

การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้า
จากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพ

ENHANCED EFFICIENCY OF ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY
FROM SPENT LITHIUM-ION BATTERY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-027-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENHANCED EFFICIENCY OF ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY
FROM SPENT LITHIUM-ION BATTERY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-M-027-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

การให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพ
นักศึกษา	นางสาวอรทัย ครุฑหุ่น
รหัสประจำตัว	64601170
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้วด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งซึ่งมีโลหะโคบอลต์เป็นเป้าหมาย การดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การสร้างและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ และ 2) การศึกษาหาเงื่อนไขของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นจะถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพของวงจรผ่านการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการดำเนินงานพบว่าเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้ สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ออกจากซากของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้สูงกว่าร้อยละ 90 ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสม นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมากที่สุด คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลาการดำเนินงาน และอุณหภูมิของสารละลาย ตามลำดับ

Thesis	Enhanced Efficiency of Electrowinning for Metal Recovery from Spent Lithium-Ion Battery
Student	Miss Orathai Kruthun
Student ID.	64601170
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering (Multi-Disciplinary Program)
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Piampoom Sarikprueck

ABSTRACT

This thesis presents a study on the efficiency improvement of precious metal cobalt recovery from spent lithium-ion batteries using the electrowinning method. The study is divided into two main parts: 1) construction and development of a prototype closed-loop controlled DC power supply, and 2) a study to determine the optimal condition for recovering cobalt with the highest efficiency by the electrowinning method. The proposed closed-loop controlled DC power supply is investigated and used to be a suitable electric power supply for the electrowinning process to effectively discover the optimal condition for cobalt recovery. As the results, the proposed model can recover more than 90% of cobalt under an appropriate operating condition. In addition and very notably, the most significant parameters affecting the cobalt recovery by the electrowinning process include the cobalt concentration, supply current density, pH of the solution, operating time, and temperature of the solution, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ เจ้าหน้าที่และหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ดังมีรายชื่อดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษาในการทำงานและเอาใจใส่ในทุกๆ ด้าน ตลอดจนให้ความรู้ รวมถึงให้ประสบการณ์ที่มีคุณค่ายิ่งแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ในหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ ตลอดจนให้คำชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชดชนก อัทธพงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนห้องปฏิบัติการทดลองในการศึกษาวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำปรึกษาทางด้านเคมีและสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ คุณนาตยา โมรารวรรณ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางด้านการเตรียมสารเคมี กระบวนการทดลองทางเคมี ตลอดจนการส่งตรวจสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การส่งตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma (ICP)

ขอขอบคุณ คุณศรารุณี มณีสุวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ให้คำปรึกษา รวมถึงช่วยแก้ปัญหาต่างๆ

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้การเลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างดี คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อรทัย ครุฑหุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	6
2.1 กล่าวนำ	6
2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery).....	6
2.2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม	6
2.2.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียม	7
2.2.3 ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียม.....	8
2.2.4 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียม.....	10
2.3 กระบวนการวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy process)	11
2.3.1 อิเล็กโทรลิซิส	11
2.3.2 สมดุลเคมี (Chemical equilibrium)	13
2.3.3 จลศาสตร์เคมี (Chemical kinetic).....	14
2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply).....	16
2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer).....	16
2.4.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit).....	18
2.4.3 ไอจีบีที (Isulated gate biopolar transistors, IGBT)	20
2.4.4 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter).....	21
2.4.5 ไดโอด (Diode).....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.6	ออปแอมป์ (Operational amplifier).....	25
2.4.7	อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator)	27
2.4.8	ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	28
2.4.9	อาดูยโน่ (Arduino).....	29
2.5	การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)	30
2.5.1	การระบุสารที่ศึกษา (Selection of substances).....	31
2.5.2	การกำหนดขอบเขตการศึกษา (System definition in space and time)	31
2.5.3	การระบุการไหล การสะสมของวัสดุ และกระบวนการที่เกี่ยวข้อง (Identification of relevant flows, stocks and processes)	31
2.5.4	การคำนวณปริมาณการไหลของมวลสาร ปริมาณการสะสม และความเข้มข้น (Determination of mass flows, stocks and concentrations)	32
2.5.5	การประเมินปริมาณการไหลของวัสดุ และปริมาณการสะสมทั้งหมด (Assessment of total material flows and stocks).....	32
2.5.6	การนำเสนอผลการศึกษา (Presentation of results)	32
2.6	การทบทวนวรรณกรรม (Literature review).....	33
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	36
3.1	การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	37
3.1.1	แนวคิดการออกแบบวงจร.....	37
3.1.2	หลักการทำงานของวงจร.....	37
3.1.3	การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์.....	39
3.2	การนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง.....	41
3.2.1	อุปกรณ์และสารเคมี.....	41
3.2.2	แผนการดำเนินงาน	42
3.2.3	การวิเคราะห์ผล	43
บทที่ 4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	45
4.1	การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	45
4.1.1	การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m ²	45
4.1.2	การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m ²	47
4.1.3	การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m ²	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปขอประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 บทวิเคราะห์.....	49
4.2 ผลการทดลองของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์.....	50
4.2.1 ผลกระทบจากความเข้มข้นสารละลาย.....	50
4.2.2 ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	53
4.2.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิ.....	55
4.2.4 ผลกระทบจากเวลา.....	57
4.2.5 ผลกระทบจากความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย.....	59
4.3 ประสิทธิภาพของการนำกลับ.....	61
4.3.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency).....	63
4.3.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับโคบอลต์ 1 กิโลกรัม.....	63
4.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ.....	65
4.4.1 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 1.....	66
4.4.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 2.....	67
4.4.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 3.....	68
4.4.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 4.....	69
4.4.5 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 5.....	70
4.4.6 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 6.....	71
4.4.7 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 7.....	72
4.4.8 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 8.....	73
4.4.9 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 9.....	74
4.4.10 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 10.....	75
4.4.11 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 11.....	76
4.4.12 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 12.....	77
4.4.13 สรุปการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VI ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.	84
ภาคผนวก ข.	89
ภาคผนวก ค.	94
ประวัติผู้เขียน.....	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการศึกษา	4
ตารางที่ 1.2	ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)	4
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างเงื่อนไขการนำกลับของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินิ่ง	33
ตารางที่ 3.1	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	40
ตารางที่ 3.2	แผนการดำเนินงาน	42
ตารางที่ 4.1	ประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์วินิ่ง	62
ตารางที่ 4.2	การคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า	63
ตารางที่ 4.3	สรุปปริมาณการไหลเข้า-ออกของสารจากผังการไหลของวัสดุ	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [8]	7
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [9].....	11
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์.....	12
รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	18
รูปที่ 2.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลาง.....	19
รูปที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์	20
รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของไอจีบีที.....	21
รูปที่ 2.8 วงจร Buck Converter	21
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของ Buck Converter ขณะสวิตช์นำกระแส.....	22
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของ Buck Converter ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส.....	23
รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ของไดโอด.....	25
รูปที่ 2.12 สัญลักษณ์พื้นฐานของออปแอมป์	26
รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบกลับเฟสของออปแอมป์	27
รูปที่ 2.14 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสของออปแอมป์	27
รูปที่ 2.15 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา.....	28
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ [16].....	30
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	36
รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	37
รูปที่ 3.3 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	39
รูปที่ 3.4 ซีวีอิเล็กทรอนิกส์ชนิด stainless steel 316L	41
รูปที่ 4.1 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2	46
รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2	46
รูปที่ 4.3 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2	46
รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m^2	47
รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m^2	47
รูปที่ 4.6 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m^2	48
รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m^2	48
รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m^2	49
รูปที่ 4.9 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m^2	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรผ่านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่ง	50
รูปที่ 4.11 ลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน	51
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความเข้มข้นต่างกัน	51
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความเข้มข้นต่างกัน	52
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์	52
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน	53
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน	54
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์	55
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน	56
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน	56
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์	57
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ เวลาการทดลองต่างกัน	58
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์ ณ เวลาการทดลองต่างกัน	58
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน	59
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย	59
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน	60
รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์	61
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างสารละลายภายหลังกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่ง	62
รูปที่ 4.28 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับโคบอลต์ 1 กิโลกรัม	64
รูปที่ 4.29 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 1	66
รูปที่ 4.30 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 2	67
รูปที่ 4.31 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 3	68
รูปที่ 4.32 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 4	69
รูปที่ 4.33 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 5	70
รูปที่ 4.34 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 6	71
รูปที่ 4.35 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 7	72
รูปที่ 4.36 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 8	73
รูปที่ 4.37 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 9	74
รูปที่ 4.38 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 10	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ Xing อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 11.....	76
รูปที่ 4.40 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 12.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานให้แก่เครื่องใช้ไฟฟ้าในเวลาที่ต้องการถูกนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ในภาคอุตสาหกรรม แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้งานสำหรับกักเก็บพลังงานหมุนเวียนที่ผลิตจากธรรมชาติ หรือนำมากักเก็บพลังงานสำรองสำหรับใช้งานในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่จำเป็นอย่างมากต่อการดำเนินธุรกิจของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ ความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาลังวัลได้ผลักดันให้เกิดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานทดแทนในหลายภูมิภาค หนึ่งในนั้นคือนโยบายการลดจำนวนเครื่องยนต์สันดาปและหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่แทน ส่งผลให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความต้องการสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องไปกับปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าในตลาดที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี โดย International Energy Agency (IEA) ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 2030 ยอดขายรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกจะอยู่ที่ 23 ล้านคัน ในขณะที่จำนวนรวมทั้งหมดจะอยู่ที่ 130 ล้านคัน (รวมมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า) ซึ่ง IDTechEx สำนักวิเคราะห์จากอังกฤษก็ได้มีการคาดการณ์ว่า ในปีเดียวกันนี้รถยนต์ไฟฟ้าจะเป็นตลาดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใหญ่ที่สุดและมีมูลค่าสูงถึง 3 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ [1, 2] ดังนั้นจากแนวโน้มดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นว่าความต้องการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคตโดยมีแหล่งอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นแหล่งอุตสาหกรรมหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนทางธุรกิจ

ความต้องการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ ย่อมก่อให้เกิดซากของแบตเตอรี่เนื่องจากการเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานแล้วอย่างมหาศาล ซึ่งก็จะถูกนำไปกำจัดตามกระบวนการกำจัดของเสียที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามภายในซากของแบตเตอรี่เหล่านี้ยังถูกพบว่ามีส่วนประกอบของโลหะมีค่าหลายชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ผ่านกระบวนการรีไซเคิล เช่น ลิเทียม นิกเกิล แมงกานีส และโคบอลต์ เป็นต้น จากการศึกษามูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลได้พบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีขั้วแคโทดเป็นลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO_2) มีมูลค่าสูงที่สุดคือ 12-16 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ รองลงมาคือ แคโทดชนิดลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$) ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (LiFePO_4) และลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMnO_2) โดยมีมูลค่าของแคโทดอยู่ที่ 10-13 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ 9 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ และ 4.50 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ ตามลำดับ [3] โดยจะเห็นว่าขั้วแคโทดที่มีมูลค่าสูงสุด 2 อันดับแรกล้วนแต่มีธาตุโคบอลต์ซึ่งเป็นหนึ่งในโลหะหายากที่มีมูลค่าทางการตลาดสูงเป็นองค์ประกอบ

ดังนั้นแนวคิดเกี่ยวกับการรีไซเคิลเพื่อนำกลับโลหะโคบอลต์ออกจากซากของแบตเตอรี่จึงเป็นหนึ่งในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางที่มีศักยภาพสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้วิกฤตการขาดแคลนแร่ธาตุหายาก และสร้างมูลค่าให้กับซากของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่หมดอายุการใช้งานแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการรีไซเคิลเพื่อนำกลับโลหะมีค่าต่างๆ ออกจากซากแบตเตอรี่ลิเทียมกำลังได้รับความสนใจมากขึ้นและอยู่ในช่วงระหว่างการศึกษาวิจัยในประเทศต่างๆ ทั่วโลก โดยเฉพาะการพัฒนาเทคโนโลยีและเทคนิควิธีการที่จะนำมาใช้สกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากซากแบตเตอรี่ลิเทียม กระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลาย (Hydrometallurgical process) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีของการรีไซเคิลที่กำลังได้รับความนิยมน้อยลงมาก เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถเลือกสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการได้ที่ละขั้นตอน อย่างไรก็ตามภายหลังจากกระบวนการสกัดพบว่า โลหะที่ได้ยังคงมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นผ่านกรรมวิธีการทางโลหวิทยาไฟฟ้าเคมี หรือเรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) [3]

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เป็นกระบวนการแยกสกัดโลหะที่ต้องการออกจากสารละลายผ่านการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและการควบคุมค่าพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เหมาะสม โดยจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4-6] อย่างไรก็ตามการออกแบบและควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมตามชนิดของโลหะมีค่าที่ต้องการถือว่ามี ความยากและท้าทาย เนื่องจากกลุ่มของพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโดยตรง ประกอบกับการศึกษาวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างละเอียดและเป็นรูปธรรมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยเฉพาะพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึ่งถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง [7]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาวิธีการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้ว ซึ่งมีโลหะมีค่าโคบอลต์เป็นเป้าหมาย เนื่องจากเป็นธาตุหายากที่มีมูลค่าทางการตลาดสูงและกำลังจะขาดแคลนในอนาคตอันใกล้ โดยสร้างและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (closed-loop controlled DC power supply) สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทร-วินนิ่ง พร้อมกับการศึกษาหาเงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสมผ่านการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เพื่อให้สามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง
- 2) เพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผ่านการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการนำกลับโคบอลต์ที่เหมาะสมที่สุด
- 3) เพื่อส่งเสริมองค์ความรู้ ความเข้าใจ และสร้างแรงจูงใจที่เป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทั้งหมด 2 แห่ง อันได้แก่ 1) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ 2) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน คือ

- 1) การศึกษาและออกแบบเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสม
- 2) การศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย
- 3) การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการนำไปจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง พร้อมกับการเก็บรวบรวมข้อมูลและบันทึกผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการนำกลับโคบอลต์ที่ดีที่สุด
- 4) การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้สอดคล้องกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าและเงื่อนไขของกระบวนการนำกลับที่เหมาะสม
- 5) การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลสำหรับใช้นำเสนอผ่านการจัดทำผังการไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA) เพื่อให้ทราบกลไกการไหลของวัสดุโดยรวมตลอดทั้งการดำเนินงาน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่สารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนของเสียที่ได้จากกระบวนการทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2564					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. การศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	●	●	●							
2. ออกแบบและสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง			●	●	●	●				
3. ออกแบบการทดลองและเตรียมจัดอุปกรณ์ทดสอบที่เกี่ยวข้อง							●	●		
4. ทดสอบประสิทธิภาพของวงจรผ่านกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์									●	●

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
5. ปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการนำกลับ	●									
6. การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของกลุ่มพารามิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์		●	●	●	●	●				
7. ปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับ			●	●	●	●				
8. ส่งตรวจผลิตภัณฑ์			●	●	●	●				
9. วิเคราะห์และสรุปผล							●	●		
10. จัดทำวิทยานิพนธ์							●	●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) เทคโนโลยีการรีไซเคิลด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์สามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ ความบริสุทธิ์สูงออกจากซากแบตเตอรี่ลิเทียมได้มากกว่าร้อยละ 90
- 3) ผลการศึกษาสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยนวัตกรรมใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวคิดของเศรษฐกิจหมุนเวียน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้า จากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งมีโลหะโคบอลต์เป็นเป้าหมาย ผู้วิจัยได้มีการศึกษาและ ทบทวนวรรณกรรมจากวารสารและเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ รวมไปถึง การศึกษาจากวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เทคนิค และกระบวนการทางเคมีสำหรับใช้ในการนำกลับโลหะมีค่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และการ ทบทวนวรรณกรรมจากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อันเป็นที่มาและแนวคิดของการศึกษาในครั้งนี้

2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery)

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (แบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟใหม่ได้) ซึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเพื่อขจัดปัญหาการด้อยประสิทธิภาพและการก่อให้เกิดมลพิษต่อ สิ่งแวดล้อมจากการใช้งานแบตเตอรี่ปฐมภูมิอันไม่พึงประสงค์ ปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ถูกนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประเภทต่างๆ ในฐานะแหล่งกำเนิดพลังงาน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าซึ่ง แบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออนถูกเลือกมาเป็นแกนพลังงานหลักในการขับเคลื่อนรถยนต์พลังงานไฟฟ้า เนื่องจาก มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีค่าความหนาแน่นของพลังงานสูง อายุการใช้งานยาวนาน และเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจากคุณสมบัติการใช้งานดังกล่าว แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจึงถือว่าเป็นหนึ่งใน เทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีศักยภาพต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานเชิงธุรกิจ

2.2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แผ่นกั้น (Separator) และตัวรับกระแส (Current collector, Tabs) ดัง รูปที่ 2.1 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และวัสดุที่แตกต่างกัน [8] ดังนี้

1) ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของ กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าสู่สารละลาย นอกจากนี้ที่บริเวณของขั้วแคโทดและ แอโนดยังเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้วัสดุประเภทลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์

(Lithium cobalt oxide, LCO) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LMO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP) และลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นวัสดุของขั้วแคโทด ขณะที่ใช้แกรไฟต์ (Graphite) เป็นวัสดุของขั้วแอโนด

2) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

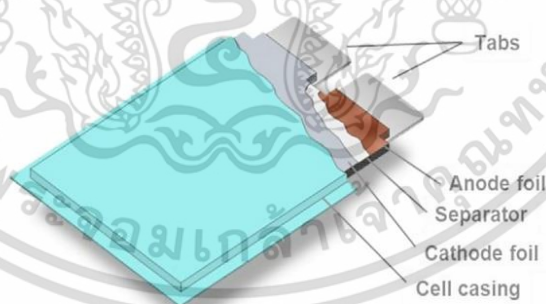
สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียม อิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายอินทรีย์ที่มีเกลือลิเทียมเป็นองค์ประกอบ โดยสามารถแตกตัวเป็นไอออนอิสระเมื่อละลายน้ำหรือหลอมเหลว ดังนั้นจึงทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนอิสระ อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้เพียงแต่ไอออนไหลผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน ดังนั้นจึงเป็นตัวนำไอออนที่ดีแต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่ไม่ดี

3) แผ่นกั้น (Separator)

เป็นส่วนที่ป้องกันอันตรายจากการเกิดการลัดวงจรระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเมมเบรน มีรูพรุน ประกอบขึ้นจากวัสดุประเภทโพลีเอทิลีน (Polyethylene) และโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) เป็นหลักซึ่งสารประกอบลิเทียมสามารถซึมผ่านได้

4) ตัวรับกระแส (Current collector, Tabs)

เป็นอุปกรณ์ชนิดโลหะตัวนำ ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สู่อุปกรณ์ภายนอก และรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกเข้าสู่แบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่ทำการประจุพลังงาน โดยชนิดของตัวรับกระแสมีผลกระทบต่อความจุไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ตัวรับกระแสเป็นโลหะประเภทอลูมิเนียม ทองแดง และคาร์บอน



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [8]

2.2.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นหลายประการ เช่น ในด้านประสิทธิภาพการใช้งาน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าและสำรองจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพในอัตราคงที่ตลอดเวลา แม้ประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ใกล้หมด โดยมีความจุพลังงานจำเพาะตั้งแต่ 90 ถึง 250 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับแรงดันใช้งาน ความหนาแน่นของลิเทียมไอออน และผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับอิเล็กโทรไลต์ (Solid electrolyte interphase, SEI) นอกจากนี้ในด้านของอายุการใช้งานพบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น โดยมีอายุการใช้งานในระยะเต็มประสิทธิภาพประมาณ 1-1.5 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานและการดูแลรักษา ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับความเสื่อมประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ (Self-discharge)

ความเสื่อมประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกสภาวะ ซึ่งจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและการดูแลรักษา ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ คือ อุณหภูมิใช้งาน การประจุเกินเวลา (overcharge) ความลึกการคายประจุ (deep discharge) และการเสื่อมสภาพเนื่องจากกระแสที่สูงเกินไป (overcurrent) นอกจากนี้แบตเตอรี่สามารถเสื่อมสภาพลงได้แม้จะถูกเก็บไว้โดยที่ยังไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นผู้ใช้งานควรจะต้องศึกษาวิธีการใช้งานและการดูแลรักษาแบตเตอรี่อย่างถูกวิธี เพื่อความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานมากขึ้นกว่าเดิม

2.2.3 ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานตามประเภทและลักษณะของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภทตามชนิดของวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วแคโทด [8] ดังนี้

1) ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LCO)

ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดแรกๆ ที่เริ่มวางจำหน่ายในปี 1991 โดยมีลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เป็นขั้วแคโทด สัญลักษณ์ทางเคมีคือ LiCoO_2 และแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะสูงตั้งแต่ 150-190 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ส่งผลให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลานาน อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถทำงานในสภาวะที่มีโหลดทางไฟฟ้าสูงได้ ดังนั้นจึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ถูกนำมาใช้งานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเท่านั้น เช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป และแท็บเล็ต เป็นต้น นอกจากนี้แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ยังไม่ถูกนิยมนำมาใช้ในงานในปัจจุบันเนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น (โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 500-1,000 รอบ) ทำให้ต้องประจุไฟใหม่บ่อยครั้ง และยังมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการเกิดอาการแบตเตอรี่ (thermal runaway) ได้

2) ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP)

ลิเทียมไอรอนฟอสเฟตเป็นแบตเตอรี่ที่มีขั้วแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมไอรอนฟอสเฟต สัญลักษณ์ทางเคมีคือ LiFePO_4 ขณะที่ขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์ มีความทนทาน ปลอดภัย และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน (ประมาณ 2,000 รอบขึ้นไป) อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ดังกล่าวมีค่าพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบยืมเรียบร้อยแล้ว กรุณา
ไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 90–140 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น นอกจากนี้แบตเตอรี่ลิเทียมไอรอนฟอสเฟตยังมีประสิทธิภาพของการทำงานลดลงเมื่อต้องเผชิญกับสภาวะที่มีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถนำมาใช้งานกับอุตสาหกรรมของเครื่องยนต์ข้อเหวี่ยงได้ ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอรอนฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) และรถจักรยานไฟฟ้า รวมไปถึงในระบบจ่ายไฟทั้งระบบออฟกริด (Off-Grid) และระบบโครงข่ายจำหน่ายไฟฟ้า (Grid-Connected)

3) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LMO)

ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์เป็นแบตเตอรี่ที่มีขั้วแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4) มีโครงสร้างสามมิติคล้ายเส้นใยสปิเนลซึ่งนอกจากจะช่วยปรับปรุงการไหลของไอออนในอิเล็กโทรดให้ดีขึ้นแล้ว ยังช่วยลดค่าความต้านทานภายในและการจัดการกระแส ซึ่งส่งผลให้มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิและความปลอดภัยที่สูงขึ้น แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์มีค่ากำลังจำเพาะค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ ทำให้สามารถรองรับและส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่า มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่า และสามารถทำงานที่สภาวะการใช้งานอุณหภูมิสูงได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้แบตเตอรี่ดังกล่าวยังมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถรองรับการใช้งานในสภาวะที่มีโหลดทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียเปรียบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์คือมีอายุการใช้งานสั้น (ประมาณ 300–700 รอบ) เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดอื่น ทำให้ปัจจุบันถูกนิยมนำมาใช้กับเครื่องมือและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าบางชนิดเท่านั้น เช่น เครื่องมือไฟฟ้าแบบพกพา เครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ และรถยนต์ไฟฟ้าบางรุ่น

4) ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC)

แบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (LiNiMnCoO_2) เป็นแบตเตอรี่ที่รวมคุณสมบัติจากองค์ประกอบหลักสามชนิดที่ใช้ในขั้วแคโทด ได้แก่ นิกเกิล แมงกานีส และโคบอลต์ โลหะนิกเกิลมีคุณสมบัติของค่าพลังงานจำเพาะที่สูงแต่มีความเสถียรต่ำ ขณะที่โลหะแมงกานีสมีค่าพลังงานจำเพาะต่ำแต่มีเสถียรภาพสูง ดังนั้นการผสมผสานระหว่างโลหะนิกเกิลและโลหะแมงกานีสเข้าด้วยกันจึงช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้ให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้แบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์จะมีความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะสูงและวงจรชีวิตที่ยาวนานแล้ว (ประมาณ 1,000–2,000 รอบ) ยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้โคบอลต์เป็นส่วนประกอบ อย่างไรก็ตามการไร้ซึ่งโคบอลต์ทำให้แรงดันไฟฟ้าใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดนี้ต่ำกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นที่มีโลหะโคบอลต์เป็นส่วนประกอบอยู่เล็กน้อย ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์มีบทบาทสำคัญสำหรับการนำมาใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับพกพา อุปกรณ์ไฟฟ้า และเครื่องมือทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide, NCA)

โดยทั่วไปแล้ว แบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นแบตเตอรี่ที่มีส่วนผสมของนิกเกิล 80% โคบอลต์ 15% และอะลูมิเนียม 5% ซึ่งการผสมผสานดังกล่าวทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีค่าพลังงานจำเพาะสูงสุดถึง 250 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม พร้อมกับค่ากำลังจำเพาะที่เหมาะสมและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน (ประมาณ 1,000–1,500 รอบ) ปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้กำลังเป็นที่นิยมในตลาดรถยนต์ไฟฟ้าและเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่เทสลา (Tesla) เลือกใช้ ซึ่งในอนาคตได้มีการคาดการณ์ว่าจะถูกนำมาใช้งานในระบบโครงข่ายจำหน่ายไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ในปัจจุบันยังถือว่าค่อนข้างมีราคาแพงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีโลหะโคบอลต์เป็นส่วนประกอบ

6) ลิเทียมไทเทเนียมออกไซด์ (Lithium Titanate, LTO)

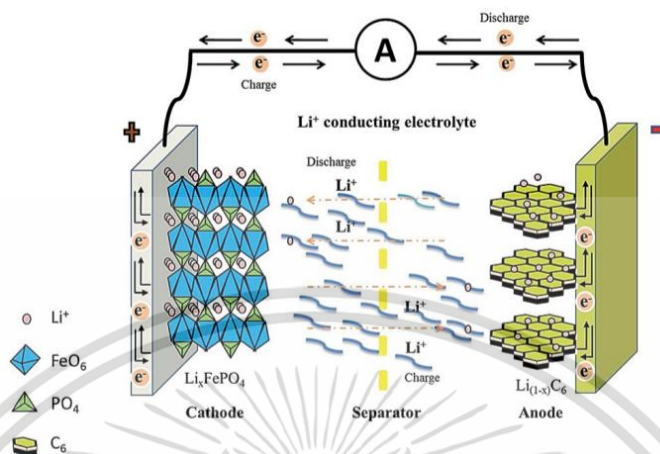
แบตเตอรี่ลิเทียมไทเทเนียมออกไซด์ หรือ แบตเตอรี่ลิเทียมไททานेट เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีแบตเตอรี่หายากและมีราคาแพง โดยมีขั้วแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ หรือ ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ขณะที่ขั้วแอโนดทำจากสารประกอบลิเทียมไททานेटแทน การใช้แกรไฟต์ การเลือกใช้สารประกอบดังกล่าวส่งผลให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความปลอดภัย มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถประจุไฟได้เร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามอุปสรรคสำคัญของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ การมีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานเป็นปริมาณมากได้ ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไททานेटถูกนำมาใช้งานในยานพาหนะไฟฟ้าและสถานีชาร์จ อุปกรณ์จ่ายไฟอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์เก็บพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ไฟถนนพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบโทรคมนาคม และอุปกรณ์การบินและอวกาศ

