

การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน



นายศุภคันส์ สกุลตั้ง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2076-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF METALS FROM SPENT MOBILE PHONE BATTERIES BY LEACHING
AND PRECIPITATION



Mr. Supasan Sakultang

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2005

ISBN 974-14-2076-5

ศุภกันส์ สฤกษ์ตั้ง: การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน (RECOVERY OF METALS FROM SPENT MOBILE PHONE BATTERIES BY LEACHING AND PRECIPITATION) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. มะลิ หุ่นสม, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. ดร. เก็จวลี พุกษาทร, 79 หน้า. ISBN 974-14-2076-5.

แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว องค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่เหล่านี้ซึ่งประกอบด้วยโลหะหลายชนิด เช่น นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม ทองแดง แลนทานัม และอื่นๆ ล้วนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำโลหะนิกเกิลและโคบอลต์กลับคืนโดยการชะละลายและการตกตะกอน ซึ่งแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด คือ แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การทดลองจะเริ่มต้นโดยการแกะแยกแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณโลหะภายในแบตเตอรี่ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของกรด (ซัลฟิวริก ไนตริก และไฮโดรคลอริก) ความเข้มข้นของกรด (1-6 โมลต่อลิตร) อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด (10-40 กรัมต่อลิตร) อุณหภูมิ (30-90 องศาเซลเซียส) เวลา (5-120 นาที) พบว่ากรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ได้ดีกว่ากรดซัลฟิวริกและไนตริก และภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะละลาย คือ กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ได้ร้อยละ 99 และ 90 ตามลำดับ ปฏิกริยาการชะละลายโลหะทั้งสองชนิดนี้เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) และเป็นปฏิกริยาอันดับที่ 2 ควบคุมการเกิดปฏิกริยาโดยกระบวนการเชิงกายภาพ มีค่าพลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกริยาการชะละลายสำหรับโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ 0.34 และ 0.52 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนร่วมกันของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เท่ากับ 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....*ด.ศ.กันส์ สฤกษ์ตั้ง*
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ดร. มะลิ หุ่นสม*
 ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*ดร. เก็จวลี พุกษาทร*

4672433623: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: MOBILE PHONE BATTERY; METAL; LEACHING; PRECIPITATION

SUPASAN SAKULTANG: RECOVERY OF METALS FROM SPENT MOBILE PHONE BATTERIES BY LEACHING AND PRECIPITATION. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph. D., 79 pp. ISBN 974-14-2076-5

Spent mobile phone batteries consisted of various kinds of metals such as Ni, Co, Al, Cu, La, etc are considered as hazardous materials. This research was carried out to recover some valuable metals from the electrode of the spent mobile phone batteries by using the leaching and precipitation processes in laboratory scale. Two types of spent mobile phone batteries were employed in this study; nickel-metal hydride (Ni-MH) and lithium-ion batteries (Li-ion). Both batteries were first crushed and analyzed their principle components. Afterward, the leaching process was carried out. Effects of parameters including types of acid (H_2SO_4 , HNO_3 and HCl), acid concentration (1-6 M), solid-liquid ratio (10-40 g/l), leaching temperature (30-90 °C) and leaching time (5-120 min) on the leaching percentages of Co and Ni in the leaching process were investigated. The preliminary results indicated that the HCl provided the highest leaching percentages than that of H_2SO_4 and HNO_3 for all leaching conditions. The optimum leaching condition was found at acid concentration of 5 M, leaching temperature of 80 °C, solid-liquid ratio of 15 g/l, and leaching time of 60 min. According to this condition by using HCl , greater than 99 % and 90 % of Ni and Co were leached, respectively. Further investigation indicated that the leaching processes of both metals were the endothermic processes with the rate law of the second-order reaction. In addition, the physical process principally controlled the leaching process with the activity energy of 0.34 and 0.52 kJ/mol for Ni and Co, respectively. The pH condition of co-precipitation of nickel and cobalt by using $NaOH$ 2 M was equal to 11.

Department.....ChemicalTechnology..... Student's signature.....*Jupason Sakultang*.....
 Field of study.....Chemical Technology..... Advisor's signature.....*Mali Hunsom*.....
 Academic year.....2005.....Co-advisor's signature.....*Kejvalee Pruksathorn*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทรร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่อง “การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากบัณฑิตศึกษา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการรองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรามา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการแนะนำการใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัยการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	4
2.2 เซลล์กัลวานิก.....	4
2.2.1 เซลล์ปฐมภูมิ.....	4
2.2.2 เซลล์ทุติยภูมิ.....	6
2.3 แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่.....	7
2.3.1 แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม.....	7
2.3.2 แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์.....	7
2.3.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	8
2.3.4 แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์.....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในปัจจุบัน.....	9
2.4.1 แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์.....	9
2.4.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	12
2.5 การผลิตไส้แบตเตอรี่.....	15
2.6 การจัดการกับแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว.....	16
2.6.1 การเผาอุณหภูมิสูง.....	16
2.6.2 การปรับเสถียร.....	17
2.6.3 การฝังกลบ.....	17
2.6.4 การรีไซเคิล.....	17
2.7 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่.....	18
2.7.1 กระบวนการแยกโลหะด้วยความร้อน.....	18
2.7.2 กระบวนการแยกโลหะด้วยปฏิกิริยาเคมี.....	19
2.8 กระบวนการชะละลาย.....	20
2.8.1 กระบวนการชะละลายทางชีวภาพ.....	20
2.8.2 กระบวนการชะละลายทางเคมี.....	21
2.9 การตกตะกอนทางเคมี.....	22
2.9.1 การตกตะกอนในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์.....	23
2.9.2 การตกตะกอนในรูปสารประกอบคาร์บอเนต.....	25
2.9.3 การตกตะกอนในรูปสารประกอบซัลไฟด์.....	27
2.10 เทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่.....	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 รูปแบบการวิจัย.....	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.3 สารเคมี.....	38
3.4 วัสดุดิบ.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของแบตเตอรี่.....	39
3.5.2 วิเคราะห์ปริมาณโลหะภายในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	39
3.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชนิดของกรดที่ใช้ในการชะละลายโลหะ.....	39
3.5.4 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการชะละลาย.....	41
3.5.5 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอน.....	42
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบภายใน ของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาศึกษา.....	44
4.2 การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยชะละลาย.....	48
4.2.1 ผลของกรดต่อประสิทธิภาพการชะละลาย.....	48
4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการชะละลาย.....	51
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของกรดต่อประสิทธิภาพการชะละลาย.....	52
4.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรดต่อประสิทธิภาพการชะละลาย.....	54
4.2.5 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการชะละลาย.....	55
4.3 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์.....	57
4.3.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์.....	57
4.3.2 พลังงานการกระตุ้น.....	61
4.4 การตกตะกอนโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ได้จากการชะละลาย.....	63
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	76

สารบัญ (ต่อ)

ประวัติผู้เขียน.....	หน้า
	79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละประเภท.....	9
2.2 หน้าที่ของคาร์บอนในแบตเตอรี่ลิเทียมประเภทต่างๆ.....	12
2.3 ค่าความสามารถในการละลายของโลหะคาร์บอนแต่ละประเภท.....	26
2.4 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของโลหะหนักโดยการเติมคาร์บอน.....	27
2.5 ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนโลหะ ด้วยสารเคมีต่างๆ.....	28
2.6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมีรูปแบบต่างๆ.....	29
3.1 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรด.....	40
4.1 ค่าคงที่สมดุลของกรดที่ 25 องศาเซลเซียส.....	50
4.2 ตารางที่ 4.2 ค่า k ของปฏิกิริยาการละลายโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ.....	61
ก. โลหะหนักเกิดและโคบอลต์ในแต่ละส่วนที่ได้ทำการศึกษา.....	75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์.....	10
2.2 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์แบบทรงกระบอก.....	11
2.3 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์แบบทรงเหลี่ยม.....	11
2.4 กระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	13
2.5 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก.....	14
2.6 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงเหลี่ยม.....	15
2.7 ความดันไอของโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ.....	19
2.8 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	23
2.9 ความเข้มข้นของโลหะที่ละลายในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	24
2.10 ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ โดยมีสารแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย.....	25
2.11 กระบวนการ Sumitomo.....	30
2.12 กระบวนการ Snam-Savam.....	33
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการชะละลาย.....	40
4.1 รูปร่างแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาศึกษา.....	44
4.2 ร้อยละขององค์ประกอบภายในแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์.....	45
4.3 ร้อยละขององค์ประกอบภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	45
4.4 ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์.....	46
4.5 ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	47
4.6 ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ผสมกับลิเทียมไอออน.....	47
4.7 ร้อยละของโลหะนิกเกิลที่ถูกชะละลาย.....	49
4.8 ร้อยละของโลหะโคบอลต์ที่ถูกชะละลาย.....	50
4.9 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
4.10 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ.....	53
4.11 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดต่างๆ.....	54
4.12 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่เวลาต่างๆ.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ร้อยละของโลหะนิกเกิลที่ถูกชะละลายที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	58
4.14 ร้อยละของโลหะโคบอลต์ที่ถูกชะละลายที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.15 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ในการชะละลาย โลหะนิกเกิลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.16 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ในการชะละลาย โลหะโคบอลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	60
4.17 ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิ.....	60
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ สำหรับปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์.....	62
4.19 การตกตะกอนทางเคมีของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	65
4.20 ปริมาณโลหะในตะกอนไฮดรอกไซด์.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารและโทรคมนาคมก่อให้เกิดอุปสรรคอันอำนวยความสะดวกในการสื่อสารจำนวนมาก เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น โดยเฉพาะโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือโทรศัพท์มือถือได้กลายเป็นอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวัน มีรายงานจากสำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ทส.) ถึงจำนวนผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศไทยปี 2546 ว่ามีอยู่จำนวน 20.5 ล้านราย และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคต ขณะที่ผู้ผลิตก็แข่งขันพัฒนาโทรศัพท์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ทั้งขนาดที่เล็กลงและที่สำคัญเต็มไปด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ ทำให้โทรศัพท์กลายเป็นอุปกรณ์สารพัดประโยชน์ ทั้งดูหนัง ฟังเพลง เล่นอินเทอร์เน็ต (Internet) และอื่นๆ อีกมากมาย

เป็นที่ทราบกันดีว่าโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ การใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากก็จะส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับขยะที่เกิดจากแบตเตอรี่ตามมา ในปัจจุบันพบว่ามีแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ถูกทิ้งมากกว่าปีละ 10 ล้านก้อนและเพิ่มปริมาณขึ้นทุกปี เมื่อแบตเตอรี่เหล่านี้หมดอายุการใช้งานแล้วจะถูกทิ้งในรูปของขยะอันตรายปะปนกับขยะทั่วไป โดยไม่ได้รับการคัดแยกไปกำจัดอย่างถูกวิธี ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากเมื่อทิ้งไปสักระยะหนึ่งแล้วเปลือกห่อหุ้มของแบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพหรือผุกร่อน ทำให้สารเคมีที่เป็นโลหะหนักภายในของแบตเตอรี่ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีสไหลออกมาปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งหากสิ่งมีชีวิตได้รับอาหารและน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ก็อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบต่างๆ ของร่างกาย โดยแคดเมียมที่ปนเปื้อนจะก่อพิษแบบเฉียบพลันเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ อาเจียน ท้องร่วง ถ้ารุนแรงมากจะเป็นอันตรายต่อปอด เกิดอาการบวมหรือพองของเนื้อเยื่อปอด รวมทั้งมีผลต่อระบบการสร้างเม็ดเลือด เกิดโรคโลหิตจางได้ ส่วนนิกเกิลจะเกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง หายใจเข้าไปจะเกิดอาการแพ้สารเคมี ทำให้มีอาการหืดหอบ ฝุ่นของนิกเกิลเป็นสารก่อมะเร็งและมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีผู้ประกอบการหรือหน่วยงานใดที่ออกมาแสดงความรับผิดชอบในการกำจัดแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้โดยตรง [1]

เมื่อกล่าวถึงวิธีการที่นำมาใช้จัดการกับแบตเตอรี่เหล่านี้มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การฝังกลบ การเผา เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากในขณะนี้คือ การรีไซเคิล เนื่องจากภายในแบตเตอรี่มีองค์

ประกอบเป็นโลหะที่มีมูลค่าหลายชนิด ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการรีไซเคิลที่นิยมใช้ได้แก่ กระบวนการ Pyrometallurgy และกระบวนการ Hydrometallurgy [2]

จากความสำคัญของปัญหาจึงเป็นที่มาของงานวิจัยในการศึกษาการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว โดยใช้กระบวนการแยกโลหะด้วยปฏิกิริยาเคมีซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การชะละลายขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีองค์ประกอบเป็นโลหะหนักให้อยู่ในรูปของสารละลาย และการตกตะกอนเพื่อแยกโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักออกในรูปของแข็ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาองค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่
2. ศึกษาการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่
3. หามภาวะที่เหมาะสมของการชะละลายโลหะจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่
4. หามภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนโลหะที่ได้จากการชะละลาย

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อัตราส่วนระหว่างกรดต่อโลหะ เวลา และอุณหภูมิ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. รวบรวมแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เสื่อมสภาพและคัดแยกประเภท
3. แยกแบตเตอรี่ออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่
4. ศึกษาการชะละลายโลหะ โดยมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้
 - 4.1 ชนิดของกรด ได้แก่ กรดไนตริก (HNO_3) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
 - 4.2 ความเข้มข้น 1-6 โมลต่อลิตร
 - 4.3 อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 10-40 กรัมต่อลิตร
 - 4.4 อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส

4.5 เวลา 5-120 นาที

5. ศึกษาการตกตะกอนโลหะ โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าความเป็นกรด-เบส
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมของการแยกโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยกระบวนการชะละลายและการตกตะกอน
2. เป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนากระบวนการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและเนื้อหาที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ที่ใช้งานกันมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน วิธีและกระบวนการที่นำมาใช้ในการจัดการกับแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว รวมทั้งงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาและทดลองไปแล้ว

2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี [3]

เซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เกิดจากสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากันแล้วมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวอย่างเซลล์กัลวานิก ได้แก่ ถ่านไฟฉายหรือเซลล์แห้ง (Dry cell) และเซลล์แอลคาไลน์ (Alkaline cell) เป็นต้น

2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเคมี เกิดจากการใส่กระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปภายในเซลล์ แล้วทำให้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ตัวอย่างเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ การแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า และการชุบโลหะ เป็นต้น

2.2 เซลล์กัลวานิก

เซลล์กัลวานิกเป็นเซลล์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 เซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell)

เซลล์ปฐมภูมิ หมายถึง เซลล์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อปฏิกิริยาภายในเซลล์เกิดขึ้นและดำเนินไปข้างหน้าจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับอีกไม่ได้ เซลล์ประเภทนี้เมื่อสร้างเสร็จแล้ว สามารถนำไปใช้ได้ทันที เมื่อเริ่มปฏิกิริยาในเซลล์ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (แอโนดและแคโทด) จะค่อยๆ ลดลง จนในที่สุดเป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองจะเท่ากัน เรียกว่าเซลล์อยู่ในภาวะสมดุล เซลล์ประเภทนี้เมื่อใช้หมดแล้ว จะนำมาอัดไฟใหม่ไม่ได้ ตัวอย่างเช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ เซลล์ปรอท และเซลล์เงิน ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีรูปแบบของเซลล์ต่างกัน แต่มีหลักการทำงานเดียวกัน ได้แก่

● **ถ่านไฟฉาย** เป็นเซลล์ปฐมภูมิ มีชื่อเรียกอย่างอื่น ๆ เช่น เซลล์เลอ คลังเช (Leclanche cell) เซลล์โวลตาอิก (Voltaic cell) หรือเซลล์แห้ง (Dry cell) ถ่านไฟฉายเป็นเซลล์ปฐมภูมิที่ได้รับการดัดแปลงให้มีขนาดเล็ก เพื่อให้สะดวกแก่การใช้งาน สารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ไม่ใช่ของเหลว แต่เป็นของแข็ง จึงเรียกว่าเซลล์แห้ง

ลักษณะของถ่านไฟฉายจะเหมือนกับเซลล์ปฐมภูมิชนิดอื่นๆ ที่ออกแบบมาให้สะดวกต่อการประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน คือ มีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว และมีอิเล็กโทรไลต์อยู่ระหว่างขั้วทั้งสอง และทั้งหมดนี้อยู่ในกล่องหรือภาชนะปิด เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นจากภายนอกเข้าไป ถ้าผ่าถ่านไฟฉายออกดูจะพบว่าถ่านไฟฉายประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ แกรไฟต์ (หรือแท่งคาร์บอน) เป็นแคโทด (ขั้วบวก) และสังกะสีเป็นแอโนด (ขั้วลบ) แกรไฟต์จะอยู่ตรงกลาง และสังกะสีจะหุ้มอยู่รอบนอกระหว่างแกรไฟต์กับสังกะสี จะมีสารที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์บรรจุ คือ ผงคาร์บอน (Carbon) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) แมงกานีส (IV) ออกไซด์ (MnO_2) และกาวย สารทั้งหมดนี้จะจัดทำเป็นรูปทรงกระบอกดังที่เห็นกันโดยทั่วไป ด้านนอกอาจเคลือบด้วยสี หรือหุ้มด้วยกระดาษแข็งอีกชั้นหนึ่งและปิดด้วยยางมะตอยเพื่อกันความชื้น ถ่านไฟฉายมีศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ประมาณ 1.5 โวลต์ เมื่อใช้ไปนานๆ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะลดลงจนในที่สุดเข้าสู่ภาวะสมดุล ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้า เรียกว่าถ่านหมดอายุการใช้งาน ซึ่งจะพบว่าถ่านไฟฉายหมดอายุการใช้งาน มักจะมีลักษณะบวม และมีน้ำไหลออกมา เพราะมีความดันจากแอมโมเนีย (NH_3) และมีน้ำ (H_2O) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา

● **เซลล์แอลคาไลน์ (Alkaline cell)** เป็นเซลล์ปฐมภูมิอีกชนิดหนึ่ง อาศัยหลักการเช่นเดียวกับถ่านไฟฉาย ส่วนประกอบต่างๆ เหมือนกับถ่านไฟฉาย แต่ใช้สารละลายเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แทนแอมโมเนียมคลอไรด์ ดังนั้นจึงเรียกว่า เซลล์แอลคาไลน์ เซลล์ชนิดนี้ให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.5 โวลต์ แต่ให้กระแสไฟฟ้าได้มากกว่าและนานกว่าเซลล์ถ่านไฟฉาย เนื่องจากที่แคโทด เกิดปฏิกิริยาแล้วได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ที่แอโนด

● **เซลล์ปรอท (Mercury cell)** เซลล์ปรอท หรือเซลล์เมอร์คิวรี หรือเซลล์รูบิน-มาลลอรี่ (Rubin-mallory cell) เป็นเซลล์ปฐมภูมิเช่นเดียวกับเซลล์แอลคาไลน์ ใช้หลักการเช่นเดียวกัน และมีลักษณะคล้ายๆ กัน เพียงแต่เปลี่ยนสารอิเล็กโทรไลต์จากแมงกานีส (IV) ออกไซด์เป็นเมอร์คิวรี (II) ออกไซด์ (HgO) เซลล์ชนิดนี้ให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.5 โวลต์ มีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์แอลคาไลน์ แต่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเกือบคงที่ตลอดอายุการใช้งาน

เซลล์ชนิดนี้มีขนาดเล็กจึงสะดวกต่อการใช้ โดยเฉพาะใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องฟังเสียงสำหรับหูคนพิการ เกมสติก นาฬิกาข้อมือ เครื่องคิดเลข และกล้องถ่ายรูป เป็นต้น

● **เซลล์เงิน (Silver cell)** เป็นเซลล์ปฐมภูมิเช่นเดียวกัน มีหลักการและส่วนประกอบเช่นเดียวกับเซลล์ปรอท เพียงแต่ใช้ซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) แทนเมอร์คิวรี (II) ออกไซด์ เซลล์ชนิดนี้ให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.5 โวลต์ มีขนาดเล็กกว่าแต่ราคาแพง

2.2.2 เซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell)

เซลล์ทุติยภูมิหมายถึงเซลล์ที่สร้างเสร็จแล้วยังไม่มีกระแสไฟฟ้า ก่อนการนำไปใช้งานต้องทำการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปก่อน เมื่อกระแสไฟฟ้าหมดก็สามารถนำมาอัดไฟใหม่ และนำกลับไปใช้ได้อีกเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เซลล์ทุติยภูมิที่รู้จักกันเป็นอย่างดีคือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดต่างๆ

- **แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead-acid battery)** เรียกอีกอย่างว่า "เซลล์เปียก" (Wet cell) เป็นเซลล์สะสมไฟฟ้าชนิดที่สามารถอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ที่เก่าแก่ที่สุด ซึ่งยังใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบัน โดยใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีน้ำหนักมาก รูปแบบทั่วไปของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด คือ แบตเตอรี่รถยนต์ นอกจากนี้ได้มีการนำมาใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นแรกที่เป็นกระเป๋าหิ้ว กล้องถ่ายภาพวิดีโอขนาดใหญ่ อุปกรณ์สำรองกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ประเภทไฟฟ้าฉุกเฉิน เป็นต้น ลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าแบบตะกั่วประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำด้วยแผ่นตะกั่ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ กรดซัลฟิวริก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25-1.30 เซลล์ไฟฟ้าแบบตะกั่วแต่ละเซลล์จะมีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ ซึ่งถ้านำมาต่อกันแบบอนุกรมจะได้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกลายเป็น "แบตเตอรี่" ศักย์ไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่มาต่อกัน เช่น ถ้าในรถยนต์ใช้ 6 เซลล์ จะได้แบตเตอรี่ 12 โวลต์

ปกติเมื่อใช้แบตเตอรี่ไปนานๆ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะลดลงเนื่องจากเปลี่ยนเป็นเลด (II) ซัลเฟต ($PbSO_4$) และน้ำ ดังนั้น จึงสามารถที่จะตรวจสอบสภาพของแบตเตอรี่ได้ง่ายโดยพิจารณาจากความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเหลือน้อย ทำให้เลด (II) ซัลเฟตเกิดขึ้นมาก แสดงว่ากระแสไฟฟ้าใกล้จะหมดแล้ว แต่ในทางปฏิบัติมักจะสังเกตจากค่าความถ่วงจำเพาะ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1.24 แสดงว่าไฟฟ้าหมดหรือใกล้จะหมด ให้นำแบตเตอรี่ไปอัดไฟใหม่ ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่เมื่อใช้ไฟหมดแล้วจะสามารถนำไปอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้อีกก็ตาม ในขณะที่มีการจ่ายไฟนั้น ทำให้เลด (II) ซัลเฟตที่เกิดขึ้นอาจจะหลุดร่อนออกจากแผ่นตะกั่วกลายเป็นตะกอนอยู่ก้นภาชนะ ทำให้แผ่นตะกั่วเกิดการสึกกร่อนไปเรื่อยๆ แบตเตอรี่จึงเกิดการเสื่อมคุณภาพและไม่สามารถแก้ไข ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ ซึ่งยังเป็นปัญหาอยู่จนถึงปัจจุบัน

- **แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile phone battery)** เป็นเซลล์ทุติยภูมิที่เป็นเซลล์แห่งรูปแบบใหม่ มีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้ พัฒนาขึ้นมาใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ (Note book) ซึ่งตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้มีแบตเตอรี่ที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่เกิดขึ้นอย่างมากมายสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ [4]

แบตเตอรี่ที่มีการผลิตขึ้นมาเพื่อใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนั้น สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทต่างๆ ดังนี้

