินัม พบว่าสามารถสกัดไอออนแพลเลเดียมด้วยสารละลายอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 99.9 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูง (5 M) สามารถสกัดทองด้วยสารละลายอินทรีย์ได้ดี ในการแยกทองออกจากสารละลายอินทรีย์สามารถทำได้ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2 และใช้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้นสูงในการแยกแพลเลเดียม โดยสามารถแยกแพลเลเดียมได้มากกว่าร้อยละ 99.9 ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลาร์และแยกทองได้มากกว่าร้อยละ

99.9 ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายอินทรีย์ต่อน้ำเท่ากับ 2 ต่อ 1

ไชยเชษฐ และนพวรรณ [15] ศึกษาการชะละลายเงิน ทองและทองแดงออกจากกากตะกอนด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยชนิดของตัวทำละลายที่ศึกษาคือ กรดไนตริก กรดซัลฟูริกและไทโอยูเรีย ผลการทดลองพบว่ากรดไนตริกมีความสามารถในการชะละลายเงินและทองแดงได้ดี การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกจาก 1-9 โมลต่อลิตรมีผลมากต่อการชะละลายของเงิน โดยมีค่าการนำกลับจากร้อยละ 2.2 เป็น 76.3 แต่มีผลเล็กน้อยต่อการชะละลายของทองแดง โดยมีค่าการชะละลายร้อยละ 54.1 ถึง 70.5 การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1-6 โมลต่อลิตร มีผลเล็กน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการนำกลับทองแดงและทอง อุณหภูมิมีผลต่อการชะละลายโลหะชนิดต่างๆ ไม่มากนัก แต่มีผลต่ออัตราเร็วของการชะละลายในช่วง 1 ชั่วโมงแรก การชะละลายของเงินและทองแดงในกรดไนตริกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนตะกอนต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

Yap และ Mohamed [16] ศึกษาการนำกลับทองจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีโลหะวิทยา (hydrometallurgy) ในสารละลายไซยาไนด์ ตามด้วยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ โดยชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาคือ ขั้วไฟฟ้า porous graphite reticulated vitreous carbon (RVC) ขั้วไฟฟ้าทองแดงและขั้วไฟฟ้า stainless steel ผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้า reticulated vitreous carbon (RVC) มีอัตราการพอกพูนที่สูงที่สุดและสามารถนำกลับทองได้มากกว่าร้อยละ 99 ภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอื่นๆ ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้

วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล [17] ศึกษาการชะละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยสารละลายกรด โดยสารละลายกรดที่ใช้ศึกษาคือ กรดซัลฟูริก ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ร้อยละของแข็ง อัตราความเร็วรอบการกวนและอุณหภูมิ พบว่าสังกะสีละลายได้ทั้งหมดในช่วงความเป็นกรด-เบส 1-2 เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นสังกะสีจะละลายได้น้อยลง และเมื่อเพิ่มร้อยละของแข็งให้มากขึ้นพบว่า สังกะสีละลายได้มากขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 1.4 น้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิมีผลต่อการละลายของสังกะสีไม่มากนัก และอัตราความเร็วรอบการกวนในช่วงที่ศึกษา (200-500 รอบต่อนาที) ไม่มีผลต่ออัตราเร็วของการละลาย

Yavuz และ Ziyadanogullari [18] ศึกษาการนำกลับทองและเงินจากกากตะกอนซึ่งประกอบด้วยโลหะทองแดง ซิลิเนียม และเทลลูเรียม โดยในขั้นตอนแรกได้ทำการกำจัดโลหะทองแดง ซิลิเนียม เทลลูเรียม และเงินส่วนใหญ่ออกจากกากตะกอนก่อนด้วยตัวทำละลาย

ไทโอยูเรีย เมื่อกำจัดโลหะชนิดต่างๆ แล้ว สกัดทองคำและเงินที่เหลืออยู่ด้วยสารละลายไทโอยูเรีย ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถสกัดทองคำและเงินได้ในปริมาณมาก

ศุภกันต์ สกุลตั้ง [19] ศึกษาการนำกลับโลหะนิกเกิลและโคบอลต์จากแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือที่ใช้แล้ว 2 ชนิด คือ 1) นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) และ 2) ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ (Li-ion) โดยศึกษาผลของชนิดตัวทำละลาย ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ในช่วงความเข้มข้น 1 ถึง 6 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลาย 10 ถึง 40 กรัมต่อลิตร เวลาในการชะละลาย 5 ถึง 120 นาที และอุณหภูมิในการชะละลายที่ 303 ถึง 363 เคลวิน ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถชะละลายโลหะทั้งสองชนิดได้มากกว่าสารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายกรดไนตริก โดยสามารถชะละลายนิกเกิลได้สูงถึงร้อยละ 92 และชะละลายโคบอลต์ได้ร้อยละ 84 ตามลำดับ

Pruksathorn และ Dumronglerd [20] ศึกษาการนำกลับตะกั่วจากของเสียของโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยทำการชะละลายตะกั่วตามด้วยการนำกลับด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า ในขั้นตอนการชะละลาย สารละลายกรดไนตริกและสารละลายกรดแอสติกสามารถละลายตะกั่วออกไซด์ได้ดีกว่าสารละลายไฮเดรอกไซด์ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก โดยสามารถชะละลายตะกั่วได้มากกว่าร้อยละ 95 เมื่อใช้สารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายกรดแอสติกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นตัวทำละลาย ที่อัตราส่วนร้อยละของเสียต่อตัวทำละลาย 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขั้นตอนการนำกลับด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าพบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการนำกลับตะกั่วเมื่อใช้สารละลายกรดแอสติกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ในช่วง 8.8 ถึง 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร และสำหรับสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ในช่วง 15 และ 27 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ โดยสามารถนำกลับตะกั่วได้มากกว่าร้อยละ 95 ที่ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าร้อยละ 100

Reyes-Cruz และคณะ [21] ศึกษาการพอกพูนแบบเลือกเกิดของโลหะทองและเงินในภาวะที่มีความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายสูง ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรีโดยใช้สารละลายที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า การพอกพูนของทองแดงเกิดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าการพอกพูนของเงินและทอง และโวลแทมโมแกรมของสารละลายไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไอออนทองและไอออนเงินในสารละลายต่ำ และความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายสูง

พบว่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายไม่ส่งผลต่อการพอกพูนของเงินและทอง เมื่อใช้สารละลายที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการและใช้ขั้ว RVC เป็นขั้วแคโทด

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดทองแดง และ ขั้วคาร์บอน
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ได้แก่ Saturated Calomel Electrode (SCE)
3. ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) ได้แก่ ตะแกรงแพลทินัม
4. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น Auto Lab, model PG stato 30
5. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
6. แท่งกวนสาร (Magnetic bar)
7. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Sartorius
8. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply)
9. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
10. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, ยี่ห้อ Varian รุ่น AA-220)
11. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, model XRF-EDS ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED 2000)
12. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV และ Link ISIS Series 300)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37 %w/v) บริษัท Qrec
2. สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น (98 % w/v) บริษัท Qrec
3. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (65% w/v) บริษัท Qrec
4. ไทโอยูเรีย
5. น้ำปราศจากไอออน

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะในตัวอย่างของเสีย

การหาปริมาณทองในกากของเสียของการถลุงทองที่ได้จากโรงงาน Gold Field Refinery Co., Ltd. ในงานวิจัยนี้ทำการทดลอง 2 เทคนิค คือ

3.3.1.1 เทคนิควิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)

1. อบตัวอย่างของเสียที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นบดให้ละเอียด ร่อนให้มีขนาดเล็กกว่า 850 ไมโครเมตร
2. ชั่งตัวอย่างของเสียที่ผ่านการอบและบดแล้ว 9 กรัม ผสมกับเซลลูโลส 1 กรัม นำไปอัดเป็นเม็ด แล้วนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)

3.3.1.2 เทคนิคการย่อยด้วยไมโครเวฟ

การหาปริมาณทองในตัวอย่างของเสียด้วยเทคนิคการย่อยด้วยไมโครเวฟในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการย่อยแบบ Sludge sample (General method, application note 070) และการย่อยแบบ Powdered rocks (General method, application note 048) ซึ่งเป็นวิธีการย่อยตัวอย่างด้วยกรดในภาชนะปิดและใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อย่อยตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างของเสียทำได้ดังนี้

- การย่อยแบบ Sludge sample (General method, application note 070)
 1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 1 กรัมลงในภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทน (Tetrafluoromethane vessel, TFM)
 2. เติมน้ำละลายกรดไนตริกเข้มข้น 8 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร
 3. ปิดฝาภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทน แล้วนำไปใส่ในเครื่องย่อยไมโครเวฟ ซึ่งภาชนะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างของเสียแสดงดังตารางที่ 3.1
 4. เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟแล้ว รอให้อุณหภูมิของเครื่องไมโครเวฟลดลงถึง 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทนออกจากเครื่องย่อยไมโครเวฟ

5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 100 มิลลิลิตร
6. กรองสารละลายที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

- การย่อยแบบ Powdered rocks (General method, application note 048)

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 0.2 กรัม ลงในภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทน
2. เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เข้มข้น 5 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร
3. ปิดฝาภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทน แล้วนำไปใส่ในเครื่องย่อยไมโครเวฟ ซึ่งภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างของเสียแสดงดังตารางที่ 3.1
4. เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟแล้ว รอให้อุณหภูมิของเครื่องไมโครเวฟลดลงถึง 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำภาชนะเตตระฟลูออโรมีเทนออกจากเครื่องย่อยไมโครเวฟ
5. เทสารละลายลงในขวดที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE bottle, Low-density polyethylene) ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 10 มิลลิลิตร
6. ให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อระเหยกรดไฮโดรฟลูออริกจนสารละลายแห้ง
7. เติมสารละลายกรดกัดทองเข้มข้น (ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นและสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นในอัตราส่วน 3 : 1) และสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นอย่างละ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 100 มิลลิลิตร
8. กรองสารละลายที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างของเสียด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

- การย่อยแบบ Sludge sample (General method, application note 070)

ขั้นตอนที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	2.5	90	1,000
2	5	130	1,000
3	3.5	190	1,000
4	10	190	1,000

- การย่อยแบบ Powdered rocks (General method, application note 048)

ขั้นตอนที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	10	220	1,000
2	5	220	1,000
3	5	240	1,000
4	10	240	1,000

3.3.2 การชะละลายตัวอย่างของเสีย

3.3.2.1 ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 10 กรัม
2. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (อัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:100)
3. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 240 และ 300 นาที (C_t)
4. กรองสารละลาย
5. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

6. ทำซ้ำในข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายเป็น สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร สารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 0.5 และ 1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดกัดทอง

7. นำผลการวิเคราะห์มาหาค่าร้อยละการชะละลายของทอง

3.3.2.2 ศึกษาผลของการให้ความร้อนตัวอย่างของเสีย

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 10 กรัม และให้ความร้อนตัวอย่างของเสียที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง

2. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 100)

3. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 240 และ 300 นาที (C_t)

4. กรองสารละลาย

5. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

6. นำผลการวิเคราะห์มาหาค่าร้อยละการชะละลายของทอง

3.3.2.3 ศึกษาผลของออกซิเจนที่มีต่อค่าร้อยละการชะละลายเมื่อใช้ สารละลายไทโอยูเรียเป็นตัวทำละลาย

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 10 กรัม

2. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 ต่อ 100) โดยทำการเติมออกซิเจนระหว่างดำเนินปฏิกิริยา

3. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 240 และ 300 นาที (C_t)

4. กรองสารละลาย

5. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

6. นำผลการวิเคราะห์มาหาค่าร้อยละการชะละลายของทอง

3.3.2.4 ศึกษาผลของอัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 0.25 กรัม
2. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดกัดทองเข้มข้นปริมาตร 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.0025 ต่อ 1) กวนสารละลายเป็นเวลา 180 นาที
3. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร
4. กรองสารละลาย
5. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
6. ทำซ้ำในข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนอัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลายเป็น 0.005 0.01 0.02 และ 0.03
7. ทำซ้ำในข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร
8. นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณค่าร้อยละการชะละลายของทอง โดยที่ร้อยละการชะละลายทองสามารถคำนวณได้ตามภาคผนวก ก-3

