

กระบวนการนำกลับนิกเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วแล้ว  
ด้วยวิธีการทางไฟฟ้า

Nickel Recovery from Spent Lithium Ion Batteries by Electrowinning



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.256

KMITL-2024-EN-M-027-270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Nickel Recovery from Spent Lithium Ion Batteries by Electrowinning



APICHAT JAKHONGSUWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2024  
KMITL-2024-EN-M-027-270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการนำกลับนิกเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วยวิธีการทางไฟฟ้า
นักศึกษา	นายอภิชาต จักหงษ์สุวรรณ
รหัสประจำตัว	61601214
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์

### บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบัน มีเทคโนโลยีการนำกลับโลหะมีค่ามาใช้ใหม่มากมาย ร่วมกับการต้องการแร่ธาตุที่หายากในโลก เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพสูงสุด ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วยวิธีการทางไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรวินิ่งเพื่อทำให้เป้าหมายสำคัญในการนำนิกเกิลบริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่ให้ได้มากที่สุด ในการทดลองได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมกระแสตรงคงที่ ให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาและทดลองหาเงื่อนไขสภาวะสภาพแวดล้อมที่ทำให้นิกเกิลกลับมาใช้ใหม่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งสุดท้ายแล้วสามารถหาเงื่อนไขสภาวะสภาพแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 99 และได้ลำดับความสำคัญของสภาวะสภาพแวดล้อม ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนี้ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย และระยะเวลาการดำเนินงาน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis** Nickel Recovery from Spent Lithium Ion Batteries by Electrowinning  
**Student** Mister Apichat Jakhongsuwan  
**Student ID.** 61601214  
**Degree** Master of Engineering  
**Program** Electrical Engineering  
**Year** 2024  
**Thesis Advisor** Assoc. Prof. Dr. Piampoom Sarikprueck

## ABSTRACT

Presently, precious metal recovery technology has been proposed widely in order to use in the industry as the maximum efficiency. Therefore, this research presents Nickel recovery method from spent Lithium-Ion batteries by electro chemical process which electrowinning is applied to recover the purest nickel. Electrical supply with constant current control is used to create the chemical reaction in this process. Several conditions are tested in this study to find the optimum condition. As the results, the maximum recovery as the percentage of 99 can be achieved and the most important parameter can be prioritized as pH solution, current density, temperature, and testing time, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา [http://www.kmutt.ac.th](#) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากคณาจารย์ เจ้าหน้าที่และหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ตักเตือน ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำงานและเอาใจใส่ในทุกอย่าง ตลอดจนให้ความรู้ ให้ประสบการณ์ที่มีคุณค่ายิ่งแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้แนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความคิดความเข้าใจ ประสบการณ์ รวมถึงให้คำชี้แนะ จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชตชนก อัทพงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดลอง เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำปรึกษาทางด้านเคมีและมลพิษสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ คุณนาตยา โมรวรรณ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางด้านการเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี การคำนวณทางเคมี กระบวนการทดลองทางเคมี ตลอดจนการส่งตรวจสารเคมี

ขอขอบคุณ คุณอรทัย ทรัพย์หุ่่น ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางด้านวงจรไฟฟ้า การคำนวณทางไฟฟ้า ระบบควบคุมอัตโนมัติ ตลอดจนถึงผลลัพธ์การอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตรายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การส่งตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคโนโลยี Inductively Coupled Plasma (ICP)

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้การเลี้ยงดูข้าพเจ้าให้เติบโตมาเป็นอย่างดีคอยดูแล ให้กำลังใจและช่วยเหลือเกื้อกูล สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา อาจารย์ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อภิชาต จักหงษ์สุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery).....	4
2.2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม.....	5
2.2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	7
2.3 การประกอบโลหะกรรม ( Metallurgical Assembly).....	8
2.3.1 วิธีการโลหะวิทยาไฟฟ้า (Electrometallurgical Process).....	8
2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply).....	9
2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer).....	10
2.4.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit).....	10
2.4.3 ไอจีบีที (Isulated gate bipolar transistors, IGBT).....	12
2.4.4 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter).....	12
2.4.5 ไดโอด (Diode).....	13
2.4.6 ออปแอมป์ (Operational amplifier).....	14
2.4.7 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator).....	14
2.4.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	15
2.4.9 อาดูยโน่ (Arduino).....	16
2.6 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 องค์ประกอบทางไฟฟ้า.....	20
3.1.1 วงจรควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	20
3.1.2 วงจรกำลังของแหล่งไฟฟ้า.....	20
3.2 วิธีการนำกลับนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง.....	21
3.2.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	21
3.2.2 แผนการดำเนินงาน.....	22
3.2.3 การวิเคราะห์ผล.....	23
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	24
4.1 ผลการทดลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง.....	24
4.1.1 ผลการทดลอง.....	24
4.1.2 ผลกระทบจากความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย.....	26
4.1.3 ผลกระทบจากเวลา.....	29
4.1.4 ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	29
4.1.5 ผลกระทบจากอุณหภูมิของสารละลาย.....	31
4.2 ประสิทธิภาพการนำกลับ.....	33
4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีการอิเล็กโทรวินนิ่ง.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	36
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	38
ภาคผนวก.....	39
ภาคผนวก ก.....	40
ภาคผนวก ข.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **W** จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
2.1 แบบทดสอบที่เยี่ยมไอออนประเภทต่างๆ.....	7
2.2 ตัวอย่างเงื่อนไขการนำกลับนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโตรวินนิ่ง.....	17
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	23
4.1 ผลการทดลอง.....	24
4.2 ประสิทธิภาพของการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีการอิเล็กโตรวินนิ่ง.....	33
4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากควบคุมอุณหภูมิ.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **VI** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่.....	4
2.2 แสดงคุณสมบัติจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมแต่ละชนิด.....	5
2.3 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	6
2.4 แสดงหลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	8
2.5 องค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสต์.....	9
2.6 สัญลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นบริดจ์.....	12
2.7 สัญลักษณ์ของไอจีบีที.....	12
2.8 วงจร Buck Converter.....	13
2.9 สัญลักษณ์ของไดโอด.....	13
2.10 ไอซีของไดโอด.....	14
2.11 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา.....	15
2.12 องค์ประกอบกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสต์.....	17
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	20
3.3 แผนผังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
3.4 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชนิด stainless steel 316L.....	22
4.1 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน.....	26
4.2 ตัวอย่างลักษณะตะกอนก้นกล่องการทดลอง.....	27
4.3 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	27
4.4 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน.....	28
4.5 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	28
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ณ เวลาการทดลองต่างกัน.....	29
4.7 เปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน.....	30
4.8 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน.....	30
4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่างกัน.....	31
4.10 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลายสารละลาย ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน.....	32
4.11 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน.....	32
4.12 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน.....	33
4.13 ตัวอย่างสารละลายภายหลังกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสต์.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรองจากน้ำมันเชื้อเพลิง เมื่อพลังงานไฟฟ้ามีความต้องการใช้งานจากมนุษย์สูง จึงทำให้ต้องมีสิ่งกักเก็บพลังงานที่ต้องใช้ตามความต้องการของตัวเอง จึงเกิดแบตเตอรี่ขึ้น ปี พ.ศ. 2402 และพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง จนถึงการมาของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีที่สุด น้ำหนักเบา และเก็บค่าพลังงานได้เยอะที่สุด [1] แนวโน้มการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมในประเทศไทยมีจำนวนมากขึ้นทุกปี ตั้งแต่ ปีพ.ศ. 2553 มีขนาด 22 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี จนถึง ปีพ.ศ. 2573 มีขนาด 390 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี [2]

เมื่อมีการใช้สิ่งใดสิ่งหนึ่งมากเกินไปจนเกินที่ควรเป็น และของทุกสิ่งมีอายุของตัวเอง ดังนั้น แบตเตอรี่ลิเทียมจึงมีปัญหาเมื่อเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานแล้วกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ต้องถูกกำจัดของเสียตามกระบวนการที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าขยะแบตเตอรี่ลิเทียมในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปีอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [2] และ ค้นพบว่าวัสดุขีปนาวุธที่มีมูลค่า, เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้ยาก และกำลังจะขาดแคลนภายในแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ผ่านกระบวนการรีไซเคิล เช่น ลิเทียม นิกเกิล แมงกานีส และโคบอลต์ เป็นต้น จากการศึกษามูลค่าวัสดุขีปนาวุธที่นำมาผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมพบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมที่มีขั้วแคโทดเป็นชนิดลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ ) มีมูลค่าของแคโทดอยู่ที่ 10-13 ดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ สูงเป็นอันดับที่ 2 [2] ดังนั้นแนวทางเกี่ยวกับการรีไซเคิลนำธาตุ นิกเกิลกลับมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วนำมาประยุกต์ให้มีประสิทธิภาพเพื่อสร้างมูลค่าใหม่และแก้วิกฤตการขาดแคลนแร่ธาตุหายากปัจจุบันเทคโนโลยีการรีไซเคิลเพื่อนำกลับธาตุโลหะต่างๆ ออกจากแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วกำลังได้รับการพัฒนาและได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั่วโลกในประเทศต่างๆกำลังศึกษาวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการที่จะสกัดธาตุโลหะออกจากแบตเตอรี่ลิเทียม มี 2 กระบวนการคือ 1.กระบวนการโลหวิทยาทางความร้อน 2.กระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgical process) เนื่องด้วยกระบวนการที่ 2 ไม่เกิดมลพิษทางอากาศและต้นทุนต่ำกว่า และยังมีเทคนิคหลายวิธีประกอบไปด้วย การชะละลาย (leaching) การตกตะกอน (precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การสกัดด้วยสารละลาย (solvent extraction) และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ในที่กล่าวมาประสิทธิภาพกระบวนการนำกลับธาตุโลหะได้ดีที่สุดคือ กระบวนการทางไฟฟ้า หรือ กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinnings) [2] กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง คือการทำให้ธาตุโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายมาเกาะอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด เมื่อทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการกำกับดูแลค่าพารามิเตอร์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าความเป็นกรด-ด่าง เวลา และอุณหภูมิของสารละลาย ให้ได้สถานะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับธาตุโลหะโดยตรง มีการศึกษาวิจัยในประเทศและต่างประเทศได้มีการศึกษาถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์แต่ไม่ละเอียด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการนำกลับธาตุโลหะ ด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้ว มีจุดมุ่งหมายเป็นโลหะธาตุ निकเกิล เนื่องจากเป็นธาตุที่กำลังจะขาดแคลนในอนาคตและมีมูลค่าสูง และศึกษาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติคงที่สม่ำเสมอ (Automatic controlled DC power supply) ใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับการทดลอง และศึกษาหาเงื่อนไของค์ประกอบของการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ด้วยกัน ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เวลา และ อุณหภูมิของสารละลาย เพื่อสามารถนำกลับ निकเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับ निकเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมที่ใช้งานแล้ว ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สามารถสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับการนำกลับ निकเกิลได้ค่าสูงที่สุด
- 2) เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ ทางด้านการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่งกับธาตุโลหะ ในประเทศไทย
- 3) เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้ และส่งเสริมแนวความคิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ในด้าน สร้างหลักประกันว่าทุกคนเข้าถึงพลังงานสมัยใหม่ในราคาที่สามารถซื้อหาได้ เชื่อถือได้ และยั่งยืน

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการนำกลับ निकเกิลมากขึ้นหรือลดลงได้ ที่เกิดจากตัวแปรดังต่อไปนี้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เวลาดำเนินการทดลอง และ อุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้น กระบวนการทดลอง เริ่มจากเตรียมแหล่งจ่ายทางไฟฟ้าและเคมี เตรียมสารทดลอง เริ่มกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เก็บผลการทดลองในรูปแบบของแข็งและของเหลวที่เหลือ ส่งตรวจด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	•	•								
2.ศึกษาวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า แบบป้อนกลับ		•	•	•						
3.จัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ				•						
4.ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์						•	•			
5.ส่งตรวจผลิตภัณฑ์								•		
6.วิเคราะห์และสรุปผล								•		
7.จัดทำวิทยานิพนธ์									•	•

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เทคโนโลยีกระบวนการแปรรูป หรือปรับปรุงคุณภาพ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยความบริสุทธิ์สูงออกจากแบตเตอรี่ใช้งานแล้วได้มากกว่าร้อยละ 99
- 2) เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ ทางด้านการทดลองอิเล็กทรอนิกส์กับธาตุโลหะ ที่มีสภาพแวดล้อมภายนอกของประเทศไทย
- 3) ผลการศึกษาสามารถนำมาเป็นแนวทางในการนำกลับธาตุโลหะชนิดนี้เกิดด้วยวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวทางเป้าหมายที่ยั่งยืนของโลก (SDGs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

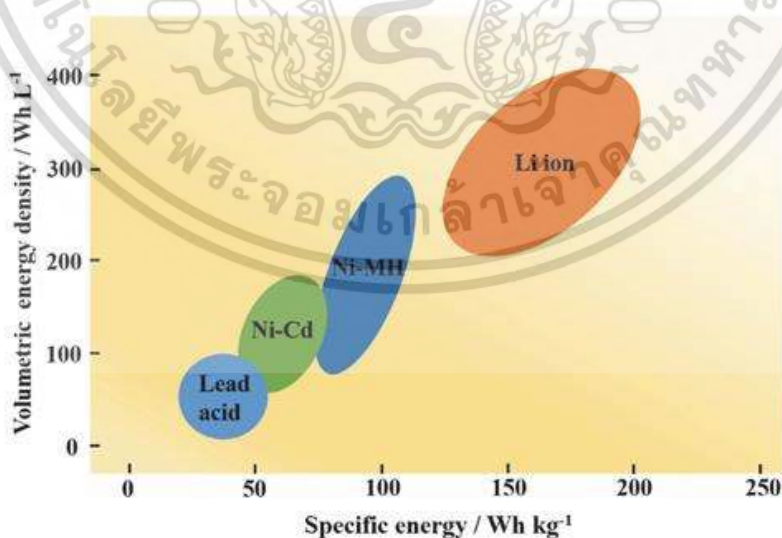
### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มผลลัพท์ที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินิจจากแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้ว มีเป้าหมายสำคัญคือการนำนิเกิลกลับมาใช้ใหม่ ผู้วิจัยได้ศึกษาทบทวนงานวิจัย วารสาร การประชุมวิชาการ บทความ วิทยานิพนธ์ รวมถึงหนังสือที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ มีเนื้อหาหลักสำคัญเกี่ยวข้องกับ การแปรรูปหรือปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของแบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออน แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นบรรทัดฐานของการศึกษาครั้งนี้