2.3.1 แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Nickel cadmium battery, Ni-Cd)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ประเภทแรกที่ผลิตขึ้นมาใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เริ่มใช้กันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1899 แต่ในขณะนั้นวัสดุขั้วที่นำมาใช้มีราคาสูง ต่อมาในปี ค.ศ. 1932 ได้มีการใช้วัสดุขั้วชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า และมีการนำแผ่นนิกเกิลมาเป็นตัวประกอบภายใน โดยมีชื่อทางเทคนิคว่า Porous nickel-plate electrode และในปี ค.ศ. 1974 แบตเตอรี่ Seal nickel cadmium ได้เกิดขึ้น ลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดนี้ ขณะอัดประจุไฟฟ้าจะมีแก๊สภายในแพร่กระจายออกมา ซึ่งจากการพัฒนานี้ทำให้แบตเตอรี่ Seal nickel cadmium มีสมบัติที่ดีขึ้นและใช้งานกันมาถึงปัจจุบัน นอกจากนี้จะนำมาใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นแรกๆ แล้ว ยังนิยมนำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอื่นๆ อีกมากมาย เช่น วิทยุ กล้อง เป็นต้น ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ การอัดประจุไฟฟ้าสะดวกและรวดเร็ว จำนวนของการอัดและคายประจุไฟฟ้ามากกว่า 1,000 รอบ และมีให้เลือกหลายขนาด ราคาไม่แพงจนเกินไป ในการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดนี้ ต้องคำนึงถึงเรื่องของคุณภูมิด้วย เพราะถ้าคุณภูมิสูงเกินไปแล้วทำให้การอัดประจุไฟฟ้าไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าคุณภูมิต่ำประสิทธิภาพของการอัดประจุไฟฟ้าจะดีขึ้น ก่อนการใช้งานครั้งแรก ควรอัดประจุไฟฟ้าเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง เพราะเมื่อประจุไฟฟ้าจะเต็มในเวลา 8-10 ชั่วโมง หลังจากนั้นวงจรภายในจะหยุดอัดประจุไฟฟ้า และจะอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้งเป็นช่วงๆ จนครบ 24 ชั่วโมง เซลล์ไฟฟ้าแต่ละเซลล์ภายในแบตเตอรี่จะมีแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากัน การอัดประจุไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของประจุไฟฟ้านั้นเอง สำหรับการอัดประจุครั้งต่อไปนั้น จำเป็นต้องคายประจุให้หมดก่อนที่จะทำการอัดประจุใหม่ ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้เลิกใช้ไปแล้ว

2.3.2 แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel metal hydride battery, Ni-MH)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เริ่มทำการค้นคว้าและวิจัยกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ จนกระทั่งในปี 1980 และได้มีการพัฒนาขึ้นอีกครั้ง เพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในเรื่องของพลังงาน จะมีความจุมากกว่าแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมขนาดเดียวกัน 30-50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีรูปร่างและขนาดที่เล็กกว่า ส่วนโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในก็เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแคดเมียม จำนวนรอบของการอัดและคายประจุไฟฟ้าอยู่ที่ 500-600 รอบ ในขณะที่มีการอัดประจุไฟฟ้าคุณภูมิจะสูงขึ้น สำหรับการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์จะมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าน้อยกว่าแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมมาก และจำเป็นต้องคายประจุไฟฟ้าออกให้เกือบหมด

เสียก่อนจึงสามารถอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ ในการอัดประจุไฟฟ้าใหม่ใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง แต่ถ้าหากเป็นการใช้งานครั้งแรกควรจะใช้เวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมงขึ้นไป แต่ไม่ควรเกิน 24 ชั่วโมง

2.3.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion battery, Li-ion)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1912 แต่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1970 การพัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้เริ่มต้นขึ้นอีกครั้ง แต่ก็ยังไม่สมบูรณ์เพราะมีปัญหาในการนำไปอัดประจุไฟ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1980 จึงจะสามารถแก้ปัญหาตรงนี้ได้และได้นำออกมาใช้งาน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีองค์ประกอบเป็นโลหะที่มีความสามารถสูงในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบาว่าแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ แต่ถ้าเกิดปัญหาลัดวงจรอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะให้พลังงานถึง 2 เท่าของแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม ในขณะที่อัตราการคายประจุก็น้อยกว่า แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์จะมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าออกประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ หรือน้อยกว่านั้นต่อวัน แต่หากเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแล้ว จะมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าน้อยกว่านั้นมาก คือเพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวันเท่านั้น สำหรับการอัดประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่ควรอัดประจุไฟฟ้าเป็นช่วงๆ เพราะจะทำให้วงจรเกิดการสะสมของประจุมากเกินไป (Overcharge) และยังทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้น ภายในวงจรของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า หากมีการอัดประจุไฟฟ้ามากกว่า 4.3 โวลต์ หรืออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส วงจรจะสามารถสั่งหยุดอัดประจุไฟฟ้าโดยทันที

2.3.4 แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ (Lithium polymer battery, Li-polymer)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ในช่วงแรกของการทดลองใช้งานเกิดการรั่วของสารภายในทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดการบวม แต่หลังจากได้ปรับปรุงแก้ไขแล้ว มีการคาดการณ์ว่าจะเป็นแบตเตอรี่อีกชนิดหนึ่งที่จะได้รับความนิยมในอนาคต ทั้งนี้เพราะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีรูปร่างค่อนข้างจะใหญ่ แต่แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์จะใช้ตัวนำไฟฟ้าที่เป็นพลาสติกซึ่งเบาและสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรง ได้หลายแบบ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์จะมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าน้อยกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน อย่างไรก็ตาม การที่ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควรเป็นเพราะสาเหตุสำคัญสองอย่างคือ จำนวนครั้งในการอัดประจุไฟฟ้าน้อยเกินไป และราคาที่สูงเกินไป ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ PowerPad 160 แบบต่อภายนอก สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้แค่ 300 ครั้งเท่านั้นซึ่งน้อยกว่าแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์หรือลิเทียมไอออนถึงครึ่งหนึ่ง และแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และหากจะเทียบกับแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์แล้วเห็นได้ชัดว่ามีราคาแพงกว่ามาก สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้ง 4 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละประเภท [4]

ประเภทของแบตเตอรี่	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-polymer
ความจุ	-	400-600 mAh	550-1200 mAh	500-700 mAh
อายุการใช้งาน (รอบ)	> 1000	500	300-500	300
อัตราการคายประจุ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าครั้งแรก (ชั่วโมง)	24	16-24	8-16	8-16
เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าครั้งต่อไป (ชั่วโมง)	2	2-4	3	8-16

2.4 แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในปัจจุบัน

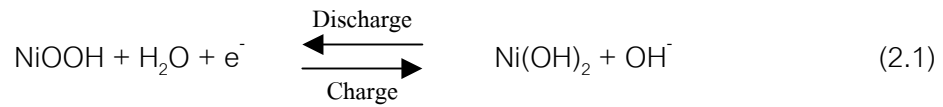
ในปัจจุบันแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีพัฒนาไปอย่างมากทั้งรูปร่าง ขนาด และคุณสมบัติภายใน และแบตเตอรี่ที่ใช้งานกันอยู่นั้นมี 2 ประเภท ดังนี้

2.4.1 แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ [5]

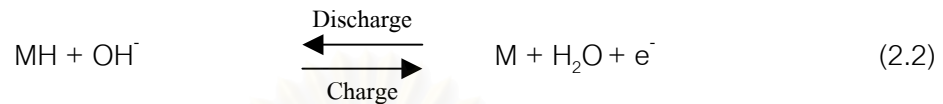
แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์เป็นแบตเตอรี่รุ่นแรกๆ ที่มีการอัดประจุไฟฟ้าแบบแห้งออกมา แบตเตอรี่ชนิดนี้มีลักษณะเฉพาะตัว คือ เมื่อต้องการอัดประจุไฟฟ้าจะต้องอัดให้เต็มเสมอ และต้องรอให้ประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ในแบตเตอรี่หมดหรือเกือบจะหมดเสียก่อน จึงจะอัดประจุไฟฟ้าครั้งต่อไปได้ ซึ่งในกรณีที่แบตเตอรี่ยังมีประจุไฟฟ้าค้างอยู่ในแบตเตอรี่ แล้วต้องการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “แท่นอัดประจุไฟฟ้า” ที่สามารถคายประจุไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ได้ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และไม่ทำให้แบตเตอรี่เกิดปัญหาเก็บประจุไฟฟ้าไม่อยู่

องค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีความคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียมที่ขั้วบวก (Positive electrode) หรือขั้วแอโนด (Anode) จะมีโลหะนิกเกิลอยู่ในรูป NiOOH (Nickel oxy hydroxide) ส่วนที่ขั้วลบ (Negative electrode) หรือขั้วแคโทด (Cathode) จะมีโลหะผสม (Alloy metal) ที่สามารถดูดซับแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen-absorbing alloy) ซึ่งที่พื้นผิวของโลหะชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติในการดูดซับและปล่อยแก๊สไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่เป็นดังสมการที่ (2.1) - (2.3)

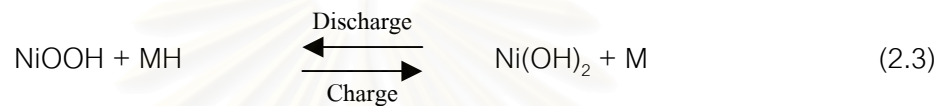
ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก



ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ

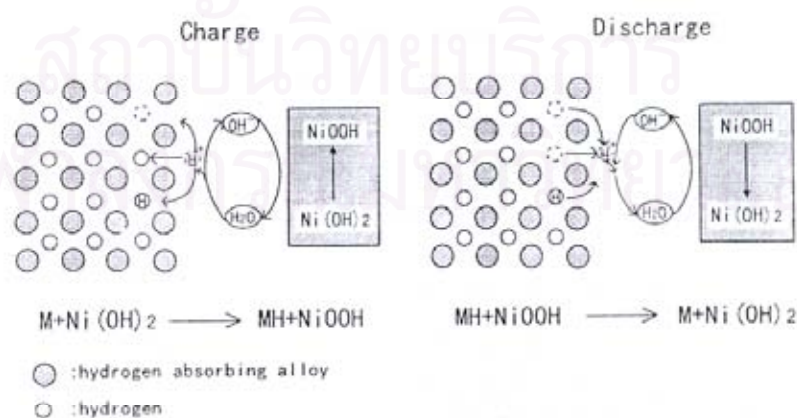


ปฏิกิริยารวม



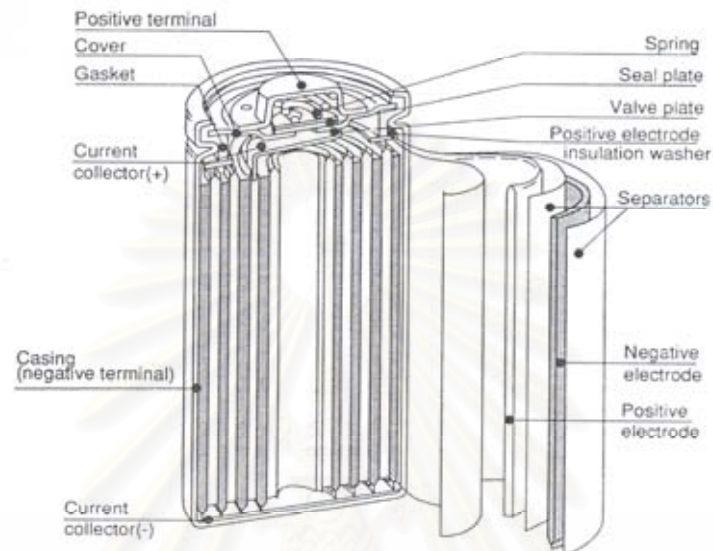
เมื่อ M = Hydrogen-absorbing alloy และ MH = Metal hydride

รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ ในช่วงที่เกิดการอัดประจุไฟฟ้าน้ำจะตัวทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน (H^+) ขึ้นในปฏิกิริยา อะตอมไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกโลหะอัลลอยด์ดูดซับเอาไว้ที่ผิว ส่วนในขณะที่เกิดการคายประจุไฟฟ้า ไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะจะถูกคายออกมารวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) แล้วกลายเป็นน้ำอีกครั้ง จากการที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า ไฮโดรเจนจะเป็นตัวกระตุ้น (Active material) ที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ในขณะที่โลหะอัลลอยด์จะเป็นตัวดูดซับและปล่อย (Storage medium) ไอออนของไฮโดรเจน

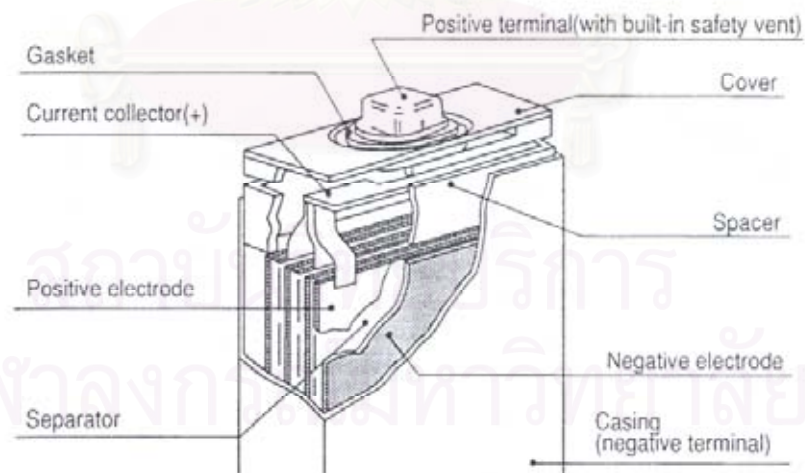


รูปที่ 2.1 กระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ [5]

แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้งานอยู่มีรูปร่างอยู่ 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอก (Cylindrical shape) และแบบทรงสี่เหลี่ยม (Prismatic shape) โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ทรงกระบอกแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนในรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์แบบทรงกระบอก [5]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์แบบทรงเหลี่ยม [5]

2.4.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [6]

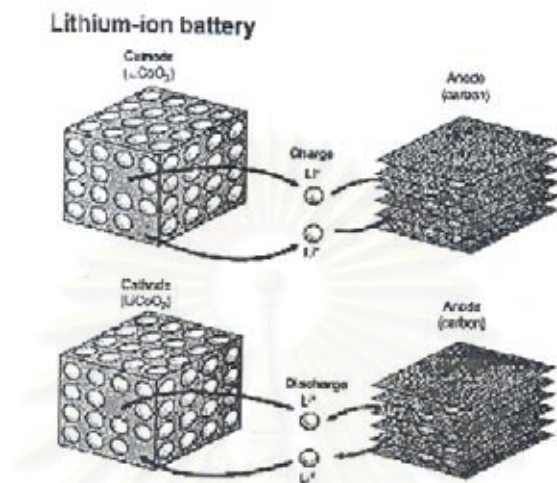
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่รูปแบบใหม่ที่มีความแตกต่างจากแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ในเรื่องรูปแบบการผลิตได้ของแบตเตอรี่และลักษณะของการนำไปใช้งาน เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนี้ไม่ต้องรอให้ประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่หมด แต่สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อเห็นว่าการกำลังไฟเหลือน้อย แบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ลิเทียมเป็นขั้วแอโนด เพราะวาลิเทียมมีคุณสมบัติในด้านศักย์ไฟฟ้าที่สูงและน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ต่ำ ทำให้มีความจุลอมป์สูง ซึ่งหมายถึงมีปริมาณอิเล็กตรอนต่อน้ำหนักสูง สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มาก ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงมีความหนาแน่นของพลังงานสูง นอกจากนี้ยังมีสารอีกชนิดที่นำมาใช้ในการทำแบตเตอรี่ชนิดนี้ นั่นคือคาร์บอน ซึ่งหน้าที่ของคาร์บอนในแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของคาร์บอนในแบตเตอรี่ลิเทียมประเภทต่างๆ [6]

ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียม	องค์ประกอบคาร์บอน	หน้าที่
Lithium/sulphur dioxide	อะเซทีลีนแบล็คติดเทฟลอน	เพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับแคโทด
Lithium/thionyl choride	อะเซทีลีนแบล็คติดเทฟลอน	เพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับแคโทด
Lithium/manganese dioxide	Vulcan VXC 72Rplus MnO ₂	ผิวหน้าว่องไวต่อปฏิกิริยาสำหรับลดออกซิเจน
Lithium/air	Catalysed Chevron black	เพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับแคโทด
Lithium/lithiated MnO ₂	Super-S/graphite n LiMn ₂ O ₄	เพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับแคโทด
Lithium-ion (Li/LiCoO ₂)	5-10 % อะเซทีลีน	เพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับแคโทด
Lithium-ion	ถ่านโค้กบริสุทธิ์ หรือแกรไฟต์บริสุทธิ์	ที่รองรับสำหรับให้ลิเทียมแทรกตัว

แบตเตอรี่ลิเทียมที่ผลิตขึ้นมาอยู่หลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือแบบที่หนึ่งไม่สามารถอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ ได้แก่ ลิเทียมแมงกานีสไดออกไซด์ ลิเทียมไทโอนิลคลอไรด์ และลิเทียมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การเติมคาร์บอนให้กับขั้วแคโทดก็เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าและเพิ่มความจุไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพราะว่าอะเซทีลีนแบล็ค คือ ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับสารละลายไฟฟ้า (ไทโอนิลคลอไรด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์) เนื่องจากความทนทานต่อสารเคมีที่กัดกร่อน และการแทนที่อะเซทีลีนแบล็คด้วยเส้นใยจุลภาคของคาร์บอน (Carbon microfibers) จะช่วยเพิ่มความจุของแคโทดได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เพราะเส้นใยจุลภาคของคาร์บอนช่วยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

สำหรับแบบที่สองเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมที่สามารถอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ เรียกกันว่า ลิเทียมไอออนที่แทรกอยู่ในคาร์บอน ส่วนขั้วแคโทดเป็นออกไซด์ของโลหะแทรนซิชัน เช่น โคบอลต์ออกไซด์ และมีลิเทียมแทรกอยู่ในเนื้อวัสดุเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.4



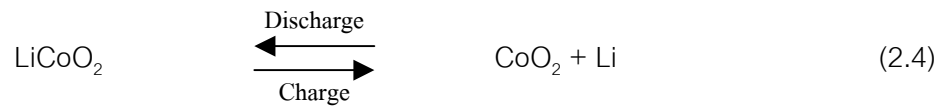
รูปที่ 2.4 กระบวนการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [6]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีการใช้คาร์บอนในรูปแบบต่างๆ รูปแบบในยุคต้นๆ มีปิโตรเลียมโค้ก ซึ่งได้จากการทำให้น้ำมันยางปิโตรเลียมร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 900- 1,000 องศาเซลเซียส แต่ปัจจุบันนิยมใช้แกรไฟต์มากกว่า เพราะว่ามีพื้นที่ให้ลิเทียมเข้าไปแทรกอยู่ได้สูงกว่า ซึ่งทำให้ความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สารอื่นๆ ที่อาจใช้แทรกแทนลิเทียมไอออน ได้แก่ Cu₂Zn₅ และ SnO₂ (ดีบุกออกไซด์)

แบตเตอรี่ลิเทียมที่อัดไฟใหม่ได้อีกแบบหนึ่ง คือ แบตเตอรี่ลิเทียม/อากาศ (Lithium/air) ประกอบด้วยแอโนดในรูปแผ่นโลหะลิเทียม (Lithium foil) ต่อกับขั้วแคโทดทำด้วยคาร์บอนสัมผัสอยู่กับออกซิเจน หรือเรียกว่า “ขั้วไฟฟ้าอากาศ” (Air electrode) ซึ่งอยู่ในพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าอากาศจะมีตัวรองรับเป็นแกรไฟต์พอร์น หรืออะเซทีลีนแบล็ค และมีตัวเร่งโคบอลต์กระจายอยู่โดยทั่วไป ขณะที่เซลล์ไฟฟ้าจะเกิดลิเทียมเปอร์ออกไซด์มาจับที่รูพอร์น การจ่ายไฟฟ้าสิ้นสุดลงเมื่อแคโทดถูกอุดตันจนหมด

อัตราการจ่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของวัสดุคาร์บอน โดยทั่วไปจะพบว่าอะเซทีลีนแบล็คเซฟรอน (Chevron) มีพื้นที่ประมาณ 40 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจะสูงกว่าพื้นที่ผิว 5 ตารางเมตรต่อกรัมคาร์บอน เช่น Ketjenblack ที่มีพื้นที่ผิวสูง 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม หรือ Black Pearl ที่มีพื้นที่ผิวสูง 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่เป็นดังสมการที่ (2.4) - (2.6)

ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก



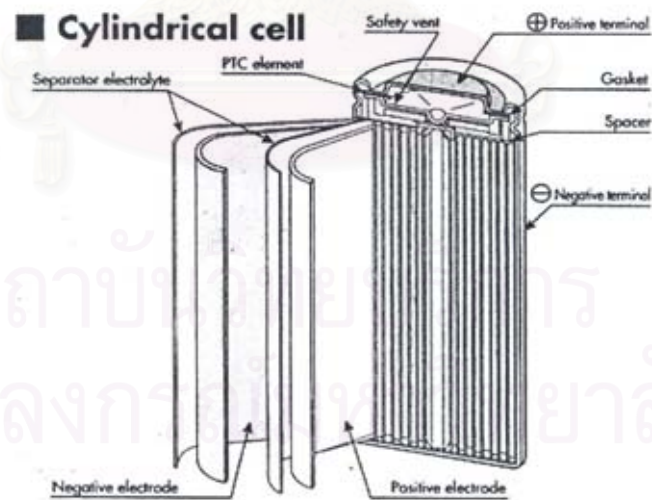
ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ



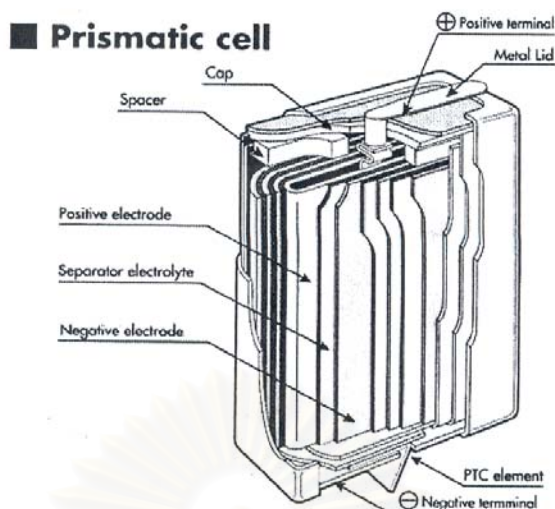
ปฏิกิริยารวม



โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 2.5 และแบบทรงสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก [5]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงเหลี่ยม[5]

การพัฒนาในอนาคตสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมซึ่งแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่นิยมใช้กันมากและจะเข้ามาแทนที่แบตเตอรี่ประเภทอื่นๆ นั้นจะมุ่งเน้นไปที่การใช้พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เพื่อผลิตแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นออกมาในเชิงการค้าการพาณิชย์

2.5 การผลิตใส่แบตเตอรี่ [7]

แบตเตอรี่ที่ได้กล่าวมานั้นมีการแบ่งแยกประเภทตามลักษณะใส่แบตเตอรี่ที่นำมาผลิตแบตเตอรี่ สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันนั้นยังไม่มีโรงงานผลิตใส่แบตเตอรี่ เนื่องจากสาเหตุหลายประการที่ไม่เอื้ออำนวยในการที่จะผลิตเอง เช่น เงินลงทุนที่ค่อนข้างจะสูงในการตั้งโรงงานผลิต การจัดระบบรักษาความปลอดภัยในการผลิต เพราะวัตถุดิบที่นำมาผลิตใส่แบตเตอรี่นั้นสามารถระเบิดได้ และการทำเรื่องขอสร้างโรงงานก็ต้องผ่านกระบวนการอนุมัติของกระทรวงอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ้งยากมากกว่าจะผ่านขั้นตอนเหล่านี้ได้ บริษัทผู้ผลิตแบตเตอรี่ในเมืองไทยจึงใช้วิธีสั่งซื้อใส่แบตเตอรี่ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เข้ามาประกอบเป็น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการจะหาแหล่งที่จะได้ใส่แบตเตอรี่มาผลิตจากผู้ผลิตโดยตรงนั้นยากมาก แต่วิธีการที่จะได้ใส่แบตเตอรี่มาง่ายกว่านั้นก็ยังมีอยู่หลายวิธีเช่นเดียวกัน ในการหาใส่แบตเตอรี่มาใช้ในการผลิตสามารถแยกออกเป็นหลายวิธีการ ดังนี้ โดยสามารถอธิบายแยกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. การสั่งซื้อใส่แบตเตอรี่ใหม่จากโรงงานผู้ผลิตโดยตรงหลัก ซึ่งแหล่งที่สั่งซื้อใส่แบตเตอรี่ในขณะนี้หลักๆ ก็มาจาก ญี่ปุ่น จีน หรือไต้หวัน เป็นต้น โดยปกติโรงงานผู้ผลิตใส่แบตเตอรี่ในญี่ปุ่น หรือจีนที่มีขนาดใหญ่และมีชื่อเสียงจะไม่มีกำหนดจำหน่ายให้แก่โรงงานโดยทั่วไปอย่างเสรี การที่จะจัด