3.3.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิบัติการการชะละลายทอง

1. ชั่งตัวอย่างของเสีย 10 กรัม
2. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร (อัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.01:1) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)
3. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 5 10 15 30 45 60 90 120 150 และ 180 นาที (C_t)
4. กรองสารละลาย
5. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAs)
6. ทำซ้ำในข้อ 1-5 แต่อุณหภูมิในการทดลองเป็น 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยจัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1
7. นำผลการวิเคราะห์มาหาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการชะละลายของทอง

4. จ่ายกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์ หรือที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด และขั้วแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด ทำการกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 700 รอบต่อนาที
5. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ
6. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
7. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.01 – 0.1 แอมแปร์ หรือช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 – 318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
8. นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณค่าร้อยละการนำกลับทอง โดยร้อยละการนำกลับทองสามารถคำนวณได้ตามภาคผนวก ก-4

3.3.4.3 ศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าในการนำกลับทอง

1. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.0025:1 เป็นเวลา 180 นาที จากนั้นกรองสารละลายที่ได้
2. เก็บสารละลายที่ได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งใช้เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองในสารละลาย (C_0) เพื่อใช้คำนวณหาค่าร้อยละการนำกลับทอง
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.2
4. จ่ายกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์ หรือที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด และขั้วแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด ทำการกวนสารละลาย
5. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ (C_1)
6. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่างสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

7. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนขั้วแคโทดเป็นขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วทองแดงโดยจ่ายกระแสไฟฟ้า 0.04 แอมแปร์ และ 0.01 แอมแปร์ ตามลำดับ โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

8. นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณค่าร้อยละการนำกลับทอง

3.3.4.4 ศึกษาผลของขนาดของขั้วไฟฟ้าในการนำกลับทอง

1. ชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.0025 ต่อ 1 เป็นเวลา 180 นาที จากนั้นกรองสารละลายที่ได้

2. เก็บสารละลายที่ได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่งสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งใช้เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองในสารละลาย (C_0) เพื่อใช้คำนวณหาค่าร้อยละการนำกลับทอง

3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.2

4. จ่ายกระแสไฟฟ้า 0.01 แอมแปร์ หรือที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด ที่มีพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 4.14 cm^2 และขั้วแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด ทำการกวนสารละลาย

5. เก็บสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 15 30 45 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ (C_t)

6. วิเคราะห์หาปริมาณทองในตัวอย่งสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

7. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนขนาดของขั้วแคโทดจาก 3.14 ตารางเซนติเมตร เป็น 9.42 ตารางเซนติเมตร

8. นำผลการวิเคราะห์มาคำนวณค่าร้อยละการนำกลับทอง

3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ในการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ขั้วคาร์บอน ขั้วทองแดง และขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

โดยทำการวิเคราะห์ห้ชั่วไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่เกิดการพอกพูนที่ชั่วไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายและการนำกลับของเสียของกระบวนการสกัดทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายและอัตราส่วนระหว่างของเสียต่อตัวทำละลาย และตัวแปรที่มีผลต่อการนำกลับของ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้าและขนาดของขั้วไฟฟ้า

4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะในตัวอย่างของเสีย

ตัวอย่างของเสียจากกระบวนการสกัดทองที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีสีดำ การหาปริมาณทองในตัวอย่างของเสียในงานวิจัยนี้ทำการทดลอง 2 เทคนิค คือ

4.1.1 เทคนิควิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างของเสียจากกระบวนการสกัดทองด้วยเทคนิค XRF พบว่าปริมาณธาตุที่พบมากที่สุด คือ ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 48 รองลงมาคือ โซเดียม (Na) ร้อยละ 13.80 และสังกะสี (Zn) ร้อยละ 12.50 ตามลำดับ และธาตุอื่นๆ ที่พบในตัวอย่างของเสียแสดงดังตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณทองในตัวอย่างของเสีย เนื่องจากทองในตัวอย่างของเสียมีปริมาณน้อยมาก และถูกล้อมรอบด้วยธาตุชนิดอื่น ประกอบกับขนาดอนุภาคของทองที่มีขนาดเล็ก (ในระดับไมโครเมตร หรือ อังสตรอม) ทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้ [22, 23] รวมถึงข้อจำกัดของเทคนิค XRF ที่วิเคราะห์สารในรูปสารประกอบออกไซด์ แต่เนื่องจากทองไม่เกิดสารประกอบออกไซด์จึงไม่สามารถตรวจพบได้

4.1.2 เทคนิคการย่อยด้วยไมโครเวฟ

จากการย่อยตัวอย่างของเสียด้วยเทคนิคไมโครเวฟและวิเคราะห์หาปริมาณทองในสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAs) พบว่าการย่อยตัวอย่างแบบ Sludge sample ให้ค่าปริมาณทองเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย และการย่อยตัวอย่างแบบ Powdered rocks ให้ค่าปริมาณทองเฉลี่ย

เท่ากับ 0.16 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย โดยการย่อยตัวอย่างแบบ Powdered rocks สามารถย่อยทองได้มากกว่าการย่อยตัวอย่างแบบ Sludge sample เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างแบบ Powdered rocks ทำที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการสลายพันธะของทองในตัวอย่างของเสีย โดยค่าปริมาณทองที่ได้จากการย่อยตัวอย่างด้วยเทคนิคไมโครเวฟจะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการหาค่าร้อยละการชะละลาย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบในตัวอย่างของเสียจากกระบวนการสกัดทอง

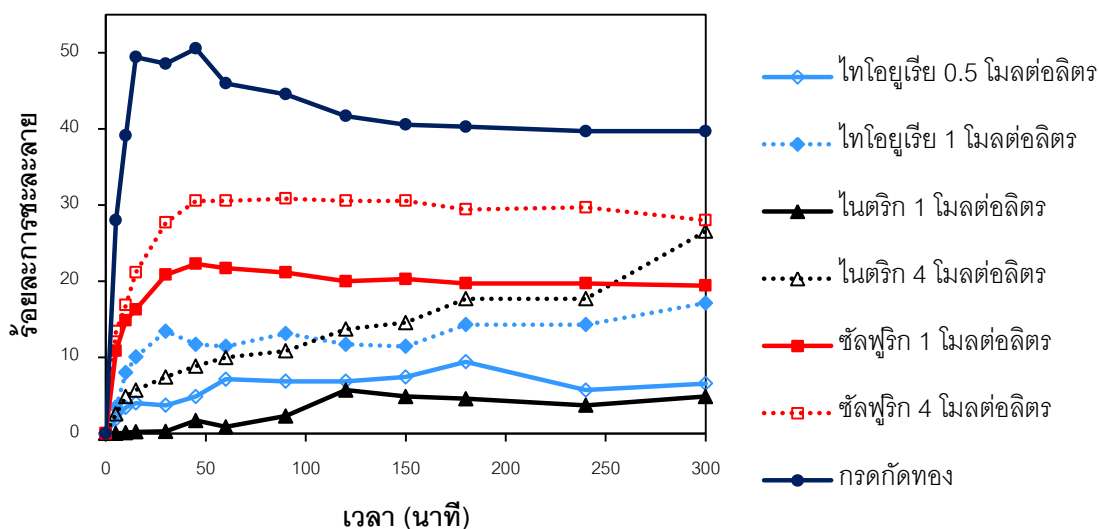
ธาตุ	ร้อยละ
ซิลิกอน (Si)	48.00
โซเดียม (Na)	13.80
สังกะสี (Zn)	12.50
เหล็ก (Fe)	10.20
อะลูมิเนียม (Al)	7.35
แคลเซียม (Ca)	3.00
ทองแดง (Cu)	1.66
อื่นๆ	3.49
รวม	100.00

4.2 การชะละลายโลหะจากตัวอย่างของเสีย

4.2.1 ผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

เพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่สามารถชะละลายทองจากตัวอย่างของเสีย โดยชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารละลายไทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดกัดทอง (Aqua regia) ที่อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:100 อัตราการกวนสารละลาย 700 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.1 พบว่าสารละลายกรดกัดทองสามารถชะละลายทองได้สูงถึงร้อยละ 41 รองลงมาคือ สารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายทองได้ร้อยละ 30 สารละลายกรดไนตริกชะละลายทองได้น้อย เนื่องจากธรรมชาติของสารละลายกรดไนตริกที่ชะละลายเงินได้ดีกว่า โดยค่าความสามารถในการละลาย (Solubility product constant, K_{sp}) ของ ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) มีค่าเท่ากับ 216 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [24, 25] สารละลายไทโอยูเรียชะละลายทองได้น้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้เตรียมสารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 0.5 และ 1 โมลต่อลิตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไทโอยูเรียมากกว่า 1 โมลต่อลิตรไม่สามารถละลายไทโอยูเรียได้ และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป 60 นาที พบว่าร้อยละการชะละลายทองไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงกล่าวได้ว่าการชะละลายทองเข้าสู่สมดุลที่เวลาการทำปฏิกิริยามากกว่า 60 นาที โดยความสามารถในการชะละลายทองสามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้

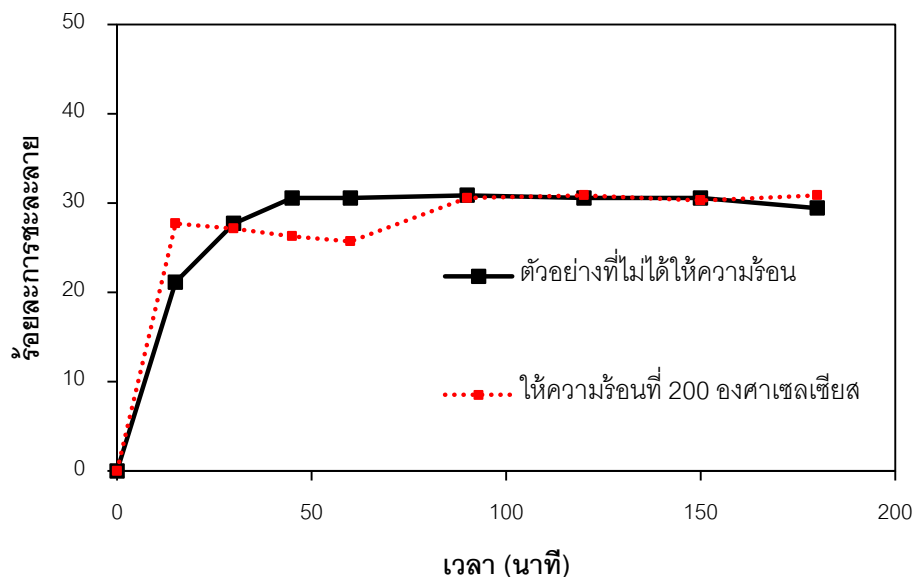
สารละลายกรดกัดทอง > สารละลายกรดซัลฟูริก > สารละลายไทโอยูเรีย > สารละลายกรดไนตริก



รูปที่ 4.1 ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่มีต่อค่าร้อยละการชะละลายของ

4.2.2 ผลของการให้ความร้อนตัวอย่างของเสีย

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการบำบัดสินแร่ด้วยการให้ความร้อนก่อนนำไปชะละลาย เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น ซัลเฟอร์ และเพื่อเพิ่มร้อยละการชะละลายของโลหะ [26] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการให้ความร้อนตัวอย่างของเสียที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ก่อนนำไปชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการชะละลายของทองคำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราเร็วการชะละลายทองในช่วงแรกเร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ให้ความร้อน โดยในสินแร่บางชนิด การให้ความร้อนแก่สินแร่จะทำให้การชะละลายของทองคำ เนื่องจากอนุภาคของทองที่ถูกล้อมรอบอยู่ภายในรูพรุน ซึ่งอัตราการชะละลายถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านรูพรุน [3] ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของการให้ความร้อนต่อค่าร้อยละการชะละลายทอง