#### 2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery)

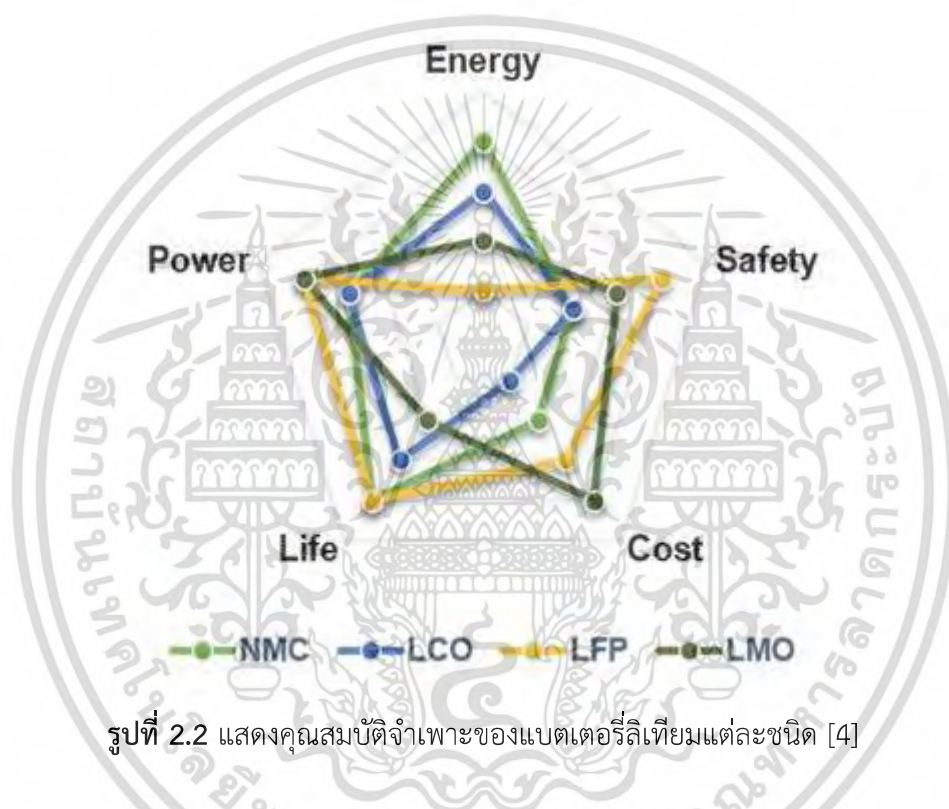
แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง และสามารถชาร์จซ้ำไม่เกิดปัญหาชาร์จแล้วประจุไม่เต็ม (Memory Effect) ความหนาแน่นของพลังงานแบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออน มีค่าประมาณ 125 ถึง 200 Wh/kg ซึ่งถือว่าสูงมากที่สุดดังแสดงในรูป 2.1 [4] อายุการใช้งานเต็มประสิทธิภาพ ประมาณ 12-18 เดือน ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานและการดูแลรักษา ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ คือ อุณหภูมิใช้งาน การประจุเกินเวลา (overcharge) ความลึกการคายประจุ (deep discharge) และการเสื่อมสภาพเนื่องจากกระแสสูงเกินไป (overcurrent) และถูกเก็บไว้ไม่ใช้งานก็เสื่อมสภาพได้ ความหนาแน่นของพลังงานแบตเตอรี่ ผู้ใช้งานควรอ่านคู่มือวิธีการใช้งานเพื่อดูแลรักษาแบตเตอรี่อย่างถูกวิธี [3]



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ลิเทียมชนิดไอออนเป็นแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิที่สามารถประจุไฟใหม่ได้ ซึ่งแก้ปัญหาขยะก่อนมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ ใช้แล้วทิ้ง ปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายแทนแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด (Lead-acid) นิกเกิล-แคดเมียม(Ni-cd) และนิกเกิล-เมทัลไฮไดร (Ni-MH) ทำให้เป็นส่วนประกอบแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง อายุการใช้งานยาวนาน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จึงมีประสิทธิภาพต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุตสาหกรรมต่างๆ



รูปที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมแต่ละชนิด [4]

### 2.2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม

ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน [5] คือ

1) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยมีสารประกอบจำพวกลิเทียม หรือเกลือของลิเทียม เป็นวัสดุขั้วแคโทด (Cathode) เช่น ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LCO) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium-manganese oxide, LMO) และลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP) และมีสารคาร์บอน (Carbon) หรือแกรไฟต์ (Graphite) เป็นวัสดุขั้วแอโนด (Anode)

2) แผ่นกั้น (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจรของกระแส สารประกอบลิเทียมสามารถซึมผ่านได้ ทำมาจากโพลิเมอร์ (PP/PE)

3) ตัวรับกระแส (Current collector) เป็นโลหะตัวนำ ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านออกสู่วงจรรภายนอก เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ส่วนมากทำมาจากวัสดุ อลูมิเนียม (AL) และทองแดง (Cu)

4. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายอินทรีย์ที่มีเกลือลิเทียมเป็นตัวยึดประกอบ นำไฟฟ้าได้ดี สามารถแตกตัวเป็นไอออนอิสระและยอมให้แต่ไอออนไหลผ่านไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน จึงเป็นตัวนำไอออนที่ดีแต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่ไม่ดี



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

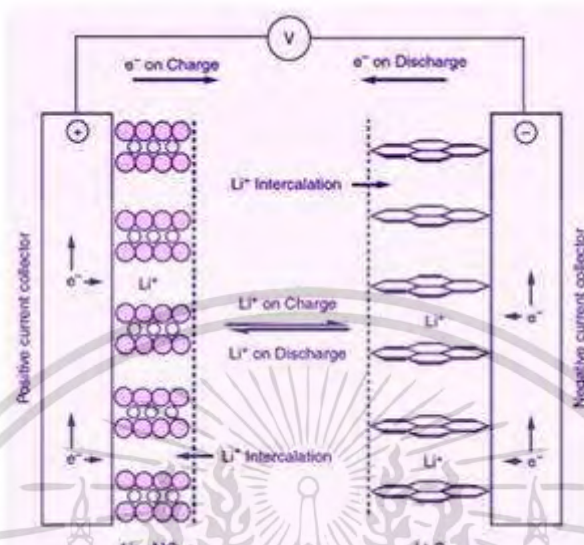
ตารางที่ 2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ [5]

ลำดับที่	วัสดุขั้วบวก	วัสดุขั้วลบ	การใช้งาน
1	Lithium Cobalt Oxide (LCO)	แกรไฟต์	โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แล็ปท็อป กล้องดิจิทัล
2	Lithium Manganese Oxide (LMO)	แกรไฟต์	เครื่องมือไฟฟ้า (Power tools) อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลัง ในยานยนต์ไฟฟ้า
3	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	แกรไฟต์	จักรยานไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบสำรองไฟฟ้า
4	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	แกรไฟต์	อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลัง ในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบสำรองไฟฟ้า
5	Lithium Iron Phosphate (LFP)	แกรไฟต์	ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบที่ต้องการกระแสและความ ทนทานสูง
6	LMO หรือ แกรไฟต์	Lithium Titanate (LTO)	ระบบสำรองไฟฟ้า ระบบส่งกำลัง ในยานยนต์ไฟฟ้า

### 2.2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้านั้นเกิดจากการแพร่ของลิเทียมไอออนบวก จากขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ และจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อประจุรวมของสารที่แพร่ทั้งหมด (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) มีค่าเป็นกลางเนื่องจากอิเล็กโตรไลต์ไม่สามารถเป็นสื่อนำอิเล็กตรอนได้ การแพร่ของลิเทียมไอออนบวก จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกหรือโลหะตัวนำทำให้อิเล็กตรอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิ่งผ่าน ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้านำไปใช้ประโยชน์ได้ หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [5]

## 2.3 การประกอบโลหะกรรม (Metallurgical Assembly)

คือ การทำวัตถุดิบที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบให้เป็นสารประกอบโลหะด้วยวิธีการใดๆ เช่น วิธีการโลหะวิทยาความร้อน (Pyrometallurgical Process) วิธีการโลหะวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgical Process) วิธีการโลหะวิทยาไฟฟ้า (Electrometallurgical Process) และ วิธีการอื่นๆ

### 2.3.1) วิธีการโลหะวิทยาไฟฟ้า (Electrometallurgical Process)

เป็นวิธีการสกัดโลหะ ออกจากสารละลายโลหะโดยใช้พลังงานกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนรูปอนุโมลโลหะให้มีค่าไอออนบวกและไอออนลบ เป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ทำให้โลหะเกาะอยู่ขั้วแคโทด สามารถแยกโลหะออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้

#### 1) กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิ่ง (Electrorefining)

คือ กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรง จากภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้าเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ มักจะใช้กับการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า หลักการคือ ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ ไอออนของโลหะในสารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าน้ำ จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เกิดเป็นอะตอมของโลหะเคลือบอยู่ที่ผิวของขั้วแคโทดที่นำมาชุบ ขณะที่โลหะขั้วบวก เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลาย เพื่อชดเชยไอออนของโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปให้อะตอมที่ผิวโลหะขั้วแคโทดที่จะชุบ ขั้วบวกจึงสึกกร่อนไป ขั้วลบมีโลหะมาเกาะมากขึ้น

#### 2) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

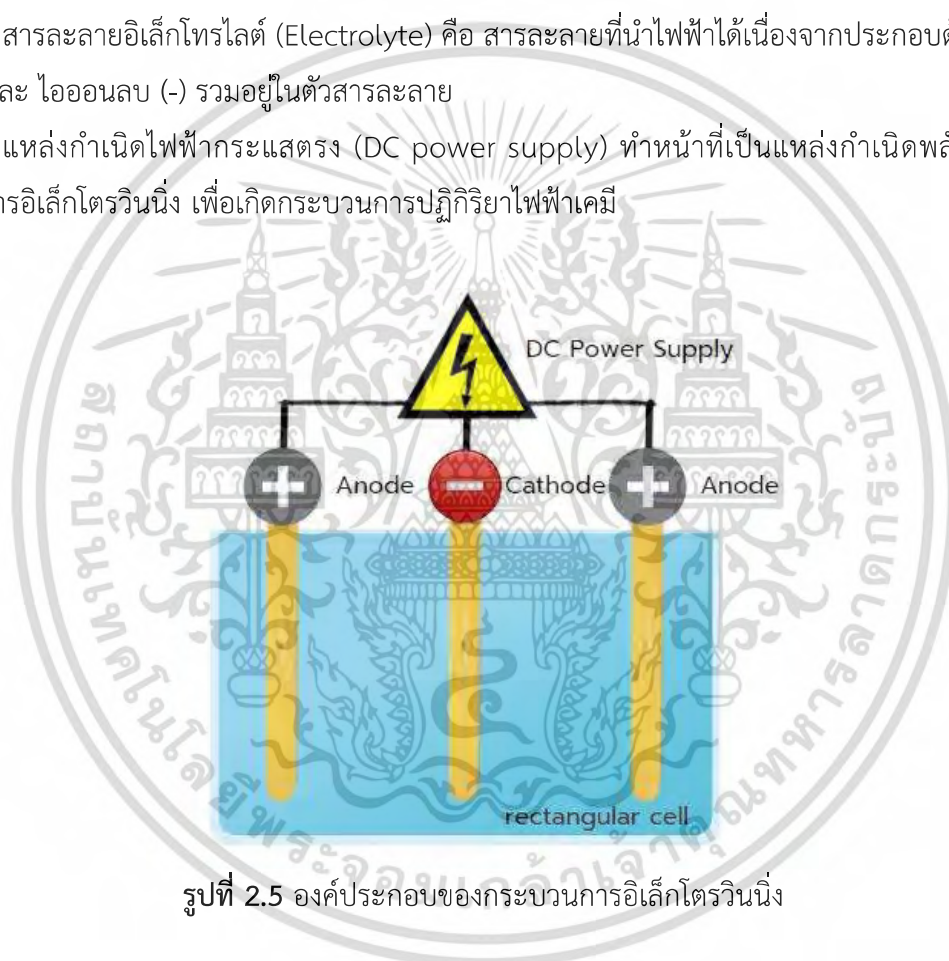
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้สารละลายโลหะ เช่น เหล็ก ไทเทเนียม ถูกปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โลหะรวมตัวกันเป็นอนุกรมมากขึ้นเกาะที่ขั้วแคโทด ทำให้สามารถแยกโลหะออกจากสารละลายโลหะ ทำให้โลหะที่ได้ออกมามีความบริสุทธิ์สูง มีองค์ประกอบที่เป็นพื้นฐานของกระบวนการ อยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ

1) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) แผ่นตัวนำไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรง วัสดุที่นำมาทำขั้วไฟฟ้าจะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นขั้วเฉื่อย (Inert electrode) เช่น แกรไฟต์ (Graphite, C) และแพลทินัม (Platinum, Pt) เป็นต้น มี 2 ขั้ว 1) ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วบวก (+) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และ 2) ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วลบ (-) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)

2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่นำไฟฟ้าได้เนื่องจากประกอบด้วยไอออนบวก (+) และ ไอออนลบ (-) รวมอยู่ในตัวสารละลาย

3) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เพื่อเกิดกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

## 2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ดังนั้น จึงต้องการแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่กระบวนการ มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภท คือ

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่ (constant voltage DC power supply, CVDC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรไฟฟ้าที่แรงดันเอาต์พุตคงที่ตลอดเวลา ไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเกิดสภาวะใดๆ อุณหภูมิ การใช้พลังงานของโหลด รวมถึง การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบในระบบที่มีวงจรอยู่ จึงมีประโยชน์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อนด้านแรงดันไฟฟ้า

## 2) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสคงที่ (constant current DC power supply, CCDC)

เป็นวงจรไฟฟ้าที่ควบคุมกระแสเอาต์พุตคงที่ ไม่สนใจการใช้พลังงานของโหลด หรือสภาวะใดๆ เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่ เพียงแต่เปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า เพื่อจะควบคุมในการใช้งาน เช่น UPS ที่ต้องการกระแสคงที่เพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนานตามผู้ออกแบบได้กำหนด เป็นต้น

### 2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าตามการตั้งค่าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังวงจรไฟฟ้าหนึ่ง หรือ การปรับเปลี่ยน แรงดัน กระแส เพื่อจ่ายโหลดตามภาระที่ต้องการ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน [3] คือ

#### 1) แกนเหล็ก

มีลักษณะเป็นแผ่นบางเคลือบด้วยฉนวน เรียกว่าแผ่นลามิเนต เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss) อัดซ้อนเข้าด้วยกันเป็นรูปทรง เมื่อดูที่สันแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นเหล็กแต่ละแผ่นเรียงกันอย่างชัดเจน

#### 2) ขดลวดตัวนำ

ด้านขาเข้าขดลวดทำหน้าที่ต่อกับแรงดันไฟฟ้าก่อนปรับแรงดัน ส่วนขาออกขดลวดทำหน้าที่ป้อนไฟฟ้าให้กับโหลด ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ขด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) เป็นขดลวดด้านขาเข้าต่ออยู่กับแหล่งจ่ายหรือระบบไฟฟ้าที่ต้องการปรับแรงดัน และขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) เป็นขดลวดด้านขาออก เป็นขดลวดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด

### 2.4.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแส คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางเดียวโดยมีอุปกรณ์สำคัญคือ ไดโอด เป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้าสลับที่มีคลื่นด้านบวกและลบ ให้มีเฉพาะคลื่นด้านบวกหรือลบด้านเดียวผ่านไปได้ มีรูปแบบวงจร 3 รูปแบบ คือ

#### 1) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ใช้ไดโอดจำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่เปลี่ยนอินพุตกระแสสลับเป็นกระแสตรง เฉพาะคลื่นไซเคิลบวกของอินพุตเท่านั้น เพราะไดโอดได้ถูกออกแบบมาให้ทำงานนำกระแส (ON) เมื่อได้รับคลื่นไซน์ด้านครึ่งไซเคิลบวกเท่านั้น ไดโอดจะได้รับการไบแอสโดยตรง จึงเกิดกระแสไหลจากแหล่งจ่ายกระแสสลับไปสู่ปลายทาง แต่เมื่อคลื่นไซน์อินพุตเป็นด้านครึ่งไซเคิลลบ ไดโอดจะไม่นำกระแส (OFF) จึงไม่มีกระแสไหลผ่านได้ รูปคลื่นที่ไปสู่ปลายทางจึงปรากฏเฉพาะครึ่งไซเคิลบวกเท่านั้น กระแสที่ไปสู่ปลายทางนั้นยังไม่เรียบพอใช้งานได้อย่างมีคุณภาพ จึงต้องมีการกรองคลื่นด้วยตัวเก็บประจุ (Filter Capacitor) ทำหน้าที่ให้กระแสตรงจากไดโอดสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ไม่เป็นคลื่น เรียบ (Smooth) ทำให้แรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรงที่ได้จากการเรียงกระแสมีคุณภาพใกล้เคียงกับแรงดันกระแสตรงที่ได้มาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุจำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งต่อขนานกับทิศทางไปสู่อุปกรณ์เอาต์พุตของวงจร ตัวเก็บประจุ จะเก็บประจุช่วงแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าแรงดันตกคร่อม และช่วงแรงดันเอาต์พุตต่ำกว่านั้น จะคายประจุมาชดเชย

## 2) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier)

### 2.1) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท่งกลาง

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น จะสามารถเรียงแรงดันไฟฟ้าสลับให้ออกเอาต์พุตได้ทั้งคลื่นลูกขึ้นของแรงดันไฟฟ้าสลับที่ป้อนเข้ามาที่อินพุตของวงจร โดยไม่มีส่วนใดของคลื่นแรงดันไฟฟ้าสลับถูกลบทิ้งไป ลักษณะของวงจรจะใช้ไดโอด 2 ตัว ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ มีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท่งกลาง (Center Tap) ทำหน้าที่แบ่งเฟสที่แตกต่างกัน 180 องศา เป็น 2 ส่วนแยกกันที่ส่วนบนและส่วนล่างของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อต่างเข้า ไดโอดทั้ง 2 ตัวสลับกันทำงาน ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีรูปคลื่นแบบเต็มคลื่นมีค่าสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นเป็น 2 เท่า จ่ายกระแสไฟฟ้ได้เรียบและสูงกว่าด้วย