จำหน่ายให้โรงงานที่สั่งซื้อจะต้องมีการส่งข้อมูลทั้งหมดให้โรงงานผู้จำหน่ายตรวจสอบ เช่น มาตรฐานของกระบวนการผลิตของโรงงานว่าได้มาตรฐานความปลอดภัย เพื่อไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชื่อเสียงผู้ผลิตได้แบตเตอรี่ในภายหลัง ทำให้ราคาของได้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาสูง ทั้งนี้เพื่อความมั่นใจในคุณภาพของผู้ผลิตได้แบตเตอรี่ที่กล้ารับประกันคุณภาพให้ด้วย ได้แบตเตอรี่ประเภทนี้จะมีคุณภาพสูงสุด

2. การหาซื้อได้แบตเตอรี่มือสองมาแยกประกอบใหม่ ซึ่งวิธีนี้จะง่ายกว่าแบบแรกมาก วิธีการก็คือหาซื้อได้แบตเตอรี่ในสเปคและขนาดที่ต้องการที่ได้มาจากอุปกรณ์เก็บไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีได้แบตเตอรี่นี้เป็นส่วนประกอบอยู่ เช่น ชี้อดาวเทียมเก่าในราคาถูกเพื่อแกะเอาได้แบตเตอรี่ที่มีอยู่จำนวนนับล้านก้อนเพื่อนำมาใช้ หรือแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือรุ่นเก่าๆ ที่เลิกใช้แล้ว ก็นำมาแกะเอาปลอกหุ้ม (Case) ออก แล้วนำได้แบตเตอรี่ไปใช้ผลิตต่อ เป็นต้น วิธีการนี้จัดได้ว่าจะได้ได้แบตเตอรี่คุณภาพต่ำเนื่องจากได้แบตเตอรี่ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และระยะเวลาที่นานจนทำให้สารเคมีบางตัวนั้นเสื่อมลง

3. การหาซื้อได้แบตเตอรี่ที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ วิธีนี้ผู้ที่ซื้อนั้นต้องมั่นใจว่าได้แบตเตอรี่ที่ซื้อไปนั้นสามารถใช้งานได้ดีในระดับหนึ่ง ซึ่งแบตเตอรี่ที่ได้มาย่อมมีคุณภาพที่ต่ำกว่าปกติแน่นอน แต่ราคาก็จะถูกตามไปด้วย

4. การหาซื้อได้แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นได้แบตเตอรี่คงค้างในคลังสินค้าที่เก็บไว้นานมาก ซึ่งโรงงานเหล่านั้นได้ขายในราคาถูกๆ โดยไม่มีการรับประกันคุณภาพ ซึ่งได้แบตเตอรี่เหล่านี้มักจะเกิดปัญหากระแสไฟฟ้าเริ่มตกเมื่อใช้งานไปสักพัก แต่อายุการใช้งานก็ยังปกติเพราะยังไม่เคยถูกอัดประจุไฟฟ้ามาก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของได้แบตเตอรี่ยี่ห้อนั้นว่ามีคุณภาพดีมาน้อยเพียงใด

5. การหาซื้อจากแหล่งอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถกระทำได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างโรงงานผู้ผลิตได้แบตเตอรี่ กับโรงงานผู้ผลิตแบตเตอรี่ เช่น โรงงาน ก. ซื้อได้แบตเตอรี่จากโรงงาน ข. ที่เป็นเพื่อนกัน ซึ่งเป็นลูกค้าของผู้ผลิตได้แบตเตอรี่โดยตรง เป็นต้น

2.6 การจัดการกับแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งาน [8]

แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วเมื่อถูกทิ้งปะปนกับขยะทั่วไปโดยไม่ได้รับการคัดแยกไปจัดการอย่างถูกวิธี อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นโลหะหนักภายในของแบตเตอรี่ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส เป็นต้น จึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์การจัดการกับแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้ ซึ่งแบ่งออกเป็นวิธีการต่างๆ ดังนี้

2.6.1 การเผาอุณหภูมิต่ำ (Incineration)

การจัดการกับแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการนำมาเผาเพื่อให้แบตเตอรี่เปลี่ยนสภาพไปเป็นเถ้าของแข็ง แล้วนำเถ้านี้ไปฝังกลบต่อไป ต้องทำการเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1000-1200 องศาเซลเซียส ในการเผาจะต้องมีการเผาไอแก๊สที่เกิดขึ้นซ้ำอีกครั้งเพื่อลดมลพิษที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด และต้องปรับอัตราส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศให้เหมาะสม นอกจากนี้จะต้องมีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศซ้ำ เช่น เครื่องดักฝุ่น เครื่องกำจัดไอพิษที่อาจจะเกิดขึ้น ก่อนที่จะปล่อยไอแก๊สออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากอาจจะมีโอกาสของโลหะหนักเกิดขึ้น เช่น ไบปรอท ตะกั่ว หรือแคดเมียม เป็นต้น

2.6.2 การปรับเสถียร (Stabilization)

การปรับเสถียรนี้เป็นกระบวนการปรับสภาพของแบตเตอรี่ ทำให้โครงสร้างมีความเสถียร โลหะหนักไม่ถูกชะล้างออกมาได้ง่าย เพื่อเตรียมนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย ตัวอย่างของการปรับเสถียร ได้แก่ การผสมปูนซีเมนต์กับตะกอนโลหะหนักแล้วนำมาหล่อให้เป็นก้อน ตะกอนที่ผ่านการปรับเสถียรต้องนำมาทดสอบสมบัติการชะละลาย (Leaching test) ภายใต้ภาวะมาตรฐานก่อนนำไปฝังกลบ สารละลายที่ผ่านการชะละลายแล้ว จะต้องมีความเข้มข้นต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ ซึ่งวิธีนี้อาจไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีต้นทุนที่สูง

2.6.3 การฝังกลบ (Landfill)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การเผาเป็นการเปลี่ยนซากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วให้อยู่ในรูปเถ้าของแข็ง ต่อจากนั้นนำไปปรับให้เสถียรก่อนเพื่อให้มีความคงตัวมากขึ้นอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แล้วจึงนำไปทำการฝังกลบอย่างปลอดภัยต่อไป โครงสร้างของหลุมฝังกลบนั้นจะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและสารอันตรายอย่างรัดกุมมาก ที่กั้นหลุม และด้านข้างหลุม มีการบดอัดด้วยดินเหนียวซึ่งมีอัตราการไหลซึมของน้ำต่ำ กรณีหลุมฝังของ GENCO มีอัตราการไหลซึมของน้ำชั้นดินเหนียวต่ำกว่า 7-10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ต่อจากนั้น จึงปูด้วยแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติก เช่น แผ่น HDPE จำนวน 2 ชั้น เหนือชั้นแผ่นยางแต่ละชั้นเป็นชั้นระบายน้ำ ซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลลงมา น้ำเหล่านี้จะไหลลงท่อ เพื่อรวบรวมนำมาบำบัดภายนอกต่อไป เมื่อฝังกลบกากของเสียจนเต็มหลุมแล้วต้องทำการปิดหลุมด้วยดินอัดแน่น ต่อจากนั้น ปูแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติกสังเคราะห์แล้วปูทับด้วยดินอีกชั้น แล้วปลูกพืชคลุมดินไว้ เพื่อลดการชะล้างพังทลายหน้าดินไป นอกจากนี้ ด้านบนของหลุมฝังกลบ จะต้องมียุทธศาสตร์อากาศ เพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดตัวของแก๊สจนดันหลุมฝังกลบให้มีรอยแตกได้ ด้านข้างของหลุมฝังกลบทั้ง 2 ด้านต้องมีบ่อบาดาลเป็นบ่อสังเกตการณ์การรั่วไหลออกสู่ภายนอก โดยต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อทั้งสองมาตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนอยู่เสมอ

2.6.4 การรีไซเคิล (Recycling)

การรีไซเคิลเป็นวิธีการนำสิ่งที่มีมูลค่ากลับมาผ่านกระบวนการเพื่อให้นำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบภายในแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นโลหะหนักหลายชนิด เช่น นิกเกิล โคบอลต์ แมงกานีส แคดเมียม เป็นต้น โลหะเหล่านี้จัดเป็นโลหะที่มีมูลค่าสูง จึงมีแนวความคิดที่จะนำโลหะเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ ทำให้เกิดเทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งาน โดยจะมีขั้นตอนการเตรียมแบตเตอรี่ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลที่เรียกว่า "Pretreatment" คือ การถอดปลอกพลาสติกที่หุ้มแบตเตอรี่ออก แล้วตัดหรือบดย่อยด้วยเครื่องมือให้แบตเตอรี่มีขนาดเล็กลง เพื่อที่ผ่านเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลต่อไป แต่ขั้นตอนนี้มีข้อควรระวัง คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นอาจทำให้ประจุไฟฟ้าที่ยังเหลืออยู่ในแบตเตอรี่เกิดการระเบิดได้ ดังนั้น ควรจะมีการติดตั้งระบบหล่อเย็น (Cooling) เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

2.7 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ [9]

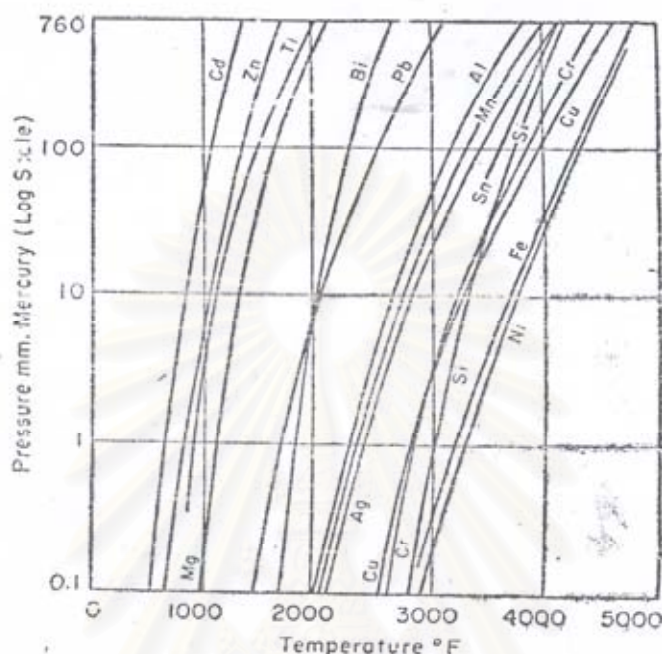
กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (Metallurgical industry) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการ Pyrometallurgy และ กระบวนการ Hydrometallurgy ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลนี้จะมีหลายรูปแบบ เช่น อยู่ในรูปโลหะผสม (Metallic alloys) หรือสารประกอบ (Compound) หรืออยู่ในรูปสารละลายที่มีไอออนของโลหะ (Metal ions) ละลายอยู่ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ต่างๆ เหล่านี้สามารถนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ในการปรับคุณสมบัติของเหล็ก แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.7.1 กระบวนการ Pyrometallurgy

กระบวนการ Pyrometallurgy เป็นกระบวนการแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากกันด้วยความร้อนโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ ถ้าพิจารณาถึงความแตกต่างในเรื่องของความดันไอ (Vapor pressure) เพราะความดันไอเป็นตัวที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นแก๊ส ความดันไอจึงเป็นสมบัติของสารที่สามารถใช้บอกความแตกต่างอุณหภูมิของจุดเดือดได้ สารที่มีอุณหภูมิของจุดเดือดต่ำ จะมีความดันไอสูง ส่วนสารที่มีอุณหภูมิของจุดเดือดสูงจะมีความดันไอต่ำ และความดันไอจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของจุดเดือด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระบวนการนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. การทำให้เป็นไอ (Vaporization) คือ การทำให้โลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส โดยให้ความร้อนกับโลหะ ทำให้โลหะมีความดันไอสูงขึ้น แล้วสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส ในขั้นตอนนี้จะต้องค่อยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเพื่อแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากกันให้ได้

2. การควบแน่น (Condensation) คือ การทำให้โลหะที่อยู่ในสถานะแก๊สเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของเหลว และปล่อยให้เย็นตัวลงเป็นแข็งอีกครั้ง เมื่อโลหะอยู่ในสถานะแก๊สมาสัมผัสกับความเย็น ทำให้ความดันไอของโลหะลดลงจึงเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.7 ความดันไอของโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ [9]

ตัวอย่างของกระบวนการนี้ เช่น ตะกั่ว (Lead) ที่มีสังกะสี (Zinc) ผสมอยู่ ถ้าให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิเหนือจุดเดือด (Boiling point) เล็กน้อยก็จะทำให้สังกะสีกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว แต่ตะกั่วก็ยังคงอยู่ในสถานะของเหลว เมื่อสังเกตจากกราฟรูปที่ 2.7 ระหว่างตะกั่วกับสังกะสี สังกะสีจะกลายเป็นไอและควบแน่นออกมาที่อุณหภูมิต่ำกว่าตะกั่ว

เมื่อให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป โลหะจะเกิดการหลอมเหลวและเดือดกลายเป็นไอ โดยทำในเตาเผา (Smelting Furnace) และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับดักจับแก๊สพิษที่เกิดจากการเผาไหม้โดยเฉพาะปรอท ซึ่งเป็นโลหะที่มีความดันไอสูง จุดเดือดค่อนข้างต่ำกว่าโลหะตัวอื่นๆ อาจจะเป็นสารประกอบออกไซด์ได้และปนเปื้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศ

2.7.2 กระบวนการ Hydrometallurgy

กระบวนการ Hydrometallurgical เป็นกระบวนการแยกโลหะออกจากกันโดยอาศัยสมบัติทางเคมีด้วยการใช้สารละลายกรด (Acid solution) เพื่อแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากกัน อาจจะมีการใส่สารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อละลายโลหะ และทิ้งสิ่งเจือปน (Impurities) ไว้ หรือละลายสิ่งเจือปนแล้วทิ้งโลหะไว้ กระบวนการแยกโลหะด้วยปฏิกิริยาเคมี ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

- การชะละลายโลหะ (Leaching)
- การแยกสารละลายออกจากสิ่งเจือปน (Filtration)
- การแยกโลหะออกจากสารละลายโดยการตกตะกอน (Precipitation) หรือทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry)

ในขั้นตอนแรกนำโลหะใส่ลงไปในสารละลายกรด กรดจะทำหน้าที่ชะละลายโลหะออกมาอยู่ในรูปของไอออนที่อยู่ในสารละลาย แล้วจึงแยกเอาส่วนที่ไม่ละลายออกโดยการกรอง นำส่วนที่ได้จากการชะละลายซึ่งมีโลหะที่ต้องการอยู่ (Pregnant solution) ไปทำการแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากกันโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมี หรือใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี

2.8 กระบวนการชะละลาย [10]

กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นกระบวนการละลายของแข็งให้อยู่ในรูปของเหลว เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ กระบวนการนี้แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี

2.8.1 กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการชะละลายโลหะโดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์ (Micro-organism) ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดขึ้น แล้วนำกรดที่ได้ไปชะละลายโลหะอีกทีหนึ่ง โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล (Genus) Thiobacillus เช่น Thiobacillus thiooxidans และ Thiobacillus ferrooxidans ซึ่งจะจัดอยู่ในจุลินทรีย์ที่สร้างอาหารได้เอง โดยใช้พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันของสาร กระบวนการสร้างและสลายพลังงานเป็น 2 แบบ คือ

- แบบทางตรง (Direct process) เป็นการเปลี่ยนโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปโลหะซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ ดังสมการปฏิกิริยาที่ (2.7)



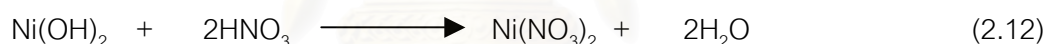
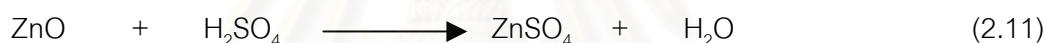
- แบบทางอ้อม (Indirect process) ในขั้นแรกโลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดส์ด้วยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ดังสมการที่ (2.8)



จากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดส์ซัลเฟอร์และเฟอร์รัส (Fe (II)) ไฮดรอกไซด์ ดังสมการปฏิกิริยาที่ (2.9) และ (2.10) จากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาที่ (2.8) เป็นวงจรต่อเนื่อง วิธีการนี้จะเกิดกรดซัลฟิวริกในปฏิกิริยาที่ (2.9) ที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสลดลง



2.8.2 กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการชะละลายโลหะด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการทางเคมี คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และสารละลายไฮดรอกไซด์ คือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ และสามารถละลายโลหะได้เป็นส่วนมาก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการชะละลายโลหะชนิดต่างๆ เป็นดังสมการที่ (2.11) – (2.14)



การศึกษากระบวนการชะละลาย มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการชะละลาย ได้แก่

1. ชนิดของกรด กรดที่ใช้ในการชะละลาย ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งกรดเหล่านี้เป็นกรดที่สามารถชะละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นกรดแก่ที่แตกตัวได้ร้อยละ 100 สามารถแสดงสมการการแตกตัวของกรดทั้งสามชนิดได้ดังสมการที่ (2.15) - (2.18) มีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าความสามารถในการชะละลายโลหะสังกะสีด้วยกรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริกมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ในส่วนของกรดซัลฟิวริกเป็นกรดที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูก



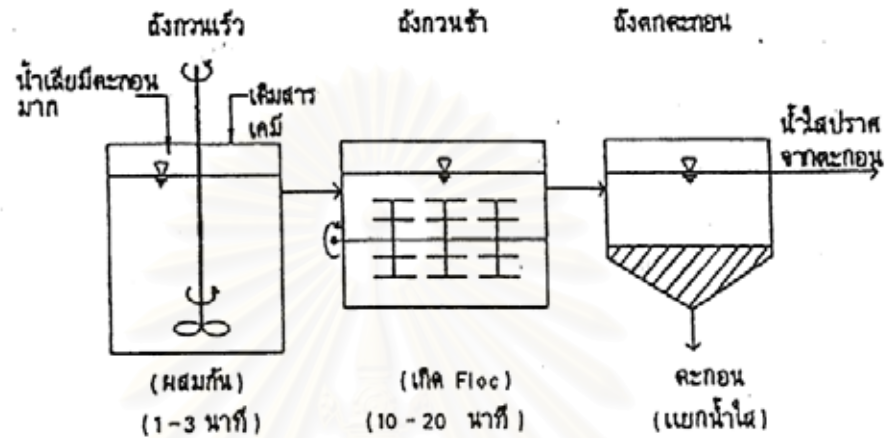
2. ค่าความเป็นกรด-เบส ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-2 โดยถ้าค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 9-10 โลหะสังกะสีจะละลายได้น้อยที่สุด
3. เวลาในการชะละลาย เวลาที่ใช้ในการชะละลายจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส ชนิดของโลหะ เป็นต้น
4. ชนิดของโลหะ โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่าโลหะอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใด ซึ่งโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิกที่เมื่ออยู่ในน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย
5. อุณหภูมิ ปฏิกริยาการชะละลายส่วนใหญ่ จะเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การชะละลายจะเพิ่มขึ้น
6. ปริมาณโลหะ ค่าการชะละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น
7. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ
8. ขนาดอนุภาคของตะกอนโลหะ โลหะจะอยู่ในรูปของตะกอน ถ้าตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับกรดน้อย ทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก
9. ความเข้มข้นของตะกอนโลหะ ตะกอนโลหะที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ทำให้อนุภาคภายในตะกอนอยู่ชิดติดกันมากขึ้น ทำให้ตะกอนโลหะมีความเสถียร ค่าการชะละลายจึงลดลง

2.9 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) [11]

การตกตะกอนทางเคมี เป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะซึ่งอยู่ในรูปแตกตัว (Ionized form) ซึ่งละลายน้ำ (Soluble) แยกออกมาโดยทำปฏิกริยากับสารเคมีที่เติมลงไป เปลี่ยนแปลงไปเป็นสารใหม่ซึ่งไม่ละลายน้ำ หรือความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) ลดน้อยลงอย่างมาก จึงทำให้โลหะดัง

กล่าวตกตะกอนเป็นผลึก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้โดยวิธีง่ายโดยใช้ถังตกตะกอนดังแสดงในรูปที่ 2.8 หรือใช้ระบบตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation, DAF) เป็นต้น

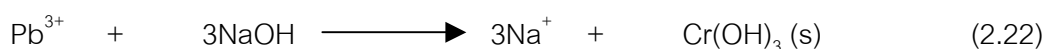
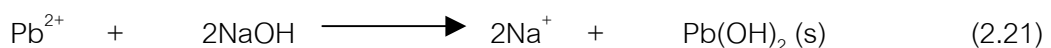
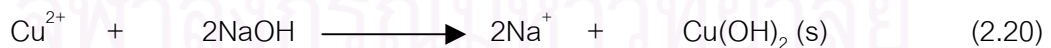
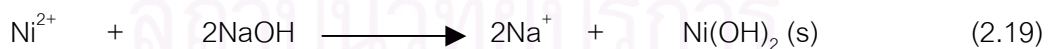
วิธีการตกตะกอนทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็นหลายวิธีตามลักษณะของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนต่างๆ ดังนี้



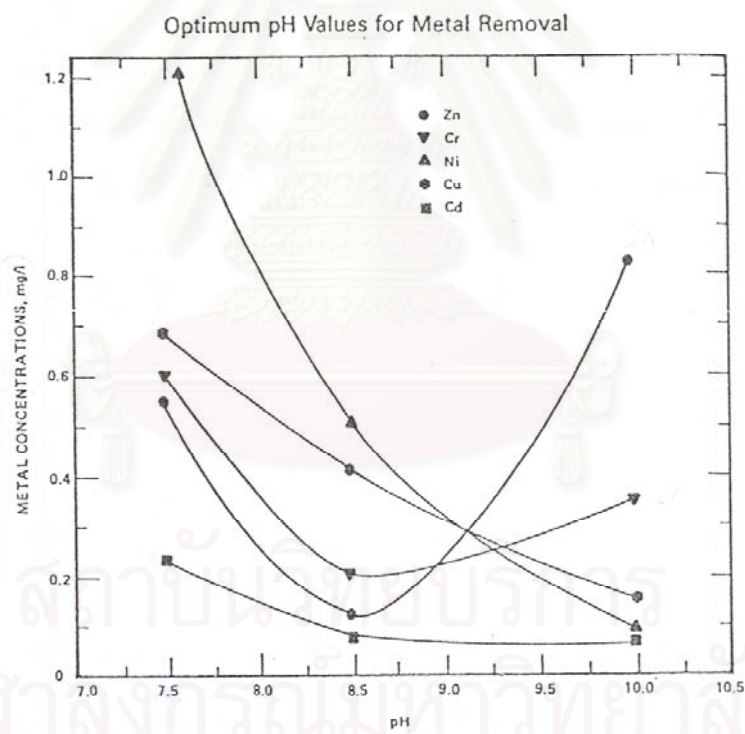
รูปที่ 2.8 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี [11]

2.9.1 การตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

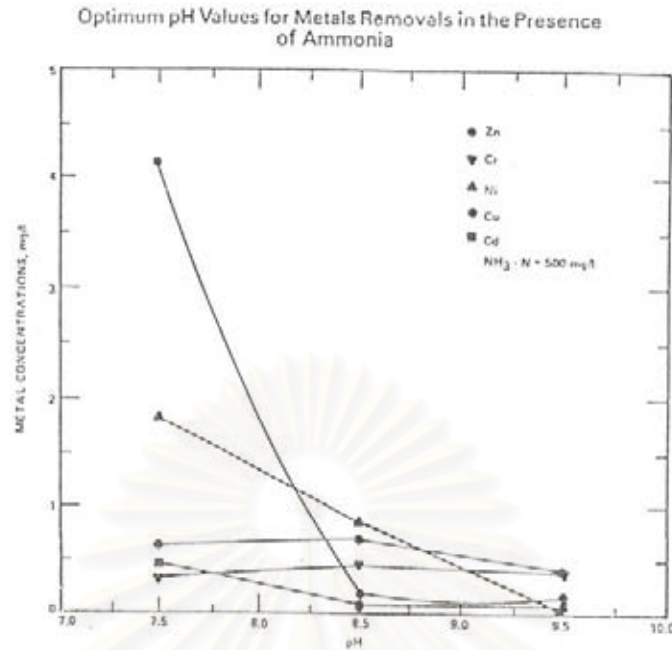
การทำให้อนุภาคบวก (Cation) ของโลหะตกตะกอนออกมาในรูปของไฮดรอกไซด์ โดยการปรับค่าปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นด่าง (สูงกว่า 7) สารที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) สามารถแสดงสมการเคมีการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์ ได้ดังสมการที่ (2.19) – (2.22)