4.2.3 ผลของออกซิเจนต่อร้อยละการชะละลายด้วยสารละลายไทโอยูเรีย

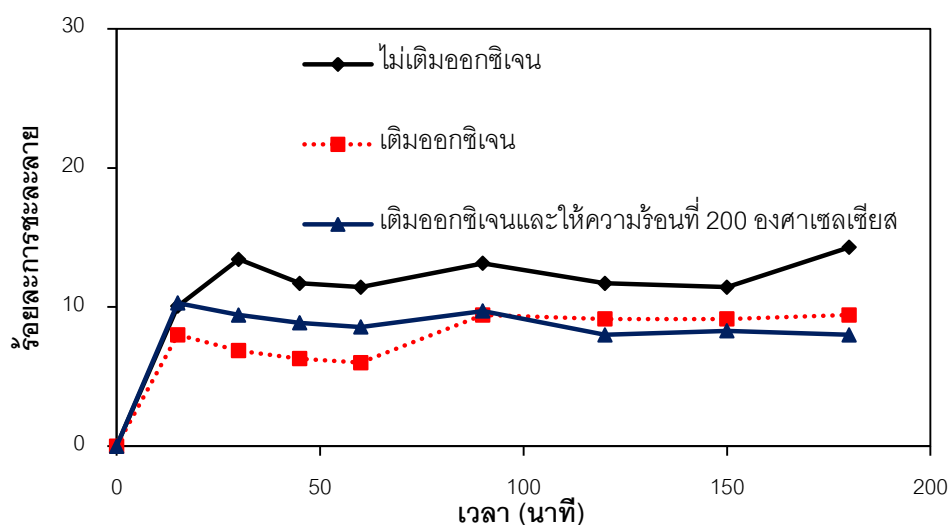
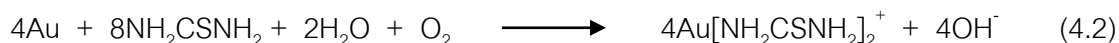
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติมอากาศ (ออกซิเจน) เข้าไประหว่างดำเนินปฏิกิริยาการชะละลายเมื่อใช้สารละลายไทโอยูเรียเป็นตัวทำละลายช่วยเพิ่มร้อยละการชะละลายของทองให้มากขึ้น เนื่องจากออกซิเจนช่วยในการออกซิไดส์ทอง เกิดเป็นไอออนทองในสารละลายที่มีความเสถียร (Au^+) โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองกับไทโอยูเรียจะเสถียรเมื่อเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูป Au^+ [27] ในงานวิจัยนี้ ทำการเติมอากาศลงไปในช่วงปฏิกิริยาการชะละลาย โดยมีสารละลายไทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเป็นตัวทำละลาย พบว่าการเติมอากาศไม่มีผลต่อร้อยละการชะละลายทอง ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายทองของสารละลายไทโอยูเรียแสดงดังสมการที่ (4.1) และเมื่อเติมออกซิเจนในปฏิกิริยา กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ (4.2) โดยออกซิเจนช่วยในการออกซิไดส์จาก Au^0 เป็น Au^+ แต่เนื่องจากทองในตัวอย่างเป็นเสถียรอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนและมีปริมาณน้อย ดังนั้น การเติมออกซิเจนช่วยในการสกัดตัวอย่างเป็นจึงไม่ช่วยในการออกซิไดส์ทองได้เหมือนงานวิจัยที่ผ่านมา [27]

การชะละลายของสารละลายไทโอยูเรีย :



การชะละลายของสารละลายไทโอยูเรียเมื่อมีออกซิเจนในสารละลาย :

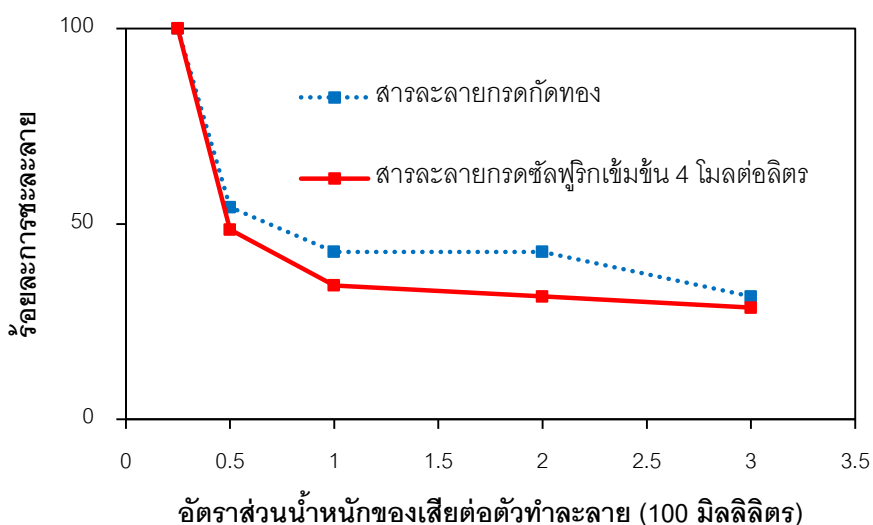


รูปที่ 4.3 ผลของการเติมออกซิเจนต่อค่าร้อยละการชะละลายทองด้วยสารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

4.2.4 ผลของอัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย

เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย ในงานวิจัยนี้ศึกษาในช่วงอัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25:100 ถึงอัตราส่วน 3:100 ผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการชะละลายที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากที่อัตราส่วนสูงมีปริมาณกรดไม่เพียงพอในการชะละลายโลหะจากตัวอย่างของเสีย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายในงานวิจัยนี้คืออัตราส่วนเท่ากับ 0.0025:1 ได้ค่าร้อยละการชะละลายทองเท่ากับร้อยละ 100 สำหรับทั้งสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดกำถกของ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยที่ผ่านมา นั่นคือ ร้อยละที่เหมาะสมในการชะละลายน้อยกว่า 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากเมื่อปริมาณของเสียมากขึ้นทำให้ปริมาณกรดไม่เพียงพอในการชะละลายโลหะจากตัวอย่างของเสีย [20, 28] ที่อัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายมากขึ้นพบว่า สารละลายกรดซัลฟูริกสามารถชะละลายทองได้น้อยกว่าสารละลายกรดกัดทอง เนื่องจากสารละลายกรดกัดทองมีความเป็นกรดมากกว่ากรดซัลฟูริก



รูปที่ 4.4 ร้อยละการชะละลายต่ออัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลาย

จากการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายทองจากตัวอย่างของเสีย คือ ร้อยละตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยที่ภาวะนี้สามารถชะละลายทองได้เท่ากับร้อยละ 100 เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองและสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นตัวทำละลาย

4.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายทอง

การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic model) ของปฏิกิริยาการชะละลายทองสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้โดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เอ็มพิริกัล (Empirical

kinetic model) ซึ่งแบบจำลองนี้แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายเป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียม (Pseudo second order) ดังสมการที่ (4.3) [29, 30]

$$\frac{dC_t}{dt} = k(C_s - C_t)^2 \quad (4.3)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียม (Pseudo second-order rate constant) มีหน่วยเป็นลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที่ C_t คือ ความเข้มข้นของทองในสารละลายที่เวลาใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร C_s คือ ความเข้มข้นของทองในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร และ t คือ เวลาที่ใช้ในการชะละลาย มีหน่วยเป็นนาที่

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (4.3) โดยกำหนดขอบเขต $t = 0$ ถึง t และ $C_t = 0$ ถึง C_t ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) จะได้สมการที่ (4.6)

$$\int_0^{C_t} dC_t = \int_0^t k(C_s - C_t)^2 dt \quad (4.4)$$

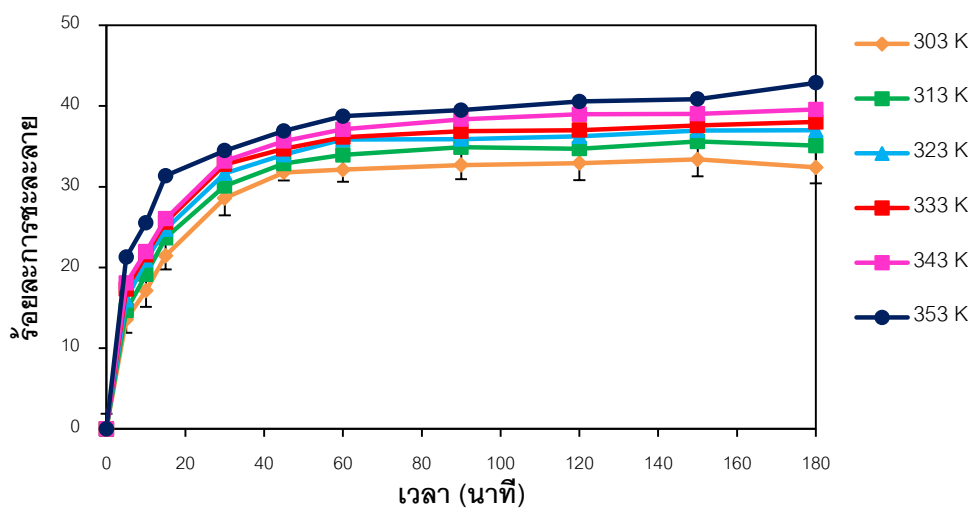
$$C_t = \frac{C_s^2 kt}{1 + C_s kt} \quad (4.5)$$

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{kC_s^2} + \frac{t}{C_s} \quad (4.6)$$

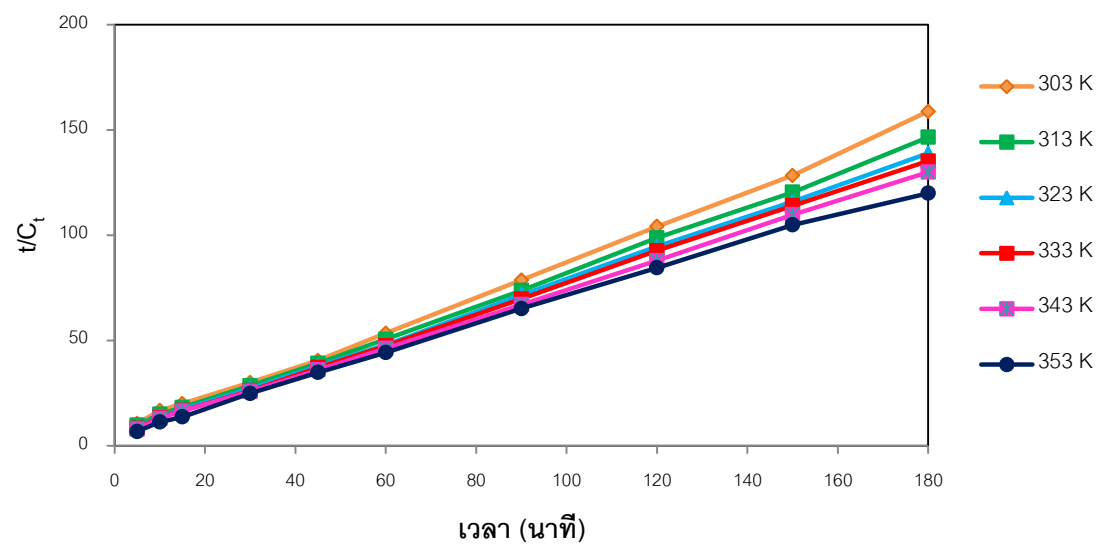
จากสมการที่ (4.6) สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/C_s$ และตัดแกน y ที่ $1/kC_s^2$ จากความชันและจุดตัดดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่า k และ C_s ได้

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การชะละลายของได้ทำการทดลอง โดยทำการชะละลายของด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 80 องศาเซลเซียสและที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 – 180 นาที

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการชะละลายการชะละลายของที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ในช่วงแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะค่อยๆ คงที่ เมื่อนำข้อมูลที่ได้พล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t ที่อุณหภูมิต่างๆ ของปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.6 พบว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการชะละลายของเป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียบจริงตามแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่น่าเสนอมา



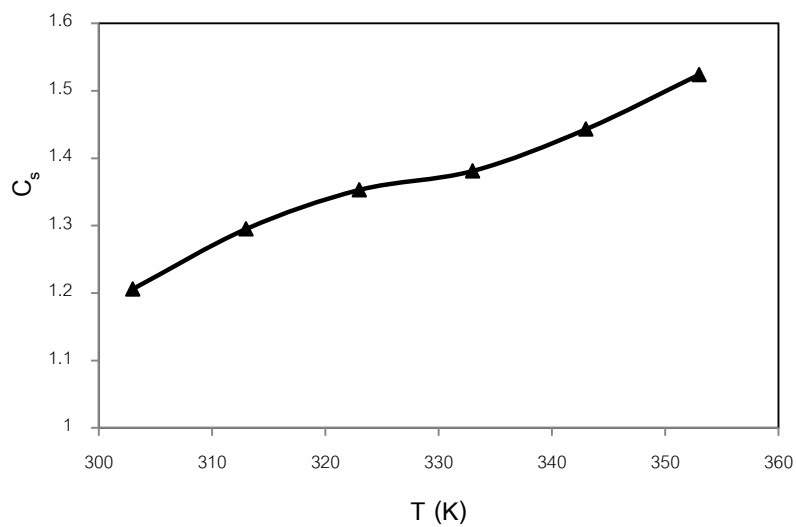
รูปที่ 4.5 ร้อยละการชะละลายของที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.6 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียมของการชะละลายทองที่อุณหภูมิต่างๆ