2.2.4 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียม

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าในปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมออกมาหลากหลายชนิดเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ลิเทียมแต่ละชนิดดังกล่าวจะมีคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะที่โดดเด่นแตกต่างกัน แต่กลุ่มของแบตเตอรี่ดังกล่าวกลับมีหลักการทำงานสำหรับการประจุไฟฟ้าและจ่ายพลังงานไฟฟ้าในลักษณะเดียวกัน คือ แบตเตอรี่ลิเทียมจะทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี ในกระบวนการอัดประจุ (charge) ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนตัวออกจากโครงสร้างของขั้วแคโทดซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วบวก ผ่านเยื่อเลือกผ่าน เข้าสู่ขั้วแอโนดซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ และเกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมและคาร์บอนในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวจากขั้วบวกเข้าสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก ส่วนในกระบวนการคายประจุ (discharge) ปฏิกริยาจะเกิดในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนตัวออกจากโครงสร้างของขั้วลบ ผ่านเยื่อเลือกผ่าน เข้าสู่ขั้วบวก และเกิดเป็นสารประกอบของลิเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนชนิดต่างๆ ตามประเภทของวัสดุที่ใช้ประกอบเป็นขั้วแคโทดเดิม ดังรูปที่ 2.2 กระบวนการที่ไอออนของลิเทียมสอดแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุขั้วบวกหรือขั้วลบ เรียกว่า “Lithium Insertion” [9]



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [9]

2.3 กระบวนการวิทยาการละลาย (Hydrometallurgy process)

กระบวนการวิทยาการละลายเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้สำหรับการนำกลับโลหะจากแร่ธาตุและวัสดุรีไซเคิลที่อยู่ในรูปของสารละลาย ปัจจุบันกระบวนการวิทยาการละลายมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และการรีไซเคิล เนื่องจากสามารถเลือกสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยวัสดุของเสียได้ โดยการทำงานของกระบวนการดังกล่าวอาศัยหลักพื้นฐานของทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) กล่าวคือ เป็นกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าออกจากสารละลายผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) หรือการตกตะกอนของเกลือ (Crystallisation) เทคโนโลยีของกระบวนการโลหวิทยาการละลายสำหรับการรีไซเคิลประกอบด้วยเทคนิควิธีการที่หลากหลายสอดคล้องไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การชะละลาย (leaching) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) เป็นต้น [10]

2.3.1 อิเล็กโทรลิซิส

อิเล็กโทรลิซิส เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรง) จากแหล่งกำเนิดภายนอกเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับดำเนินปฏิกิริยาทางเคมีอันเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอน หรือเรียกว่า การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีถูกนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหะและเหมืองแร่ เช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า และการแยกโลหะออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

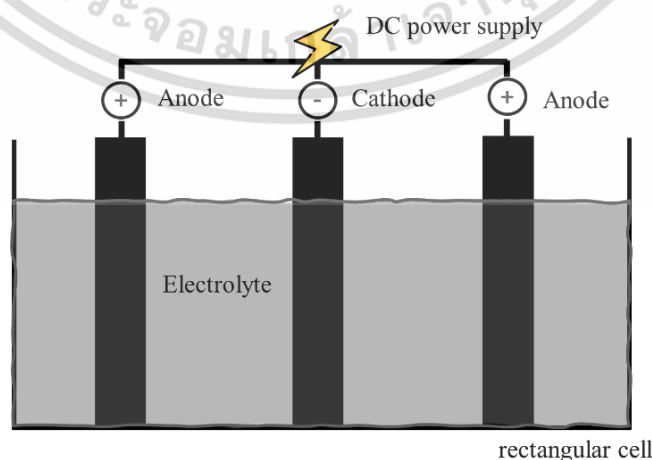
ปัจจุบันกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อการอุตสาหกรรมโลหะและเหมืองแร่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิง (Electrorefining) และกระบวนการอิเล็กโทรวินนิง (Electrowinning) ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิง (Electrorefining)

เป็นกระบวนการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้าผ่านการใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic cell) โดยมีหลักการทำงานที่สำคัญคือ การแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะจากบริเวณขั้วแอโนด (ด้านของโลหะไม่บริสุทธิ์) ไปยังขั้วแคโทด (ด้านของตัวอย่างโลหะบริสุทธิ์) ผ่านการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ระหว่างขั้วเข้าสู่สารละลายที่มีโลหะบริสุทธิ์เป็นองค์ประกอบ [11] โดยมีผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการเป็นโลหะบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมโลหะเดิมหรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้ ปัจจุบันกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิงกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในกลุ่มของอุตสาหกรรมโลหะและเหมืองแร่ โดยมักจะถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายภายหลังการถลุงโลหะด้วยกรรมวิธีการใช้ความร้อนสูง (Pyrometallurgical extraction) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของโลหะที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงสุด

2) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิง (Electrowinning)

เป็นกระบวนการนำกลับโลหะ เช่น ทองคำ ทองแดง และเงิน ออกจากสารละลายผ่านการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สารละลาย [12] ในระหว่างกระบวนการ อิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าภายนอกจะลดปริมาณของโลหะไอออนด้วยการทำปฏิกิริยาและฟอร์มตัวไปเป็นสารประกอบของโลหะในรูปของแข็งเกาะอยู่ที่บริเวณขั้วแคโทดซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยผลิตภัณฑ์โลหะของแข็งที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปหลอมเหลวได้อย่างง่ายดายตามลักษณะความต้องการใช้งาน องค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิง ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีหน้าที่และรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ขั้วไฟฟ้า

ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้า และเป็นส่วนหลักของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ประกอบด้วยขั้วแคโทดซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ และขั้วแอโนดซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วบวก โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งจะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นขั้วเฉื่อย (Inert electrode) กล่าวคือ เป็นขั้วของโลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เช่น แพลทินัม (Platinum, Pt) และแกรไฟต์ (Graphite, C) เป็นต้น

2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนของโลหะที่ต้องการนำกลับ ซึ่งได้จากการนำของเสีย (ในรูปของแข็ง) ที่ต้องการรีไซเคิลมาเข้าสู่กระบวนการชะละลายเพื่อเปลี่ยนของเสียให้อยู่ในรูปของสารละลายโดยการใช้สารละลายกรดหรือเบส จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือกระบวนการตกตะกอนอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อสกัดโลหะบางชนิดที่ต้องการออกมา ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการแยกสกัดโลหะที่ต้องการออกมาให้อยู่ในรูปของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด

3) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่สำคัญที่สุด ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสารละลายผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรภายนอก เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่ (constant voltage DC power supply) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสคงที่ (constant current DC power supply) ซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป

2.3.2 สมดุลเคมี (Chemical equilibrium)

สภาวะสมดุลที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นด้วยอัตราที่เท่ากัน เรียกว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ที่สภาวะนี้ความเข้มข้นของสารจะมีค่าคงที่ ขณะที่ปฏิกิริยายังคงเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา [13] โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดสภาวะสมดุลประกอบด้วย ดังนี้

- 1) ต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบปิดเท่านั้น กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวลสารกับสิ่งแวดล้อม เมื่อปฏิกิริยาเคมีดำเนินไปแล้วมวลของสารต้องมีค่าคงที่
- 2) ต้องเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าและย้อนกลับอยู่ตลอดเวลา
- 3) อัตราการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าและอัตราการเปลี่ยนย้อนกลับต้องเท่ากัน
- 4) ระบบต้องมีสมบัติคงที่ เช่น ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด ความเข้มข้นของสีคงที่ ระบบที่มีตะกอนจะมีปริมาณคงที่ และความดันคงที่หากมีแก๊สอยู่ในระบบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 จลศาสตร์เคมี (Chemical kinetic)

ในปฏิกิริยาเคมีส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา (reactants) ไปสู่สารที่เป็นผลิตภัณฑ์ (products) ซึ่งหลายปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยความเร็วสูงมาก ขณะที่บางปฏิกิริยากลับใช้เวลาานมากในการทำปฏิกิริยา จลศาสตร์เคมีเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ความไวของการเกิดปฏิกิริยา ตลอดจนการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำนายกลไกของปฏิกิริยาต่างๆ ทำให้สามารถควบคุมปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นตามต้องการเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ตามจุดประสงค์ของการศึกษา สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งนำเสนอเกี่ยวกับจลศาสตร์เคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์ อันประกอบด้วย อัตราการเกิดปฏิกิริยาในสารละลาย ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน [13] ดังนี้

1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาในสารละลาย

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ ความเร็วที่ตัวทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลา โดยปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะของแก๊สและสารละลาย การเกิดปฏิกิริยาในสารละลายจะมีความซับซ้อนมากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดในสถานะแก๊ส เนื่องจากสารตั้งต้นนอกจากจะทำปฏิกิริยาในสารละลายแล้ว ตัวทำละลายยังส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย กล่าวคือ ถ้าตัวทำละลายมีโมเลกุลใหญ่ หรือ มีความหนืดมาก จะทำให้เกิดขวางการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้น ทำให้ปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ (diffusion controlled) ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นช้า เมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายที่มีความหนืดน้อยกว่า

สำหรับปฏิกิริยาของสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนได้ จะมีผลของความแรงของไอออน (ionic strength) ในสารละลายเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เรียกว่า ผลกระทบจากเกลือ (salt effect) ดังนั้น ประจุของสารตั้งต้นจึงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ตัวทำละลายยังมีผลต่อการกีดขวางไม่ให้สารตั้งต้นสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวทำละลายซึ่งล้อมรอบอยู่จะทำหน้าที่เป็นกรงล้อมโมเลกุลของสารตั้งต้นไว้ เรียกว่า ผลของการกักขัง (cage effect)

การเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถกระทำได้โดยใช้ตัวเร่งทางปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งตัวเร่งที่เติมลงไปนั้นต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ มากมาย ซึ่งตัวเร่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกใหม่ ทำให้ใช้พลังงานกระตุ้นลดลง ดังนั้นจึงทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้ไวขึ้น

2) ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ประกอบด้วย สมบัติของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิ พื้นที่ผิวของสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีคุณสมบัติและรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ธรรมชาติของสารตั้งต้นขึ้นอยู่กับสมบัติของสารแต่ละชนิด ซึ่งมีความว่องไวในการถูกสร้างและถูกทำลายในปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน
- ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ถ้าสารตั้งต้นมีความเข้มข้นมากจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไวกว่าสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นน้อย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้โอกาสการชนกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มตามไปด้วย
- อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงการชนของโมเลกุล กล่าวคือ อนุกรมสูงกว่า จะเกิดการชนกันบ่อยครั้งกว่าซึ่งเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชนกันจะมีพลังงานมากขึ้น
- พื้นที่ผิวของสารตั้งต้น การเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง เช่น การทำให้มีขนาดเล็กลงหรือการนำไปบดละเอียด จะทำให้ปฏิกิริยาบ่อยมีโอกาสเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากของแข็งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีเนื้อผสมเกิดได้ไวขึ้น
- ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และตัวยับยั้ง (inhibitor) มีผลต่อความไวความช้าของการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสารที่ใส่ลงไปในการปฏิกิริยาเพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ขณะที่ตัวยับยั้งจะเป็นสารเมื่อใส่ลงไปในการปฏิกิริยาแล้วมีหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นเพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยาเคมี

3) กลไกของปฏิกิริยาเคมี

การเกิดปฏิกิริยาเคมีอาจมีหลายขั้นตอน โดยเกิดเป็นสารอื่นๆ ก่อนที่จะได้ผลิตภัณฑ์ สารที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของปฏิกิริยาเรียกว่า อินเตอร์มีเดียต (Intermediate) ในการทำปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งอาจเกิดขึ้นได้หลายขั้นตอน แต่ขั้นที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นกำหนดความเร็วหรือช้าของปฏิกิริยานั้นๆ เรียกว่า ขั้นกำหนดอัตรา (rate determining step) โดยขั้นตอนย่อยของการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ unimolecular process ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีสารตั้งต้นเพียงตัวเอง bimolecular process ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีสารตั้งต้น 2 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยา และ termolecular process กระบวนการที่มีสารตั้งแต่ 3 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นการทราบกลไกของปฏิกิริยาจะทำให้สามารถเขียนกฎอัตราเร็วสำหรับแต่ละขั้นตอนได้โดยดูจากปริมาณสารสัมพันธ์ และกฎอัตราที่เขียนจากสมการจะต้องสอดคล้องกับกฎอัตราเร็วที่ได้จากการทดลองเสมอ

2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อดำเนินปฏิกิริยาเคมี แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่ (constant voltage DC power supply, CVDC) และ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสคงที่ (constant current DC power supply, CCDC) ซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่

เป็นวงจรไฟฟ้าซึ่งแรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมให้อยู่ในระดับคงที่ กล่าวคือ มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่โดยไม่คำนึงถึงโหลดทางไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่แล้วนิยมนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าคงที่เพราะไม่สามารถรับมือกับความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าอันไม่คาดคิดได้

2) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสคงที่

เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งถูกควบคุมกระแสเอาต์พุตให้อยู่ในระดับคงที่ ซึ่งนิยมนำมาใช้จ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดไฟ LED (Light Emitting Diode) เนื่องจากความสว่างของหลอดไฟ LED จะถูกกำหนดโดยค่ากระแสไฟฟ้า กล่าวคือ หากค่ากระแสไฟฟ้าเกิดความผันผวน จะส่งผลให้ความสว่างของหลอดไฟเกิดความผันผวนตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความเสถียร นอกจากนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้าง่ายดังกล่าวยังถูกนำมาใช้เป็นหนึ่งในวิธีการประจุพลังงาน (charging) แบตเตอรี่ โดยจะจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่สู่แบตเตอรี่ขณะประจุพลังงาน จนกระทั่งแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นถึงค่าขีดจำกัดแรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท

2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้เปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถเปลี่ยนระดับของแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น (Step up Transformer) หรือ ลดลง (Step down Transformer) ขณะที่มีการกำลังไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าคงที่ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และ ฉนวนหม้อแปลง ซึ่งมีหน้าที่และรายละเอียดแตกต่างกัน ดังนี้

1) แกนเหล็ก

มีลักษณะเป็นแผ่นบางเคลือบด้วยฉนวน เรียกว่า แผ่นลามิเนต ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยผลิตจากแผ่นเหล็กซิลิกอนที่มีคุณสมบัติการตอบสนองต่อเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าได้สูงสุด ปัจจุบันแกนเหล็กถูกนำมาดัดแปลงเป็นรูปทรงต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน เช่น แกนเหล็กแบบคอร์ (Core Type) แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell Type) และแกนเหล็กแบบทอรรอยด์ (Toroid Type) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ขดลวดตัวนำ

มีลักษณะเป็นขดลวดทองแดงหรืออะลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน ซึ่งเป็นตัวนำที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการขดลวดหม้อแปลง โดยตัวนำทองแดงจะมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงเชิงกลและการนำไฟฟ้าสูง ขณะที่ตัวนำอะลูมิเนียมจะเป็นวัสดุที่มีต้นทุนน้อยกว่าและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับทองแดง ดังนั้นจึงนิยมใช้ขดลวดทองแดงในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ และใช้ขดลวดอะลูมิเนียมสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดกลาง

3) ฉนวนหม้อแปลง

ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกัน ซึ่งฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำมันและเซลลูโลส (กระดาษ/กระดาษแข็ง) โดยเฉพาะฉนวนหม้อแปลงเซลลูโลสซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริกโดยการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าเมื่อหม้อแปลงถูกกระตุ้นแล้ว ยังช่วยเติมเต็มการทำงานเชิงกลด้วยการสนับสนุนขดลวดและช่วยให้ระดับความร้อนของหม้อแปลงดีขึ้นโดยการสร้างท่อระบายความร้อนสำหรับน้ำมัน โดยฉนวนจะทำหน้าที่ได้ดีที่สุดเมื่อสะอาด แห้ง ค่อนข้างไม่มีช่องว่าง และใช้งานภายในช่วงของอุณหภูมิที่กำหนด

หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานโดยอาศัยกฎพื้นฐานของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าสลับผ่านเข้าไปยังขดลวด จะทำให้ขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กสอดคล้องตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น” ดังนั้นการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงใช้หลักการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากขดลวด 2 ชนิด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) และ ขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก และจะถูกส่งไปยังขดลวดทุติยภูมิโดยผ่านแกนเหล็ก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ สำหรับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดที่ขดลวดทุติยภูมินั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนรอบที่พันของขดลวดทั้งสอง ดังสมการที่ 2.1

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (2.1)$$

เมื่อ a = อัตราส่วนของจำนวนรอบ (turn ratio)

N_p = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_s = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

V_p = แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ

V_s = แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิ

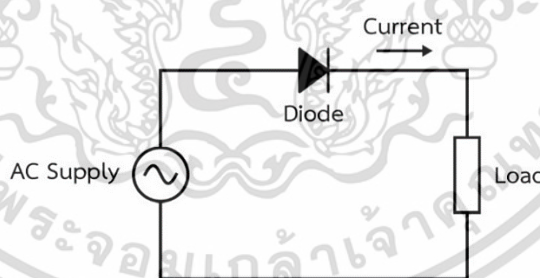
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)

คือ วงจรสำหรับแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC signal) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC signal) ผ่านการทำงานของไดโอดเรียงกระแส โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะแรงดันอินพุต คือ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส และวงจรเรียงกระแส 1 เฟส และแบ่งตามลักษณะแรงดันเอาต์พุตได้ 2 ลักษณะ คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier circuit) และ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier circuit) ซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน [14] ดังนี้

1) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เป็นวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการตัดเอาแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาซึ่งอาจจะเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบขึ้นอยู่กับการทำงานของไดโอด โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะเป็นช่วงๆ กล่าวคือ จะประกอบด้วยช่วงที่มีแรงดันและช่วงที่ไม่มีแรงดันสลับกันไป ซึ่งลักษณะของวงจรประกอบด้วยไดโอดเพียงตัวเดียว ดังรูปที่ 2.4 การทำงานของวงจรอาศัยหลักการทำงานของไดโอด คือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจร ไดโอดจะทำงานโดยยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว (ช่วงไปอัสตรง) ดังนั้นวงจรจะมีกระแสไหลเพียงช่วงบวกของไฟสลับเท่านั้น โดยช่วงลบของไฟสลับจะไม่มีกระแสไหล ส่งผลให้ได้แรงดันไฟตรงซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟด้านบวกเพียงด้านเดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวยังไม่สามารถนำไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ เนื่องจากลักษณะของแรงดันที่ได้ยังไม่เรียบพอ (pulse DC) ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งวงจรกรอง (filter) โดยใช้ตัวเก็บประจุซึ่งจะทำหน้าที่กรองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้มีลักษณะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบมากขึ้น



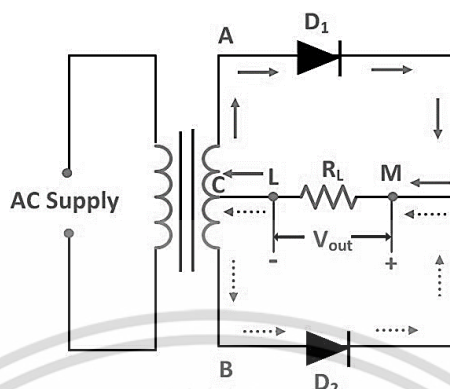
รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

2) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ผ่านการใช้งานแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 ด้าน (ด้านไฟบวกและด้านไฟลบ) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามจำนวนของไดโอดใช้งาน ได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลาง (full wave rectifier by center-tapped transformer) และ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ (full wave bridge rectifier) ซึ่งมีรายละเอียดต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลาง
เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปและไดโอด 2
ตัว ดังรูปที่ 2.5



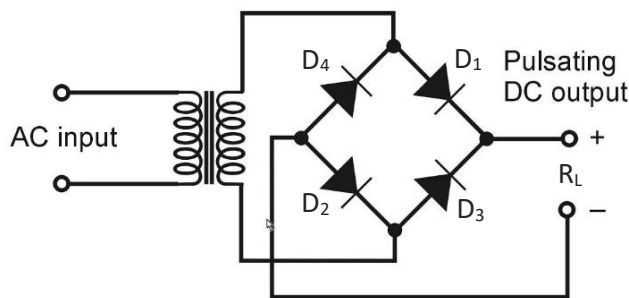
รูปที่ 2.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลาง

เมื่อมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นที่ขั้วของขดทุติยภูมิ โดยแทปกกลางของหม้อแปลงจะกำหนดให้มีแรงดัน 0 โวลต์ ดังนั้นแรงดันครึ่งหนึ่งจึงเกิดขึ้นระหว่างขั้วบนของขดทุติยภูมิและแทปกกลางของหม้อแปลง ขณะที่แรงดันอีกครั้งจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบนของขดทุติยภูมิและแทปกกลางของหม้อแปลง โดยระหว่างขั้วด้านบนและขั้วด้านล่างจะมีเฟสต่างกันอยู่ 180 องศา สำหรับการทำงานของวงจรเมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นบวกและขั้วล่างมีแรงดันเป็นลบ ไดโอด D_1 จะทำงาน (ช่วงไบอัสตรง) นำกระแสไหลผ่านไดโอด ผ่านโหลด R_L ไปครบวงจรที่ขั้วแทป ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด R_L เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่น ในช่วงเวลาต่อมาเมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นลบและขั้วล่างมีค่าแรงดันเป็นบวก ไดโอด D_2 จะทำงาน (ช่วงไบอัสตรง) เกิดการนำกระแสไหลผ่านไดโอด ผ่านโหลด R_L ไปครบวงจรที่ขั้วแทป ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด R_L เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่นบวก เช่นเดียวกับที่ไดโอด D_1 นำกระแสปรากฏเป็นเอาต์พุต การทำงานดังกล่าวส่งผลให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟตรงต่อเนื่องแบบพัลส์ ซึ่งต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของรูปคลื่นด้วยวงจรกรองก่อนที่จะนำมาใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกัน

2.2) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์

มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลาง เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างวงจรเรียงกระแสดังกล่าวคือ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงแบบมีแทปกกลางใช้ไดโอด 2 ตัว ขณะที่วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว ดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง (Center Tap, CT) มี 3 ขั้ว ขณะที่แบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

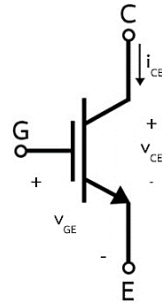


รูปที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์

การทำงานของวงจร ไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครึ่งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันไฟสลับปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะที่ด้านล่างเป็นไฟลบ ไดโอด D_1 และ D_2 จะทำงาน (ช่วงไบอัสตรง) ทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ผ่านโหลด R_L และผ่านไดโอด D_2 ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านล่าง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมโหลด R_L เป็นแรงดันไฟออกเอาต์พุตบวก ในช่วงเวลาต่อมาเมื่อไซเคิลลบของแรงดันไฟสลับปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างเป็นไฟบวก ณ ช่วงเวลานี้ ไดโอด D_3 และ D_4 จะทำงานแทน ทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_3 ผ่านโหลด R_L และผ่านไดโอด D_4 ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านบน ซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อมโหลด R_L เป็นแรงดันไฟออกเอาต์พุตบวกเช่นเดียวกับเมื่อคลื่นไซเคิลบวกของแรงดันไฟสลับทำงาน ส่งผลให้ได้คลื่นไฟตรงรวมแบบเสริมกันเต็มคลื่น ซึ่งก็จะถูกนำไปปรับปรุงคุณภาพคลื่นให้ได้เป็นคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียกขานก่อนนำไปใช้งานเช่นเดียวกัน

2.4.3 ไอจีบีที (Isulated gate bipolar transistors, IGBT)

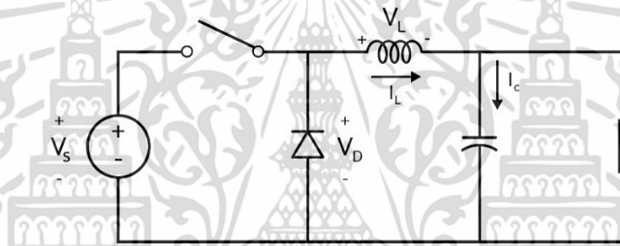
เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้านำกระแสหรือหยุดนำกระแสได้ผ่านการควบคุมขากเกต โดยสามารถใช้งานสำหรับการสวิตชิงที่ความถี่สูงได้ ไอจีบีทีเกิดจากการผสมผสานคุณสมบัติที่ดีที่สุดของทรานซิสเตอร์ (Transistor) และมอสเฟต (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor: MOSFET) กล่าวคือ ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติการมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) และความเร็วการสวิตชิง (Switching speeds) สูงของมอสเฟต ส่งผลให้ใช้พลังงานน้อยในการควบคุมสวิตซ์ ประกอบกับการใช้ประโยชน์จากการมีค่าแรงดันอิมพัลส์ต่ำของทรานซิสเตอร์ (ชนิด 2 รอยต่อ) เพื่อที่จะสร้างทรานซิสเตอร์รูปแบบใหม่ที่มีกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector, C) และอิมิตเตอร์ (Emitter, E) สูง ขณะที่ใช้ปริมาณกระแสสำหรับขั้วเกต (Gate, G) ต่ำ ไอจีบีทีประกอบด้วยขาตัวนำ 3 ขา คือ ขาตัวนำคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์สำหรับใช้ผ่านกระแสไฟฟ้าหลัก และขาเกตสำหรับใช้ควบคุมการนำกระแสและการหยุดนำกระแส ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งไอจีบีทีมีช่วงเวลากำหนดการนำกระแสและการหยุดนำกระแสประมาณ 1 ไมโครวินาที มีพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้า 5,000 โวลต์ [15]



รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

2.4.4 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

เป็นวงจรสำหรับลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมต่อจุดประสงค์การใช้งาน โดยโครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถสั่งให้ “ON” หรือ “OFF” ได้ทุกขณะตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมี ไดโอด (diode, D) ตัวเก็บประจุ (capacitor, C) และตัวเหนี่ยวนำ (inductor, L) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจร Buck Converter

1) เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอยู่ตัว

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.2)$$

- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.3)$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุ (I_C) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \quad (2.4)$$

- กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (P_s) เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o)

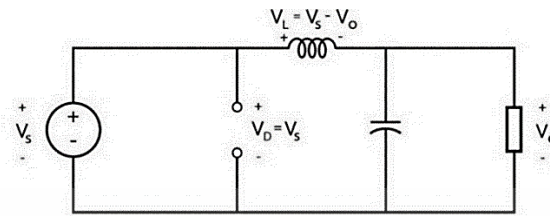
$$P_s = P_o \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) หลักการทำงานของวงจร Buck Converter

การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะคงตัว ดังนี้

- ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของ Buck Converter ขณะสวิตช์นำกระแส