ในกรณีที่มีไอออนบวกหลายชนิดอยู่ในน้ำเสีย การควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสมีความสำคัญมากในการกำจัดไอออนบวกนั้น รูปที่ 2.9 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี (Zinc) โครเมียม (Chromium) นิกเกิล (Nickel) ทองแดง (Copper) และแคดเมียม (Cadmium) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น มีค่าต่ำสุดที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.5 ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 8.5 ความเข้มข้นของโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี และโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ในการกำจัดโลหะหนัก เหล่านี้จึงจำเป็นต้องคุมค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.5 แล้วปล่อยให้โลหะไฮดรอกไซด์ของสังกะสี และโครเมียมตกตะกอนแยกออกจากนั้นนำมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสเป็น 10 เพื่อตกตะกอนโลหะ นิกเกิล ทองแดง และแคดเมียม จึงเป็นการตกตะกอนสองขั้นตอน โดยสารอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียอาจมี ผลต่อการตกตะกอนเคมี เช่น สารแอมโมเนีย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะทำให้กราฟเปลี่ยนรูปร่างไป ซึ่ง จะเห็นว่าการกำจัดโลหะหนัก ในกรณีนี้เป็นขั้นตอนเดียว คือควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9.5 จะสามารถแยกโลหะหนักทุกตัวได้สูงสุด



รูปที่ 2.9 ความเข้มข้นของโลหะที่ละลายในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ [11]



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ โดยมีสารแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย [11]

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นด่างมีข้อดีหลายประการคือการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สะดวก รวมทั้งการเติมและการผสมไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อเสียคือตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้ค่อนข้างเบาจึงจมตัวได้ยากและกรองให้แห้งยาก นอกจากนี้มีค่าใช้จ่ายสูง

ในกรณีที่สารละลายมีโครเมียมปนเปื้อนอยู่ จำเป็นต้องมีการเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ลงไปเพื่อเป็นตัวรีดิวซ์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} แล้วจึงจะตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24)



2.9.2 การตกตะกอนในรูปของสารประกอบคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

การแยกโลหะที่อยู่ในรูปไอออนบวกด้วยการตกตะกอนออกมาในรูปผลึกคาร์บอเนต ซึ่งโลหะส่วนใหญ่เกือบทุกชนิดสามารถตกตะกอนเป็นผลึกคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องมาจากโลหะคาร์บอเนตเกือบทุกตัวมีค่าความสามารถในการละลายที่ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความสามารถในการละลายของโลหะคาร์บอเนตต่างๆ ($pK_s = -\log K_s$) [11]

สารประกอบ	pks	สารประกอบ	pks
CaCO ₃	8.2	CrPO ₄	17.0
BaCO ₃	8.2	SnS ₂	18.3
NiCO ₃	8.3	FeS	21.2
SrCO ₃	9.0	ZnS	24.7
ZnCO ₃	9.1	SnS	25.9
MnCO ₃	9.3	Sb ₂ S ₃	26.0
CuCO ₃	9.9	NiS	26.6
CoCO ₃	10.0	CdS	27.0
FeCO ₃	10.5	PbS	27.4
Ag ₂ CO ₃	11.1	As ₂ S ₃	27.5
PbCO ₃	13.5	CuS	36.1
CdCO ₃	13.7	Ag ₂ S	50.1
HgCO ₃	16.0	HgS	53.3

การตกตะกอนคาร์บอเนตนี้โดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) และปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงสมการเคมีการตกตะกอนของโลหะในรูปคาร์บอเนต ดังสมการที่ (2.25) – (2.27)



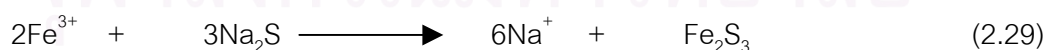
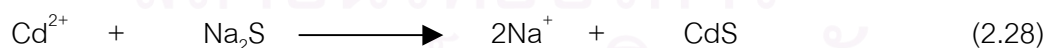
ข้อดีของการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตเมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ คือ มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่สูงกว่า และตะกอนที่ได้อยู่ในรูปผลึกเม็ดโต จึงทำให้แยกออกมาได้สะดวก แต่ก็มีข้อเสียคือ การเตรียมโซเดียมคาร์บอเนตนั้นค่อนข้างยุ่งยาก ตารางที่ 2.4 แสดงถึงประสิทธิภาพของการตกตะกอนของโลหะในรูปของคาร์บอเนต พบว่า โลหะส่วนใหญ่สามารถตกตะกอนออกมาได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของโลหะหนักโดยการเติมคาร์บอนेट [11]

ความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
โลหะ	ขาเข้า	ขาออก	ร้อยละของโลหะที่ตกตะกอนได้
Ag	0.24-1.51	0.01-0.02	96-99
As	7.00-8.40	0.20-0.30	96-97
Ba	0.36-1.08	0.04-0.14	87-89
Cd	0.54-5.78	0.01-0.19	95-99
Co	0.42-1.29	0.04-0.09	90-96
Cu	0.60-1.47	0.04-0.03	84-93
Hg	3.26-4.45	0.29-0.61	86-91
Mn	1.37-2.26	0.01-0.02	99
Ni	0.75-1.36	0.11-0.20	85
Pb	0.41-1.21	0.04-0.05	90-96
Zn	7.34-9.61	0.21-0.18	97-99

2.9.3. การตกตะกอนในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ (Sulphide precipitation)

การตกตะกอนโลหะหนักในรูปซัลไฟด์ (Sulphide) โดยเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มักนิยมใช้ตกตะกอนโลหะหนัก เช่น อาร์เซนิก แคดเมียม เหล็ก อลูมิเนียม และปรอท เนื่องจากโลหะซัลไฟด์ส่วนใหญ่มีค่าการละลายต่ำมาก ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์จึงสูงกว่าในรูปไฮดรอกไซด์และคาร์บอนेट แสดงปฏิกิริยาเคมีของการตกตะกอนของโลหะในรูปสารประกอบซัลไฟด์ ได้ดังสมการ (2.28) และ (2.29)



แต่การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์มีข้อเสีย คือสารประกอบซัลไฟด์ที่เติมลงไปอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมที่ดี ในการตกตะกอนผลึกต่างๆ ให้ได้ผลดีจะต้องพิจารณาค่าความเป็นกรด-เบส หลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-เบสควร

สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม และชนิดของสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อกำจัด หรือแยกโลหะออกจากน้ำเสีย

ตารางที่ 2.5 ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนโลหะด้วยสารเคมีต่างๆ [11]

โลหะที่อยู่ในสารละลาย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม	ตะกอนที่ได้
Aluminum	Lime	5	Al(OH)_3
Arsenic	Ferric chloride	8	AsCl_2
Barium	Sodium sulfate	10	BaSO_4
Cadmium	Lime	9.5-12	Cd(OH)_2
Chromium	Lime	8.0-9.5	Cr(OH)_2
Copper	Lime	9-10	Cu(OH)_2
Ferric	Lime	7	Fe(OH)_2
Fluoride	Lime	12	CaF_2
Manganese	Lime	10	Mn(OH)_2
Mercury	Sodium sulfide	8.5	HgS
Nickel	Lime	10	Ni(OH)_2
Phosphorus	Ferric chloride	7	FePO_4
Plumbic	Lime	6-10	Pb(OH)_2
Selenium	Sodium sulfide	6.5	SeS_2
Silver	Sodium chloride	8	AgCl
Stannic	Lime	4-4.5	Sn(OH)_2
Zinc	Lime	5-6	Zn(OH)_2

ในส่วนของตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมีในรูปแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมา

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมีรูปแบบต่างๆ [11]

เทคนิคการตกตะกอน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮดรอกไซด์	-เกิดโลหะออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ สามารถแยกออกได้	-ปริมาณตะกอนมาก
คาร์บอเนต	-เกิดผลึกที่ละลายน้ำได้น้อยสามารถ แยกออกได้โดยการกรอง	-แยกโลหะออกจากสารละลาย ได้ยาก -เกิดสารประกอบคาร์บอเนต กับกับโลหะอื่น
ซัลเฟต	-เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำ ได้บ้าง	-เป็นพิษเนื่องจากแก๊สซัลเฟต
ออกไซด์ของเหล็ก	-ตกตะกอนและสามารถนำกลับมาใช้ ได้ง่าย	
สารประกอบพอลิเมอร์	-ความเข้มข้นของตะกอนโลหะหนัก น้อย	-ต้องเผาตะกอนเพื่อแยกโลหะ หนักออก

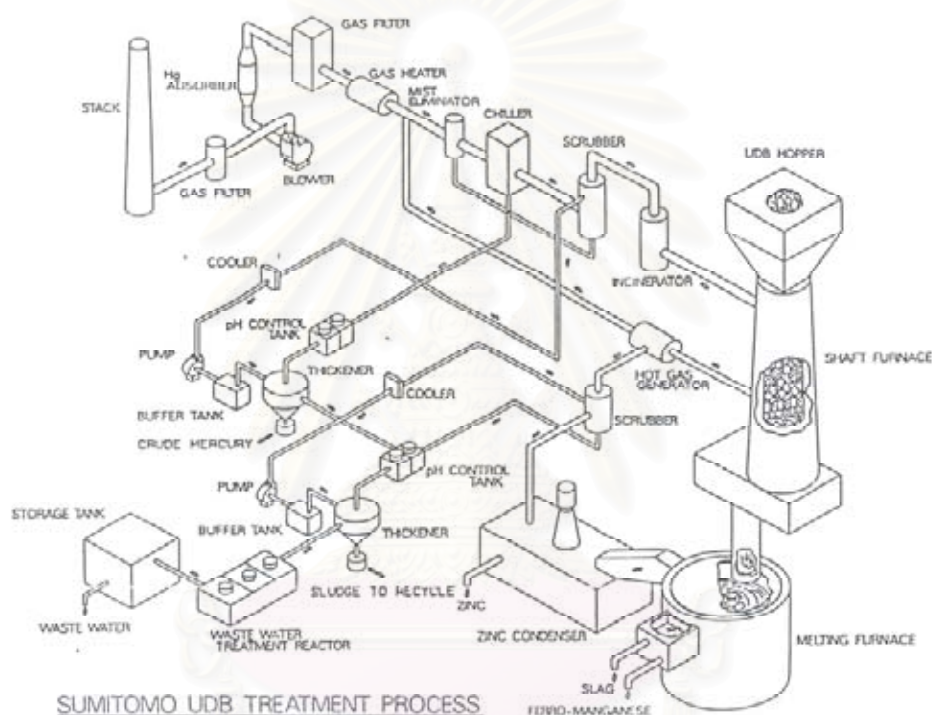
2.10 เทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ [12]

เทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่จะกล่าวถึงนี้มีมากมายหลากหลายเทคโนโลยี บางเทคโนโลยีถูกออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยเฉพาะ แต่บางเทคโนโลยีก็ออกแบบให้สามารถรีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น แบตเตอรี่สำหรับโทรศัพท์บ้าน ถ่านไฟฉาย ถ่านชาร์จ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีต่างๆ เหล่านี้ได้พัฒนามาจากกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ได้แก่กระบวนการต่างๆ ดังนี้

● Sumitomo

Sumitomo เป็นเทคโนโลยีของประเทศญี่ปุ่นเป็นกระบวนการ Pyrometallurgy ที่ออกแบบมาสำหรับแบตเตอรี่รีไซเคิล Zn-MnO₂ เริ่มต้นพัฒนาในทศวรรษที่ 80 เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีแรกๆ ที่เข้ามาในอุตสาหกรรมรีไซเคิลแบตเตอรี่ กระบวนการนี้เริ่มนำมาใช้ในบริษัท Batreco เมือง Wimmis ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (Switzerland) ในปี 1992 สามารถรับแบตเตอรี่มาจัดการได้ถึง 2,000 ต่อบปี และในปี 1995 สามารถรับเพิ่มเป็น 3000 ตันต่อปี ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง กระบวนการนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ โดยขั้นตอนแรกเป็นการเผาในเตาเผาธรรมดาที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อกำจัดปรอทและสารประกอบคลอไรด์ให้กลายเป็นไอ รวมทั้งอาจมีองค์ประกอบอื่นๆ ในแบตเตอรี่ที่ถูก

กำจัดออกไปพร้อมกันด้วย เช่น กระดาษ และพลาสติก เป็นต้น และมีการติดตั้งระบบควบแน่นเพื่อไม่ให้สารเหล่านี้ปนเปื้อนออกสู่บรรยากาศ ส่วนโลหะตัวอื่นๆ ที่เหลืออยู่จะถูกส่งไปเผาต่อในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปที 1,500 องศาเซลเซียส จนเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายออกมาเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับแมงกานีส (Fe-Mn alloy) โดยเป็นเหล็ก 65 เปอร์เซ็นต์ และแมงกานีส 35 เปอร์เซ็นต์ แบตเตอรี่แต่ละตันที่ถูกป้อนเข้าไปจะออกมาเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับแมงกานีส 360 กิโลกรัม สังกะสี 200 กิโลกรัม พรอท 1.5 กิโลกรัม และอื่นๆ 20 กิโลกรัม โดยใช้กำลังไฟประมาณ 3500 กิโลวัตต์ต่อตัน รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนของกระบวนการ Sumitomo



รูปที่ 2.11 กระบวนการ Sumitomo [12]

● Recytec

Recytec เป็นเทคโนโลยีของประเทศสวีเดนที่รวมเอากระบวนการ Pyrometallurgy เข้ากับกระบวนการ Hydrometallurgy สามารถใช้รีไซเคิลแบตเตอรี่ได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม กระบวนการนี้ถูกนำมาใช้งานในบริษัท Aclens ประเทศสวีเดน สามารถรับแบตเตอรี่มาจัดการได้วันละ 2,000 ตันต่อปี

กระบวนการนี้มีขั้นตอนเหมือนกับ Sumitomo แต่ในกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 650 °C เพราะแค่อุณหภูมิ 600 °C ก็สามารถกำจัดปรอทและสารประกอบคลอไรด์ออกไปได้แล้ว จึง

เลือกใช้อุณหภูมินี้ และต้องมีการติดตั้งระบบควบแน่นเพื่อไม่ให้สารเหล่านี้ปนเปื้อนออกสู่บรรยากาศเหมือนกัน ความแตกต่างของกระบวนการ Recytec นี้กับ Sumitomo โลหะที่เหลือจากผ่านขั้นตอนการเผาไล่ปรอทออกไปแล้วจะถูกส่งต่อไปเพื่อแยกเป็นโลหะชนิดต่างๆโดยนำไปผ่านกระบวนการดังนี้ เหล็กจะถูกแยกออกด้วยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ เช่น สังกะสี และทองแดงจะนำไปผ่านกระบวนการ Hydrometallurgy ต่อไป

สำหรับกระบวนการนี้สามารถที่จะนำไปใช้กับขยะที่มีสารปรอทเป็นองค์ประกอบได้ เช่น หลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamps) เป็นต้น

- Inmetco

Inmetco เป็นเทคโนโลยีในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยบริษัท International Nickel Company (INCO) เริ่มต้นจากการนำฝุ่นกลับคืนมาจากการเผาในเตาเผาไฟฟ้า (Electric arc furnace) และสามารถได้โลหะกลับคืนมาจากการบวนการอีกด้วย จึงได้พัฒนามาใช้ในการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม กระบวนการนี้ทำการเผาที่อุณหภูมิสูงมากถึง 1,350 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์จำนวนมากในช่วง 15 นาทีแรก ในกระบวนการนี้โลหะที่กลายเป็นไอ เช่น ตะกั่ว และสังกะสี จะถูกควบคุมโดยปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ ส่วนเหล็กและโครเมียมจะกลายเป็นของเหลวในเตาเผา กระบวนการนี้ออกแบบมาสำหรับแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม โดยโลหะนิกเกิลและแคดเมียมจะกลายเป็นไอปะปนมากับโลหะชนิดอื่นๆ แล้วจะส่งต่อไปยังบริษัทอื่นเพื่อทำการแยกเป็นโลหะแต่ละชนิด นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังสามารถใช้กับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ได้ด้วย เช่น แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และแบตเตอรี่สังกะสี-แมงกานีส เป็นต้น

ในเดือนธันวาคม ปี 1995 บริษัทได้มีการปรับปรุงและติดตั้งหน่วยปฏิบัติงานสำหรับจัดการแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยก่อนที่จะทำการรีไซเคิล ต้องมีการขั้นตอนการเตรียมก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล ดังนี้ การแยกพลาสติกและปลอกเหล็กที่หุ้มได้แบตเตอรี่ที่เป็นขั้วไฟฟ้าออกเสียก่อน แล้วจึงจะนำใส่แบตเตอรี่ที่ได้ผ่านเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลต่อไป โดยนำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าเป็นเวลา 12-14 ชั่วโมง ที่ 950 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ อากาศมีปริมาณออกซิเจนน้อยๆ ทำให้โลหะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเฉพาะ แคดเมียมที่ได้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95

- Accurec

กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีของประเทศเยอรมนี เป็นกระบวนการ Pyrometallurgy ที่ถูกออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม โดยเตาเผาตัวแรกติดตั้งในปี 1997 และมีสามารถรับแบตเตอรี่มาจัดการได้ 500 ตันต่อปี และเตาเผาตัวที่สองติดตั้งในปี 2000 บริษัทมีสำนักงานอยู่ที่เมือง Mulheim ประเทศเยอรมนี ขั้นตอนของกระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการแยกใส่แบตเตอรี่ที่เป็นขั้วไฟฟ้าออกจาก ปลอกพลาสติกและปลอกเหล็กเหมือนกับกระบวนการ Inmetco หลังจากนั้นนำส่วนได้

แบตเตอรี่ที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบไปผ่านกระบวนการกลั่นแยกออกเป็นโลหะชนิดต่างๆ โดยระบบการกลั่นจะเป็นแบบระบบสุญญากาศ (Vacuum distillation) เตาเผาถูกออกแบบพิเศษให้ทำเป็นท่อแก้ว และติดตั้งระบบควบแน่น (Condensation) ซึ่งต่อกับท่อป้อนน้ำ

กระบวนการนี้ต้องมีการควบคุมภาวะให้มีความดันน้อยกว่า 10 มิลลิบาร์ เริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเพื่อเผาพลาสติกและไล่ความชื้นออกไปให้หมดก่อน หลังจากนั้นก็เพิ่มอุณหภูมิเป็น 850 องศาเซลเซียสเพื่อแยกโลหะแคดเมียมออก และต้องมีการควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ด้วย ทำการเผาต่อไปอีก 12 ชั่วโมงจะได้โลหะแคดเมียมที่บริสุทธิ์ร้อยละ 99.95

● TNO

กระบวนการ Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek ออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมมีจุดประสงค์เพื่อแยกโลหะแคดเมียมนิกเกิลและเหล็กกลับคืนมา กระบวนการนี้เริ่มต้นโดยการตัดแบตเตอรี่ให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดเล็กกว่า 15 มิลลิเมตร และทำการคัดแยกด้วยตะแกรงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนละเอียด (Fine fraction) มีขนาดเล็กกว่า 3 มิลลิเมตร และส่วนหยาบ (Coarse fraction) มีขนาดใหญ่กว่า 3 มิลลิเมตร

ส่วนหยาบจะถูกส่งไปเข้าเครื่องแยกด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic separator) ประมาณร้อยละ 50 ของส่วนหยาบจะถูกแม่เหล็กดูดติดไว้ ซึ่งประกอบด้วยเหล็กเป็นส่วนใหญ่ และมีนิกเกิลกับแคดเมียมปนออกด้วยเล็กน้อย ต่อจากนั้นทั้งส่วนที่ติดแม่เหล็กและส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กจะนำไปละลายในกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโลหะแคดเมียมออกมาด้วยกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือที่เรียกว่า การชะละลาย ในส่วนละเอียดจะมีโลหะนิกเกิลและแคดเมียมเป็นส่วนใหญ่ และมีเหล็กอยู่เล็กน้อย จะนำไปละลายในกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร ในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โลหะแคดเมียมและนิกเกิลที่ปนกันอยู่ในรูปสารละลายจะถูกแยกออกจากกัน โดยแยกโลหะแคดเมียมออกมาโดยกระบวนการสกัด (Extraction) ด้วยสารละลายผสมระหว่าง Tributylphosphate (TBF) ร้อยละ 75 กับ Shellsol R ร้อยละ 25 หลังจากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อดึงโลหะแคดเมียมกลับมา เรียกว่าการ Stripping แล้วทำให้โลหะแคดเมียมบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ในส่วนของสารละลายที่ผ่านการสกัดแยกโลหะแคดเมียมออกไปจะเหลืออยู่แต่โลหะนิกเกิลก็นำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเหมือนกัน

กระบวนการนี้สามารถพัฒนาไปใช้รีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ได้เหมือนกัน เช่น แบตเตอรี่กัลวานิกถ่านไฟฉาย เป็นต้น

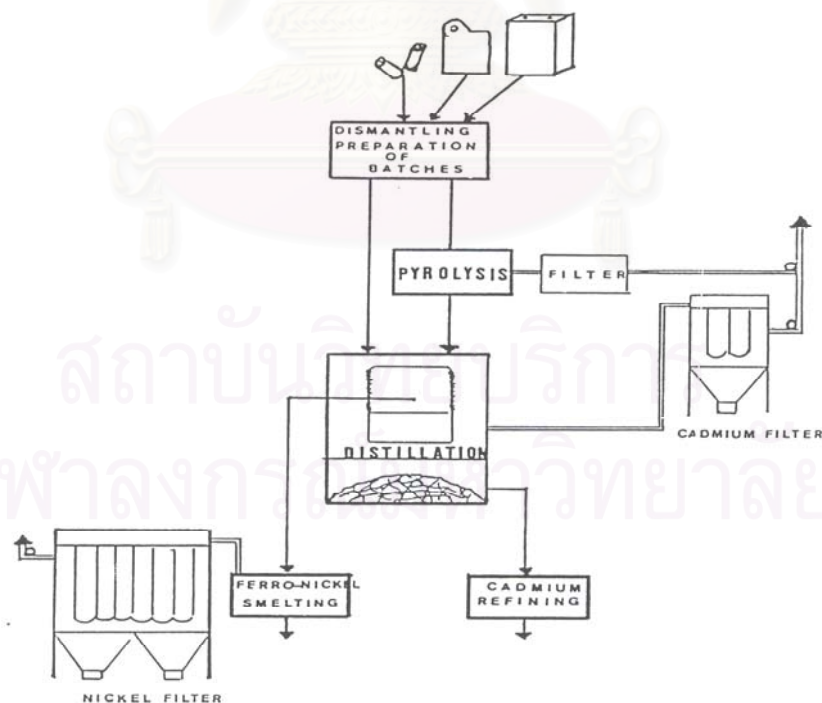
● Sab Nife

เทคโนโลยี Sab Nife เป็นเทคโนโลยีของกระบวนการ Pyrometallurgy ถือกำเนิดขึ้นในทศวรรษที่ 80 ในประเทศสวีเดนซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการแรกเริ่มที่ออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม และพัฒนาให้สามารถรีไซเคิลแบตเตอรี่รถยนต์ได้ กระบวนการนี้เริ่มต้น

ด้วยการแยกปลอกที่หุ้มแบตเตอรี่ออก นำส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าไปอบไล่ความชื้น แล้วนำไปเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยการแบ่งช่วงของความร้อนแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการให้ความร้อนประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) ต่างๆ ได้แก่ สารประกอบคาร์บอน เป็นต้น โดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง โดยในขั้นตอนนี้ต้องมีการควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนต่อไนโตรเจนในอากาศให้ไม่เกินร้อยละ 12 เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะแคดเมียมกลายเป็นไอ เรียกว่า กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) หลังจากนั้นในขั้นตอนที่สอง จะให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นไปที่ 900 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโลหะแคดเมียมให้กลายเป็นไอ โดยแก๊สที่ใช้ในการเผาเป็นแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและไฮโดรเจน ซึ่งขั้นตอนนี้ใช้เวลา 20 ชั่วโมง หลังจากนั้น จะส่งไปควบแน่นที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สุดท้าย จะเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 1,300 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดโลหะผสม (Alloy metal) ระหว่างนิกเกิลกับเหล็ก

● Snam-Savam

กระบวนการ Snam (Societe Nouvelle Daffinage des Metaux) เกิดขึ้นในประเทศฝรั่งเศส ปี 1985 หลังจากนั้นกระบวนการ Savam (Societe Aveyronnaise de Valorisation des Metaux) ก็เกิดขึ้นขึ้นตามมาในปี 1988 ซึ่งกระบวนการทั้งสองนี้ใช้เทคโนโลยีลักษณะเดียวกันสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมและพัฒนาให้สามารถใช้กับแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ได้ด้วย



รูปที่ 2.12 กระบวนการ Snam-Savam [12]