นำค่า C_s ที่ได้จากความชันกราฟรูปที่ 4.6 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มข้นของโลหะที่ภาวะอิ่มตัวของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ดังสมการที่ (4.7)

$$C_s = 1 \times 10^{-5} T^2 - 0.002 T + 0.933 \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของทองในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ค่า k ของปฏิกิริยาการชะละลายทองที่อุณหภูมิต่างๆ

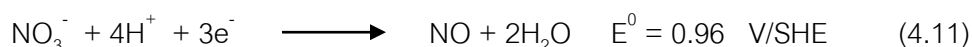
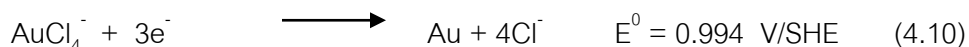
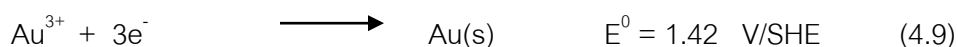
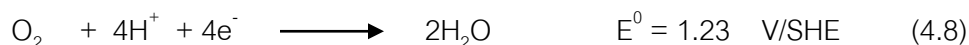
อุณหภูมิ (เคลวิน)	k (ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที)
303	0.122
313	0.107
323	0.104
333	0.105
343	0.093
353	0.091

4.4 การนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

4.4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

การทดลองด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นการทดลองเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนทองในสารละลาย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดกัดทอง (Aqua regia) โดยทำการตรวจกราดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.658 ถึง $+1.342$ โวลต์เทียบกับ Saturated Calomel Electrode (SCE) ด้วยอัตราการตรวจกราด 0.05 โวลต์ต่อวินาที โดยใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วคาโทด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อใช้สารละลายที่ชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบที่ศักย์รีดักชันของทองไม่ชัดเจน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรตไอออน (NO_3^-) ให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะไปเกาะที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด จึงทำให้โลหะเกิดการพอกพูนที่ขั้วอิเล็กโทรดได้น้อย โดยปฏิกิริยารีดักชันของทองจะเริ่มเกิดที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.0 ถึง 1.5 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (SHE) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่ชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์พบที่ศักย์รีดักชันของทองที่ชัดเจน ปฏิกิริยารีดักชันของทองจะเริ่มเกิดที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.2 ถึง 1.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (SHE)

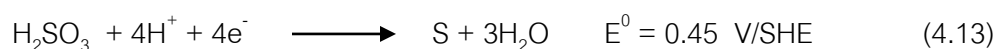
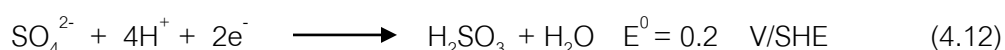
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารละลายที่ชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทอง (Aqua regia) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แสดงดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (4.8) ถึง (4.11)



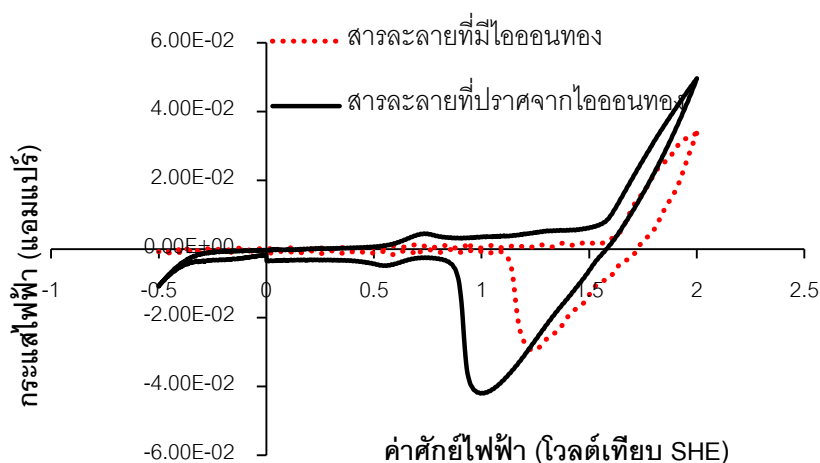
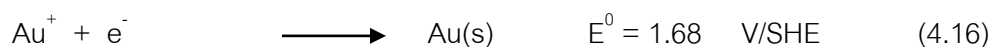
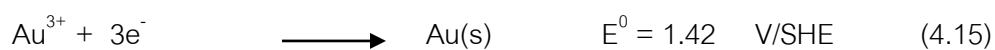
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารละลายที่ชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการทดลองกับสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น

4 โมลต่อลิตรที่ปราศจากไอออนทองในสารละลายเพื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (4.8) ถึง (4.13) พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่ปราศจากไอออนทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ ปฏิกิริยารีดักชันของ SO_4^{2-} และ H_2SO_3 เปรียบเทียบกับสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีไอออนทองอยู่ในสารละลายพบปฏิกิริยารีดักชันของทองร่วมอยู่ด้วย

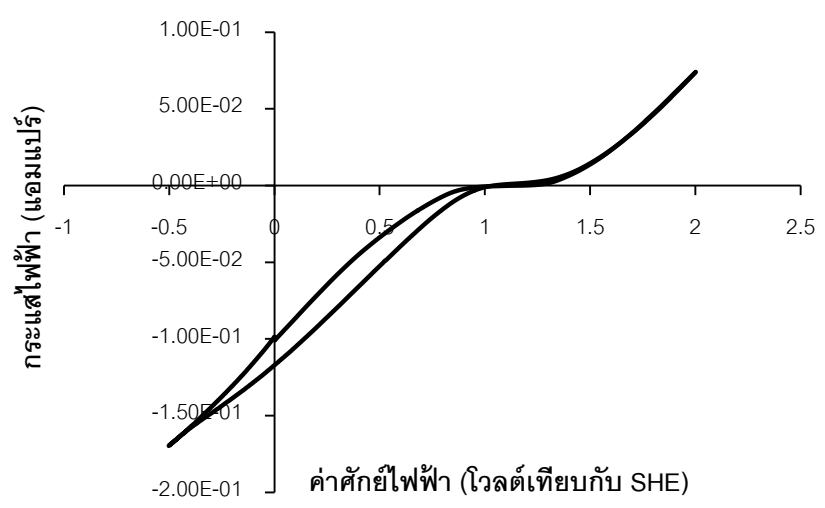
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร :



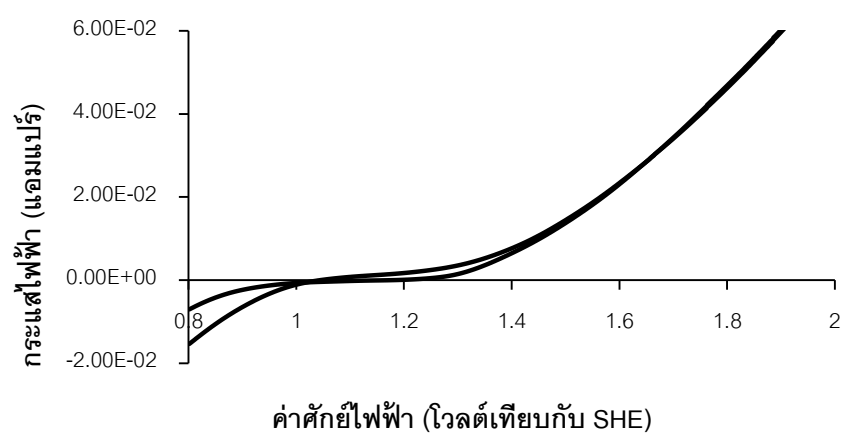
เมื่อใช้สารละลายทองที่ชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (4.14) ถึง (4.16)



รูปที่ 4.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร



(ก)

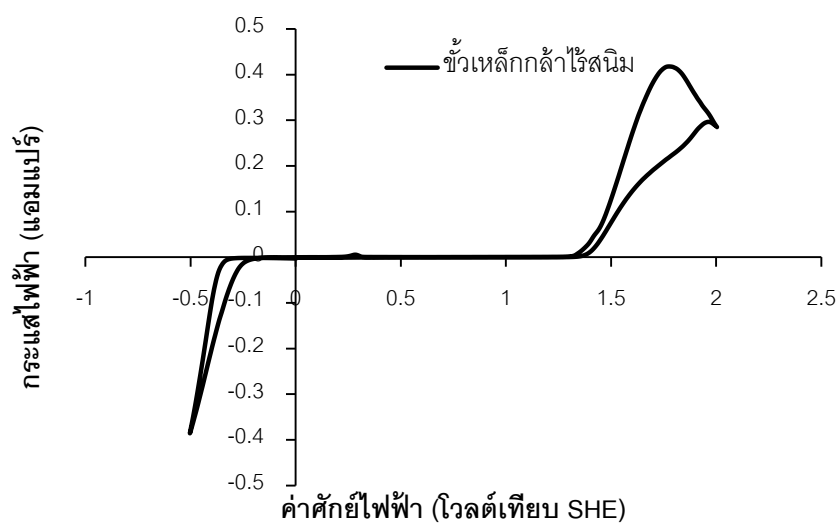


(ข)

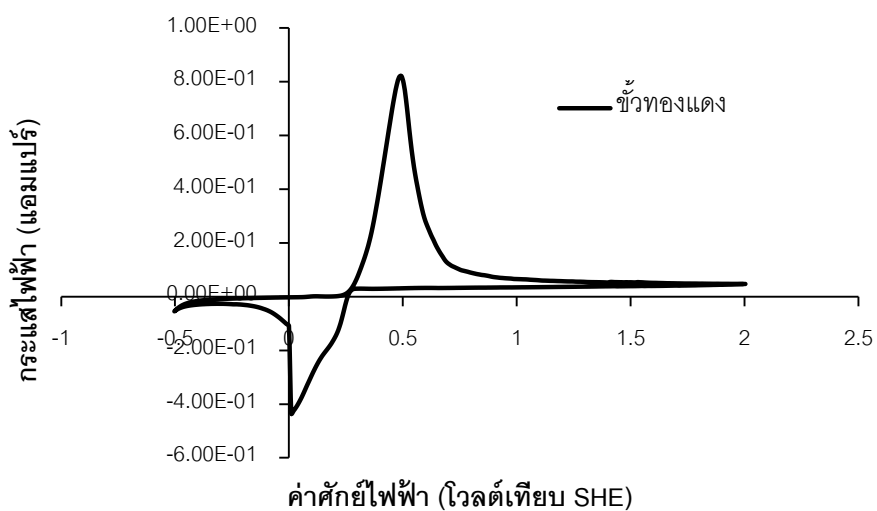
รูปที่ 4.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดกำมะถัน (ก) ทำการตรวจรูดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.502 ถึง $+2.0$ โวลต์เทียบกับ Standard Hydrogen Electrode (SHE) (ข) ขยายแกนค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง 1.0 ถึง 1.5 โวลต์

4.4.2 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้า

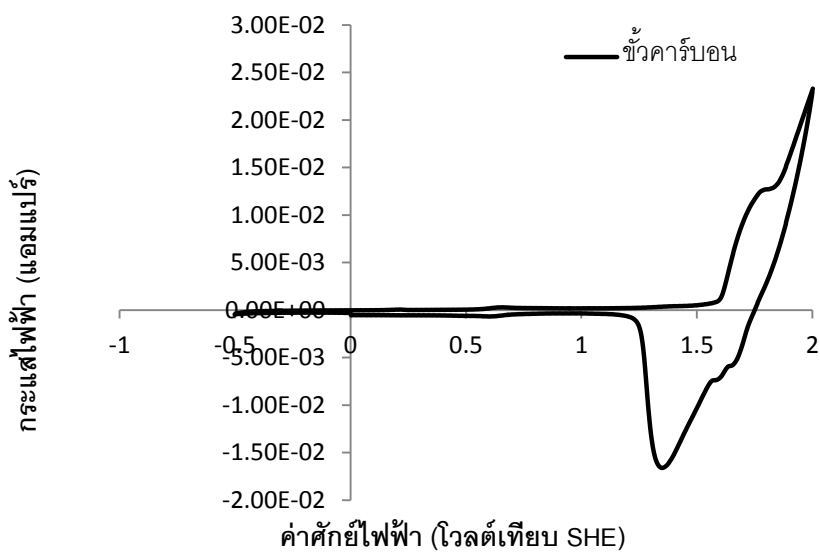
เพื่อศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำกลับของ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษานิดของ ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ ขั้วคาร์บอน ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วทองแดง เมื่อพิจารณาโวลแทมโมแกรม การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองในสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ รูปที่ 4.10 ถึง 4.12 พบว่าเมื่อใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด พบพีคปฏิกิริยา รีดักชันของทองในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า +1.20 ถึง +1.80 โวลต์เทียบกับขั้วมาตรฐานไฮโดรเจน (SHE) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 4.15 ถึง 4.19 เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่พบพีค ปฏิกิริยารีดักชันของทอง และสำหรับขั้วทองแดงพบพีคปฏิกิริยารีดักชันของทองแดง ดังสมการ (4.17) ถึง (4.18)