จากวงจรสมมูลขณะสวิตช์นำกระแส ดังรูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ (Switch on) และผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปสะสมเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ สมการในช่วงสวิตช์นำกระแสเป็นดังนี้

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.6)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_o \quad (2.7)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.8)$$

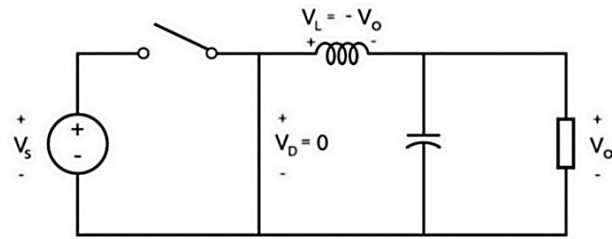
dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$ ดังนั้นจะได้

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.9)$$

เมื่อ	D	=	Duty Cycle
	t_{on}	=	ช่วงเวลานำกระแส
	t_{off}	=	ช่วงเวลาไม่นำกระแส
	T	=	เวลาหนึ่งคาบ
	i_L	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
	$\Delta i_{L,on}$	=	การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส
	V_s	=	แรงดันอินพุต
	V_o	=	แรงดันเอาต์พุต
	V_L	=	แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของ Buck Converter ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

จากวงจรสมมูลขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.10 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะนำกระแส (ช่วงไปอัสตรง) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง สมการในช่วงสวิตช์ไม่นำกระแสเป็นดังนี้

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (2.10)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.11)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ ดังนั้น สมการที่ (2.11) จัดรูปใหม่ได้

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.12)$$

เมื่อ $\Delta i_{L,off}$ = การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

3) อัตราขยายแรงดันของวงจร Buck Converter

การหาอัตราขยายแรงดันพิจารณาจากเงื่อนไขในสมการที่ (2.2) การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นในขณะสวิตช์นำกระแสกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ลดลงในขณะสวิตช์ไม่นำกระแสจะเท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.15)$$

4) ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจร Buck Converter

เนื่องจากขณะอยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.16)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสคือ

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.17)$$

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.18)$$

เมื่อ $I_{L,\min} = 0$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำสุด

ดังนั้นสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้วงจรสามารถทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องได้ โดยกำหนดให้ $I_{L,\min} = 0$ เท่ากับศูนย์ จะได้

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.19)$$

เมื่อ L_{\min} = ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด

R = ค่าตัวต้านทานของวงจร

f = ความถี่สวิตซ์ (Switching frequency)

5) ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ในวงจร Buck Converter จะต้องมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ แต่เพื่อให้ตัวเก็บประจุมีขนาดที่เหมาะสมที่ยังทำให้อัตราการระลอกคลื่นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงต้องมีการคำนวณโดยหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุหาได้จากสมการ

$$I_C = I_L - I_R \quad (2.20)$$

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นบวก ช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุโดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$\Delta Q = C\Delta V_o = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔQ = ค่าประจุที่เปลี่ยนแปลง
 ΔV_o = ค่าระลอกของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
 C = ค่าตัวเก็บประจุของวงจร

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.21) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\frac{\Delta V_o}{V_o}$ = อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

2.4.5 ไดโอด (Diode)

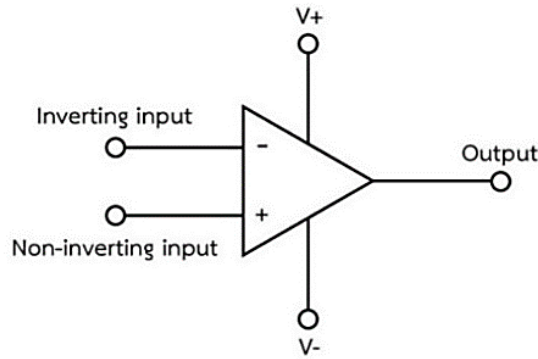
เป็นอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำซึ่งได้จากการนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมาต่อชนกัน เรียกว่า รอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) ไดโอดประกอบด้วยขั้วตัวนำ 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ดังรูปที่ 2.11 โดยมีคุณสมบัติ คือ “ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว” วิธีการกระตุ้นให้ไดโอดทำงานจะเรียกว่า การไบอัส (Bias) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไบอัสตรง (forward bias) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดได้ และการไบอัสกลับ (reverse bias) ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดไม่ได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ไดโอดได้รับความนิยมอย่างมากในกลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การนำมาทำเป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือการนำมาใช้เป็นตัวแยกสัญญาณในเครื่องรับวิทยุ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ของไดโอด

2.4.6 ออปแอมป์ (Operational amplifier)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดัน โดยเป็นหนึ่งในกลุ่มวงจรรวมที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายเสียง วงจรเครื่องมือวัด วงจรในระบบควบคุมอัตโนมัติ วงจรกำเนิดสัญญาณ และวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า เป็นต้น ออปแอมป์มีโครงสร้างภายในเป็นวงจรที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน, ทรานซิสเตอร์, ตัวเก็บประจุ และไดโอดเป็นจำนวนมาก มีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สัญลักษณ์พื้นฐานของออปแอมป์

จากรูปที่ 2.12 สัญลักษณ์ของออปแอมป์มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ประกอบด้วยขั้วตัวนำสำหรับต่อใช้งาน คือ ขั้วอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting input, -) เป็นขั้วอินพุตลบของออปแอมป์ โดยเมื่อป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วอินพุตนี้จะทำให้เกิดการกลับเฟสของสัญญาณเอาต์พุต ขั้วอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting input, +) เป็นขั้วอินพุตบวก ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขั้วอินพุตนี้จะมีเฟสเดียวกับสัญญาณป้อนเข้า นอกจากนี้ยังประกอบด้วยขั้วต่อแรงดันไฟเลี้ยงบวก (V+) และขั้วต่อแรงดันไฟเลี้ยงลบ (V-) สำหรับใช้จ่ายแรงดันไบอัสให้กับออปแอมป์ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ค่าแรงดันบวกและลบไม่เกิน 15 โวลต์

ออปแอมป์สำหรับวงจรรขยายสัญญาณ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) และวงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier) ซึ่งมีคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

1) วงจรรขยายแบบกลับเฟส

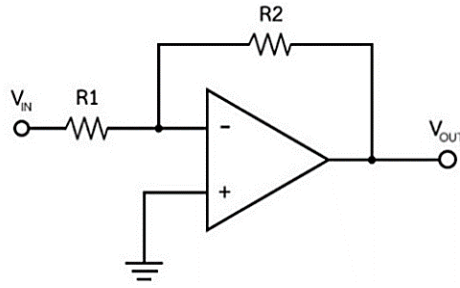
คือ วงจรรขยายและกลับเฟสของสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) 180 องศาจากสัญญาณอินพุตเดิม (V_{in}) ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ การต่อสัญญาณที่ต้องการขยายเข้ากับขั้วอินพุตลบของออปแอมป์ผ่านความต้านทาน R_1 และ R_2 เพื่อทำหน้าที่จำกัดกระแสและขยายสัญญาณ ขณะที่ขั้วอินพุตบวกจะต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.13 อัตราขยายของวงจรรขยายแบบกลับเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.23)

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.23)$$

เมื่อ A_v = อัตราขยายของวงจร

R_1 = ความต้านทานซึ่งต่อระหว่างสัญญาณป้อนเข้าและขั้วอินพุตลบของออปแอมป์

R_2 = ความต้านทานซึ่งต่อระหว่างขั้วอินพุตลบและขั้วเอาต์พุตของออปแอมป์



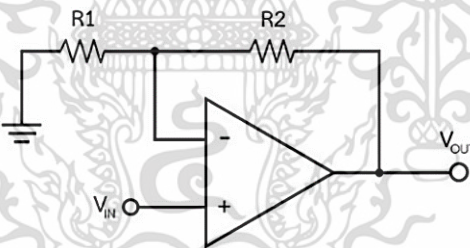
รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบกลับเฟสของออปแอมป์

2) วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

คือ วงจรขยายที่มีสัญญาณเอาต์พุตเฟสเหมือนกับสัญญาณอินพุต ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจร ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งอัตราขยายของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ (R_1 และ R_2) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.24) ดังนี้

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.24)$$

เมื่อ A_v = อัตราขยายของวงจร
 R_1 = ความต้านทานซึ่งต่อระหว่างขั้วอินพุตลบของออปแอมป์และกราวด์
 R_2 = ความต้านทานซึ่งต่อระหว่างขั้วอินพุตลบและขั้วเอาต์พุตของออปแอมป์



รูปที่ 2.14 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสของออปแอมป์

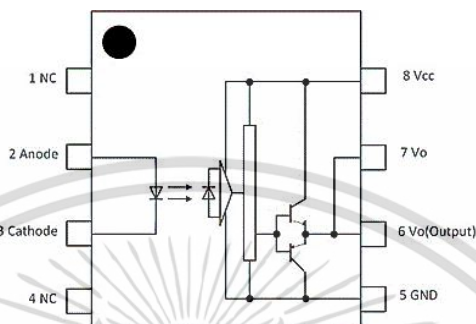
2.4.7 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ถ่ายโอนสัญญาณไฟฟ้าระหว่างวงจรแยกสองวงจรโดยใช้แสง ผ่านการเปลี่ยนจากสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงและเปลี่ยนกลับจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรไฟฟ้ากำลังและวงจรไฟฟ้าควบคุมซึ่งมีระดับการใช้งานของแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันวงจรควบคุมขณะเกิดการลัดวงจร โดยจะเป็นตัวแยกวงจรไม่ให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงผ่านเข้ามายังวงจรควบคุมได้

อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง ภายในประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) สำหรับใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) สำหรับใช้เป็นตัวรับ

สัญญาณ อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงอาศัยการทำงานผ่านการควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สั่งควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของไดโอดเปล่งแสงที่อยู่ภายใน เพื่อนำแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอด ไปควบคุมการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ การต่อใช้งานอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงในทางปฏิบัติ จำเป็นต้องมีตัวจำกัดกระแส หรือ ตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ด้วย เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ขนาดของกระแสมีค่าสูงเกินกว่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ (5-50 มิลลิแอมแปร์) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ โดยสัญลักษณ์ของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงจะแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา

2.4.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีความสามารถคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย หน่วยประมวลผล หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งถูกบรรจุไว้ภายในตัวถังเดียวกัน นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เนื่องจากสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขาของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อด้วยได้ องค์ประกอบหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1) หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU)

ทำหน้าที่ในการคิดคำนวณ ประมวลผลคำสั่งโปรแกรม และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อื่นในระบบ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละชนิดสามารถมีหน่วยประมวลผลกลางได้มากกว่า 1 ตัว

2) หน่วยความจำ (Memory)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) โดยหน่วยความจำโปรแกรมจะทำหน้าที่เก็บรวบรวมโปรแกรมคำสั่งการทำงาน ซึ่งข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำชนิดนี้จะไม่สูญหายแม้ไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับระบบ ขณะที่หน่วยความจำข้อมูลจะมีหน้าที่สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประมวลผล ซึ่งจะเกิดการสูญหายข้อมูลในหน่วยความจำสูญหายเมื่อหยุดการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับระบบ

3) ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (Port)

ทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ภายนอก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ พอร์ตอินพุต (Input Port) สำหรับใช้ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอก

และพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) สำหรับใช้ในการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)

ทำหน้าที่เป็นเส้นทางแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต

5) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator)

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสำหรับใช้กำหนดจังหวะเวลาของการประมวลผลและการคำนวณต่างๆ โดยการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับสัญญาณนาฬิกาดังกล่าว กล่าวคือ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูงจะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่าสัญญาณนาฬิกาที่ถูกกำหนดให้มีความถี่ในการประมวลผลต่ำ

2.4.9 อาดูยโน้ (Arduino)

เป็นหนึ่งในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาในรูปแบบ Open Source เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยง่าย การใช้งาน Arduino ถูกออกแบบมาให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างสถาปัตยกรรมภายในซีพียู เพียงแต่จำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับการต่อใช้งานพอร์ตรับ-ส่งสัญญาณซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการทำงานของ Arduino เช่น Arduino Nano บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA328 ประกอบด้วย จำนวนขาดีจิตอล 14 ขา ซึ่งสามารถตั้งค่าแต่ละขาเป็น Input/Output ได้ นอกจากนี้ยังมีขาที่สามารถใช้งานเป็น PWM เอาต์พุตได้อีก 6 ขา และมีขาสำหรับรับสัญญาณอนาล็อกอีก 8 ขา โดยทำงานที่ความถี่ 16 เมกะเฮิรตซ์ และมีปุ่มสำหรับรีเซ็ตโปรแกรม เป็นต้น Arduino อาศัยการทำงานภายใต้การเขียนโปรแกรมเพื่อป้องกันคำสั่งควบคุมตามจุดประสงค์ของผู้ใช้งาน ผ่านแพลตฟอร์มของ Arduino ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1) ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนประกอบหลักร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ ซึ่งมีหลากหลายรุ่นให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม โดยบอร์ด Arduino ในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในด้านของราคา ขนาด และสเปกการใช้งาน เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และประสิทธิภาพของหน่วยประมวลผล เป็นต้น ปัจจุบันบอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ Arduino UNO Arduino Mega และ Arduino Nano

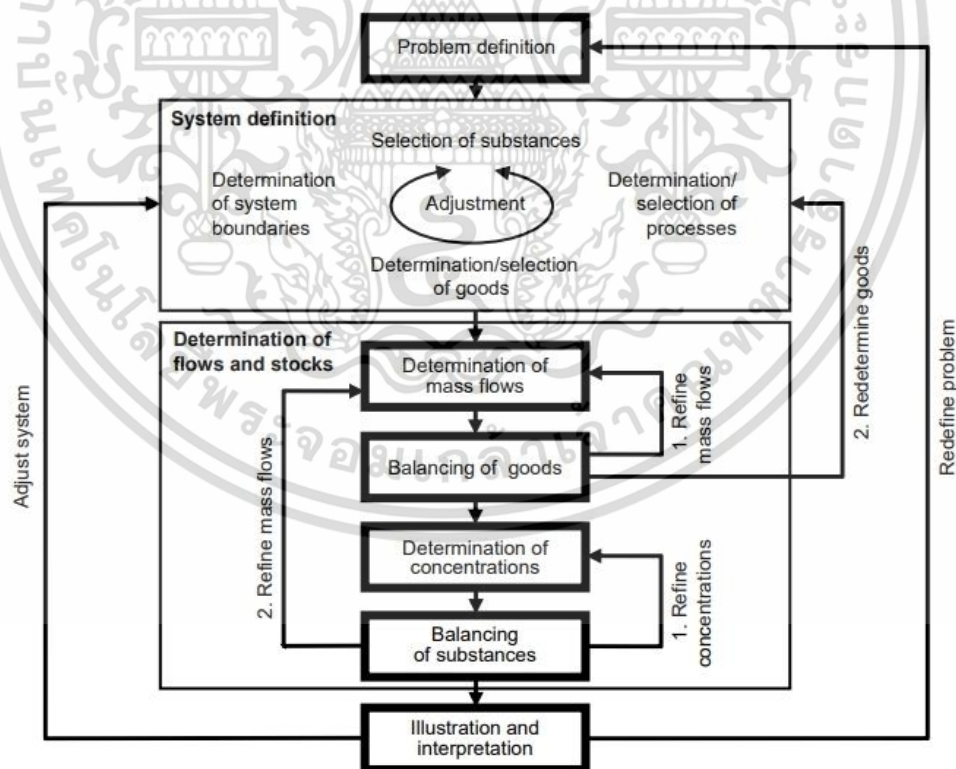
2) ซอฟต์แวร์ (Software)

Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับการเขียนโค้ดโปรแกรม การประมวลผลโปรแกรม (การแปลงไฟล์ภาษาซีให้เป็นภาษาเครื่อง) และการอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด โดยส่วนใหญ่แล้วภาษาที่ใช้เขียนโค้ดควบคุมบอร์ด Arduino จะเป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมที่มีไวยากรณ์เช่นเดียวกับภาษา C/C++

2.5 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ เป็นทฤษฎีการวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับอธิบายปริมาณสารที่เข้า-ออก และสะสมอยู่ในกระบวนการของระบบทั้งหมด ภายใต้ระยะเวลาและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้ โดยอาศัยหลักการสำคัญคือ ปริมาณของสารที่เข้าสู่ระบบจะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างปริมาณสารที่สะสมอยู่ในแต่ละกระบวนการกับปริมาณสารที่ออกจากระบบ หรือที่เรียกว่า การทำสมดุลมวลสาร (mass balance) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวลสาร (law of conservation of matter) ที่กล่าวว่า “มวลของสารจะไม่สูญหายหรือถูกทำลายไป” [16]

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์และจัดการกับปัญหา โดยการใช้การเชื่อมโยงกันของแหล่งกำเนิด (source) เส้นทางผ่าน (pathway) และองค์ประกอบอื่นๆ ของวัสดุในระบบมาช่วยสำหรับการระบุแหล่งที่มาของของเสียและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การกำหนดนโยบายและเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุประกอบด้วย การระบุสารที่ศึกษา การกำหนดขอบเขตและระยะเวลาของการศึกษา การระบุการไหล การคำนวณปริมาณการไหล การประเมินปริมาณการไหลของวัสดุ และการนำเสนอผลการศึกษา ดังรูปที่ 2.16 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การระบุสารที่ศึกษา (Selection of substances)

การกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษาและชนิดของระบบการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่นำมาใช้ในการเลือกสารของระบบ เนื่องจากจุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ คือ ต้องแสดงผลลัพธ์ของกระบวนการให้ออกแบบในรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจ ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ตัวแปรพารามิเตอร์มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอาศัยการเลือกตัวดัชนี (Indicator elements) ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มสาร โดยสามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะตัวทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติเฉพาะของสารทุกชนิดในกลุ่มได้

2.5.2 การกำหนดขอบเขตการศึกษา (System definition in space and time)

ในการบริหารจัดการประเทศส่วนใหญ่ จะถูกแบ่งออกเป็นแต่ละระดับชั้นของการปกครอง เช่น ระดับตำบล ระดับชุมชน และระดับจังหวัด เนื่องจากจะได้มีการบริหารจัดการพื้นที่และชีวิตความเป็นอยู่ของบุคลากรภายในประเทศอย่างทั่วถึง อีกทั้งยังคำนึงถึงการจัดระเบียบความเรียบร้อยขององค์กรทั้งส่วนของภาครัฐและภาคเอกชน ส่งผลให้การเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ กระทำได้สะดวกยิ่งขึ้น ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของระบบเชิงพื้นที่ (Spatial system boundary) ส่วนมากจึงถูกกำหนดเป็นระดับประเทศ ระดับรัฐหรือระดับเมือง และระดับชุมชน เพื่อเพิ่มความสะดวกต่อการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ สำหรับใช้จัดทำผังการไหลของวัสดุ นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดขอบเขตของระบบเชิงเวลา (Temporal system boundary) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขอบเขตเชิงเวลามักถูกกำหนดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 1 วัน หรือ 1 ปี โดยหากโครงการที่ศึกษามีการกำหนดขอบเขตเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่จะส่งผลให้ขอบเขตของระบบเชิงเวลาต้องใช้ระยะเวลานานสำหรับการศึกษา เช่น โครงการขนาดใหญ่ที่ทำการศึกษาในระดับประเทศ ระดับเมือง หรือระดับองค์กร จะนิยมกำหนดขอบเขตของเวลาเป็น 1 ปี เป็นต้น สิ่งที่ควรตระหนักและพึงระลึกไว้เสมอสำหรับการกำหนดขอบเขตและระยะเวลาของการศึกษาคือ ขอบเขตของการศึกษาต้องเหมาะสม และครอบคลุมทุกกระบวนการในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุตามวัตถุประสงค์ที่มีการกำหนดไว้

2.5.3 การระบุการไหล การสะสมของวัสดุ และกระบวนการที่เกี่ยวข้อง (Identification of relevant flows, stocks and processes)

การทำสมดุลของผลิตภัณฑ์ในระบบเป็นขั้นตอนถัดจากการเลือกสารและกำหนดขอบเขตของระบบ การเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัย หรือเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จะถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างผังการไหลของวัสดุโดยต้องคำนึงถึงความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของข้อมูลที่ถูกรวบรวมมาใช้เป็นอันดับแรกเสมอ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและสามารถสร้างประโยชน์ต่อวางแผนโครงการในอนาคตมากที่สุด ในขั้นตอนนี้ปริมาณการไหลของวัสดุที่มีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณการไหลทั้งหมดจะไม่ถูกนำมาพิจารณา โดยต้องคำนึงเสมอว่าการถูกต้องของข้อมูลเหล่านี้ต้องไม่มีผลกระทบต่อวัตถุประสงค์ของการศึกษา และยังสามารถรวมกระบวนการย่อยๆ ให้กลายเป็นกระบวนการเดียวได้ เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการในระบบที่จะเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การคำนวณปริมาณการไหลของมวลสาร ปริมาณการสะสม และความเข้มข้น (Determination of mass flows, stocks and concentrations)

การคำนวณปริมาณการไหลของวัสดุอาศัยการคาดการณ์หรือตั้งสมมติฐานผ่านการใช้โมเดลทางวิทยาศาสตร์ที่อ้างอิงถึงข้อมูลพร็อกซี (Proxy Data) ซึ่งเป็นการคาดการณ์ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบระบบที่มีความคล้ายคลึงกัน เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สูญเสียจากการสึกกร่อนของยางรถยนต์ โดยอาศัยการอ้างอิงข้อมูลประเภทพร็อกซีจากประเทศสวีเดนที่มีการศึกษาไว้แล้วก่อนหน้า กล่าวคือ ปริมาณสังกะสีที่สูญเสียจากการสึกกร่อนของยางรถยนต์ในประเทศสวีเดน 1 คันเท่ากับ 0.032 กิโลกรัม ดังนั้นจากข้อมูลยานพาหนะที่มีการใช้งานอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวน 140 ล้านคัน ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สูญเสียจากการสึกกร่อนของยางรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกาจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของ 0.032 กิโลกรัมสังกะสีต่อปีกับจำนวนรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา 140 ล้านคัน (4,500 คันต่อปี) เป็นต้น

2.5.5 การประเมินปริมาณการไหลของวัสดุ และปริมาณการสะสมทั้งหมด (Assessment of total material flows and stocks)

ปริมาณการไหลของสสารในระบบสามารถใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์คำนวณได้ โดยคิดจากผลคูณระหว่างมวลการไหลของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นของสสารในผลิตภัณฑ์ การประเมินปริมาณการสะสมของวัสดุที่อยู่ในระบบสามารถกระทำได้ 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 คือ การวัดมวลของวัสดุที่สะสมอยู่ในระบบโดยตรง และวิธีที่ 2 คือ การหาปริมาณการสะสมของวัสดุจากการประเมินผ่านตัวแปรปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุ (มวลของวัสดุมีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างความหนาแน่นของวัสดุกับปริมาตรของวัสดุ) โดยวิธีแรกเหมาะสมกับการพิจารณาวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบน้อยมากและสะสมอยู่ในระบบเป็นระยะเวลานาน เช่น การศึกษากระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในดิน หรือ แอ่งน้ำขนาดใหญ่ เป็นต้น ขณะที่วิธีที่สองเหมาะสมกับการพิจารณาวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบอย่างรวดเร็ว เช่น การศึกษาการฝังกลบขยะประเภทต่างๆ ตามชุมชนเมือง เป็นต้น

2.5.6 การนำเสนอผลการศึกษา (Presentation of results)

การนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุต้องถูกนำเสนอออกมาในรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจ ไม่ซับซ้อน และต้องมีความน่าเชื่อถือ สิ่งสำคัญอีกประการสำหรับการนำเสนอผลการศึกษาคือ วิธีการสื่อสารระหว่างผู้ส่งสารกับผู้รับสาร โดยผู้ส่งสารต้องสามารถสื่อสารออกมาได้อย่างชัดเจน เนื่องจากกลุ่มผู้ฟังหลักมี 2 ประเภทคือ กลุ่มของนักวิชาการและกลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสีย (นักลงทุน) ซึ่งความแตกต่างระหว่างกลุ่มผู้ฟัง 2 ประเภทนี้คือ ความรู้และความเข้าใจที่มีต่อศาสตร์ดังกล่าว เนื่องจากเหล่านักวิชาการ คือ ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในด้านการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ตลอดจนการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ขณะที่กลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสีย (นักลงทุน) คือ ผู้ที่อาจจะไม่ได้มีพื้นฐานทางด้านนี้ แต่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มักเป็นผู้ที่มีบทบาทในการตัดสินใจด้านนโยบายหรือการอนุมัติโครงการ ดังนั้นการนำเสนอผลการวิเคราะห์จึงควรมีทั้งรายงานฉบับเต็ม (comprehensive technical report) และรายงานสรุป (executive summary)

2.6 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เป็นกระบวนการแยกสกัดโลหะที่ต้องการออกจากสารละลาย โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้าคงที่กระแสตรง ภายใต้การควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เป็นต้น ปัจจุบันกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีของการนำกลับของเสียที่มีศักยภาพในวงการอุตสาหกรรมกำจัดขยะและของเสีย โดยจะเห็นได้จากตัวอย่างงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งได้มีการนำกระบวนการดังกล่าวมาใช้เพื่อนำกลับวัสดุมีค่า หรือ แร่ธาตุหายากที่ต้องการ ออกจากซากของแบตเตอรี่ที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเงื่อนไขการนำกลับของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

Metal	Electrode		pH	Temperature (°C)	Current density (A/m ²)	Yield (%)	Ref.
	cathode	anode					
Cobalt	Stainless steel	Iridium oxide	2-4	50	150	98.8	[17]
	Stainless steel 316L	Titanium plate	5	50	110	88	[18]
	Aluminium	Pb-8Sb	4-4.5	25-50	250	>90	[19]
	Stainless steel	Platinum/Iridium-coated titanium	6	50	250	>92	[20]
	Stainless steel	Pb-Ag (1%Ag) alloy	2.5-3.5	65	125	87-93	[2]
	AISI 316L stainless steel/Aluminium	Pb-8Sb	4	50	250	96	[21]
	Stainless steel 316L	Stainless steel 316L	5-6	20-25	110	-	[22]

จากตารางข้างต้นจะเห็นว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งถูกนำมาใช้นำกลับโลหะโคบอลต์ ซึ่งเป็นหนึ่งในโลหะมีค่า หายาก และมีราคาแพง ออกจากซากของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการนำกลับที่แตกต่างกัน จากงานวิจัย [17] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับโลหะโคบอลต์ออกจากซากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการดังกล่าวสามารถนำกลับโคบอลต์ได้สูงถึงร้อยละ 98.8 ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการ คือ การใช้ Stainless steel และ Iridium oxide เป็นขั้วแคโทดและแอโนดตามลำดับ สารละลายที่ใช้เป็นสารประกอบโคบอลต์ที่ผ่านการชะละลาย (leaching) และสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 2-4 ขณะดำเนินงานใช้กระแสไฟฟ้าความหนาแน่น 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตรจ่ายให้กับระบบสารละลาย ผ่านการควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ 50 องศาเซลเซียสตลอดทั้งการทดลอง 48 ชั่วโมง นอกจากนี้ การศึกษาของงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่า ลักษณะของสารละลายมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับ โดยการใช้สารประกอบโคบอลต์ที่ผ่านกระบวนการชะละลายเพียงอย่างเดียวพบว่ามีประสิทธิภาพของการนำกลับโคบอลต์เพียงร้อยละ 62.2 เมื่อเทียบกับสารประกอบโคบอลต์ที่ผ่านการชะละลายและสกัดด้วยตัวทำละลาย ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมือนกัน ดังนั้นการเลือกใช้สารละลายให้เหมาะสมกับการดำเนินงาน จึงถือว่าเป็นเงื่อนไขที่สำคัญมากสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง

จากงานวิจัย [18] พบว่าประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะโคบอลต์อยู่ที่ร้อยละ 88 โดยมีเงื่อนไขของกระบวนการ คือ การใช้ Stainless steel 316L และ Titanium เป็นขั้วแคโทดและแอโนด ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าและชนิดของสารละลายที่ใช้แตกต่างกันไปจากงานวิจัยก่อนหน้า [17] กล่าวคือ มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าความหนาแน่น 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตรให้กับสารละลายชนิดโคบอลต์ซัลเฟตที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 ซึ่งจะเห็นว่า ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับ

จากงานวิจัย [19] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ออกจากซากแบตเตอรี่ลิเทียมได้เกินกว่าร้อยละ 90 ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงาน คือ การใช้ Aluminium และ Pb-8Sb เป็นขั้วแคโทดและแอโนด ตามลำดับ สารละลายที่ใช้คือ LiCoO_2 ที่ผ่านการชะละลายแล้ว ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 4-4.5 นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ยังมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นมากกว่างานวิจัยก่อนหน้าทั้งหมด โดยใช้กระแสไฟฟ้าความหนาแน่น 250 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ประมาณ 25-50 องศาเซลเซียส ภายใต้ระยะเวลาดำเนินงานเพียงแค่ 2 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ใช้เวลาในการดำเนินงานน้อยกว่างานวิจัย [17] มากอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีสามารถดำเนินไปได้เร็วขึ้น

จากงานวิจัย [20] การนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้การใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 250 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพสูงเกินกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกับงานวิจัย [19] อย่างไรก็ตามชนิดของขั้วอิเล็กโทรดและสารละลายที่ใช้มีความแตกต่างกัน โดยงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ Stainless steel เป็นขั้วแคโทด และ Platinum/iridium-coated titanium เป็นขั้วแอโนด ขณะที่ใช้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6 ซึ่งมากกว่างานวิจัยก่อนหน้าทั้งหมด

จากงานวิจัย [2] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการหาเงื่อนไขที่ทำให้ได้โลหะมีค่าโคบอลต์ที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง จากการศึกษาพบว่า การใช้ Stainless steel เป็นขั้วแคโทด และ Pb-Ag (1%Ag) alloy เป็นขั้วแอโนด ผ่านการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่น 125 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์ต่อตารางเมตรให้กับสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.5-3.5 ขณะที่ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ 60 องศา จะทำให้ได้ประสิทธิภาพของการนำกลับโคบอลต์อยู่ที่ร้อยละ 87-93

จากงานวิจัย [21] ซึ่งศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทำอิเล็กโทรวินนิ่งโคบอลต์ ผลการศึกษาพบว่า ในการทดลองที่ใช้เทคนิค Galvanostatic (การป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่) ขั้วแคโทดชนิด AISI 316L stainless steel หรือ Aluminum และขั้วแอโนดชนิด Pb-8Sb เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดมากที่สุด ขณะที่การทดลองโดยใช้เทคนิค Potentiostatic (การป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่) เหมาะสมต่อการใช้ Aluminum เป็นขั้วแคโทดมากกว่าการใช้วัสดุประเภท Stainless steel หรือ Nickel นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4-6 เพื่อประเมินสภาวะการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่ดีที่สุด

จากงานวิจัย [22] ซึ่งได้ทำการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์จากซากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการนำกลับโคบอลต์ คือ การใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel 316L ทั้งขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ขณะที่สารละลายที่ใช้ คือ โคบอลต์ซัลเฟต (CoSO_4) ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5-6 โดยมีค่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ 5,000-10,000 ppm นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรดสามารถทำให้ปริมาณการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นและมีลักษณะของการเกาะที่สม่ำเสมอขึ้น

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรม พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งนั้นแตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะมีค่าที่ต้องการและลักษณะของสารละลายที่นำมาใช้ซึ่งมีความแตกต่างกันตามชนิดของแบตเตอรี่ที่ต้องการรีไซเคิล นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับโลหะโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยไม่เน้นด้านการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์โดยละเอียด โดยเฉพาะพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างทางวิชาการสำหรับการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาระบบเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้การศึกษาหาเงื่อนไขของการนำกลับโคบอลต์ที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้นำเสนอวิธีการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยไฟฟ้าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ 1) การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ และ 2) การศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้การทำงานของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

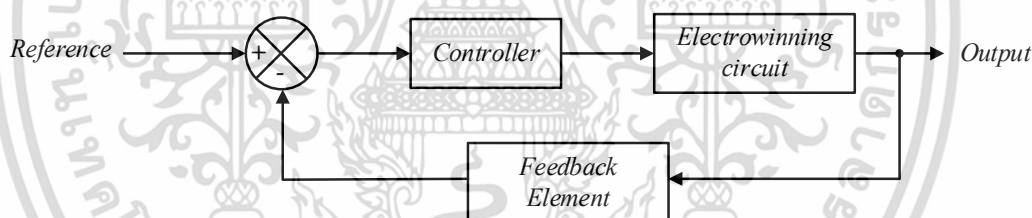
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง นับว่าเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่งที่สำคัญ เนื่องจากปริมาณและลักษณะของการจ่ายกระแสไฟฟ้ามีผลกระทบต่อปริมาณการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์โดยตรง ดังนั้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษา ออกแบบ และพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดของการออกแบบ ดังนี้

3.1.1 แนวคิดการออกแบบวงจร

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่งที่ดำเนินงานภายใต้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 100-200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีแนวโน้มที่จะสามารถนำกลับโลหะโคบอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถรองรับและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100-200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยอาศัยการทำงานของ Microcontroller ชนิด Arduino Nano เป็นส่วนควบคุมปริมาณและลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจร เพื่อให้วงจรสามารถทำงานจ่ายกระแสไฟฟ้าได้แบบคงที่ ซึ่งเรียกการทำงานแบบนี้ว่า “วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ” ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

3.1.2 หลักการทำงานของวงจร

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนประกอบหลัก คือ 1) ส่วนของวงจรควบคุม (Control circuit) และ 2) ส่วนของวงจรกำลัง (Power circuit) ดังรูปที่ 3.3 ส่วนของวงจรควบคุมถูกออกแบบให้มีการทำงานแบบวงจรป้อนกลับ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีค่าคงที่ผ่านการทำงานของ Arduino nano ออปแอมป์ และอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง ขณะที่ส่วนของวงจรกำลังจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สำหรับใช้ควบคุมปริมาณของกระแสขาออกให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สูงชีพิตจระกับคาบเวลาในการทำงาน หรือที่เรียกว่า “ดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle)” โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดมีหน้าที่และการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แหล่งจ่ายกำลัง

เพื่อให้วงจรสามารถรองรับและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นจึงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 V_{ac} เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการ

2) วงจรเรียงกระแส

ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีตัวเก็บประจุ (C) ทำหน้าที่ปรับรูปคลื่นแรงดันให้มีความเรียบหรือความเป็นกระแสตรงมากขึ้น ก่อนที่จะนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปจ่ายให้กับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

3) วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันเพื่อให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ ก่อนที่จะนำจ่ายให้กับโหลดสารละลาย (Solution) โดยอุปกรณ์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย ไดโอด (D_{buck}) ตัวเหนี่ยวนำ (L_{buck}) และตัวเก็บประจุ (C_{buck}) ซึ่งจะแสดงการคำนวณค่าใช้งานที่เหมาะสมในส่วนถัดไป

4) ออปแอมป์

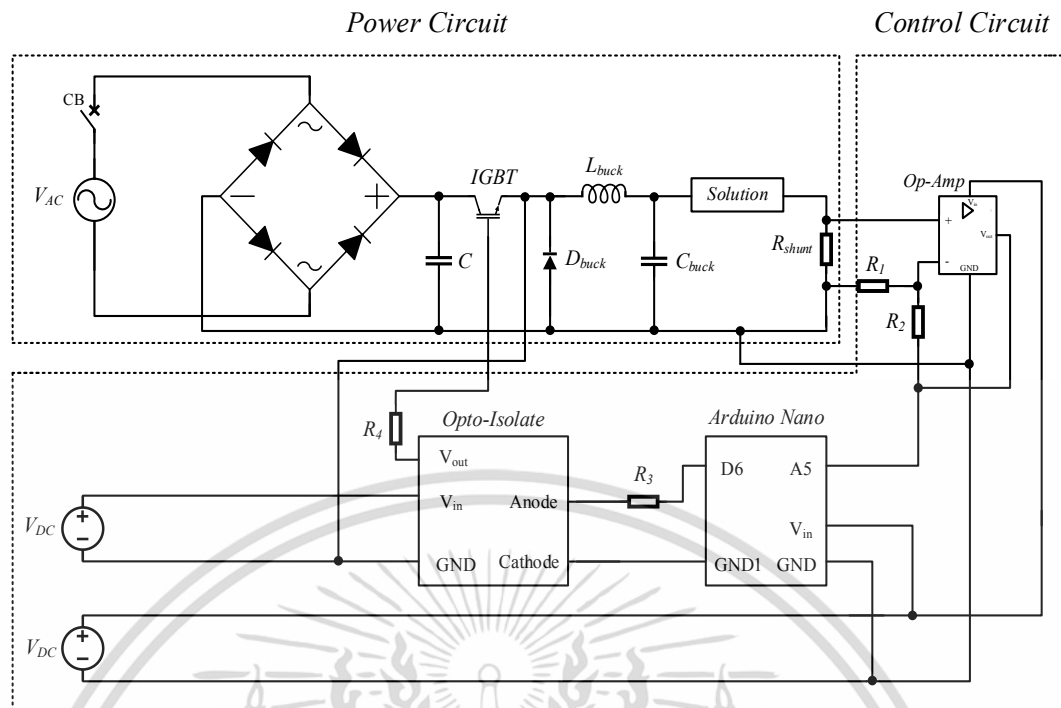
เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีการทำงานแบบป้อนกลับ ดังนั้นจึงเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออปแอมป์ เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันจากตัวต้านทานชั๊นท์ (R_{shunt}) ก่อนนำจ่ายให้กับอุปกรณ์ควบคุม (PWM Controller)

5) อุปกรณ์ควบคุม

เลือกใช้เป็น Arduino Nano เพราะสามารถรับสัญญาณอินพุตได้จากหลายแหล่ง โดยจะประมวลผลออกมาเป็นสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นตัวควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse width) ตามภาระโหลดที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้การโปรแกรมผ่าน Arduino IDE

6) อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง

ทำหน้าที่แยกวงจรไฟฟ้ากำลังและวงจรควบคุมออกจากกันอย่างเด็ดขาด เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างวงจรเนื่องจากการใช้งานของระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้ IC เบอร์ TLP 250 เพราะสามารถจ่ายไฟเลี้ยงได้ถึง 10 – 35 V ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ขับเคลื่อนของ MOSFET หรือ IGBT ได้ดี



รูปที่ 3.3 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.1.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

ในงานวิจัยนี้ ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์จะถูกออกแบบโดยใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 100-200 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นมาตรฐาน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ อิเล็กโทรดที่สัมผัสที่ผิวสัมผัสสารละลายทั้งหมด 0.015 ตารางเมตรต่อแผ่น ซึ่งในแต่ละการทดลองจะใช้ขั้วแอโนดทั้งหมด 2 แผ่น ต่อขั้วแคโทด 1 แผ่น ดังนั้นกระแสใช้งานของวงจรจะมีค่าอยู่ในช่วง 3.3-6 แอมแปร์ โดยสามารถนำมาประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ ดังนี้

1) การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_{buck})

กำหนดให้ ความต้านทานสารละลาย (Solution) = 5 โอห์ม, ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) = 1,000 เฮิร์ตซ์, ดิวตี้ไซเคิล (D) = 50% จากสมการ (2.19) ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้วงจรสามารถทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องได้ จะเท่ากับ

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f_s}$$

$$L_{min} = \frac{(1-0.5) \times 5}{2 \times 1,000}$$

$$L_{min} = 0.00125$$

ดังนั้น ความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ คือ 1.25 มิลลิเฮนรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ (C_{buck})

กำหนดให้ ความเหนี่ยวนำ (L_{buck}) = 1.25 มิลลิเฮนรี่, ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) = 1,000 เฮิร์ตซ์, ดิวตี้ไซเคิล (D) = 50% และแรงดันริบเปิล ($\Delta V_o / V_o$) = 3% จากสมการ (2.22) ค่าตัวเก็บประจุของ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ จะเท่ากับ

$$C = \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C = \frac{1-0.5}{8 \times 0.00125 \times 1000^2 \times 0.03}$$

$$C = 0.001667$$

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ คือ 1,670 ไมโครฟารัด

เนื่องจากในทางปฏิบัติ การสร้างวงจรโดยใช้ความเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ 1.25 มิลลิเฮนรี่ ไม่สามารถทำให้วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ (3.3-6 แอมแปร์) ดังนั้นจึงมีการ เพิ่มขนาดความเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เป็น 321 มิลลิเฮนรี่ เพื่อให้วงจรสามารถจ่าย กระแสไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ เช่นเดียวกับค่าความจุไฟฟ้าของวงจร ซึ่งถูกปรับให้มีขนาดเพิ่ม ขึ้นเป็น 5,500 ไมโครฟารัด เพื่อให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรมีความเรียบและเป็นกระแสตรงมาก ยิ่งขึ้น ดังนั้นจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ จึงสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ โดยรวมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (รูปที่ 3.3) ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจร	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
วงจรกำลัง	ความต้านทานชั้นท์ [R_{shunt}]	0.1	Ω
วงจรขยายสัญญาณ	ความต้านทาน [R_1]	100	Ω
	ความต้านทาน [R_2]	1	k Ω
วงจรควบคุม	ความต้านทาน [R_3]	3.3	k Ω
	ความต้านทาน [R_4]	10	k Ω
วงจรเรียงกระแส	ตัวเก็บประจุ [C]	470	μF
วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	ตัวเก็บประจุ [C_{buck}]	5,500	μF
	ตัวเหนี่ยวนำ [L_{buck}]	321	mH

3.2 การนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

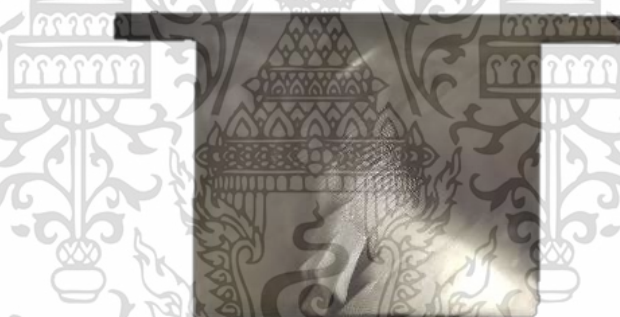
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองสำหรับนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ การกำหนดอุปกรณ์และสารเคมี การออกแบบแผนการทดลอง และการส่งตรวจวิเคราะห์ผล โดยมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ การนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งจะถูกออกแบบดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 แผ่น แบ่งออกเป็นขั้วแอโนด 2 แผ่น และขั้วแคโทด 1 แผ่น จุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีส่วนประกอบของโคบอลต์ไอออน โดยการเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) ขั้วอิเล็กโทรด

ขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละการทดลองจะเป็นวัสดุชนิด stainless steel 316L เนื่องจากมีความทนทานต่อสารละลายกรด และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละแผ่นจะถูกออกแบบให้มีขนาดกว้าง 110 มิลลิเมตร ยาว 185 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะของรูปทรงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้วอิเล็กโทรดชนิด stainless steel 316L

2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายโคบอลต์ซัลเฟต (Co(II)SO_4) ซึ่งมีโคบอลต์ไอออนเป็นองค์ประกอบจะถูกนำมาใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ณ ความเข้มข้นต่างๆ โดยทางผู้จัดทำจะขอยกตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมสารละลายโคบอลต์ซัลเฟต (Co(II)SO_4) ณ ความเข้มข้น 5,000 ppm ดังนี้

- $\text{Co(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ มีน้ำหนักโมเลกุล (MW) เท่ากับ 281.10 g/mol
- ต้องการสารละลายโคบอลต์ ณ ความเข้มข้น 5,000 ppm หมายความว่า ในน้ำ 1,000 mL มี Co 5,000 mg ดังนั้นในการเตรียม Co 5,000 mg/L ปริมาตร 1,000 mL ต้องใช้ Co 5,000 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จาก $\text{Co(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 281.10 g แยกตัวให้ Co 58.93 g เมื่อแปลงหน่วยของ Co จาก g เป็น mg จะได้ Co 58.93×10^3 mg ซึ่งจะต้องใช้ $\text{Co(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 281.10 \times 10^3$ mg
- ถ้า Co 5,000 mg จะต้องใช้ $\text{Co(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = (281.10 \times 10^3 / 58.93 \times 10^3) \times 5,000$ mg = 23,850 mg = 23.85 g ดังนั้นต้องใช้ $\text{Co(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ หนัก 23.85 g ผสมกับน้ำกลั่นให้ละลายจนหมด
- ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้เท่ากับ 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น

3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 mol/dm^3 ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้สอดคล้องตามเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ดังนี้

- ต้องการโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 mol/dm^3 หมายความว่า ในสารละลาย $1,000 \text{ cm}^3$ มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อยู่ 2 mol ดังนั้นในการเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 cm^3 จะมีเนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ อยู่ 8 g
- ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 100 mL ด้วยน้ำกลั่น

3.2.2 แผนการดำเนินงาน

เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของกลุ่มพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับ ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย โดยในแต่ละการทดลองมีแผนการดำเนินงาน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แผนการดำเนินงาน

No.	Factors	Condition					
		Concentration (ppm)	Current density (A/m^2)	Temperature (celsius)	Time (minute)	pH	Distance (mm.)
1.	Concentration	5,000	110	45	120	4	12.5
		10,000	110	45	120	4	12.5
2.	Current density	5,000	110	45	90	4	12.5
		5,000	150	45	90	4	12.5
		5,000	200	45	90	4	12.5
3.	Temperature	5,000	110	room	120	4	12.5
		5,000	110	45	120	4	12.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 5,000 ซึ่งงานเพื่อการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ใน 60 นาที ให้เห็น 120 ใช้ประจุ 4 ชม. ค่า 12.5 ราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

No.	Factors	Condition					
		Concentration (ppm)	Current density (A/m ²)	Temperature (celsius)	Time (minute)	pH	Distance (mm.)
4.	Time	5,000	110	45	60	4	12.5
		5,000	110	45	100	4	12.5
		5,000	110	45	120	4	12.5
		5,000	110	45	180	4	12.5
5.	pH	5,000	110	45	100	3	12.5
		5,000	110	45	100	4	12.5
		5,000	110	45	100	5	12.5

หมายเหตุ: Distance คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด (มิลลิเมตร) **

3.2.3 การวิเคราะห์ผล

ภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปของตะกอน ซึ่งพบได้ทั้งบริเวณขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และก้นภาชนะ โดยจำนวนตะกอนดังกล่าวจะถูกส่งตรวจเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma (ICP) ประกอบกับการหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) เพื่อบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อจำนวนตะกอนที่ได้ (Power consumption) ซึ่งมีการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) การหาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับด้วยเทคนิค ICP (Co recovery)

เนื่องจากตะกอนที่ได้ภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งอาจมีการปนเปื้อนจากธาตุและโลหะหนักชนิดอื่นซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกส่งตรวจตะกอนด้วยเทคนิค ICP เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของตะกอนโคบอลต์ที่ได้จากตะกอนทั้งหมดโดยตรง โดยสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับด้วยวิธีการดังกล่าว ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{icp} = \frac{N_{cd}}{N_{ci}} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ η_{icp} = ประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโคบอลต์ด้วยเทคนิค ICP (%)

N_{cd} = ปริมาณตะกอนโคบอลต์ภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (g)

N_{ci} = ปริมาณตะกอนโคบอลต์ตั้งต้นก่อนกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (g)

2) การหาประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนมากนำเสนอประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับผ่านการคำนวณประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับตะกอนทั้งหมด อย่างไรก็ตามการหาประสิทธิภาพด้วยวิธีดังกล่าวไม่สามารถบอกได้ถึงปริมาณของตะกอนโคบอลต์ที่นำกลับได้จริง เนื่องจากใช้จำนวนตะกอนทั้งหมดซึ่งถูกอนุมานว่าเป็นตะกอนโคบอลต์ที่ได้ภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมาคำนวณ ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนจากธาตุและโลหะชนิดอื่นที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ โดยประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2) [7]

$$\eta_c = \frac{90.969V}{P} \quad (3.2)$$

เมื่อ η_c = ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (%)
 V = แรงดันไฟฟ้าใช้งานเฉลี่ย (V)
 P = กำลังไฟฟ้าใช้งานจำเพาะ (kWh/kg of Co)

3) การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ภายหลังการส่งตรวจและวิเคราะห์ผล ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาเสนอผ่านการจัดทำผังการไหลของวัสดุ ซึ่งจะแสดงถึงเส้นทางการไหลเข้า-ออกของโลหะมีค่าที่เกิดขึ้นก่อนและหลังกระบวนการ ตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัด ภายใต้แนวคิดขยะเหลือศูนย์ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจและเห็นภาพรวมของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองตามแผนงานที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถแบ่งการรายงานผลและวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ผลการทดลองของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่ง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับ และการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

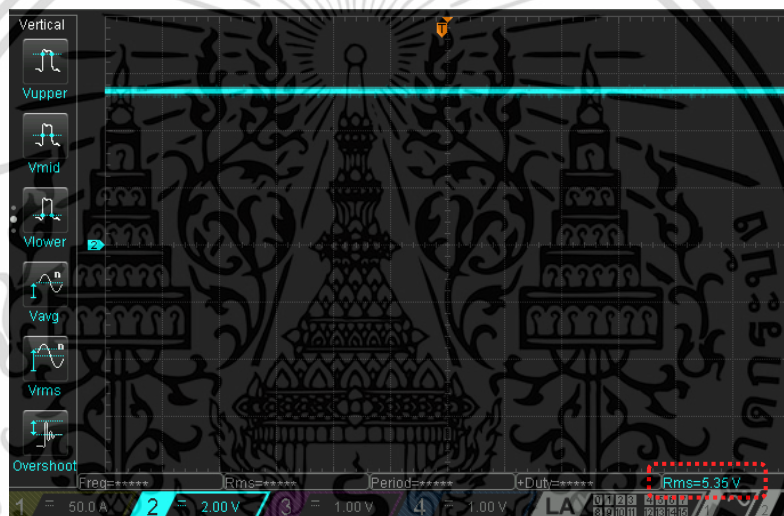
ภายหลังการสร้างและพัฒนา เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการทำงานด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดสารละลายที่มีลักษณะและคุณสมบัติเหมือนกับสารละลายที่ใช้ในกระบวนการนำกลับจริง ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.1.1 การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m²

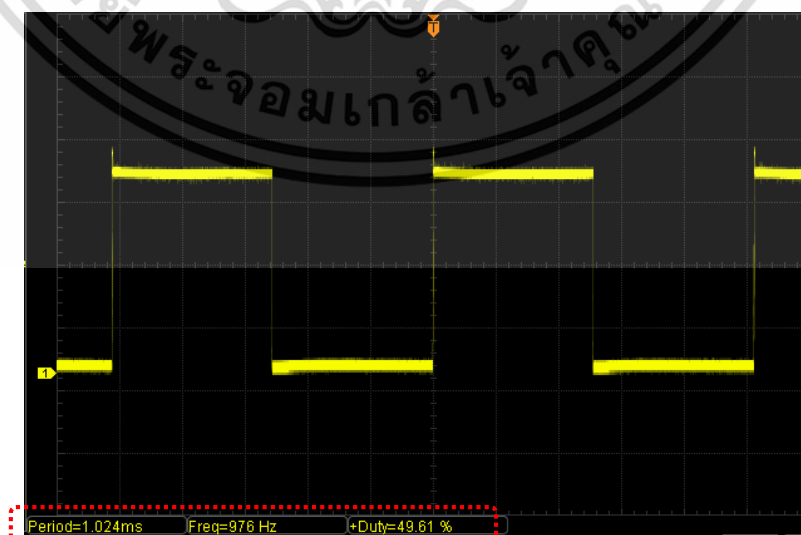
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ อิเล็กโทรดที่สัมผัสผิวสัมผัสสารละลายทั้งหมด 0.015 ตารางเมตรต่อแผ่น ซึ่งในแต่ละการทดลองจะใช้ขั้วแอโนดทั้งหมด 2 แผ่น ต่อขั้วแคโทด 1 แผ่น ดังนั้นกระแสใช้งานของวงจรจะมีค่าเท่ากับ $110 \times 0.015 \times 2 = 3.3$ แอมแปร์ ในการดำเนินงาน เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกนำมาใช้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่ง โดยมีแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าวงจรประมาณ 15 V_{ac} ซึ่งจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ โดยใช้การปรับค่าดิโอด์ไซเคิลจากการทำงานของวงจรควบคุมเป็นหลัก ผลการทดสอบพบว่า เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดสารละลายได้อย่างคงที่ประมาณ 3.3 แอมแปร์ตลอดช่วงการทดลอง โดยมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นประมาณ 5.35 โวลต์ ขณะที่มีความถี่ไซเคิลอยู่ที่ร้อยละ 49.61 ดังรูปที่ 4.1-รูปที่ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็นเส้นตรง สะท้อนให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ณ เงื่อนไขความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m²



รูปที่ 4.1 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2



รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2



รูปที่ 4.3 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 A/m^2

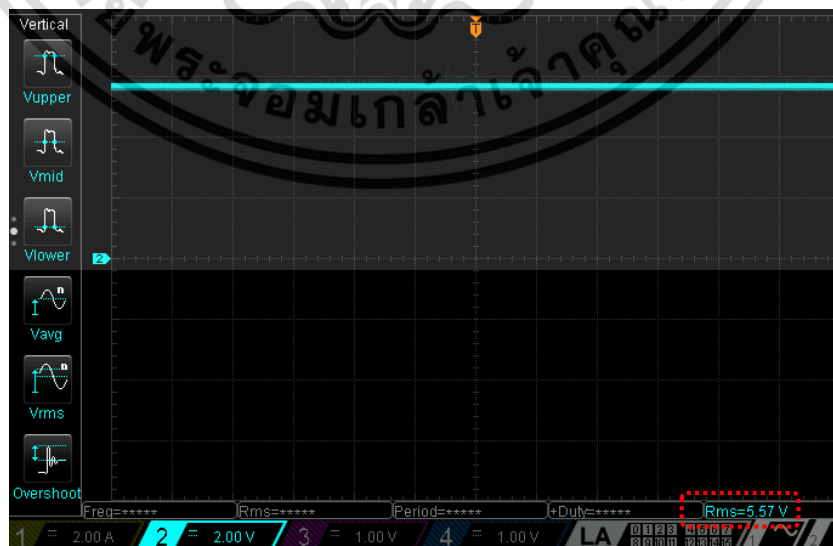
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m²

เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสสารละลายของอิเล็กโทรดที่ใช้มีค่าเท่ากัน (0.015 ตารางเมตรต่อแผ่น) ดังนั้นกระแสใช้งานของวงจรจะมีค่าเท่ากับ $150 \times 0.015 \times 2 = 4.5$ แอมแปร์ จากการดำเนินงานแบบเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโพลดสารละลายได้อย่างคงที่ประมาณ 4.5 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีลักษณะของสัญญาณรูปคลื่นกระแสที่ค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นประมาณ 5.57 โวลต์ และมีค่าตัวชี้ไขเคลอยู่ที่ร้อยละ 60.55 ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าช่วงของแรงดันไฟฟ้าใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวงจรควบคุมมีการปรับค่าตัวชี้ไขเคลให้เพิ่มขึ้น สอดคล้องตามความต้องการใช้งานกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

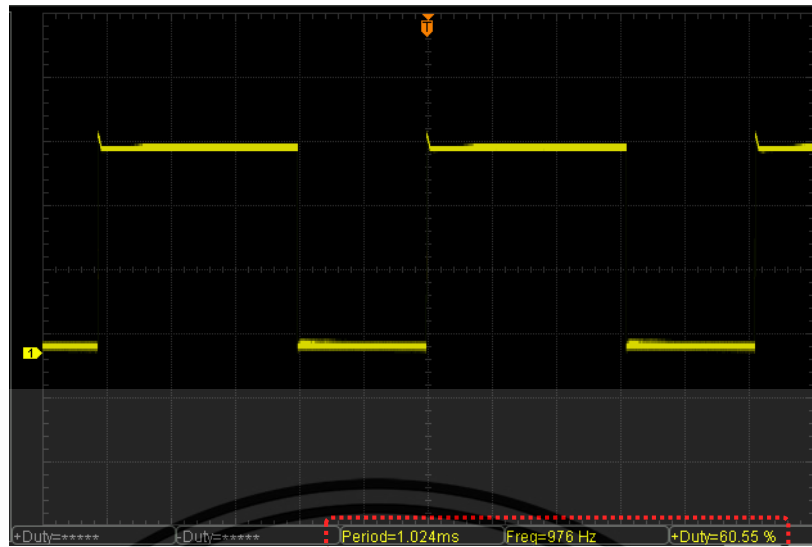


รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m²



รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยผู้ดูแลระบบขอสงวนสิทธิ์ในการคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m^2

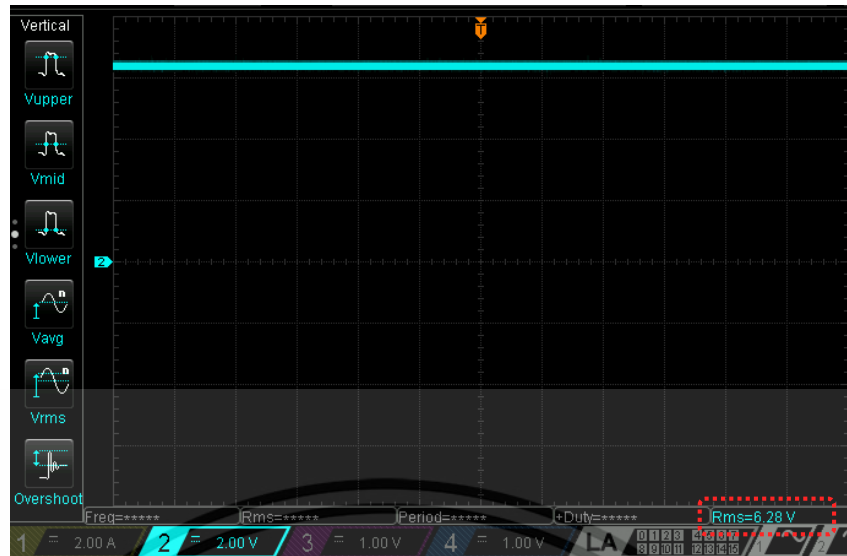
4.1.3 การทำงานของวงจร ณ สภาวะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m^2

เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสสารละลายของอิเล็กโทรดที่ใช้มีค่าเท่ากัน (0.015 ตารางเมตรต่อแผ่น) ดังนั้นกระแสใช้งานของวงจรจะมีค่าเท่ากับ $200 \times 0.015 \times 2 = 6$ แอมแปร์ จากรูปที่ 4.7 เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโพลิตสารละลายได้อย่างคงที่ 6 แอมแปร์ โดยมีลักษณะของสัญญาณรูปคลื่นกระแสที่เรียบเป็นกระแสตรง มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นประมาณ 6.28 โวลต์ และมีค่าดิวตี้ไซเคิลอยู่ที่ร้อยละ 73.44 ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m²



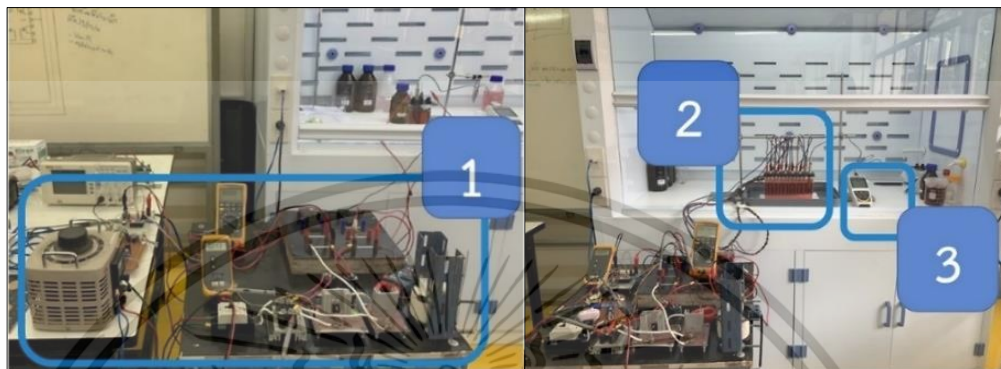
รูปที่ 4.9 ดิวตี้ไซเคิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 A/m²

4.1.4 บทวิเคราะห์

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบสารละลายได้อย่างเสถียรและมีประสิทธิภาพ ภายใต้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าครอบคลุมตั้งแต่ 110-200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (3.3-6 แอมแปร์) โดยวงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบสามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรให้มีค่าคงที่ตามกำหนดผ่านการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลอย่างอัตโนมัติ เพื่อปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้สอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายให้กับโพลิตาร์ละลาย นอกจากนี้สัญญาณของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรค่อนข้างมีความเรียบและเป็นกระแสตรง ดังนั้นจึงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากกระบวนการทดสอบวงจร เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกนำไปใช้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ณ เจ็อนไซต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถนำกลับโลหะโคบอลต์ออกจากสารละลายได้มากที่สุด จากรูปที่ 4.10 กระบวนการทดลองจะประกอบด้วย 1) เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 2) โหลดสารละลาย และ 3) เครื่องมือวัด



รูปที่ 4.10 การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรผ่านกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

4.2 ผลการทดลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

จากการดำเนินงานตามแผนการทดลอง (ตารางที่ 3.2) พารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งมีผลการทดลองที่แตกต่างกัน ดังนี้

4.2.1 ผลกระทบจากความเข้มข้นสารละลาย

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ระยะเวลาในการทดลอง 2 ชั่วโมง, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

1) ลักษณะของตะกอน

ในการดำเนินงาน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น 10,000 ppm และ 5,000 ppm ถูกนำมาใช้ในกระบวนการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลการทดลองพบว่า การใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นของสารละลาย 10,000 ppm จะทำให้ได้ตะกอนสีเขียวที่มีลักษณะหนาและทึบกว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้น 5,000 ppm ซึ่งมีลักษณะของเม็ดตะกอนที่ละเอียดและสว่างมากกว่า ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งส่งผลให้การใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ณ ความเข้มข้น 5,000 ppm สามารถนำกลับตะกอนได้มากกว่า

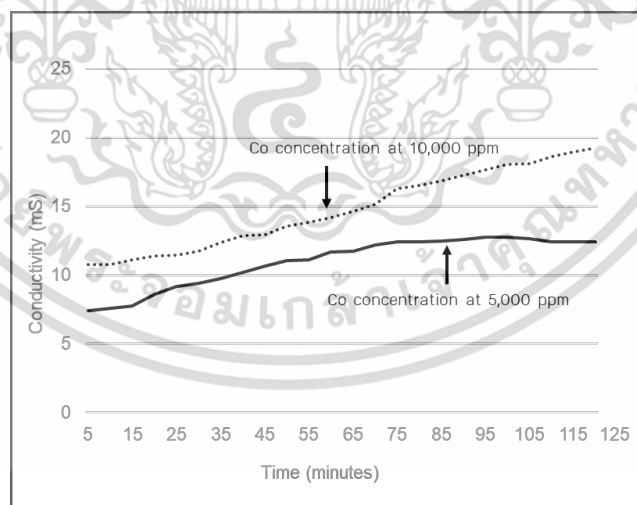
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน

2) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย (Conductivity)

จากรูปที่ 4.12 พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในแต่ละการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 10,000 ppm ซึ่งมีค่าความนำไฟฟ้าเริ่มต้นมากกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้าดังกล่าวบ่งบอกถึงปริมาณการแตกตัวของโคบอลต์ไอออนในสารละลายที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยจะฟอร์มตัวไปอยู่ในรูปของตะกอนโคบอลต์ (ของแข็ง) เมื่อได้รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด ซึ่งสอดคล้องตามหลักการพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงของสารในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

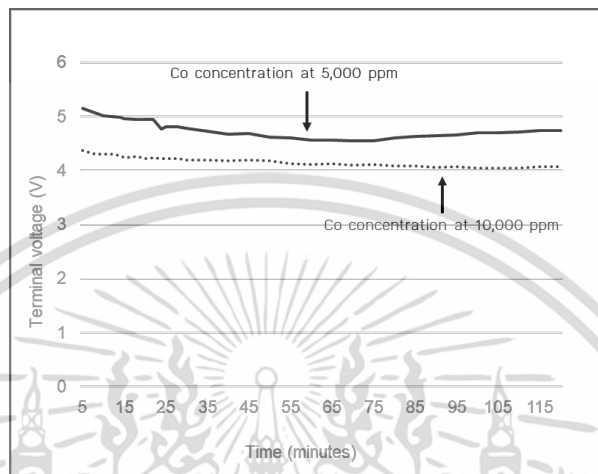


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความเข้มข้นต่างกัน

3) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

จากรูปที่ 4.13 พบว่า การทดลองที่ใช้สารละลายความเข้มข้นมากกว่าจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่ำกว่า กล่าวคือ ต้องการใช้พลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาเคมีน้อยกว่า โดยในระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

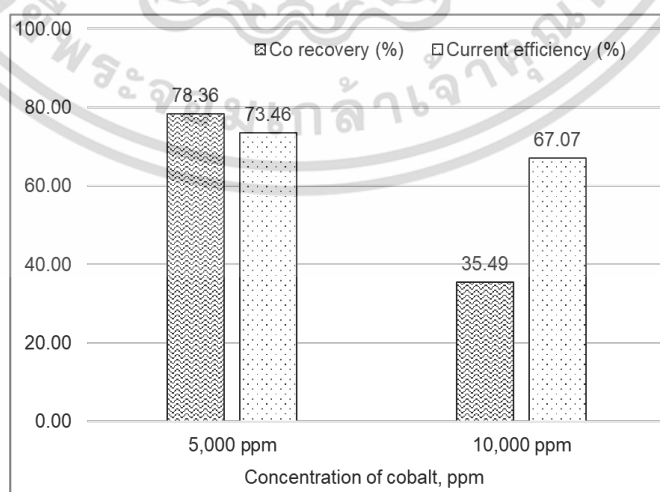
กระบวนการพบว่า แรงดันไฟฟ้าใช้งานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากในสารละลายเกิดการแตกตัวของโคบอลต์ไอออนมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของโคบอลต์ในสารละลายส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการนำกลับ เนื่องจากหากในสารละลายมีโคบอลต์ไอออนจำนวนมาก ย่อมส่งผลให้ใช้เวลาในกระบวนการนำกลับมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความเข้มข้นต่างกัน

4) ประสิทธิภาพการนำกลับ

จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่ใช้สารละลายความเข้มข้น 5,000 ppm สามารถนำกลับตะกอนโคบอลต์ได้มากกว่า โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับร้อยละ 78.36 และมีประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 73.46 ซึ่งมากกว่าเงื่อนไขของการใช้สารละลายความเข้มข้น 10,000 ppm ทั้งคู่ ดังรูปที่ 4.14 ดังนั้น สารละลายความเข้มข้น 5,000 ppm จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกนำไปทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์

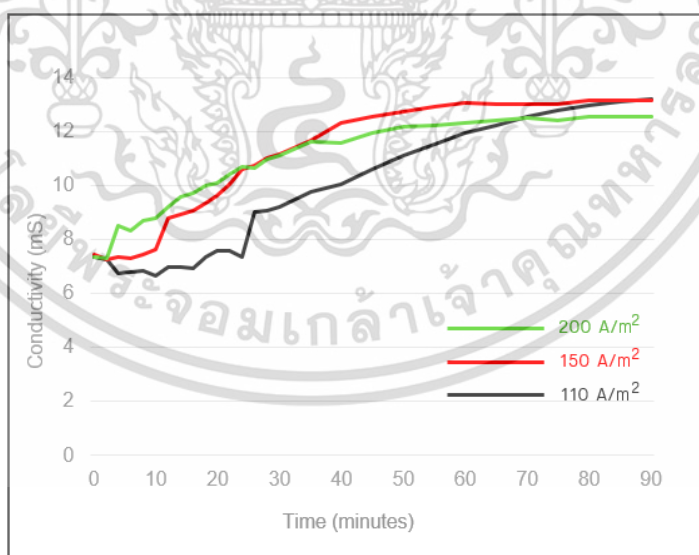
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ระยะเวลาในการทดลอง 90 นาที, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

1) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผลการทดลองพบว่า ในช่วงต้นกระบวนการ ความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และจะมีค่าความนำไฟฟ้าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที ดังรูปที่ 4.15 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ กระบวนการที่ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไวกว่ากระบวนการที่ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมากกว่า เนื่องจากในสารละลายเกิดการแตกตัวของไอออนอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับอัตราการแตกตัวของไอออนที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใช้งานต่ำกว่า

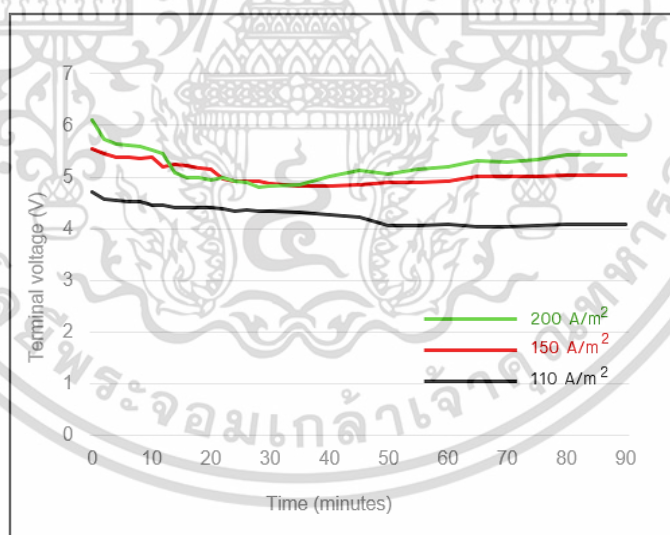


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

จากรูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าใช้งานของกรณีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีแนวโน้มลดลงในช่วง 30 นาทีแรกของการกระบวนการ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น ซึ่งสามารถตีความได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเป็นผลมาจากความต้านทาน (สารละลาย) ที่ลดลง เพื่อที่จะคงค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ เนื่องจากความนำไฟฟ้า หรือ จำนวนไอออนในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามกฎของโอห์ม ($V=IR$) ในทางตรงกันข้าม ในช่วงหลังของการกระบวนการ (หลังจากเวลา 30 นาที) พบว่า แรงดันไฟฟ้ากลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโคบอลต์ไอออนในสารละลายมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากการกระบวนการเปลี่ยนรูปของไอออนเป็นตะกอนโลหะบนขั้วแคโทด ดังนั้นจึงทำให้สารละลายมีความนำไฟฟ้าลดลง (ความต้านทานเพิ่มขึ้น) ในทำนองเดียวกัน การทดลอง ณ เงื่อนไขความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตรก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงการของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่เวลาของการเริ่มเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งพบว่า การทดลอง ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เริ่มเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่เวลาประมาณ 35 นาที ขณะที่การทดลอง ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตรกลับเริ่มเกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่เวลาประมาณ 50 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ช้ากว่า ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อความนำไฟฟ้าของสารละลายข้างต้น



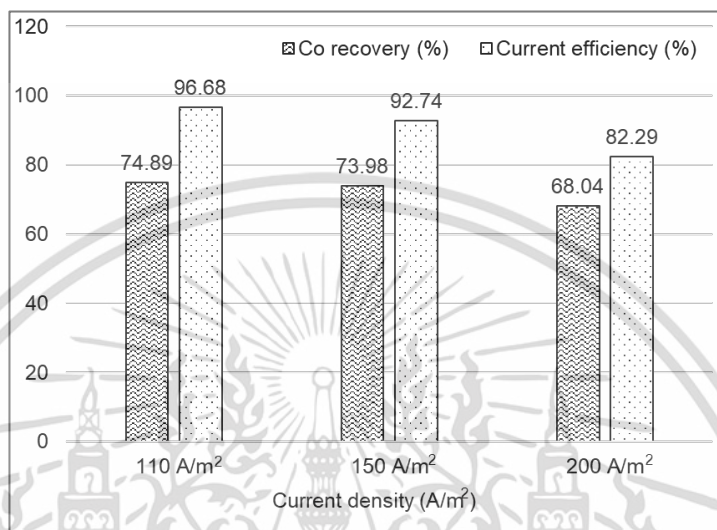
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน

3) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ผลการทดลองพบว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่น 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตรให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ ร้อยละ 74.89 และร้อยละ 96.68 ตามลำดับ ขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ให้กับกระบวนการกลับมีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าลดลง ดังรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.17 เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นอาจไปกระตุ้นให้กระบวนการเกิดการผลิไอน้ำระหว่างปฏิกิริยา ซึ่งจะไปยังยังปฏิกิริยาการตกตะกอนของโลหะโคบอลต์ [7] นอกจากนี้จะเห็นว่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งสื่อให้เห็นว่า นอกเหนือจากโลหะโคบอลต์ อาจมีการปนเปื้อนจากธาตุหรือโลหะชนิดซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนำกลับเกิดขึ้น



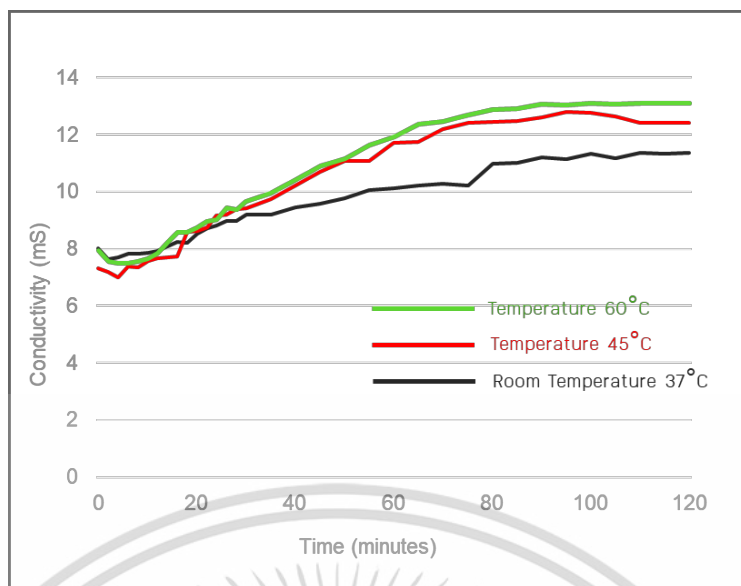
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์ ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่างกัน

4.2.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิ

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ระยะเวลาในการทดลอง 2 ชั่วโมง, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

1) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

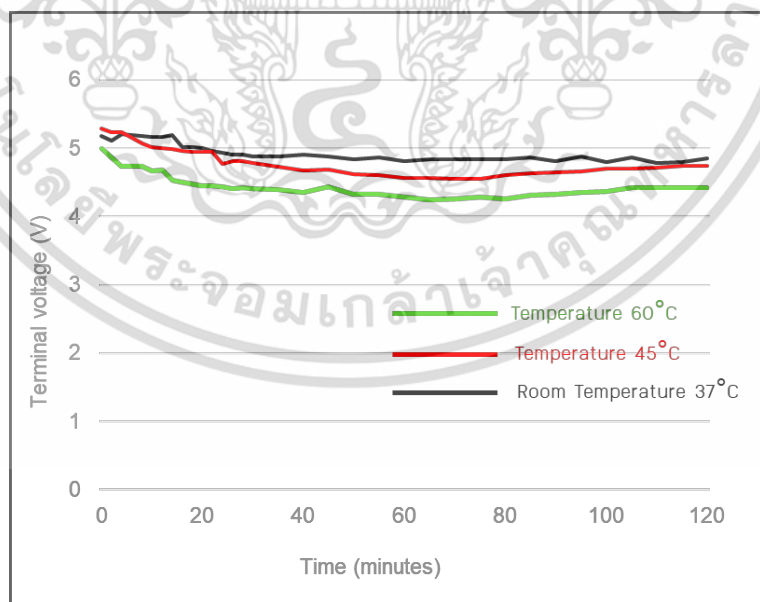
จากผลการทดลองพบว่า ความนำไฟฟ้าของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 70-80 นาทีแรกของกระบวนการ และเริ่มมีค่าคงที่ในเวลา 100 นาทีหลังจากนั้น โดยการทดลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้ามากกว่าการทดลองที่สารละลายมีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ 37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การควบคุมอุณหภูมิของสารละลายมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการแตกตัวของไอออนมากกว่าสารละลายที่มีอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

2) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

จากรูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าใช้งานมีแนวโน้มลดลง โดยในการทดลองกรณีที่สารละลายถูกควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่ำกว่าการทดลองที่สารละลายถูกควบคุมอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ 37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการนำกลับโคบอลต์โดยใช้สารละลายที่มีอุณหภูมิสูง จะใช้พลังงานในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้สารละลายอุณหภูมิต่ำ

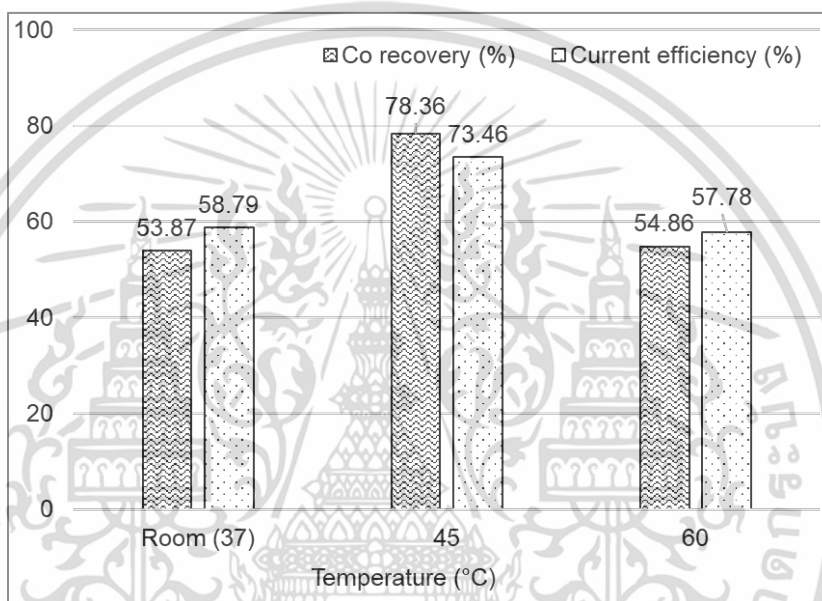


รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ผลการทดลองพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ 45 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ ร้อยละ 78.36 และร้อยละ 73.46 ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองที่สารละลายถูกควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และในกรณีที่สารละลายไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ กลับมีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นพารามิเตอร์อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จึงถูกนำไปใช้ในการทดลองครั้งถัดไป เพื่อหาเงื่อนไขของการนำกลับโคบอลต์ที่เหมาะสมที่สุด



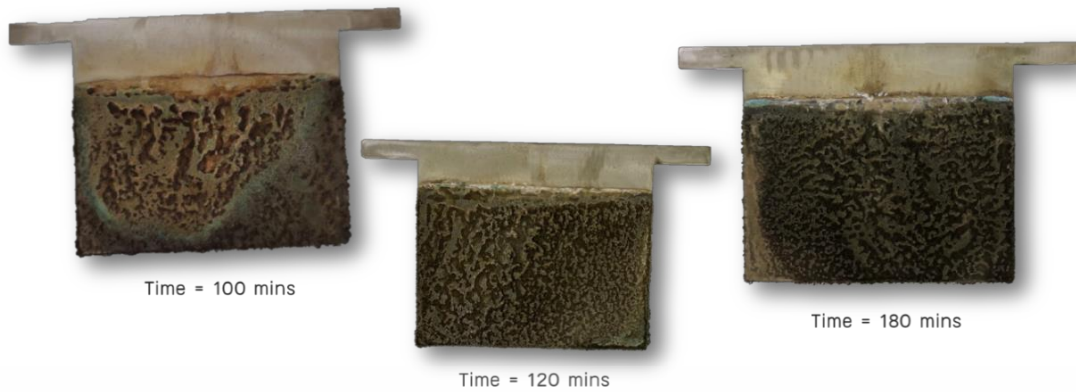
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์ ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

4.2.4 ผลกระทบจากเวลา

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

1) ลักษณะของตะกอน

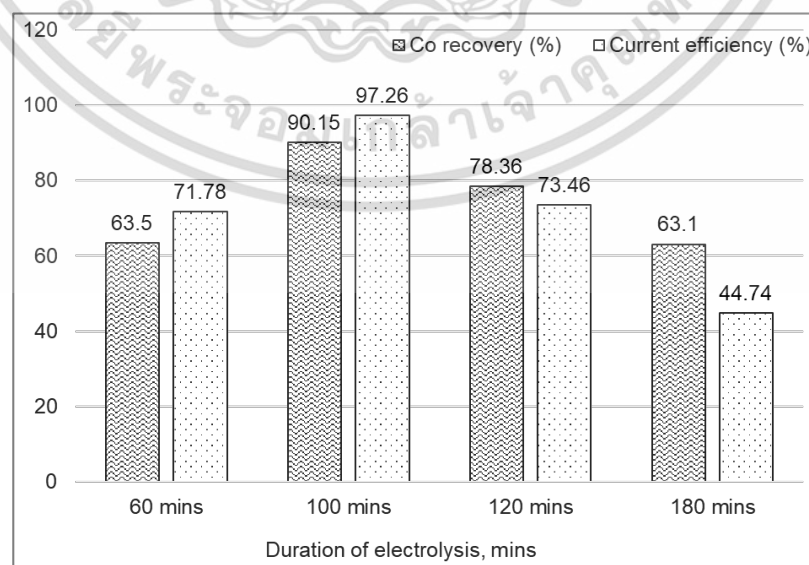
การทดลองที่ใช้เวลาทำอิเล็กโทรวินนิ่ง 100 นาที สามารถนำกลับตะกอนได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้เวลา 120 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ โดยตะกอนที่ได้มีสีดำค่อนข้างเขียว และมีลักษณะการเกาะเป็นชั้นสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ เวลาการทดลองต่างกัน

2) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ในกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ทำอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยศึกษาที่เวลาการทดลอง 60 นาที 100 นาที 120 นาที และ 180 นาที ขณะที่เงื่อนไขการทดลองอื่นเหมือนกัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้เวลาทำอิเล็กโทรวินนิ่ง 100 นาที มีค่าประสิทธิภาพนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ ร้อยละ 90.15 และร้อยละ 97.26 รองลงมาคือ การทดลองที่ใช้เวลา 120 นาที โดยมีค่าประสิทธิภาพนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 78.36 และร้อยละ 73.46 ตามลำดับ ขณะที่การทดลองที่ใช้เวลา 60 นาที และ 180 นาที กลับมีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 63.5 และร้อยละ 63.1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 การลดลงของประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง (ตั้งแต่ 100 นาทีขึ้นไป) อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งจะทำให้ตะกอนโคบอลต์ที่ได้ละลายกลับไปในสารละลายดั้งเดิม ดังนั้น การทำอิเล็กโทรวินนิ่งโดยใช้เวลาประมาณ 100 นาที จึงถือว่าเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลกระทบจากความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 100 นาที, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

1) ลักษณะของตะกอน

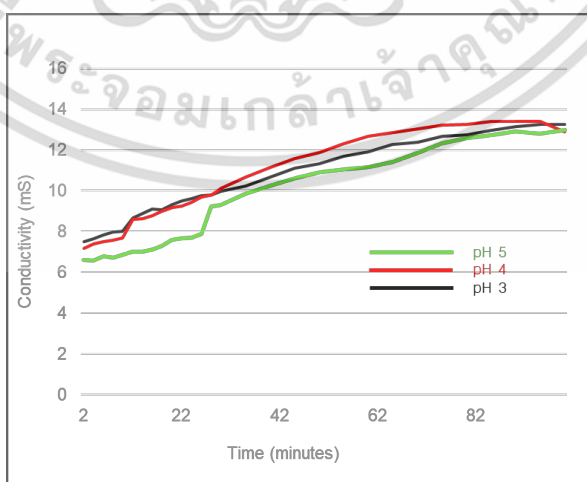
ผลการทดลองพบว่า การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ให้เท่ากับ 4 ตลอดการทดลองสามารถนำกลับตะกอนได้ปริมาณมากกว่า และมีลักษณะการเกาะของตะกอนที่เป็นชั้นหนากว่าการทดลองที่ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 5 ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

2) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากผลการทดลองพบว่า ความนำไฟฟ้าของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายถูกควบคุมให้เท่ากับ 4 มีการเพิ่มขึ้นของความนำไฟฟ้าของสารละลายสูงกว่ากรณีอื่น ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโคบอลต์ไอออนในสารละลายแตกตัวได้ดีที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างนี้ (pH = 4)

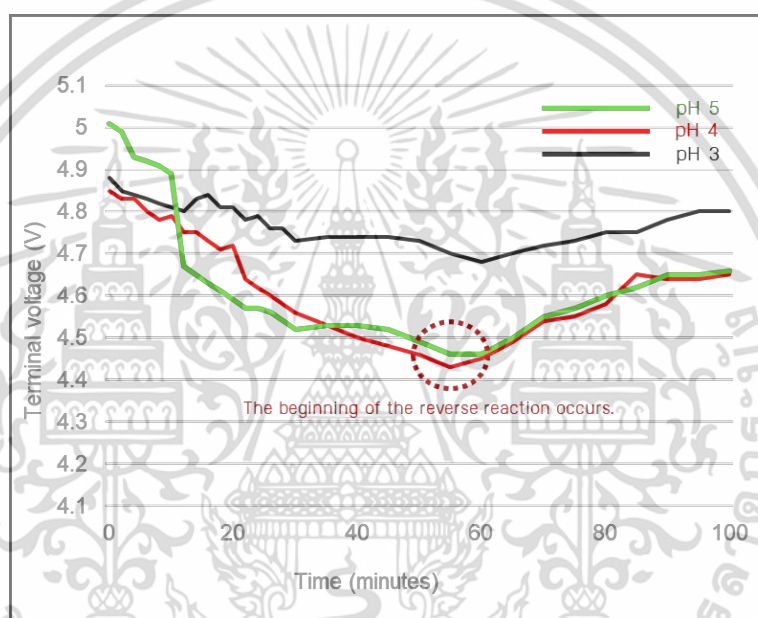


รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

จากรูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าใช้งานมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาประมาณ 60 นาทีแรกของการทดลอง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น สอดคล้องไปตามเหตุผลซึ่งได้อธิบายไปแล้วเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์ก่อนหน้า นอกจากนี้จากผลการศึกษายังมีการคาดการณ์ว่าจุดต่ำสุดของแรงดันไฟฟ้าใช้งานอาจเป็นจุดที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในลักษณะที่ตรงข้ามจากเดิม โดยการทดลอง ณ เงื่อนไขที่ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3 (กรด) มีความต้องการใช้พลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาก่อนข้างมากเมื่อเทียบกับเงื่อนไขความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 และ 5 ซึ่งมีความต้องการใช้พลังงานต่ำกว่าและอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน



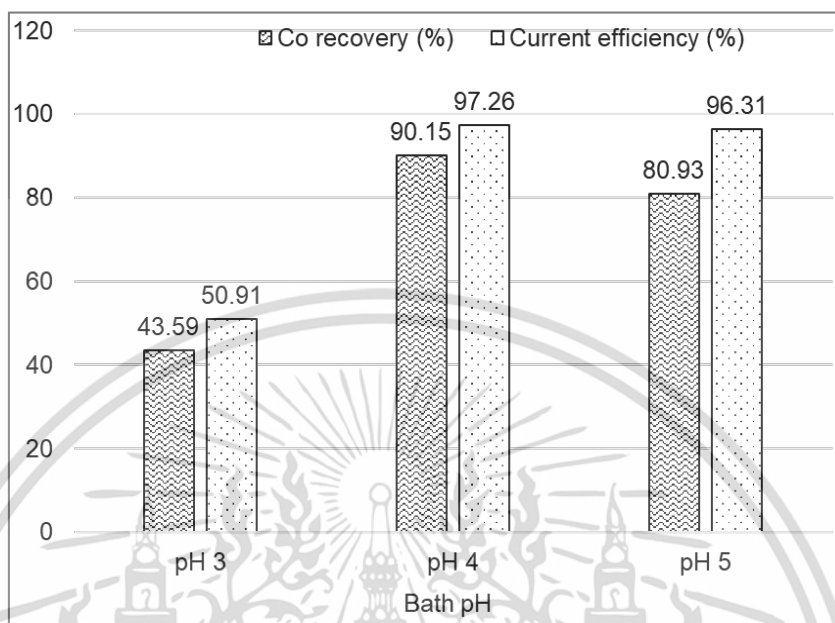
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

4) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยศึกษาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3, 4 และ 5 ขณะที่เงื่อนไขการทดลองอื่นเหมือนกัน ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เท่ากับ 4 ตลอดทั้งกระบวนการ มีค่าประสิทธิภาพนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ ร้อยละ 90.15 และร้อยละ 97.26 ตามลำดับ รองลงมาคือ การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เท่ากับ 5 โดยมีค่าประสิทธิภาพนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 80.93 และร้อยละ 96.31 ตามลำดับ ในขณะที่เงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพการนำกลับต่ำสุดคือ การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เท่ากับ 3 โดยมีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำกว่าร้อยละ 50 ขณะที่มียุทธศาสตร์กระแสอยู่ที่ร้อยละ 50.91 ดังรูปที่ 4.26 ดังนั้นจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการนำกลับโลหะโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งเหมาะที่จะทำในสภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4-5 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับจะลดลงเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ($\text{pH} = 1-3$)



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับโลหะโคบอลต์ ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

4.3 ประสิทธิภาพของการนำกลับ

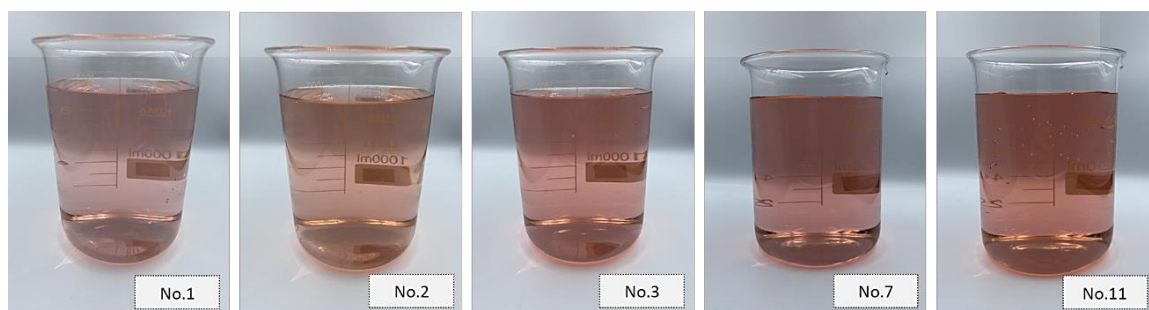
ประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ (Co recovery) และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 100 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 90.15 และ 97.26 ตามลำดับ ขณะที่เงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับต่ำที่สุด คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 10,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์และประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าเพียงร้อยละ 35.49 และ 67.07 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง

No	Condition					Efficiency (%)	
	Concentration (ppm)	Current density (A/m ²)	Temperature (celsius)	Time (minute)	pH	Co recovery	Current efficiency
1.	5,000	110	45	100	4	90.15	97.26
2.	5,000	110	45	100	5	80.93	96.31
3.	5,000	110	45	120	4	78.36	73.46
4.	5,000	110	45	90	4	74.89	96.68
5.	5,000	150	45	90	4	73.98	92.74
6.	5,000	200	45	90	4	68.04	82.29
7.	5,000	110	45	60	4	63.5	71.78
8.	5,000	110	45	180	4	63.1	44.74
9.	5,000	110	60	120	4	54.86	57.78
10.	5,000	110	room	120	4	53.87	58.79
11.	5,000	110	45	100	3	43.59	50.91
12.	10,000	110	45	120	4	35.49	67.07

อ้างอิงจากรูปที่ 4.1 ตัวอย่างสารละลายที่ได้ภายหลังกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไข หมายเลข 1 หมายเลข 2 หมายเลข 3 หมายเลข 7 และหมายเลข 11 ถูกแสดงดังรูปที่ 4.27 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าสีของสารละลายหมายเลข 1 มีลักษณะเป็นสีชมพูอ่อนและใส เนื่องจากสามารถนำกลับโคบอลต์ออกจากสารละลายได้มากที่สุด (ร้อยละ 90.15) รองลงมาคือสารละลายหมายเลข 2 ซึ่งมีลักษณะสีชมพูกึ่งส้มอ่อน โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์อยู่ที่ร้อยละ 80.93 ในขณะที่สารละลายหมายเลข 3 และหมายเลข 7 เริ่มมีสีแดงเข้มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์อยู่ที่ร้อยละ 78.36 และร้อยละ 63.5 ตามลำดับ สุดท้ายคือสารละลายหมายเลข 11 ที่มีลักษณะสีแดงเข้มที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในสารละลายยังประกอบด้วยไอออนของโคบอลต์อยู่เป็นจำนวนมาก จะเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพของการนำกลับโคบอลต์ที่มีค่าต่ำเพียงร้อยละ 43.59 เท่านั้น ดังนั้นสีของสารละลายที่ได้ภายหลังกระบวนการจึงสามารถช่วยคาดการณ์ได้ว่าการทดลองครั้งนั้นสามารถนำกลับโคบอลต์ได้มากหรือน้อยเพียงใด



รูปที่ 4.27 ตัวอย่างสารละลายภายหลังกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency)

จากตารางที่ 4.2 ค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง (อ้างอิงลำดับจากตารางที่ 4.1) จะถูกคำนวณจากพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย 1) แรงดันไฟฟ้าใช้งานเฉลี่ยของการทดลองนั้นๆ (Average voltage, V) 2) จำนวนตะกอนทั้งหมดที่ได้ภายหลังการทดลอง (Total deposit, kg) 3) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Energy, kWh) และ 4) กำลังไฟฟ้าใช้งานจำเพาะ (Specific power consumption, kWh/kg of Co) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.2) ค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้างกล่าวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อจำนวนตะกอนที่สามารถนำกลับได้ กล่าวคือ การทดลองที่สามารถนำกลับตะกอนได้มากจะมีค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสูง ในขณะที่การทดลองที่นำกลับตะกอนได้น้อยจะมีค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าเท่ากัน

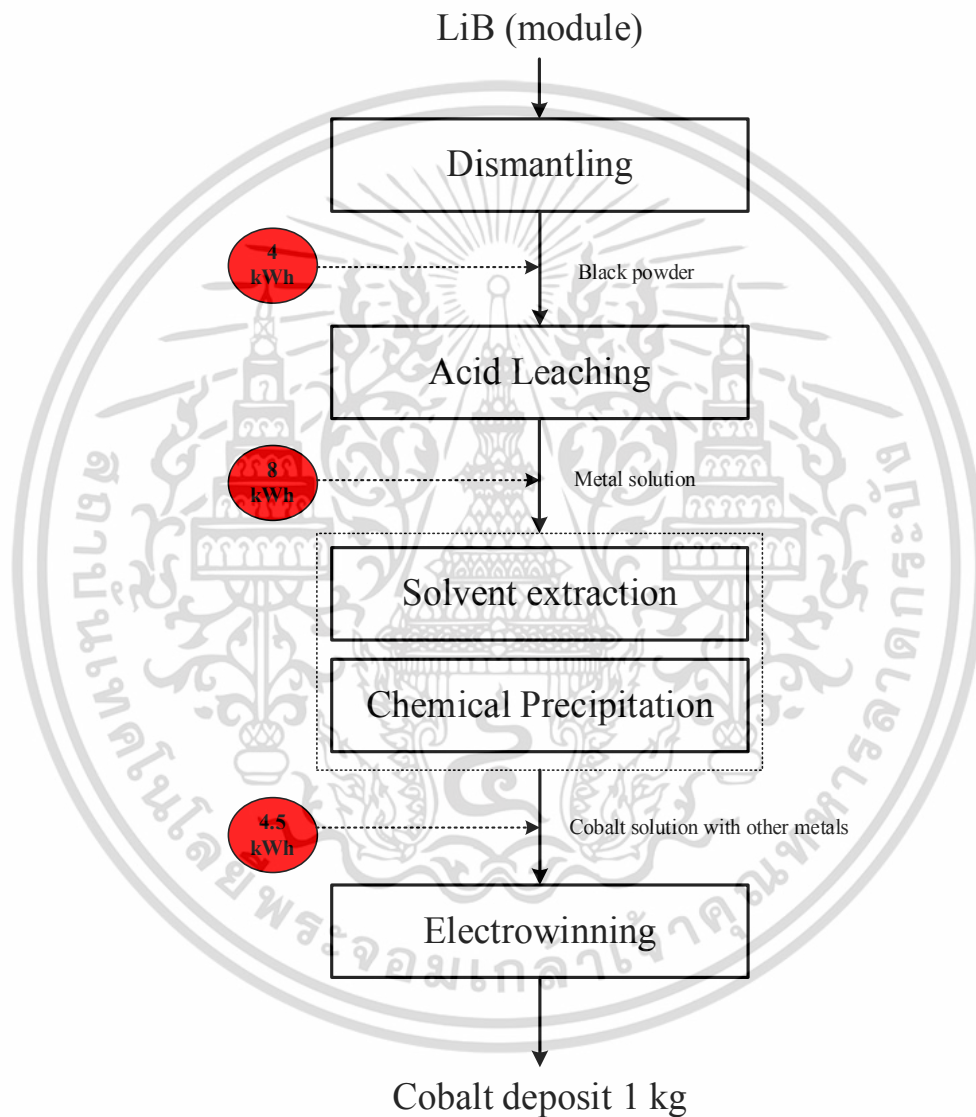
ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า

No	Average voltage (V)	Total deposit (kg)	Energy (kWh)	Specific power consumption (kWh/kg of Co)	Current efficiency (%)
1.	4.6445	0.005880	0.0255	4.3440	97.26
2.	4.6623	0.005823	0.0256	4.4039	96.31
3.	4.7985	0.005329	0.0317	5.9425	73.46
4.	4.2956	0.00526	0.0213	4.0418	96.68
5.	5.0715	0.00505	0.0251	4.9747	92.74
6.	5.2093	0.00448	0.0258	5.7590	82.29
7.	4.5700	0.00261	0.0151	5.7917	71.78
8.	4.5971	0.00487	0.0455	9.3474	44.74
9.	4.4461	0.00419	0.0293	6.9997	57.78
10.	4.9394	0.00427	0.0326	7.6429	58.79
11.	4.7113	0.00308	0.0259	8.4180	50.91
12.	4.1916	0.00487	0.0277	5.6853	67.07

4.3.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับโคบอลต์ 1 กิโลกรัม

กระบวนการนำกลับโคบอลต์จะเริ่มจากการนำโมดูลของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพแล้วมาเข้าสู่กระบวนการถอดแยกและขูดวัสดุที่ขั้วแคโทดออกมา (Dismantling) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงสีดำที่มีโลหะโคบอลต์ผสมอยู่ (Black powder) ซึ่งจะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการย่อยด้วยกรด (Acid Leaching) เพื่อเปลี่ยนสถานะให้อยู่ในรูปของสารละลาย จากนั้นจะนำไปเข้าสู่กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) หรือ การตกตะกอน (Chemical Precipitation) เพื่อแยกโลหะบางชนิดออกให้สารละลายสุดท้ายที่ได้มีโคบอลต์เป็นส่วนประกอบอยู่มากที่สุด จากนั้นจึงจะนำสารละลายดังกล่าวไปเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเพื่อนำกลับตะกอนโลหะโคบอลต์ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความบริสุทธิ์สูงที่สุดออกมา โดยกระบวนการทั้งหมดดังกล่าวเมื่อนำมาคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับตะกอนโคบอลต์ 1 กิโลกรัมแล้วพบว่า จะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 16.5 หน่วย (kWh) ซึ่งแบ่งเป็นกระบวนการย่อยด้วยกรด 4 หน่วย กระบวนการตกตะกอน 8 หน่วย และกระบวนการนำกลับด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งอีก 4.5 หน่วย ดังรูปที่ 4.28 ขณะที่กระบวนการคายประจุแบตเตอรี่ และการถอดแยกเพื่อขูดวัสดุที่ขูดออกมาจะไม่ใช้พลังงาน เนื่องจากจะใช้สารเคมี (กรณีที่มีการคายประจุ) และการถอดแยกด้วยมือเท่านั้น



รูปที่ 4.28 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อการนำกลับโคบอลต์ 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุถูกนำมาใช้ในการศึกษาปริมาณการไหลเข้า-ออกของสารในระบบผ่านกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเทคนิค ICP เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในงานวิจัยนี้ กระบวนการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ประกอบด้วย 3 เทคนิค กระบวนการ คือ 1) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง 2) กระบวนการขูด และ 3) กระบวนการกรอง ซึ่งแต่ละกระบวนการมีหน้าที่และรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

คือ กระบวนการสกัดโลหะโคบอลต์ที่ต้องการออกจากสารละลาย ภายใต้การจ่ายพลังงานไฟฟ้าและการกำหนดเงื่อนไขของการทำงานที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย โดยสามารถอ่านรายละเอียดของกระบวนการเพิ่มเติมได้จากบทที่ 2

2) กระบวนการขูดตะกอน (Scraping)

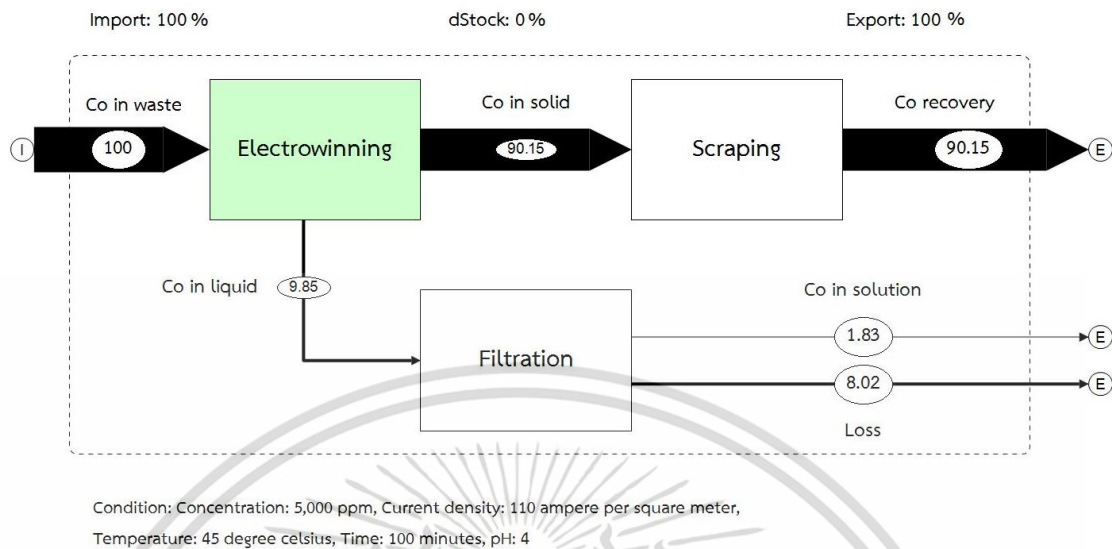
ภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ตะกอนโคบอลต์ที่นำกลับได้ ณ ขั้วแคโทดจะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการขูดด้วยอุปกรณ์ชนิดข้อนหน้าตัดสแตนเลส เพื่อรวบรวมปริมาณของตะกอนที่สามารถนำกลับได้จากกระบวนการก่อนนำเข้าสู่กระบวนการส่งตรวจให้ได้มากที่สุด

3) กระบวนการกรอง (Filtration)

คือ กระบวนการกรองเศษตะกอนที่ยังหลงเหลืออยู่ในสารละลายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการ ภายใต้เทคนิคการกรองด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) โดยกระบวนการกรองที่มีประสิทธิภาพสูงต้องสามารถกรองตะกอนที่ต้องการออกจากสารละลายได้ทั้งหมด ดังนั้น การเลือกใช้กระดาษกรองของชั้นตอนนี้จึงถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการดำเนินงานของการนำกลับโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งในแต่ละเงื่อนไขผ่านการจัดทำผังการไหลของวัสดุ อ้างอิงจากตารางที่ 4.1 โดยจะแสดงผลลัพธ์เป็นประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ (Co recovery) ปริมาณโคบอลต์คงเหลือในสารละลาย (Co in solution) และปริมาณโคบอลต์ที่สูญเสียไปในระหว่างกระบวนการ (Loss) ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

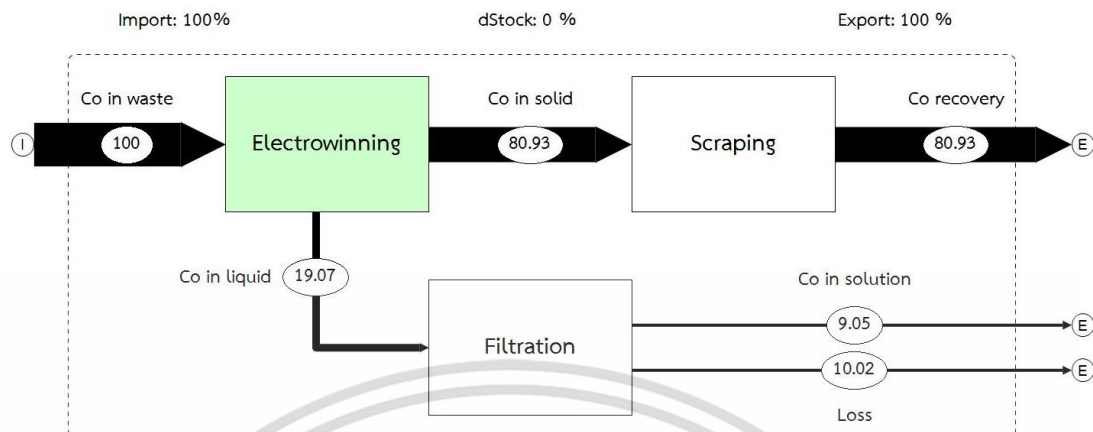
4.4.1 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 1



รูปที่ 4.29 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 1

จากรูปที่ 4.29 สารละลายโคบอลต์ซัลเฟต ซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยซากของแบตเตอรี่ทางเคมี จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเพื่อนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงาน คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 100 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ภายหลังจากกระบวนการ ตะกอนที่ได้จะถูกขูดออกจากขั้วแคโทดเพื่อนำไปส่งตรวจและวิเคราะห์ผล ขณะที่สารละลายจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกรองเพื่อแยกเศษตะกอนที่เจือปนอยู่ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการส่งตรวจเช่นเดียวกัน จากผลการศึกษาพบว่า การทำอิเล็กโทรวินนิ่งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถนำกลับโลหะโคบอลต์ได้สูงถึงร้อยละ 90.15 ขณะที่ยังคงมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ในสารละลายเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1.83 และมีโคบอลต์ซึ่งสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการกรองร้อยละ 8.02

4.4.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 2

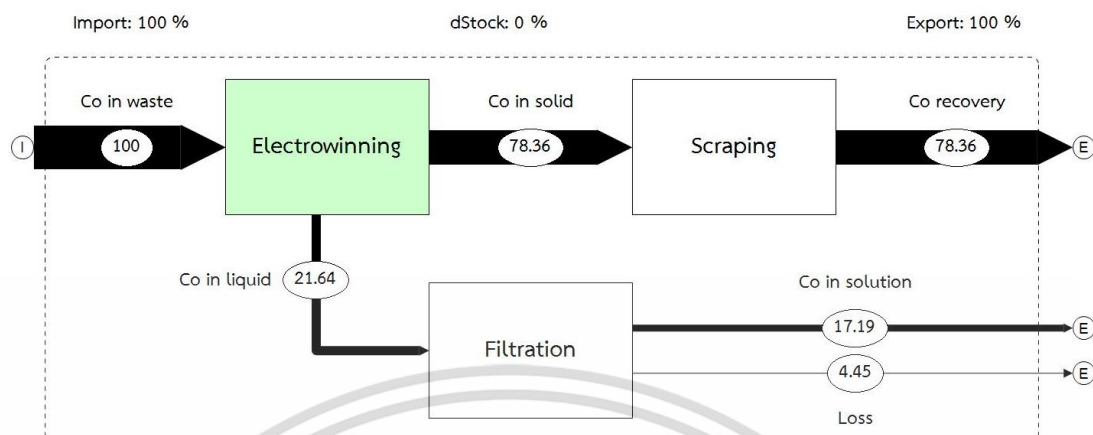


Condition: Concentration: 5,000 ppm, Current density: 110 ampere per square meter,
Temperature: 45 degree celsius, Time: 100 minutes, pH: 5

รูปที่ 4.30 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 2

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 100 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 5, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 80.93 ขณะที่ในสารละลายยังคงมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 9.05 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 10.02 ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานอิเล็กโทรวินนิ่งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำกว่าเงื่อนไขการทดลองหมายเลข 1 อยู่ประมาณร้อยละ 10 ขณะที่มีการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการใกล้เคียงกัน ดังนั้น ความต่างกันของค่าประสิทธิภาพการนำกลับจึงเป็นผลมาจากเงื่อนไขที่ใช้ในการดำเนินงานมากกว่าการสูญเสียของโคบอลต์จากกระบวนการกรอง

4.4.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 3

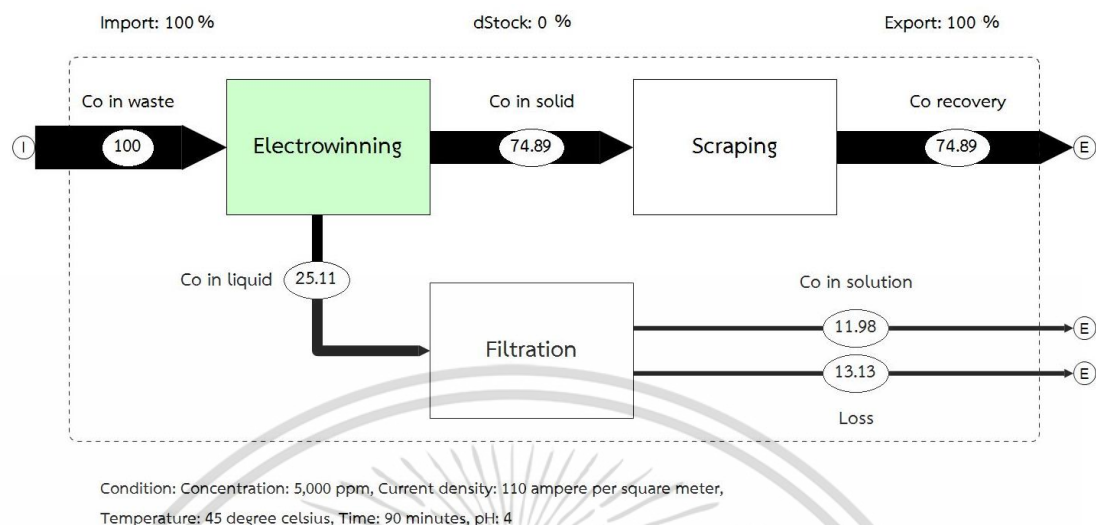


Condition: Concentration: 5,000 ppm, Current density: 110 ampere per square meter,
Temperature: 45 degree celsius, Time: 120 minutes, pH: 4

รูปที่ 4.31 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 3

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 78.36 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 17.19 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 4.45 ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการทดลองหมายเลข 1 สืบให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาของการทำอิเล็กโทรวินนิ่งหลังจาก 100 นาที ทำให้ค่าประสิทธิภาพการนำกลับลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งทำให้ตะกอนโคบอลต์ที่ได้ละลายกลับไปในสารละลายดั้งเดิม สอดคล้องตามปริมาณของโคบอลต์ในสารละลายที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.83 เป็นร้อยละ 17.19

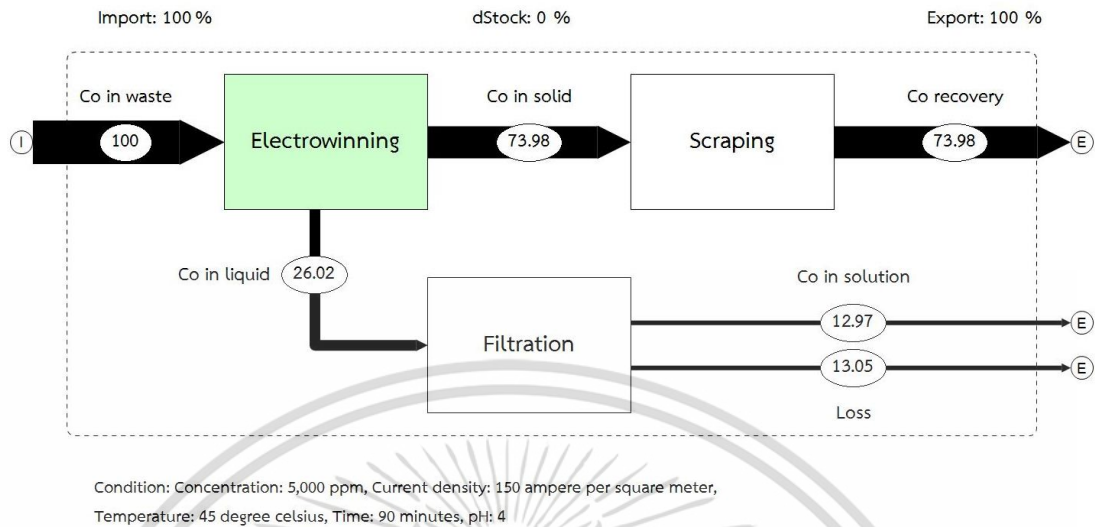
4.4.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 4



รูปที่ 4.32 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 4

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 90 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 74.89 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 11.98 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 13.13 ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งหากเปรียบเทียบกับผลการทดลองหมายเลข 1 พบว่า แม้ระยะเวลาของการทำอิเล็กโทรวินนิ่งจะต่างกันเพียงแค่ 10 นาที กลับส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์อย่างมหาศาล โดยจะเห็นได้จากการทดลองหมายเลข 1 ที่สามารถนำกลับโคบอลต์ได้สูงถึงร้อยละ 90.15 ภายใต้ระยะเวลา 100 นาที ขณะที่การทดลองนี้สามารถนำกลับโคบอลต์ได้เพียงร้อยละ 74.89 ภายใต้ระยะเวลา 90 นาที ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานจึงเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำกลับโคบอลต์อย่างมีนัยสำคัญ

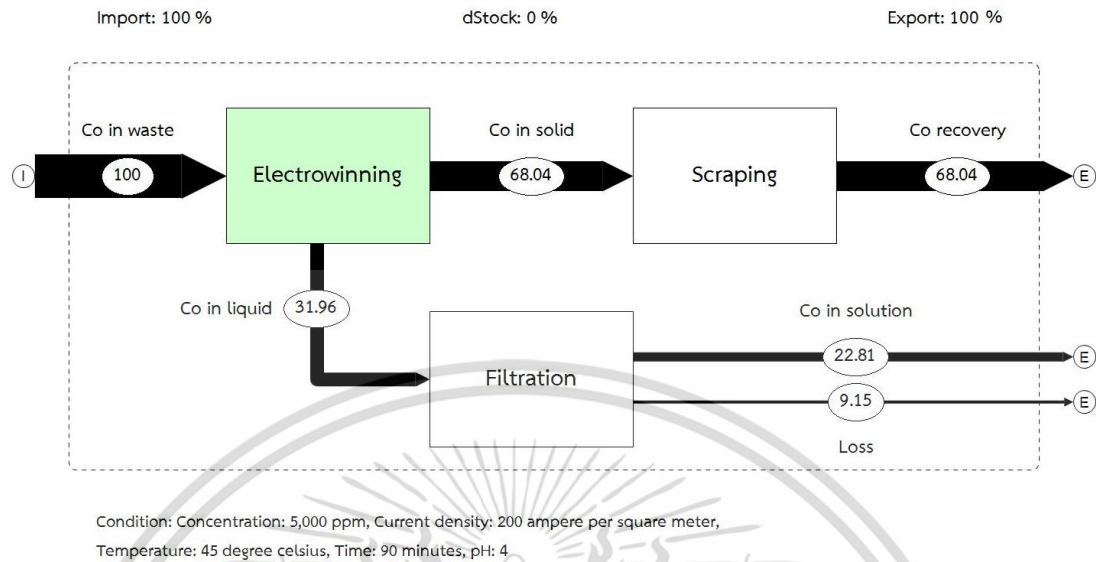
4.4.5 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 5



รูปที่ 4.33 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 5

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 90 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 73.98 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 12.97 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 13.05 ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งจะเห็นว่าการทำอิเล็กโทรวินนิ่งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว มีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ใกล้เคียงกับการทดลองหมายเลข 4 อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าใช้งาน (Power consumption) พบว่าการทดลองหมายเลข 4 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการนำกลับตะกอนที่ต่ำกว่า ดังนั้น การเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จึงเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกว่าการใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

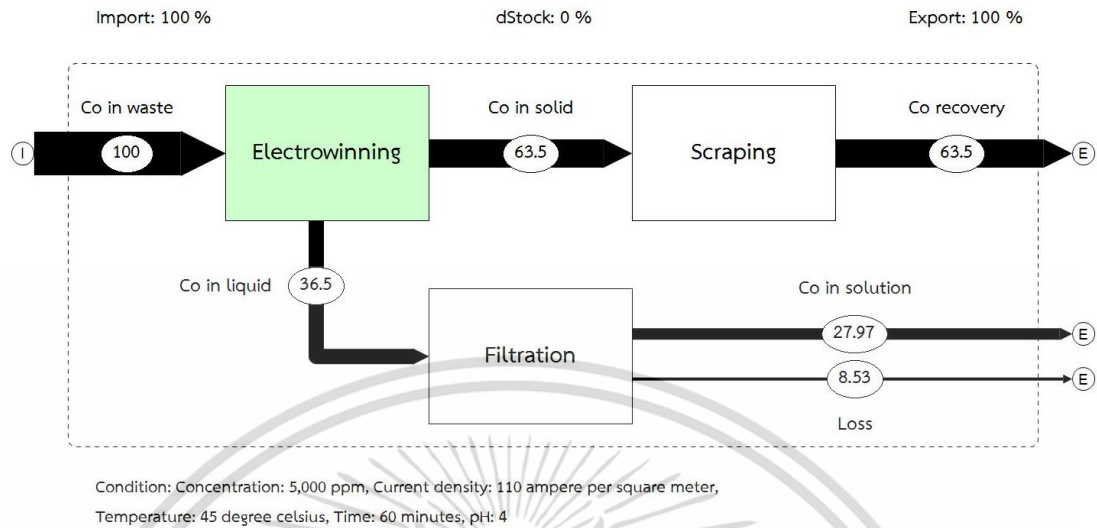
4.4.6 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 6



รูปที่ 4.34 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 6

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 90 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 68.04 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 22.81 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 9.15 ดังรูปที่ 4.34 โดยจะเห็นว่าการทำอิเล็กโทรวินนิ่งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว มีค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำกว่าการทดลองที่ 4-5 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณโคบอลต์ที่ยังหลงเหลืออยู่ในสารละลายมากกว่า ดังนั้น การเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเกินกว่า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จึงเป็นการลดประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ตามที่ได้อภิปรายไปแล้วในหัวข้อ 4.2.2

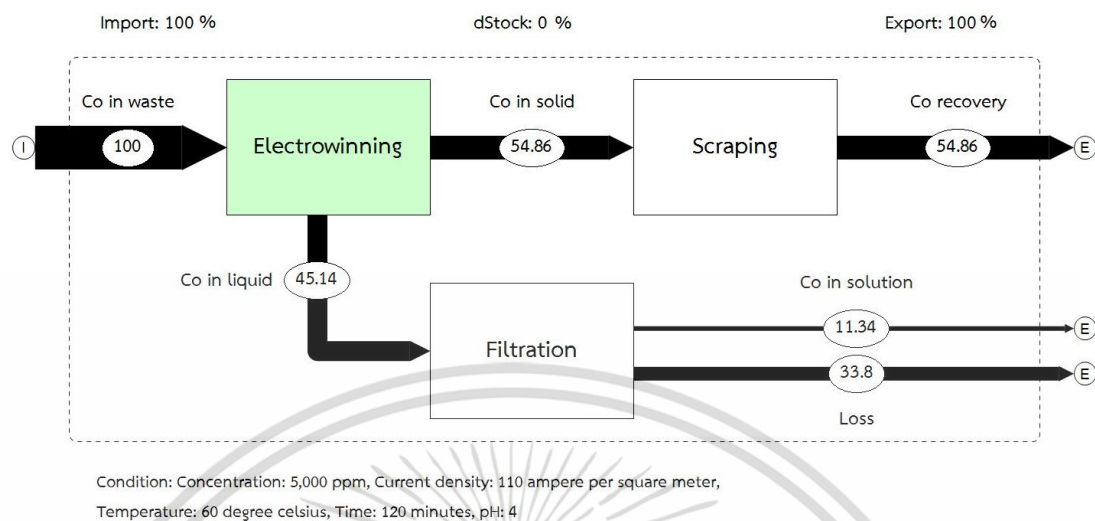
4.4.7 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 7



รูปที่ 4.35 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 7

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 60 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 63.5 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 27.97 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 8.53 ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นว่ามีความประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำกว่าการทดลองหมายเลข 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการนำกลับที่น้อยเกินไป ทำให้ในสารละลายยังคงหลงเหลือโคบอลต์อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น การเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการนำกลับให้มากกว่า 60 นาที จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ปริมาณมากขึ้น

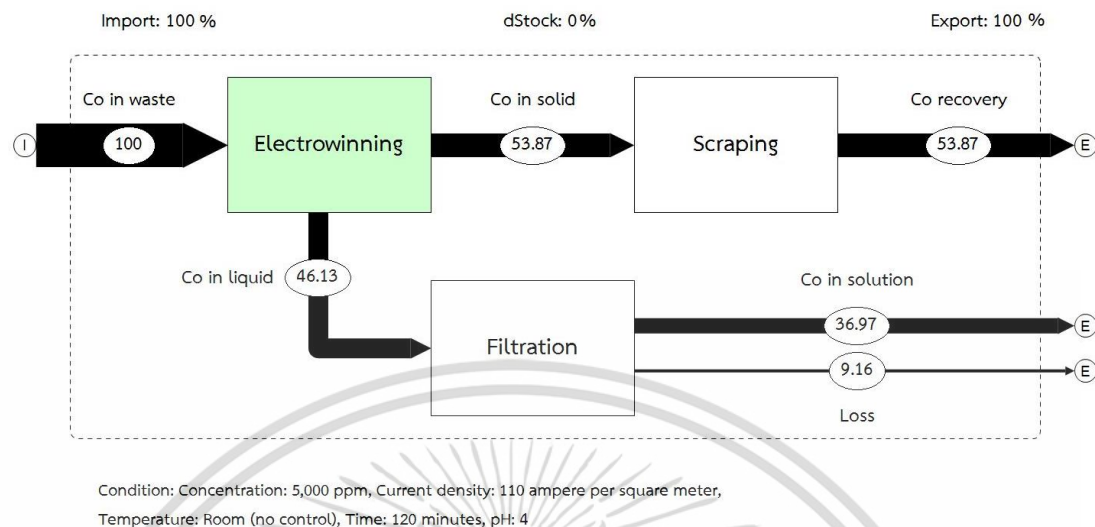
4.4.9 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 9



รูปที่ 4.37 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 9

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 60 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 54.86 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 11.34 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 33.8 ดังรูปที่ 4.37 ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายในการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับการทดลองหมายเลข 3 นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการเพิ่มขึ้นเกือบ 8 เท่า ดังนั้น การทำอิเล็กโทรวินนิ่งด้วยเงื่อนไขนี้จึงไม่นับว่าเป็นเงื่อนไขของกระบวนการนำกลับโคบอลต์ที่ดีที่สุด

4.4.10 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 10



รูปที่ 4.38 ผังการไหลของวัสดุจากการทดลองหมายเลข 10

จากผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 4 และไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ร้อยละ 53.87 ขณะที่ในสารละลายมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 36.97 และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการร้อยละ 9.16 ดังรูปที่ 4.38 โดยจะเห็นว่าการไม่ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายทำให้ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโคบอลต์ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองหมายเลข 3 เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มอัตราการตกตะกอนของโคบอลต์ ณ ขั้วแคโทด ส่งผลให้ได้ปริมาณการนำกลับที่มากกว่าการไม่ควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย โดยจะเห็นได้จากค่าของโคบอลต์ในสารละลายที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 36.97 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของโคบอลต์ที่ยังนำกลับได้ไม่หมด

4.4.13 สรุปการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

จากผังการไหลของวัสดุในการทดลองหมายเลข 1-12 สามารถสรุปปริมาณการไหลเข้า-ออกของสาร ซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ (Co recovery) โคบอลต์ที่ยังหลงเหลืออยู่ในสารละลาย (Co in solution) และ การสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการ (Loss) ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งการทดลองหมายเลข 1 มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์สูงสุด (ร้อยละ 90.15) ขณะที่การทดลองหมายเลข 12 มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ที่ต่ำสุด (ร้อยละ 35.49) การทดลองที่มีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ในสารละลายมากที่สุด คือ การทดลองหมายเลข 10 (ร้อยละ 36.97) และการทดลองที่มีการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการมากที่สุด คือ การทดลองหมายเลข 12 (ร้อยละ 49.99)

ตารางที่ 4.3 สรุปปริมาณการไหลเข้า-ออกของสารจากผังการไหลของวัสดุ

No.	Experiment	Material Flow Analysis (%)			Total (%)
		Co recovery	Co in solution	Loss	
1.	การทดลองหมายเลข 1	90.15	1.83	8.02	100
2.	การทดลองหมายเลข 2	80.93	9.05	10.02	100
3.	การทดลองหมายเลข 3	78.36	17.19	4.45	100
4.	การทดลองหมายเลข 4	74.89	11.98	13.13	100
5.	การทดลองหมายเลข 5	73.98	12.97	13.05	100
6.	การทดลองหมายเลข 6	68.04	22.81	9.15	100
7.	การทดลองหมายเลข 7	63.50	27.97	8.53	100
8.	การทดลองหมายเลข 8	63.10	11.70	25.20	100
9.	การทดลองหมายเลข 9	54.86	11.34	33.8	100
10.	การทดลองหมายเลข 10	53.87	36.97	9.16	100
11.	การทดลองหมายเลข 11	43.59	9.22	47.19	100
12.	การทดลองหมายเลข 12	35.49	14.52	49.99	100

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้า จากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้วโดยมีโลหะโคบอลต์เป็นเป้าหมาย ภายใต้การสร้างและพัฒนาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง พร้อมกับศึกษาหาเงื่อนไขของการทำงานที่เหมาะสมผ่านการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1) เครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110-200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (3.3-6 แอมแปร์) ผ่านการเปลี่ยนแปลงของค่า Duty cycle สำหรับควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบของสารละลายให้มีค่าคงที่อย่างอัตโนมัติ

2) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้นำกลับโคบอลต์ออกจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ถึงร้อยละ 90.15 และมีประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 97.26 ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 45 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 100 นาที, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 4, ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) และระยะห่างระหว่างขั้ว 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการนำกลับโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง

3) พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำกลับโคบอลต์ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งมากที่สุดคือ ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลาในการทดลอง และอุณหภูมิของสารละลาย ตามลำดับ

4) เนื่องจากประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์แสดงให้เห็นถึงปริมาณของโคบอลต์ที่สามารถนำกลับได้จากกระบวนการ ในขณะที่ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าบ่งบอกถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อกระบวนการนำกลับตะกอนทั้งหมด ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าค่าประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ จึงแสดงให้เห็นว่ามีผลิตภัณฑ์อื่นนอกเหนือจากตะกอนโคบอลต์เกิดขึ้นระหว่าง

เอกสารที่กระบวนการที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) จากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งในแต่ละเงื่อนไขของการนำกลับพบว่า กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์สูงที่สุดจะมีปริมาณของโคบอลต์ที่ยังหลงเหลืออยู่ในสารละลายน้อยมาก และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ในกระบวนการอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ ในทางตรงกันข้าม กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำที่สุดจะมีโคบอลต์หลงเหลืออยู่ในสารละลายเป็นจำนวนมาก และเกิดการสูญเสียโคบอลต์ระหว่างกระบวนการมากเช่นเดียวกัน

6) สีของสารละลายที่ได้ภายหลังจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ กล่าวคือ ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์สูง ภายหลังจากกระบวนการจะได้สารละลายที่มีลักษณะสีชมพูใส ขณะที่กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพการนำกลับโคบอลต์ต่ำจะได้สารละลายที่มีสีแดงเข้มในภายหลังจากกระบวนการ ดังนั้นยังสามารถนำกลับโคบอลต์ออกจากสารละลายได้มากเท่าไร สีของสารละลายภายหลังจากกระบวนการที่ได้อาจมีสีอ่อนมากเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาต่อยอดงานวิจัย ดังนี้

1) ในระหว่างกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่ง ควรควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้มีค่ามากกว่า 3 เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาแทรกแซงจากสารอื่น และควรออกแบบการทดลองเป็นระบบปิด เพื่อป้องกันการระเหยและการสูญเสียของโคบอลต์ระหว่างกระบวนการ

2) ควรทำการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โทรวินนิ่งภายในตู้ดูดไอสารเคมีและควัน เพื่อป้องกันไอระเหยของโคบอลต์ซึ่งเป็นอันตรายจากกระบวนการ และควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ร่วมด้วย เช่น หน้ากากป้องกันสารพิษ แวนตานิรภัย รองเท้าป้องกันสารเคมี และ เสื้อกาวน์ เป็นต้น

3) ผู้วิจัยควรมีความรู้เบื้องต้นด้านระบบไฟฟ้าและกระบวนการทางเคมี เพื่อการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการทดลอง

4) ผู้วิจัยไม่ควรจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยโหมดแรงดันคงที่ (Constant Voltage) เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพของการนำกลับโคบอลต์มีค่าลดลง

5) ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการนำกลับโคบอลต์ นอกเหนือจากกระบวนการทดลองทางเคมีแล้ว ควรนำวิธีการทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้เพิ่มเติมเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น วิธีทางสถิติ หรือ การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Global EV Outlook 2019, Scaling-up the transition to electric mobility. (Online). <https://shorturl.asia/S7Auf>. 6 April 2023.
- [2] N. Mulaudzi and M. Kotze, "Direct cobalt electrowinning as an alternative to intermediate cobalt mixed hydroxide product," in Base Metals Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Johannesburg, 2013, pp. 209-222.
- [3] ผศ.ดร.สงบ คาค้อ, การศึกษาสถานภาพพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย. ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). 2562.
- [4] K. Kosugi, R. Hayashi, S. Machmudah, R. M. Ibarra, H. Kanda, and M. Goto, "Subcritical water electrolysis for cobalt recovery from spent lithium-ion batteries in an acidic environment," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 181, p. 105501, 2022.
- [5] B. Yu, R. Xu, X. Wang, S. He, and B. Chen, "Electrodeposition of MnO₂-doped Pb-0.6% Sb/ α -PbO₂/ β -PbO₂ novel composite energy-saving anode for zinc electrowinning," *Journal of Energy Storage*, vol. 61, p. 106264, 2023.
- [6] Y. Zhang and Z. Guo, "Anodic behavior and microstructure of Pb-Ca-0.6% Sn, Pb-Co₃O₄ and Pb-WC composite anodes during Cu electrowinning," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 724, pp. 103-111, 2017.
- [7] S. Das and T. Subbaiah, "Electrowinning of cobalt I. Winning from pure cobalt sulphate bath," *Hydrometallurgy*, vol. 12, no. 3, pp. 317-333, 1984.
- [8] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292-308, 2018.
- [9] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, "Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview," in 2012 7th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA), 2012: IEEE, pp. 1567-1572.
- [10] S. Bhargava, M. Pownceby, and R. Ram, *Hydrometallurgy*. MDPI, 2018.
- [11] I. S. Arvanitoyannis, *Waste management for the food industries*. Academic Press, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] M. L. Free, *Hydrometallurgy: fundamentals and applications*. Springer Nature, 2021.
- [13] ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2550. เคมีสำหรับวิศวกร. กรุงเทพมหานคร: เอสทีซี แอนด์ มาเก็ตติ้ง.
- [14] J. Millman, *Electronic Devices and Circuits* [by] Jacob Millman [and] Christos C. Halkias. McGraw-Hill, 1967.
- [15] วีระเชษฐ ชันเงิน และคณะ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง. 2561.
- [16] P. H. Brunner and H. Rechberger, *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*. CRC press, 2016.
- [17] W.-Y. Wang, C. H. Yen, J.-L. Lin, and R.-B. Xu, "Recovery of high-purity metallic cobalt from lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)-type Li-ion battery," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 21, no. 2, pp. 300-307, 2019.
- [18] G. C. Yang, Y.-C. Huang, and S.-C. Huang, "Recovery of valuable metals from cylindrical 18650-type spent lithium-ion batteries," in *The 15th Japan/Korea Int. Symp. Resour. Recycl. Mater. Sci.*, 2017, pp. 1-10.
- [19] M. Pasquali and C. Lupi, "Electrolytic cobalt recovery from Lithium-ion batteries," 2001.
- [20] D. A. Bertuol, F. D. Amado, H. Veit, J. Z. Ferreira, and A. M. Bernardes, "Recovery of nickel and cobalt from spent NiMH batteries by electrowinning," *Chemical engineering & technology*, vol. 35, no. 12, pp. 2084-2092, 2012.
- [21] C. Lupi, M. Pasquali, and A. Dell’Era, "Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical processes," *Waste management*, vol. 25, no. 2, pp. 215-220, 2005.
- [22] กรวิชัย บุญศรี และคณะ, “การนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว”, *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2563.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้า จากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้ว

Enhanced Efficiency of Electrowinning for Metal Recovery from Spent Lithium-Ion Battery

อรทัย คุรุทนต์*, ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤตฤกษ์*, นาดยา โมรวรรณ**, ผศ.ดร.ชดชนก อัทธพงศ์**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย หลอดกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 E-mail: 64601170@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) เครื่องต้นแบบจะถูกออกแบบและสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมป้อนกลับ โดยจะถูกนำมาเชื่อมต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อนำกลับโลหะมีค่าออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยตะกอนที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการจะถูกเก็บรวบรวมผ่านกรรมวิธีการชุบ และการกรอง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma, ICP) จากผลการศึกษาพบว่าเครื่องต้นแบบนี้สามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้มากกว่าร้อยละ 70 ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมากที่สุดคือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด่างของสารละลาย และเวลา ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน, อิเล็กโทรวินนิ่ง, แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมแบบป้อนกลับได้

Abstract

This paper presents a study on the efficiency improvement for precious metal recovery from spent lithium-ion batteries using the electrowinning method. A prototype model is designed and built up to be a closed-loop controlled DC power supply connected to electrodes for recovering the precious metal dissolved in the solution. The obtained deposit from this operation is collected using scraping and filtrating techniques to determine the quantity using an Inductively Coupled Plasma (ICP) machine. As the results, the proposed model can recover the precious metal back more than 70% under an appropriate

operating condition. In addition and very importantly, the most significant parameters in the electrowinning process are the supply current density, pH of the solution, and operating time, respectively.