### 2.2) วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

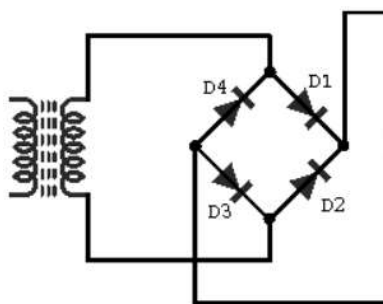
แรงดันได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นยังมีระลอกคลื่นปนอยู่ปริมาณสูง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน จะต้องนำแรงดันนี้ไปผ่านวงจรกรองก่อนที่จะนำไปใช้งาน วงจรกรองแบบที่ง่ายและนิยมที่สุดก็คือ วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุ C ต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด RL ตัวเก็บประจุ C จะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในช่วงเวลาไดโอดนำกระแสและทำหน้าที่คายประจุผ่านตัวต้านทานโหลดในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส การทำงานของวงจรกรองจะทำการกรองแรงดันไฟตรงที่ยังไม่เรียบให้มีความราบเรียบยิ่งขึ้นสามารถนำไปใช้งานกับวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ อีกทั้งแรงดันไฟตรงที่ได้เมื่อผ่านการกรองแรงดันแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยคำนวณได้จากสูตร  $V_{DC} = V_P = 1.414$  คูณ VAC วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนั้น ไดโอดทั้ง 2 ตัวจะผลัดกันทำงานคนละครึ่งไซเคิล ทำให้การเรียงกระแสออกมาครบทั้งซีกบวกและซีกลบสามารถปรับให้เรียงกระแสให้ออกมาเป็นซีกบวกอย่างเดียวเรียงกันไป หรือปรับถ้าต้องการเรียงกระแสให้ออกมาเป็นซีกลบก็สามารถทำได้โดยการกลับขั้วไดโอดทั้ง 2 เสียใหม่

### 3) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์นั้น จะใช้ไดโอด 4 ตัว ใช้หม้อแปลง 2 ขั้ว, 3 ขั้ว หรือจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงก็ย่อมได้ หลักการทำงานของวงจร ไดโอดผลัดกันนำกระแสครั้งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสลับ ปรากฏที่ด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ และด้านล่างปรากฏไซเคิลลบ จะทำให้ ไดโอด D1 และ D3 ได้รับการไบอัสโดยตรง จะมีกระแสไหลผ่าน ไดโอด D1 ผ่านไปยังแหล่งที่ต้องการจ่ายกระแสไฟฟ้า กลับมาผ่านไดโอด D2 ครบวงจรที่ขดลวดด้านล่างทุติยภูมิ ต่อมาไซเคิลลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ปรากฏด้านบนขดลวดทุติยภูมิ และด้านล่างปรากฏไซเคิลบวก ทำให้ ไดโอด D1 และ D3 ได้รับการไบอัสกลับ แต่ไดโอด D2 และ D4 จะได้รับไบอัสตรง ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ไดโอด D2 ผ่านไปยังแหล่งที่ต้องการจ่ายกระแสไฟฟ้า กลับมาผ่านไดโอด D4 ครบวงจรที่ขดลวดด้านบนทุติยภูมิ ทำให้ได้คลื่นไฟตรงรวมกันเต็มลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

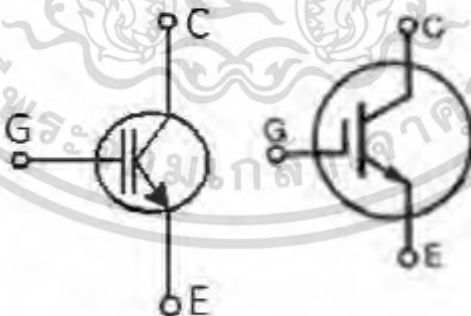
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นบริดจ์

#### 2.4.3) ไอจีบีที (Isolated gate bipolar transistors, IGBT)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พัฒนาขึ้นมาไม่นานนัก โดนใช้การผสมผสานกันระหว่างข้อดีด้านเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์และข้อดีด้านอินพุตของมอสเฟต กล่าวคือ ไอ.จี.บี.ที.จะมี คุณสมบัติด้านอินพุตเหมือนมอสเฟต คือมีความต้านทานอินพุตสูงมาก แต่มีความต้านทานเอาต์พุตเมื่อนำกระแสต่ำ ทำให้ไอ.จี.บี.ที.เป็น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ ควบคุมการเปิด-ปิดของกระแสไฟฟ้าได้ด้วยแรงดัน (Voltage control current source) เช่นเดียวกับมอสเฟตกำลัง ไอ.จี.บี.ที.ที่เป็นสวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำงาน ได้ในย่านความถี่สูงกว่าทรานซิสเตอร์แต่ต่ำกว่ามอสเฟต คือที่ความถี่ระหว่าง 1kHz-100kHz แต่พิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า มอสเฟตกำลัง คือ 500A/2000V ไอ.จี.บี.ที. มีสามขา ขาอินพุตคือ เกต(G) ขาเอาต์พุต คือ คอลเลกเตอร์ (C) และ อิมิตเตอร์ (E) โครงสร้างของมันเมื่อพิจารณาจากรูป 2.6 ที่อินพุตจะพบว่าเหมือน มอสเฟต ตัวหนึ่งต่ออยู่ และทางเอาต์พุตเปรียบเหมือน เป็นทรานซิสเตอร์กำลัง และ สัญลักษณ์ของ ไอ.จี.บี.ที.

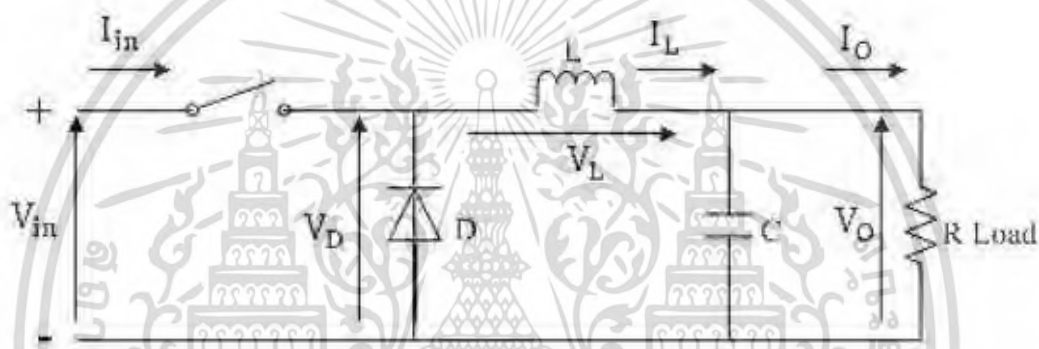


รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

#### 2.4.4 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

คุณสมบัติเฉพาะตัวของวงจร คือระดับขาเข้าจะสูงกว่าแรงดันขาออกของวงจรเสมอ ระดับแรงดันขาออกเปลี่ยนแปลงตามค่าของ Duty Cycle ซึ่งคือ อัตราส่วนช่วงเวลาสวิทซ์ปิดวงจรกับคาบเวลาการทำงาน มีการทำงานของสวิทซ์เปิดและปิดเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเฉลี่ย แล้วนำไปต่อกับวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ให้ได้กระแสตรงมากๆ โดยมากจะเลือกใช้วงจรแบบ LC เพราะ มีอัตราการลดทอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

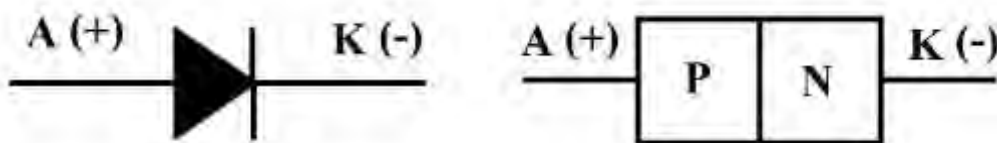
สัญญาณที่ไม่ซับซ้อน วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ มี 2 แบบ ที่นิยมใช้งานกัน คือ แบบตัวเหนี่ยวนำขดลวดเดี่ยว ดังรูปที่ 2.8 หลักการทำงาน เมื่อครบวงจร แรงดันไฟฟ้าบวก โหลดผ่านขดลวด L ไปชาร์จประจุ C พร้อมไหลผ่าน R ก่อนครบวงจรที่ขั้วลบ หลักการทำงานของอุปกรณ์ ดังนี้ ขดลวด L เกิดประจุเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเก็บสะสมพลังงานไว้ในตัวขดลวด L มีแรงดันตกคร่อมขดลวด L ทำให้กระแสของขดลวด L ไหลไปทางซายไดโอด D ได้รับรีเวิร์สไบอัสไม่สามารถนำกระแสได้ ในขณะเดียวกันกระแสและแรงดันที่อยู่ใน C ก็จะดิสชาร์จให้กับโหลด R เมื่อเปิดวงจร ไม่มีกระแสไหลผ่านไปที่ขดลวด ทำให้สนามแม่เหล็กในขดลวด L ยุบตัว เกิดการกลับขั้วแรงดัน ไดโอด D จึงได้รับไบอัสตรง พลังงานสะสมในขดลวด L ถูกจ่ายให้ตัวเก็บประจุ C ไดโอด D ได้รับไบอัสตรงดังนั้นจึงยอมให้กระแสผ่านได้ และตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุและแรงดันเพื่อสำรองจ่ายให้ โหลด R ต่อไป



รูปที่ 2.8 วงจร Buck Converter

#### 2.4.5 ไดโอด (Diode)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่ได้เกิดจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) มาต่อชนกัน เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) ไดโอดมีคุณสมบัติ คือ สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าจากภายนอกให้ไหลผ่านได้ทิศทางเดียว ส่วนกระแสที่ไหลทิศทางตรงข้ามกันจะถูกกั้น สามารถนำไดโอดมาใช้เป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และใช้เป็นตัวแยกสัญญาณในเครื่องรับวิทยุได้ ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode; A) หรือขาขั้วบวก (+) ที่จะต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) และ แคโทด (Cathode; K) หรือขาขั้วลบ (-) ที่จะต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type)



รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 ออปแอมป์ (Operational amplifier)

เป็นวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดวางอุปกรณ์ภายในอย่างซับซ้อน ประกอบด้วย เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ และไดโอด เป็นต้นทำหน้าที่ขยายแรงดัน เป็นวงจรที่นำมาใช้งานที่สุดในวงจรรีเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าได้ ขยายสัญญาณทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ขยายแบนด์วิธ (Bandwidth) เอ้าท์พุทมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ออปแอมป์เป็นวงจรรวม (IC) มีรูปแบบต่างๆกัน ปัจจุบันที่พบเห็นบ่อยคือ แบบบรรจุในตัวถังพลาสติกที่เรียกว่าคูอัลอินไลน์ (Dual in-line package, DIP) มี 8 ขาหรือขั้ว (Terminal) ดังรูปที่ 2.9

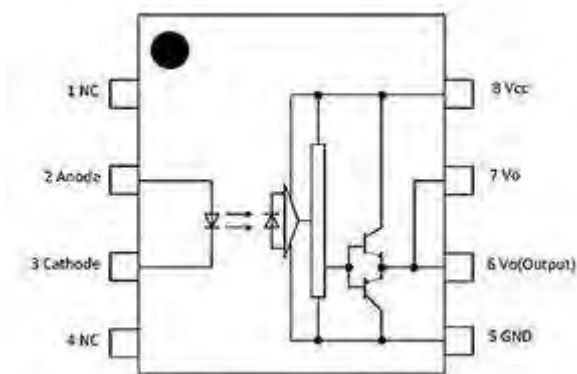


รูปที่ 2.10 ไอซีของไดโอด

#### 2.4.7 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator)

optoisolator (เรียกอีกอย่างว่า optocoupler) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสงเพื่อจับคู่สัญญาณจากอินพุต (photoemitter เช่น LED) ไปยังเอาต์พุต (photodetector เช่น photo-diode) รูปด้านบนแสดงออปติโซเลเตอร์ไดโอดแบบ LED-photo LED อยู่ทางซ้ายและโฟโตไดโอดอยู่ทางขวา การจัดเรียงที่แสดงในรูปที่ เรียกว่า ออปโตคัปปลิ่ง เนื่องจากเอาต์พุตจากวงจร LED เชื่อมต่อผ่านแสงไปยังวงจรโฟโตไดโอด เมื่อ LED ได้รับพลังงาน กระแสจะไหลผ่าน LED แสงจาก LED กระทบโฟโตไดโอดและตั้งค่ากระแสย้อนกลับผ่านตัวต้านทาน R2 แรงดันไฟฟ้าข้ามโฟโตไดโอดได้รับจาก:  $V_{out} = V_{SS} - I R_2$  แรงดันไฟขาออกขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสย้อนกลับ ถ้าเราเปลี่ยนแหล่งจ่าย LED ปริมาณของแสงจะเปลี่ยนและทำให้กระแสไฟโฟโตไดโอดเปลี่ยนไป ส่งผลให้  $V_{out}$  เปลี่ยนไป ข้อได้เปรียบที่สำคัญของ optoisolator คือการแยกทางไฟฟ้าระหว่างวงจรอินพุตและเอาต์พุต หน้าสัมผัสเดียวระหว่างวงจรอินพุตและเอาต์พุตคือกระแสไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา

#### 2.4.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีความสามารถเป็นเศษส่วนของคอมพิวเตอร์ กล่าวคือ มีความสามารถแบบคอมพิวเตอร์แต่สามารถทำงานได้เพียงชุดคำสั่งเล็กๆ ไม่ซับซ้อน ใช้หน่วยความจำไม่เยอะ ซึ่งชิ้นส่วนที่ประกอบในคอมพิวเตอร์ได้ถูกรวมไว้ในบอร์ดเดียวกัน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ สามารถโปรแกรมคำสั่งควบคุมเอาต์พุตได้ องค์ประกอบหลักมีทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

##### 1) หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงาน หรือประมวลผล ตามชุดของคำสั่งเครื่องจากซอฟต์แวร์ หน่วยประมวลผลเปรียบเสมือนเป็นสมองของคอมพิวเตอร์ ในการทำหน้าที่ตัดสินใจหรือคำนวณ จากคำสั่งที่ได้รับมา เช่น การเปรียบเทียบ การกระทำการทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น โดยมีกระบวนการพื้นฐานคือ อ่านชุดคำสั่ง (fetch), ตีความชุดคำสั่ง (decode), ประมวลผลชุดคำสั่ง (execute), อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ (memory) และเขียนข้อมูล/ส่งผลการประมวลกลับ (write back)

##### 2) หน่วยความจำ (Memory)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใด ๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกับกระดานหัดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป

##### 3) ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (Port)

มีหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับส่งสัญญาณระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายนอก มี 2 หลักการทำงาน 1) พอร์ตอินพุต (Input port) รับสัญญาณภายนอกเข้าสู่ภายในเพื่อประมวลผล 2) พอร์ตเอาต์พุต (Output Port) สัญญาณที่ประมวลผลแล้วส่งภายนอก

##### 4) ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)

เป็นช่องทางสำหรับส่งสัญญาณไปและกลับของซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ตต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

### 2.4.9 อาดูยโน้ (Arduino)

เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา Input/Output ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม อาดูยโน้ มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

#### 1) ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU: Microcontroller Unit) เป็นการร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ประกอบเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน หรือที่เรียกกันว่า บอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino เองก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ โดยในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดหรือสเปค เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ แรงดันไฟที่ใช้ประสิทธิ

#### 2) ซอฟต์แวร์ (Software)

ใช้ภาษา C / C++ เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload)