รูปที่ 4.10 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

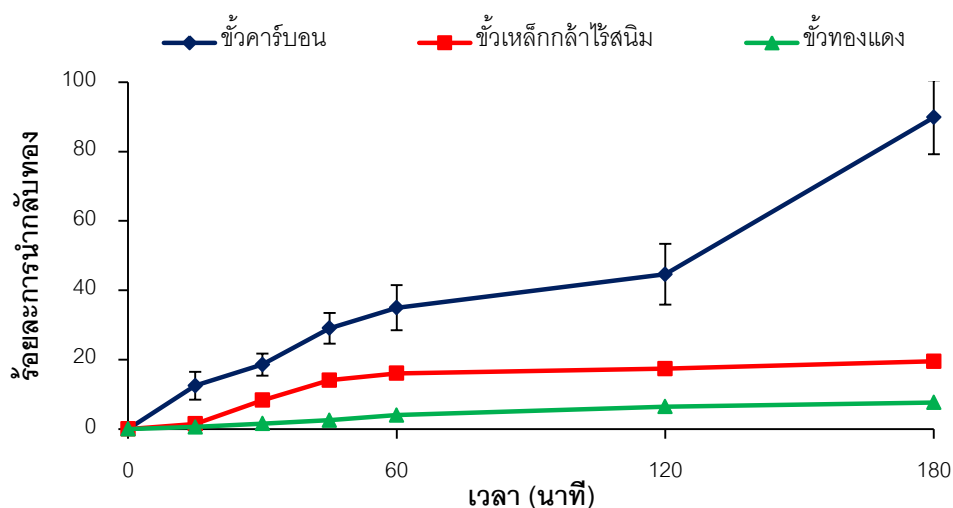


รูปที่ 4.11 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วทองแดง โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

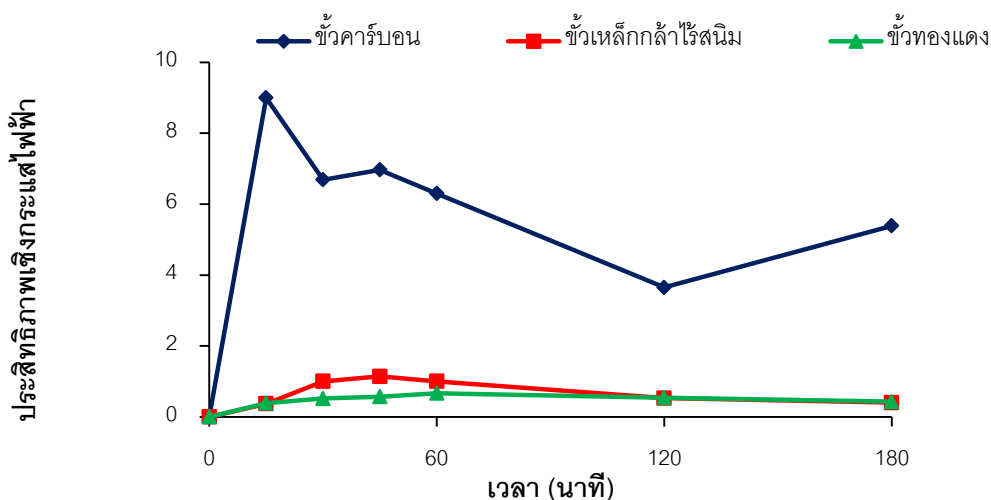


รูปที่ 4.12 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วคาร์บอน โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อศึกษาอัตราการนำกลับทองที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ผลการทดลองพบว่า ขั้วคาร์บอนสามารถนำกลับทองได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 89.87 \pm 10.63 เนื่องจากสมบัติของคาร์บอนมีความเป็นรูปทรงแท่งสูง [31] จึงมีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะไว้ที่ขั้วได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะได้ดีด้วย [32, 33] รองลงมาคือ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมนำกลับทองได้ร้อยละ 19.51 และขั้วทองแดงนำกลับทองได้ร้อยละ 7.67 ตามลำดับ ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการนำกลับทองและประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ดังนั้นในส่วนของการศึกษาต่อไปจะใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.13 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าต่ออัตราการนำกลับทอง โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

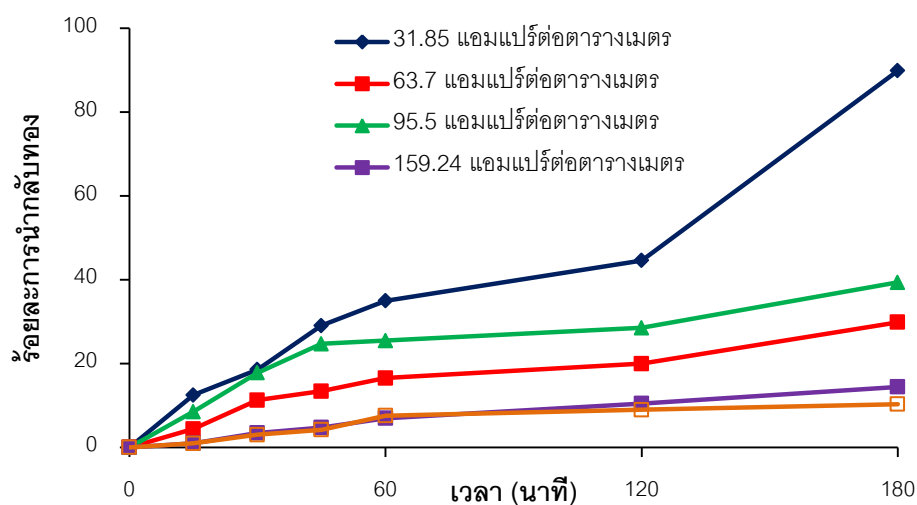
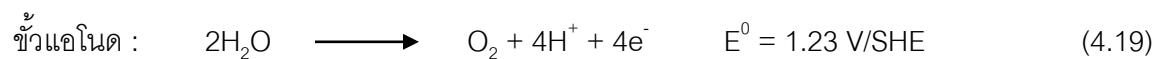


รูปที่ 4.14 ผลของชนิดขั้วไฟฟ้าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

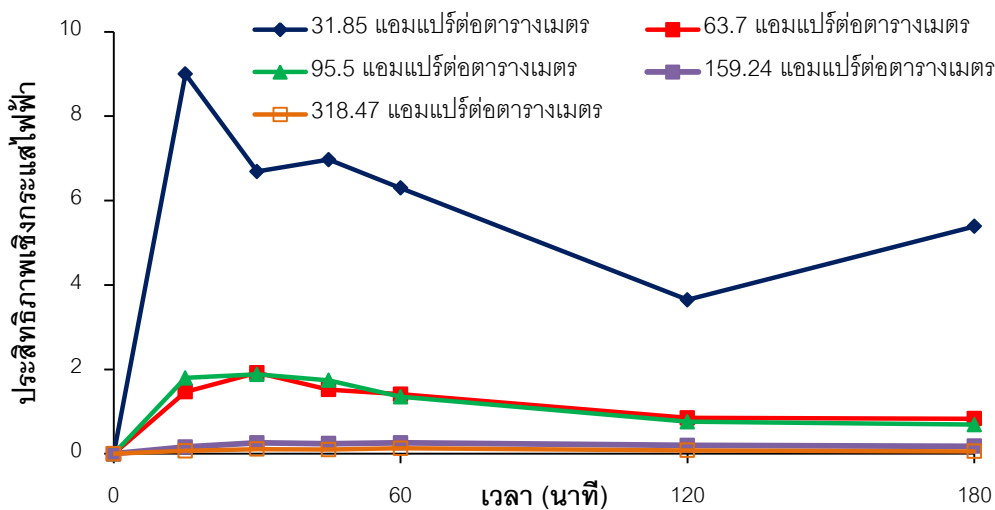
4.4.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการนำกลับทองในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ถึง 318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ขั้วแคโทดทำจากแท่งคาร์บอน ขั้วแอโนดทำจากโลหะแพลทินัมและใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรและสารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรให้ค่าการนำกลับทองที่สูงที่สุดถึงร้อยละ 89.87 ± 10.63 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยร้อยละการนำกลับทองมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแก่ระบบ ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากระบบมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ของไอออนในสารละลาย โดยปฏิกิริยาข้างเคียงในระบบที่อาจเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาการพอกพูนของโลหะชนิดอื่นที่อยู่ในสารละลายและปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจน

ตั้งสมการที่ (4.19) ถึง (4.23) และรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทองและประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ



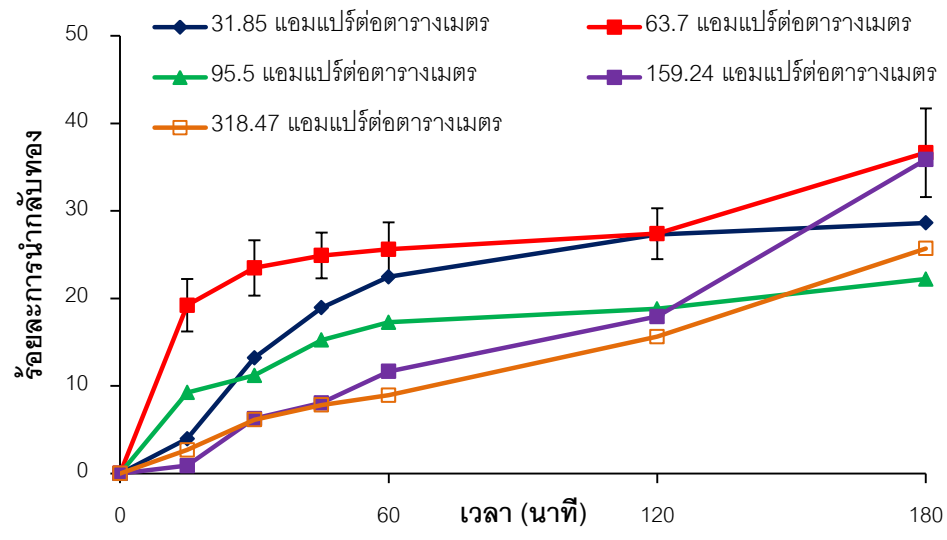
รูปที่ 4.15 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับทอง โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



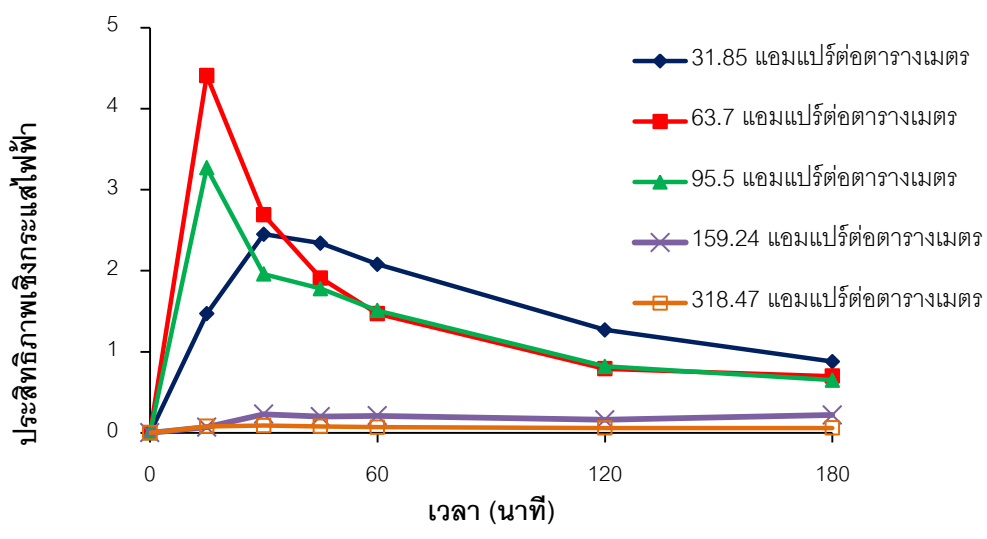
รูปที่ 4.16 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากรูปที่ 4.15 พบว่าที่เวลา 180 นาที ให้ค่าร้อยละการนำกลับของสูงชันมาก เนื่องจากตัวคาร์บอนดูดซับไอออนของไว้ที่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองได้ดี

สำหรับสารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทอง จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าให้ค่าการนำกลับทองที่สูงสุดร้อยละ 36.65 ± 5.08 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 63.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยร้อยละการนำกลับทองมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับเมื่อใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ค่าร้อยละการนำกลับทองและประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าเมื่อใช้สารละลายกรดกัดทอง เนื่องจากเมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในระหว่างดำเนินปฏิกิริยามีฟองแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะไปเกาะที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ทำให้โลหะเกิดการพอกพูนที่ขั้วอิเล็กโทรดได้น้อย ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าจึงมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 4.17 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อร้อยละการนำกลับของ โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



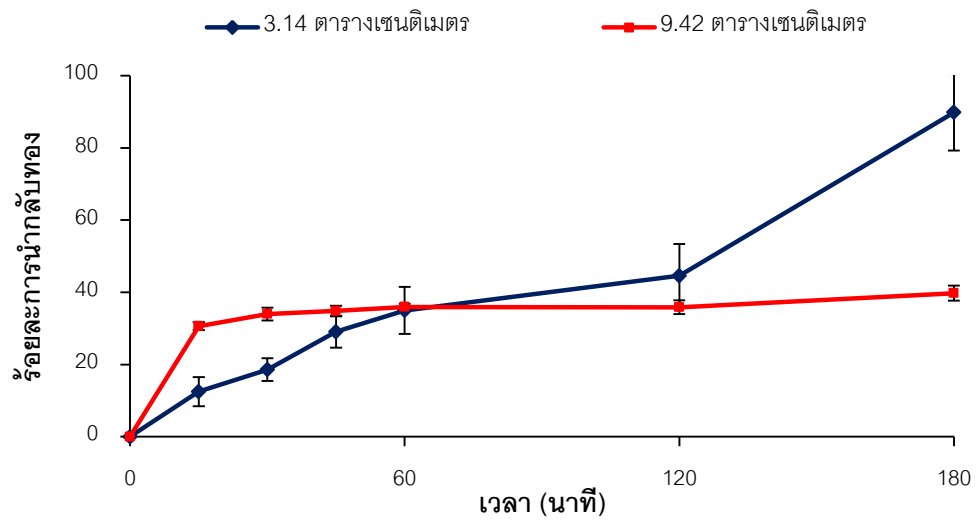
รูปที่ 4.18 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ร้อยละการนำกลับของมีค่าลดลง เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าของทองมีค่าสูงกว่าโลหะชนิดอื่นที่ตรวจพบในตัวอย่างของเสีย

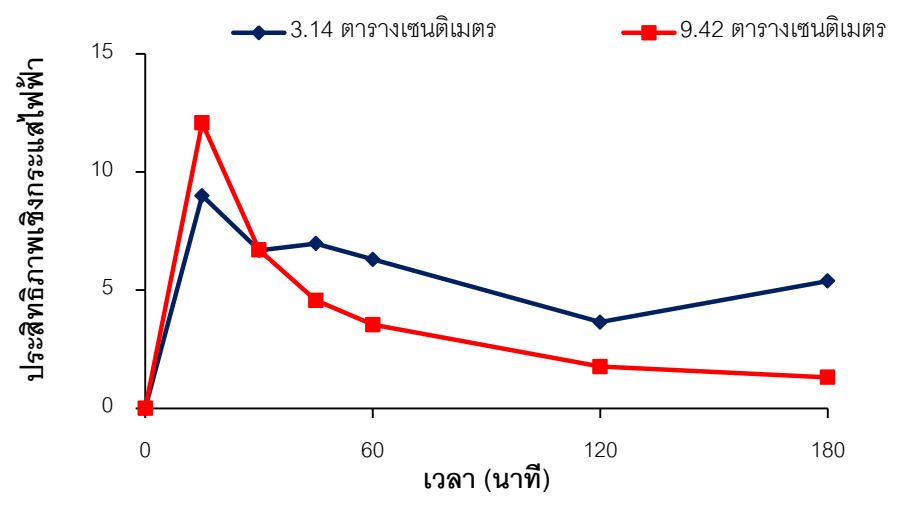
ด้วยเทคนิค XRF ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ง่ายกว่า ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะชนิดอื่นสามารถรับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกัน ทำให้ร้อยละการนำกลับของมีค่าลดลง ดังแสดงผลใน ภาคผนวก ข - 4 ตาราง ข - 13 จากตาราง พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็น 318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง โลหะที่พบบนขั้วคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำเปรียบเทียบกับโลหะที่พบบนขั้วคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ กล่าวได้ว่า โลหะเหล่านี้สามารถรับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกันทางขั้วแคโทด โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยารีดักชันของ แมกนีเซียม อะลูมิเนียม ซิลิกอน เหล็ก และแคลเซียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา นั่นคือโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า สามารถนำกลับโลหะได้ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ [34]

4.4.4 ผลของขนาดขั้วไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาผลของขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการนำกลับของ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด ขั้วแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด และใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากรูปที่ 4.19 พบว่าขั้วไฟฟ้าขนาด 3.14 ตารางเซนติเมตรให้ค่าร้อยละการนำกลับของร้อยละ 89.87 ± 10.63 ขณะที่ขั้วไฟฟ้าขนาด 9.42 ตารางเซนติเมตรให้ค่าร้อยละการนำกลับของร้อยละ 39.76 ± 2.07 เนื่องจากลักษณะรูพรุนของคาร์บอนมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อใช้ขั้วคาร์บอนขนาด 9.42 ตารางเซนติเมตร พบว่าร้อยละการนำกลับของในช่วงแรกมีอัตราเร็วกว่า ทำให้ทองที่พอกพูนบนขั้วคาร์บอนปกคลุมรูพรุนของขั้ว ทำให้เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไปการพอกพูนคงที่ ส่งผลให้ค่าร้อยละการนำกลับของมีค่าคงที่ ซึ่งในการทดลองทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันพบว่า ปริมาณฟองแก๊สที่เกิดขึ้นรอบขั้วคาร์บอนขนาด 9.42 ตารางเซนติเมตรมีปริมาณมากกว่าขั้วคาร์บอนขนาด 3.42 ตารางเซนติเมตร จึงส่งผลต่อค่าร้อยละการนำกลับของ



รูปที่ 4.19 ขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการนำกลับทอง โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.20 ขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดการพอกพูนบนขั้วอิเล็กโทรด โดยทำการวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่เกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ขั้วคาร์บอน ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วทองแดง

ขั้วคาร์บอน :

ปริมาณธาตุบนขั้วคาร์บอนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองและสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธาตุที่มาพอกพูนที่ขั้วคาร์บอน ได้แก่ คลอรีน เหล็ก ทองแดง เงิน และแพลทินัม เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธาตุที่มาพอกพูนที่ขั้วคาร์บอน ได้แก่ เหล็ก ทองแดง แพลทินัม และซัลเฟอร์ รูปทางสัณฐานวิทยาของขั้วคาร์บอนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.21 จากรูป พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโลหะที่พอกพูนบนขั้วคาร์บอนมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธาตุที่เกาะบนขั้วคาร์บอนมีลักษณะเรียบ เคลือบบนขั้วอิเล็กโทรด เปรียบเทียบกับเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธาตุที่เกาะบนขั้วคาร์บอนมีลักษณะเป็นผลึกกระจายตัวอยู่รอบขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ไม่พบทองพอกพูนบนขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากทองมีปริมาณน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุบนข้าวคาร์บอนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ)		
	ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	
		สารละลายกรดกำดทอง	สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร
คาร์บอน	65.20	58.90	36.18
ออกซิเจน	27.08	-	45.32
แมกนีเซียม	0.33	-	0.31
อะลูมิเนียม	2.24	0.82	1.08
ซิลิกอน	4.14	-	1.49
คลอรีน	0.05	12.43	-
โพแทสเซียม	0.1	-	0.21
ไทเทเนียม	0.09	-	-
เหล็ก	0.77	0.92	2.17
ทองแดง	-	0.37	4.10
เงิน	-	2.06	-
แพลทินัม	-	24.50	2.97
ซัลเฟอร์	-	-	6.17
รวม	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุบนข้าวทองแดงก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ)	
	ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
คาร์บอน	34.55	11.97
ออกซิเจน	27.55	44.28
อะลูมิเนียม	0.42	1.27
ซิลิกอน	0.45	0.28
คลอรีน	3.86	2.87
ทองแดง	33.16	28.77
ซัลเฟอร์	-	10.57
รวม	100.00	100.00

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุบนข้าวเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ)	
	ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
ฟลูออรีน	4.84	-
แมกนีเซียม	0.86	-
แมงกานีส	0.88	-
นิกเกิล	6.91	-
คาร์บอน	34.55	6.82
ออกซิเจน	27.55	80.08
อะลูมิเนียม	0.42	0.39
ซิลิกอน	0.45	0.46
ซัลเฟอร์	3.86	8.85
โครเมียม	33.16	1.72
เหล็ก	-	1.68
รวม	100.00	100.00

4.5 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4.5.1 การชะละลายทองจากตัวอย่างของเสีย

ภาวะที่ 1: สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร ร้อยละอัตราส่วนของเสียต่อตัว ทำละลายเท่ากับ 1 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากสารละลายกรดไนตริก (ความเข้มข้นร้อยละ 70) 2500 มิลลิลิตร ราคา 525 บาท

ตารางที่ 4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายกรดไนตริก

ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ราคากรดต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
1	64.28	1.35
4	257.14	5.40

ภาวะที่ 2: สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร ร้อยละอัตราส่วนของเสียต่อตัว ทำละลายเท่ากับ 1 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากสารละลายกรดซัลฟูริก (ความเข้มข้นร้อยละ 98) 2500 มิลลิลิตร ราคา 400 บาท

ตารางที่ 4.7 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ราคากรดต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
1	54.39	0.87
4	217.57	3.48

ภาวะที่ 3: สารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 0.5 และ 1 โมลต่อลิตร ร้อยละอัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากไทโอยูเรีย 500 กรัม ราคา 695 บาท

ตารางที่ 4.8 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายไทโอยูเรีย

ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคากรดต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
0.5	38.06	5.29
1	76.12	10.58

ภาวะที่ 4: สารละลายกรดกัดทองเข้มข้น ร้อยละอัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากสารละลายกรดไนตริก (ความเข้มข้นร้อยละ 70) 2500 มิลลิลิตร ราคา 525 บาท และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้นร้อยละ 37) 2500 มิลลิลิตร ราคา 380 บาท

ตารางที่ 4.9 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการชะละลายทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายกรดกัดทอง

ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ราคากรดต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
เข้มข้น	250 (ไนตริก)	5.25
	750 (ไฮโดรคลอริก)	11.4
รวม		16.65

จากอัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง) ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเท่ากับ 221.50 บาทต่อกิโลวัตต์ ทำการชะละลายทอง

จากตัวอย่างของเสียด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก กำลังไฟฟ้า 1020 วัตต์ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกวนสารละลาย ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในขั้นตอนการชะละลายทองเท่ากับ 225.93 บาทต่อกิโลวัตต์

4.5.2 การนำกลับทองจากตัวอย่างของเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

จากอัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง) ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเท่ากับ 221.50 บาทต่อกิโลวัตต์

ภาวะที่ 1: สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร รัยละลายอัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.10 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการนำกลับทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

ควาหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	กระแส (แอมแปร์)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลท์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ราคาต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
31.85	0.01	2.0	0.02	1.772×10^{-3}
63.7	0.02	2.3	0.046	4×10^{-3}
95.5	0.03	2.6	0.078	8×10^{-3}
159.24	0.05	2.6	0.13	0.012
318.47	0.1	3.1	0.31	0.028