Keywords: lithium-ion batteries, electrowinning, closed-loop controlled dc power supply

1. บทนำ

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานหลักสำหรับเครื่องมือเครื่องใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และยานยนต์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก [1, 2] ส่งผลให้ปริมาณซากของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะถูกนำไปกำจัดตามกระบวนการที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามภายในซากของแบตเตอรี่เหล่านี้ยังมีส่วนประกอบของวัสดุมีค่าหลายชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ โดยจากงานศึกษาวิจัยต่างๆ พบว่าโลหะมีค่าชนิดโคบอลต์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นเป็นธาตุหายากที่มีการนำมาใช้งานเป็นจำนวนมากและมีมูลค่าที่สูงที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการสร้างมูลค่าจากขยะของเสียและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในธรรมชาติอย่างคุ้มค่า ผู้จัดทำจึงทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery)

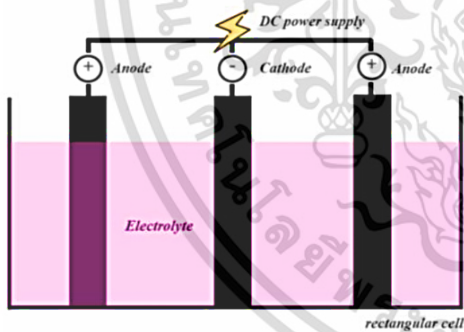
แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลากหลายชนิด เนื่องจากมีประสิทธิภาพของการใช้งานที่ดีกว่าเทคโนโลยีของ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ทั่วไป โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แผ่นแยก (Separator) และตัวรับกระแส (Current collector) ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) โดยปัจจุบันนิยมใช้เป็นวัสดุประเภทลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์ออกไซด์ และลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพของการทำงานสูง ขณะที่ขั้วแอโนด (Anode) จะนิยมใช้เป็นวัสดุประเภทแกรไฟต์ [1]

2.2 กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเป็นกระบวนการสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลาย โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะอยู่ในรูปโลหะของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งจะเกาะอยู่ที่บริเวณขั้วแคโทด กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งถูกนิยมนำมาใช้กับโลหะมีค่าจำพวกทองแดงและโคบอลต์ [2-4] ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยใช้หลักการเดียวกับอิเล็กโทรลิซิสคือ การทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นผ่านการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยองค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [5] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

3. การออกแบบการทดลอง

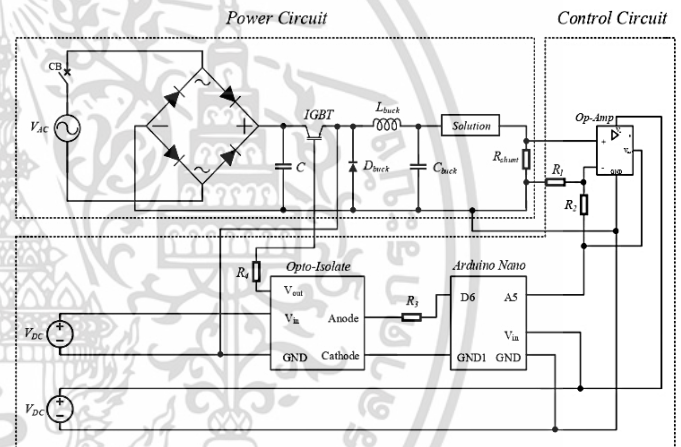
3.1 องค์ประกอบทางเคมี

1. ขั้วอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองคือ Stainless steel 316L โดยมีขนาดกว้าง 110 มิลลิเมตร ยาว 185 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร เท่ากันหมดทุกขั้ว
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองคือ สารละลายโคบอลต์ซัลเฟต (CoSO₄) และสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย (pH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 องค์ประกอบทางไฟฟ้า

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนของวงจรควบคุม (Control circuit) และส่วนของวงจรกำลัง (Power circuit) ดังรูปที่ 2 ส่วนของวงจรควบคุมถูกออกแบบให้มีการทำงานแบบวงจรป้อนกลับทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีความถี่ผ่านการทำงานของ Arduino nano และอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง ขณะที่ส่วนของวงจรกำลังจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave bridge rectifier) สำหรับใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) สำหรับใช้ควบคุมปริมาณของกระแสขาออกให้มีความถี่ตามที่ต้องการผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าของ Duty cycle [6]



รูปที่ 2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.3 แผนการทดลอง

เพื่อให้กระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยมีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทดลองนำกลับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ค่า pH ของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยการทดลองทั้งหมดจะถูกดำเนินการผ่านวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น ซึ่งใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110-200 A/m² ขณะที่อุณหภูมิของสารละลาย 45°C ขั้วอิเล็กโทรดชนิด stainless steel 316L และใช้โคบอลต์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่นำเสนอจะถูกนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบและพัฒนาประสิทธิภาพของวงจรและปรับปรุงปริมาณการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์จากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลาย

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการนำกลับโคบอลต์พบว่า การใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะมีค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมากกว่า ซึ่งส่งผลให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในการดำเนินปฏิกิริยาดำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจากกรณีทั้ง 2 มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยตะกอนที่ได้จากสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะมีลักษณะดำสนิทและมีปริมาณตะกอนน้อยกว่าการทดลองที่ใช้สารละลายความเข้มข้นน้อยกว่า ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะตะกอนที่ขั้วแคโทด ณ สารละลายความเข้มข้นต่างกัน

4.2 ผลกระทบจากเวลา

ผลการทดลองเกี่ยวกับเวลาที่ใช้สำหรับทำอิเล็กโทรวินนิ่งพบว่า ณ เงื่อนไขเดียวกันและสารละลายมีความเข้มข้น 5,000 ppm เท่ากันทุกกรณี การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทดลองจะทำให้ได้ปริมาณการนำกลับโคบอลต์ที่มากขึ้นเนื่องจากไอออนในสารละลายยังคงมีการเคลื่อนตัวและฟอร์มตัวไปเป็นตะกอนโคบอลต์ที่อยู่ในสภาพของแข็งอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามหากเวลาที่ใช้ในการทดลองเกินเวลาของการเกิดสมดุลทางเคมีจะทำให้ปริมาณการนำกลับมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ตะกอนโคบอลต์ที่ขั้วละลายกลับไปในสารละลายดั้งเดิม

4.3 ผลกระทบจากค่า pH ของสารละลาย

การทดลองอิเล็กโทรวินนิ่งที่สารละลาย pH 4-5 สามารถให้ปริมาณการนำกลับโคบอลต์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่

ลักษณะตะกอนที่ขั้วของสารละลาย pH 4 จะมีสีอ่อนและเกาะแน่นกว่าการใช้ละลาย pH 5 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะตะกอนที่ขั้วแคโทด ณ สารละลาย pH ต่างกัน

4.4 ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้จ่ายพลังงานให้กับกระบวนการจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้ดำเนินไปได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันใช้งานที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของตะกอนโคบอลต์ที่ได้ลดลงเนื่องจากผลการแทรกแซงของการเกิดปฏิกิริยาเคมีอื่น

4.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจร

เพื่อให้กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโคบอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) และวงจร Buck converter ให้เหมาะสมต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ โดยทำการเพิ่มขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุให้มีค่ามากขึ้นเพื่อให้วงจรสามารถรองรับและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้นำกลับปริมาณตะกอนโลหะมีค่าโคบอลต์ได้มากขึ้น ดังตารางที่ 1 โดยรายละเอียดของตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรจะถูกแสดงในตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรแหล่งจ่ายไฟ

วงจร	พารามิเตอร์	จำนวน	การปรับปรุงครั้งที่ 1	การปรับปรุงครั้งที่ 2	หน่วย
Power	R_{buck}	0.1	0.1	0.1	Ω
Amplifier	R_1	100	100	100	Ω
	R_2	5	5	1	$k\Omega$
Control	R_3	3.3	3.3	3.3	$k\Omega$
	R_4	10	10	10	$k\Omega$
AC to DC converter	C	470	470	470	μF
Buck converter	C_{buck}	1.24	1.41	5.5	mF
	L_{buck}	83.3	85	320	mH
Power source		40 (DC)	40 (DC)	220 (AC)	V

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวแปรพารามิเตอร์ในวงจร

ลำดับ	พารามิเตอร์	ชื่อ
1.	R_{shunt}	Shunt resistor
2.	R_1	Input resistor
3.	R_2	Feedback resistor
4.	R_3	Limit current resistor
5.	R_4	
6.	C	Capacitor
7.	C_{buck}	Buck capacitor
8.	L_{buck}	Buck inductor

4.6 ปริมาณของการนำกลับโคบอลต์

ตารางที่ 3 ปริมาณการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ ณ เงื่อนไขต่างๆ

ที่	เงื่อนไขการทดลอง				การนำกลับ (%)
	ความเข้มข้น สารละลาย (ppm)	ความหนาแน่น กระแส (A/m^2)	เวลา (นาที)	pH	
1.	10,000	110	120	4	35.49
2.	5,000	110	90	4	74.89
3.	5,000	150	90	4	73.98
4.	5,000	200	90	4	68.04
5.	5,000	110	120	4	78.36
6.	5,000	110	180	4	61.11
7.	5,000	110	120	5	71.30

จากตารางที่ 3 พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์คือ การใช้สารละลายความเข้มข้น 5,000 ppm โดยในระหว่างการทดลองต้องมีการควบคุมค่า pH ให้คงที่ประมาณ 4 อุณหภูมิ 45°C และควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ให้คงที่ 110 A/m^2 ตลอดระยะเวลาการทดลอง 2 ชั่วโมง โดยให้ค่าปริมาณการนำกลับสูงถึงร้อยละ 78.36

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำงานด้วยระบบ Feedback control โดยประกอบด้วยวงจรสำคัญ Buck converter สำหรับใช้ควบคุมปริมาณกระแสที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการทำอิ-

เล็ก โตรวีนนิ่งได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายตลอดช่วงระยะเวลาของการทดลองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ผ่านการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในวงจรเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต้องการได้ ขณะที่เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำกลับโคบอลต์คือ การใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel 316L สารละลายเป็นสารประกอบซัลเฟตที่ค่า pH 4 มีความเข้มข้นของสารละลายประมาณ 5,000 ppm อุณหภูมิของสารละลายถูกควบคุมให้คงที่ 45°C และควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ให้คงที่ 110 A/m^2 ตลอดระยะเวลาการทดลอง 2 ชั่วโมง ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวสามารถให้ค่าปริมาณการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ได้สูงกว่าร้อยละ 70 ภายใต้การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น

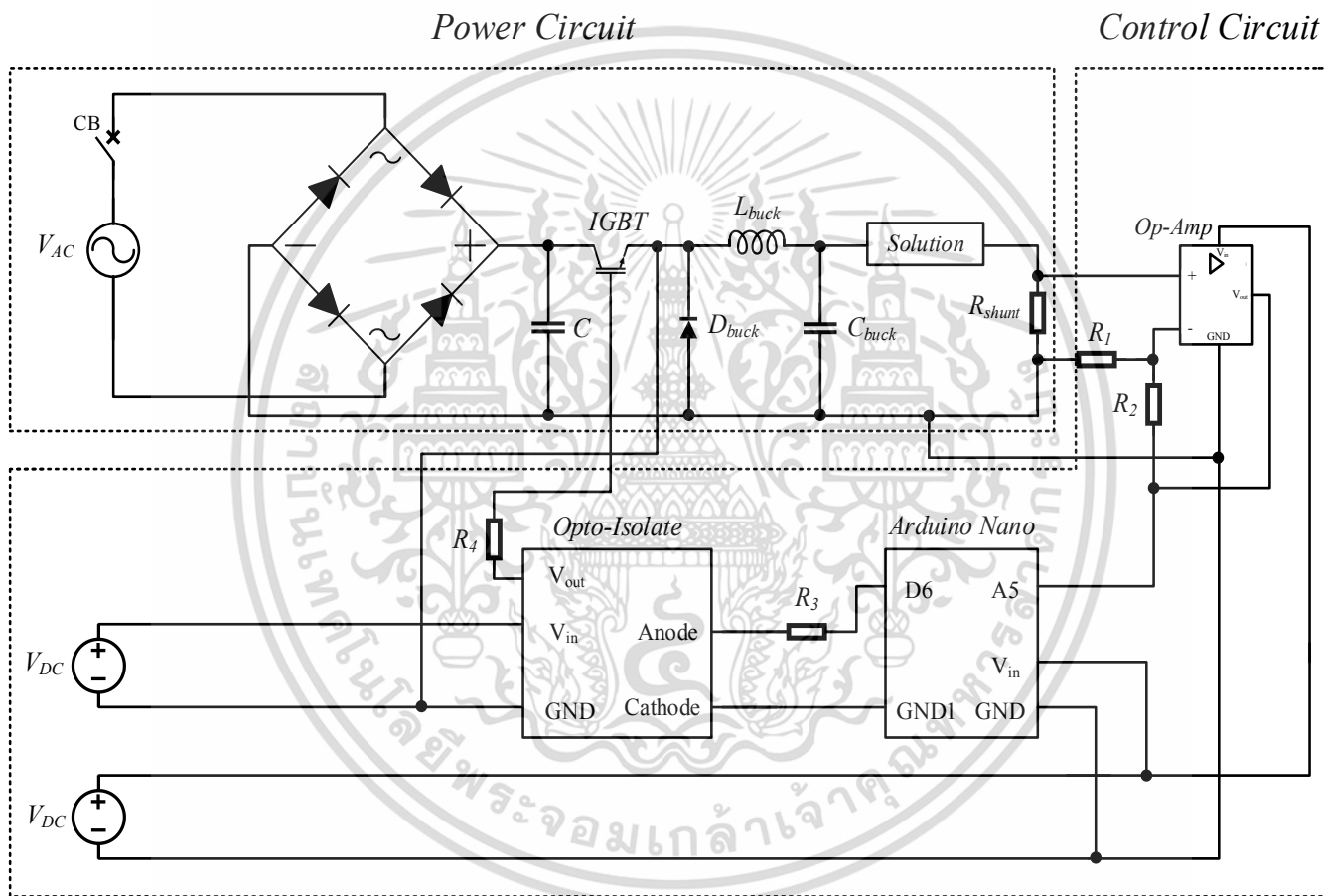
เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292-308, 2018.
- [2] W.-Y. Wang, C. H. Yen, J.-L. Lin, and R.-B. Xu, "Recovery of high-purity metallic cobalt from lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)-type Li-ion battery," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 21, no. 2, pp. 300-307, 2019.
- [3] C. Lupi, M. Pasquali, and A. Dell'Era, "Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical processes," *Waste management*, vol. 25, no. 2, pp. 215-220, 2005.
- [4] G. C. Yang, Y.-C. Huang, and S.-C. Huang, "Recovery of valuable metals from cylindrical 18650-type spent lithium-ion batteries," in *The 15th Japan/Korea Int. Symp. Resour. Recycl. Mater. Sci.*, 2017, pp. 1-10.
- [5] M. Adams, *Gold ore processing: project development and operations*. Elsevier, 2016.
- [6] I. Gottlieb, *Practical Transformer Handbook: for Electronics, Radio and Communications Engineers*. Elsevier, 1998.

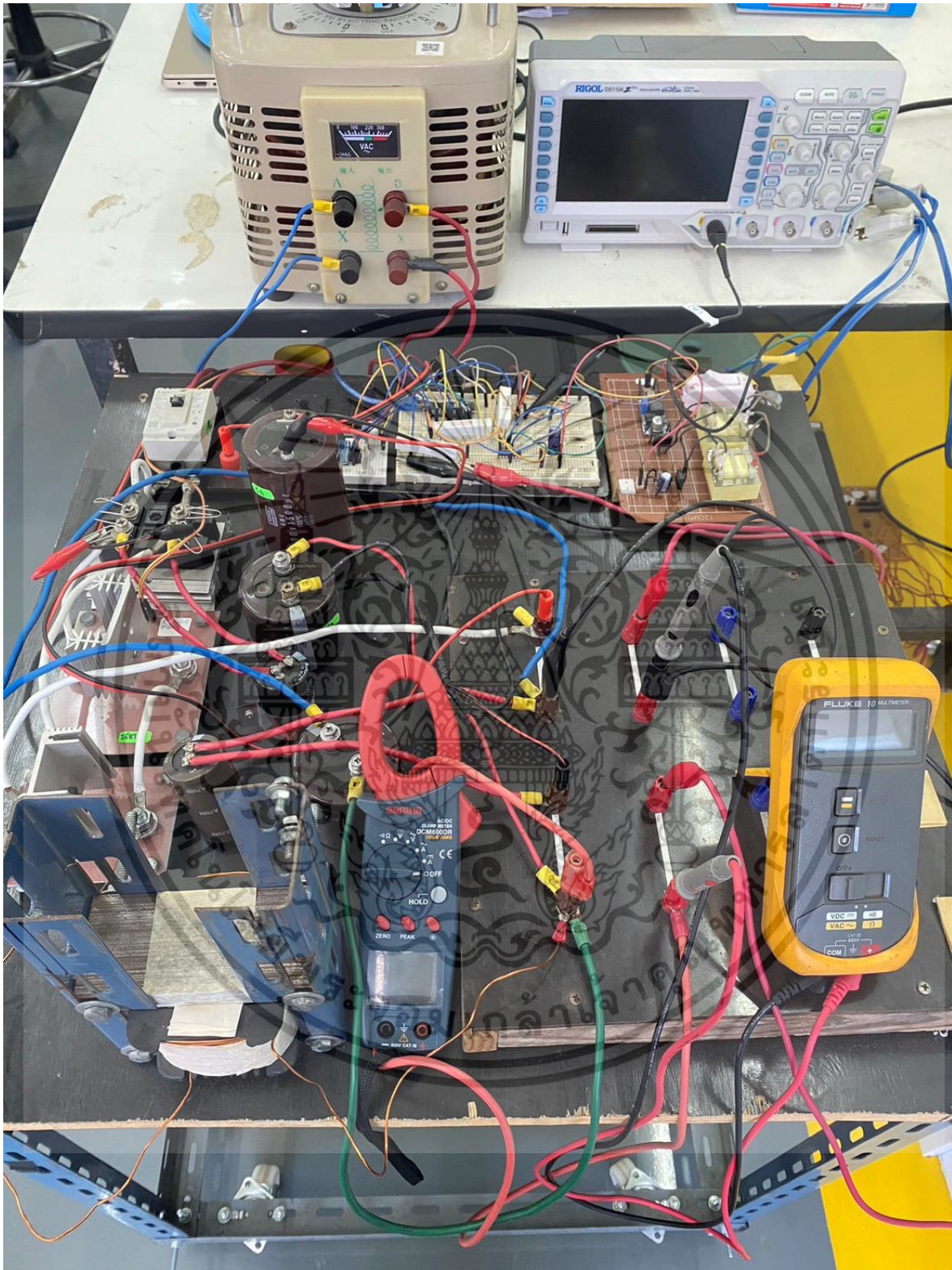
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

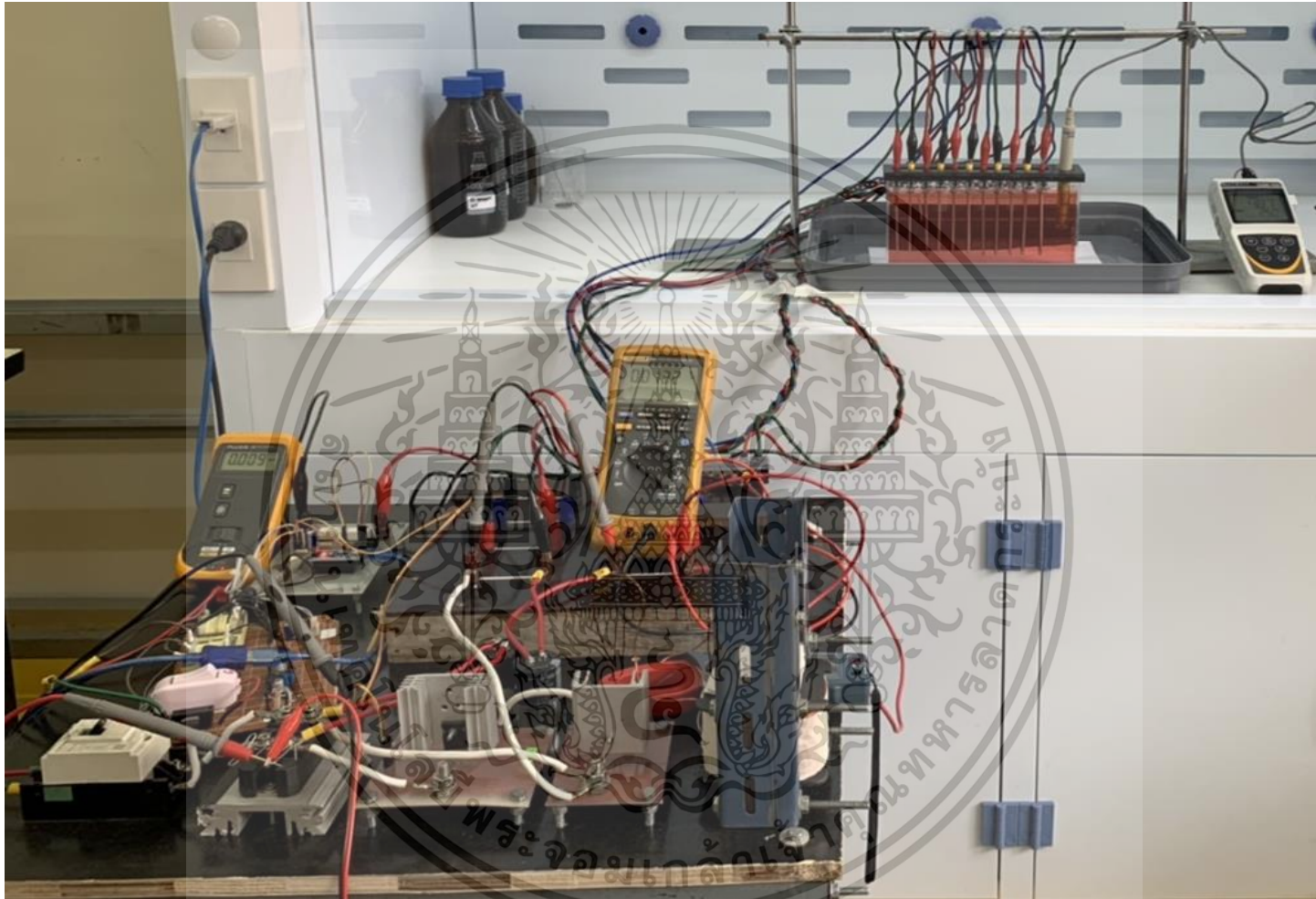


แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การนำกลับโคบอลต์ด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินนิ่ง



Co-recovery = 43.59%
Current efficiency = 50.91%

Co-recovery = 63.5%
Current efficiency = 71.78%

Co-recovery = 78.36%
Current efficiency = 73.46%

Co-recovery = 80.93%
Current efficiency = 96.31%

Co-recovery = 90.15%
Current efficiency = 97.26%

condition
Co concentration: 5,000 ppm
Current density: 110 A/m²
Temperature: 45°C
Time: 100 mins
pH: 3
Plate distance: 12.5 mm

condition
Co concentration: 5,000 ppm
Current density: 110 A/m²
Temperature: 45°C
Time: 60 mins
pH: 4
Plate distance: 12.5 mm

condition
Co concentration: 5,000 ppm
Current density: 110 A/m²
Temperature: 45°C
Time: 120 mins
pH: 4
Plate distance: 12.5 mm

condition
Co concentration: 5,000 ppm
Current density: 110 A/m²
Temperature: 45°C
Time: 100 mins
pH: 5
Plate distance: 12.5 mm

condition
Co concentration: 5,000 ppm
Current density: 110 A/m²
Temperature: 45°C
Time: 100 mins
pH: 4
Plate distance: 12.5 mm

ตัวอย่างสีสารละลายภายหลังกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง



ภาคผนวก ค.

โปรแกรม Arduino สำหรับควบคุมวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรม Arduino feedback สำหรับจ่ายกระแสคงที่ 3.3 A

```

#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <Wire.h>
double read_ratio,op_ratio,current_read,current_real;
double duty_cycle = 0.5;
float supply,x,y,z;
#define feedback_current A7
#define calibrate A1
double current_con = 3.3;
double cal_ratio,buttonPin = 7,buttonState = 0;
float CurrentCorrected,cur0Corrected;
int in1;
float val1;
float val1Corrected, volts0Corrected;
int16_t adc0;
float volts0,cur0;
int analogPin = A0;
float cal,cali;
Adafruit_ADS1115 ads;
void setup() {
pinMode(buttonPin,INPUT_PULLUP);
pinMode(feedback_current, INPUT);
Serial.begin(9600);
if (!ads.begin()) {
Serial.println("Failed to initialize ADS.");
while (1);
}
}
void loop() {
adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
volts0 = ads.computeVolts(adc0);
cur0 = volts0/0.35;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cal = map(analogRead(analogPin),0,1023,1,40);
cali = cal/100 ;
buttonState = digitalRead(buttonPin);

//=====================================================
current_read = analogRead(feedback_current);
current_real = ((current_read/175)/3.5)/0.1;

//=====================================================
in1 = analogRead(feedback_current);
val1 = in1 * 5.0 / 1024.0;
supply = readVcc() / 1000.0;
val1Corrected = supply / 5 * val1;
CurrentCorrected = val1Corrected/0.35;

//=====================================================
volts0Corrected = supply / 5 * volts0;
cur0Corrected = volts0Corrected/(0.28+cali);
if(buttonState == 1){
  constant_duty();
}
else{
  vary_duty();
}
}

//=====================================================
void constant_duty() {
  duty_cycle = 0.5;
  analogWrite(6, duty_cycle * 255);
  Serial.print((String)"DUTY : " + duty_cycle * 100 + " %");
  Serial.print((String)" || Current read : " + current_real +"|"+" Supply : " + supply );
  Serial.print((String)" || Current : " + CurrentCorrected + " || Current ads : "+
  cur0Corrected );
  Serial.println((String)"|| AIN0: " + adc0 + " " + volts0 + "V");
  delay(1000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
//=====
void vary_duty(){
if (cur0Corrected > current_con)
{
duty_cycle = duty_cycle-0.001;
}
if (cur0Corrected < current_con)
{
duty_cycle = duty_cycle+0.001;
}
analogWrite(6, duty_cycle * 255);
Serial.println((String)"DUTY : " + duty_cycle * 100 + " %");
Serial.print((String)" || Current read : " + "||"+" Supply : " + supply );
Serial.println((String)" || Current : "+ CurrentCorrected + " || Current ads : "+
cur0Corrected );
Serial.print((String)"AIN0: " + adc0 + "-" + volts0 + "v" );
delay(200);
}
long readVcc() {
long result;
// Read 1.1V reference against AVcc
#if defined(__AVR_ATmega32U4__) || defined(__AVR_ATmega1280__) ||
defined(__AVR_ATmega2560__)
ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
#elif defined (__AVR_ATtiny24__) || defined(__AVR_ATtiny44__) ||
defined(__AVR_ATtiny84__)
ADMUX = _BV(MUX5) | _BV(MUX0);
#elif defined (__AVR_ATtiny25__) || defined(__AVR_ATtiny45__) ||
defined(__AVR_ATtiny85__)
ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
#else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
#endif
delay(2); // Wait for Vref to settle
ADCSRA |= _BV(ADSC); // Convert
while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));
result = ADCL;
result |= ADCH << 8;
result = 1126400L / result; // Calculate Vcc (in mV); 1126400 = 1.1*1024*1000
return result;
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นางสาวอรรทัย ครุฑหุ่น
- วัน เดือน ปีเกิด 6 เมษายน 2542
- ที่อยู่ 461/12 ตำบลหนองหลวง อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000
- ประวัติการศึกษา
- พ.ศ. 2557 - 2560 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนตากพิทยาคม
- พ.ศ. 2560 - 2564 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พ.ศ. 2564 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
- พ.ศ.2566 “การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้ว Enhanced Efficiency of Electrowinning for Metal Recovery from Spent Lithium-Ion Battery” และนำเสนอผลงานใน “การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15” ระหว่างวันที่ 1 - 3 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์วิว นครพนม จังหวัดนครพนม (รางวัลบทความวิจัยดีเด่น)
- พ.ศ.2564 โครงการพิเศษเรื่อง “การพัฒนารูปแบบการยืดอายุเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเศรษฐกิจหมุนเวียน” สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้