## 2.5 การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

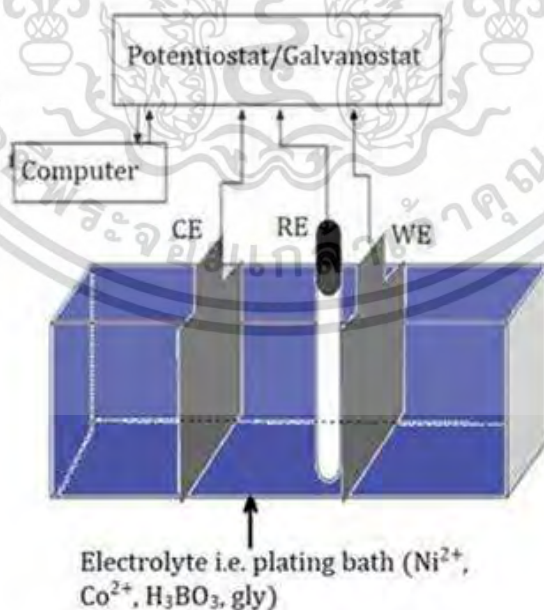
กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์หนึ่ง เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี หนึ่งในวิธีของการประกอบโลหะกรรม แยกสารประกอบโลหะออกจากสารละลาย โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมสภาพแวดล้อมตามค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งสมมุติฐานไว้ เกิดการนำกลับโลหะหนักเกิดให้มากที่สุด มีพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุม อาทิ ความหนาแน่นทางไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลากระบวนการ สารละลายที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของสารละลาย คุณภาพของตัวทำละลายสารละลาย เป็นต้น ถือว่าเป็นเทคโนโลยีการรีไซเคิลอย่างหนึ่งนำวัสดุที่ใช้แล้วนำมาประกอบใช้ใหม่ เป็นกระบวนการสำคัญในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจาก ควบคุมต้นทุน อันเป็นปัจจัยสำคัญอันดับในการทำธุรกิจ งานวิจัยทางด้านกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์หนึ่ง มีทั้งในประเทศและต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเงื่อนไขการนำกลับนิกเกิลเกิดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง [8]

Nickel electrowinning results with different cathodes, performed at 250 A/m <sup>2</sup> with an electrolyte containing 65 g/l Ni					
Time (min)	Catholyte pH	T (K)	$\eta_l$ (%)	$\Delta V$ (V)	SEC (KWh/kg)
<i>Stainless steel AISI 316L cathode material</i>					
14	5.2	RT	71.80	3.145	4.000
19	4.2	RT	83.02	3.160	3.476
50	3.2	313	89.43	2.936	2.998
54	4.2	313	92.64	3.035	2.992
<i>Aluminium cathode material</i>					
26	4.2	RT	–	3.206	–
48	3.2	RT	–	3.087	–
<i>Titanium cathode material</i>					
21	4.2	313	90.00	3.010	3.054
32	4.2	RT	72.33	–	–
62	3.2	RT	58.30	2.894	4.675

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า การนำกลับนิกเกิลนั้น สนใจค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิของสารละลาย แรงดันไฟฟ้า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย และเวลาดำเนินการ สุดท้ายแล้วนำกลับนิกเกิลได้มากที่สุด ร้อยละ 92.64 และค้นพบว่า อุณหภูมิของสารละลายส่งผลต่อค่าการนำกลับ และชนิดขั้วของแคโทดก็มีความสำคัญต่อกระบวนการนำกลับเช่นกัน [8]



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศใช้องค์ประกอบกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินิจแบบเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันออกไป ตามสภาพแวดล้อม ค่าพารามิเตอร์และแนวคิด [9] ในงานวิจัยนี้ คำนึงถึงแรงดันไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-ด่างสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองนี้นำกลัษธาตุนิกเกิดในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์วินิ่ง โดยจะศึกษาทดลองหาสภาวะแวดล้อมที่ดีที่สุด มีประสิทธิภาพสูงทำให้มีการสูญเสียด้านต่างๆน้อยที่สุด แผนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

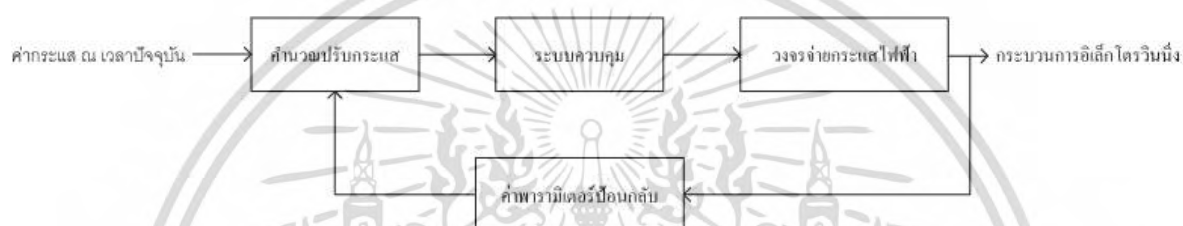
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 องค์ประกอบทางไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นองค์ประกอบหลักในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โตรวินนิ่ง เนื่องจาก ปฏิบัติการเคมีในการทดลอง ถูกพลังงานไฟฟ้ากระตุ้นและดำเนินงานทางเคมีไฟฟ้า แรงดันและกระแสของการจ่ายกระแสไฟฟ้ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับนิเกิลเป็นอย่างมาก จึงศึกษาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีรายละเอียดที่ศึกษาดังนี้

#### 3.1.1 วงจรควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า

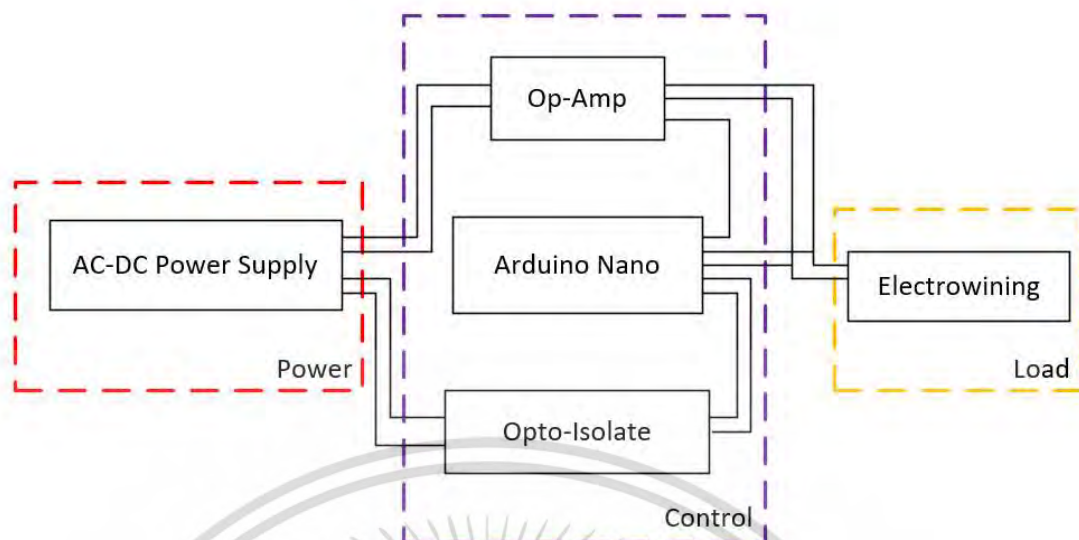
วงจรควบคุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง มีหน้าที่ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีค่าคงที่ตามต้องการโดยอาศัยการทำงานแบบวงจรถ้อนกลับด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino nano



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

#### 3.1.2 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

วงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น สำหรับใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรถักคอนเวอร์เตอร์ สำหรับใช้ควบคุมปริมาณของกระแสขาออกให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาเวลาที่สวิทช์ปิดวงจรกับคาบเวลาในการทำงาน หรือที่เรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle)



รูปที่ 3.3 แผนผังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.2 วิธีการนำกลับนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

อธิบายส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนในการทดลอง ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์และสารเคมี การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด เตรียมสารละลาย เตรียมสารปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง 2)แบบแผนการทดลอง ลำดับขั้นตอนการทำแต่ละสภาวะแวดล้อมการทดลอง 3) การวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพการนำกลับ จะเป็นการส่งตรวจเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (ICP) เมื่อได้ค่าจากเครื่องมาคำนวณตามสูตรหาร้อยละการนำกลับ

#### 3.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

การจัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีในการทดลอง แบ่งย่อยได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

##### 1) ขั้วอิเล็กโทรด

ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ทำการทดลอง มีขนาดกว้าง 110 มิลลิเมตร ยาว 185 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 เนื้อวัสดุเป็น stainless steel 316L ทนต่อการเกิดสนิมและการทดลองความเป็นกรด-ด่าง เป็นธาตุที่มีความเป็นตัวนำที่ดี ในงานวิจัยนี้ ใช้รูปแบบขั้วอิเล็กโทรด 2 รูปแบบ แต่ละรูปแบบใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 แผ่น รูปแบบที่ 1) ขั้วแอโนด 2 แผ่น และ ขั้วแคโทด 1 แผ่น 2) ขั้วแอโนด 1 แผ่น และ ขั้วแคโทด 2 แผ่น เกิดจากการทดลองความหนาแน่นทางไฟฟ้า แหล่งในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีส่วนประกอบของนิกเกิลไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ขั้วอิเล็กโทรดชนิด stainless steel 316L

## 2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายนิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ) ซึ่งมีนิกเกิลไอออนเป็นองค์ประกอบถูกนำมาใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้น 5,000 ppm มีขั้นตอนเตรียมสารละลาย ดังนี้

- $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  มีน้ำหนักโมเลกุล (MW) เท่ากับ 262.86 g/mol
- ต้องการ Ni มีความเข้มข้น 5,000 ppm หมายความว่า ในน้ำ 1,000 mL มี Ni 5,000 mg ดังนั้นในการเตรียม Ni 5,000 mg/L ปริมาตร 1,000 mL ต้องใช้ Ni 5,000 mg
- ดังนั้น Ni  $58.69 \times 10^3$  mg ต้องใช้  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $262.86 \times 10^3$  mg
- ถ้า Ni 5,000 mg ต้องใช้  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 22,393.93$  mg = 22.39 g
- ดังนั้นต้องใช้  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หนัก 22.39 g ผสมกับน้ำกลั่นให้ละลายจนหมด
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 ml

## 1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น  $2 \text{ mol/dm}^3$  ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ มีขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ดังนี้

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น  $2 \text{ mol/dm}^3$  คือ มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ 2 mol ในสารละลายทั้งหมด  $1,000 \text{ cm}^3$  ดังนั้นการเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์  $100 \text{ cm}^3$  จะมีส่วนผสมของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ 8 g
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 mL

### 3.2.2 แผนการดำเนินงาน

ศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง นำธาตุนิกเกิลกลับมาให้มากที่สุด งานวิจัยจึงศึกษากลุ่มค่าพารามิเตอร์ที่มีคุณลักษณะของตัวเองเพื่อปรับค่า ประกอบไปด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เวลาการดำเนินงาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิของสารละลาย ให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุด ลำดับการทดลองในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

No	Factors	Condition			
		pH	Time (minute)	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Temperature (23elsius)
1.	pH	5	120	220	60
		6	120	220	60
		7	120	220	60
		8	120	220	60
2.	Time	5	120	110	60
		5	180	110	60
		5	90	110	60
		5	60	110	60
3.	Current density	6	120	220	60
		6	120	110	60
4.	Temperature	8	120	220	25
		8	120	220	40
		8	120	220	60

### 3.2.3 การวิเคราะห์ผล

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง จะต้องทำการนำขั้วแคโทดและแอโนด ตากให้แห้งและชุดเอาผงโลหะออก และนำสารละลายที่เหลือในภาชนะทดลองกรองสูญญากาศและเข้าตูอบ ทำให้เป็นของแข็งปราศจากน้ำ โดยนำตะกอนที่ขูดได้และสารละลายที่แห้งแล้ว ส่งตรวจเพื่อวิเคราะห์หาค่าการนำกลับนิกเกิล ด้วยเครื่อง วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะ เทคโนโลยี Inductively Coupled Plasma (ICP) เพื่อทราบถึงปริมาณของตะกอนนิกเกิลที่ได้จากตะกอนทั้งหมด เพราะอาจปนเปื้อนวัสดุชนิดอื่นในภาชนะทดลองและขั้วอิเล็กโทรด เมื่อได้ค่าออกมา ต้องคำนวณหาค่าร้อยละการนำกลับ ใช้วิธีคำนวณประสิทธิภาพ ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\eta_{icp}$  = ประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับนิกเกิลด้วยเทคนิค ICP (%)

$N_{cd}$  = ปริมาณตะกอนนิกเกิลภายหลังดำเนินการอิเล็กโทรวินนิ่ง (g)

$N_{ci}$  = ปริมาณตะกอนนิกเกิลตั้งต้นก่อนดำเนินการอิเล็กโทรวินนิ่ง (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น รายงานผลและวิเคราะห์ผลการทดลองกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

จากการดำเนินงานตามแผนการทดลอง (ตารางที่ 3.1) ได้ปรับค่าพารามิเตอร์ ให้เกิดประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับนิเกิลสูง ดังนี้ ความหนาแน่นทางไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย และเวลา มีผลการทดลองแสดงออกมาดังนี้

##### 4.1.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

No	Condition				Ni recovery (%)
	Current density (A/m <sup>2</sup> )	pH	Temperature (celsius)	Time (minute)	
1.	110	4.5	60	45	31.42
2.	110	4	25	30	16.55
3.	110	4	40	30	29.58
4.	110	3.5	10	60	30.54
5.	110	3	40	90	24.97
6.	110	4	40	120	41.10
7.	110	4.5	40	120	42.54
8.	110	5	40	120	37.05
9.	110	5	60	120	67.59
10.	110	5	25	120	28.42
11.	110	5	60	60	54.12
12.	110	5	60	90	58.99
13.	110	5	25	120	50.20
14.	110	5	25	120	58.29
15.	110	4	60	120	65.80
16.	110	3	60	120	62.26
17.	110	5	60	180	59.47
18.	110	6	60	120	61.66
19.	110	6	80	120	66.78
20.	220	6	60	120	69.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง(ต่อ)

21.	220	5	60	120	72.45
22.	220	6	60	120	73.09
23.	220	7	60	120	80.53
24.	220	8	60	120	81.57
25.	220	9	60	60	73.94
26.	220	10	40	90	93.06
27.	220	10	25	90	78.07
28.	220	7	40	60	68.21
29.	220	8	40	120	84.13
30.	220	8	25	120	99.24

จากลำดับการทดลองทั้ง 30 การทดลอง เรียงลำดับก่อนจนถึงหลัง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ถึง 5 ได้ทำการทดลอง ตามงานวิจัย การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้ว เนื่องจาก เป็นการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ ค่าที่นำกลับได้ดีสภาวะเป็นกรดและที่มีอุณหภูมิสูง เวลาที่ไม่เหมือนกันเนื่องจาก ค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อคงที่แล้วหรือตีกลับ ในการนำกลับของโคบอลต์นั้นจะไม่เพิ่มประสิทธิภาพการนำกลับ ปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมีไม่มี

การทดลองที่ 6 ถึง 8 เป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ความเป็นกรด-ต่าง ระยะสั้นที่ความเป็นกลาง การทดลองที่ 8 ถึง 10 นำการทดลองที่ 8 ตั้งต้น เพื่อหาค่าการนำกลับโลหะมีค่าที่ดีที่สุดจากค่าพารามิเตอร์ อุณหภูมิ

การทดลองที่ 11 ถึง 14 ทดลอง 2 ช่วงอุณหภูมิ และ 2 ช่วงเวลา ดูจากสีสารละลายที่เหลืออยู่เป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจ

การทดลองที่ 15 ถึง 19 เป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ความเป็นกรด-ต่างอีกครั้ง ที่อุณหภูมิสูง ผลการทดลองที่ 19 นำกลับโลหะมีค่านิกเกิลได้มากกว่าจริง แต่กล่องการทดลองไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงเกินกว่านี้ได้

การทดลองที่ 20 ถึง 21 เป็นการทดลองค่าความเป็นกรด-ต่างที่ 5 กับ 6 เนื่องจากผลการนำกลับโลหะมีค่าได้ค่าที่สูงขึ้น ในสภาวะเป็นด่างทดลองเปลี่ยนค่าความหนาแน่นทางไฟฟ้าเป็น 220 A/m<sup>2</sup> สารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังการทดลองมีสีที่ใสขึ้น จึงใช้จนถึงการทดลองที่ 30

การทดลองที่ 22 ถึง 23 เป็นการทดลองกระแสไฟฟ้า ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์กระแสที่จ่ายเพื่อดูการเกิดปฏิกริยาเคมีและคาดการณ์จากสีสารละลายหลังการทดลอง