ภาวะที่ 2: สารละลายกรดกัดทองเข้มข้น ร้อยละอัตราส่วนของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25 เตรียมสารละลายปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.11 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการนำกลับทองจากตัวอย่างด้วยสารละลายกรดกัดทอง

ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	กระแส (แอมแปร์)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลท์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ราคาต่อกรัม ตัวอย่างของเสีย (บาท)
31.85	0.01	0.3	3×10^{-3}	2.66×10^{-4}
63.7	0.02	0.3	6×10^{-3}	5.32×10^{-4}
95.5	0.03	2.1	0.063	5.6×10^{-3}
159.24	0.05	2.3	0.115	0.012
318.47	0.1	2.2	0.22	0.02

จากอัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง) ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเท่ากับ 221.50 บาทต่อกิโลวัตต์ ทำการนำกลับทองจากตัวอย่างของเสียด้วยกระบวนการด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก กำลังไฟฟ้า 1020 วัตต์ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการนำกลับทองด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ 225.93 บาทต่อกิโลวัตต์

จากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองในงานวิจัยนี้พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างกากของเสียต่อตัวทำละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เท่ากับ 0.25 ต่อ 100 ราคาการรดต่อกรัมของเสียเท่ากับ 13.92 บาท และเมื่อนำสารละลายที่ได้จากการชะละลายนี้มานำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1.772×10^{-3} บาทต่อกรัมตัวอย่างของเสีย รวมเท่ากับ 13.922 บาทต่อกรัมตัวอย่างของเสีย

จากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้น กระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าแล้วได้ผลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงที่สุดเป็นกระบวนการที่มีความคุ้มค่า ซึ่งจากการทดลองพบว่า การนำกลับทองจากของเสียของการถลุงทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าสามารถนำกลับทองได้น้อยและเหมาะสำหรับปฏิบัติการในห้องทดลองมากกว่า เนื่องจากปริมาณที่ใช้ในการทดลองทำในปริมาณน้อย (Lab Scale) เปรียบเทียบในเชิงอุตสาหกรรมซึ่งต้องทำในปริมาณมาก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายทองจากของเสียของกระบวนการสกัดทอง พบว่า ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย และร้อยละของเสีย ต่อตัวทำละลายมีผลต่อการชะละลายทอง ดังนี้ สารละลายกรดกัดทองสามารถชะละลายทองได้สูงถึง ร้อยละ 41 รองลงมาคือสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายทองได้ ร้อยละ 30 และร้อยละที่เหมาะสมของของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 0.25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่ง ที่ภาวะนี้สามารถชะละลายทองได้สูงถึงร้อยละ 100 โดยความสามารถในการชะละลายทองในงานวิจัยนี้สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้

สารละลายกรดกัดทอง > สารละลายกรดซัลฟูริก > สารละลายกรดไนตริก > สารละลายไทโอยูเรีย ตามลำดับ

การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า พบว่า เมื่อใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายทองด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถนำกลับทองได้สูงถึงร้อยละ 89.87 ± 10.63 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31.85 แอมแปร์ ต่อตารางเมตร และเมื่อใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายทองด้วยสารละลายกรดกัดทองเป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถนำกลับทองได้ร้อยละ 36.65 ± 5.08 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 63.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยชนิดของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการนำกลับทองดังนี้ ขั้วคาร์บอน สามารถนำกลับทองได้มากกว่าขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วทองแดง ตามลำดับ

การศึกษาหาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายทอง พบว่า อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการ ชะละลายทองเป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 เทียม

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. สารละลายที่ได้จากการชะละลายควรกำจัดโลหะชนิดอื่นออกไปก่อน เช่น ทองแดง เงิน เป็นต้น ด้วยการตกตะกอนแล้วจึงนำสารละลายนี้ไปทำการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาแข่งขันการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า เพื่อให้สามารถนำกลับทองได้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Ammen, C.W. Recovery and Refining of Precious Metal. 3rd edition, Chapman&Hall, 1997.
- [2] Gerg, M.C. Wealth daily report. August 20th, 2007.
- [3] John, O. Marsden., and Lain House, C. The Chemistry of Gold Extraction. 2nd edition, SME, 1960.
- [4] Rosenqvist, T. Principles of Extractive Metallurgy. McGRAW-HILL, 1983.
- [5] Van Zyl, D.J.A., Hutchinson, I.P.G., and Kiel, J.E. Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, (1988): 122-145.
- [6] Quinet, P., Proost, J., Van Lierde, A. Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes, Miner. Metal Process, 22 (1) (2005): 17–22.
- [7] Mishra, C.S.K., and Champagne, P. Biotechnology Applications. I.K. International Publishing House, 2009.
- [8] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [9] Maloy, J.T. Factors affecting the shape of current-potential curves. Chemical Education. 60 (1983): 285-288.
- [10] Brett, C.M.A., and Brett, A.M.O. Electrochemistry: Principles, Methods, and Applications. 2nd edition, Oxford Science Publications, New York, 1993.
- [11] Rahman, A., Kumar, P., Park, D., and Shim, Y. Electrochemical Sensors Based on Organic Conjugated Polymers. Sensors, 8 (2008): 118-141.
- [12] Elorza-Rodriguez, E., Nava-Alonso, F. Jara, J. and Lara-Valenzuela, C. Leaching Treatment of pyritic matrix gold-silver refractory ores by

- ozonization-cyanidation. *Minerals Engineering*, 19 (2006): 56–61.
- [13] Breuer, P.L., Dai, X., and Jeffrey, M.I. Leaching of gold and copper minerals in cyanide deficient copper solutions. *Hydrometallurgy*, 78(2005): 156–165.
- [14] Shen, Y.F., and Xue, W.Y. Recovery palladium, gold and platinum from hydrochloric acid solution using 2-hydroxy-4-sec-octanoyl diphenylketoxime. *Separation and Purification Technology*, 56 (2007) : 278–283.
- [15] ไชยเชษฐา เพ็ญอัมพร และนพวรรณ เนตรงาม. การแยกเงินและทองออกจากสลาม. รายงานโครงการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [16] Yap, C.Y., and Mohamed, N. An electrogenerative process for the recovery of gold from cyanide solutions. *Chemosphere*, 67 (2007): 1502-1510.
- [17] วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล. การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [18] Yavuz, O., and Ziyadanogullari, R. Recovery of Gold and Silver of Copper anode slime. *Separation Science and Technology*, 35(1) (2000): 133-141.
- [19] ศุภกันต์ สกุกตั้ง. การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [20] Pruksathorn, K., and Damronglerd, S. Lead Recovery from Waste Frit Glass Residue of Electronic Plant by Chemical-Electrochemical Methods. *Korean J. Chemical Engineering*, 22(6) (2005): 873-876.
- [21] Reyes-Cruz, V., Ponce-de-León, C., Gonzalez, I., and Oropeza, M.T. Electrochemical deposition of silver and gold from cyanide leaching solutions. *Hydrometallurgy*, 65 (2002): 187-203.
- [22] Fraser, K.S., Walton, R.H., and Wells, J.A. Processing of Refractory Gold Ores.

Minerals Engineering, 4 (1991): 1029-1041.

- [23] Rapson, W.S. New chloride leaching process for gold extraction from refractory ores. Gold Bulletin, 30 (1997): 20.
- [24] Sulekh, C. Inorganic Chemistry, Vol.2, New Age International, 2006.
- [25] Solubility database. International Union of Pure and Applied Chemistry, National Institute Standards and Technology.
- [26] Kushakova, L., and Muszer, A. Optimization of roasting of Arsenic-Carbon refractory gold ores for cyanide leaching. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 43 (2009): 59-64.
- [27] Geoffroy, N., and Cardarelli, F. A. Method for Leaching or Dissolving Gold from Ores or Precious Metal Scrap. Metals, (2005): 47-50.
- [28] Wozniak, D.J., and Huang, J.Y.C. Variables Affecting Metal Removal from Sludge. Water Pollution Control Federal, 54 (1982): 1574.
- [29] Ho, Y.S., Harouna-Oumarou, H.A., Fauduet, H., and Porte, C. Kinetics and model building of leaching of water-soluble compound of Tilia sapwood. Separation and Purification Technology, 45 (2005):, 169-173.
- [30] Lee, I.H., Wang, Y.J., and Chern, J.M. Extraction kinetics of heavy metal-containing sludge. Hazardous Materials, 123 (2005): 112-119.
- [31] Chun-Chen, Y. Recovery of heavy metals from spent Ni-Cd batteries by a potentiostatic electrodeposition. Power Sources, 115 (2003): 352-359.
- [32] Abbas, A., Tayyeb, M. and Ziba, K. Effect of the impregnation of carbon cloth with Ethylenediaminetetraacetic acid on its adsorption capacity for the adsorption of several metal ions. Hazardous Materials, 150 (2008): 408-412.
- [33] Faur, B.C., Kadirvelu, K., and Cloirec, P. Removal of metal ions from aqueous solution by adsorption onto activated carbon cloths: adsorption competition with organic matter. Carbon, 40 (2002): 2387-2392.

- [34] Gordon Yang, C.C., and Chi-Ming, Tsai. A study on heavy metal extractability and subsequent recovery by electrolysis for a municipal incinerator fly ash. Hazardous Materials, 58 (1998): 103-120.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก - 1 การเตรียมสารละลายกรด

เตรียมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร จากสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมวล

$$\text{จากสูตร} \quad N = \frac{\% \times 10 \times d}{MW}$$

$$\text{และ} \quad N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{\% \times 10 \times d \times V_1}{MW} = N_2 V_2$$

โดยที่	%	=	ร้อยละโดยมวลหรือปริมาตรของกรดซัลฟูริกเข้มข้น
	d	=	ความหนาแน่นของกรดซัลฟูริกเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
	MW	=	น้ำหนักอะตอมของสาร
	N	=	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)
	V	=	ปริมาตร (มิลลิลิตร)

แทนค่า

$$\frac{98 \times 10 \times 1.84 \times V_1}{98.08} = 4 \times 1000$$

$$V_1 = 217.57 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ต้องปิเปตสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมวล ปริมาตร 217.57 มิลลิลิตร ใส่ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร

ก - 2 การเตรียมสารละลายไทโอยูเรีย

เตรียมสารละลายไทโอยูเรีย 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{g}{\text{MW}} = \frac{N \times V}{1000}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } g &= \text{น้ำหนักสาร (กรัม)} \\ \text{MW} &= \text{น้ำหนักอะตอมของสาร} \\ N &= \text{ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)} \\ V &= \text{ปริมาตร (มิลลิลิตร)} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\frac{g}{76.12} = \frac{1 \times 1000}{1000}$$

$$g = 76.12 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องชั่งไทโอยูเรีย 76.12 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร

ก - 3 การคำนวณร้อยละการชะละลายทอง

โลหะที่ถูกชะละลายได้อยู่ในรูปของไอออนโลหะในสารละลาย สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAs) ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละการชะละลายได้ดังนี้

การชะละลายทองจากตัวอย่างของเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1

จากสูตร ร้อยละการชะละลาย (%) = $(C_t/C_0) \times 100$

เมื่อ C_0 = ปริมาณเริ่มต้นของทองในกากของเสีย (มิลลิกรัม)

C_t = ปริมาณทองในสารละลายที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม)

โดยที่ $C_0 = 3.50$ มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย ที่เวลา 90 นาที สามารถชะละลายทองได้ 11.441 มิลลิกรัมต่อลิตร (C_t) ร้อยละการชะละลายคิดเทียบจากปริมาตรกรดที่เหลืออยู่จริงเท่ากับ

$$C_t = \frac{11.441 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{940 \text{ ml}}{10 \text{ g}}$$

$$= 1.0754 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ร้อยละการชะละลาย (\%)} &= \frac{1.0754}{3.5} \times 100 \\ &= 30.73 \% \end{aligned}$$

ก - 4 การคำนวณร้อยละการนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

การนำกลับทองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าสามารถคำนวณร้อยละการนำกลับทองได้ดังนี้

$$\text{จากสูตร ร้อยละการนำกลับทอง (\%)} = \frac{[(C_0) - (C_t)]}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 = ปริมาณเริ่มต้นของทองในสารละลาย (มิลลิกรัม)

C_t = ปริมาณทองในสารละลายที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม)