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการ Pyrometallurgy เริ่มต้นด้วยระบบคัดแยกชนิดของแบตเตอรี่แบบอัตโนมัติ และแกะแยกพลาสติกที่หุ้มแบตเตอรี่ออกเสียก่อน จึงผ่านเข้าสู่กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน เพื่อกำจัดสารประกอบ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหลั่นแยกโลหะแคดเมียมออกมา แล้วนำไปควบแน่นทำให้ได้โลหะแคดเมียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95 ส่งขายให้กับโรงงานที่ผลิตแบตเตอรี่ต่อไป ในส่วนโลหะนิกเกิลที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับเหล็ก ส่งไปขายให้กับอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์และสร้างมูลค่าเพิ่มขึ้นได้อย่างมาก ขั้นตอนของกระบวนการนี้แสดงในรูปที่ 2.12

- **Waelz**

กระบวนการ Waelz เกิดขึ้นในเมือง Lurgi ในประเทศเยอรมนี ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 เป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ในการแยกสังกะสีออกจากแร่ออกไซด์ (Oxide ores) และได้พัฒนามาใช้ในการรีไซเคิลแบตเตอรี่ ต่อมาได้แพร่หลายไปทั่วโลกทั้งในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น สามารถรีไซเคิลแบตเตอรี่ได้ถึง 1 ล้านตันต่อปี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการ Pyrometallurgical ที่ออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่แอลคาไลน์ที่ไม่มีส่วนผสมของปรอท กระบวนการเผาจะใช้ถ่านหิน (Coal) เป็นเชื้อเพลิง ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เกิดสารประกอบออกไซด์ของโลหะ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม แยกออกมาตามจุดเดือดของสารแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังได้ออกไซด์ของเหล็กใช้เป็นโครงสร้างของถนน หรือนำไปผลิตเหล็กต่อไป

กระบวนการนี้มีความพิเศษตรงที่มีเตาเผาตัวที่สองที่ทำหน้าที่เผาฝุ่น (Dust) หรือไอที่เกิดขึ้นเพื่อทำให้ได้ไอที่มีความสะอาดมากขึ้น หรือมีสิ่งเจือปนน้อยลง โดยการใส่แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 700-800 องศาเซลเซียส

- **Tera**

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการ Pyrometallurgy โดยใช้เตาเผาแบบ Tera ที่ถูกออกแบบมาสำหรับรีไซเคิลแบตเตอรี่ปรอท-ออกไซด์ (Hg-oxide battery) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กับนาฬิกา หรือวิทยุ กระบวนการนี้มีหน่วยปฏิบัติงานอยู่ 3 ที่คือ บริษัท NQR ตั้งขึ้นในปี 1996 และบริษัท GMR ในปี 1998 ทั้งสองอยู่ที่ประเทศเยอรมนี และบริษัท NKC ตั้งขึ้นในปี 2000 อยู่ที่ประเทศญี่ปุ่น ในกระบวนการประกอบด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสุญญากาศเพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้ จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปจนถึง 850 องศาเซลเซียส แล้วใส่อากาศเข้าไปพร้อมกับควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจน กระบวนการนี้ต่างจากกระบวนการอื่น ๆ ตรงที่ระบบจะมีการปฏิบัติงานภายใต้ภาวะความดันต่ำที่ 1 มิลลิบาร์

- **Batenus**

กระบวนการ Batenus เป็นกระบวนการที่สามารถรีไซเคิลแบตเตอรี่ได้หลายๆ ประเภท ประกอบด้วยหลายขั้นตอน เป็นกระบวนการ Hydrometallurgy เริ่มต้นด้วยการคัดแยกประเภทของ

แบตเตอรี่ จากนั้นส่งแบตเตอรี่เข้าเครื่องตัดแยกออกเป็นชิ้นเล็ก แล้วผ่านเข้าเครื่องแยกโลหะด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนที่มีคุณสมบัติติดแม่เหล็ก (Ferrous materials) จะถูกแยกออกไป สำหรับส่วนที่ไม่มีคุณสมบัติติดแม่เหล็ก (Non-ferrous materials) จะมีการคัดแยกอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อแยกส่วนที่เป็นพลาสติก กระดาษออกจากโลหะที่ไม่มีคุณสมบัติติดแม่เหล็ก และนำโลหะเหล่านี้ไปละลายในกรดซัลฟิวริกและทำการกรอง สารที่กรองได้จะเป็นคาร์บอน ส่วนในสารละลายที่ได้จะมี ไอออนของโลหะต่างๆ ละลายอยู่รวมกัน หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการแยกโลหะแต่ละชนิดออกจากกัน โดยสังกะสีจะแยกออกมาโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) ในส่วนของปรอท ทองแดง นิกเกิล และแคดเมียมจะแยกออกมาโดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนโดยเรซิน (Ion exchange rasins) จากนั้นจะเหลือแมงกานีสอยู่ ซึ่งจะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ส่วนไอออนของโลหะบางชนิดที่เหลืออยู่เล็กน้อยจะแยกออกด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) เป็นส่วนสุดท้าย

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีของกระบวนการ Hydrometallurgy ซึ่งเป็นกระบวนการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและได้นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย กล่าวถึงวิธีการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดต่างๆ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันในส่วน of ขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

Zhu และคณะ [13] ศึกษาการแยกโลหะนิกเกิลและแคดเมียมจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดนิกเกิลแคดเมียมใช้กระบวนการชีวเคมี โดยการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิด Thiobacillus ferrooxidant และ Thiobacillus thiooxidant เพื่อสังเคราะห์กรดซัลฟิวริก และนำกรดที่ได้ไปใช้ในการชะละลายโลหะออกมาในรูปของไอออนในสารละลาย โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ เวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเพื่อสร้างกรดซัลฟิวริก (RTB) เวลาที่ใช้ในการชะละลายโลหะ จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเพื่อสร้างกรดซัลฟิวริกคือ 4 วัน และเวลาที่ใช้ในการชะละลายคือ 50 วัน สามารถแยกโลหะนิกเกิลและแคดเมียมออกมาได้คิดเป็นร้อยละ 75.6 และ 98.8 ตามลำดับ

Zhang และคณะ [14] ศึกษาการแยกโลหะนิกเกิลและโคบอลต์จากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกทำการชะละลายโลหะทั้งหมดออกมาอยู่ในรูปของไอออน และใช้สารละลาย D2EHPA (Di 2-ethyl-hexyl phosphoric acid) แยกโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกจากโลหะอื่นๆ และใช้สารละลาย Cyanex 272 (Di 2,4,4-tri-methylpentyl) ดึงโลหะโคบอลต์ออกจากนิกเกิล จากนั้นทำให้โลหะทั้งสองที่อยู่ในรูปของไอออนในสารละลายตกผลึก

โดยการเติมกรดออกซาลิก (Oxalic acid) จากผลการทดลองพบว่าผลึกของโลหะโคบอลต์และนิกเกิล มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.6 และ 99.8 ตามลำดับ

Lee และคณะ [15] ศึกษาการแยกโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกจากขั้วแคโทด (LiCoO_2) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโดยใช้กระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดไนตริก และมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลาย ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นและปริมาณของสารละลาย ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 1.7 โดยปริมาตร ในอัตราส่วนระหว่างโลหะแคโทด 10-20 กรัมต่อสารละลาย 1 ลิตร ใช้เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส สามารถแยกโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกจากขั้วแคโทดได้มากกว่าร้อยละ 95

Lupi และคณะ [16] ศึกษาการนำโลหะนิกเกิลกลับคืนจากขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในระบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvan static conditions) และระบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Potentiostatic condition) โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลสูงถึง 50 กรัมต่อลิตร จะถูกนำกลับมาในภาวะคงที่เพื่อให้ความเข้มข้นต่ำลงมาเหลือ 1.7-1.8 กรัมต่อลิตร แล้วจึงนำกลับนิกเกิลที่เหลือในสารละลายในภาวะความต่างศักย์คงที่ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเริ่มต้น ความเข้มข้นนิกเกิลในสารละลาย อุณหภูมิ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลกลับคืนมาในระบบกระแสไฟฟ้าคงที่คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 250 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 3-4.2 เมื่อใช้ AISI 316L และ 316L และ Pb-8Sb เป็นขั้วแคโทดและแอโนดตามลำดับ และให้ผลค่อนข้างดีในการจับตัวนิกเกิล สำหรับภาวะที่เหมาะสมของระบบศักย์ไฟฟ้าคงที่คือ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -1.20 V/SCE ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้อะลูมิเนียมและไทเทเนียมเป็นขั้วแคโทดและแอโนดตามลำดับ โดยนิกเกิลที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง

Tenorio และคณะ [17] ทำการศึกษาการแยกโลหะจากแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ โดยใช้คุณสมบัติของแม่เหล็ก (Magnetic separation) มาใช้ในการแยก และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่โลหะด้วยเครื่อง X-ray Diffraction พบว่ามีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการแยกโลหะกลับมาด้วยเครื่องแยกแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Separator) โดยอาศัยหลักการดึงดูดของสนามแม่เหล็ก พบว่าสามารถนำนิกเกิลกลับมาได้ถึงร้อยละ 86 โดยน้ำหนัก

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการชะละลายโลหะจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ และหาภาวะที่ดีที่สุดของการชะละลาย หลังจากนั้นจึงนำสารละลายที่มีโลหะละลายอยู่ไปทำตกตะกอน และวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของตะกอนที่แยกออกมาได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในระดับอุตสาหกรรม

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องบด (Hammer mill) (Model 1212-HM, Serial 500454)
2. เครื่องอบแห้ง (Dryer) (Model SCSD-CT-04-102)
3. เครื่องตัดเหล็ก
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. เครื่องกวนแบบก้านใบพัดกวน
6. เครื่องกวนแบบใช้แม่เหล็ก (Magnetic stirrer) พร้อมอุปกรณ์ให้ความร้อน (Hot plate)
7. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter)
8. เตาอบ (Oven) ของ WT Bider
9. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารละลาย (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AA 6800
10. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในของแข็ง (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, XRF) ยี่ห้อ Siemens รุ่น SRS3400
11. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
12. ขวดก้นกลม 3 คอ
13. โถอบไล่ความชื้น
14. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
15. เครื่องชั่งละเอียด
16. นาฬิกาจับเวลา

17. กระจกทรง
18. ขวดเก็บตัวอย่าง (Sample bottle)
19. ปีกเกอร์ (Beaker)
20. ปิเปต (Pipette)
21. กระจกตวง (Measuring cylinder)
22. ขวดปริมาตร (Volumetric flask)
23. ขวดรูปชมพู่ (Conical flasks)
24. บิวเรต (Burette)
25. ขวดน้ำกลั่น (Washing bottle)
26. กรวยแยก (Funnel)
27. ลูกยาง (Rubber bulb)
28. หลอดหยด (Dropper)
29. กระจกนาฬิกาและชั้นตักสาร
30. ถังมือยาง
31. หน้ากากกันสาร
32. แว่นตากันสาร

3.3 สารเคมี

1. กรดซัลฟูริก (95% H_2SO_4 , ผู้ผลิต Carlo Erba)
2. กรดไนตริก (69% HNO_3 , ผู้ผลิต Carlo Erba)
3. กรดไฮโดรคลอริก (36% HCl , ผู้ผลิต Carlo Erba)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)

3.4 วัสดุ

1. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion) ยี่ห้อโนเกีย
2. แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) ยี่ห้ออีริคสัน

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของแบตเตอรี่

- 1) นำแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์มาซึ่งน้ำหนัก
- 2) แยกเปลือกพลาสติกภายนอกออกจากแบตเตอรี่
- 3) แยกเปลือกโลหะภายในออกจากตัวใส่แบตเตอรี่
- 4) แยกส่วนของใส่แบตเตอรี่ออกเป็นสามส่วนคือ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) แผ่นกั้นภายในแบตเตอรี่ (Separator) และองค์ประกอบอื่นๆ (Other components) เช่น วงจรไฟฟ้า สติกเกอร์ เป็นต้น
- 5) ชั่งน้ำหนักองค์ประกอบต่างๆ และบันทึกผล
- 6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 เช่นเดียวกันกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

3.5.2 วิเคราะห์ปริมาณโลหะภายในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่

- 1) นำขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ใส่ไปในเครื่องบดเพื่อทำให้มีขนาดเล็กลง และกลายเป็นผง
- 2) นำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการบดเรียบร้อยแล้วใส่ในตูอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น
- 3) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-2 เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
- 4) นำขั้วไฟฟ้าที่ได้ของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่องมือ XRF

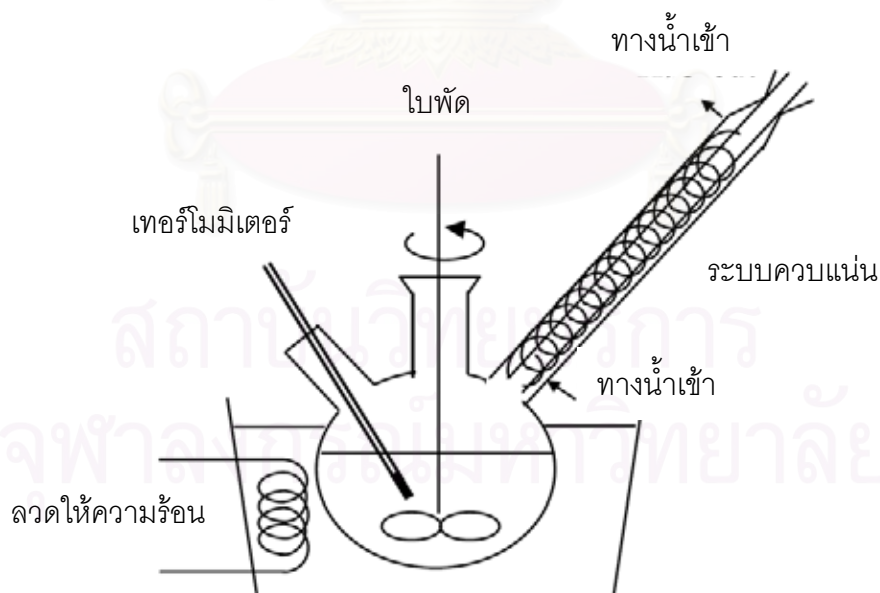
3.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชนิดของกรดที่ใช้ในการชะละลายโลหะ

- 1) เตรียมขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการชะละลายโดยผสมขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดด้วยกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก
- 2) ในการทดลองแต่ละครั้งใช้สารละลายกรด 100 มิลลิลิตร เทใส่ขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนโดยการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วติดตั้งระบบควบแน่น (Condenser) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้ว ให้ใส่ขั้วไฟฟ้าที่จะชะละลายลงไปให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 120 นาที
- 3) ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพกรดแต่ละชนิดโดยใช้ภาวดังตารางที่ 3.1 ซึ่งกรดแต่ละชนิดจะต้องทำการทดลองทั้ง 8 ครั้ง ซึ่งกรดที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก
- 4) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายไปกรองเพื่อแยกตะกอนที่ไม่ละลายออกไป

- 5) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์โดยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectrophotometer

ตารางที่ 3.1 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรด

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นกรด (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนระหว่าง ชั่วโมงต่อกรด (กรัมต่อลิตร)
1	40	1	10
2	80	1	10
3	40	5	10
4	80	5	10
5	40	1	40
6	80	1	40
7	40	5	40
8	80	5	40



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้การชะละลาย

3.5.4 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการชะละลาย

- อุณหภูมิที่เหมาะสมในการชะละลาย

- 1) เตรียมสารละลายกรดที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุดความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) ทำการชะละลายโดยใช้กรดที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใส่ขั้วไฟฟ้าลงไป 1 กรัมต่อสารละลายกรด 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที
- 3) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายไปกรองเพื่อแยกตะกอนที่ไม่ละลายออกไป
- 4) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการชะละลายเป็น 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ โดยเครื่อง AAS
- 6) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการชะละลายต่อไป

- ความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในการชะละลาย

- 1) เตรียมสารละลายกรดที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุดความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2) ทำการชะละลายโดยใช้กรดที่เตรียมไว้ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยใส่ขั้วไฟฟ้าลงไป 1 กรัมต่อสารละลายกรด 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที
- 3) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายไปกรองเพื่อแยกตะกอนที่ไม่ละลายออกไป
- 4) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการชะละลายเป็น 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตร
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ โดยเครื่องมือ AAS
- 6) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด นำผลการทดลองไปศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการชะละลายต่อไป

- อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดที่เหมาะสมในการชะละลาย

- 1) เตรียมสารละลายกรดที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุด ที่ความเข้มข้นที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุด 100 มิลลิลิตร

- 2) ทำการชะละลายโดยใช้กรดที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยใส่ขี้ไฟฟ้าลงไป 1 กรัมต่อสารละลายกรด 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที
- 3) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายไปกรองเพื่อแยกตะกอนที่ไม่ละลายออกไป
- 4) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนขี้ไฟฟ้าที่ใส่ลงไปเป็น 1, 2, 3, และ 4 กรัมต่อสารละลายกรด 100 มิลลิลิตร
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ โดยเครื่องมือ AAS
- 6) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างขี้ไฟฟ้าต่อสารละลายกรดที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด นำผลการทดลองไปศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการชะละลายต่อไป

● เวลาที่เหมาะสมในการชะละลาย

- 1) เตรียมสารละลายกรดที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุด ที่ความเข้มข้นที่มีประสิทธิภาพการชะละลายดีที่สุด 100 มิลลิลิตร
- 2) ทำการชะละลายโดยใช้กรดที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด และใส่ขี้ไฟฟ้าลงไป ในปริมาณที่เกิดการชะละลายดีที่สุด เป็นเวลา 120 นาที
- 3) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายไปกรองเพื่อแยกตะกอนที่ไม่ละลายออกไป
- 4) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการชะละลายเป็น 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที
- 5) นำสารละลายที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ โดยเครื่องมือ AAS
- 6) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด
- 7) จากผลการทดลองที่ได้ทำให้ได้ชนิดของกรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด อัตราส่วนระหว่างขี้ไฟฟ้าต่อกรด และเวลาที่ทำให้การชะละลายมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งจะผลที่ได้จะนำไปใช้ในการทำการชะละลายเพื่อศึกษาผลของการตกตะกอนต่อไป

3.5.5 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอน

● หาภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอน

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 และ 5 โมลต่อลิตร

- 2) นำสารละลายที่ได้จากการชะละลายมาปรับสภาพโดยการเติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตรลงไปแล้วทำการวัดค่าความเป็นกรด-เบส หลังจากนั้นกวนสารละลายด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที ถึง 1 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนต่อไป
- 3) นำสารละลายที่ได้ในข้อ 2 แบ่งใส่บีกเกอร์ใบละ 100 มิลลิลิตร กวนสารละลายอย่างรวดเร็ว ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ค่อยๆ เติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตรลงในแต่ละบีกเกอร์ ด้วยปริมาณต่างๆ กัน พร้อมกันทุกๆ ใบจากนั้นลดความเร็วของเครื่องลงให้เหลือประมาณ 40 รอบต่อนาที (กวนช้าๆ) เป็นเวลา 15-20 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 15-20 นาทีที่ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำใสข้างบนจากแต่ละบีกเกอร์
- 4) นำสารละลายที่ได้ไปกรองเพื่อแยกตะกอนออกแล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์โดยเครื่องมือ AAS
- 5) นำตะกอนที่แยกได้ไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้นหาปริมาณโลหะด้วยเครื่องมือ XRF
- 6) วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เพื่อหาค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะทั้งสองชนิด
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาศึกษา

แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ที่นำมาศึกษาเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้ออีริคสัน (Ericsson) ลักษณะทรงกระบอกขนาดเท่าถ่านไฟฉาย AAA บรรจุอยู่ด้วยกัน 3 ก้อน ภายนอกหุ้มด้วยพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ส่วนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่นำมาศึกษาเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อโนเกีย (Nokia) จะเป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยมแล้วหุ้มด้วยพลาสติกอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข)



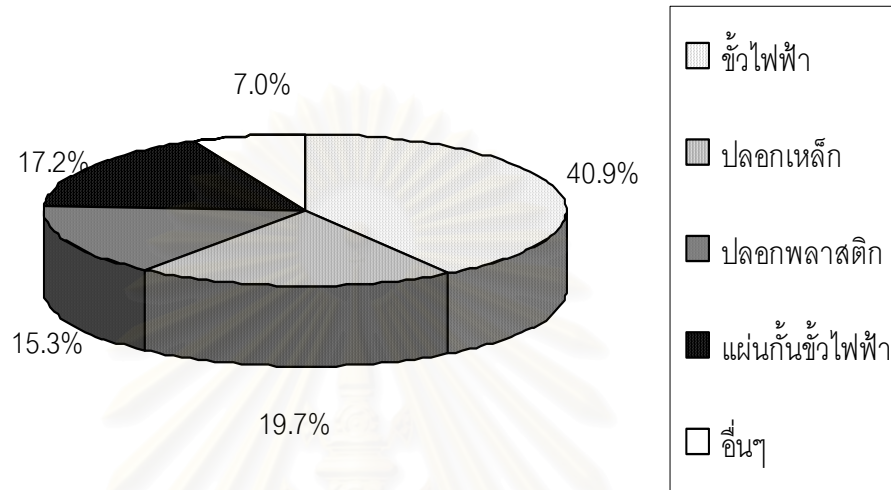
(ก) แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์

(ข) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

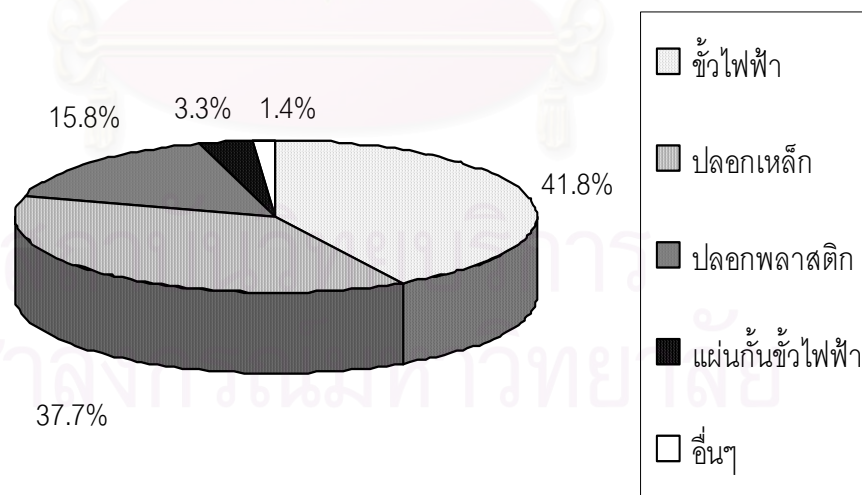
รูปที่ 4.1 รูปร่างแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาศึกษา

เมื่อนำแบตเตอรี่โทรศัพท์ทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบภายในโดยการแกะแยกแบตเตอรี่ออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ แล้วทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนนอกสุดเป็นพลาสติก (Plastic case) ที่แสดงรูปร่างภายนอกของแบตเตอรี่ เมื่อแกะพลาสติกออกจะพบปลอกเหล็ก (Steel case) ที่หุ้มไส้ในของแบตเตอรี่ ซึ่งภายในประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) และแผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า (Separator) นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แผงวงจรไฟฟ้า สติกเกอร์ เป็นต้น

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ พบว่ามีองค์ประกอบเป็นดังนี้ คือ ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 40.9 โดยน้ำหนัก ปลอกเหล็กร้อยละ 19.7 โดยน้ำหนัก ปลอกพลาสติกร้อยละ 15.3 โดยน้ำหนัก แผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าร้อยละ 17.2 โดยน้ำหนัก และอื่นๆ ร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนัก



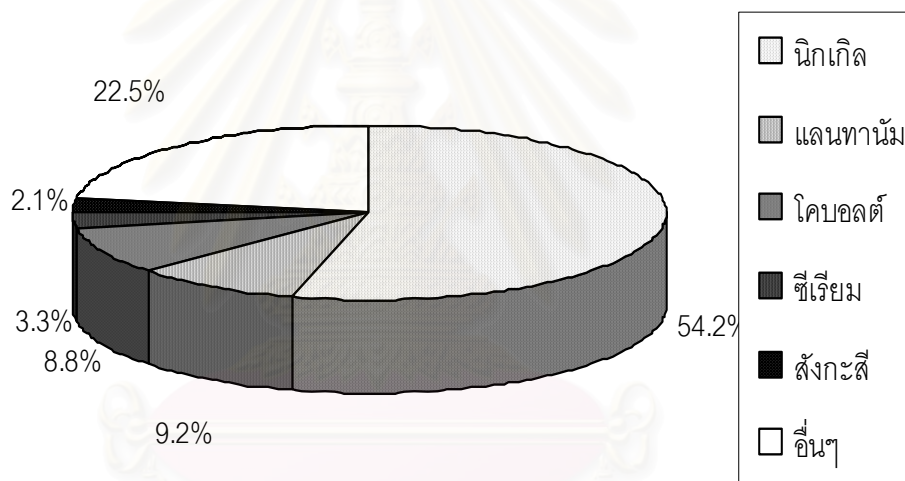
รูปที่ 4.2 ร้อยละขององค์ประกอบภายในแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์