การทดลองที่ 24 ถึง 30 เริ่มจากการสังเกต ค่าความเป็นด่างทำให้นำกลับโลหะมีค่านิกเกิลได้ดี ตกตะกอนไว และแยกออกมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงทำการทดลองจากค่าความเป็นด่าง และปรับเปลี่ยนค่า ระยะเวลากการทดลองโดยสังเกตจากการแยกชั้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เห็นนิกเกิลออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

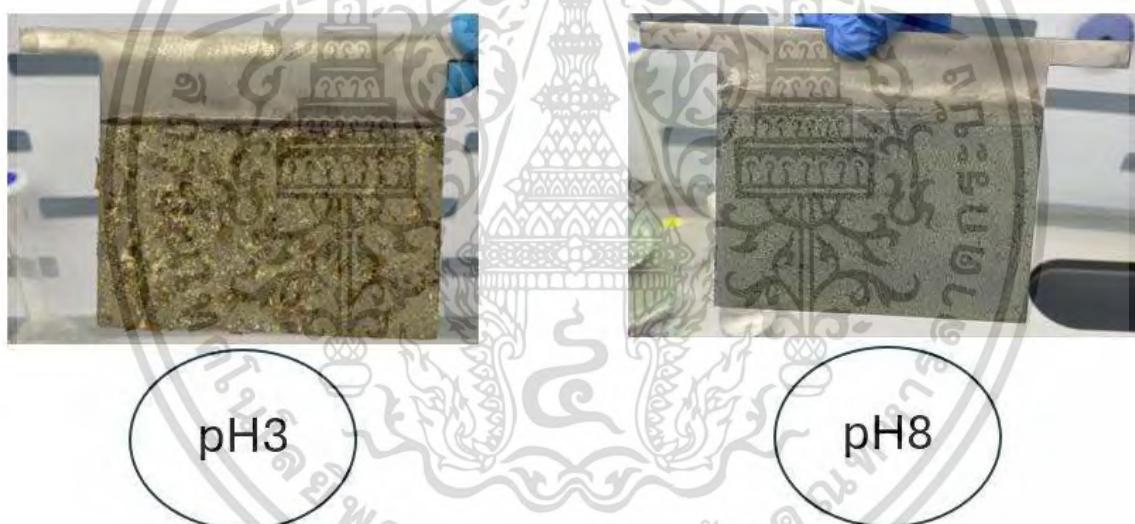
ตกตะกอนแยกกับชั้นน้ำใสอย่างชัดเจนจึงหยุดการทดลองและอุณหภูมิเริ่มจากอุณหภูมิสูงก่อนจากการใช้พลังงานมาก เพื่อให้ได้ข้อจำกัดขั้นสูงก่อนและ จะเห็นได้ว่า การทดลองที่ 24,29 และ 30 ค่าพารามิเตอร์จะต่างกันตรงอุณหภูมิเนื่องจากย้อนกลับดูผลการทดลองดูค่าการนำกลับโลหะมีค่าจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ในสถานะเป็นต่าง

#### 4.1.2 ผลกระทบความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที มีผลการทดลองดังนี้

##### 1) ลักษณะตะกอน

ผลการทดลองพบว่า การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ให้เท่ากับ 3 และ 8 ตลอดนั้น การทดลองที่ค่าความเป็นกรดมีตะกอนนิกเกิลเกาะที่ขั้วแคโทดมากกว่าค่าความเป็นด่าง ที่ค่าความเป็นด่างเกิดตะกอนนิกเกิลไวกว่าประมาณ 30 นาที และมีตะกอนกันกล่องเยอะกว่า ทำให้ทราบได้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีความสัมพันธ์กับการตกตะกอนอันดับ 1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างลักษณะตะกอนบนขั้วแคโทด ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

และที่กันกล่องการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 มีการตกตะกอนของนิกเกิลน้อยกว่าและยังมีนิกเกิลที่เป็นสารละลาย ส่วนกันกล่องการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 8 นิกเกิลตกตะกอนแยกชั้นกับน้ำอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



pH3

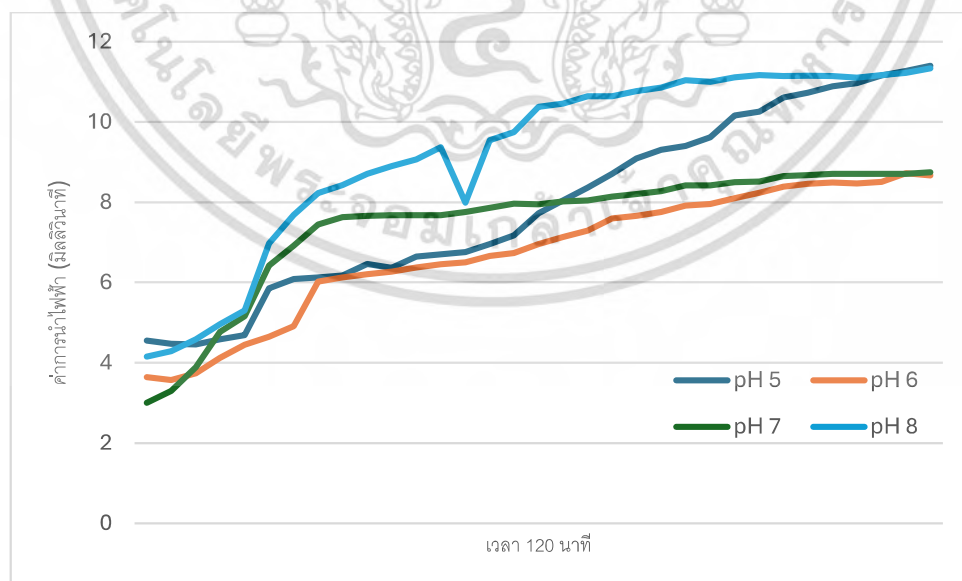


pH8

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะตะกอนก้นกล่องการทดลอง  
ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

## 2) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากผลการทดลองพบว่า ความนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทุกการทดลอง โดยการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายถูกควบคุมให้เท่ากับ 8 มีการเพิ่มขึ้นของความนำไฟฟ้าในสารละลายสูงกว่ากรณีอื่น แสดงว่านิกเกิลไอออนแตกตัวในสารละลายได้ดี ทำให้นิกเกิลนั้นก่อตัวเป็นตะกอนได้รวดเร็วขึ้น ดังในรูปที่ 4.9

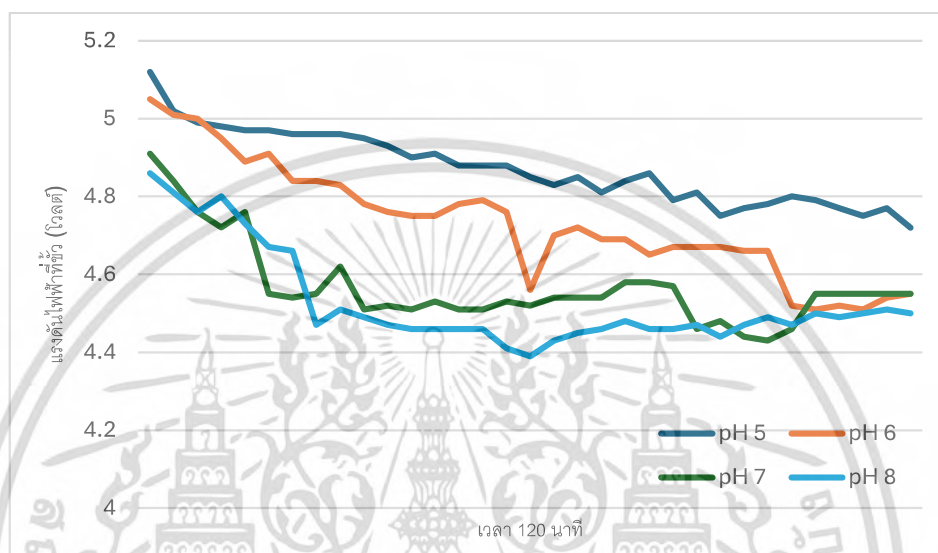


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

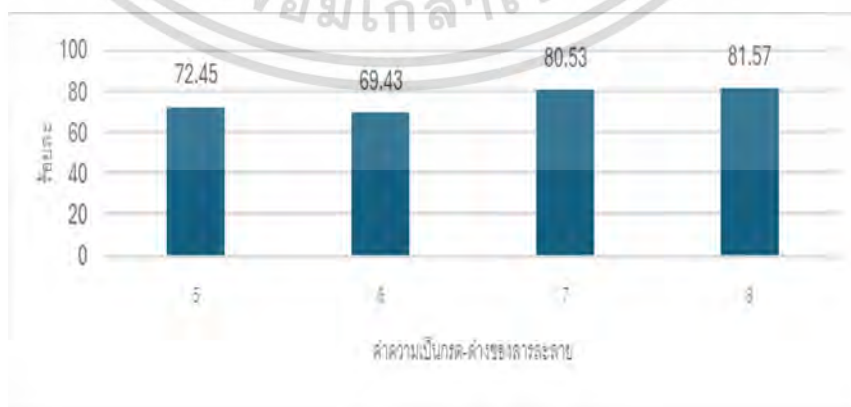
แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดจากไอออนมีค่าการแตกตัวมากขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ต้องการใช้พลังงานในการดำเนินปฏิกิริยาทางเคมีค่อนข้างมากเนื่องจากมีค่าความต้านทานสูงเกิดจากมีปฏิกิริยาเคมีน้อย ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8 ใช้ค่าพลังงานน้อยที่สุด แต่มีค่านำไฟฟ้าสูงที่สุดตลอดการทดลองเกิดการตอบสนองปฏิกิริยาเคมีต่อไอออนที่แตกตัวมาก



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

### 4) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8 ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุด ร้อยละ 81.57 รองลงมาคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7 และน้องลงอย่างมีนัยยะ เมื่อเข้าใจค่าความเป็นกรด

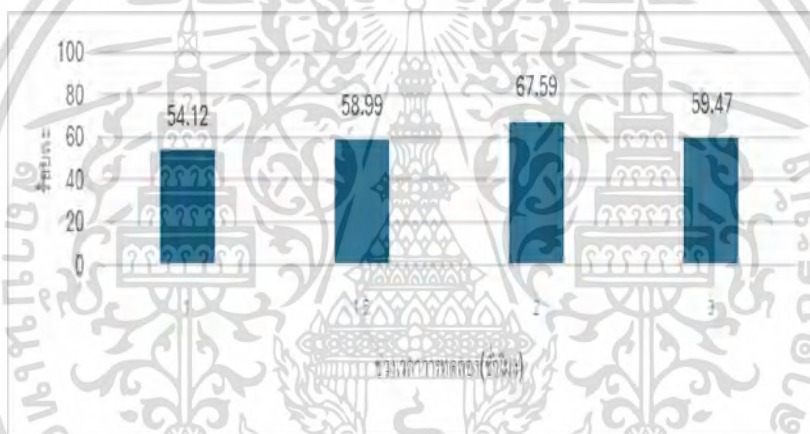


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการนำกลับนิกเกิล ณ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลกระทบจากเวลา

กำหนดให้การทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตรและความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 5ประสิทธิภาพการนำกลับในกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ศึกษาเวลาในการทดลองที่ 60 นาที 90 นาที 120 นาที และ 180 นาที ผลการศึกษาพบว่า การใช้เวลาในการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง 120 นาที มีประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลสูงสุด ร้อยละ 67.59 รองลงมาคือ 180 นาที มีประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ร้อยละ 59.47 เป็นลำดับที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นจากเวลาการทดลองที่มากขึ้น แต่ การใช้เวลาในการทดลอง 180 นาที มีค่าการนำกลับต่ำกว่า 120 นาที นั้น เพราะว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของนิกเกิลทำให้ตะกอนนิกเกิลกลับไปเป็นโมเลกุลอยู่ในสารละลายดั้งเดิม เวลาที่น้อยกว่า 120 นาที มีค่าการนำกลับต่ำกว่าเนื่องจากโมเลกุลนิกเกิลในการรวมตัวใช้เวลา ดังนั้น การทำอิเล็กโทรวินนิ่งใช้เวลา 120 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ณ เวลาการทดลองต่างกัน

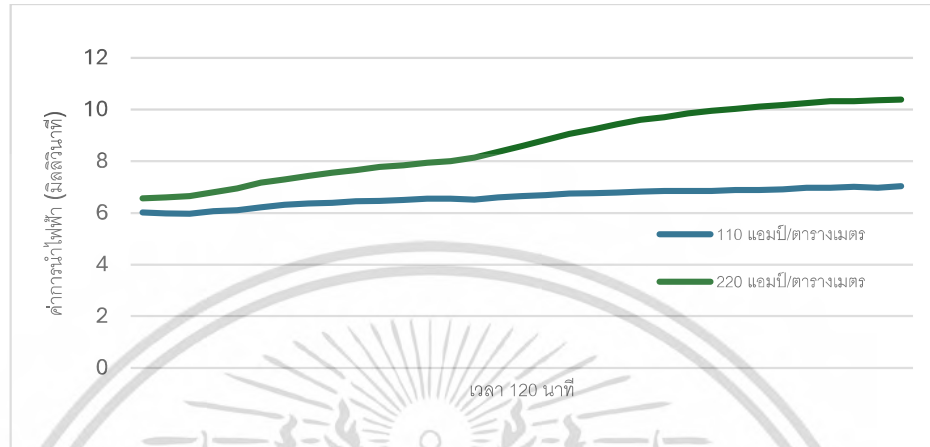
#### 4.1.4 ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) 6, อุณหภูมิของสารละลาย 60 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที

##### 1) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เมื่อดูจากกราฟ ในช่วงต้นกระบวนการ ความนำไฟฟ้าของสารละลายต่างกันเล็กน้อยอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมก่อนการดำเนินการ เมื่อทำการทดลองกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการเร็วขึ้นเมื่อผ่านไป 60 นาที จนการทดลองครบ 120 นาที การทดลองกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร และกระแสไฟฟ้าที่ 110 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร มีค่าการนำไฟฟ้าต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้ กระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร มีค่าดีกว่าดังรูปที่ 4.7 ปริมาณกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อกระบวนการนำกลับ เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

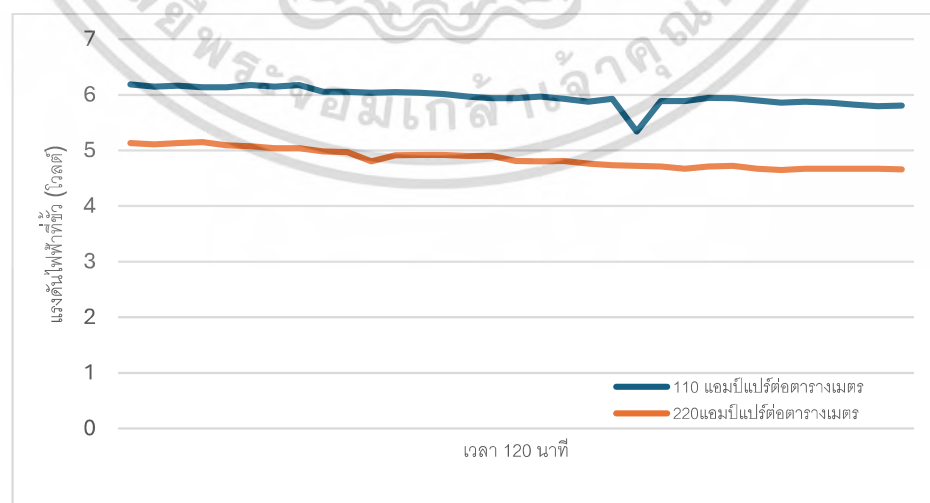
สูงขึ้นปฏิกิริยาเคมีมีสูงขึ้น ค่านำไฟฟ้าสารละลายมากขึ้น สารละลายเกิดการแตกตัวของไอออนอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้า 220แอมป์แปรต่อตารางเมตรเกิดการตกตะกอนไวกว่าและมีสัดส่วนเยาะกว่า 110 แอมป์แปรต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย  
ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน

## 2) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

ความหนาแน่น 110 แอมป์แปรต่อตารางเมตร ได้ช่วงแรงดันที่ 5.8 – 6.2 โวลต์ และ ความหนาแน่นที่ 220 แอมป์แปรต่อตารางเมตร ได้ช่วงแรงดันที่ 4.6 – 5.2 โวลต์ จากการสังเกต จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นสูงจะได้ค่าแรงดันต่ำ เนื่องจากในทางกลับกัน การที่แรงดันน้อยลง เพราะว่า ค่ากระแสเพิ่มขึ้น ทำให้ไอออนในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จากกฎของโอห์ม ( $V=IR$ ) จากรูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการทดลอง ทำให้นิกเกิลไอออนมีค่าน้อยลง เปลี่ยนรูปเป็นตะกอนโลหะบนขั้วแคโทดและจมลงก้นกล่อง



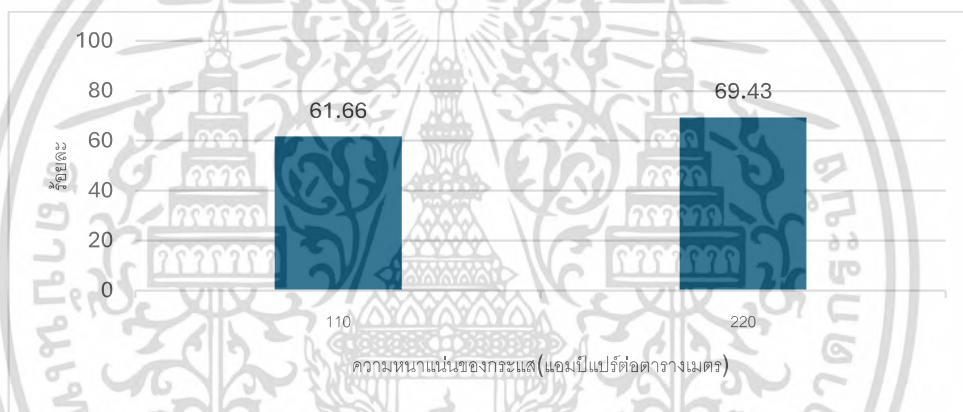
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่ 220 แอมป์แปรต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ร้อยละ 61.66 และการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่ 110 แอมป์แปรต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล ร้อยละ 69.43 เพราะ ค่ากระแสเพิ่มขึ้น ปฏิกริยาเคมีก็เพิ่มขึ้นและไวขึ้น อีกส่วนหนึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 110 แอมป์แปรต่อตารางเมตร ใช้ขั้วแคโทด 1 ขั้ว และแอโนด 2 ขั้ว ส่วนการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 220 แอมป์แปรต่อตารางเมตร ใช้ขั้วแคโทด 2 ขั้ว และแอโนด 1 ขั้ว ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ การใช้แคโทด 2 ขั้ว จะมีตะกอนนิกเกิลติดที่ขั้ว แคโทดเดียวและ การใช้แคโทด 1 ขั้ว มีตะกอนติด 2 ด้าน จะเท่ากับมีพื้นที่ที่ตะกอนนิกเกิลติดเท่ากัน แต่พื้นที่การนำไฟฟ้านั้นมีมากกว่า จึงถือว่ามีผลทำให้ปฏิกริยาเคมีเพิ่มขึ้นและไวขึ้นได้ ดังนั้นพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้าที่ 220 แอมป์แปรต่อตารางเมตร จึงถูกนำไปใช้ในการทดลองครั้งถัดไป เพื่อหาเงื่อนไขการนำกลับนิกเกิลที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล  
ณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่างกัน

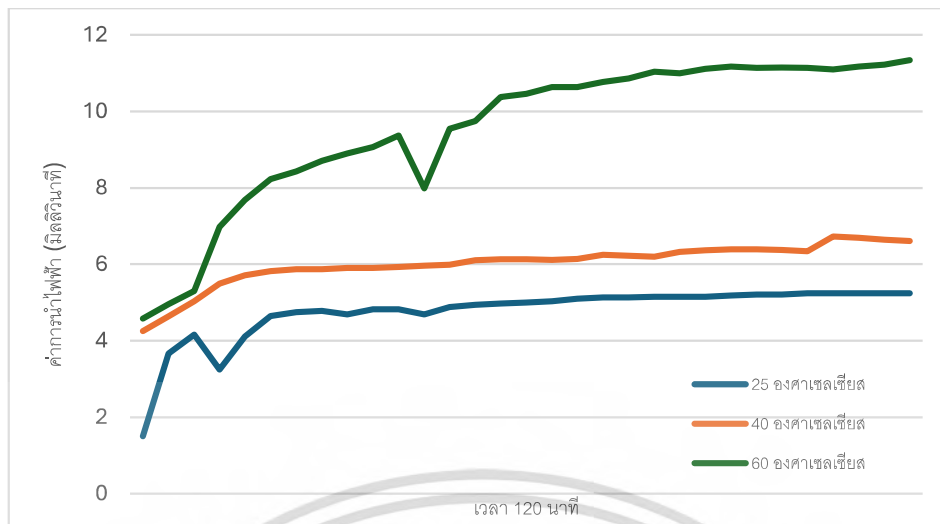
#### 4.1.5 ผลกระทบจากอุณหภูมิของสารละลาย

กำหนดให้แต่ละการทดลองใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปรต่อตารางเมตร, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 8 และระยะเวลาในการทดลอง 120 นาทีซึ่งมีผลการทดลอง ดังนี้

##### 1) ความนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความนำไฟฟ้านั้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยค่าเริ่มต้นสารละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสนั้นต่ำที่สุด สูงขึ้นมาเป็น 40 องศาเซลเซียสและ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าการที่ควบคุมอุณหภูมิสารละลายส่งผลกับปฏิกริยาเคมี โดยสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงมีอัตราการแตกตัวของไอออนมากกว่าสารละลายที่อุณหภูมิต่ำ

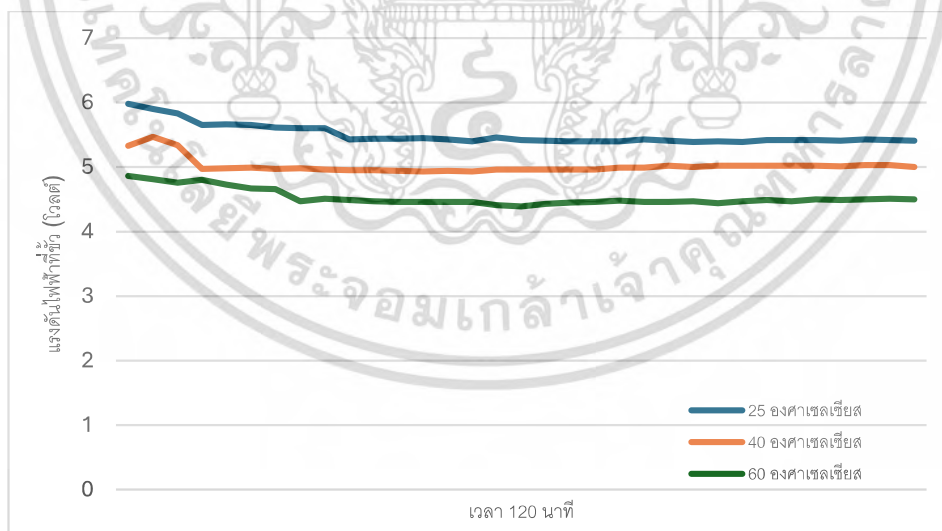
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย  
ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

### 2) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage)

จากรูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง สังเกตได้ว่าอุณหภูมิสูง มีค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่ำ แรงดันไฟฟ้าจากมากสุดไปน้อยที่สุดคือ 25 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กระบวนการนำกลับนิกเกิลที่ใช้สารละลายอุณหภูมิสูง จะใช้พลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานต่ำกว่า กระบวนการที่ใช้สารละลายอุณหภูมิต่ำ

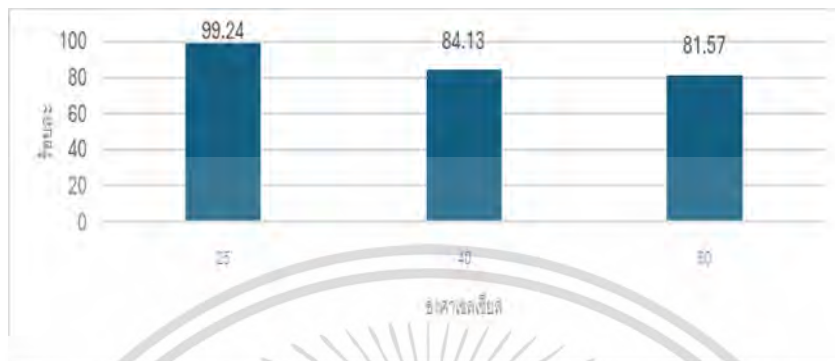


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

### 3) ประสิทธิภาพการนำกลับ

ผลการทดลองพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายคงที่ 25 องศาเซลเซียส มีค่าการนำกลับนิกเกิลสูงสุดคือ ร้อยละ 99.24 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส มีค่าการนำกลับนิกเกิลที่น้อยกว่าอยู่ที่ ร้อยละ 84.13 และ 81.57 ตามลำดับ เท่ากับว่านิกเกิลในสถานะอนุมูลมีค่าส่งผลการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากกว่า อนุมูลมี 25 องศาเซลเซียส จึงถูกนำไปใช้ในการทดลองครั้งถัดไป เพื่อหาเงื่อนไขการนำกลับนิกเกิลที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความนำไฟฟ้าของสารละลาย ณ อุณหภูมิของสารละลายต่างกัน

## 4.2 ประสิทธิภาพการนำกลับ

คือ การทดลองนำกลับนิกเกิลด้วยอิเล็กโทรวินนิ่งนั้น สามารถวัดได้จากค่าการนำกลับจากนิกเกิลตั้งต้นและนิกเกิลหลังการทดลอง นำมาคำนวณหาค่าการนำกลับที่แท้จริงตั้งนั้นค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่นำกลับได้ค่ามากที่สุด คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 25 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 8 ประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลสูงถึงร้อยละ 99.24 และในการทดลองทั้งหมด ยังมีครั้งการทดลองที่กระบวนการนำกลับอิเล็กโทรวินนิ่งได้ค่าน้อยที่สุด คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร, อุณหภูมิของสารละลาย 40 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 90 นาทีและค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิล อยู่ที่ร้อยละ 24.97 จะเห็นว่าช่วงของค่าพารามิเตอร์นั้นๆ แตกต่างกันโดยมีนัยยะสำคัญ

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีการอิเล็กโทรวินนิ่ง

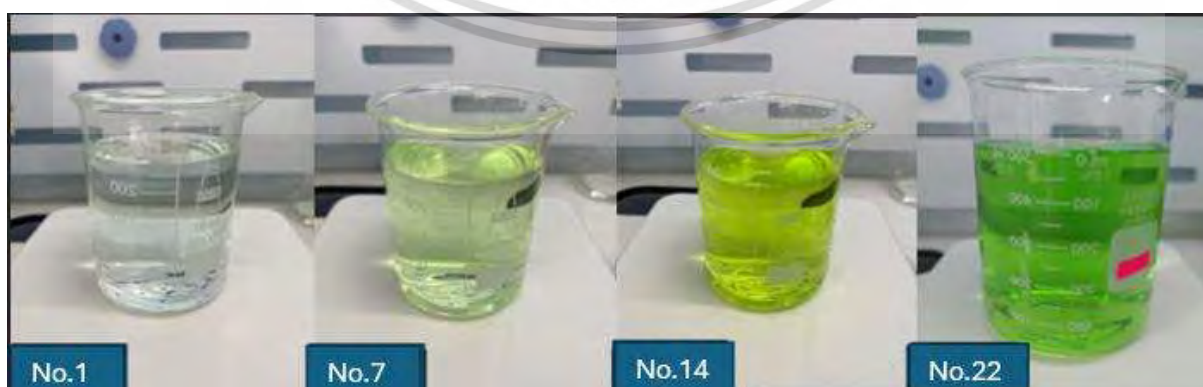
No	Condition				Ni recovery (%)
	Current density (A/m <sup>2</sup> )	pH	Temperature (celsius)	Time (minute)	
1.	220	8	25	120	99.24
2.	220	10	40	90	93.06
3.	220	8	40	120	84.13
4.	220	8	60	120	81.57
5.	220	10	25	90	78.07
6.	220	9	60	60	73.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีการอิเล็กโทรวินนิ่ง

7.	220	6	60	120	69.43
8.	220	7	40	60	68.21
9.	110	5	60	120	67.59
10.	110	6	80	120	66.78
11.	110	4	60	120	65.8
12.	110	3	60	120	62.26
13.	110	6	60	120	61.66
14.	110	5	60	180	59.47
15.	110	5	60	90	58.99
16.	110	5	25	120	58.29
17.	110	5	60	60	54.12
18.	110	5	25	120	50.2
19.	110	4	40	120	41.1
20.	110	5	40	120	37.05
21.	110	5	25	120	28.42
22.	110	3	40	90	24.97

อ้างอิงจากรายการที่ 4.1 ได้นำสารละลายที่เหลืออยู่หลังการทดลอง มาเปรียบเทียบกับแบบช่วงกว้างจากครั้งการทดลองทั้งหมด โดยเรียงตามลำดับค่าการนำกลับที่ดีที่สุด คือ หมายเลข 1 หมายเลข 7 หมายเลข 14 และหมายเลข 22 จากการสังเกตด้วยตาเปล่า หมายเลข 1 มีสีใสราวกับว่าไม่มีอะไรเจือปนอยู่ในองค์ประกอบของน้ำ เมื่อเทียบกับ หมายเลข 22 สามารถอธิบายได้เลยว่ายังคงมีธาตุนิกเกิลอยู่ในองค์ประกอบของสารละลายเยอะพอสมควร ถึงแม้ว่าสีจะเข้มน้อยกว่า สารละลายตั้งต้นก็ตาม เมื่อนำการสังเกตรวมกับค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ สรุปได้ว่า การสังเกตจากสีของสารละลายหลังการทดลอง สามารถบอกอัตราการนำกลับนิกเกิลพอสังเขปได้



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างสารละลายภายหลังกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง

ตารางที่ 4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการควบคุมอุณหภูมิ

ลำดับการทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ประสิทธิภาพการนำกลับร้อยละ	ค่าพลังงานจากแหล่งจ่าย (Kw)	ค่าพลังงานจากปรับอุณหภูมิ (Kw)	ผลรวมค่าพลังงาน (Kw)
30.	25	99.24	0.036	1.94	1.976
29.	40	84.13	0.033	0	0.033
24.	60	81.57	0.029	2.1	2.129

จากการทดลอง คำนวณค่าพลังงานในการทดลอง จาก พารามิเตอร์อุณหภูมิ และค่าพารามิเตอร์อื่นอยู่ที่ ความหนาแน่นทางไฟฟ้า 220 A/m<sup>2</sup> ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 และเวลาในการทดลอง มีค่าพลังงานที่ต้องคำนวณคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และ การควบคุมอุณหภูมิ (เครื่องให้ความร้อนและเครื่องปรับอากาศทำความเย็น) โดยพลังงานความร้อนคิดจากค่าพลังงานของเครื่องปั่นกวน Magnetic Hotplate Stirrers รุ่น MS7-H550-Pro ยี่ห้อ Onilab กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1.05 Kw และพลังงานความเย็นคิดจากค่าพลังงานเครื่องปรับอากาศ Mitsubishi รุ่น SRK/C13CXV-W1 กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.97 Kw ผลการคำนวณพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ทั้ง 3 ช่วงอุณหภูมินั้น อุณหภูมิที่ใช้พลังงานในการนำกลับน้อยที่สุดอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส นั้น เพราะว่า เป็นอุณหภูมิของสภาพอากาศปกติของประเทศไทย ทำให้ไม่ต้องมีการสูญเสียพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับนิกเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วยวิธีการทางไฟฟ้า มีจุดมุ่งหมายในการนำธาตุโลหะชนิดนิกเกิลกลับมาเป็นเป้าหมายภายใต้การศึกษาเครื่องต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง และศึกษาหาเงื่อนไขของการดำเนินการที่เหมาะสมโดยผ่านการปรับค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1) ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งนำกลับนิกเกิลออกจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ร้อยละ 99.24 จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมป์แปร์ต่อตารางเมตร, ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเท่ากับ 8 ระยะเวลาการทดลอง 120 นาที และอุณหภูมิของสารละลาย 25 องศา

2) ในการทดลองที่ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งนั้น ค่าที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด ตามลำดับดังนี้ 1) ความหนาแน่นทางไฟฟ้า 2) ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 3) ระยะเวลาการทดลอง และ 4) อุณหภูมิของสารละลาย

4) หลังกระบวนการทดลอง สารละลายที่เหลืออยู่ สามารถบ่งบอกถึงอัตราการนำกลับนิกเกิลได้จากการสังเกตสีของสารละลาย เนื่องจากสารละลายนิกเกิลที่สีเฉพาะตัวของตัวธาตุนั้นคือสีเขียว ผสมกับน้ำกลั่น จะได้สารละลายตั้งต้นสีเขียวที่ความเข้มข้น 5,000 ppm และเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ผลลัพธ์ได้สีต่างจากสารละลายตั้งต้น เป็นสีใส เท่ากับนิกเกิลแยกตัวออกจากสารละลายได้ดี ในทางกลับกัน สีของสารละลายตั้งต้น มีสีเขียวเข้มจนถึงสีเหลืองอ่อนตามลำดับ เท่ากับว่าประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลนั้นยังไม่ดีพอ

5) การใช้พลังงานไฟฟ้าการทดลองที่มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสตามสภาพอากาศประเทศไทย มีผลลัพธ์การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพที่สุด และ ต้นทุนพลังงานต่ำที่สุด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้ทำการวิจัย มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติม จากที่ได้ทำการวิจัย เพื่อนำไปเป็นแนวทางหรือข้อคิดให้กับผู้ที่ จะศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยนี้

1) ควรทำการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่ง ในห้องปฏิบัติการ งดการสูดดม และ ใส่เครื่องมือป้องกันอันตรายจากการทดลองเคมีทางผิวหนังตามมาตรฐานการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2) ผู้วิจัยไม่ควรจ่ายพลังงานไฟฟ้า แรงดันคงที่ (Constant Voltage) เนื่องจากเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาเคมีแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลง กระแสจะสูงขึ้น เกิดการแตกตัวไอออน เมื่อแรงดันคนที่ จะทำให้ประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลน้อยลง กระแสไม่อาจสูงขึ้นได้

3) ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการนำกลับนิกเกิล นอกจากกระบวนการทดลองทางเคมีแล้ว ควรนำวิธีการทางวิศวกรรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ เกี่ยวกับโปรแกรม ในการพยากรณ์ล่วงหน้า เพื่อลดจำนวนครั้งในการทดลอง

4) กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เท่ากับ 8 ขึ้นไป จะสามารถนำกลับนิกเกิลได้สูง ไอออนนิกเกิลชอบสภาวะที่เป็นเบสมากกว่าควรทำการทดลองระบบปิด ป้องกันการสูญเสียนิกเกิลระเหยสูญเสียของนิกเกิลระหว่างกระบวนการ

5) จากเวลาที่ได้ทำการทดลอง ได้ค่าที่มากที่สุดอยู่ที่ 120 นาที สันนิษฐานว่า มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ควรศึกษาต่อเรื่องความเข้มข้นของสารละลายกับเวลา

6) ควรทำการทดลองที่เปลี่ยนชนิดขั้วอิเล็กโทรดด้วย เนื่องจากความจำเพาะของธาตุแต่ละธาตุนั้นต่างกัน เนื่องจากอยากทราบว่าถ้าใช้ธาตุที่ไม่ใช่ stainless steel 316L จะมีผลลัพธ์แตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

7) กล่องการทดลอง ควรออกแบบให้ทนต่อสภาวะความเป็นกรดและ ความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. จุลสารพลังงานทดแทน. ฉบับที่ 4 ประจำเดือน สิงหาคม. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน. 2564.
- [2] ผศ.ดร.สงบ คาค้อ, การศึกษาสถานภาพพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย. ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) 2562.
- [3] อรทัย ครุฑหุ่น. 2566. “การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้ว” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรม ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Meer Safa. “different battery systems” [Online]. Available: <https://researchgate.net>
- [5] ณัฐวุฒิ สมพงษ์. 2566. “การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีไฟฟ้ในท้อลลิเมนต์แบบ 3 มิติ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี.
- [6] Tracy Rapp. “ Lithium Battery Failures – Expert Introduction to Fire & Explosion Investigations.” [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/lithium-battery-failures-expert-introduction-fire-explosion-rapp>. 2016.
- [7] Frank K. Crundwell., “Electrowinning of Nickel from Purified Nickel Solution” Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. 2011. Pp. 327-345.
- [8] C. Lupi, M. Pasquali, and A. Dell’Era, "Studies concerning nickel electrowinning from acidic and alkaline electrolytes," Minerals Engineering 19, pp. 1246-1250, 2006.
- [9] Rasha Muneer Al Radadi, Magdy Ahmed Mahmoud Ibrahim. “Nickel-cobalt alloy coatings prepared by electrodeposition Part II: Morphology, microhardness, and electrochemical studies” Korean J. Chem. Eng., 2021. pp. 152-162.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# กระบวนการนำกลับนิกเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ งานแล้วด้วยวิธีการทางไฟฟ้า

## Nickel Recovery from Spent Lithium Ion Batteries by Electrowinning

อภิชาต จักรหงษ์สุวรรณ<sup>1</sup> เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤกษ์<sup>2\*</sup> ชตชนก อัจฉมพงศ์<sup>3\*</sup> นาดยา โมรวารรณ์<sup>4\*</sup> และ อรทัย ครุฑหุ่น<sup>5\*</sup>  
Apichat Jakhongsuwan<sup>1</sup> Piampoom Sarikprueck<sup>2</sup> Chodchanok Attaphong<sup>3</sup> Nattaya Morawan<sup>4</sup> and  
Orathai Kruthun<sup>5</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาตรี; <sup>2\*</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า; <sup>3\*</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หลักสูตรวิศวกรรมโยธา;  
<sup>4\*</sup>นักศึกษาระดับปริญญาตรี; <sup>5\*</sup>วิศวกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ : 0 2329 8334, โทรสาร : 0 2329 8335, E-mail : 61601214@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากความต้องการใช้โลหะและวัสดุที่มีค่าที่เป็นองค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ที่มากขึ้น ประกอบกับการคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อน หรือ โลหะหนักที่พบในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่หมดอายุการใช้งานแล้ว ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการนำกลับโลหะนิกเกิล ซึ่งเป็นหนึ่งในโลหะหายากและมีราคาสูง จากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่หมดอายุการใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrowinning) ตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง อันได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการนำกลับ จะถูกนำมาศึกษาและวิเคราะห์อย่างละเอียดในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการนำกลับนิกเกิล ผลการศึกษาพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำกลับนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 99 ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุด โดยตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับนิกเกิลมากที่สุด คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลา และอุณหภูมิ ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** อิเล็กโทรวินนิ่ง; แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง; ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า; ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ; ระยะเวลา; อุณหภูมิ

### Abstract

In the past years, recycle of spent lithium ion batteries gain more attention because the main components of batteries demand including precious metals and materials are increasing. In addition, the impact on environmental pollution of contamination from these spent lithium ion batteries. Therefore this research propose the method for recovering nickel metal from spent lithium ion batteries by electrochemical process (Electrowinning). Parameters affected the efficiency of nickel recovery by the electrowinning process including electric current density, pH of the solution, temperature and time are considered. The best result. The results in this study by the proposed method as the most suitable condition are 99 percent of nickel recovery. The most important variables that affect recovery efficiency can be prioritized by electric current density, pH of the solution, processing time and temperature, respectively.

**Keywords :** electrowinning; DC power supply; electric current density; pH of the solution; temperature; time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทนำ

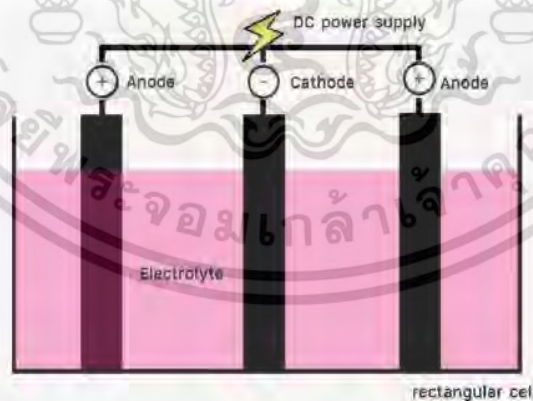
เนื่องจากความสามารถและประสิทธิภาพการใช้งานที่โดดเด่นทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานสำรองและเป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก [1] เมื่อความต้องการใช้งานแหล่งกักเก็บพลังงานประเภทนี้มีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณขยะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีองค์ประกอบของสารเคมีและโลหะหนัก ดังนั้นจึงต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจหลายประการ งานวิจัยส่วนมากจึงมุ่งความสนใจไปที่กระบวนการที่ใช้น้ำกลับโลหะมีค่าเป็นหลัก โดยเฉพาะโคบอลต์และนิกเกิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของขั้วแคโทดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายที่ใช้น้ำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ลิเทียม [1] กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการนำกลับทางเคมีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถนำกลับโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงได้มากกว่าเทคโนโลยีการนำกลับทั่วไป เช่น การตกตะกอน (Precipitation) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตาม เพื่อนำมาซึ่งประสิทธิภาพของการนำกลับที่สูงที่สุด กระบวนการนำกลับด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและเลือกใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำกลับโลหะที่ต้องการ ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจะมีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของโลหะที่ต้องการนำกลับ

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาวิธีการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพแล้ว ซึ่งมีโลหะมีค่านิกเกิลเป็นเป้าหมาย โดยจะศึกษาหาเงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสมผ่านการศึกษาค่าพารามิเตอร์ อันได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลาดำเนินการ และอุณหภูมิของสารละลาย เพื่อให้สามารถนำกลับโลหะนิกเกิลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

## อุปกรณ์และวิธีการ

### กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่ง ซึ่งต้องมียุทธศาสตร์ประกอบ 3 ส่วน 1.ภาคแหล่งกำเนิดพลังงาน เพื่อส่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ 2.สารละลายที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือนิกเกิล 3.ขั้วไฟฟ้าตั้งรูปที่ 1.1 แอโนดและแคโทด ระหว่างดำเนินการกระบวนการจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ทำให้นิกเกิลรวมตัวและเกาะที่ขั้วแคโทด ได้สารนิกเกิลที่บริสุทธิ์ กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งนิยมนำมาใช้เป็นขั้นตอนถัดไปจากกระบวนการโลหะวิทยาสารละลาย เพื่อให้การนำกลับโลหะมีค่าดังเช่น นิกเกิล ทองแดง และโคบอลต์ มีความบริสุทธิ์สูงที่สุด [3]



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง [4]

### วิธีการดำเนินงาน

#### องค์ประกอบทางเคมี

1. ขั้วอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดแคโทดและแอโนดที่ใช้ในการทดลอง คือ Stainless steel 316L โดยมีขนาดกว้าง 110 มิลลิเมตร ยาว 185 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ขั้วอิเล็กโทรดชนิด stainless steel 316L

2. อิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกนำมาใช้ในการทดลอง คือ สารละลายนิกเกิลซัลเฟต ความเข้มข้น 5,000 ppm สำหรับนำกลับโลหะมีค่า निकเกิด และสารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ดังรูปที่ 1.3

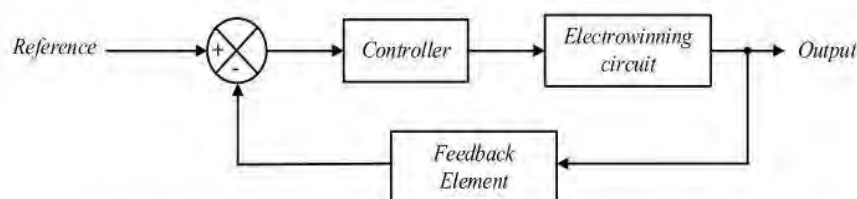


รูปที่ 1.3 สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายนิกเกิลซัลเฟต

#### องค์ประกอบทางไฟฟ้า

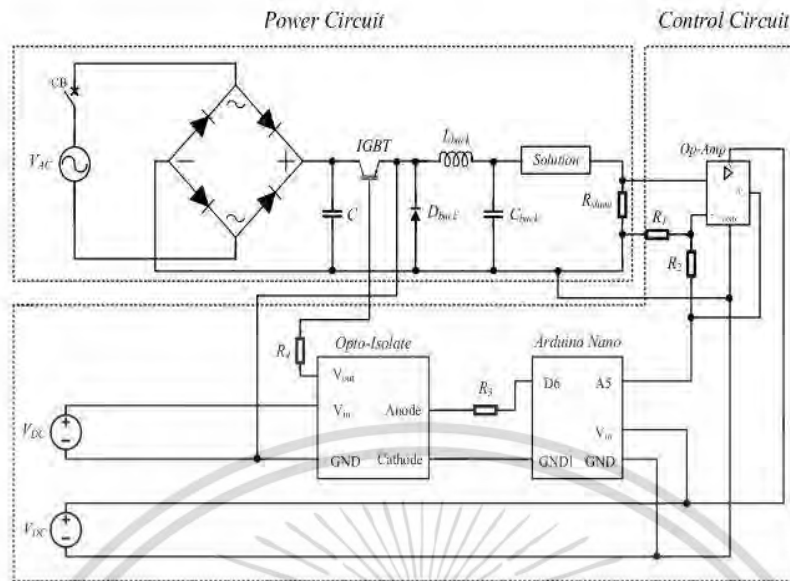
ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการนำเสนอนในงานวิทยานิพนธ์ [4] มาปรับปรุงใหม่เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสำหรับนำกลับนิกเกิล โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรควบคุม (Control circuit) และส่วนของวงจรถูกำลัง (Power circuit) ดังรูปที่ 1.4 และ รูปที่ 1.5 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ที่สำคัญ ดังนี้

1. วงจรควบคุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง มีหน้าที่ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีค่าคงที่ตามต้องการ โดยอาศัยการทำงานแบบวงจรป้อนกลับด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino nano
2. วงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น สำหรับใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สำหรับใช้ควบคุมปริมาณของกระแสขาออกให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่มีสวิทช์ปิดวงจรกับคาบเวลาในการทำงาน หรือที่เรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle)



รูปที่ 1.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง [4]

แผนการทดลอง

เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของการนำกลับนิกเกิลที่เหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงมีการวางแผนการศึกษาแต่ละพารามิเตอร์ โดยเริ่มจากการศึกษาความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่ใช้ในกระบวนการ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ อุณหภูมิของสารละลาย ดังตารางที่ 1.1 ในการศึกษา พารามิเตอร์ในแต่ละกลุ่มจะถูกทดลอง ณ ค่าต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของการนำกลับนิกเกิลสูงสุดจะถูกเลือกและนำมาใช้เป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่ม

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

No	Factors	Condition			
		pH	Time (minute)	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Temperature (celsius)
1.	pH	5	120	220	60
		6	120	220	60
		7	120	220	60
		8	120	220	60
2.	Time	5	120	110	60
		5	180	110	60
		5	90	110	60
		5	60	110	60
3.	Current density	6	120	220	60
		6	120	110	60
4.	Temperature	8	120	220	25
		8	120	220	40
		8	120	220	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ผลการทดลองและวิจารณ์**

**ปริมาณการนำกลับนิกเกิล**

จากแผนการทดลองสามารถแสดงผลการนำกลับนิกเกิล ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง**

No	Condition				Ni recovery (%)
	Current density (A/m <sup>2</sup> )	pH	Temperature (celsius)	Time (minute)	
1.	220	8	25	120	99.24
2.	220	10	40	90	93.06
3.	220	8	40	120	84.13
4.	220	8	60	120	81.57
5.	220	10	25	90	78.07
6.	220	9	60	60	73.94
7.	220	6	60	120	69.43

หมายเหตุ: ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่ใช้ คือ 5,000 ppm เท่ากันทุกการทดลอง

**ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง (ต่อ)**

No	Condition				Ni recovery (%)
	Current density (A/m <sup>2</sup> )	pH	Temperature (celsius)	Time (minute)	
8.	220	7	40	60	68.21
9.	110	5	60	120	67.59
10.	110	6	80	120	66.78
11.	110	4	60	120	65.8
12.	110	3	60	120	62.26
13.	110	6	60	120	61.66
14.	110	5	60	180	59.47
15.	110	5	60	90	58.99
16.	110	5	25	120	58.29
17.	110	5	60	60	54.12
18.	110	5	25	120	50.2
19.	110	4	40	120	41.1
20.	110	5	40	120	37.05
21.	110	5	25	120	28.42
22.	110	3	40	90	24.97

หมายเหตุ: ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่ใช้ คือ 5,000 ppm เท่ากันทุกการทดลอง

จากตารางจะเห็นว่าเงื่อนไขของการนำกลับนิกเกิลที่ดีที่สุด คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 220 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 8, อุณหภูมิของสารละลาย 25 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการทดลอง 120 นาที และใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel (316L) โดยสามารถนำกลับนิกเกิลไม่ต่ำกว่าร้อยละ หักสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

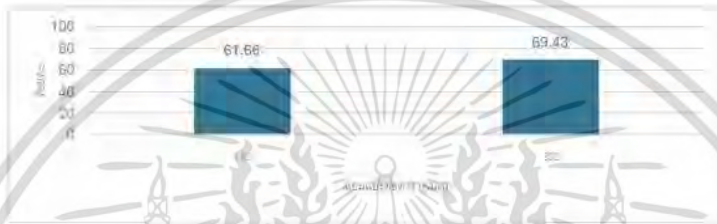


ได้สูงถึงร้อยละ 99.24 ในขณะที่เงื่อนไขของการนำกลับนิกเกิลที่ต่ำที่สุด คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 5,000 ppm, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3, อุณหภูมิของสารละลาย 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทดลอง 90 นาที ซึ่งสามารถนำกลับนิกเกิลได้เพียงร้อยละ 24.97 เท่านั้น

### บทวิจารณ์

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโตรวินนิ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ อันประกอบด้วย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลาย เวลา และความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ดังนี้

#### 1. ผลกระทบจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

จากรูป 2.1 ค่าความหนาแน่น 220 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการนำกลับนิกเกิลมากกว่าการใช้ความหนาแน่น 110 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

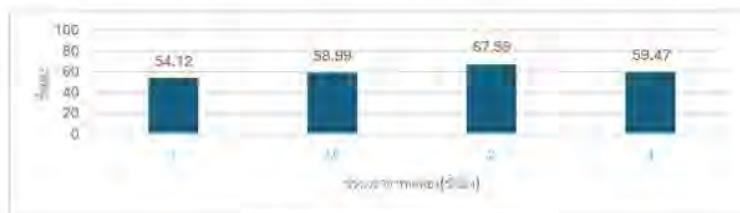
#### 2. ผลกระทบจากอุณหภูมิของสารละลาย



รูปที่ 2.2 อุณหภูมิของสารละลาย

จากรูป 2.2 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำกลับนิกเกิล เนื่องจากการนำกลับนิกเกิลที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มก่อให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการระเหยของสารละลาย

#### 3. ผลกระทบจากเวลาการทดลอง



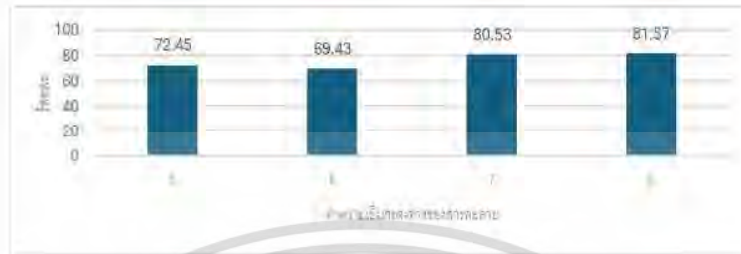
รูปที่ 2.3 ช่วงเวลาการทดลอง

จากรูป 2.3 ช่วงเวลาการทดลองที่ดีที่สุด คือ 2 ชั่วโมง โดยจากผลการทดลองพบว่า ปฏิกริยาทางเคมีการฟอร์มของตัวนิกเกิลจากรูปสารละลายของแข็งจะเริ่มเกิดในช่วงเวลาการทดลองตั้งแต่ 30 นาที จนถึง 2 ชั่วโมง หากเกินระยะเวลา 2 ชั่วโมงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังกล่าวจะเข้าสู่ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ โดยนิกเกิลในรูปของแข็งจะกลับไปเป็นสารละลายเหมือนเดิม ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำกลับนิกเกิลลดลงเมื่อเวลาการทดลองมากขึ้น

#### 4. ผลกระทบจากความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย



รูปที่ 2.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

จากรูป 2.4 นิกเกิลซัลเฟตตกตะกอนได้ดีเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นด่าง ขณะที่เมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกรดจะยังยั้งกระบวนการตกตะกอนของนิกเกิล ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณการนำกลับนิกเกิล ณ สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง มีแนวโน้มที่สูงกว่า

#### สรุป

จากงานวิจัยการศึกษากระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วซึ่งมีโลหะนิกเกิลเป็นเป้าหมายพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 99 ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ สารละลายความเข้มข้น 5,000 ppm อุณหภูมิของสารละลายถูกควบคุมให้คงที่ที่ 25°C ณ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 8 และควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ให้คงที่ 220 A/m<sup>2</sup> ตลอดระยะเวลาการทดลอง 2 ชั่วโมง โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่งมากที่สุด คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ระยะเวลาในการทดลอง และอุณหภูมิของสารละลาย ตามลำดับ

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชตชนก อัทธพงษ์ สำหรับความอนุเคราะห์ห้องทดลองและอุปกรณ์การทดลองทางเคมีและขอขอบคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพลกุล สำหรับความอนุเคราะห์ปรึกษาทางด้านไฟฟ้า สารละลายนิกเกิลซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับทดลอง ขอขอบคุณ นางสาวนาดยา โมราวรรณ สำหรับความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทางเคมี และ นางสาวอรัญญา คุรุทนต์ สำหรับความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทางไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Saloojee and J. Lloyd, "Lithium battery recycling process," Department of Environmental Affairs Development Bank of South Africa (Project No. DB-074 (RW1/1016)), vol. 27, no. 0, 2015.
- [2] ผศ.ดร.สงบ ศาค้อ, การศึกษาสถานภาพพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย. ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). 2562.
- [3] P. Fornari, C. Abbruzzese, 1999. Copper and nickel selective recovery by electrowinning from electronic and galvanic industrial solutions. Hydrometallurgy 52 1999 209–222
- [4] นางสาวอรัญญา คุรุทนต์. วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง "การพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เสื่อมสภาพ". สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2566.

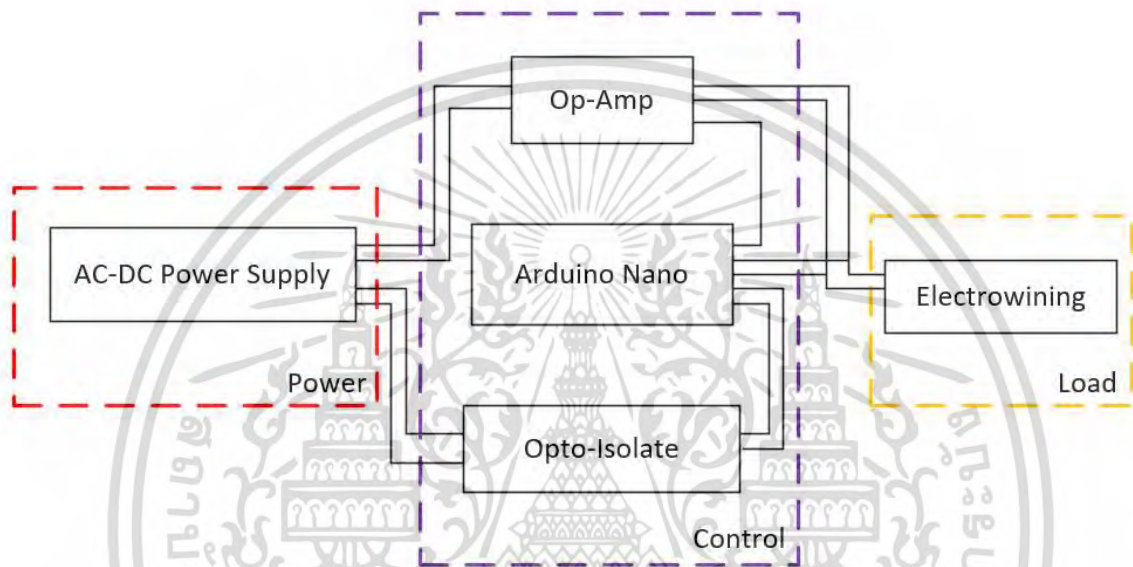
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

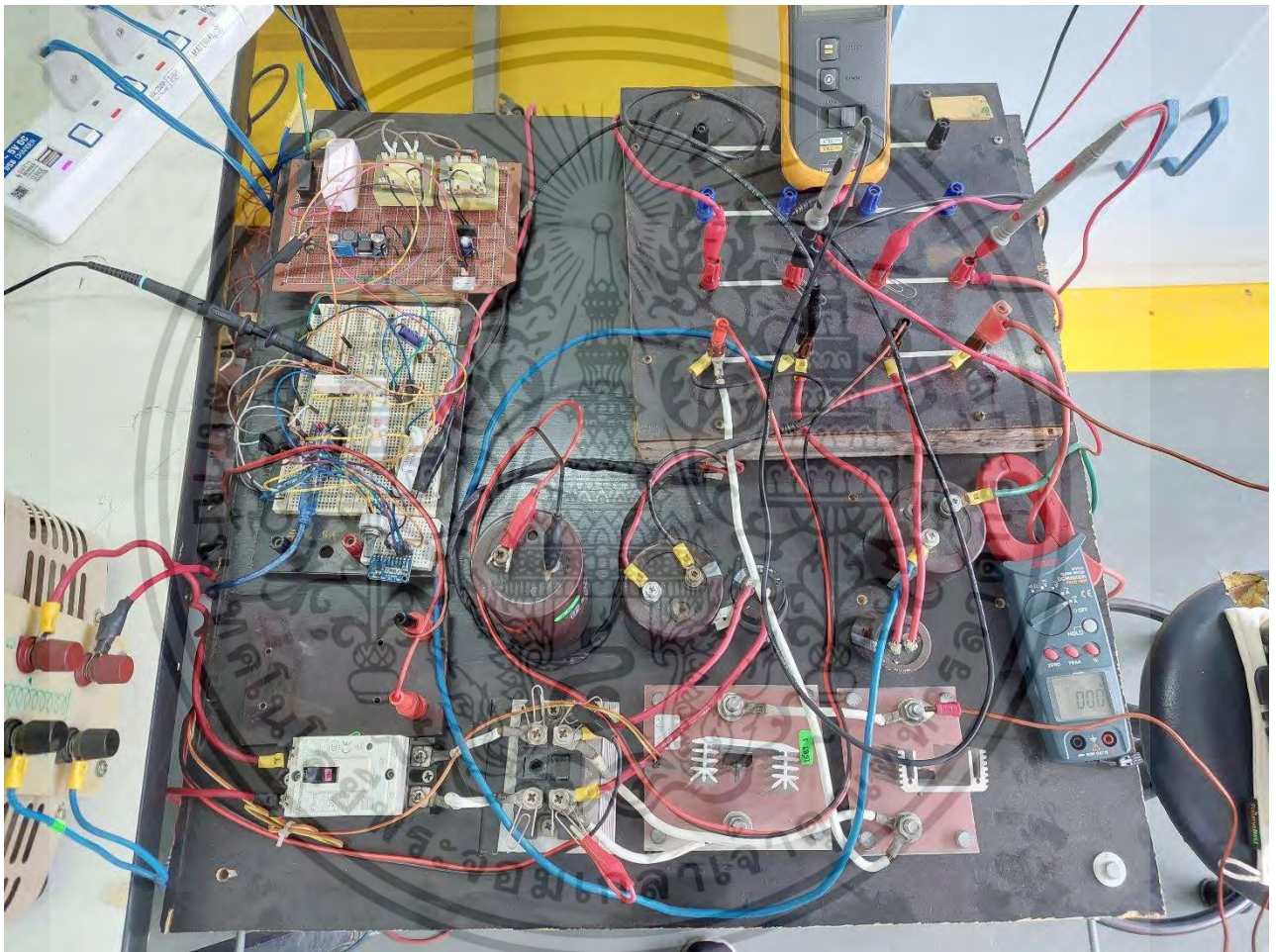
องค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



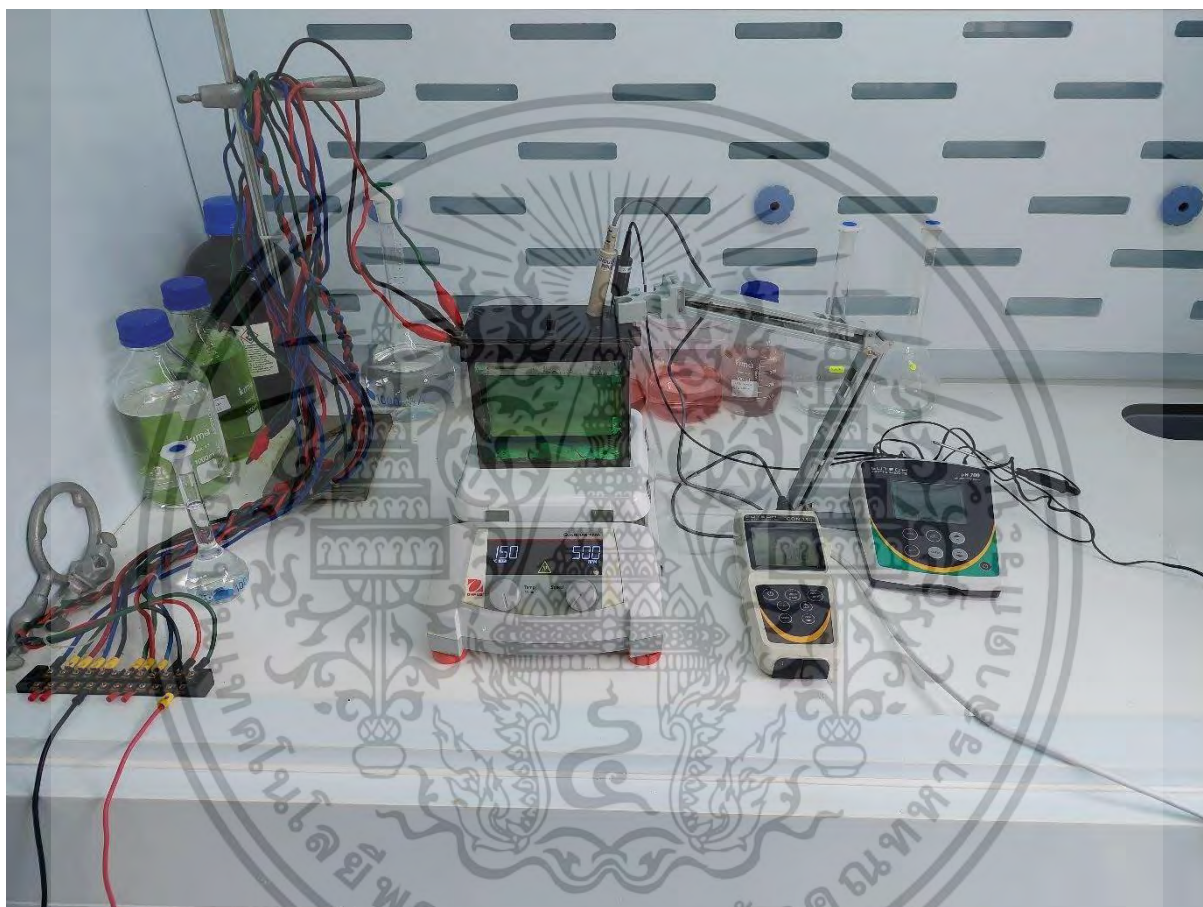
แผนผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การนำกลีบนิกเกิดด้วยวิธีการอิเล็กโทรซินนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	อภิชาต จักหงษ์สุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	30 พฤษภาคม 2539
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 281 ซอยสุขโขทัย 13 ถนน สุขโขทัย แขวงดุสิต เขตดุสิต จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10300
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2554-2557	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนราชวินิต
พ.ศ. 2557 – 2561	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม
พ.ศ. 2561 - ปัจจุบัน	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2567	“กระบวนการนำกลับนิกเกิลจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วย วิธีการทางไฟฟ้า Nickel Recovery from Spent Lithium Ion Batteries by Electrowinning” และนำเสนอผลงานใน “การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 23” ระหว่างวันที่ 9 – 10 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิต จังหวัดขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้