เมื่อใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับร้อยละ 0.25 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่เวลา 180 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$C_t = \frac{1.1740 \text{ mg} \quad | \quad 1 \text{ L} \quad | \quad 950 \text{ ml}}{1 \text{ L} \quad | \quad 1000 \text{ ml} \quad | \quad 2.5 \text{ g}}$$

= 0.4461 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย

$$C_0 = \frac{11.01 \text{ mg} \quad | \quad 1 \text{ L}}{1 \text{ L} \quad | \quad 2.5 \text{ g}}$$

= 4.4040 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างของเสีย

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับทอง} &= \frac{4.4040 - 0.4461}{4.4040} \times 100 \\ &= 89.87 \% \end{aligned}$$

ก - 5 การคำนวณประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า} = \frac{\text{ปริมาณสารที่เกิดขึ้นจริงในปฏิกิริยา}}{\text{ปริมาณสารที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี}} \times 100$$

โดยที่ ปริมาณสารที่เกิดขึ้นจริงในปฏิกิริยา = ร้อยละการนำกลับทอง $\times C_0$

เมื่อ C_0 = ปริมาณเริ่มต้นของทองในสารละลาย (มิลลิกรัม)

และ ปริมาณสารที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี = $\frac{MW \times I \times t}{nF}$

เมื่อ MW = น้ำหนักอะตอมของสาร

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลาที่ใช้ (วินาที)

$$n = \text{จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอน (อิเล็กตรอนต่อโมล)}$$

$$F = \text{ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,500 (คูลอมบ์ต่ออิเล็กตรอน)}$$

ที่ร้อยละการนำกลับของเท่ากับร้อยละ 89.87 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือเท่ากับ 0.01 แอมแปร์ เวลาที่ใช้ 180 นาที โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 มิลลิลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลายเท่ากับร้อยละ 0.25 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$\text{ปริมาณสารที่เกิดขึ้นจริงในปฏิกิริยา} = 0.8987 \times 4.4040$$

$$= 3.96 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ปริมาณสารที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี} = \frac{196.96 \times 0.01 \times (180 \times 60) \times 1000}{3 \times 96500}$$

$$= 73.48 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า} = \frac{3.96}{73.48} \times 100$$

$$= 5.39 \%$$

ก - 6 การคำนวณพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด

ขั้วคาร์บอนอิเล็กโทรดขนาดรัศมีเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 5 เซนติเมตร

$$\text{พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด} = 2\pi rL$$

$$= 2 \times 3.14 \times (1 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-2})$$

$$= 3.14 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

ก - 7 การคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i)} = \frac{I}{A}$$

$$\text{เมื่อ } I = \text{กระแสไฟฟ้า (A)}$$

$$A = \text{พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด (m}^2\text{)}$$

ที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.01 แอมแปร์ พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 3.14×10^{-4} ตารางเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i)} &= \frac{0.01}{3.14 \times 10^{-4}} \\ &= 31.85 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \end{aligned}$$

ก - 8 การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

การคำนวณค่า k และ C_s จากสมการแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เอ็มพริกัลป์

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{t}{C_t} = \frac{1}{k C_s^2} + \frac{t}{C_s}$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/C_s$ และตัดแกน y ที่ $1/kC_s^2$ จากความชันและจุดตัดดังกล่าวสามารถหาค่า k และ C_s ได้ ดังตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หรือ 353 เคลวิน ซึ่งมีสมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.656x + 4.730$$

$$\text{ดังนั้น} \quad 1/C_s = 0.656$$

$$\text{จะได้} \quad C_s = 1.524 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{และ} \quad 1/kC_s^2 = 4.730$$

แทนค่า C_s ลงไป จะได้

$$k = 0.091 \quad \text{ลิตรต่อมิลลิกรัม-นาท}$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

ข - 1 ร้อยละการชะละลายทอง

- ผลของชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย

ตาราง ข-1 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้

เวลา (นาที)	ปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)						
	สารละลาย ไทโอยูเรีย		สารละลาย กรดไนตริก		สารละลาย กรดซัลฟูริก		สารละลาย กรดกัดทอง
	0.5 M	1.0 M	1.0 M	4.0 M	1.0 M	4.0 M	เข้มข้น
0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.6510	1.2110	0.0010	0.8645	3.7730	4.7460	9.7580
10	1.1970	2.7825	0.0420	1.7185	5.2255	5.9955	13.7935
15	1.3825	3.5945	0.0735	2.0055	5.7925	7.5040	17.6470
30	2.0335	4.8055	0.1060	2.6640	7.5300	10.0035	17.4890
45	1.8225	4.3085	0.5950	3.2515	8.0890	11.1200	18.4160
60	2.6050	4.2095	0.3085	3.7260	7.9905	11.2380	16.9810
90	2.5840	4.8605	0.8535	4.0355	7.8795	11.4410	16.5690
120	2.5560	4.3775	2.1205	5.1520	7.5090	11.5260	15.6940
150	2.8480	4.3190	1.8840	5.5870	7.7689	11.6810	15.4420
180	3.6395	5.5250	1.7175	6.7900	7.6085	11.3345	15.4430
240	2.2425	5.6065	1.4920	6.9015	7.6695	11.5010	15.40
300	2.6385	6.7070	1.9105	10.48	7.6115	11.0125	15.40

- ผลของการให้ความร้อนตัวอย่างของเสียก่อนการชะละลาย ตัวทำละลายที่ใช้คือ สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร

ตาราง ข-2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้เปรียบเทียบกับตัวอย่าง ที่ให้ความร้อนก่อนนำไปชะละลาย

เวลา (นาที)	ปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ให้ความร้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	ตัวอย่างที่ไม่ให้ความร้อน
0	0	0
15	9.7250	7.5040
30	9.6440	10.0035
45	9.4330	11.1200
60	9.2440	11.2380
90	11.110	11.4410
120	11.3470	11.5260
150	11.2860	11.6810
180	11.6070	11.3345

- ผลของออกซิเจนต่ออัตราการชะละลายด้วยสารละลายไทโอยูเรียเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

ตาราง ข-3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้

เวลา (นาที)	ปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	เติมออกซิเจน	ไม่เติมออกซิเจน	เติมออกซิเจนและให้ความร้อนตัวอย่าง
0	0	0	0
15	2.8480	3.5945	3.6270
30	2.3790	4.8055	3.3030
45	2.2800	4.3085	3.1460
60	2.2080	4.2095	3.1210
90	3.4680	4.8605	3.5050
120	3.3930	4.3775	2.9020
150	3.4470	4.3190	3.1120
180	3.5770	5.5250	3.0370

- ผลของอัตราส่วนตัวอย่างของเสียต่อตัวทำละลาย

ตาราง ข-4 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลายที่ชะละลายออกมาได้

อัตราส่วน	ปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร	สารละลายกรดกัดทอง
0.25	0.8750	0.8750
0.5	0.8337	0.9615
1	1.1753	1.5429
2	2.1768	3.0881
3	3.1154	3.3617

ข - 2 ร้อยละการนำกลับทอง

- ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ตาราง ข-5 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)				
	31.85	63.7	95.5	159.24	318.47
0	0	0	0	0	0
15	9.64	9.92	8.91	11.23	10.34
30	9.06	9.30	8.08	11.05	10.23
45	7.97	9.17	7.89	11.03	10.21
60	7.38	8.93	7.48	10.88	9.95
120	6.36	8.65	7.26	10.57	9.90
180	1.174	7.66	6.21	10.22	9.86
C ₀	11.01	10.37	9.7435	11.34	10.41

ตาราง ข-6 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองเป็น
สารละลายอิเล็กโทรไลต์

ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)				
	31.85	63.7	95.5	159.24	318.47
0	0	0	0	0	0
15	5.45	5.68	14.64	5.53	4.36
30	4.97	5.43	14.35	5.29	4.23
45	4.70	5.39	13.97	5.23	4.21
60	4.54	5.387	13.78	5.07	4.20
120	4.29	5.32	13.65	4.77	3.93
180	4.27	4.69	13.21	3.78	3.50
C ₀	5.676	7.036	16.136	5.572	4.473

- ผลของชนิดข้าวไฟฟ้า

ตาราง ข-7 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
เวลา (นาที)	ชนิดข้าวไฟฟ้า		
	คาร์บอน	เหล็กกล้าไร้ สนิม	ทองแดง
0	0	0	0
15	9.64	12.84	10.149
30	9.06	12.08	10.148
45	7.97	11.43	10.141
60	7.38	11.28	10.114
120	6.36	11.22	9.958
180	1.17	11.05	9.909
C_0	11.01	13.04	10.21

- ผลของขนาดขั้วไฟฟ้า

ตาราง ข-8 ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
เวลา (นาที)	ขนาดขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)	
	3.14	9.42
0	0	0
15	9.64	12.56
30	9.06	12.08
45	7.97	12.05
60	7.38	11.96
120	6.36	12.10
180	1.17	11.49
C_0	11.01	18.11

ข - 3 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า

- ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ตาราง ข-9 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า					
เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)				
	31.85	63.7	95.5	159.24	318.47
0	0	0	0	0	0
15	9.00	1.47	1.80	0.16	0.07
30	6.69	1.92	1.88	0.26	0.11
45	6.97	1.52	1.74	0.24	0.10
60	6.30	1.41	1.35	0.26	0.13
120	3.65	0.85	0.76	0.20	0.08
180	5.39	0.83	0.69	0.18	0.06

ตาราง ข-10 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้เมื่อใช้สารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลาย
อิเล็กโทรไลต์

ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า					
เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)				
	31.85	63.7	95.5	159.24	318.47
0	0	0	0	0	0
15	1.47	4.41	3.27	0.07	0.08
30	2.45	2.69	1.96	0.23	0.09
45	2.34	1.91	1.78	0.20	0.08
60	2.08	1.47	1.51	0.21	0.07
120	1.27	0.79	0.82	0.16	0.06
180	0.88	0.70	0.65	0.22	0.06

ตาราง ข-11 ผลของชนิดข้าวไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้เมื่อใช้
สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า			
เวลา (นาที)	ชนิดข้าวไฟฟ้า		
	คาร์บอน	เหล็กกล้าไร้ สนิม	ทองแดง
0	0	0	0
15	9.00	0.37	0.39
30	6.69	1.00	0.52
45	6.97	1.14	0.57
60	6.30	1.00	0.67
120	3.65	0.53	0.54
180	5.39	0.40	0.43

ตาราง ข-12 ผลของขนาดขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้เมื่อใช้
สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า		
เวลา (นาที)	ขนาดขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)	
	3.14	9.42
0	0	0
15	9.00	12.08
30	6.69	6.70
45	6.97	4.57
60	6.30	3.54
120	3.65	1.77
180	5.39	1.31

ข -4 ปริมาณธาตุบนข้าวคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ตาราง ข-13 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณธาตุบนข้าวคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยมีสารละลายกรดกัดทองเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	
		31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
คาร์บอน	65.20	58.90	-
ออกซิเจน	27.08	-	-
แมกนีเซียม	0.33	-	2.75
อะลูมิเนียม	2.24	0.82	17.83
ซิลิกอน	4.14	-	55.12
คลอรีน	0.05	12.43	7.34
โพแทสเซียม	0.1	-	2.18
ไททานเนียม	0.09	-	1.27
เหล็ก	0.77	0.92	9.96
ทองแดง	-	0.37	-
เงิน	-	2.06	-
แพลทินัม	-	24.50	-
ซัลเฟอร์	-	-	-
แคลเซียม	-	-	3.56
รวม	100	100	100

ตาราง ข-14 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณธาตุบนขั้วคาร์บอนหลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยมีสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	ก่อนเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	หลังเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	
		31.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	318.47 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
คาร์บอน	65.20	36.18	-
ออกซิเจน	27.08	45.32	-
แมงกานีส	0.33	0.31	1.34
อะลูมิเนียม	2.24	1.08	13.40
ซิลิกอน	4.14	1.49	24.70
คลอรีน	0.05	-	-
โพแทสเซียม	0.1	0.21	1.18
ไททานเนียม	0.09	-	-
เหล็ก	0.77	2.17	7.47
ทองแดง	-	4.10	-
เงิน	-	-	-
แพลทินัม	-	2.97	-
ซัลเฟอร์	-	6.17	49.73
แคลเซียม	-	-	2.18
รวม	100	100	100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววาณี หมอดี เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี ในปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2551 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552