รูปที่ 4.3 ร้อยละขององค์ประกอบภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแบคทีเรียที่เติมไอออน พบว่ามีองค์ประกอบเป็นดังนี้ คือ ขี้ไฟฟ้าร้อยละ 41.8 โดยน้ำหนัก ปลูกเหล็กร้อยละ 37.7 โดยน้ำหนัก ปลูกพลาสติกร้อยละ 15.8 โดยน้ำหนัก แผ่นกั้นระหว่างขี้ไฟฟ้าร้อยละ 3.3 โดยน้ำหนัก และอื่นๆ ร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก นำขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรียที่แกะแยกแล้วออกมาบด หรือตัดให้มีขนาดเล็กกลง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบในขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรียโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละชนิด

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณโลหะในขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรีนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ พบว่าขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรียมีโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักดังนี้ คือ นิกเกิลร้อยละ 54.2 โดยน้ำหนัก แลนทานัมร้อยละ 9.2 โดยน้ำหนัก โคบอลต์ร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก ซีเรียมร้อยละ 3.3 โดยน้ำหนัก สังกะสีร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก และอื่นๆ ร้อยละ 22.5 โดยน้ำหนัก

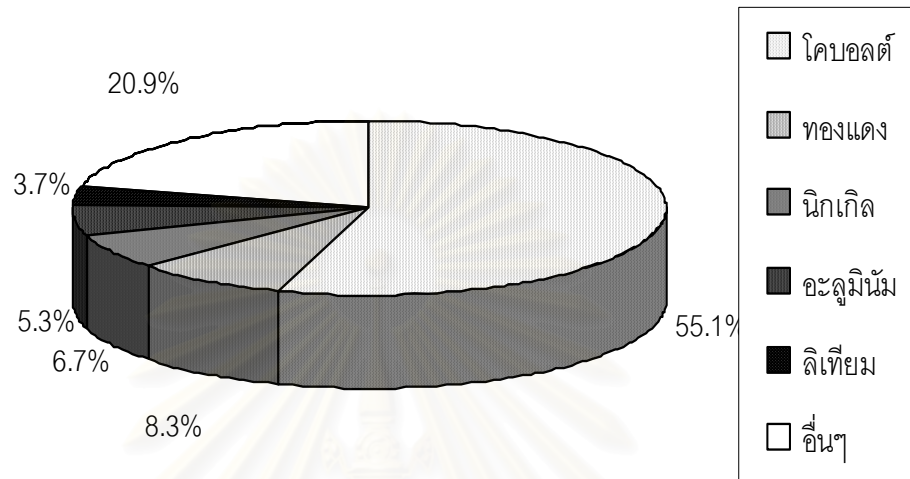


รูปที่ 4.4 ปริมาณโลหะในขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรีนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์

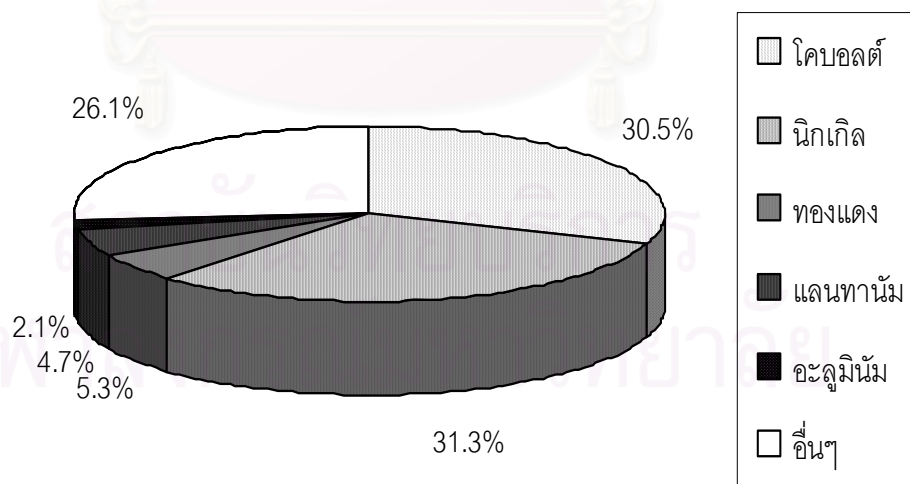
ส่วนขี้ไฟฟ้าของแบคทีเรียลิเทียมไอออนมีโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักดังนี้ คือ โคบอลต์ร้อยละ 55.1 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 8.3 โดยน้ำหนัก นิกเกิลร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมร้อยละ 5.3 โดยน้ำหนัก ลิเทียมร้อยละ 3.7 โดยน้ำหนัก และอื่นๆ ร้อยละ 20.9 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เมื่อพิจารณาโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของขี้ไฟฟ้าแบคทีเรียทั้งสองชนิด พบว่าแบคทีเรีนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์มีปริมาณโลหะนิกเกิลอยู่มากที่สุด ในขณะที่แบคทีเรียลิเทียมไอออนมีโลหะโคบอลต์อยู่มากที่สุด และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ พบว่าแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีโลหะที่เป็นองค์

ประกอบหลักเหมือนกัน เช่น นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง สังกะสี อะลูมิเนียม จึงได้นำขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะต่อไป



รูปที่ 4.5 ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 4.6 ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ผสมกับลิเทียมไอออน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์มาผสมกับลิเทียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก พบว่ามีโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักดังนี้ คือ โคบอลต์ร้อยละ 30.5 โดยน้ำหนัก นิกเกิลร้อยละ 31.3 โดยน้ำหนัก ทองแดงร้อยละ 5.3 โดยน้ำหนัก แลนทานัมร้อยละ 4.7 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก และอื่นๆ ร้อยละ 26.1 โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาโลหะที่เป็นองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าที่เกิดจากการผสมกันของแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์และลิเทียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามีโลหะอยู่ 2 ชนิดที่มีปริมาณมากพอๆ กัน นั่นคือ นิกเกิลและโคบอลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักทั้งสองนี้กลับมาโดยการชะละลายและการตกตะกอนทางเคมีร่วมกัน

4.2 การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยการชะละลาย

4.2.1 ผลของกรดต่อประสิทธิภาพการชะละลาย

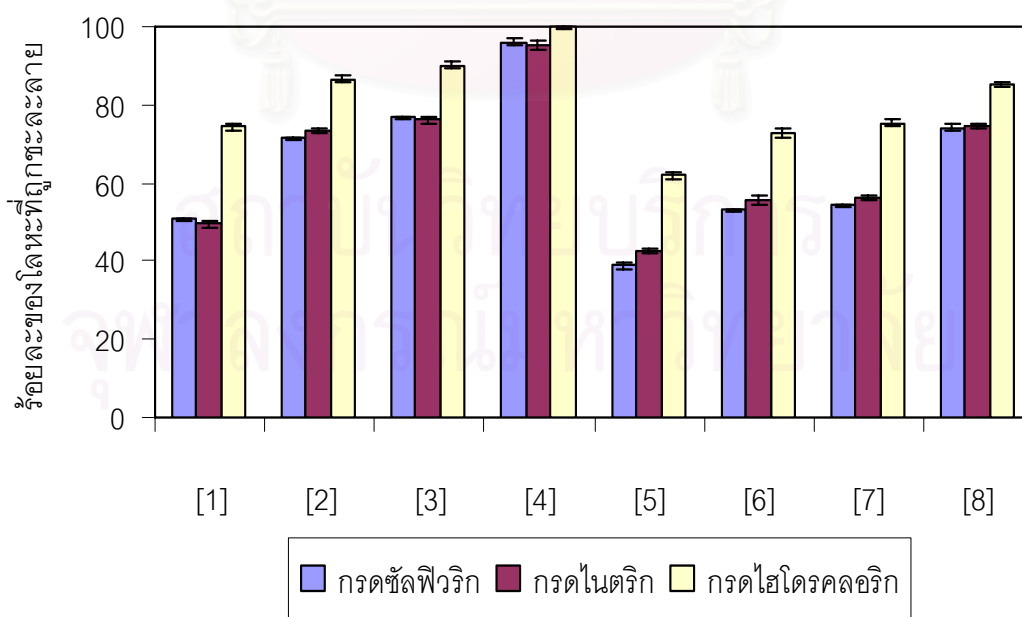
ขั้วไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาวิเคราะห์ พบว่ามีองค์ประกอบที่เป็นโลหะอยู่หลายชนิด โลหะบางชนิดเป็นโลหะที่มีปริมาณมาก และมีมูลค่าเหมาะแก่การนำกลับคืนมาได้แก่ โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ซึ่งโลหะทั้งสองนี้จะอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ และเป็นที่ทราบกันว่าสามารถใช้กรดเข้าไปละลายโลหะออกมาได้ ซึ่งกรดที่ใช้ได้มีอยู่หลายชนิด [18] งานวิจัยนี้จึงศึกษาการแยกโลหะทั้งสองชนิดออกมาได้โดยใช้กรดเข้าไปละลายโลหะออกมาให้อยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย หรือที่เรียกว่า “การชะละลาย”

เพื่อศึกษาชนิดของกรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ในการทดลองจึงได้กำหนดรูปแบบของการทดลองขึ้นมา 8 การทดลองดังตารางที่ 3.1 เพื่อศึกษาว่าตัวแปรใดบ้างที่มีผลต่อการทดลอง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 1 และ 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 10 และ 40 กรัมต่อลิตร สำหรับกรดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก

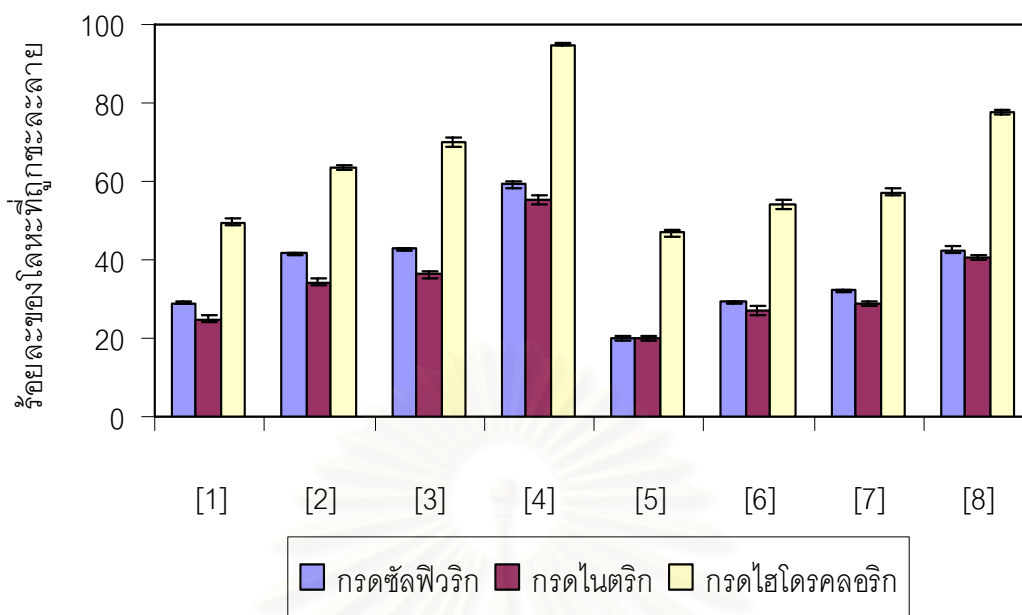
รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายโดยใช้กรด 3 ชนิดตามลำดับ พบว่าในการทดลองทั้ง 8 การทดลอง ร้อยละของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ในส่วนของโลหะนิกเกิล กรดไฮโดรคลอริกสามารถชะละลายโลหะนิกเกิลออกมาได้ปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในทุกๆ การทดลอง ส่วนกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกสามารถชะละลายโลหะนิกเกิลออกมาได้ปริมาณใกล้เคียงกัน ในส่วนของโลหะโคบอลต์ก็เช่นเดียวกัน กรดไฮโดรคลอริกสามารถชะละลายโลหะโคบอลต์ออกมาได้ปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในทุกๆ การทดลอง ส่วนกรดซัลฟิวริกสามารถชะละลายโลหะโคบอลต์ออกมาได้ปริมาณมากกว่ากรดไนตริก

เล็กน้อย ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากรดไฮโดรคลอริกจึงเป็นกรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [19] ที่ศึกษาการชะละลายโลหะโคบอลต์และลิเทียมโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ภาวะเดียวกันกรดไฮโดรคลอริกสามารถชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ออกมาได้มากกว่ากรดซัลฟิวริก และงานวิจัยของ Contestabile และ คณะ [20] ซึ่งศึกษาการชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ แสดงให้เห็นว่าที่ภาวะเดียวกันกรดซัลฟิวริกสามารถชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ออกมาได้มากกว่ากรดไนตริกเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาสมบัติในการละลายน้ำ หรือการแตกตัวในน้ำของกรดทั้งสามชนิด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก โดยดูจากค่าคงที่สมดุลของกรด (Dissociation constant of acid) แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าคงที่สมดุลของกรดทั้งสามชนิดมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ากรดทั้งสามชนิดเป็นกรดแก่ (Strong acid) แต่กรดไฮโดรคลอริกมีค่าคงที่สมดุลของกรดมากกว่ากรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ดังนั้นกรดไฮโดรคลอริกจึงมีความเป็นกรดแรงที่สุด รองลงมาเป็นกรดซัลฟิวริกและตามด้วยกรดไนตริกซึ่งมีความแรงของกรดน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่ากรดซัลฟิวริกมีค่าคงที่สมดุลอยู่ 2 ค่า เพราะว่าการกรดซัลฟิวริกเป็นกรดที่แตกตัวได้ 2 ครั้ง เนื่องจากมีโปรตอน (H^+) อยู่ 2 ตัว แต่ค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันมากกว่า 10^3 เท่า จึงไม่นำค่าคงที่สมดุลครั้งที่สองมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อภาวะความเป็นกรดสูงขึ้น ทำให้โลหะ निकเกิดและโคบอลต์ถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้น [21] กรดไฮโดรคลอริกจึงเป็นกรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ออกมาได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก



รูปที่ 4.7 ร้อยละของโลหะ निकเกิดที่ถูกชะละลาย

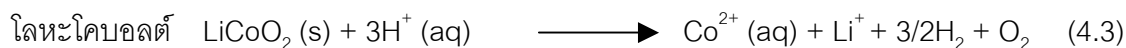
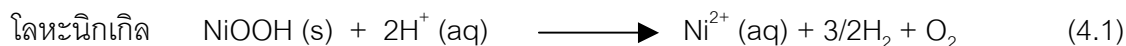


รูปที่ 4.8 ร้อยละของโลหะโคบอลต์ที่ถูกชะละลาย

โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่อยู่ในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิก (Ionic compounds) ต่างๆ เมื่อทำการชะละลายขั้วไฟฟ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก โปรตอนที่เกิดจากการแตกตัวของกรดไฮโดรคลอริกจะเข้าไปทำลายพันธะภายในสารประกอบไอออนิกของโลหะ ทำให้โลหะหลุดออกมาอยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย ซึ่งสามารถแสดงสมการการชะละลายโลหะทั้งสองชนิดได้ดังสมการที่ (4.1) - (4.4) พบว่าโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่อยู่ในสารประกอบไอออนิกจะถูกชะละลายออกมาอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายที่มีประจุเป็น +2 เพราะว่าเป็นภาวะที่เสถียรที่สุด [18] นอกจากนี้การที่โลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิกที่ต่างกัน ทำให้การชะละลายโลหะทั้งสองชนิดนั้นใช้ปริมาณโปรตอนไม่เท่ากัน ซึ่งโลหะโคบอลต์จะใช้โปรตอนในการชะละลายมากกว่านิกเกิล ส่งผลให้โลหะโคบอลต์จะถูกชะละลายออกมาได้ยากกว่าหรือน้อยกว่านิกเกิล

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่สมดุลของกรดที่ 25 องศาเซลเซียส [22]

กรด	ค่าคงที่สมดุลของกรด (K_a)
H_2SO_4	1×10^3
HSO_4^-	1.2×10^{-2}
HNO_3	28
HCl	1×10^6

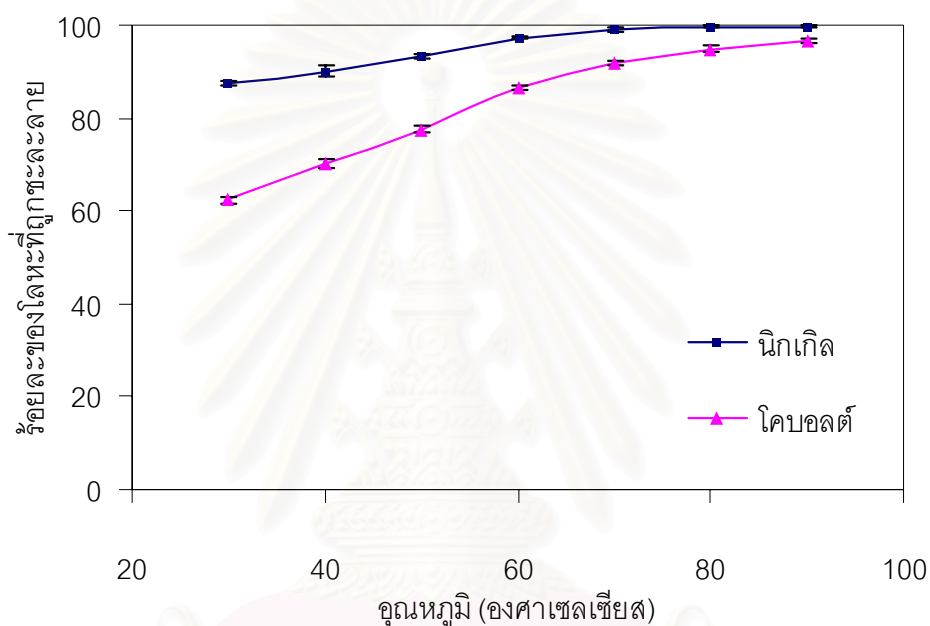


เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด/ด และอุณหภูมิ นอกจากนี้ทำให้สามารถกำหนดค่าของตัวแปรเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทดลองที่ 4 สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์กลับมาได้มากที่สุด ซึ่ง ภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 10 กรัมต่อลิตร เวลา 120 นาที จะนำมาใช้เป็นภาวะเริ่มต้นในการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกต่อไป

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการชะละลาย

การศึกษาค้นหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะทำการศึกษาค้นหาอุณหภูมิในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 10 กรัมต่อลิตร เวลา 120 นาที รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายกับอุณหภูมิต่างๆ พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 88 และ 63 ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปที่ 80 องศาเซลเซียส สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 100 และ 95 ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 90 องศาเซลเซียส สามารถชะละลายโลหะโคบอลต์ออกมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือ ร้อยละ 96 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียสขึ้นไป โลหะที่ถูกชะละลายได้จะมีปริมาณมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 80 องศาเซลเซียส โลหะที่ถูกชะละลายได้จะเริ่มมีปริมาณคงที่ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และในทางเศรษฐศาสตร์ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นภาวะที่

เหมาะสมสำหรับการชะละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [15] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายเพิ่มขึ้นไปด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) [23] เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โมเลกุลของกรดที่เกิดการแตกตัวเป็นโปรตอนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจึงสามารถจะเข้าไปทำลายพันธะไอออนิกที่ยึดเหนี่ยวโลหะไว้ในรูปของสารประกอบให้หลุดออกมาอยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย จึงส่งผลให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้น



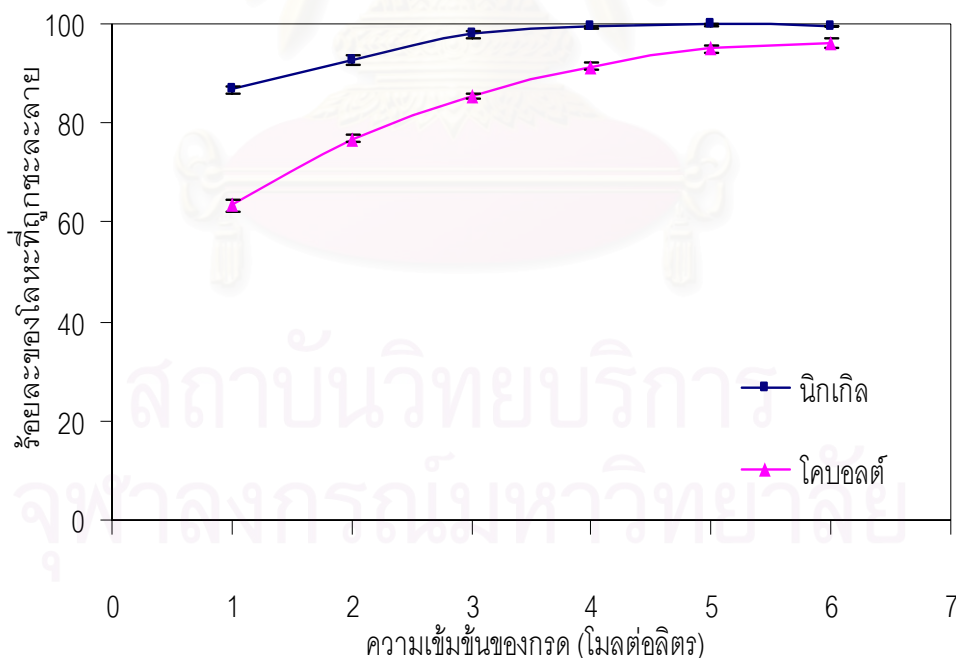
รูปที่ 4.9 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่อุณหภูมิต่างๆ โดยกรดไฮโดรคลอริก

ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 10 กรัมต่อลิตร
เวลา 120 นาที

4.2.3 ผลของความเข้มข้นของกรดที่มีต่อประสิทธิภาพการชะละลาย

การศึกษาค้นหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะทำศึกษาค้นหาความเข้มข้นของกรดในช่วง 1-6 โมลต่อลิตร โดยใช้ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 10 กรัมต่อลิตร เวลา 120 นาที รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายกับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก พบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีผลต่อการชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้นทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายได้มากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์

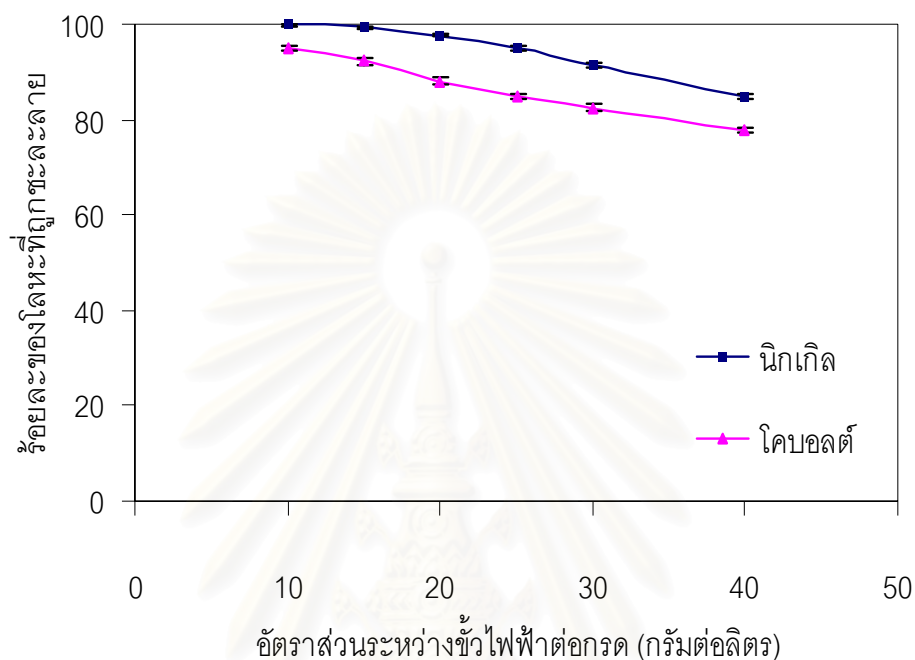
ออกมาได้ร้อยละ 87 และ 64 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกขึ้นไป 5 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 100 และ 95 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตร สามารถชะละลายโลหะ निकเกิดออกมาได้ในปริมาณเท่าเดิม และสามารถชะละลายโลหะโคบอลต์ออกมาได้เพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยคือร้อยละ 96 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกให้สูงขึ้นโลหะที่ถูกชะละลายได้จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้นไปกว่า 5 โมลต่อลิตร โลหะที่ถูกชะละลายจะเริ่มมีปริมาณคงที่ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 5 โมลต่อลิตรเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการชะละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [15] ที่ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่อการชะละลายโลหะ निकเกิดและโคบอลต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะ निकเกิดและโคบอลต์ถูกชะละลายเพิ่มขึ้น เพราะความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณโปรตอนในสารละลายมีปริมาณมากขึ้น จึงสามารถเข้าไปชะละลายโลหะออกมาได้มากขึ้น [23] นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ก็ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำลง ซึ่งโลหะจะถูกชะละลายได้มากขึ้นที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่ำๆ [18] ส่งผลให้ปฏิกิริยาชะละลายเกิดได้ดีขึ้นและชะละลายโลหะออกมาได้มากขึ้น



รูปที่ 4.10 ร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายได้ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่างๆ โดยอัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

4.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดต่อประสิทธิภาพการชะละลาย

การศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดในช่วง 10-40 กรัมต่อลิตร จะทำการทดลองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที



รูปที่ 4.11 ร้อยละของโลหะที่ชะละลายได้ที่อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดต่างๆ โดยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายได้กับอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดที่ค่าต่างๆ พบว่าอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดมีผลต่อการชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ กล่าวได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดเพิ่มขึ้นจะทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายได้น้อยลง โดยที่อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 100 และ 95 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร สามารถชะละลายของโลหะนิกเกิลออกมาได้ในปริมาณเท่าเดิม และสามารถชะละลายโคบอลต์ออกมาได้ต่ำลงเล็กน้อยคือร้อยละ 93 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 97 และ 87 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรดเพิ่มขึ้นจาก 10 ไป 15 กรัมต่อลิตร โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายออกมาจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน

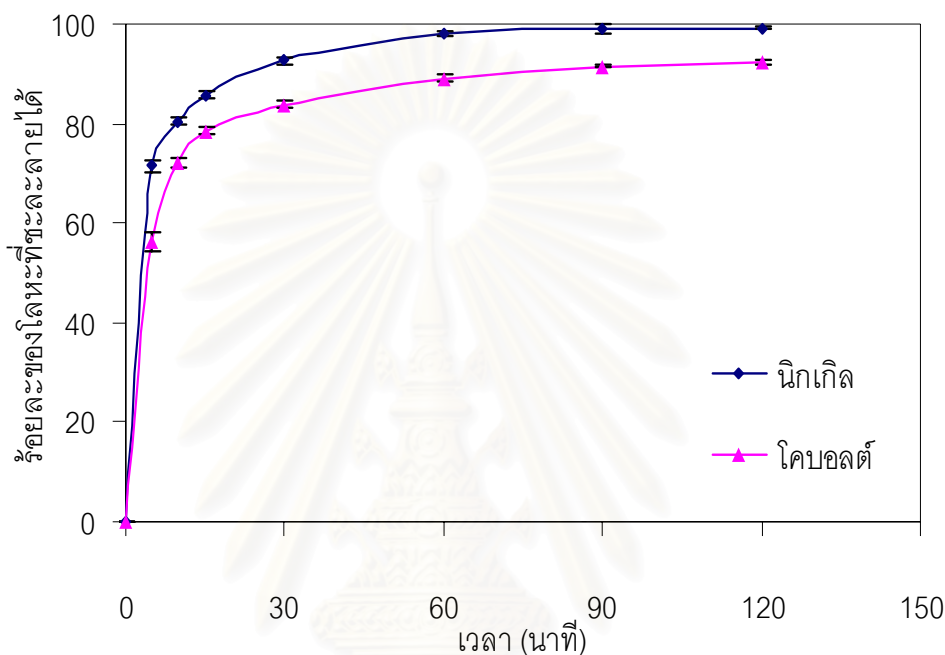
ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดตั้งแต่ 20 กรัมต่อลิตร โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายออกมาจะมีปริมาณลดลงอย่างมาก และเมื่อพิจารณาในทางเศรษฐศาสตร์ อัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดที่มากขึ้น แสดงว่าสามารถใส่สารตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นในแต่ละครั้ง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ (Product) ได้ครั้งละมากๆ จะช่วยประหยัดเวลาและลดต้นทุนในการดำเนินงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วอัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตรเป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [15] ที่ได้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดที่มีผลต่อการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายออกมาน้อยลง เพราะเมื่อเพิ่มข้าวไฟฟ้าลงไปในกรดมากขึ้น ทำให้ปริมาณโลหะที่จะถูกชะละลายมีมากขึ้น แต่กรดที่เข้าไปชะละลายโลหะมีปริมาณเท่าเดิม เมื่อเวลาผ่านไป ปฏิกิริยาการชะละลายเกิดมากขึ้น ปริมาณโปรตอนที่เกิดจากกรดจะลดลงและหมดไป โลหะที่เหลือก็ไม่สามารถถูกชะละลายเพิ่มได้ [23] ทำให้ร้อยละของโลหะที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดมากขึ้น

4.2.5 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการชะละลาย

การศึกษาค้นคว้าหาเวลาที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะทำการศึกษาเวลาในช่วง 5-120 นาที โดยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างข้าวไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่เวลาต่างๆ ของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ตามลำดับ พบว่าเวลาที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ กล่าวคือเมื่อเวลาในการชะละลายมากขึ้นทำให้โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายได้มากขึ้น โดยเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 93 และ 84 ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 98 และ 90 ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไปถึง 90 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 99 และ 92 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาตั้งแต่ 5-30 นาทีแรก โลหะนิกเกิลและโคบอลต์จะถูกชะละลายออกมาได้ปริมาณมากและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปถึง 60 นาที โลหะนิกเกิลและโคบอลต์จะถูกชะละลายออกมาได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หลังจากผ่านไปถึง 90 นาที โลหะนิกเกิลและโคบอลต์จะถูกชะละลายเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว ที่เวลา 60 นาที จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และคณะ [15] ที่ได้ศึกษาผลของเวลาต่อการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงแรก โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายได้จะเริ่มช้า

ลงและคงที่ เพราะว่าปฏิกิริยาการชะละลายโลหะก็เหมือนกับปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไปในช่วงแรกของปฏิกิริยา สารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยายังมีอยู่มาก จึงเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อสารตั้งต้นหมดลงปฏิกิริยาก็จะไม่เกิดขึ้น [23] ทำให้ปริมาณโลหะ निकเกิลและโคบอลต์ที่ถูกชะละลายได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรก เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มช้าลงจนกระทั่งคงที่



รูปที่ 4.12 ร้อยละของโลหะที่ชะละลายได้ที่เวลาต่างๆ โดยกรดไฮโดรคลอริก

ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร
อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะ निकเกิลและโคบอลต์ออกจากขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว คือ การใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาการชะละลาย 60 นาที สามารถชะละลายโลหะ निकเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 99 และ 90 ตามลำดับ

4.3 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์

4.3.1 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์

การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic model) ของปฏิกิริยาการชะละลายด้วยไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทดด์ที่เคลื่อนที่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) สามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้โดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เอ็มพิริกัล (Empirical kinetic model) ซึ่งแบบจำลองนี้จะแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายโลหะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second order) ดังสมการที่ (4.5) [24, 25]

$$\frac{dC_t}{dt} = k(C_s - C_t)^2 \quad (4.5)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order rate constant) มีหน่วยเป็นลิตรต่อมิลลิโมล-นาที ($l/mm\text{ol}\cdot\text{min}$) C_t คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่เวลาใดๆ (Concentration of metal in the solution at any time) มีหน่วยเป็นมิลลิโมลต่อลิตร ($mm\text{ol}/l$) C_s คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัว (Concentration of metal in the solution at saturation) มีหน่วยเป็นมิลลิโมลต่อลิตร ($mm\text{ol}/l$) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการชะละลาย (Time of leaching) มีหน่วยเป็นนาที (min)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (4.5) โดยกำหนดขอบเขต $t = 0$ ถึง t และ $C_t = 0$ ถึง C_t ซึ่งแสดงดังสมการ (4.6) และ (4.7) จะได้สมการที่ (4.8)

$$\int_0^{C_t} dC_t = \int_0^t k(C_s - C_t)^2 dt \quad (4.6)$$

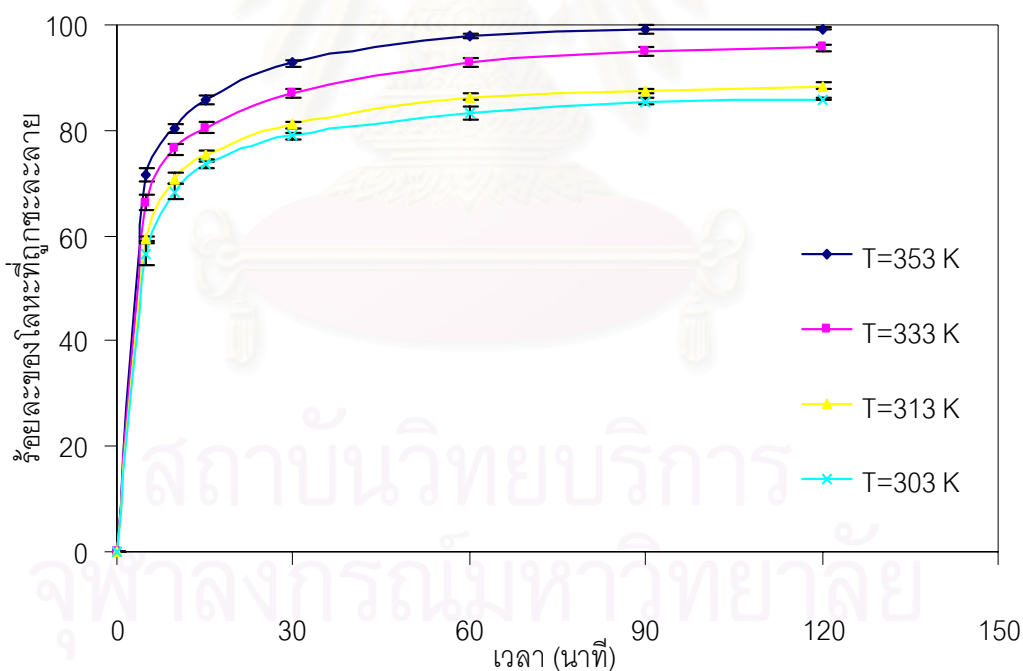
$$C_t = \frac{C_s^2 kt}{1 + C_s kt} \quad (4.7)$$

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{kC_s^2} + \frac{t}{C_s} \quad (4.8)$$

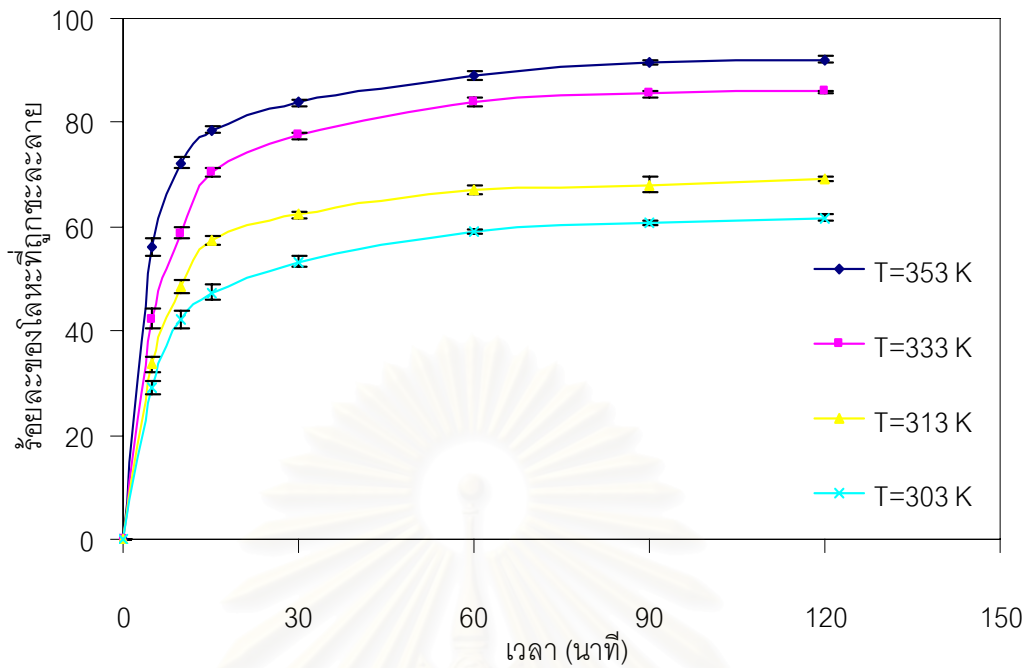
จากสมการที่ (4.8) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_s กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (Slope) เท่ากับ $1/C_s$ และตัดแกน y ที่ $1/kC_s^2$ จากความชันและจุดตัดดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณหาค่า k และ C_s ได้

ในการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูล โดยทำการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 30 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส หรือ 303 313 333 และ 353 เคลวินตามลำดับ เป็นเวลา 5-120 นาที

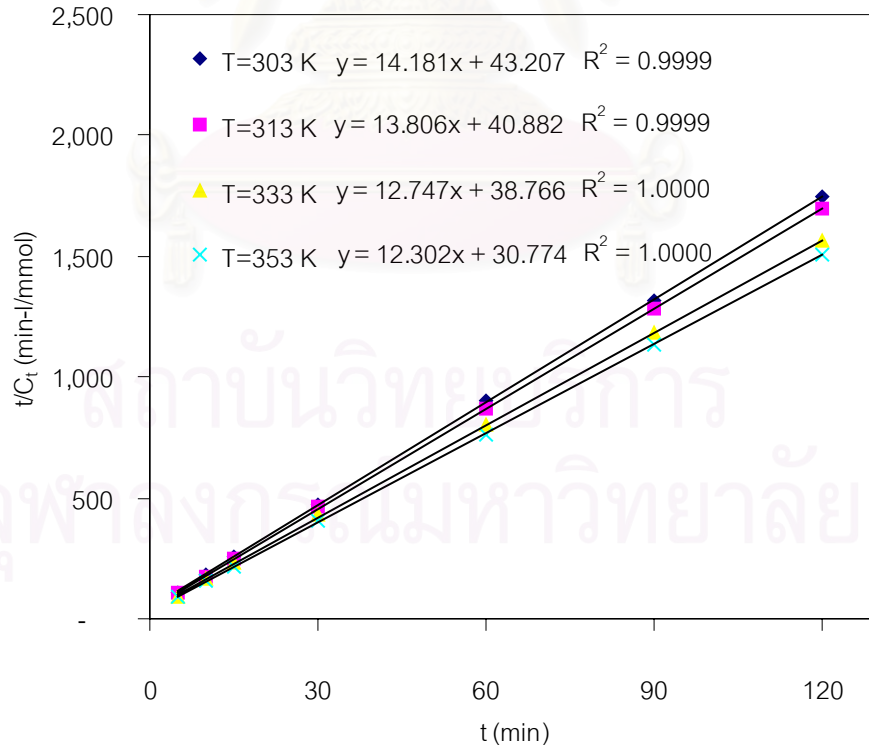
รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ตามลำดับ พบว่าในช่วงแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_s กับ t ที่อุณหภูมิต่างๆ ของปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าความสัมพันธ์ของกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง (Linear) โดยดูได้จากค่า R^2 (Coefficient of determination) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 จริงตามแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เอ็มพิริกัลที่นำมาเสนอ



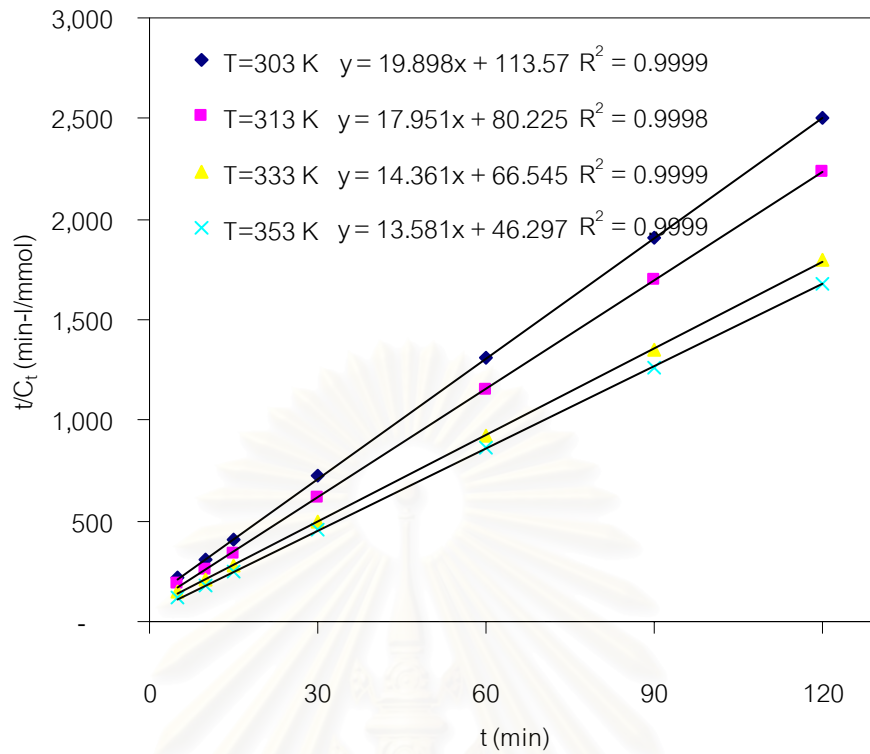
รูปที่ 4.13 ร้อยละของโลหะนิกเกิลที่ถูกชะละลายที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ โดยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร



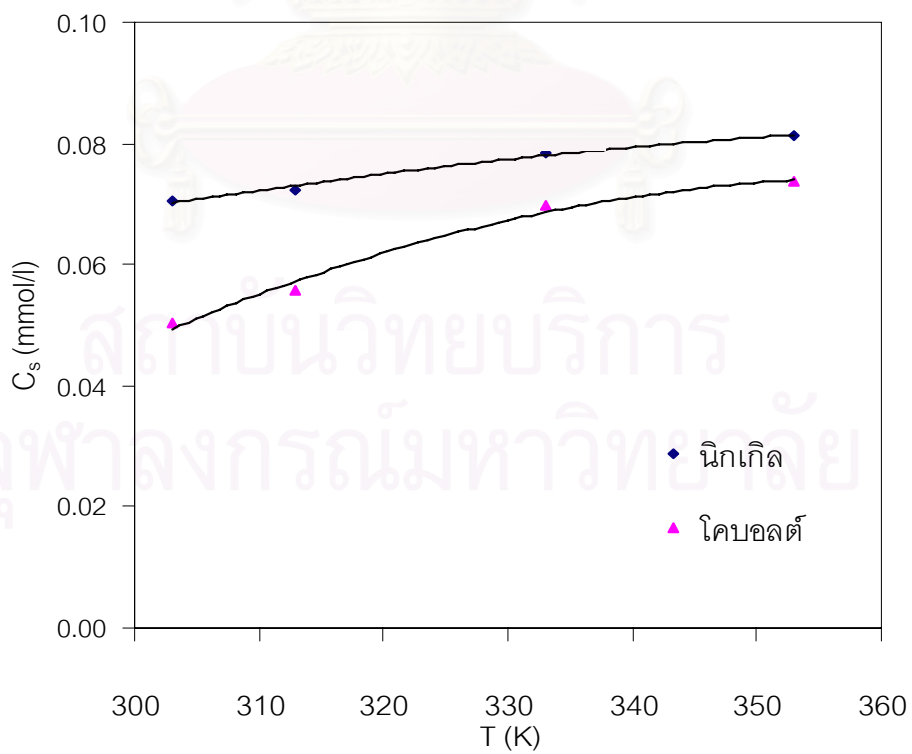
รูปที่ 4.14 ร้อยละของโลหะโคบอลต์ที่ถูกชะละลายที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ โดยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.15 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ในการชะละลายโลหะนิกเกิลที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.16 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ในการชะละลายโลหะโคบอลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

นำค่า C_s ที่หาได้จากความชันกราฟรูปที่ 4.15 และ 4.16 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าความเข้มข้นของโลหะที่ภาวะอิ่มตัวของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะในสารละลายที่ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในรูปของสมการที่ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ

$$C_{s,Ni} = -2 \times 10^{-6} T^2 + 0.0014T - 0.1901 \quad (4.11)$$

$$C_{s,Co} = -7 \times 10^{-6} T^2 + 0.0054T - 0.8918 \quad (4.12)$$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า k ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่หาได้จากจุดตัดแกน y ของกราฟรูปที่ 4.15 และ 4.16

ตารางที่ 4.2 ค่า k ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (เคลวิน)	k (ลิตรต่อมิลลิโมล-นาท)	
	โลหะนิกเกิล	โลหะโคบอลต์
303	4.65	3.49
313	4.66	4.02
333	4.19	3.10
353	4.92	3.98

4.3.2 พลังงานการกระตุ้น

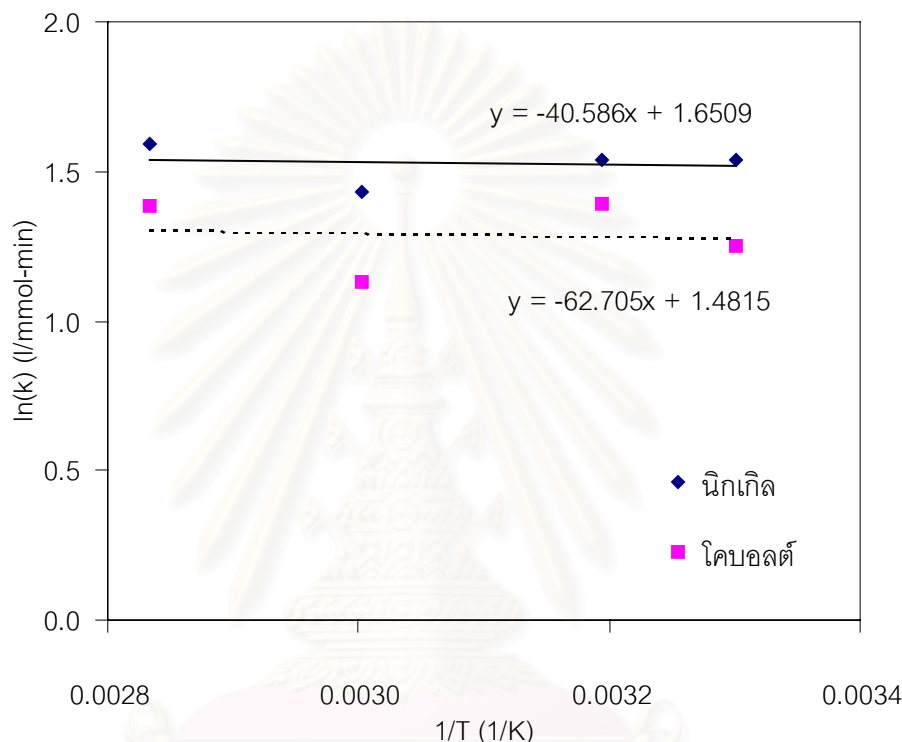
พลังงานการกระตุ้น หรือ พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) หาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [26] แสดงได้ดังสมการที่ (4.13)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.13)$$

ซึ่ง k_0 คือค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature-independent factor) มีหน่วยเป็นลิตรต่อมิลลิโมล-นาท ($l/mmole\cdot min$) E_a คือค่าพลังงานการกระตุ้นมีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อโมล

(kJ/mol) R คือค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314×10^{-3} กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน (J/mol-K) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K) จากสมการที่ (4.13) สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสมการที่ (4.14)

$$\ln(k) = \ln(k_0) + \left(-\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T} \quad (4.14)$$



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ สำหรับปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์

จากสมการที่ (4.14) นำค่า k ในตารางที่ 4.2 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ ดังรูปที่ 4.18 จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln(k_0)$ จากความชันและจุดตัดทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานการกระตุ้นและค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาได้ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในสมการของอาร์เรเนียสได้ดังแสดงในสมการที่ (4.15) และ (4.16) พบว่าค่า k_0 ของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ 5.21 และ 4.40 ลิตรต่อมิลลิโมล-นาที่ ตามลำดับ ซึ่งค่า k_0 ของโลหะนิกเกิลสูงกว่าโคบอลต์ แสดงให้เห็นว่าโลหะนิกเกิลสามารถเกิดปฏิกิริยาการชะละลายได้ดีกว่าโคบอลต์

$$k_{Ni} = 5.21 \exp\left(-\frac{0.34}{RT}\right) \quad (4.15)$$

$$k_{Co} = 4.40 \exp\left(-\frac{0.52}{RT}\right) \quad (4.16)$$

4.4 การตกตะกอนโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ได้จากการชะละลาย

โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ได้จากการชะละลายจะอยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย ซึ่งสามารถที่จะแยกออกมาจากสารละลายด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) ให้อยู่ในรูปผลึกของแข็ง โดยการเติมสารเคมีที่มีสมบัติเป็นเบสลงไป เพื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยสารเคมีที่ใช้ในการทดลองคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์

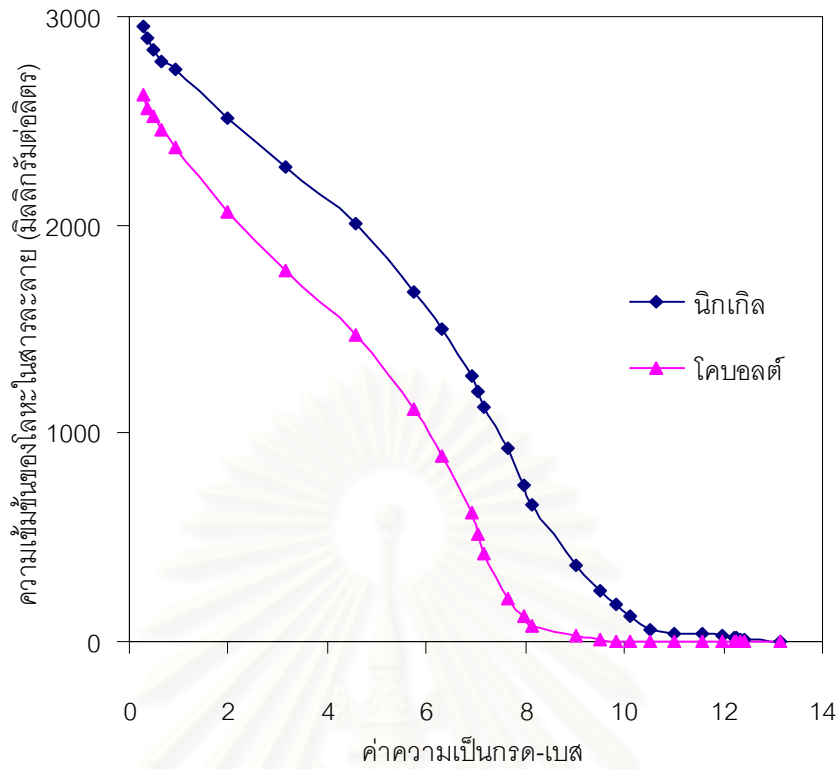
สารละลายที่ได้จากการชะละลายด้วยไฟฟ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 99 และ 90 ตามลำดับคิดเป็นปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ 4.622 และ 4.184 กรัมต่อลิตร สารละลายที่ได้นี้จะมีความเข้มข้นของโปรตอนค่อนข้างสูงมากจึงมีการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตรเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับนำมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอน โดยเริ่มต้นทำการวัดค่าความเป็นกรด-เบสได้ 0.29 และมีปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ 2.949 และ 2.628 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการตกตะกอนของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ 36.2 และ 37.2 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยต้องควบคุมให้ค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้เห็นถึงภาวะของการตกตะกอนอย่างชัดเจน พบว่าความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในสารละลายลดลง แสดงให้เห็นว่าโลหะทั้งสองชนิดตกตะกอนออกมาในรูปของไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.19 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่อยู่ในรูปของไอออนในสารละลายลดลง แสดงว่าโลหะทั้งสองชนิดตกตะกอนออกมาในรูปของไฮดรอกไซด์ โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8 ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในสารละลายเหลืออยู่ 0.658 และ 0.079 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9 ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในสารละลายเหลืออยู่ 0.361 และ 0.032

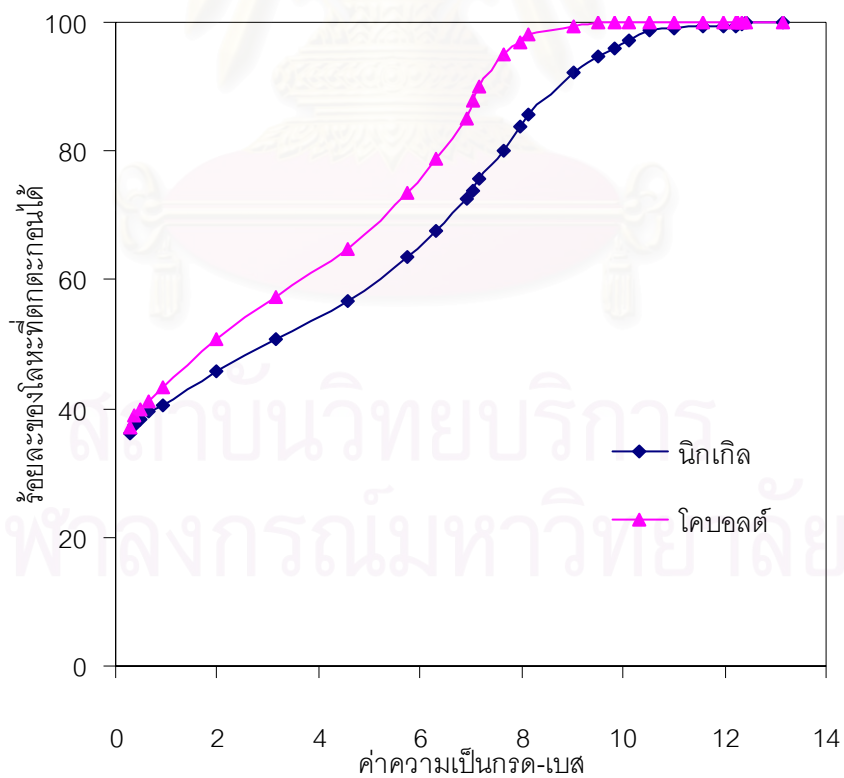
กรด-เบสเท่ากับ 11 ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลในสารละลายเหลืออยู่ 0.038 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 12 ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลในสารละลายเหลืออยู่ 0.021 กรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนโลหะโคบอลต์เท่ากับ 9 และสำหรับโลหะนิกเกิลเท่ากับ 11 แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าความเป็นกรด-เบสที่ใช้ในการตกตะกอนโลหะทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ต้องใช้วิธีการตกตะกอนร่วมกัน (Co-precipitation) ของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ ซึ่งค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนร่วมกันของโลหะทั้งสองชนิดนี้เท่ากับ 11

รูปที่ 4.19 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่ตกตะกอนได้ในรูปของไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ พบว่าที่ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 11 สามารถตกตะกอนโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาจากสารละลายได้มากกว่าร้อยละ 99 และ 100 ตามลำดับ

เนื่องจากสารละลายที่ได้จากการชะละลายขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วมีองค์ประกอบอยู่หลายชนิด เพื่อศึกษาถึงความบริสุทธิ์ของโลหะผสมของนิกเกิลและโคบอลต์ที่ตกตะกอนได้ จึงนำตะกอนที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF รูปที่ 4.20 แสดงปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในตะกอนที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนโลหะทั้งสองชนิดที่อยู่ในสารละลายด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 11 ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่มีอยู่ในตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าในตะกอนมีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ร้อยละ 42.7 และ 38.0 ตามลำดับ และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ร้อยละ 19.4 แสดงให้เห็นว่าตะกอนที่ได้มีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ร้อยละ 80.7 และมีสิ่งเจือปนมากับตะกอน เนื่องมาจากในการชะละลายขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่นอกจากจะมีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่เป็นองค์ประกอบหลักแล้วยังมีโลหะอื่นๆ อีกที่เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน แต่มีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า เช่น สังกะสี ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น ดังที่กล่าวไว้ในผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ เริ่มตั้งแต่ในขั้นตอนการชะละลายโลหะเหล่านี้จะถูกชะละลายออกมาด้วยในภาวะเดียวกับที่โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ถูกชะละลาย นอกจากนี้ยังมีคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่เกิดจากกรดไฮโดรคลอริกแตกตัวปะปนมาด้วยในสารละลาย และเมื่อทำการตกตะกอนโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เพิ่มขึ้นก็ทำให้โลหะอื่นๆ จะตกตะกอนร่วมกับโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วย เพราะว่าโลหะทั่วไปสามารถตกตะกอนได้ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น [10] ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปอาจจะต้องมีการใช้สารเคมี (Solvent) ที่มีสมบัติในการสกัดแยก (Extraction) เฉพาะโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาก่อนที่จะทำการตกตะกอน เพื่อให้ได้ตะกอนที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

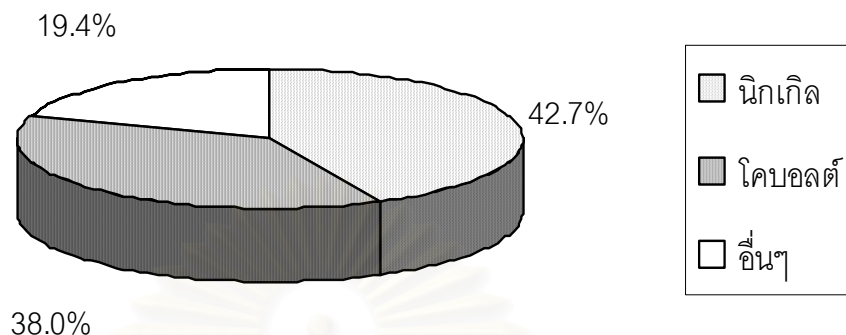


(ก) ความเข้มข้นของโลหะที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ



(ข) ร้อยละของโลหะที่ตกตะกอนได้ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ

รูปที่ 4.19 การตกตะกอนทางเคมีของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยไฮโดรอกไซด์



รูปที่ 4.20 ปริมาณโลหะในตะกอนไฮดรอกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำโลหะนิกเกิลและโคบอลต์กลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนโดยการชะละลายและการตกตะกอน และทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของกรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด เวลา และตัวแปรที่มีผลต่อการตกตะกอน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่มีองค์ประกอบเป็นโลหะนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ร้อยละ 30.5 และ 31.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
2. กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ได้ดีกว่ากรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก
3. ภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก คือ กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ออกมาได้ร้อยละ 99 และ 90 ตามลำดับ
4. อัตราเร็วของปฏิกิริยาการชะละลายเป็นอันดับที่ 2 (Second order reaction) มีค่าพลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาชะละลายของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ 0.34 และ 0.52 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ
5. ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนร่วมกันของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11
6. ตะกอนที่ได้มีปริมาณนิกเกิลและโคบอลต์อยู่ร้อยละ 42.7 และ 38.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หมดอายุการใช้งานแล้วนำมาใช้ในการทดลองต้องแน่ใจว่าไม่มีประจุไฟฟ้าค้างอยู่ เนื่องจากอาจเกิดอันตรายในขั้นตอนการแกะแยกชิ้นส่วนต่างๆ ได้

2. ในขั้นตอนของการตกตะกอนไอออนของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ เพื่อให้ตะกอนที่ได้มีความบริสุทธิ์ของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์มากขึ้น ควรใช้สารเคมีที่มีสมบัติในการสกัดแยกโลหะทั้งสองออกจากโลหะอื่นๆ ที่ละลายอยู่ในกรดไฮโดรคลอริกเสียก่อน แล้วจึงทำการตกตะกอนต่อไป
3. ทดลองใช้สารเคมีอื่นๆ ที่สามารถตกตะกอนโลหะทั้งสองชนิดนี้ได้ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- 1 คอลัมน์ที่พิมพ์ข่าวสิ่งแวดล้อม. ล้อมคอกอันตรายจากซากโทรศัพท์มือถือและแบตเตอรี่เก่า. หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ. (23 ธันวาคม 2546)
- 2 Bernardes A.M., Espinosa D.C.R. and Tenorio J.A.S. An overview on the current processes for the recycling of batteries. Journal of Power Source 135 (2004): 311–319.
- 3 สำราญ พุกษ์สุนทร. ไฟฟ้าเคมี. สำนักพิมพ์พัฒนาศึกษา, 2543.
- 4 ธีรพล โอภาสพันธ์วงศ์ และประกาศิต จ่วงพานิช. ความเป็นไปได้ในการนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยเครื่องแยกแร่โลหะด้วยแม่เหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- 5 Besenhand J.O. Handbook of battery materials. John Wiley & Sons, 1999.
- 6 Darren B., Gary M., Cyril G., Kevin G., Barry L. and Phil B. Carbon: The key to power. Chemistry & Industry 21 (November 1999): 817-860.
- 7 แหล่งที่มา: <http://www.tftbattery.com>
- 8 Bernardes A.M., Espinosa D.C.R. and Tenorio J.A.S. Recycling of batteries: A review of current processes and technologies. Journal of Power Source. 130 (2004): 291–298.
- 9 ประกอบ บุญยงค์. โลหะวิทยาประยุกต์. สำนักพิมพ์เมโทร, 2531.
- 10 วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล. การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- 11 สุขเมธ ชวเดช. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- 12 Hurd D.J., Muchnick D. M., Schedler M.F. and Mele T. Recycling of consumer dry cell batteries. Noyes Data Corporation, 1993.
- 13 Zhu N., Zhang L., Li C. and Cai C. Recycling of spent nickel–cadmium batteries based on bioleaching process. Waste Management. 23 (2003): 703-708.

- 14 Zhang P., Yokoyama T., Itabashi O., Wakui Y., Suzuki T.M. and Inoue K. Recovery of metal values from spent nickel–metal hydride rechargeable batteries. Journal of Power Sources. 77 (1999): 116–122.
- 15 Lee C.K. and Rhee K. Reductive leaching of cathodic active materials from lithium ion battery wastes. Journal of Power Sources. 109 (2002): 17–21.
- 16 Lupi C. and Pasquali M. Electrolytic nickel recovery from lithium-ion batteries. Minerals Engineering. 16 (2003): 537–542.
- 17 Tenorio J.A.S. and Espinosa D.C.R. Recovery of Ni-based alloys from spent nickel–metal hydride batteries. Journal of Power Sources. 108 (2002): 70–73.
- 18 ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536
- 19 Zhang P., Yokoyama T., Itabashi O., Wakui Y., Suzuki T.M. and Inoue K. Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. Hydrometallurgy. 47 (1998): 259-271.
- 20 Contestabile M., Panero S., B. Scrosati. A laboratory-scale lithium battery recycling process. Journal of Power Sources. 83 (1999): 75–78.
- 21 Reid M. Heavy metal removal from sewage sludge: Pratical experiences with acid treatment. Pretreatment in chemical water and wastewater treatment. 117 (1988): 327-334.
- 22 Spencer J.N., Bodner G.M. and Rickard L.H. Chemistry structure & Dynamic. John Wiley & Sons, 2003.
- 23 เทพจำนงค์ แสงสุนทร. เคมีพื้นฐาน. สำนักพิมพ์ภูมิบัณฑิต, 2538.
- 24 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.
- 25 Lee I.H., Wang Y.J. and Chern J.M. Extraction kinetics of heavy metal-containing sludge. Journal of Hazardous Materials. B123 (2005): 112–119.
- 26 วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

1. องค์ประกอบภายในแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่

●	แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์					
	ขั้วไฟฟ้า	27.72	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	40.85	โดยน้ำหนัก
	แผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า	13.33	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	19.65	โดยน้ำหนัก
	ปลอกโลหะ	10.40	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	15.33	โดยน้ำหนัก
	ปลอกพลาสติก	11.64	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	17.16	โดยน้ำหนัก
	อื่นๆ	4.76	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	7.01	โดยน้ำหนัก
	รวม	67.85	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	100.00	โดยน้ำหนัก
●	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน					
	ขั้วไฟฟ้า	12.04	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	41.83	โดยน้ำหนัก
	แผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า	0.96	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	3.34	โดยน้ำหนัก
	ปลอกโลหะ	10.85	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	37.70	โดยน้ำหนัก
	ปลอกพลาสติก	4.54	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	15.77	โดยน้ำหนัก
	อื่นๆ	0.39	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	1.36	โดยน้ำหนัก
	รวม	28.78	กรัม	คิดเป็นร้อยละ	100.00	โดยน้ำหนัก

2. ปริมาณโลหะภายในขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่

●	แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์		
	อะลูมิเนียมร้อยละ	0.267	โดยน้ำหนัก
	ซิลิกอนร้อยละ	0.047	โดยน้ำหนัก
	ฟอสฟอรัสร้อยละ	0.032	โดยน้ำหนัก
	คลอรีนร้อยละ	0.147	โดยน้ำหนัก
	โพแทสเซียมร้อยละ	6.389	โดยน้ำหนัก
	แคลเซียมร้อยละ	0.030	โดยน้ำหนัก

ไทเทเนียมร้อยละ	0.032	โดยน้ำหนัก
แมงกานีสร้อยละ	1.754	โดยน้ำหนัก
เหล็กร้อยละ	0.159	โดยน้ำหนัก
โคบอลต์ร้อยละ	8.780	โดยน้ำหนัก
นิกเกิลร้อยละ	54.20	โดยน้ำหนัก
ทองแดงร้อยละ	1.788	โดยน้ำหนัก
สังกะสีร้อยละ	2.083	โดยน้ำหนัก
แพลตตินัมร้อยละ	9.145	โดยน้ำหนัก
ซีเรียมร้อยละ	3.266	โดยน้ำหนัก
นาวาเดียมร้อยละ	1.042	โดยน้ำหนัก
อื่นๆ	10.80	โดยน้ำหนัก
รวม	100.00	โดยน้ำหนัก

- แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ลิเทียมร้อยละ	3.671	โดยน้ำหนัก
อะลูมิเนียมร้อยละ	5.313	โดยน้ำหนัก
ซิลิกอนร้อยละ	0.071	โดยน้ำหนัก
ฟอสฟอรัสร้อยละ	1.425	โดยน้ำหนัก
คลอรีนร้อยละ	0.074	โดยน้ำหนัก
โพแทสเซียมร้อยละ	0.843	โดยน้ำหนัก
แคลเซียมร้อยละ	0.035	โดยน้ำหนัก
ไทเทเนียมร้อยละ	0.016	โดยน้ำหนัก
แมงกานีสร้อยละ	0.182	โดยน้ำหนัก
เหล็กร้อยละ	0.108	โดยน้ำหนัก
โคบอลต์ร้อยละ	55.109	โดยน้ำหนัก
นิกเกิลร้อยละ	6.679	โดยน้ำหนัก
ทองแดงร้อยละ	8.316	โดยน้ำหนัก
สังกะสีร้อยละ	0.280	โดยน้ำหนัก
แพลตตินัมร้อยละ	0.853	โดยน้ำหนัก
ซีเรียมร้อยละ	0.278	โดยน้ำหนัก
นาวาเดียมร้อยละ	0.084	โดยน้ำหนัก

อื่นๆ	20.31	โดยน้ำหนัก
รวม	100.00	โดยน้ำหนัก

- แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ผสมลิเทียมในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

อะลูมิเนียมร้อยละ	2.063	โดยน้ำหนัก
ซิลิกอนร้อยละ	0.052	โดยน้ำหนัก
ฟอสฟอรัสร้อยละ	0.800	โดยน้ำหนัก
คลอรีนร้อยละ	0.088	โดยน้ำหนัก
โพแทสเซียมร้อยละ	4.059	โดยน้ำหนัก
แคลเซียมร้อยละ	0.051	โดยน้ำหนัก
ไทเทเนียมร้อยละ	0.018	โดยน้ำหนัก
แมงกานีสร้อยละ	0.908	โดยน้ำหนัก
เหล็กร้อยละ	0.113	โดยน้ำหนัก
โคบอลต์ร้อยละ	30.534	โดยน้ำหนัก
นิกเกิลร้อยละ	31.334	โดยน้ำหนัก
ทองแดงร้อยละ	5.258	โดยน้ำหนัก
สังกะสีร้อยละ	1.323	โดยน้ำหนัก
แลนทานัมร้อยละ	1.656	โดยน้ำหนัก
ซีเรียมร้อยละ	0.561	โดยน้ำหนัก
นาวาเดียมร้อยละ	0.552	โดยน้ำหนัก
อื่นๆ	16.479	โดยน้ำหนัก
รวม	100.00	โดยน้ำหนัก

3. ปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในแต่ละส่วนที่ได้ทำการศึกษา

ปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ที่จะนำเสนอในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในขั้วไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ XRF ส่วนที่ 2 คือ ปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในขั้วไฟฟ้าที่ถูกชะละลายออกมาอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ AAS และส่วนที่ 3 คือ ปริมาณโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนไอออนของโลหะทั้งสองชนิดด้วยโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณของโลหะทั้งสองที่แสดงออกมานี้จะคิดจากเทียบจากข้าวไฟฟ้าน้ำหนัก 15 กรัม ซึ่งแสดงข้อมูลดังตาราง ก.

ตาราง ก. โลหะนิกเกิลและโคบอลต์ในแต่ละส่วนที่ได้ทำการศึกษา

ปริมาณโลหะ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3
นิกเกิล	4.699 กรัม	4.622 กรัม	4.457 กรัม
โคบอลต์	4.579 กรัม	4.184 กรัม	4.156 กรัม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณองค์ประกอบภายในแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่

ชั่งน้ำหนักแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งก้อนได้ 28.78 กรัม หลังจากนั้นทำการแกะแยกแบตเตอรี่ออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแต่ละส่วน ดังตัวอย่าง ชั่วไฟฟ้าหนัก 12.04 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ชั่วไฟฟ้ามีน้ำหนักเป็นร้อยละ} &= \frac{12.04 \times 100}{28.78} \\ &= 41.83 \end{aligned}$$

2. การคำนวณปริมาณโลหะในชั่วไฟฟ้าของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่

ชั่วไฟฟ้าที่นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบโดยเครื่อง XRF จะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปของร้อยละโดยน้ำหนัก ดังตัวอย่าง มีโลหะนิกเกิลอยู่ร้อยละ 31 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณหาน้ำหนักของโลหะที่ใช้ในการทดลองได้เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างชั่วไฟฟ้าต่อกรดเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโลหะนิกเกิล} &= \frac{31 \times 15}{100} \\ &= 4.70 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

3. การคำนวณปริมาณโลหะที่ถูกชะละลายได้ในกรด

โลหะที่ถูกชะละลายได้ในกรดจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่อยู่ในรูปของสารละลายโดยเครื่อง AAS จะแสดงผลออกมาในหน่วยของ ppm (part per million) หรือมิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถ

คำนวณปริมาณร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายออกมาได้ ดังตัวอย่าง ในการชะละลายโดยใช้อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรดเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร หรือ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้โลหะ निकเกิดถูกชะละลายได้ 3996 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณร้อยละของโลหะที่ถูกชะละลายได้} &= \frac{3996 \times 100}{15,000} \\ &= 15.77 \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาค่าต่างๆ ในแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

4.1 คำนวณหาค่า k และ C_s จากสมการของแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์เอ็มพิริกัล

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{kC_s^2} + \frac{t}{C_s}$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/C_s$ และตัดแกน y ที่ $1/kC_s^2$ จากความชันและจุดตัดดังกล่าวทำให้สามารถหาค่า k และ C_s ดังตัวอย่าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/C_t กับ t ของอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือ 303 เคลวิน มีสมการเป็นดังนี้ $y = 14.181x + 43.207$

ดังนั้น	$1/C_s$	=	14.181	
จะได้	C_s	=	0.071	มิลลิโมลต่อลิตร
และ	$1/kC_s^2$	=	43.207	
แทนค่า	C_s	ลงไป		
จะได้	k	=	4.65	ลิตรต่อมิลลิกรัม-โมล

4.2 คำนวณหาค่าพลังงานการกระตุ้น (E_a) ของอาร์รีเนียส

$$\ln(k) = \ln(k_0) + \left(-\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T}$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln(k_0)$ ดังตัวอย่าง กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ ของปฏิกิริยาการชะละลายโลหะนิกเกิล มีสมการเป็นดังนี้ $y = -40.568x + 1.6509$

ดังนั้น	$-E_a/R$	=	-40.568	
แทนค่า	R	=	8.314×10^{-3}	กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน ลงไป
จะได้	E_a	=	0.34	กิโลจูลต่อโมล
และ	$\ln(k_0)$	=	1.6509	
จะได้	k_0	=	5.21	ลิตรต่อมิลลิโมล-นาที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศุภกันต์ สกุลงตั้ง เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2524 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต ในปีการศึกษา 2541 หลังจากนั้น เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อ ระดับปริญญาโทวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย