

การนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว

ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY FROM SPENT

LITHIUM ION BATTERY

โดย



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY FROM SPENT  
LITHIUM ION BATTERY

KORAWICH

BOONSRI

KRITTIMA

CHERDSURIYA

KRITSADAKORN

PANYA

CHAWAKORN

KAMNUANSIL

SUWANNACHART

YARNSUWAN

ANECHA

BOUYAM

APIRAK

KETPHONG

ORATHAI

KRUTHUN

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว

ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY FROM SPENT  
LITHIUM ION BATTERY

โดย



ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

รศ. พิชิต ล้ายอง

ผศ.ดร.ชดชนก อัทฒพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว

ผู้จัดทำ

- |                   |             |
|-------------------|-------------|
| 1. นายกรวิชัย     | บุญศรี      |
| 2. นางสาวกฤติมา   | เชิดสุริยา  |
| 3. นายกฤษฎากร     | ปัญญา       |
| 4. นายชวกร        | ค่านวนศิลป์ |
| 5. นายสุวรรณหชาติ | ยานสุวรรณ์  |
| 6. นายอเนชา       | บัวแย้ม     |
| 7. นายอภิรักษ์    | เกตุพงษ์    |
| 8. นางสาวอรัญญา   | ครุฑทูน     |

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## การนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว

นายกรวิษณ์	บุญศรี	
นางสาวกฤติมา	เชิดสุริยา	
นายกฤษฎากร	ปัญญา	
นายชวกร	คำนวนศิลป์	
นายสุวรรณาชาติ	ยานสุวรรณ์	
นายอเนชา	บัวแย้ม	
นายอภิรักษ์	เกตุงษ์	
นางสาวอรทัย	ครุฑหุ่น	
ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ	สฤกพฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. พิชิต	ลำยอง	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ชดชนก	อัทธมพงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563		

### บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการนำกลับโลหะที่มีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) ซึ่งประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ผลการศึกษาพบว่าชุดจำลองดังกล่าวสามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้ภายใต้เงื่อนไขของการทำงานที่เหมาะสม โดยผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังกระบวนการทดลองจะถูกนำเสนอผ่านการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA) ซึ่งอาศัยข้อมูลจากการทดลองและการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP (Inductively coupled plasma, ICP) เป็นพื้นฐาน เพื่อใช้เป็นเครื่องมือหลักในการสนับสนุนและสร้างแรงจูงใจสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าจากซากของแบตเตอรี่ภายใต้กระบวนการรีไซเคิลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# ELECTROWINNING FOR METAL RECOVERY FROM SPENT LITHIUM ION BATTERY

Mr. Korawich	Boonsri
Miss Krittima	Cherdsuriya
Mr. Kritsadakorn	Panya
Mr. Chawakorn	Kamnuansil
Mr. Suwannachart	Yarnsuwan
Mr. Anecha	Bouyam
Mr. Apirak	Ketphong
Miss Orathai	Kruthun
Asst. Prof. Dr. Piampoom Sarikprueck	Advisor
Assoc. Prof. Pichit Lumyoung	Advisor
Asst. Prof. Dr. Chodchanok Attaphong	Advisor

## Abstract

This thesis presents the study of electrically recovering precious metals from spent lithium-ion batteries. The objective is to create and develop a prototype model for the recovery of required precious metals by the electrowinning process, which consists of a circuit power supply, electrodes and electrolyte solution. The results of the study showed that the proposed model was able to remove the required precious metal from the solution under suitable operating conditions. The product results after the experimental process were presented through Material Flow Analysis (MFA) based on experimental data and the inductively coupled plasma (ICP) metallurgy analysis. Fundamentally, it serves as a key tool to support and incentivize the recovery of precious metals from battery residues under an environmentally friendly recycling process in line with the principles of a circular economy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชตชนก อัทธพงษ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ นอกจากนี้ยังได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นางสาวนัตยา โมรวรรณ นักศึกษาบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาเป็นผู้ร่วมวิจัยและที่เลี้ยงให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนร่วมดำเนินการวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) ที่ให้โอกาสในการร่วมมือพัฒนางานวิจัย และสนับสนุนทุนในการศึกษางานวิจัยนี้ตลอดโครงการ

ขอขอบคุณนายภัทรพล เอี่ยมยัง วิศวกรชาย บริษัทบินเบรนต์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและจัดหาอุปกรณ์เครื่องวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้สมบูรณ์

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในด้านค่าใช้จ่ายและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยในการจัดหาอุปกรณ์ให้คำแนะนำและปรึกษาจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	4
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery)	6
2.1.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่	6
2.1.1.1 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)	6
2.1.1.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	6
2.1.1.3 แผ่นแยก (Separator)	7
2.1.1.4 ตัวรับกระแส (Current collector หรือ Tabs)	7
2.1.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่	7
2.1.3 ชนิดของแบตเตอรี่	8
2.1.3.1 ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LCO)	8
2.1.3.2 ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LMO)	8
2.1.3.3 ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP)	8
2.1.3.4 ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide, NCA)	8
2.1.3.5 ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. IV

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 กระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy process)	9
2.2.1 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)	9
2.2.1.1 กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิง (Electrorefining)	10
2.2.1.2 กระบวนการอิเล็กโทรวินนิง (Electrowinning)	10
2.2.2 สารละลายมาตรฐาน (standard solution)	11
2.2.2.1 สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ (primary standard solution)	11
2.2.2.2 สารละลายมาตรฐานทุติยภูมิ (secondary standard solution)	11
2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	11
2.3.1.1 หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU)	11
2.3.1.2 หน่วยความจำ (Memory)	11
2.3.1.3 ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (Port)	12
2.3.1.4 ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)	12
2.3.1.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator)	12
2.3.2 อาศัยโน้ (Arduino)	12
2.3.2.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)	12
2.3.2.2 ซอฟต์แวร์ (Software)	13
2.3.3 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current Sensor)	13
2.3.4 ไดโอด (Diode)	13
2.3.5 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Junction Transistor, IGBT)	13
2.3.6 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)	14
2.3.6.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit)	14
2.3.6.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit)	15
2.3.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)	16
2.3.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอยู่ตัว	16
2.3.7.2 หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	16
2.3.7.3 อัตราขยายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	18
2.3.7.4 ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก 2.3.8 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator) 19

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.9 ออปแอมป์ (Operational Amplifier, Op-amp)	20
2.3.9.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)	21
2.3.9.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)	22
2.3.10 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	22
2.3.11 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)	23
2.4 เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)	23
2.4.1 หลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน	24
2.4.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)	25
2.4.2.1 นิยาม	25
2.4.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ	27
<b>บทที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>30</b>
3.1 การกำหนดประเด็นปัญหา	31
3.2 การกำหนดขอบเขตของการศึกษา	31
3.3 การออกแบบ การสร้าง และการพัฒนา	31
3.3.1 องค์ประกอบทางเคมี	32
3.3.1.1 ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)	32
3.3.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	32
3.3.2 องค์ประกอบทางไฟฟ้า	33
3.3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก	33
3.3.2.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่	34
3.4 การทดลองและการบันทึกผล	35
3.5 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล</b>	<b>39</b>
4.1 ผลการทดลองจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง	39
4.2 ปริมาณของการนำกลับโลหะมีค่าจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง	49
4.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ	52
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>56</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.1.1 ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าในการนำกลับโลหะมีค่า	56
5.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	56
5.1.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุภายใต้แนวคิดของหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 5.1.1 ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าในการนำกลับโลหะมีค่า 56 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 5.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 56

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use. 5.1.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุภายใต้แนวคิดของหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน 57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	57
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	58
5.4 ปัญหาและอุปสรรคเกิดขึ้น	58
5.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น	58
5.6 แนวทางที่นำไปสู่การต่อยอดความรู้	59
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	60
<b>ภาคผนวก</b>	61
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	62
ภาคผนวก ข รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง	67
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์	72
ภาคผนวก ง โปรแกรม Arduino สำหรับควบคุมการป้อนกลับของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	93
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and <sup>VII</sup> cite the document when use.

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	7
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano	12
2.3 สัญลักษณ์ของไดโอด	13
2.4 สัญลักษณ์ของไอซีพีที	14
2.5 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	15
2.6 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	15
2.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	16
2.8 วงจรสมมูลของบัคคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์นำกระแส	16
2.9 วงจรสมมูลของบัคคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส	17
2.10 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา	20
2.11 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	21
2.12 วงจรขยายแบบกลับเฟส	22
2.13 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	22
2.14 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น CON150	23
2.15 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนผังการไหลของวัสดุ	26
2.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ	27
3.1 แผนผังการดำเนินงาน	30
3.2 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรด ชนิดสแตนเลส (ด้ายซ้าย) และไทเทเนียม (ด้านขวา)	32
3.3 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจ่ายไฟโดยวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่	32
3.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก	34
3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่	35
3.6 การทดสอบชุดจำลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก	37
3.7 การทดสอบชุดจำลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่	37
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณีที่ 1	40
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณีที่ 1	40
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณีที่ 2	41
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณีที่ 2	41
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณีที่ 3	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด

4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณีที่ 3	42
4.7 การเปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ขั้วแคโทดจากการทดลองกรณีที่ 1 2 และ 3	43
4.8 การเปรียบเทียบลักษณะตะกอนในสารละลายจากการทดลองกรณีที่ 1 2 และ 3	43

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะของข้อผิดพลาดและสารละลายจากการทดลองกรณี 4	43
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณี 4	44
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณี 4	44
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณี 5	45
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณี 5	45
4.14 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์ในสารละลายจากการทดลองกรณี 5	46
4.15 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณี 6	47
4.16 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณี 7	48
4.17 ลักษณะการจัดเรียงข้อผิดพลาด	48
4.18 ลักษณะการเกาะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณี 8	49
4.19 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 50	53
4.20 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 75	54
4.21 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 95	54
ข.1 ไดอะแกรมวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก	68
ข.2 ไดอะแกรมวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่	69
ข.3 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก	70
ข.4 ชุดแบบจำลองต้นแบบของกระบวนการทำอิเล็กโตรวินนิ่ง	70
ข.5 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวิเคราะห์แนวโน้มทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียมตั้งแต่อดีต ปัจจุบัน และอนาคต	2
1.2 มูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลได้จากแบตเตอรี่	2
1.3 แผนการดำเนินโครงการ	5
3.1 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก	36
3.2 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่	36
4.1 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 1	50
4.2 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 2	51
4.3 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 3	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and <sup>X</sup> cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานหลักสำหรับเครื่องมือเครื่องใช้และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมถึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่จะมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอนาคตอันใกล้ โดยจะเห็นได้จากตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงแนวโน้มทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียมในประเทศไทยตั้งแต่อดีต ปัจจุบัน และอนาคต (ปี พ.ศ. 2553-2573) ซึ่งพบว่ามีการใช้งานโทรศัพท์มือถือเพิ่มมากขึ้นเกือบเท่าตัว เห็นได้จากปีพ.ศ. 2553 ที่มีการใช้งานคิดเป็น 6 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี เพิ่มขึ้นเป็น 11 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี ในปีพ.ศ. 2558 และคาดการณ์ว่าในอนาคตจะมีการใช้งานเพิ่มขึ้นเป็น 44 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี ในปีพ.ศ. 2573 ในขณะที่ส่วนของการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า อาทิเช่น รถยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ปลั๊กอินไฮบริดและอื่นๆ ก็มีแนวโน้มทางการตลาดที่เพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเช่นเดียวกัน และเมื่อประมาณการโดยรวมกับการใช้งานด้านอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและการใช้งานด้านอื่นๆ แล้วพบว่าอนาคตในปี พ.ศ. 2573 จะมีแนวโน้มการใช้งานแบตเตอรี่มากถึง 390 กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี

เมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานก็จะถูกกำจัดไปตามกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตามซากของแบตเตอรี่เหล่านี้ยังมีส่วนประกอบของวัสดุมีค่าหลายชนิดที่นอกจากจะสามารถนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลเพื่อแก้วิกฤตการขาดแคลนธาตุหายากแล้ว ยังสามารถสร้างราคาหรือมูลค่าให้กับซากของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่หมดอายุการใช้แล้วอีกด้วย โดยสังเกตได้จากตารางที่ 1.2 ที่เป็นการแสดงมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับได้จากแบตเตอรี่ ซึ่งจะเห็นว่าขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีองค์ประกอบชนิด  $\text{LiCoO}_2$  มีมูลค่ามากที่สุดคือ 12-16 ดอลลาร์ต่อปอนด์ รองลงมาคือแคโทดชนิด  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  มีมูลค่า 10-13 ดอลลาร์ต่อปอนด์ ขณะที่แคโทดที่มีมูลค่าน้อยกว่าคือ  $\text{LiMnO}_2$  และ  $\text{LiFePO}_4$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1.1 การวิเคราะห์แนวโน้มทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียมตั้งแต่อดีต ปัจจุบัน และอนาคต (หน่วย: กิกะวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

ประเภทการใช้งาน	พ.ศ.2553	พ.ศ.2558	พ.ศ.2563	พ.ศ.2568	พ.ศ.2573
โทรศัพท์มือถือ	6	11	17	28	44
คอมพิวเตอร์แท็บเล็ต	1	7	12	17	25
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	12	9	9	9	11
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา (อื่นๆ)	3	4	7	12	20
<b>อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา (ทั้งหมด)</b>	<b>22</b>	<b>31</b>	<b>45</b>	<b>66</b>	<b>100</b>
รถยนต์ไฟฟ้า (EV)	0	11	65	115	200
รถยนต์ปลั๊กอินไฮบริด (PHEV)	0	2	8	13	25
รถยนต์ไฮบริด (HEV)	0	0	2	7	15
ยานยนต์ไฟฟ้า (อื่นๆ)	0	0	1	2	5
<b>ยานยนต์ไฟฟ้า (ทั้งหมด)</b>	<b>0</b>	<b>13</b>	<b>76</b>	<b>137</b>	<b>245</b>
อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (energy storage)	0	0	2	10	30
การใช้งานอื่นๆ	1	1	2	7	15
<b>รวมทั้งสิ้น</b>	<b>23</b>	<b>45</b>	<b>125</b>	<b>220</b>	<b>390</b>

ที่มา การศึกษาสถานภาพการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย (น. 2-12), โดย ผศ.ดร.สงบ คาค้อ, 2562, ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ตารางที่ 1.2 มูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลได้จากแบตเตอรี่

แคโทด	มูลค่าขององค์ประกอบ (ดอลลาร์/ปอนด์)	มูลค่าของแคโทด (ดอลลาร์/ปอนด์)
LiCoO <sub>2</sub>	8.3	12-16
LiNi <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub>	4.9	10-13
LiMnO <sub>2</sub>	1.7	4.50
LiFePO <sub>4</sub>	0.7	9

ที่มา การศึกษาสถานภาพการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย (น. 2-12), โดย ผศ.ดร.สงบ คาค้อ, 2562, ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในต่างประเทศได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยเทคโนโลยีการรีไซเคิลหลากหลายชนิด [1] ซึ่งมีกระบวนการทำงานที่ต่างกันออกไป โดยเฉพาะกระบวนการสกัดโลหะมีค่าออกมาด้วยกรรมวิธีทางโลหวิทยาที่มีความหลากหลายของกระบวนการให้นำมาประยุกต์ใช้ หนึ่งในนั้นคือกระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลาย (Hydrometallurgical process) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมค่อนข้างมากเพราะมีต้นทุนต่ำ และสามารถเลือกสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการได้ที่ละขั้นตอน แต่ภายหลังการสกัด โลหะที่ได้นั้นมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นที่จะต้องทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรรมวิธีการทางโลหวิทยาไฟฟ้าเคมี เช่น กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) เป็นต้น

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเป็นกระบวนการแยกสกัดโลหะที่ต้องการออกจากสารละลายโดยใช้เซลล์ไฟฟ้า (Electrolytic Cell) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าคงที่กระแสตรง ซึ่งสุดท้ายแล้วโลหะมีค่าที่ต้องการจะมาเกาะอยู่ที่ขั้วแคโทด ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะได้มาซึ่งโลหะมีค่าที่มีความบริสุทธิ์สูงและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหล่านั้น แต่ทว่าเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการมีมาก อีกทั้งประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่ได้มีศึกษาวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับเทคโนโลยีชนิดนี้มากนัก ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างทางวิชาการ ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะสามารถแยกสกัดโลหะมีค่าที่มีความบริสุทธิ์สูงออกจากสารละลายที่ต้องการ และเพื่อเป็นการสร้างมูลค่าให้กับโลหะหรือวัสดุจากซากแบตเตอรี่ภายใต้กระบวนการรีไซเคิลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาการสร้างชุดจำลองของการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)
2. ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดลองทำอิเล็กโทรวินนิ่ง เพื่อนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว
3. เพื่อส่งเสริมองค์ความรู้ ความเข้าใจ และสร้างแรงจูงใจที่เป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในปฏิยานิพนธ์เล่มนี้จะครอบคลุมทั้งหมด 6 ตัวแปรคือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เวลา อุณหภูมิ ความนำไฟฟ้าของสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย

2. ศึกษาและสร้างชุดจำลองของการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิยู่ผู้ใดเห็นใจใช้เพื่อประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. ทดสอบชุดจำลองกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ในการสกัดโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วภายในห้องปฏิบัติการที่มีมาตรฐานความปลอดภัยทางเคมี และบันทึกข้อมูลที่ได้ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูง

4. ปรับปรุงและพัฒนาชุดจำลองต้นแบบ เพื่อเตรียมความพร้อมสู่การนำไปใช้งานจริงสำหรับภาคอุตสาหกรรมในอนาคต

5. วิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์และจัดทำผังการไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA) จากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เพื่อให้เข้าใจกลไกการไหลของวัสดุก่อนถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้นจากการสกัด

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี สารสนเทศ และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อวางแนวทางในการออกแบบชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

2. ประชุมทีมเพื่อระดมความคิดในการจัดเตรียมอุปกรณ์ และออกแบบวิธีการทำชุดจำลองของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

3. สร้างชุดจำลองต้นแบบสำหรับกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำกลับโลหะมีค่าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

4. ทดสอบชุดจำลองต้นแบบสำหรับกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถใช้งานได้จริง มีความถูกต้องแม่นยำ และเชื่อถือได้ ภายใต้การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการทางเคมีที่มีมาตรฐานความปลอดภัย และบันทึกข้อมูลที่ได้เพื่อใช้ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูง

5. ปรับปรุงและพัฒนาชุดจำลอง เพื่อให้สามารถตอบสนองตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และเพื่อเตรียมความพร้อมสู่การนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

6. วิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลขณะทำการทดลอง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการสร้างผังการไหลของวัสดุจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

7. วิเคราะห์การไหลของวัสดุจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เพื่อสร้างแรงจูงใจและความเชื่อมั่นในการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้า ภายใต้แนวคิดของหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงาน

หัวข้อ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. การศึกษาข้อมูล	←→								
2. การออกแบบชุดจำลอง การทำอิเล็กทรอนิกส์		←→							
3. สร้างชุดจำลองต้นแบบ		←→	←→						
4. ทดสอบและเก็บข้อมูล			←→	←→					
5. การปรับปรุงและพัฒนา				←→	←→	←→			
6. การวิเคราะห์และการ สังเคราะห์ข้อมูล					←→	←→			
7. วิเคราะห์การไหลของ วัสดุจากซากแบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออน						←→	←→		
8. สรุปผลการศึกษา									←→

←→ หมายถึงระยะเวลาที่วางแผน

←→ หมายถึงระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการออกจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน
2. สามารถส่งเสริมองค์ความรู้ ความเข้าใจ และสร้างแรงจูงใจจากการสนับสนุนการนำกลับโลหะและวัสดุมีค่าด้วยเทคโนโลยีการรีไซเคิล ภายใต้หลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)
3. สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำผังการไหลของวัสดุจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ประกอบด้วย การศึกษา ออกแบบ และพัฒนาการสร้างชุดแบบจำลองต้นแบบของการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้งานแล้วด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะของการทดลองที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ปริมาณของการนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการมากกว่า 85% และรวมไปถึงการสร้างแรงจูงใจที่เป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนจากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ ซึ่งสามารถนำไปใช้ต่อยอดในการวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมต่างๆ ต่อไปในอนาคตได้

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

ในปัจจุบัน การใช้งานแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพของใช้งานที่ดีกว่าเทคโนโลยีของแบตเตอรี่โดยทั่วไป ทั้งในด้านของโครงสร้างและส่วนประกอบ อายุการใช้งาน ความหนาแน่นของพลังงาน ความจุ และคุณสมบัติอื่นๆ อีกมากมาย นอกจากนี้ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนยังถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลังงานในอุตสาหกรรมรถยนต์ที่เป็นมิตรต่อธรรมชาติ ซึ่งนับได้ว่าเป็นทางเลือกที่มีประโยชน์สำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เป็นอย่างมาก

##### 2.1.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แผ่นแยก (Separator) และตัวรับกระแส (Current collector) โดยมีหน้าที่และวัสดุที่แตกต่างกันดังนี้ (Ghassan Zubi et al. 2018)

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode foil) ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เป็นวัสดุประเภทลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LCO) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LMO) ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP) และลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) ขณะที่ขั้วแอโนด (Anode foil) จะนิยมใช้เป็นวัสดุประเภทแกรไฟต์ (Graphite)

2. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีส่วนผสมของเกลือลิเทียมและสารละลายออร์แกนิก ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้ไอออนไหลผ่าน แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน ดังนั้นจึงเป็นตัวนำไอออนที่ดี แต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่ไม่ดี

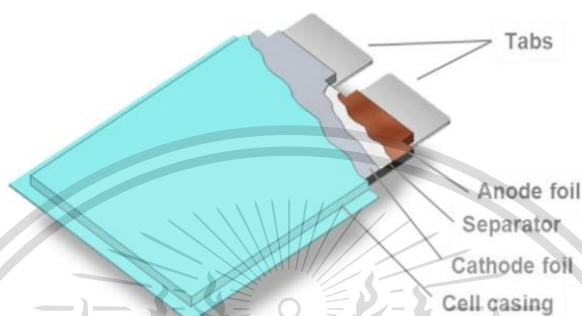
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. แผ่นแยก (Separator) คือ สารประกอบที่กั้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจร โดยเป็นสารประกอบที่ลิเทียมไอออนสามารถซึมผ่านได้ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วใช้วัสดุประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) ในการทำแผ่นแยก

4. ตัวรับกระแส (Current collector หรือ Tabs) คือ โลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก และเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน  
ที่มา Ghassan Zubi et al. (2018)

#### 2.1.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

คุณลักษณะที่สำคัญของแบตเตอรี่คือ พลังงานจำเพาะ กำลังจำเพาะ ความทนทาน และความปลอดภัย พลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขึ้นอยู่กับขั้วของแคโทด (อิเล็กโทรดขั้วบวก) และขั้วของแอโนด (อิเล็กโทรดขั้วลบ) ซึ่งปัจจุบันในเชิงพาณิชย์ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีค่าพลังงานจำเพาะตั้งแต่ 90 ถึง 250 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะสามารถอธิบายด้วยอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อพลังงาน (P/E Ratio) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ความหนาแน่นของลิเทียมไอออน ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับอิเล็กโทรไลต์ (Solid electrolyte interphase, SEI) สัมประสิทธิ์การแพร่ และการนำไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด

ในด้านความทนทานหรืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับ การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ (Self-discharge) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกสภาวะ แต่จะเกิดขึ้นในสัดส่วนที่มากหรือน้อยนั้นเป็นผลมาจากการใช้งาน ดังนั้นจึงเกิดเงื่อนไขที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ เช่น การทำงานภายใต้อุณหภูมิที่สูงหรือต่ำ การประจุเกินเวลา (overcharge) ความลึกการคายประจุ (deep discharge) และการเสื่อมสภาพเนื่องจากกระแสที่สูงเกินไป นอกจากนี้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สามารถลดลงได้แม้จะถูกเก็บไว้โดยที่ยังไม่ได้ใช้งาน และปัจจัยภายนอกโดยเฉพาะอุณหภูมิ โดยรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับ การเก็บประจุและคายประจุของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.1.3 ชนิดของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้มีการจัดประเภทตามวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วแคโทด ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบลิเทียม ดังต่อไปนี้

#### 1. ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium cobalt oxide, LCO)

ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารประกอบของลิเทียมไอออนชนิดแรกที่เริ่มวางจำหน่ายในปี 1991 โดยมีลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เป็นขั้วแคโทด มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ  $\text{LiCoO}_2$  และแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด ซึ่งให้พลังงานจำเพาะ 150–190 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม โดยแบตเตอรี่ LCO เป็นตัวเลือกยอดนิยมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต และแล็ปท็อป มีจำนวนรอบการใช้งาน 500-1000 รอบเต็ม และมีอายุการใช้งานที่สั้น ข้อเสียหลักของแบตเตอรี่ LCO คือ มีความปลอดภัยต่ำเนื่องจากโคบอลต์ออกไซด์มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิต่ำ อาการแบตเตอรี่ไหม้ (thermal runaway) จะเริ่มเกิดเมื่อแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูง 150 องศา นอกจากนี้ยังมีเรื่องของช่วงการใช้งานที่สั้น (short lifespan) จึงต้องมีการประจุไฟใหม่บ่อยครั้ง

#### 2. ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium manganese oxide, LMO)

สารประกอบลิเทียมแมงกานีสออกไซด์เริ่มวางจำหน่ายในปี 1996 โดยแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ สัญลักษณ์ทางเคมีคือ  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  มีรูปแบบโครงสร้างสปิเนล ซึ่งช่วยให้การไหลของไอออนในอิเล็กโทรดดีขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานภายในต่ำ มีอายุการใช้งาน 1,000–1500 รอบ มีพลังงานจำเพาะค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 100–140 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม อาการแบตเตอรี่ไหม้ของแบตเตอรี่ LMO จะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 250 องศา นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่มีโคบอลต์เป็นส่วนประกอบ และใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่จะใช้ในรถจักรยานไฟฟ้า (electric bicycle, e-bikes) เครื่องมือทางไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางการแพทย์

#### 3. ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate, LFP)

ลิเทียมไอรอนฟอสเฟตเป็นสารประกอบของลิเทียมไอออนที่เริ่มวางจำหน่ายในปี 1999 โดยแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมไอรอนฟอสเฟต มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ  $\text{LiFePO}_4$  ขณะที่ส่วนมากจะใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุที่ขั้วแอโนด มีความทนทาน ปลอดภัย ใช้วัสดุที่มีมากในธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีจำนวนรอบการใช้งานสูงสุดถึง 2000 รอบ และมีประสิทธิภาพคงที่ แต่มีพลังงานจำเพาะต่ำอยู่ในช่วง 90–140 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น ในปัจจุบันนี้แบตเตอรี่ LFP มีบทบาทสำคัญในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) และรถจักรยานไฟฟ้า รวมไปถึงในระบบจ่ายไฟทั้งระบบออฟกริด (Off-Grid) และระบบโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid-Connected)

#### 4. ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide, NCA)

ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในปี 1999 โดยแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์หรือ  $\text{LiNiCoAlO}_2$  มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์นี้ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด โดยทั่วไปแล้วขั้วแคโทดของ NCA จะใช้ส่วนผสมของนิเกิล 80% โคบอลต์ 15% และอะลูมิเนียม 5% ซึ่งจะเห็นว่ามีการใช้งานโคบอลต์ในปริมาณไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ LCO แบตเตอรี่ NCA มีค่าพลังงานและกำลังจำเพาะที่สูงมาก โดยมีค่าพลังงานจำเพาะสูงสุดถึง 250 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม และมีรอบการทำงานอยู่ที่ 1,000–1500 รอบ ในปัจจุบันเทสลา (Tesla) ได้ใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ในรถยนต์ไฟฟ้า และยังมีการคาดการณ์ว่าจะถูกนำมาใช้ในระบบโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าในอนาคต

5. ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC)

ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์มีแคโทดทำจากสารประกอบลิเทียม-นิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ สัญลักษณ์ทางเคมีคือ  $\text{LiNiMnCoO}_2$  และมีแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ NCA แล้วพบว่า แบตเตอรี่ NMC มีค่าพลังงานจำเพาะที่ต่ำกว่าซึ่งจะอยู่ในช่วงประมาณ 140–200 วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ในขณะที่มีอายุการใช้งานนานถึง 1,000–2,000 รอบ สัดส่วนของนิเกิล แมงกานีส และโคบอลต์อาจเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของแบตเตอรี่ที่มีการปรับสัดส่วนให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะ โดยการเพิ่มสัดส่วนของนิเกิลจะช่วยเพิ่มพลังงานจำเพาะ ขณะที่การเพิ่มสัดส่วนของแมงกานีสจะเป็นการเพิ่มกำลังจำเพาะ แบตเตอรี่ NMC ถูกนำมาใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับพกพา เครื่องมือไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางการแพทย์

## 2.2 กระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy process)

กระบวนการโลหวิทยาสารละลายเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสกัดโลหะมีค่าออกมาจากซากของเสียที่ผ่านการใช้งานแล้ว ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการโลหวิทยาสารละลายเริ่มจากนำซากของเสียไปผ่านการบดลดขนาดให้อยู่ในรูปของผงละเอียด จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งอาจจะเป็นสารละลายกรดหรือเบส แล้วแยกสกัดโลหะมีค่าแต่ละชนิดที่ต้องการออกมาจากสารละลายด้วยวิธีการสกัดด้วยสารละลาย หรือวิธีการตกตะกอนขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งเทคนิควิธีการของกระบวนการโลหวิทยาสารละลายประกอบด้วย การชะละลาย (Leaching) การตกตะกอน (Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การสกัดด้วยสารละลาย (Solvent extraction) และอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) หรือการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า (ผศ.ดร.สงบ คำค้อ, 2562)

เนื่องจากปริมาณพันธบัตรนี้มุ่งเน้นไปที่การนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการออกจากสารละลาย ดังนั้นเทคนิคและวิธีการที่ใช้ของกระบวนการโลหวิทยาสารละลายจึงให้ความสำคัญไปที่การแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า ดังนี้

### 2.2.1 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือ การใช้ปฏิกิริยาเคมีเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าหรือการให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอน หรือที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เรียกว่า การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีถูกนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า และการแยกโลหะออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้า เป็นต้น

1. กระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิง (Electrorefining) เป็นกระบวนการทำโลหะให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า โดยมีหลักการสำคัญคือ การทำให้โลหะที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งเป็นขั้วแอโนดกลายเป็นโลหะที่บริสุทธิ์มาเกาะที่ขั้วแคโทด (โดยขั้วแอโนดและแคโทดเป็นของแข็งทั้งคู่) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วกระบวนการอิเล็กโทรรีไฟนิงมักถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายภายหลังการถลุงโลหะโดยกรรมวิธีการใช้ความร้อนสูง (Pyrometallurgical extraction) มาแล้วในตอนต้น

2. กระบวนการอิเล็กโทรวินนิง (Electrowinning) เป็นกระบวนการสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลาย โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นโลหะในสภาพของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงเกาะอยู่ที่ขั้วแคโทด กระบวนการอิเล็กโทรวินนิงนิยมนำมาใช้เกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าจำพวกทองแดง ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแบตเตอรี่และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะที่สูง ประกอบกับการใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งสะดวกต่อผู้ลงทุนหรือผู้ศึกษาวิจัยในการค้นคว้าหาข้อมูล สำหรับกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิงจะใช้หลักการเดียวกับอิเล็กโทรลิซิสคือ การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, D.C.) จากวงจรภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการได้แก่ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอิเล็กตรอนเพื่อทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรและทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าจะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นขั้วเฉื่อย (Inert electrode) ซึ่งก็คือ ขั้วที่ไม่มีส่วนร่วมใดๆ ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น แพลทินัมหรือทองคำขาว (Platinum, Pt) และแกรไฟต์ (Graphite, C) เป็นต้น

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเนื่องจากประกอบด้วยไอออนบวกที่วิ่งไปรีดิวซ์ที่แคโทด ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ขณะที่ไอออนลบในสารละลายจะวิ่งไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วบวกแล้วจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบของสารละลายเพื่อทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2.2 สารละลายมาตรฐาน (standard solution)

สารละลายมาตรฐานคือ สารละลายที่ทราบค่าความเข้มข้นแน่นอน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (สุทธิณี มีสุข, 2554)

1. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ (primary standard solution) เป็นสารละลายมาตรฐานที่เตรียมจากการชั่งสารบริสุทธิ์ที่จะใช้ทำเป็นสารละลาย ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลว มีเสถียรภาพสูง น้ำหนักโมเลกุลมาก และทราบสูตรที่แน่นอน โดยนำมาละลายในตัวทำละลายให้มีปริมาตรตามที่ต้องการพอดีในขวดวัดปริมาตรที่เป็นเครื่องแก้วหรือเครื่องมือชนิด Class A ที่ผ่านการสอบเทียบมาแล้ว เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐานที่มีค่าความเข้มข้นที่แน่นอน ความเสถียรสูง และเก็บรักษาได้นานโดยที่ความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง

2. สารละลายมาตรฐานทุติยภูมิ (secondary standard solution) เป็นสารละลายที่เตรียมจากสารที่ไม่เสถียรหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่ายในบรรยากาศ ส่งผลให้เป็นสารละลายที่ไม่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอนจากการเตรียมโดยตรง ซึ่งการหาความเข้มข้นที่ถูกต้องทำได้โดยการเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ

## 2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงถูกนำมาใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะสามารถสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้ วงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงถูกออกแบบให้มีลักษณะของการทำงานคือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (Constant Current) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในวงจรมีค่าคงที่ (Feedback Control Circuit) เพื่อควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีค่าคงที่เมื่อความต้านทานของสารละลายมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

### 2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีความสามารถคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยองค์ประกอบภายในของอุปกรณ์ประกอบด้วย หน่วยประมวลผล หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งถูกบรรจุไว้ภายในตัวถึงเดียวกัน นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เนื่องจากสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขาของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อด้วยได้ โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1. หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU) ทำหน้าที่ประมวลผลคำสั่งโปรแกรม โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตัวสามารถมีหน่วยประมวลผลกลางได้หลายตัว

2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) โดยหน่วยความจำ

โปรแกรมทำหน้าที่เก็บโปรแกรมคำสั่งการทำงาน ซึ่งข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำชนิดนี้จะไม่ว่ากรณีใด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับระบบ ขณะที่หน่วยความจำข้อมูลที่มีหน้าที่สำหรับเก็บข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลจะเกิดกรณีข้อมูลในหน่วยความจำสูญหายเมื่อหยุดการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับระบบ

3. ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (Port) ทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายนอก สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ พอร์ตอินพุต (Input Port) สำหรับใช้ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอก และพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) สำหรับใช้ในการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ภายนอก

4. ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS) คือ สายสัญญาณที่เชื่อมต่อกับทุกส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่เป็นเส้นทางแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการกำหนดจังหวะของการประมวลผลและการคำนวณต่างๆ การทำงานที่เกิดขึ้นของไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับจังหวะที่กำหนดจังหวะ โดยหากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูงจะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการประมวลผลที่สูงเนื่องจากมีจังหวะของการทำงานถี่ขึ้น

### 2.3.2 อาดูอินโน (Arduino)

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาในรูปแบบ Open Source ที่มีการแจกจ่ายความรู้ทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาและพัฒนาต่อยอดได้ Arduino นับได้ว่าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาเนื่องจากสะดวกต่อการใช้งาน โดยสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกเข้าไปยังขา I/O ของบอร์ด จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมเพื่อป้อนคำสั่งควบคุมการทำงานของ Arduino ให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ผู้ใช้งานต้องการ แพลตฟอร์มของ Arduino ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่

1. ฮาร์ดแวร์ (Hardware) เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งส่วนมากแล้วบอร์ดจะถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้บอร์ด Arduino ยังมีหลากหลายชนิดให้เลือกใช้งาน โดยแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น จำนวนขาและแรงดันไฟที่ใช้ เป็นต้น บอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ Arduino UNO Arduino Mega และ Arduino Nano เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ซอฟต์แวร์ (Software) แพลตฟอร์ม Arduino จะมีซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า Arduino IDE ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการเขียนโปรแกรม คอมไพล์ และอัปโหลดลงบอร์ด Arduino ด้วยภาษา Arduino ที่มีภาษา C/C++ เป็นต้นแบบ

### 2.3.3 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current Sensor)

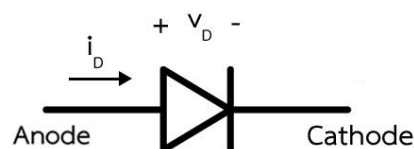
เซนเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทาน (Current Sensing Resistor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำของวงจรไฟฟ้า การติดตั้งเซนเซอร์จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการจะวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยอาศัยอุปกรณ์ตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าน้อยๆ สำหรับช่วยในการวัดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นท์ หรือที่เรียกว่า ตัวต้านทานชั้นท์ (Shunt Resistor) ซึ่งจะทำการต่ออนุกรมกับโหลด แล้วทำการวัดแรงดันตกคร่อม เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการที่ (2.1)

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานชั้นท์  
 $V_{shunt}$  = แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานชั้นท์  
 $R_{shunt}$  = ค่าความต้านทานชั้นท์

### 2.3.4 ไดโอด (Diode)

ไดโอดคือ อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าให้ไหลได้เพียงทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) แสดงดังรูปที่ 2.3 หลักการทำงานของไดโอดคือ เมื่อไดโอดถูกไบอัสไปข้างหน้า (forward biased) ไดโอดจะนำกระแสโดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเล็กน้อยขนาด 0.6-0.7 โวลต์ (เมื่อไดโอดเป็นสารซิลิคอน) และเมื่อไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ (reverse biased) จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วขนาดน้อยมากจนอาจถือว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอุปกรณ์ไดโอดจนกระทั่งถึงจุดแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ย้อนกลับ (reverse breakdown voltage)



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.3.5 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Junction Transistor, IGBT) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่ละเอียดและดียิ่งกว่าที่หาได้ทั่วไป

นำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีถูกพัฒนาขึ้นโดยการนำข้อดีของ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง และจีทีโอไธริสเตอร์มารวมกัน กล่าวคือ ไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตที่สูงคล้ายของมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยในการควบคุมการสวิตช์ การควบคุมการนำและการหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต อีกทั้งยังสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูงได้ ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่าประมาณ 2-3 โวลต์ สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนั้นไอจีบีทีจะถูกออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้านานได้คล้ายกับจีทีโอไธริสเตอร์

ไอจีบีทีมีช่วงเวลาการนำกระแสและการหยุดนำกระแสที่มีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีพิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าถึง 5,000 โวลต์ โดยสัญลักษณ์ของไอจีบีทีที่แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะประกอบด้วยขา 3 ขา ได้แก่ ขาที่ใช้สำหรับการผ่านกระแสไฟฟ้าหลักคือ ขาคอลเล็กเตอร์ (Collector, C) กับขาอิมิตเตอร์ (Emitter, E) และขาที่ใช้ในการควบคุมการนำกระแสและการหยุดนำกระแสของไอจีบีทีซึ่งเรียกว่าขาเกต (G)



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

### 2.3.6 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสคือ วงจรที่ทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้แปลงสัญญาณคือ ไดโอด ซึ่งไดโอดจะทำให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีทั้งครึ่งคลื่นบวกและลบกลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเฉพาะครึ่งคลื่นบวกหรือลบเพียงอย่างเดียว วงจรเรียงกระแสสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

#### 1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit)

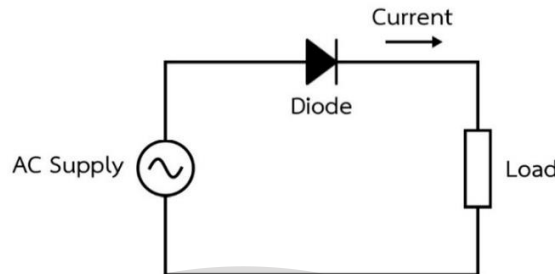
วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะประกอบไปด้วยไดโอด 1 ตัว ซึ่งวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้ามากลายเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มี 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีสัญญาณเอาต์พุตกับช่วงที่ไม่มีสัญญาณเอาต์พุต วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งคลื่นบวกเข้ามาที่ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากพบว่ามีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไหลผ่านไหลตได้ สัญญาณเอาต์พุตจะเหมือนกับสัญญาณอินพุต หลังจากนั้นเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

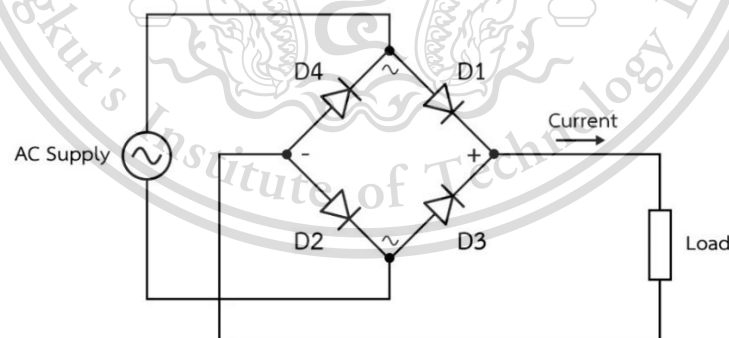
กระแสกลับเป็นครั้งคลื่นลบจะทำให้ไดโอดได้รับไบอัสกลับ ในช่วงนี้ไดโอดจะไม่นำกระแส จะไม่มีแรงดันตกคร่อมโหลด จะไม่เกิดสัญญาณเอาต์พุต จนกระทั่งเมื่อมีสัญญาณอินพุตเป็นครั้งคลื่นบวกเข้ามาอีกครั้ง จึงจะมีสัญญาณเอาต์พุตเกิดขึ้น



รูปที่ 2.5 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

## 2. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.6 วงจรจะประกอบไปด้วย ไดโอด 4 ตัว โดยมีหลักการทำงานคือ ไดโอด D1 และ D2 จะนำกระแสไฟฟ้าในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสลบครึ่งคลื่นบวก ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากไดโอด D1 เข้าโหลดแล้วไหลกลับผ่านไดโอด D2 ส่วนในช่วงที่แรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสลบครึ่งคลื่นลบจะทำให้ไดโอด D3 และ D4 นำกระแสไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากไดโอด D3 เข้าโหลดแล้วจึงไหลกลับผ่านไดโอด D4 ส่งผลให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

โดยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ จะมีค่าแรงดันไฟฟ้า rms ดังสมการที่ (2.2)

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

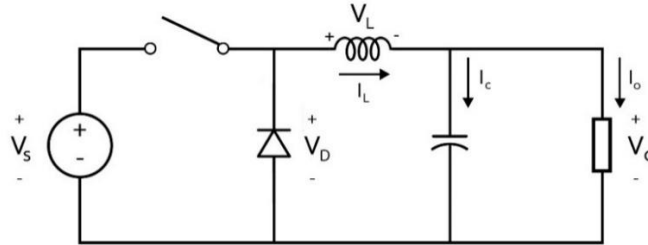
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษตามกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าอินพุต โดยส่วนประกอบของวงจรจะประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง ไดโอด ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีลักษณะของการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

1. เงื่อนไขการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอยู่ตัว

1.1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \tag{2.3}$$

1.2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $V_L$ ) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \tag{2.4}$$

1.3. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุ ( $I_C$ ) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(t) dt = 0 \tag{2.5}$$

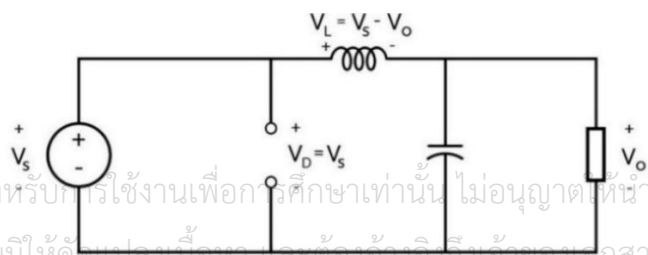
1.4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้า ( $P_s$ ) เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก ( $P_o$ )

$$P_s = P_o \tag{2.6}$$

2. หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของสวิตซ์ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะคงตัว ดังนี้

ขณะสวิตซ์นำกระแส



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของบัคคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตซ์นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวงจรสมมูลขณะสวิตช์นำกระแส ดังรูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ (Switch on) และผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปสะสมเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ สมการในช่วงสวิตช์นำกระแสเป็นดังนี้

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \tag{2.7}$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_o \tag{2.8}$$

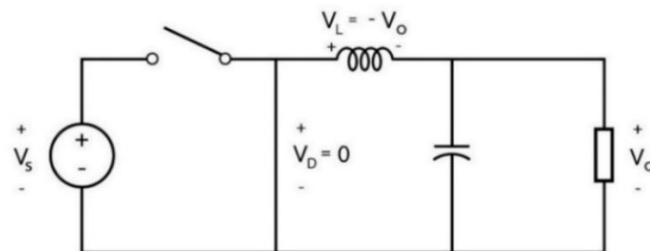
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \tag{2.9}$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแสคือ dt = DT ดังนั้นจะได้

$$\Delta i_{L,on} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \tag{2.10}$$

- เมื่อ
- D = Duty Cycle
  - t<sub>on</sub> = ช่วงเวลานำกระแส
  - t<sub>off</sub> = ช่วงเวลาไม่นำกระแส
  - T = เวลาหนึ่งคาบ
  - i<sub>L</sub> = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
  - Δi<sub>L,on</sub> = การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส
  - V<sub>s</sub> = แรงดันอินพุต
  - V<sub>o</sub> = แรงดันเอาต์พุต
  - V<sub>L</sub> = แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
  - L = ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของบัคคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวงจรสมมูลขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.9 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะนำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง สมการในช่วงสวิตช์ไม่นำกระแสเป็นดังนี้

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (2.11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.12)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงหยุดนำกระแสคือ  $dt=(1-D)T$  ดังนั้น สมการที่ (2.12) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.13)$$

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

### 3. อัตราขยายแรงดันของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

การหาอัตราขยายแรงดันพิจารณาจากเงื่อนไขในสมการที่ (2.3) การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นในขณะสวิตช์นำกระแสกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ลดลงในขณะสวิตช์ไม่นำกระแสจะเท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.14)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.16)$$

### 4. ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากขณะอยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.17)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะสวิตช์ไม่นำกระแสคือ

$$I_{L,min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอย่างอื่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $I_{L,min} =$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำสุด  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้นสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้วงจรยังสามารถทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องได้ โดยกำหนดให้  $I_{L,min}$  เท่ากับศูนย์ จะได้

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $L_{min}$  = ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด  
 $R$  = ค่าตัวต้านทานของวงจร  
 $f$  = ความถี่สวิตซิง (Switching frequency)

#### 5. ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ แต่เพื่อให้ตัวเก็บประจุมีขนาดที่เหมาะสมที่ยังทำให้อัตราละลอกคลื่นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงต้องมีการคำนวณโดยหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุหาได้จากสมการ

$$I_C = I_L - I_R \quad (2.21)$$

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$\Delta Q = C\Delta V_o = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\Delta Q$  = ค่าประจุที่เปลี่ยนแปลง  
 $\Delta V_o$  = ค่าระลอกของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  
 $C$  = ค่าตัวต้านทานของวงจร

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.24) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.23)$$

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

#### 2.3.8 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator)

อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสองวงจรที่ต้องการแยกออกจากกันทางไฟฟ้า ภายในประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) ที่ใช้เป็นตัวส่งสัญญาณ และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) ที่ใช้เป็นตัวรับสัญญาณ ไม่ว่ากรณีใด สัญญาณ โดยจะทำการแปลงสัญญาณจากสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงผ่านการทำงานของไดโอดเปล่งแสงที่อยู่ภายใน และแปลงจากสัญญาณแสงกลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าตามเดิมผ่านการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยที่อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงนี้จะทำให้เกิดการแยกกันระหว่าง 2 วงจร ซึ่งจะไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า เพื่อป้องกันการส่งสัญญาณรบกวนกันระหว่างวงจร หรือ ป้องกันแรงดันกระชากที่อาจจะเกิดขึ้นกับวงจร รูปที่ 2.10 แสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา

อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงจะรับสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital signal) เช่น จากไมโครคอนโทรลเลอร์ มาใช้ควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของไดโอดเปล่งแสงที่อยู่ภายใน เพื่อนำแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดไปควบคุมการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยเมื่อระดับแรงดันอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดันไบอัสตรงของไดโอดเปล่งแสง ( $V_F$ ) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล หรือ ที่เรียกว่า กระแสไบอัสตรง ( $I_F$ ) ซึ่งจะทำให้ไดโอดเปล่งแสงออกมาตามระดับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ในการต่อวงจรจะต้องมีตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่ด้วยเพื่อเป็นตัวจำกัดขนาดของกระแสไฟฟ้าไม่ให้มีค่าสูงเกินไป โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-50 มิลลิแอมแปร์ และเมื่อโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับแสง จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าระหว่างขา C และขา E ของโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยถ้าหากมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขา C และขา E จะทำให้มีกระแสเอาต์พุตไหลในวงจร



รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงแบบ 8 ขา

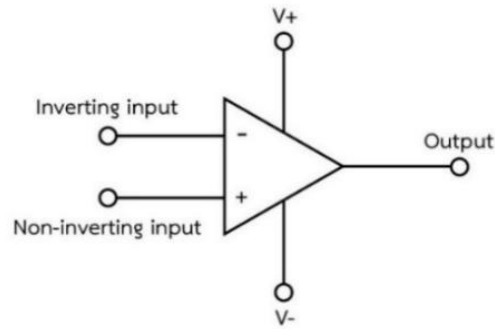
### 2.3.9 ออปแอมป์ (Operational Amplifier, Op-amp)

ออปแอมป์ ย่อมาจาก Operational Amplifier เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ภายในประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ตัวต้านทาน ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ และ ไดโอด เป็นต้น โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกต่อรวมกันอยู่ในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit, IC) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น วงจรขยายเชิงเส้น วงจรคณิตศาสตร์ วงจรกรองความถี่ และวงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

สัญลักษณ์ของออปแอมป์แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วที่ต่อใช้งาน ดังนี้

1. ขั้วอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) เป็นขั้วอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งเมื่อป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้ว Inverting Input นี้ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกกลับเฟส
2. ขั้วอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) เป็นขั้วอินพุตของออปแอมป์ ซึ่งเมื่อป้อนสัญญาณเข้าแล้ว สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสเดียวกับสัญญาณป้อนเข้า
3. ขั้วเอาต์พุต (Output) เป็นขั้วเอาต์พุตของออปแอมป์
4. ขั้วต่อแรงดันไฟเลี้ยงด้านบวก (Positive Power Supply)
5. ขั้วต่อแรงดันไฟเลี้ยงด้านลบ (Negative Power Supply)

#### 2.3.9.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบกลับเฟสคือ วงจรขยายที่มีสัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.12 สัญญาณที่ต้องการขยายจะถูกต่อเข้ากับขาอินพุตแบบกลับขั้วผ่านความต้านทาน  $R_1$  และความต้านทาน  $R_2$  ซึ่งต่อระหว่างขาอินพุตแบบไม่กลับขั้วกับขาเอาต์พุตในลักษณะป้อนกลับแบบลบ โดยขาอินพุตแบบกลับขั้วจะต่อลงกราวด์ อัตราขยายของวงจรขยายแบบกลับเฟสสามารถออกแบบได้จากสมการ (2.24) ดังนี้

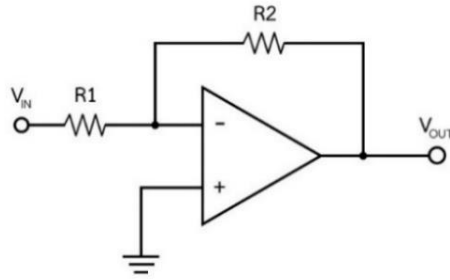
$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.24)$$

- เมื่อ
- $A_v$  = อัตราขยายของวงจร
  - $R_1$  = ค่าความต้านทาน  $R_1$
  - $R_2$  = ค่าความต้านทาน  $R_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

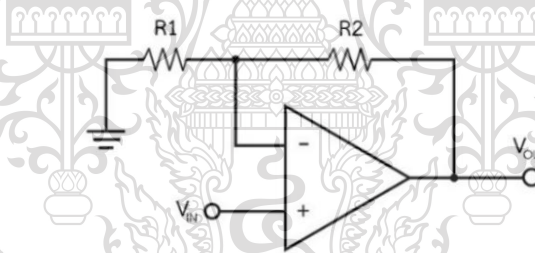


รูปที่ 2.12 วงจรขยายแบบกลับเฟส

### 2.3.9.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสคือ วงจรขยายที่มีสัญญาณเอาต์พุตเฟสเดียวกับสัญญาณอินพุต โดยมีลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 2.13 สัญญาณที่ต้องการขยายจะถูกต่อเข้ากับขาอินพุตแบบไม่กลับขั้ว ขณะที่ความต้านทาน R1 จะถูกต่อระหว่างขาอินพุตแบบกลับขั้วกับกราวด์ และความต้านทาน R2 จะถูกต่อระหว่างขาอินพุตแบบกลับขั้วกับขาเอาต์พุตในลักษณะป้อนกลับแบบลบ อัตราขยายของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสสามารถออกแบได้จากสมการ (2.25)

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

### 2.3.10 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับอีกวงจรหนึ่ง ผ่านการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายในวงจร โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ขดลวด 2 ขด ได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) พันรอบแกนที่เป็นสื่อกลางของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งมีการทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ ขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกจ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปยังขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งส่งผลให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาใช้งานในระบบ โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองฝั่ง ดังสมการที่ (2.26)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{l_2}{l_1} = a \quad (2.26)$$

เมื่อ  $V_1, V_2$  = ค่าแรงดันที่ขั้วขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ตามลำดับ

$n_1, n_2$  = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ตามลำดับ

$l_1, l_2$  = ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ตามลำดับ

$a$  = อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลง

### 2.3.11 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำหรือสารละลายคือ ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือความสามารถในการยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้ำหรือสารละลายนั้นได้ โดยความสามารถในการนำไฟฟ้าของน้ำหรือสารละลายจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของไอออนและอุณหภูมิขณะทำการวัด สำหรับการใช้งานทั่วไปของเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าจะต้องทำการจุ่มหัววัดค่าลงในน้ำหรือสารละลายที่จะทำการวัด โดยตามปกติแล้วหน่วยที่ใช้วัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำหรือสารละลายคือ ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) หรือโมห์ต่อเซนติเมตร (mho/cm) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น CON150

## 2.4 เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

แบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานจะแปรสภาพเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถ้าหากไม่มีการบริหารจัดการอย่างถูกวิธีแล้วอาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องมาจากสารเคมีอันตรายที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น สารตะกั่ว สารแมงกานีส สารแคดเมียม สารนิกเกิล และสารปรอท เป็นต้น (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา) สารเคมีที่เป็นพิษเหล่านี้อาจปนเปื้อนสู่ระบบนิเวศและระบบห่วงโซ่อาหารผ่านทางดิน น้ำ และอากาศ ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจึงควรมีการจัดการตามแนวคิดขยะเหลือศูนย์ (zero

waste) ที่เป็นแนวทางในการลดการเกิดขยะตั้งแต่ต้นทาง โดยทำให้ปริมาณขยะที่จะถูกนำไปกำจัดมี

ไม่ว่ากรณีใด ปริมาณลดลงให้น้อยที่สุดจนเป็นศูนย์ หรือการจัดการตามแนวคิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular

Economy) ที่เป็นการนำของเสียกลับมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตครั้งใหม่ ซึ่งโลหะที่เป็น

ส่วนประกอบในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่หมดอายุการใช้งานแล้วนั้นนับได้ว่าเป็นโลหะมีค่าและหายาก ดังนั้นจึงเกิดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วขึ้นมาเป็นจำนวนมาก โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อนำกลับโลหะมีค่าที่พบจากซากของเสียหรือผลิตภัณฑ์ให้กลับคืนสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง เพื่อการพัฒนาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน รักษาคุณค่าของทรัพยากร วัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ไว้ให้นานที่สุด รวมไปถึงการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น (TBCSD Sustainable Development. 2019)

เศรษฐกิจหมุนเวียน หมายถึง ระบบอุตสาหกรรมที่วางแผนและออกแบบมาเพื่อคืนสภาพหรือให้ชีวิตใหม่แก่วัสดุชนิดต่างๆ ในวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์แทนการทิ้งเป็นขยะเมื่อสิ้นสุดการบริโภค ซึ่งจะให้ความสำคัญกับการจัดการของเสียตั้งแต่ขั้นตอนของกระบวนการผลิตจนถึงขั้นตอนของการอุปโภคบริโภค โดยการนำวัตถุดิบที่ผ่านการผลิตและการบริโภคแล้วกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ (re-material) หรือการนำมาใช้ซ้ำ (reuse) แทนที่จะเป็นการทิ้งไปเป็นขยะ โดยต่างจากก่อนหน้านี้ที่เป็นเศรษฐกิจแบบเส้นตรง (Linear Economy) ซึ่งเป็นการนำทรัพยากรมาผลิตและบริโภคแบบใช้แล้วทิ้ง (Take-Make-Dispose) โดยจะก่อให้เกิดขยะเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อความเสี่ยงในการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิต และปัญหามลภาวะของสิ่งแวดล้อมที่มากขึ้นในอนาคตอันใกล้ จากปัญหาดังกล่าวทำให้องค์กรภาคธุรกิจทั่วโลกเริ่มหาทางออกโดยการนำระบบเศรษฐกิจแบบหมุนเวียนมาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีการปรับให้สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาทั้งระดับสากลและระดับประเทศ เพื่อเป้าหมายในการพัฒนาระบบเศรษฐกิจ การบริหารจัดการคุณภาพชีวิต และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน

#### 2.4.1 หลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน แบ่งออกเป็น 3 ประการ ดังนี้

1. การรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพทุนด้านทรัพยากรธรรมชาติ (Natural Capital) คือ การจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์หรือคุณค่าสูงสุด โดยการเลือกใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมและตรงตามวัตถุประสงค์ ผ่านการใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพหรือเทคโนโลยีสะอาด และการใช้พลังงานทดแทนเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รวมทั้งมีการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติในระบบให้สามารถฟื้นคืนสภาพและสามารถนำกลับมาใช้ทดแทนได้

2. การใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการหมุนเวียนวัตถุดิบคือ ผลิตภัณฑ์ส่วนประกอบ และวัสดุต่างๆ ต้องผ่านการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน (Long-Lasting Design) โดยจะต้องเป็นการออกแบบเพื่อลดของเสียและเข้ากับห่วงโซ่ชีวภาพ ไม่มีสารพิษ และสามารถย่อยสลายได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ประเภท พลาสติก โพลีเมอร์ อัดลอย หรือวัสดุประดิษฐ์อื่นๆ จะต้องถูกออกแบบให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือสามารถนำกลับมาปรับปรุง แปรสภาพ ให้มีคุณสมบัติเหมือนของใหม่ได้ เพื่อยืดอายุการใช้งานของสินค้าและผลิตภัณฑ์นั้นๆ (Remanufacturing)

3. การรักษาประสิทธิภาพของระบบด้วยการออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบด้านลบจากผลิตภัณฑ์ (Negative Externalities) หลักการดังกล่าวสามารถครอบคลุมถึงการลดผลกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแต่สิ่งนี้ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่กรณีนี้นำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ด้านลบทางสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพชีวิต โดยจัดการกับผลกระทบทางลบที่มาจากการใช้ทรัพยากร เช่น ที่อยู่อาศัย อากาศ น้ำ มลภาวะทางเสียง และการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ เป็นต้น

#### 2.4.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเป็นทฤษฎีการวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับอธิบายปริมาณสารขาเข้า-ออก และสะสมอยู่ในกระบวนการของระบบทั้งหมด ภายใต้ระยะเวลาและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้ ซึ่งอาศัยหลักการสำคัญคือ ปริมาณของสารที่เข้าสู่ระบบ จะต้องมามีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างปริมาณสารที่สะสมอยู่ในแต่ละกระบวนการกับปริมาณสารที่ออกจากระบบ หรือที่เรียกว่า การทำสมดุลมวลสาร (mass balance) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของกฎอนุรักษ์มวลสาร (law of conservation of matter) ที่ว่ามวลของสารจะไม่สูญหายหรือถูกทำลายไป (Brunner and Rechberger, 2016)

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์และจัดการกับปัญหา โดยการใช้การเชื่อมโยงกันของแหล่งกำเนิด (source) เส้นทางผ่าน (pathway) และองค์ประกอบอื่นๆ ของวัสดุในระบบมาช่วยสำหรับการระบุแหล่งที่มาของของเสียและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การกำหนดนโยบายและเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

##### 1. นิยาม

###### 1.1 สสาร (Substance)

สสารตามความหมายของราชบัณฑิตยสถานคือ สิ่งที่มีมวลสาร ต้องการที่อยู่ และสัมผัสได้ อาจมีเพียงสารเดียว เช่น ทองคำ เงิน แก้ว เหล็ก น้ำ หรือประกอบด้วยสารหลายสาร เช่น ดินปืน หรือ อากาศ ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุที่ให้นิยามของสสารว่าเป็นสารประกอบที่เป็นสารบริสุทธิ์เนื้อเดียวกัน มีสมบัติและลักษณะเฉพาะตัว สามารถระบุโครงสร้างทางเคมีได้อย่างชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น ในระดับอะตอม ธาตุต่างๆ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ถูกจัดว่าเป็นสสาร เนื่องจากมีหน่วยย่อยเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด ขณะที่ไม้ (Wood) ไม่จัดว่าเป็นสสาร เพราะประกอบด้วยเซลล์ลูลอส ไฮโดรเจน ออกซิเจน และสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่ได้เป็นหน่วยย่อยชนิดเดียวกันทั้งหมด เป็นต้น กระบวนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุอาศัยหลักการสำคัญที่ว่า สสารจะไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายลง แต่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สเพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Stable condition) เช่น แคลเซียมสามารถ เปลี่ยนเป็นแคลเซียมคลอไรด์ได้ผ่านกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งไม่ถือว่าเป็นการสร้างใหม่ เพราะแคลเซียมยังไม่ได้ถูกทำลาย เพียงแต่ถูกเปลี่ยนรูปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น

###### 1.2 ผลิตภัณฑ์ (Goods)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ผลิตภัณฑ์ตามความหมายด้านธุรกิจของราชบัณฑิตยสถานคือ สิ่งที่มีรูปร่างหรือมีคุณสมบัติทางกายภาพ สามารถจับต้องได้ และมนุษย์เป็นผู้ผลิตขึ้น เช่น เสื้อผ้าเครื่องแต่งกาย อาหาร

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

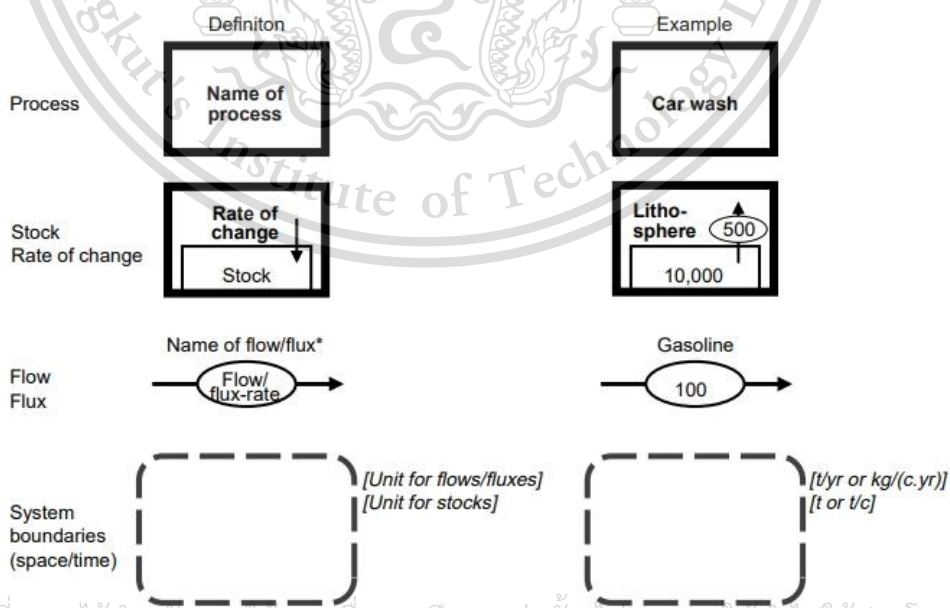
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และเครื่องตี๋ม ยานพาหนะ และยารักษาโรค เป็นต้น แต่ในด้านการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ คำว่าผลิตภัณฑ์มีความหมายว่า วัตถุที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ อาจถูกสร้างขึ้นจากสารชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน ยกตัวอย่างเช่น น้ำตี๋ม คอนกรีต โทรทัคส์ รถยนต์ รวมถึงกลุ่มของซากขยะและกากตะกอนน้ำเสียทั้งหมด มูลค่าและปริมาณของผลิตภัณฑ์มักถูกนิยมนำมาแสดงผลเป็นข้อมูลทางสถิติ โดยอาศัยการดำเนินงานผ่านทางหน่วยงานรัฐบาล องค์กร หรือ บริษัท เช่น ปริมาณของการผลิตสินค้า (ต้นต่อปี) ซึ่งนับได้ว่าเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ เป็นต้น

1.3 กระบวนการ (Process)

กระบวนการ หมายถึง ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงอย่างมีระเบียบเพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น การแปรสภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตขั้นต้นของอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหะ ซึ่งมีกระบวนการหลักคือการสกัดโลหะออกมาจากรู หรือกระบวนการแปรสภาพที่เกิดขึ้นในระดับครัวเรือนที่มีการแปรรูปจากสินค้าอุปโภคบริโภคไปเป็นของเสีย และอาจมีการปล่อยมลพิษออกสู่อากาศ

จากรูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับจัดทำผังการไหลของวัสดุประกอบด้วย กล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงถึงส่วนของกระบวนการ กล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่ซ้อนทับอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่แสดงถึงปริมาณการสะสมของวัสดุในกระบวนการนั้นๆ ส่วนการไหลของวัสดุในกระบวนการมักจะถูกแสดงออกมาในรูปเชิงปริมาณ โดยเขียนแทนด้วยเส้นตรงที่มีหัวลูกศรที่มีทิศทางชี้จากขั้นตอนหนึ่ง ไปยังอีกขั้นตอนหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีขอบเขตของระบบซึ่งถูกเขียนแทนด้วยเส้นประที่ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

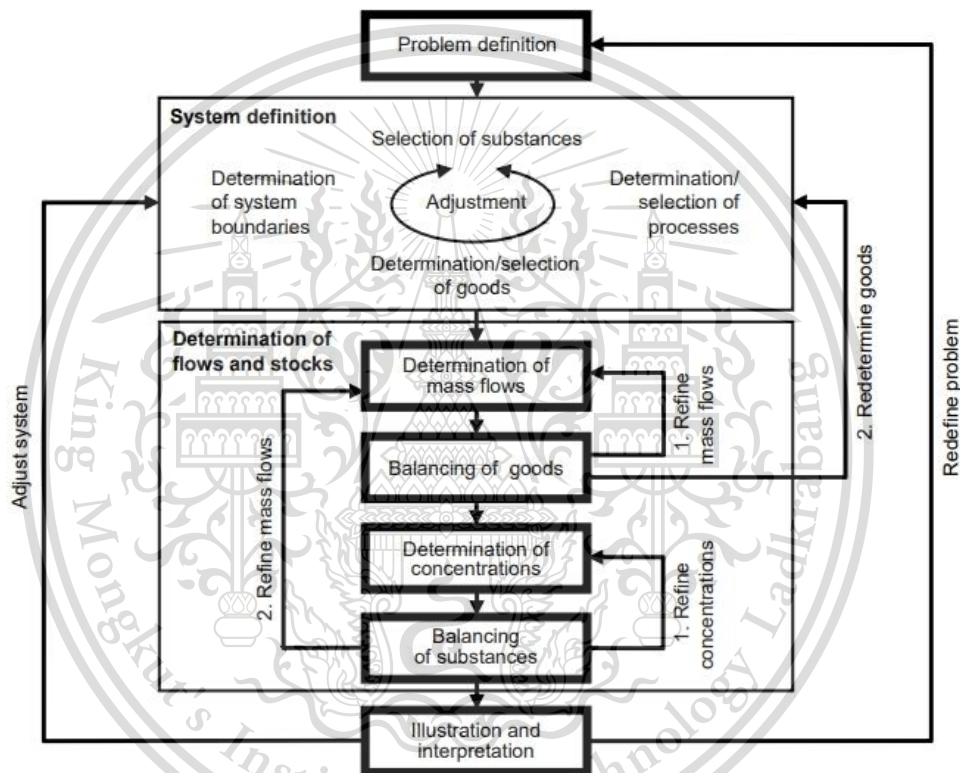
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดรูปที่ 2.15 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนผังการไหลของวัสดุทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ที่มา Brunner และ Rechberger (2016)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเป็นเครื่องมือหลักที่ช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจทั้งในด้านการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อม โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุจะถูกนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย มีความน่าเชื่อถือ และมีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากรูปที่ 2.12 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุประกอบด้วย การระบุสารที่ศึกษา การกำหนดขอบเขตและระยะเวลาของการศึกษา การระบุการไหล การคำนวณปริมาณการไหล การประเมินปริมาณการไหลของวัสดุ และการนำเสนอผลการศึกษา โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ที่มา Brunner และ Rechberger (2016)

### 2.1 การระบุสารที่ศึกษา (Selection of substances)

การกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษา และชนิดของระบบการวิเคราะห์การไหลของวัสดุนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่นำมาใช้ในการเลือกสารของระบบ เนื่องจากจุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์การไหลของวัสดุคือ ต้องแสดงผลลัพธ์ของกระบวนการให้ออกแบบในรูปแบบที่ง่ายต่อการเลือกตัวดัชนี (Indicator elements) ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มสาร โดยสามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะตัวทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติเฉพาะของสารทุกชนิดในกลุ่มได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2 การกำหนดขอบเขตและระยะเวลาการศึกษา (System definition in space and time)

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

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

การทำสมดุลของผลิตภัณฑ์ในระบบเป็นขั้นตอนถัดจากการเลือกสรรและกำหนดขอบเขตของระบบ การเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัย หรือเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จะถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างผังการไหลของวัสดุโดยต้องคำนึงถึงความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของข้อมูลที่ถูกรวบรวมมาใช้เป็นอันดับแรกเสมอ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและสามารถสร้างประโยชน์ต่อการวางแผนโครงการในอนาคตมากที่สุด ในขั้นตอนนี้ปริมาณการไหลของวัสดุที่มีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณการไหลทั้งหมดจะไม่ถูกนำมาพิจารณา โดยต้องคำนึงเสมอว่าการถูกตัดออกของข้อมูลเหล่านี้ต้องไม่มีผลกระทบต่อวัตถุประสงค์ของการศึกษา และยังสามารถรวมกระบวนการย่อยๆ ให้กลายเป็นกระบวนการเดียวได้ เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการในระบบที่จะเกิดขึ้นได้

## 2.4 การคำนวณปริมาณการไหลของมวลสาร ปริมาณการสะสม และ ความเข้มข้น (Determination of mass flows, stocks and concentrations)

การคำนวณปริมาณการไหลของวัสดุอาศัยการคาดการณ์หรือตั้งสมมติฐานผ่านการใช้โมเดลทางวิทยาศาสตร์ที่อ้างอิงถึงข้อมูลพร็อกซี (Proxy Data) ซึ่งเป็นการคาดการณ์ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบระบบที่มีความคล้ายคลึงกัน ยกตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สูญเสียจากการสึกกร่อนของยางรถยนต์ โดยอาศัยการอ้างอิงข้อมูล

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประเภทพริกซึ่งจากประเทศสวีเดนที่มีการศึกษาไว้แล้วก่อนหน้า กล่าวคือ ปริมาณสังกะสีที่สูญเสียจากการสีกร่อนของยางรถยนต์ในประเทศสวีเดน 1 คันเท่ากับ 0.032 กิโลกรัม ดังนั้นจากข้อมูลยานพาหนะที่มีการใช้งานอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวน 140 ล้านคัน ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สูญเสียจากการสีกร่อนของยางรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกาจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของ 0.032 กิโลกรัมสังกะสีต่อปีกับจำนวนรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา 140 ล้านคัน (4,500 คันต่อปี) เป็นต้น

## 2.5 การประเมินปริมาณการไหลของวัสดุ และปริมาณการสะสมทั้งหมด (Assessment of total material flows and stocks)

ปริมาณการไหลของสสารในระบบสามารถใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์คำนวณได้ โดยคิดจากผลคูณระหว่างมวลการไหลของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นของสสารในผลิตภัณฑ์ การประเมินปริมาณการสะสมของวัสดุที่อยู่ในระบบสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 คือ การวัดมวลของวัสดุที่สะสมอยู่ในระบบโดยตรง และวิธีที่ 2 คือ การหาปริมาณการสะสมของวัสดุจากการประเมินผ่านตัวแปรปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุ (มวลของวัสดุมีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างความหนาแน่นของวัสดุกับปริมาตรของวัสดุ) โดยวิธีแรกเหมาะกับการพิจารณาวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบน้อยมากและสะสมอยู่ในระบบเป็นระยะเวลานาน เช่น การศึกษากระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในดิน หรือ แอ่งน้ำขนาดใหญ่ เป็นต้น ขณะที่วิธีที่สองเหมาะกับการพิจารณาวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบอย่างรวดเร็ว เช่น การศึกษาการฝังกลบขยะประเภทต่างๆ ตามชุมชนเมือง เป็นต้น

## 2.6 การนำเสนอผลการศึกษา (Presentation of results)

การนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุต้องถูกนำเสนอออกมาในรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจ ไม่ซับซ้อน และต้องมีความน่าเชื่อถือ สิ่งสำคัญอีกประการสำหรับการนำเสนอผลการศึกษาคือ วิธีการสื่อสารระหว่างผู้ส่งสารกับผู้รับสาร โดยผู้ส่งสารต้องสามารถสื่อสารออกมาได้อย่างชัดเจน เนื่องจากกลุ่มผู้ฟังหลักมี 2 ประเภทคือ กลุ่มของนักวิชาการและกลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสีย (นักลงทุน) ซึ่งความแตกต่างระหว่างกลุ่มผู้ฟัง 2 ประเภทนี้คือ ความรู้และความเข้าใจที่มีต่อศาสตร์ดังกล่าว เนื่องจากเหล่านักวิชาการคือ ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในด้านการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ตลอดจนการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ขณะที่กลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสีย (นักลงทุน) คือ ผู้ที่อาจจะไม่ได้มีพื้นฐานทางด้านนี้ แต่มักเป็นผู้ที่มีบทบาทในการตัดสินใจด้านนโยบายหรือการอนุมัติโครงการ ดังนั้นการนำเสนอผลการวิเคราะห์จึงควรมีทั้งรายงานฉบับเต็ม (comprehensive technical report) และรายงานสรุป (executive summary)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

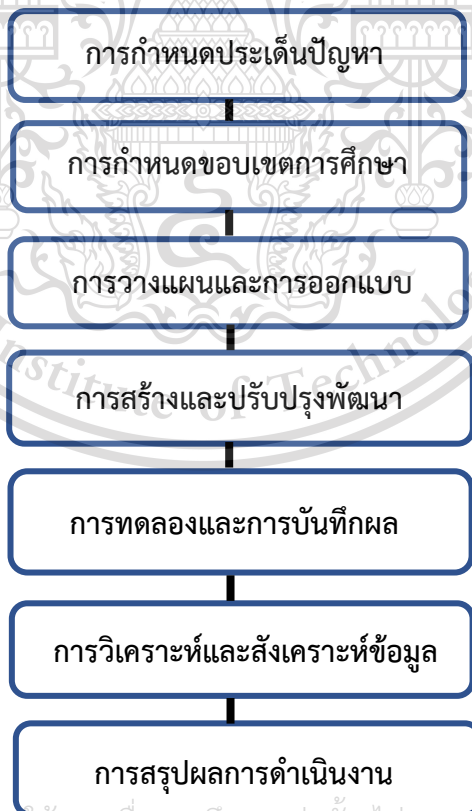
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### แผนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้จะนำเสนอการออกแบบและพัฒนาการสร้างชุดจำลองสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง เพื่อแยกสกัดโลหะที่ต้องการออกจากสารละลายที่เกิดจากการนำซากของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและสารละลาย โดยเมื่อนำผงอิเล็กโทรดที่ผ่านการชะละลายด้วยกรดและตกตะกอนเพื่อนำส่วนที่ไม่ต้องการออกไปแล้ว จะเหลือโลหะมีค่าที่ต้องการปะปนอยู่กับโลหะชนิดอื่นในรูปของสารละลาย ดังนั้นเพื่อจุดประสงค์ในการสกัดโลหะมีค่าเหล่านั้นออกจากสารละลาย จึงได้มีการนำกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงาน ซึ่งการจะนำโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้จำเป็นต้องทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และค่าความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้มีการสร้างชุดจำลองกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งขึ้น เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการแยกสกัดโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการออกจากสารละลาย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1 การกำหนดประเด็นปัญหา

การกำหนดประเด็นปัญหาเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการเลือกหัวข้องานวิจัยนับได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด เพราะนอกจากการกำหนดประเด็นปัญหาจะเป็นเครื่องมือสนับสนุนให้ผู้ทำวิจัยสามารถเลือกหัวข้องานวิจัยที่สนใจได้แล้ว ยังสร้างแรงกระตุ้นให้กับผู้ทำวิจัยในการสร้างสรรค์ผลงานออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นขั้นตอนหลังจากการกำหนดประเด็นปัญหา เพื่อช่วยในการเสริมสร้างองค์ความรู้ ความเข้าใจ และวางแนวทางในการออกแบบการดำเนินงานได้อย่างเป็นระเบียบเรียบร้อย โดยทางคณะผู้จัดทำได้เลือกหัวข้องานวิจัยเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว เนื่องจากเห็นถึงผลกระทบจากปริมาณขยะประเภทแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่กำลังเพิ่มขึ้นสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 1

ในการศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการทบทวนวรรณกรรม (Literature Review) จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งของในประเทศและต่างประเทศ เพื่อให้การดำเนินงานครั้งนี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 3.2 การกำหนดขอบเขตของการศึกษา

การกำหนดขอบเขตของการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะกระทำครอบคลุมทั้งหมด 6 ตัวแปร ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย และความนำไฟฟ้าของสารละลาย โดยทำการศึกษาร่วมทั้งสร้างชุดจำลองต้นแบบของการนำกลับโลหะมีค่าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้การปฏิบัติงานที่มีมาตรฐานความปลอดภัยทางเคมี เช่น ตู้ดูดควันหรือตู้ระบายควัน (Fume hood) หน้ากากอนามัย ถุงมือยาง และระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ เป็นต้น การพัฒนาและการปรับปรุงชุดจำลองต้นแบบอุปกรณ์ทำทั้งส่วนของวงจรทางไฟฟ้าและกระบวนการทางเคมี เพื่อเตรียมความพร้อมสู่การนำไปใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ช่วยเสริมสร้างประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อมให้กับประเทศผ่านทางการวิเคราะห์และจัดทำผังการไหลของวัสดุ เพื่อให้เข้าใจกระบวนการไหลเข้า-ออก และสะสมของสารในระบบ ซึ่งอาจนำไปสู่การกำหนดนโยบายเกี่ยวกับการบริหารจัดการซากของเสียภายในประเทศอย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 3.3 การออกแบบ การสร้าง และการพัฒนา

สำหรับการวางแผนและการออกแบบชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ องค์ประกอบทางไฟฟ้า และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

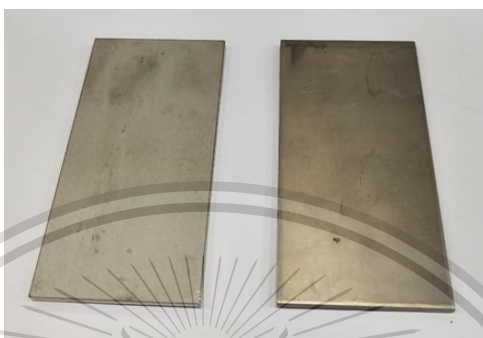
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

#### 1. ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้มีการวางแผนและออกแบบการเลือกใช้วัสดุต่างๆ ทางเคมี โดยทางคณะผู้จัดทำได้เลือกโลหะนำไฟฟ้าชนิดสแตนเลส (Stainless steel 316L) และโลหะไทเทเนียม (Titanium) มาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดสำหรับกระบวนการทดลองครั้งนี้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดชนิดสแตนเลส (ซ้าย) และไทเทเนียม (ขวา)

จากรูปที่ 3.2 ขั้วอิเล็กโทรดหรือขั้วทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Plate) มีขนาดด้านกว้าง 50 มิลลิเมตร ด้านยาว 100 มิลลิเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายใต้เงื่อนไขของการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 0.55 แอมแปร์ ซึ่งถูกป้อนกระแสไฟฟ้าโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยที่ Stainless steel 316L ถูกใช้เป็นขั้วแคโทด ขณะที่ Titanium ถูกใช้เป็นขั้วแอโนด โดยทั้ง 2 ขั้วมีขนาดเท่ากัน

สำหรับการศึกษาหาเงื่อนไขในการนำกลับโลหะมีค่าที่ระบบของสารละลายต้องการการจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น แหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับระบบแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยที่ขั้วไฟฟ้าจะถูกออกแบบโดยใช้เป็นโลหะนำไฟฟ้า Stainless steel 316L เพียงชนิดเดียว (ทั้งขั้วแอโนดและแคโทด) มีลักษณะของขั้วเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดด้านกว้าง 25 มิลลิเมตร ด้านยาว 100 มิลลิเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร เท่ากันหมดทุกขั้ว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจ่ายไฟโดยวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is received for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

### 2.1 สารละลายที่ใช้สำหรับการทดลอง

สารละลายที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองมีทั้งสารละลายมาตรฐาน (standard solution) และสารละลายธรรมดา (solution) โดยสารละลายที่เป็นสารละลายมาตรฐาน ได้แก่ โคบอลต์ (II) ไนเตรต ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ) ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และนิกเกิล (II) ไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ขณะที่สารละลายธรรมดาที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ โคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4$ ) ความเข้มข้น 4300 ppm กับ 10,000 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตรเท่ากัน และโคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4$ ) ความเข้มข้น 5,000 ppm ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

### 2.2 การเตรียมสารละลาย

สำหรับกระบวนการเตรียมสารละลายประเภทต่างๆ ข้างต้น ส่วนมากมีวิธีการเตรียมที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงขอยกตัวอย่างการเตรียมสารละลายโคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4$ ) ที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ปริมาตร 500ml มาพอสังเขป ดังนี้

1.  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  มีน้ำหนักโมเลกุล (MW) เท่ากับ 281.10 g/mol
2. ต้องการ Co มีความเข้มข้น 10,000 ppm หมายความว่า ในน้ำ 1,000 mL มี Co 10,000 mg ดังนั้นในการเตรียม Co 10,000 mg/L ปริมาตร 500 mL ต้องใช้ Co 5,000 mg
3. จาก  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  281.10 g แยกตัวให้ Co 58.93 g ดังนั้น Co  $58.93 \times 10^3$  mg ต้องใช้  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $281.10 \times 10^3$  mg
4. ถ้า Co 5,000 mg ต้องใช้  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 23,850 \text{ mg} = 23.85 \text{ g}$  ดังนั้น ต้องใช้  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  นึก 23.85 g ผสมกับน้ำกลั่นให้ละลายจนหมด
5. ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้เท่ากับ 500 ml ด้วยน้ำกลั่น

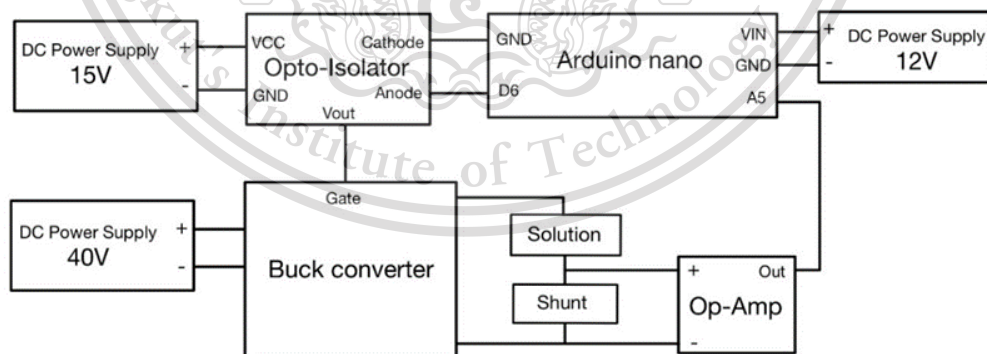
### 3.3.2 องค์ประกอบทางไฟฟ้า

เนื่องจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีตัวแปรพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 6 ตัวแปรคือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เวลา อุณหภูมิ ความนำไฟฟ้าของสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย โดยมีจุดประสงค์หนึ่งของการศึกษาคือ การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดลองทำอิเล็กโทรวินนิ่ง เพื่อนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการ ซึ่งถือว่าเป็นความท้าทายของงานวิจัยชิ้นนี้สำหรับการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่จะสามารถนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงได้มากกว่า 85% ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังกล่าว ดังนั้นในการวางแผนและการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจึงประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 ขนาดด้วยกันคือ 1. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก และ 2. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพทุกเงื่อนไขของกระบวนการทดลอง โดยวงจรทั้ง 2 ขนาดดังกล่าวมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้

## 1. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์จะดำเนินการโดยเริ่มจากการออกแบบและสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งมีการอ้างอิงมาจากเอกสารงานวิจัยต้นแบบเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าจากการใช้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการศึกษาพบว่า กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการได้มากกว่า 85% (C.C. Yang et al. 2017) ดังนั้นในการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก จึงถูกออกแบบมาให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของกระแส 1.1 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร หรือ 0.55 แอมแปร์โดยประมาณภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการทดลอง โดยวงจรมีลักษณะของการทำงานคือ สามารถจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 0.55 แอมแปร์ผ่านการควบคุมการทำงานของ Microcontroller ชนิด Arduino Nano ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของวงจรถวนกลับ (Feedback control circuit) นอกจากนี้ยังมีการนำ Arduino Nano มาใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลทางไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลให้พร้อมเข้าสู่ขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์ต่อไป

ดังรูปที่ 3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนของวงจรถวนกลับ (Control circuit) และส่วนของวงจรถวนกลับ (Power circuit) ส่วนของวงจรถวนกลับทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีค่าคงที่ผ่านการจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงให้กับ Arduino nano และอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง เพื่อให้สามารถสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับขับขาเกตของ IGBT ซึ่งเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ขณะที่ส่วนของวงจรถวนกลับ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรให้มีค่าตามคำสั่งของวงจรถวนกลับ ผ่านการปรับค่าทาง Duty cycle เพื่อควบคุมปริมาณของกระแสออกให้มีค่าคงอยู่ที่ 0.55 แอมแปร์



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก

## 2. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

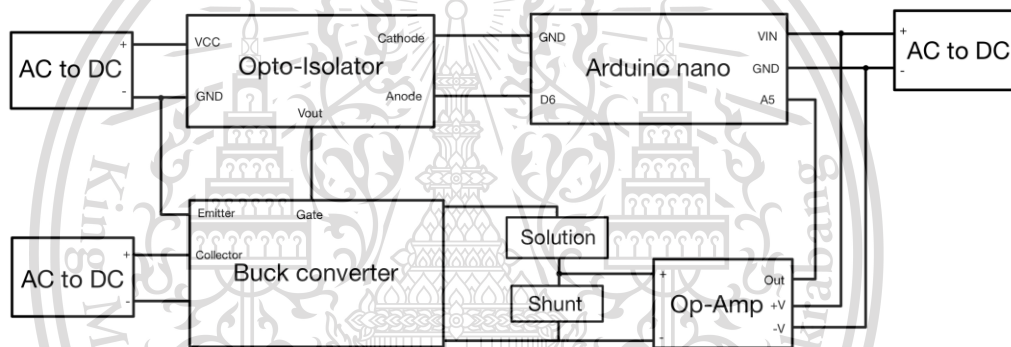
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงจรถวนกลับขนาดใหญ่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับความต้องการปริมาณของกระแสไฟฟ้าในระบบสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น การออกแบบและสร้างวงจรถวนกลับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ถูกดำเนินการโดยใช้วงจรถวนกลับขนาดเล็กเป็นรูปแบบอ้างอิง กล่าวคือ วงจรถวนกลับยังมีรูปแบบ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ของการทำงานอย่างเดิมที่สามารถจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ผ่านการควบคุมการทำงานของ Microcontroller ซึ่งความแตกต่างระหว่างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่กับวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กคือ ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้และปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่สามารถผลิตและรองรับปริมาณกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าวงจรขนาดเล็ก เนื่องจากการจ่ายไฟฟ้าทางต้นทางจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Power Supply) ทำให้สามารถปรับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่วงจรได้มากขึ้น ดังรูปที่ 3.5

อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ถูกออกแบบให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) เพื่อให้สามารถจ่ายและรองรับปริมาณกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เป็นต้น โดยจากการวางแผนและออกแบบการทดลองทางเคมี ส่งผลให้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ถูกออกแบบให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ที่ 1.1 แอมแปร์ และ 3.3 แอมแปร์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

### 3.4 การทดลองและการบันทึกผล

จากรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ในขั้นตอนของกระบวนการทดลองและบันทึกผลสามารถจำแนกได้ออกเป็น 3 องค์ประกอบหลักคือ 1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าคงที่กระแสตรง (Constant current DC supply) 2. สารละลายและขั้วทางไฟฟ้า (Solution & Electrode) และ 3. อุปกรณ์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลาย (Conductivity Meter) โดยมีแผนการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่า ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก

กรณี	ชนิดขั้ว (Electrode)			สารละลาย (Solution)			
	แคโทด	แอโนด	จำนวนขั้ว	ชนิด	pH	ค่าความเข้มข้น (ppm)	ปริมาตร (ml)
1	Stainless 316L	Titanium	2	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.20	100	500
2	Stainless 316L	Titanium	2	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.23	100	500
3	Stainless 316L	Titanium	2	Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.18	100	500
4	Stainless 316L	Titanium	2	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.20	100	500
5	Stainless 316L	Titanium	2	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	5.12	100	500
6	Stainless 316L	Stainless 316L	2	CoSO <sub>4</sub>	5.20	4,300	500

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่

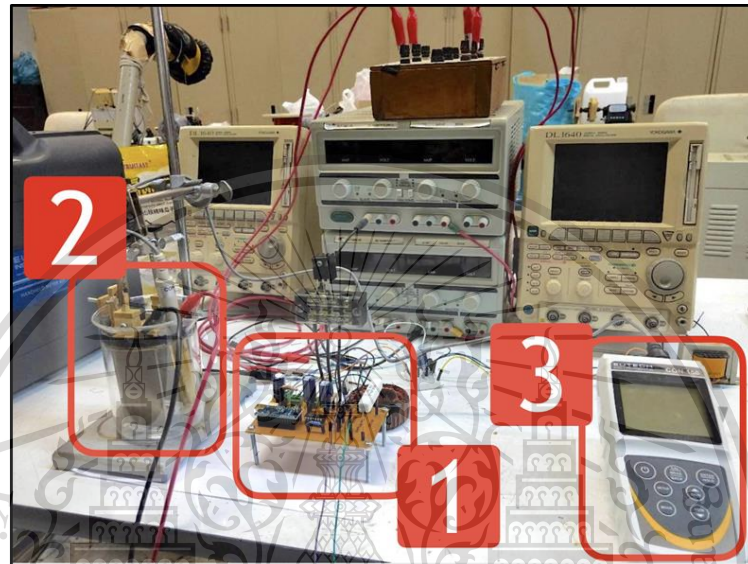
กรณี	ชนิดขั้ว (Electrode)			สารละลาย (Solution)			
	แคโทด	แอโนด	จำนวนขั้ว	ชนิด	pH	ค่าความเข้มข้น (ppm)	ปริมาตร (ml)
7	Stainless 316L	Stainless 316L	3	CoSO <sub>4</sub>	5.12	10,000	500
8	Stainless 316L	Stainless 316L	11	CoSO <sub>4</sub>	5.12	5,000	1,000

จากตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่า ถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 กรณี โดยแต่ละกรณีเกิดจากการปรับปรุงจากกระบวนการทดลองของกรณีก่อนหน้าตามลำดับ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ต้องการ การปรับปรุงเงื่อนไขของแต่ละกรณีกระทำโดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ชนิดของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) และความเข้มข้นของสารละลาย โดยยังคงรูปแบบของการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายแบบ

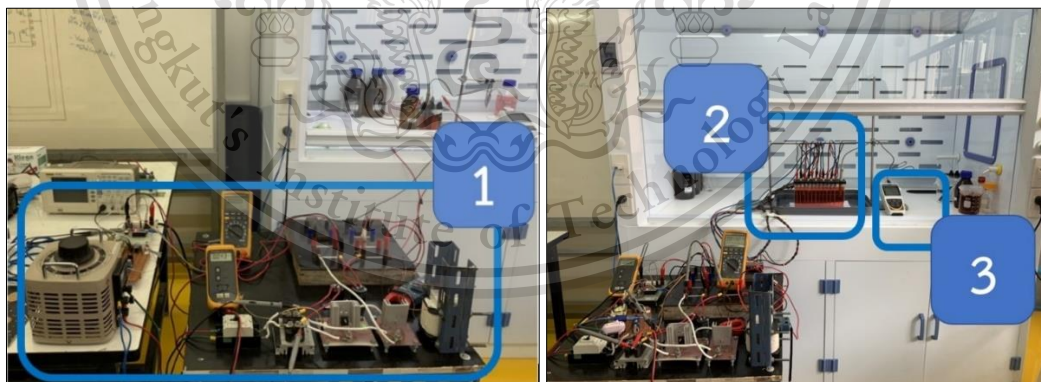
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระแสคงที่ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 1.1 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ผ่านการจ่ายกระแสโดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งการทดลองตามกรณีดังกล่าว (กรณี 1-6) นำไปสู่การปรับปรุงและออกแบบการทดลองกรณี 7 และ 8 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.2 โดยในการทดลองกรณี 7 และ 8 จะเห็นว่าการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ จำนวนขั้วอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของสารละลาย และปริมาตรของสารละลาย โดยอาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่



รูปที่ 3.6 การทดสอบชุดจำลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 3.7 การทดสอบชุดจำลองของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

ส่วนสุดท้ายของกระบวนการทดลองคือ การบันทึกผลข้อมูล โดยในแต่ละการทดลองจะทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่แสดงผลออกมาในเชิงของเวลา อุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย ผ่านอุปกรณ์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลาย เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ล้วนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.5 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการทดลองเชิงกายภาพจะถูกส่งไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่ต้องการทราบ (Inductively coupled plasma, ICP) กล่าวคือ โลหะมีค่าที่สามารถนำกลับได้จากกระบวนการทำอิเล็กโตรวินนิ่งทั้งในรูปของของแข็งและของเหลวจะถูกส่งไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลมาเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ ขณะที่ผลการทดลองเชิงปริมาณ ซึ่งอยู่ในรูปของเวลา อุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย จะถูกนำเสนอออกมาในรูปแบบของกราฟชนิดต่างๆ เพื่อหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุจะถูกดำเนินการเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณการไหลเข้า-ออกของโลหะมีค่าที่เกิดขึ้นก่อนและหลังกระบวนการทดลอง ตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัด ภายใต้แนวคิดขยะเหลือศูนย์ ซึ่งนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยต่างๆ ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แผนการทดลองทั้งหมด 8 กรณีถูกดำเนินการทดลองผ่านชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยที่การทดลองของแต่ละกรณีจะถูกปรับเปลี่ยนเงื่อนไขหรือตัวแปรพารามิเตอร์บางอย่างซึ่งเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า เวลา ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด จำนวนขั้วอิเล็กโทรด ชนิดของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) ความเข้มข้นของสารละลาย และปริมาตรของสารละลาย เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการด้วยกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง จากแผนการทดลองดังกล่าวถูกออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำกลับโลหะมีค่าชนิดโคบอลต์และนิกเกิลที่พบจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนให้ได้มากที่สุด โดยอาศัยการเก็บข้อมูลผ่านอุปกรณ์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลาย ประกอบกับการส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP เพื่อหาปริมาณของการนำกลับและนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับการจัดทำผังการไหลของวัสดุต่อไป ผลการทดลองทั้งหมด 8 กรณีที่ได้จากการดำเนินงานมีดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

จากตารางที่ 3.1 วงจรไฟฟ้าขนาดเล็กถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงที่ โดยจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.55 แอมแปร์ให้กับระบบของสารละลายในการทดลองกรณี 1-5 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

##### ผลการทดลองกรณี 1

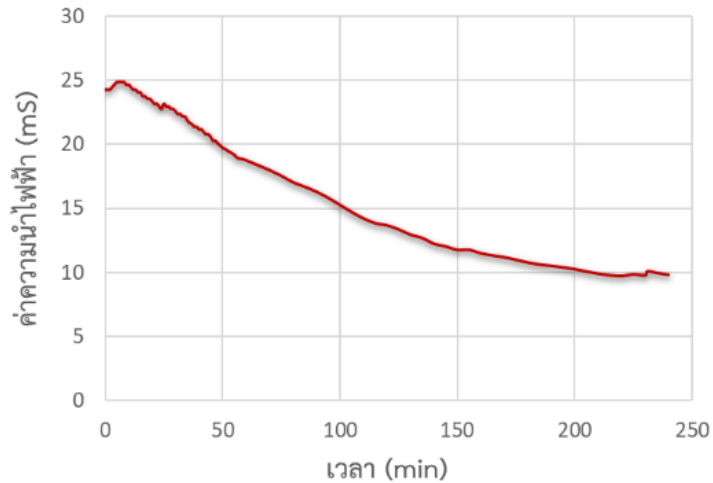
จากการทดลองกรณี 1 ซึ่งมีเงื่อนไขของการทดลองคือ นำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์จากสารละลายมาตรฐานชนิดโคบอลต์ (II) ไนเตรต ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ) ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตรโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิด Stainless steel 316L เป็นขั้วแคโทด และ Titanium เป็นขั้วแอโนด มีขนาดด้านกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตรเท่ากันทั้ง 2 ขั้ว กระแสไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าขนาดเล็กปริมาณ 0.55 แอมแปร์จะถูกจ่ายให้กับระบบของสารละลายภายใต้ระยะเวลาของการทดลองทั้งหมด 4 ชั่วโมง โดยจากผลการทดลองพบว่า ภายหลังจากกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งเสร็จสิ้นจะเกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดงเกาะอยู่บริเวณขั้วของแคโทดเพียงด้านเดียว ขณะที่ในสารละลายมีตะกอนลักษณะสีขาวขุ่นตกอยู่บริเวณที่ก้นของปีกเกอร์เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในระหว่างทำการทดลองยังพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.1 ขณะที่อุณหภูมิของสารละลายกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

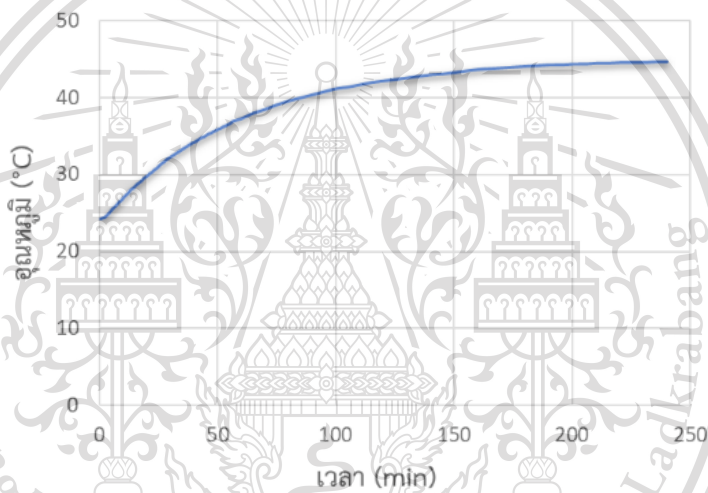
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mA) และเวลา (min) ของกรณีที่ 1



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณีที่ 1

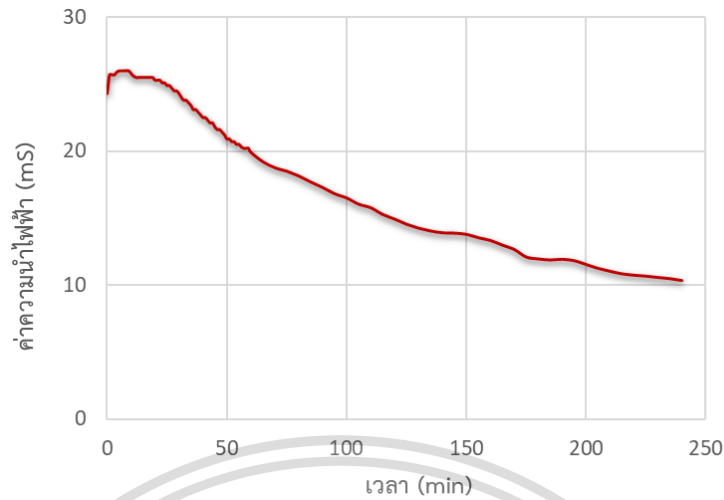
#### ผลการทดลองกรณีที่ 2

เงื่อนไขของการทดลองกรณีที่ 2 ถูกอ้างอิงมาจากการทดลองกรณีที่ 1 โดยยังคงดำเนินการทดลองโดยใช้เงื่อนไขเหมือนกับกรณีที่ 1 ยกเว้นชนิดของสารละลายที่ใช้ทดลองซึ่งถูกเปลี่ยนเป็นสารละลายมาตรฐานชนิดนิกเกิล (II) ไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) แทน โดยจากผลการทดลองพบว่า ที่บริเวณขั้วของแคโทดจะเกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นเกาะอยู่เพียงด้านเดียวคือด้านที่อยู่บริเวณตรงข้ามกับขั้วแอโนด ขณะที่ในสารละลายก็มีตะกอนลักษณะสีขาวขุ่น ปริมาณเล็กน้อยตกอยู่บริเวณที่ก้นของบีกเกอร์เช่นเดียวกัน สำหรับค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายในการทดลองกรณีที่ 2 ให้ผลเหมือนกันกับการทดลองในกรณีที่ 1 กล่าวคือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.3 ขณะที่อุณหภูมิของสารละลายกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4

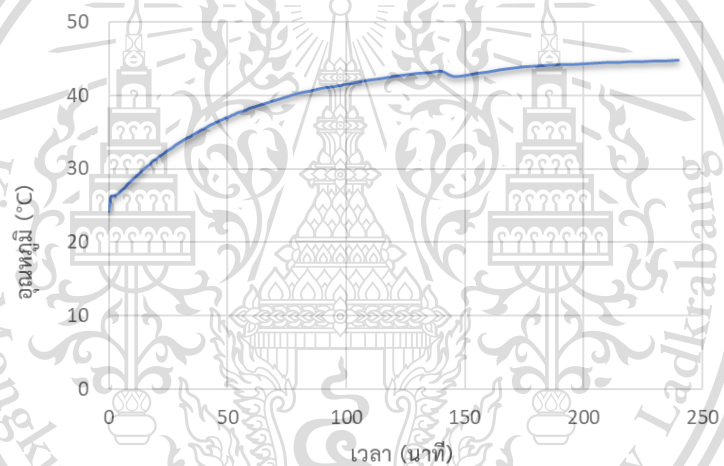
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณี ที่ 2



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณี ที่ 2

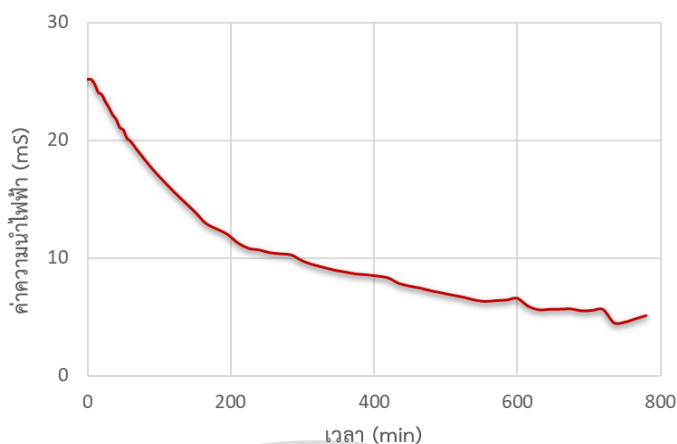
### ผลการทดลองกรณี ที่ 3

เงื่อนไขของการทดลองในกรณี ที่ 3 ถูกปรับปรุงมาจากการสังเกตผลการทดลองที่ได้จากกรณี ที่ 2 โดยมีเงื่อนไขที่ต่างกันคือ ระยะเวลาของการทดลอง เนื่องจากในการทดลองกรณี ที่ 3 ได้เพิ่มเวลาที่ใช้สำหรับทดลองอิเล็กโตรวีนนิ่งจาก 4 ชั่วโมงเป็น 13 ชั่วโมงโดยประมาณ ดังนั้นผลการทดลองบางอย่างที่ได้จึงมีความแตกต่างไปจากกรณี ที่ 1 และ 2 คือ เกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็นสีเขียวเกาะอยู่ที่บริเวณขั้วของแคโทดเล็กน้อย ซึ่งตรงข้ามกับตะกอนที่พบในสารละลายที่มีปริมาณมาก และมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยตะกอนดังกล่าวถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือ ตะกอนที่อยู่บริเวณก้นปิกเกอร์

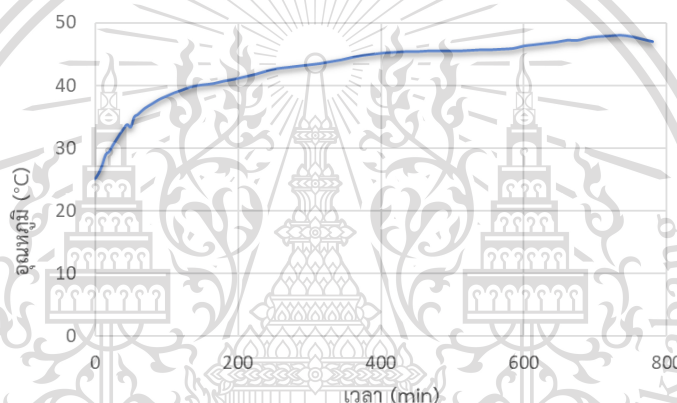
และตะกอนที่ลอยอยู่บนสารละลาย นอกจากนี้ขณะทำการทดลองยังพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าสุดท้ายของสารละลายมีแนวโน้มลดลงมากกว่าค่าความนำไฟฟ้าของการทดลองในกรณี ที่ 1 และ 2 มาก ดังรูปที่ 4.5 ขณะที่กราฟอุณหภูมิของสารละลายยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนเดิม ดังรูปที่ 4.6

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณี ที่ 3



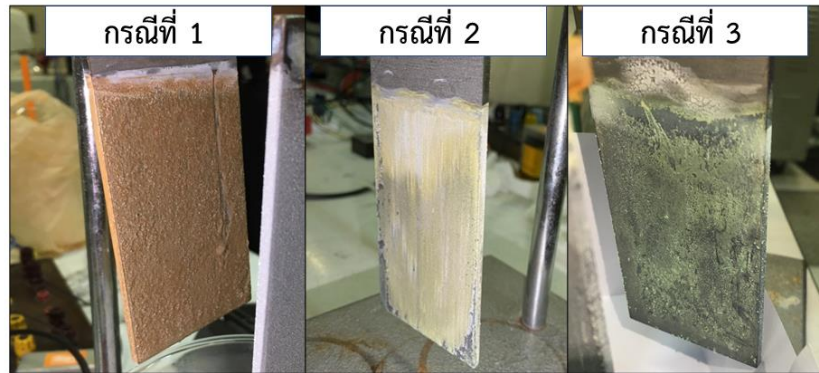
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณี ที่ 3

จากผลการทดลองของกรณี ที่ 1 2 และ 3 พบว่า ทั้ง 3 กรณีดังกล่าวมีตะกอนบางส่วนมาเกาะอยู่ที่บริเวณขั้วของแคโทดและมีลักษณะของการเกาะที่เหมือนกันคือ เกาะบริเวณขั้วของแคโทดที่อยู่ด้านตรงข้ามกับขั้วของแอโนดเพียงด้านเดียว ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่าสีตะกอนของทั้ง 3 กรณีที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวมีลักษณะแตกต่างกันคือ เกิดตะกอนสีน้ำตาลแดงขึ้นในการทดลองของกรณี ที่ 1 ตะกอนสีขาวขุ่นเกิดขึ้นในกรณี ที่ 2 และตะกอนสีเขียวเกิดขึ้นในกรณี ที่ 3 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ยังพบว่าทั้ง 3 กรณีมีตะกอนเกิดขึ้นในสารละลาย โดยในการทดลองกรณี ที่ 1 และ 2 พบว่าเกิดตะกอนสีขาวขุ่นปริมาณเล็กน้อยติดอยู่ที่บริเวณก้นบีกเกอร์ ขณะที่ในการทดลองกรณี ที่ 3 กลับมีปริมาณของตะกอนในสารละลายมากกว่ากรณี ที่ 1 และ 2 โดยมีตะกอนขนาดใหญ่ปริมาณมากตกลงสู่ก้นบีกเกอร์ และมีตะกอนบางส่วนลอยอยู่บนสารละลาย ดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ขั้วแคโทดจากการทดลองกรณีที่ 1 2 และ 3



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบลักษณะตะกอนในสารละลายจากการทดลองกรณีที่ 1 2 และ 3



รูปที่ 4.9 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดและสารละลายจากการทดลองกรณีที่ 4

ผลการทดลองกรณีที่ 4

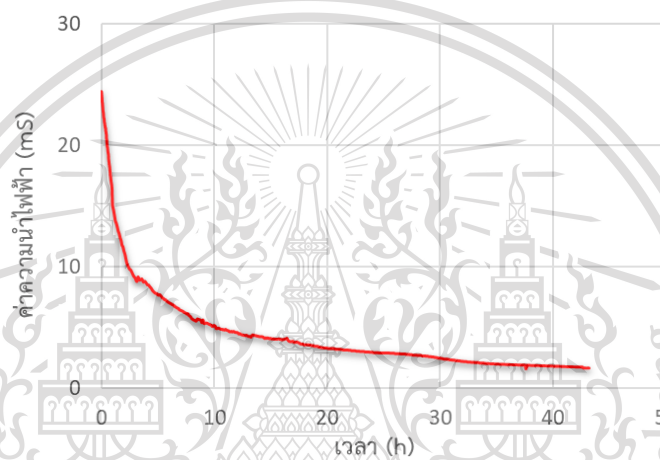
การทดลองในกรณีที่ 4 มีเงื่อนไขและจุดประสงค์ของการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในกรณีที่ 1 แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาของการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งการทดลองกรณีที่ 4 มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่สู่สาธารณะ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ระยะเวลาดังกล่าว แต่ผลการทดลองกลับพบว่า การที่ทดลองใน

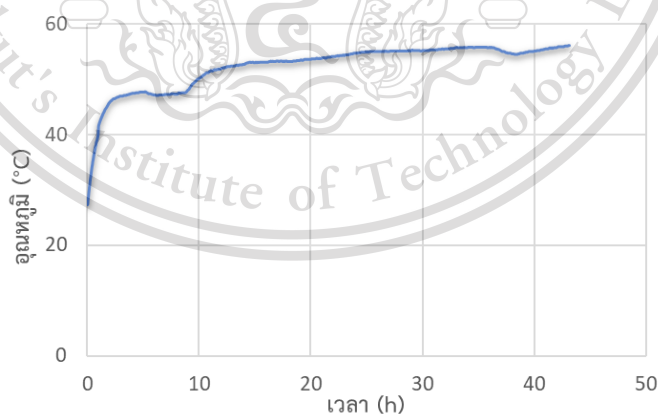
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เงื่อนไขนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นเงื่อนไขของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ เนื่องจากเกิดการเกาะของตะกอนที่บริเวณขั้วแคโทดน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีตะกอนจำนวนมากตกลงสู่ก้นบีกเกอร์ และลอยอยู่บนสารละลาย ขณะที่ลักษณะของขั้วแอโนดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเกิดการฟุกร่อนของโลหะ (Titanium) ที่บริเวณขั้วนี้โดยบริเวณส่วนบนของขั้วมีรอยไหม้ ขณะที่บริเวณส่วนล่างของขั้วเกิดความเสียหายอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.9 สำหรับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายในกรณีนี้เห็นได้ชัดว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าความนำไฟฟ้าสุดท้ายต่ำกว่าการทดลองในกรณีก่อนหน้าทั้งหมด ดังรูปที่ 4.10 อุณหภูมิของสารละลายยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกับกรณี 1-3 ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณี 4



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณี 4

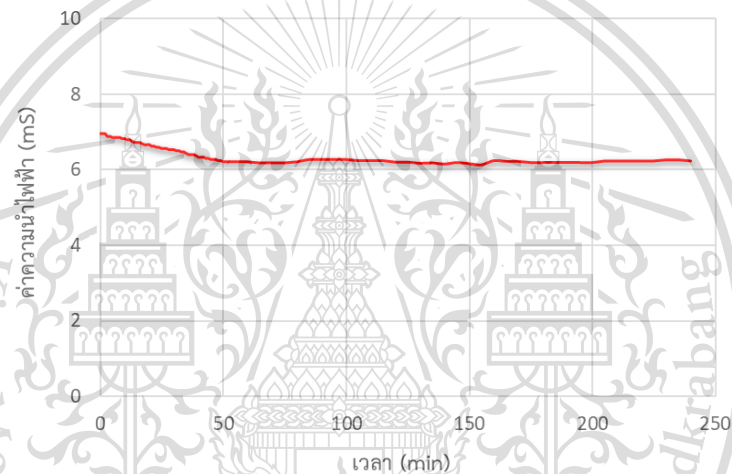
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

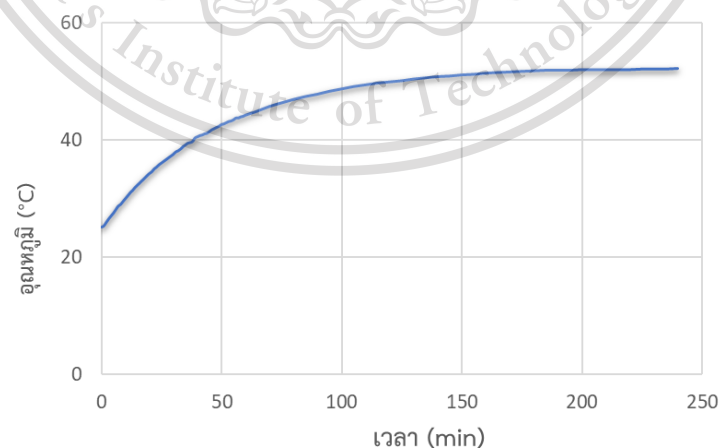
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### ผลการทดลองกรณีที่ 5

สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีที่ 5 ยังคงเหมือนกับเงื่อนไขของกรณีที่ 1 แต่ต่างกันที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยการทดลองในกรณีนี้ได้มีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายจาก 1.20 เป็น 5.12 ผลการทดลองที่ได้คือ ขณะทำการทดลองในช่วง 50 นาที แรกพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเริ่มจะมีค่าคงที่ในช่วงเวลาหลังจากนาทีที่ 50 จนกระทั่งจบการทดลอง ดังรูปที่ 4.12 ขณะที่อุณหภูมิของสารละลายกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกือบคงที่ในเวลาช่วงหลังของการทดลอง ดังรูปที่ 4.13 นอกจากนี้ยังพบว่าสีของตะกอนโคบอลต์มีลักษณะกลายเป็นสีดำขณะทำการทดลองและเกิดฟองขึ้นบริเวณด้านบนสารละลาย ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (mS) และเวลา (min) ของกรณีที่ 5

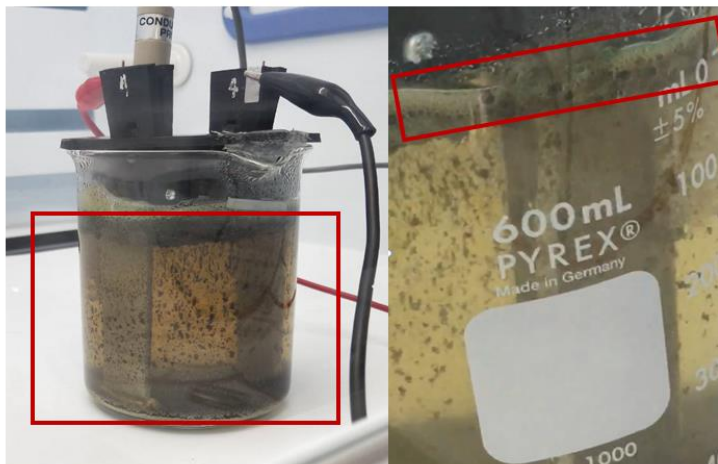


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และเวลา (min) ของกรณีที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์ในสารละลายจากการทดลองครั้งที่ 5

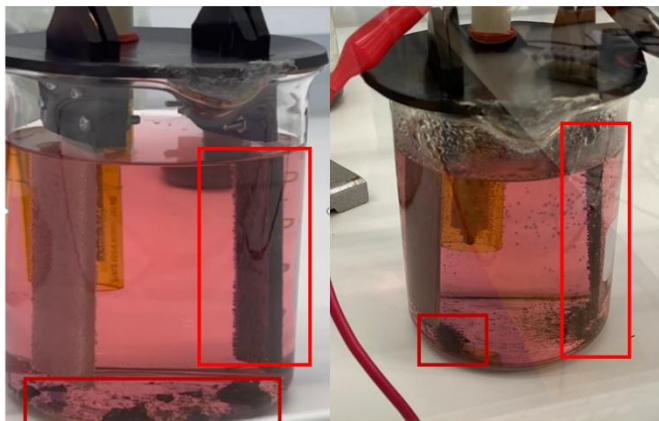
#### ผลการทดลองครั้งที่ 6

จากผลการทดลองครั้งที่ผ่านมาทั้งหมด (ครั้งที่ 1-5) พบว่ายังไม่มีกรณีไหนที่สามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการได้อย่างชัดเจน โดยในแต่ละกรณีจะเห็นว่าตะกอนของโลหะมีค่าที่มาเกาะบริเวณขั้วแคโทดมีปริมาณน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่เกิดการฟุ้งร่อนของขั้วแอโนดอย่างเห็นได้ชัดซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นเงินไอโซสำหรับนำกลับโลหะมีค่าได้ ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำ จึงได้มีการเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ทดลองจากสารละลายมาตรฐานที่เป็นสารประกอบของไนเตรตเป็นสารละลายที่เป็นสารประกอบของซัลเฟตชนิดโคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4$ ) ความเข้มข้น 4,300 ppm และเปลี่ยนชนิดของขั้วแอโนดที่ใช้เป็นประเภท Stainless steel 316L ทั้ง 2 ขั้ว ผลการทดลองพบว่า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณ 0.55 แอมแปร์ให้กับระบบของสารละลายเพียงไม่กี่วินาทีจะเกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ที่ขั้วแคโทดอย่างรวดเร็ว โดยตะกอนมีลักษณะสีดำสนิท และมีปริมาณการเกาะที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในฝั่งด้านตรงข้ามกับขั้วแอโนด ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแตกต่างไปจากกรณีก่อนๆ ที่ตะกอนของโคบอลต์จะเกิดการเกาะอย่างช้าๆ และมีปริมาณของการเกาะที่น้อยกว่ามาก เนื่องจากทดลองในกรณีที่ 6 นี้มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็ว ทำให้ทางคณะผู้จัดทำไม่สามารถบันทึกค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายได้ การทดลองในกรณีที่ 6 นี้ นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ออกจากสารละลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งอย่างแท้จริง เนื่องจากสามารถสังเกตการเกาะของตะกอนได้อย่างชัดเจนในระยะเวลาเพียงสั้นๆ ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงเงื่อนไขสำหรับกรณีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.15 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณีที่ 6

จากตารางที่ 3.2 วงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงที่ โดยจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.1 แอมแปร์ให้กับระบบของสารละลายในการทดลองกรณีที่ 7 และจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณ 3.3 แอมแปร์ให้กับการทดลองกรณีที่ 8 โดยมีผลการทดลองดังนี้

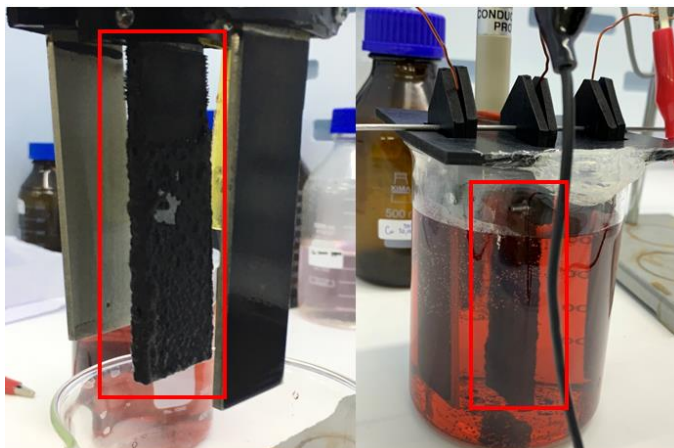
#### การทดลองกรณีที่ 7

จากผลการทดลองของกรณีที่ 6 ที่พบว่าเกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ในบริเวณขั้วแคโทดอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากลักษณะของการเกาะที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ตะกอนของโคบอลต์ส่วนมากมาเกาะอยู่บริเวณขั้วแคโทดด้านที่อยู่ตรงข้ามกับขั้วแอโนด ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบเงื่อนไขของการทดลองในกรณีที่ 7 ขึ้น โดยเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโทรดเป็น 3 ขั้ว ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนด 2 ขั้ว และขั้วแคโทด 1 ขั้ว มีลักษณะของการจัดวางขั้วคือ กำหนดให้ขั้วแคโทดอยู่ระหว่างขั้วแอโนด โดยทำการสันนิษฐานว่าการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะทำให้ตะกอนของโคบอลต์มีการเกาะที่สม่ำเสมอมากขึ้น (เกาะทั้ง 2 ด้านของแคโทด) นอกจากนี้ทางคณะผู้จัดทำยังได้เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้สำหรับทดลองจาก 4,300 ppm เป็น 10,000 ppm โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้มาซึ่งการเกาะของตะกอนโคบอลต์บริเวณขั้วแคโทดที่มากขึ้น ผลการทดลองในกรณีที่ 7 พบว่า เกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ขึ้นบริเวณขั้วแคโทดหลังจากจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายเพียงไม่กี่วินาที โดยตะกอนที่ได้มีลักษณะเป็นสีดำสนิท มีลักษณะของการเกาะคือ เกาะทั้ง 2 ด้านของขั้วแคโทดและมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ทำการทดลอง ดังรูปที่ 4.16 สำหรับในสารละลายพบว่าแทบจะไม่มีตะกอนของโคบอลต์ตกลงสู่ก้นปิกเกอร์เลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองโดยใช้เงื่อนไขนี้สามารถนำกลับปริมาณโลหะมีค่าได้มากกว่ากรณีก่อนหน้าทั้งหมด การวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายขณะทำการทดลองไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากมีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 6 ซึ่งได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองครั้งที่ 7

#### การทดลองครั้งที่ 8

การทดลองในครั้งที่ 8 คือการทดลองครั้งสุดท้ายที่ทางคณะผู้จัดทำได้มีการออกแบบการทดลอง โดยมีเงื่อนไขของการทดลองคือ เพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดจากทั้งหมด 3 ขั้วเป็น 11 ขั้ว ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนด 6 ขั้ว และขั้วแคโทด 5 ขั้ว การจัดวางขั้วมีลักษณะเป็นแบบการเรียงขั้วสลับกันระหว่างแอโนดกับแคโทด ดังรูปที่ 4.17 เพื่อจุดประสงค์ให้เกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ที่สม่ำเสมอทั้ง 2 ด้านของขั้วแคโทด สารละลายที่ใช้ถูกลดความเข้มข้นลงเหลือ 5,000 ppm เพื่อให้กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ที่อยู่ในสารละลายได้ทั้งหมด กล่าวคือ สารละลายต้องเปลี่ยนจากสีชมพูแดงเป็นสีใสในที่สุด ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3.3 แอมแปร์ให้กับระบบของสารละลายจะเกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีลักษณะของการเกาะคือ เกาะทั้ง 2 ด้านของขั้วแคโทดทั้งหมด 5 ขั้ว และสารละลายเริ่มมีสีอ่อนลงในช่วงหลังของการทดลอง ดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้สีของตะกอนที่ได้ยังมีลักษณะเป็นสีดำสนิทเช่นเดียวกับกรณีที่ 5-7 การวัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายขณะทำการทดลองไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากมีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 6-7 ซึ่งได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้

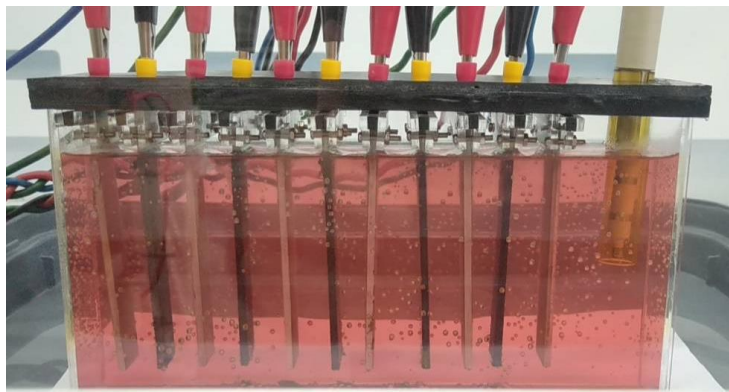


รูปที่ 4.17 ลักษณะการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 ลักษณะการเกาะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณีที่ 8

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด 8 กรณีจะเห็นว่าการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขที่ใช้สำหรับกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งมีผลต่อการนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการ โดยเงื่อนไขที่ทางคณะผู้จัดทำถือว่ามีประสิทธิภาพในการนำกลับมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองในกรณีทั้งหมดคือ การทดลองในกรณีที่ 8 เนื่องจากเกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ขึ้นทุกขั้วแคโทด (5 ขั้ว) และมีลักษณะของการเกาะที่สม่ำเสมอ กล่าวคือ เกาะทั้ง 2 ด้านของขั้วแคโทด นอกจากนี้ในช่วงหลังของการทดลองยังพบว่าสารละลายมีสีใสขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าปริมาณของโลหะมีค่าโคบอลต์บางส่วนถูกนำกลับออกจากสารละลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

#### 4.2 ปริมาณของการนำกลับโลหะมีค่าจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

หลังจากกระบวนการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่งเสร็จสิ้น ตะกอนของโลหะมีค่าทั้งหมดจะถูกขูดออกจากขั้วแคโทด ขณะที่ตะกอนที่พบในสารละลายจะถูกนำไปผ่านกระบวนการกรอง (Filtration) เพื่อนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการในสถานะของแข็ง เพื่อส่งไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP ต่อไป เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ส่งผลให้การส่งตรวจโลหะมีค่าที่ได้หลังจากกระบวนการทดลองทำได้แค่กรณีที่ 1-3 เท่านั้น โดยแต่ละกรณีมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทดลองกรณีที่ 1

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 1

ประเภทของสารที่นำไปวิเคราะห์ ICP	Cobalt	หน่วย
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	19,681	mg/kg
ตะกอนก้นบีกเกอร์	55.15	mg/kg
สารละลายที่เหลือ	54.47	mg/L

รายการวิเคราะห์	Cobalt (mg)	%Co
Mass ตั้งต้น	50.00	100.00
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	9.88	19.76
ตะกอนก้นบีกเกอร์	0.03	0.07
สารละลายที่เหลือ	27.24	54.47
รวม Mass ในระบบ	37.15	74.30
Mass loss	12.85	25.70

จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1 คือ ตะกอนของโคบอลต์ที่เกาะอยู่บนข้าวแคโทดมีปริมาณน้อยเกินกว่าจะส่งวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำตะกอนที่ก้นบีกเกอร์มาผสมกับตะกอนบนแผ่นข้าวเพื่อให้มีปริมาณมากพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง ICP ได้ ส่งผลให้ปริมาณตะกอนของโคบอลต์ที่อยู่บริเวณก้นบีกเกอร์มีค่าน้อย เพราะถูกนำไปรวมกับตะกอนบนแผ่นข้าวทั้งหมด นอกจากนี้จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่าในระหว่างทำการทดลองเกิดการสูญเสียในระบบ (Mass loss) ทำให้ทางคณะผู้จัดทำสามารถสรุปได้ว่า เส้นใยของการทดลองในกรณีที่ 1 ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ผลการทดลองครั้งที่ 2

## ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 2

ประเภทของสารที่นำไปวิเคราะห์ ICP	Nickel	หน่วย
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	10,928	mg/kg
ตะกอนก้นบีกเกอร์	36.07	mg/kg
สารละลายที่เหลือ	75.62	mg/L

รายการวิเคราะห์	Nickel (mg)	%Ni
Mass ตั้งต้น	50.00	100.00
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	5.48	10.95
ตะกอนก้นบีกเกอร์	0.02	0.04
สารละลายที่เหลือ	37.81	75.62
รวม Mass ในระบบ	43.31	86.61
Mass loss	6.69	13.39

## ผลการทดลองครั้งที่ 3

## ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ผล ICP กรณีที่ 3

ประเภทของสารที่นำไปวิเคราะห์ ICP	Nickel	หน่วย
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	28,651	mg/kg
ตะกอนก้นบีกเกอร์	194.41	mg/kg
สารละลายที่เหลือ	50.48	mg/L

รายการวิเคราะห์	Nickel (mg)	%Ni
Mass ตั้งต้น	50.00	100.00
ตะกอนบนแผ่นข้าวผสมตะกอนก้นบีกเกอร์	18.88	37.76
ตะกอนก้นบีกเกอร์	0.85	1.71
สารละลายที่เหลือ	18.53	37.05
รวม Mass ในระบบ	38.26	76.52
Mass loss	11.74	23.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP พบว่า ตะกอนบนแผ่นขั้วที่ได้จากผลการทดลองทั้ง 3 กรณีมีค่าน้อยเกินกว่าจะส่งวิเคราะห์ได้ ทำให้ต้องมีการนำตะกอนที่กั้นปีกเกอร์มาผสมกับตะกอนบนแผ่นขั้วเพื่อให้มีปริมาณมากพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง ICP ได้ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในผลการวิเคราะห์ของกรณีที่ 1 นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้ของทั้ง 3 กรณีจะพบว่า กรณีที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงเท่ากัน การทดลองในกรณีที่ 1 มีค่าตะกอนบนแผ่นขั้วผสมตะกอนกั้นปีกเกอร์มากกว่าการทดลองในกรณีที่ 2 ขณะที่ค่าความสูญเสียในระบบ (Mass loss) ในกรณีที่ 2 กลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 1 แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการแยก निकелออกจากสารละลายที่ระยะเวลาต่างกันคือ 4 ชั่วโมง (กรณีที่ 2) กับ 13 ชั่วโมง (กรณีที่ 3) พบว่ากรณีที่ 3 มีค่าตะกอนบนแผ่นขั้วผสมตะกอนกั้นปีกเกอร์มากกว่าการทดลองในกรณีที่ 2 ขณะที่ค่าความสูญเสียในระบบของกรณีที่ 2 กลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 3 เกือบ 2 เท่า ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการทดลองของกรณีที่ 1-3 ไม่สามารถนำมาใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งได้

#### 4.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุถูกนำมาใช้ในการศึกษาปริมาณการไหลเข้า-ออกของโลหะมีค่าในระบบผ่านกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP เป็นข้อมูลพื้นฐาน เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ส่งผลให้การส่งตรวจโลหะมีค่าที่ได้หลังจากกระบวนการทดลองไม่สามารถกระทำได้ในบางกรณี (กรณีที่ 4-8) ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้นำเสนอตัวอย่างของการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ โดยมุ่งเน้นไปที่กระบวนการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าชนิดโคบอลต์ร้อยละ 50 75 และ 95 ตามลำดับ นอกจากนี้ในขั้นตอนของกระบวนการกรอง ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าได้ถูกปรับเปลี่ยนสัดส่วนของมวลสารที่ได้ภายหลังจากกระบวนการกรอง ให้มีประสิทธิภาพของการกรองที่มากขึ้น เนื่องจากข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้รับหลังจากส่งตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP ครั้งก่อนหน้า (กรณีที่ 1-3) พบว่ากระบวนการกรองมีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งเกิดจากการเลือกใช้กระดาษกรองที่ไม่เหมาะสม โดยกระดาษกรองมีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าอนุภาคของโคบอลต์ ส่งผลให้มีปริมาณของโคบอลต์หลงเหลืออยู่ในสารละลายหลังจากการกรองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นขั้นตอนของกระบวนการกรองจึงจำเป็นต้องมีการเลือกใช้กระดาษกรองที่เหมาะสมกับขนาดของอนุภาคมากขึ้น

ตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของวัสดุสำหรับกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

กระบวนการขูดตะกอน (Scraping) และกระบวนการกรอง (Filtration) โดยแต่ละกระบวนการมีการคำนวณต้นทุนที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1. กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

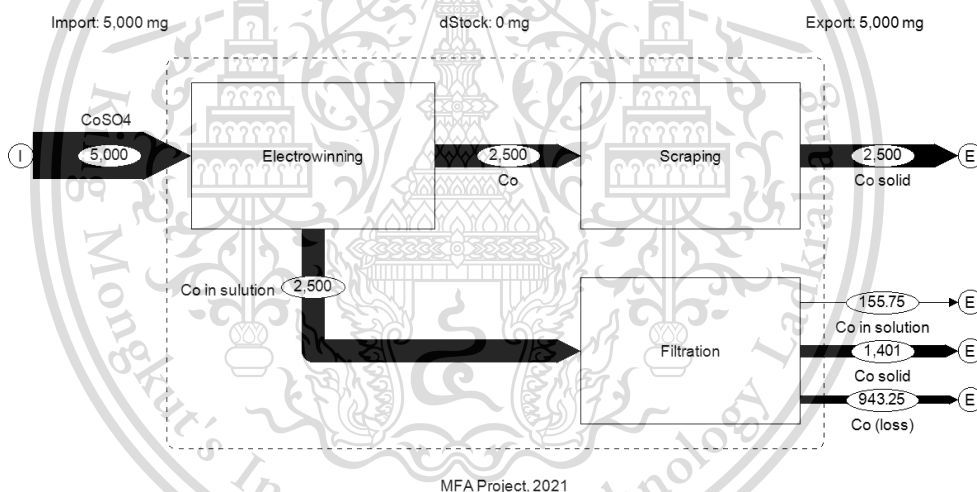
คือ กระบวนการที่ทำหน้าที่สกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายผ่านการจ่ายพลังงานด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทที่ 2

### 2. กระบวนการขูดตะกอน (Scraping)

คือ กระบวนการขูดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากขั้วอิเล็กโทรด (ขั้วแคโทด) โดยอาศัยอุปกรณ์ชนิดข้อนหน้าตัดสแตนเลสเป็นอุปกรณ์สำหรับการช่วยขูด

### 3. กระบวนการกรอง (Filtration)

คือ กระบวนการกรองตะกอนของโลหะมีค่าออกจากสารละลายโดยใช้วิธีการกรองแบบสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) กระบวนการกรองที่มีประสิทธิภาพสูงต้องสามารถกรองตะกอนที่ต้องการออกจากสารละลายได้ทั้งหมด ดังนั้นการเลือกใช้กระดาษกรองของชั้นตอนนี้จึงถือว่ามีความสำคัญมาก



รูปที่ 4.19 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 50

จากรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาว่ากระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง มีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่า 50% ดังนั้นจะสามารถทำการสันนิษฐานได้ว่า หากปริมาณของโคบอลต์ที่เข้าสู่ระบบมีค่า 5,000 มิลลิกรัม เมื่อนำไปผ่านขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งแล้วจะสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ปริมาณ 2,500 มิลลิกรัม ขณะที่ปริมาณของโคบอลต์ที่เหลือจะตกเป็นตะกอนผสมอยู่ในสารละลาย โคบอลต์ที่สามารถนำกลับได้ปริมาณ 2,500 มิลลิกรัมจะถูกขูดออกจากขั้วอิเล็กโทรดจนหมด (ขั้วแคโทด) ผ่านกระบวนการขูด ซึ่งผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะอยู่ในสถานะของของแข็ง ขณะที่โคบอลต์ปริมาณ 2,500 มิลลิกรัมที่ผสมอยู่ในสารละลายจะถูกกรองผ่าน

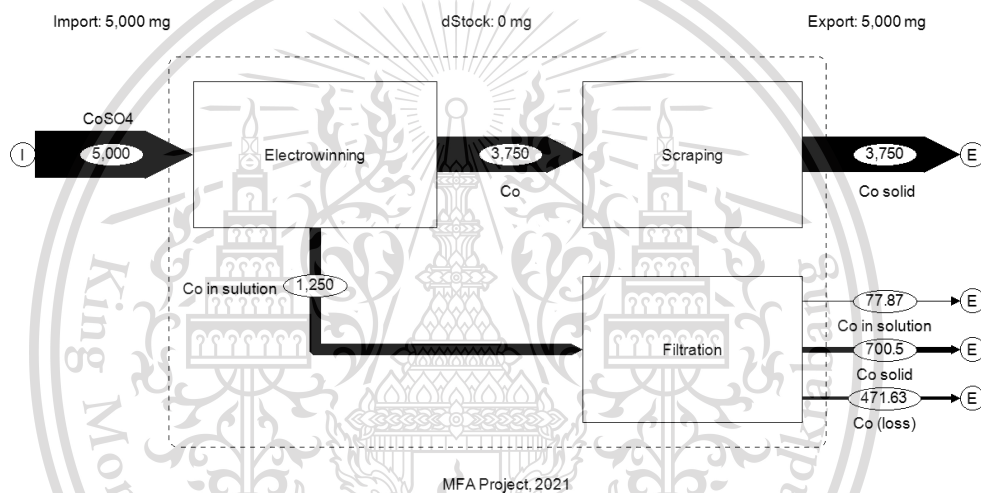
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ใช้เท่านั้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

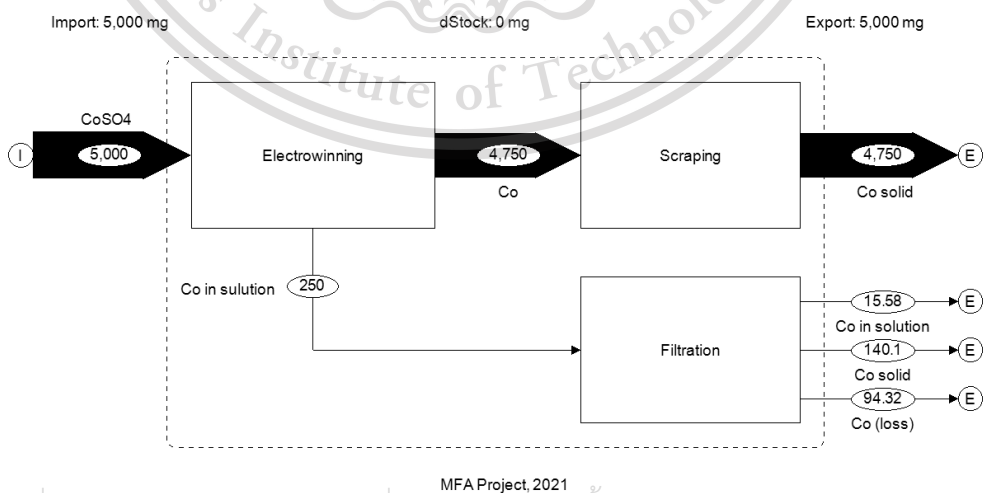
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระบวนการกรอง โดยผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะอยู่ในรูปของของแข็งและของเหลวจำนวน 1,401 และ 155.75 มิลลิกรัมตามลำดับ และจะเกิดการสูญเสียโคบอลต์ไปปริมาณ 943.25 มิลลิกรัม

หากพิจารณาปริมาณของโคบอลต์ที่เข้าสู่ระบบมีค่า 5,000 มิลลิกรัมเท่ากันทุกการทดลอง ดังนั้นถ้าหากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าร้อยละ 75 กล่าวคือ จะสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ปริมาณ 3,750 มิลลิกรัมหลังจากผ่านกระบวนการชุด โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะอยู่ในรูปของของแข็งเช่นเดิม ดังรูปที่ 4.20 ขณะที่กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าร้อยละ 95 คือ กระบวนการที่สามารถนำกลับโคบอลต์ได้สูงถึง 4,750 มิลลิกรัม โดยปริมาณของโคบอลต์ที่เหลือเป็นตะกอนในสารละลายจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกรองต่อไป ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 75



รูปที่ 4.21 ผังการไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ ที่ประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการยกตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของโลหะมีค่าโคบอลต์ที่มีประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งค่าต่างๆ พบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับสูงจะสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ออกมาจากสารละลายได้ปริมาณมากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับต่ำ โดยผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการชุบคือ โคบอลต์ที่อยู่ในสภาพของแข็ง ขณะที่ปริมาณของโคบอลต์ที่ตกตะกอนอยู่ในสารละลายจะถูกผ่านกระบวนการกรอง เพื่อให้สามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ที่ต้องการออกจากสารละลายที่เป็นของเสียได้ โดยในขั้นตอนของกระบวนการกรองนี้จะเกิดการสูญเสียของโคบอลต์ขึ้น ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขั้นตอนและอุปกรณ์ของกระบวนการกรองที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าในขั้นตอนของกระบวนการกรองมีการสูญเสียโลหะมีค่าโคบอลต์มากถึง 94.33 มิลลิกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 37.73 ของปริมาณโคบอลต์ที่เข้าสู่กระบวนการกรองทั้งหมด ขณะที่ปริมาณของโคบอลต์ที่ต้องการซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง 140.1 มิลลิกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 56.04 ของปริมาณโคบอลต์ที่เข้าสู่กระบวนการกรองทั้งหมด โดยจากข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการกรองที่มีประสิทธิภาพควรได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ต้องการมากที่สุดและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุดเช่นกัน ดังนั้นภายหลังจากกระบวนการนำกลับโลหะมีค่าเสร็จสิ้น ปริมาณโคบอลต์ที่สามารถนำกลับได้ทั้งหมด (สถานะของแข็ง) ควรถูกส่งไปตรวจหาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและเลือกใช้ อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกรองต่อไป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาการสร้างชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ ขั้วอิเล็กโทรด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยชุดจำลองต้นแบบดังกล่าวถูกนำไปใช้สำหรับการทดลองในกรณีต่างๆ (กรณีที่1-8) เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ภายหลังจากกระบวนการทดลองเสร็จสิ้น โลหะมีค่าที่สามารถนำกลับได้จะถูกส่งไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุต่อไป ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

##### 5.1.1 ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าในการนำกลับโลหะมีค่า

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กและวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ เมื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งแล้วพบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ กล่าวคือ วงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่สามารถทำการปรับค่า Duty cycle เพื่อควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบของสารละลายขณะทำการทดลองให้มีค่าคงที่ได้ อย่างอัตโนมัติ โดยตลอดการทดลองสามารถควบคุมให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ประมาณ 0.55 แอมแปร์ได้ในวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก และ 1.1 กับ 3.3 แอมแปร์ในวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ ขณะที่ประสิทธิภาพในการทำงานของวงจรอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ กล่าวคือ วงจรสามารถดำเนินการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะเวลาของการทดลอง

##### 5.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

จากการทำการทดลองเพื่อนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งพบว่าชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำมาใช้ในการนำกลับโลหะมีค่าออกจากสารละลายได้ โดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 1.1 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตรให้แก่ระบบของสารละลายแล้วพบว่าจะเกิดตะกอนของโลหะมีค่าที่เป็นส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะที่บริเวณขั้วแคโทด โดยที่ปริมาณของตะกอนดังกล่าวที่มาเกาะนั้นจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดทำให้สามารถสรุปเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งคือ ขั้วอิเล็กโทรดต้องเป็นชนิด Stainless steel 316L เหมือนกันทั้งหมด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขณะที่สารละลายที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการนำกลับโลหะโคบอลต์คือโคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4$ ) ที่ค่า pH เท่ากับ 5-6 และมีค่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ 5,000-10,000 ppm ทั้งนี้การเพิ่มจำนวนของขั้วอิเล็กโทรดสามารถทำให้นำกลับโลหะมีค่าได้ปริมาณมากขึ้นและมีลักษณะของการเกาะที่สม่ำเสมอขึ้น

### 5.1.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุภายใต้แนวคิดของหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

จากตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของวัสดุของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับโลหะมีค่าชนิดโคบอลต์ร้อยละ 50 75 และ 95 สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับสูงจะสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์ออกมาจากสารละลายได้ปริมาณมากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับต่ำ ขณะที่ปริมาณของโลหะมีค่าที่ยังหลงเหลืออยู่ในสารละลายก็จะมีค่าลดลงไปตามประสิทธิภาพของกระบวนการที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุดังกล่าวยังสามารถแสดงให้เห็นถึงปริมาณของของเสียที่ได้ภายหลังกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งนำไปสู่การบริหารและจัดการกับของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุถือว่าเป็นเครื่องมือหลักที่ช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจ ทั้งในด้านการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยให้ทราบปริมาณการไหลเข้า-ออกของโลหะมีค่าในระบบ ส่งผลให้ปริมาณของโลหะมีค่าชนิดต่างๆ ที่พบในซากของแบตเตอรี่ (Ghassan Zubi et al. 2018) ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งทั้งในทางอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่แบบเดิม และในอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของขยะที่จะต้องถูกทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 5.2 อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองของการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Yang และคณะ (2017) คือ สามารถนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วได้ โดยทางคณะผู้จัดทำได้มีการสันนิษฐานว่าสาเหตุที่ทำให้สามารถนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าได้ดังกล่าวเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาผ่านการจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ขณะทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายจะทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ไอออนลบในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด ขณะที่ไอออนบวกในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเกาะของโลหะมีค่าที่ขั้วแคโทด และเรียกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนี้ว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ผลการทดลองของโครงการนี้สามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำมาใช้ในการนำกลับโลหะมีค่าจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วได้ และยังสามารถนำผลการทดลองที่ได้นี้เป็นต้นแบบในการพัฒนาสู่การนำกลับโลหะมีค่าในระดับอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถสร้างชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารรถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้
2. สามารถหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์ในการนำกลับโลหะมีค่าความบริสุทธิ์สูงที่ต้องการจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วได้
3. ส่งเสริมองค์ความรู้ ความเข้าใจ และสร้างแรงจูงใจจากการสนับสนุนการนำกลับโลหะและ วัสดุมีค่าด้วยเทคโนโลยีการรีไซเคิลภายใต้หลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

### 5.4 ปัญหาและอุปสรรคเกิดขึ้น

จากการดำเนินการของโครงการการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว มีปัญหาและอุปสรรคเกิดขึ้นดังนี้

1. วงจรไฟฟ้าที่มีการจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้าค่ามากจะทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) เล็กน้อย ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบสารละลายมีค่าไม่คงที่เล็กน้อย
2. ในการทดลองทำอิเล็กทรอนิกส์ที่มีจำนวนขั้วอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 2 ขั้วจะเกิดการแบ่งจ่ายของกระแสไฟฟ้าในแต่ละขั้วที่ไม่เท่ากัน
3. ขณะทำการทดลองจะเกิดสารระเหยที่มีความเป็นพิษจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อการทำงานของระบบต่างๆ ในร่างกายมนุษย์ได้
4. ปัญหาจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ทำให้ในการทดลองบางกรณีไม่สามารถดำเนินการส่งวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP ได้

### 5.5 แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น

จากปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นข้างต้น ทางคณะผู้จัดทำได้ดำเนินการปรับปรุงและแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดำเนินงาน ดังนี้

1. ลดแรงดันกระเพื่อมโดยการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจร ส่งผลให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่วัดจากเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) มีค่าคงที่มากขึ้น
2. ป้องกันการสูดดมและสัมผัสกับสารระเหยที่เป็นพิษโดยการนำชุดจำลองของกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์มาทำการทดลองในตู้ดูดควัน พร้อมทั้งขณะทำการทดลองทางคณะผู้จัดทำได้มีการสวมถุงมือและหน้ากากอนามัย เพื่อให้การปฏิบัติงานมีมาตรฐานและความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.6 แนวทางที่นำไปสู่การต่อยอดความรู้

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากในประเทศไทยยังไม่ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากซากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมากนัก จึงทำให้เกิดช่องว่างทางวิชาการที่เปิดโอกาสสำหรับการทำงานวิจัยใหม่ๆ ขึ้นในอนาคต ซึ่งทางคณะผู้จัดทำเห็นว่าผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่กำลังสนใจเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากซากแบตเตอรี่เช่นเดียวกัน สำหรับแนวทางในการต่อยอดจากงานวิจัยฉบับนี้ที่เป็นไปได้ในอนาคตคือ การพัฒนาระบบการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพเพียงพอหรือเทียบเท่าที่จะสามารถนำไปใช้ในระดับภาคอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, G. Pasaogl, “The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 89, 2018, pp. 292-308.
- [2] ผศ.ดร.สงบ คาค้อ, การศึกษาสถานภาพพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลซากแบตเตอรี่ชนิดที่มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในประเทศไทย. ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). 2562.
- [3] สุทธิณี มีสุข. 2554. สารละลายมาตรฐาน. สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี). สืบค้นเมื่อ 12 พฤษภาคม 2564, จาก <https://1th.me/gJZkl>
- [4] พันพงษ์ ภูริรักษ์. 2563. หน่วยที่ 1 ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น. สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2564. จาก [http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP\\_Unit\\_1.pdf](http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP_Unit_1.pdf)
- [5] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชื่นเงินและคณะ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินตติ้ง. 2561.
- [6] กษิติศ จันทรเสนา, กิตติพงศ์ วงศ์ทันตกร, ชติยุตม์ แแบ่งสนิท และชนันธร พุทธาภิบาล, “การศึกษาการเสื่อมสภาพก่อนกำหนดของแบตเตอรี่ชนิดแทรกชั้นจากข้อมูลการใช้งานจริง”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**, 2562.
- [7] ดร.มณู ชื่นชม. 2563. บทที่ 5 ออปเปอเรชันแนล แอมพลิไฟร์ เบื้องต้น. สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2564. จาก <http://www.g-tech.ac.th/vdo/ELECTRICdoc/วิชาช่าง/E-BOOK BASIC ELECTRIC AND ELECTRONICS/อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์/บทที่ 5 ออปแอมป์เบื้องต้น.pdf>
- [8] ดร.อรรถัย พงศ์รักธรรมและคณะ, **TBCSD Sustainable Development ประจำปี 2562**. นนทบุรี: องค์การธุรกิจเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน. 2563.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถดัดแปลงไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น Florida: CRC Press Taylor and Francis Group. 2016. ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# การนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว

## Electrowinning for Metal Recovery from Spent Lithium Ion Battery

กรวิษณุ บุญศรี<sup>1</sup> กฤติมา เชิดสุริยา<sup>1</sup> กฤษฏากร ปัญญา<sup>1</sup> ชวกร คำนวนศิลป์<sup>1</sup> สุวรรณาชาติ ยานสุวรรณ<sup>1</sup>  
 อเนชา บัวเยี่ยม<sup>6</sup> อภิรักษ์ เกตุพงษ์<sup>7</sup> ורתัย ครุฑหุ่่น<sup>8</sup>  
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 1 ซอย หลอดกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

### บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง ซึ่งประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วอิเล็กโทรด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลการศึกษาพบว่าชุดจำลองดังกล่าวสามารถนำกลับโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลายได้ภายใต้เงื่อนไขของการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังกระบวนการทดลองจะถูกนำเสนอผ่านการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA) ซึ่งอาศัยข้อมูลจากการทดลองและการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะด้วยเครื่อง ICP (Inductively coupled plasma, ICP) เป็นพื้นฐาน เพื่อใช้เป็นเครื่องมือหลักในการสนับสนุนและสร้างแรงจูงใจสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าจากซากของแบตเตอรี่ด้วยกระบวนการรีไซเคิลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

### Abstract

This thesis presents the study of electrically recovering precious metals from spent lithium-ion batteries. The objective is to create and develop a prototype model for the recovery of required precious metals by the electrowinning process, which consists of a circuit power supply, electrodes and electrolyte solution. The results of the study showed that the proposed model was able to remove the required precious metal from the solution under suitable operating conditions. The product results after the experimental process were presented through Material Flow Analysis (MFA) based on experimental data and the inductively coupled plasma (ICP) metallurgy analysis. Fundamentally, it serves as a key tool to support and incentivize the recovery of precious metals from

battery residues under an environmentally friendly recycling process in line with the principles of a circular economy.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานหลักสำหรับเครื่องมือเครื่องใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และยานยนต์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณซากของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการลดปริมาณของขยะและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในธรรมชาติให้คุ้มค่า ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงทำการศึกษานำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาชุดจำลองต้นแบบสำหรับการนำกลับโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง และเพื่อส่งเสริมองค์ความรู้ ความเข้าใจ และสร้างแรงจูงใจที่เป็นส่วนหนึ่งของการสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning)

กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งเป็นกระบวนการสกัดโลหะมีค่าที่ต้องการออกจากสารละลาย โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นโลหะในสภาพของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงมาเกาะอยู่ที่ขั้วแคโทด กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งถูกนิยมนำมาใช้เกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าจำพวกทองแดงและโคบอลต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยใช้หลักการเกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิสคือ การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น โดยองค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3. แผนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 องค์ประกอบทางเคมี

##### 1. ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยชนิด Stainless steel 316L และ Titanium โดยมีการใช้งาน 2 ขนาดด้วยกันได้แก่ ขั้วที่มีด้านกว้างยาว 50 มิลลิเมตร ด้านยาว 100 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตรกับขั้วที่มีขนาดด้านกว้าง 25 มิลลิเมตร ด้านยาว 100 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร เท่ากันหมดทุกขั้ว

##### 2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

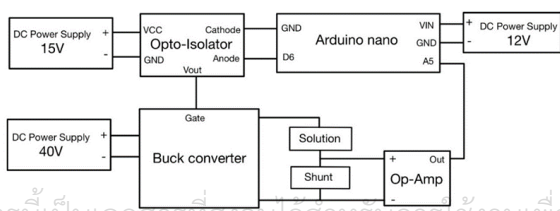
สารละลายที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองมีทั้งสารละลายมาตรฐาน (standard solution) และสารละลายธรรมชาติ (solution) โดยสารละลายที่เป็นสารละลายมาตรฐานได้แก่ โคบอลต์ (II) ไนเตรต ( $Co(NO_3)_2$ ) และนิกเกิล (II) ไนเตรต ( $Ni(NO_3)_2$ ) ขณะที่สารละลายธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่ โคบอลต์ซัลเฟต ( $CoSO_4$ )

#### 3.2 องค์ประกอบทางไฟฟ้า

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสที่ถูกออกแบบโดยประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนของวงจรควบคุม (Control circuit) และส่วนของวงจรกำลัง (Power circuit) ในส่วนของวงจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจรให้มีความถี่ผ่าน Arduino nano เพื่อให้สามารถสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับขับขาเกตของ IGBT ขณะที่ส่วนของวงจรกำลังมีองค์ประกอบหลักเป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรให้มีความถี่ของวงจรควบคุมผ่านการปรับค่าทาง Duty cycle โดยสามารถปรับขนาดของวงจรได้ดังนี้

##### 1. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก

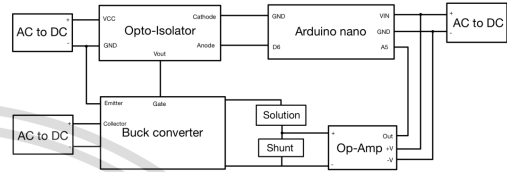
วงจรไฟฟ้าขนาดเล็กถูกออกแบบมาให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นของกระแส 1.1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยวงจรมีลักษณะของการทำงานคือ สามารถจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 0.55 แอมแปร์ผ่านการควบคุมการทำงานของ Microcontroller ชนิด Arduino Nano ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของวงจรป้อนกลับ (Feedback control circuit) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก

##### 2. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

วงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่สามารถผลิตและรองรับปริมาณกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าวงจรขนาดเล็ก เนื่องจากเปลี่ยนการจ่ายไฟฟ้าทางด้านทางจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Power Supply) ทำให้สามารถปรับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ตัววงจรได้มากขึ้น ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งส่งผลให้วงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ถูกออกแบบให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ที่ 1.1 แอมแปร์ และ 3.3 แอมแปร์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

#### 3.3 แผนการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก

กรณีที่	ชนิดขั้ว (Electrode)		จำนวนขั้ว	สารละลาย (Solution)		
	แคโทด	แอโนด		ชนิด	pH	ความเข้มข้น (ppm)
1	Stainless 316L	Titanium	2	$Co(NO_3)_2$	1.20	100
2	Stainless 316L	Titanium	2	$Ni(NO_3)_2$	1.23	100
3	Stainless 316L	Titanium	2	$Ni(NO_3)_2$	1.18	100
4	Stainless 316L	Titanium	2	$Co(NO_3)_2$	1.20	100
5	Stainless 316L	Titanium	2	$Co(NO_3)_2$	5.12	100
6	Stainless 316L	Stainless 316L	2	$CoSO_4$	5.20	4,300

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองสำหรับวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่

กรณีที่	ชนิดขั้ว (Electrode)		จำนวนขั้ว	สารละลาย (Solution)		
	แคโทด	แอโนด		ชนิด	pH	ความเข้มข้น (ppm)
7	Stainless 316L	Stainless 316L	3	$CoSO_4$	5.12	10,000
8	Stainless 316L	Stainless 316L	11	$CoSO_4$	5.12	5,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

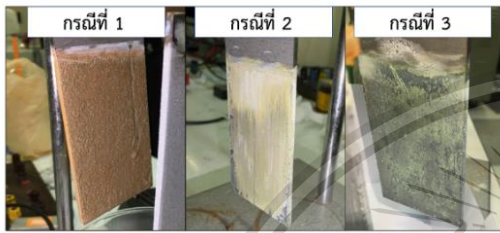
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

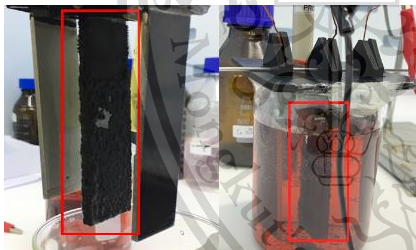
##### 4.1 ผลการทดลองจากกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง

จากผลการทดลองของกรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3 พบว่าทั้ง 3 กรณีมีตะกอนบางส่วนมาเกาะอยู่ที่ขั้วแคโทดและมีลักษณะที่เหมือนกันคือเกาะบริเวณขั้วแคโทดที่อยู่ด้านตรงข้ามกับขั้วแอโนดเพียงด้านเดียว ขณะที่สีตะกอนของทั้ง 3 กรณีกลับมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ เกิดตะกอนสีน้ำตาลแดงขึ้นในกรณีศึกษาที่ 1 ตะกอนสีขาวขึ้นในกรณีศึกษาที่ 2 และตะกอนสีเขียวเกิดขึ้นในกรณีศึกษาที่ 3 ดังรูปที่ 4.1



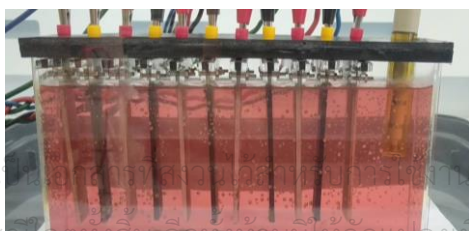
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบตะกอนที่ขั้วแคโทดจากกรณีศึกษาที่ 1 2 และ 3

สำหรับผลการทดลองของกรณีศึกษาที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 5 พบว่าเกิดการเกาะของตะกอนที่ขั้วแคโทดน้อยมาก ขณะที่ขั้วแอโนดเกิดการฟุ้งร่อนอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้เงื่อนไขของ 2 กรณีดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้สำหรับกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่ง



รูปที่ 4.2 ลักษณะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณีศึกษาที่ 7

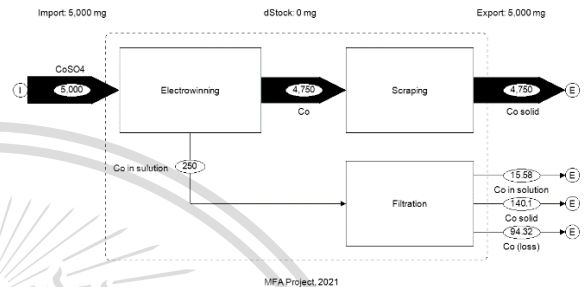
ผลการทดลองของกรณีศึกษาที่ 6 7 และ 8 พบว่าเกิดการเกาะของตะกอนโคบอลต์ที่ขั้วแคโทดอย่างเห็นได้ชัดเพียงในระยะเวลาไม่กี่วันก็เนื่องจากทั้ง 3 กรณีได้มีการเปลี่ยนเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ชนิดขั้วและสารละลาย โดยผลการทดลองของกรณีศึกษาสุดท้าย (กรณีศึกษาที่ 8) พบว่าสามารถนำกลับโลหะมีค่าออกจากสารละลายได้มากที่สุด เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้จาก 2-3 ขั้ว เป็น 11 ขั้ว



รูปที่ 4.3 การเกาะของตะกอนโคบอลต์จากการทดลองกรณีศึกษาที่ 8

##### 4.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของวัสดุของกระบวนการทดลองอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าชนิดโคบอลต์ร้อยละ 95 ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปริมาณการไหลเข้า-ออกของโลหะมีค่าในระบบ โดยประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่ง กระบวนการขูดตะกอน (Scraping) และกระบวนการกรอง (Filtration)



รูปที่ 4.4 ผังการไหลของโคบอลต์ที่มีประสิทธิภาพนำกลับร้อยละ 95

จากรูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับโลหะมีค่าร้อยละ 95 โดยจะเห็นว่าหากปริมาณของโคบอลต์ที่เข้าสู่ระบบมีค่า 5,000 มิลลิกรัม เมื่อนำไปผ่านขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งแล้วจะสามารถนำกลับโคบอลต์ได้ปริมาณ 4,750 มิลลิกรัม ขณะที่ในสารละลายจะเหลือปริมาณของโลหะมีค่าเพียง 250 มิลลิกรัมเท่านั้น

#### 5. สรุปผลการทดลอง

โครงการการนำกลับโลหะมีค่าด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้แล้วสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า ชุดจำลองต้นแบบของกระบวนการทำอิเล็กโทรวินนิ่งสามารถนำมาใช้ในการนำกลับโลหะมีค่าออกจากสารละลายได้ โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบของสารละลายได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพตลอดช่วงระยะเวลาของการทดลอง โดยสามารถควบคุมให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ประมาณ 0.55 แอมแปร์ ได้ในวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก และ 1.1 ถึง 3.3 แอมแปร์ในวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งมีเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการนำกลับคือ ขั้วอิเล็กโทรดต้องเป็นชนิด Stainless steel 316L เหมือนกันทั้งหมด สารละลายเป็นสารประกอบซัลเฟตที่ค่า pH 5-6 มีความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ 5,000-10,000 ppm ทั้งนี้การเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโทรดส่งผลให้ได้ปริมาณของการนำกลับที่มากขึ้นและมีลักษณะของการเกาะที่สม่ำเสมอขึ้น จากตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของวัสดุพบว่า กระบวนการอิเล็กโทรวินนิ่งที่มีประสิทธิภาพของการนำกลับสูงจะสามารถนำกลับโลหะมีค่าโคบอลต์

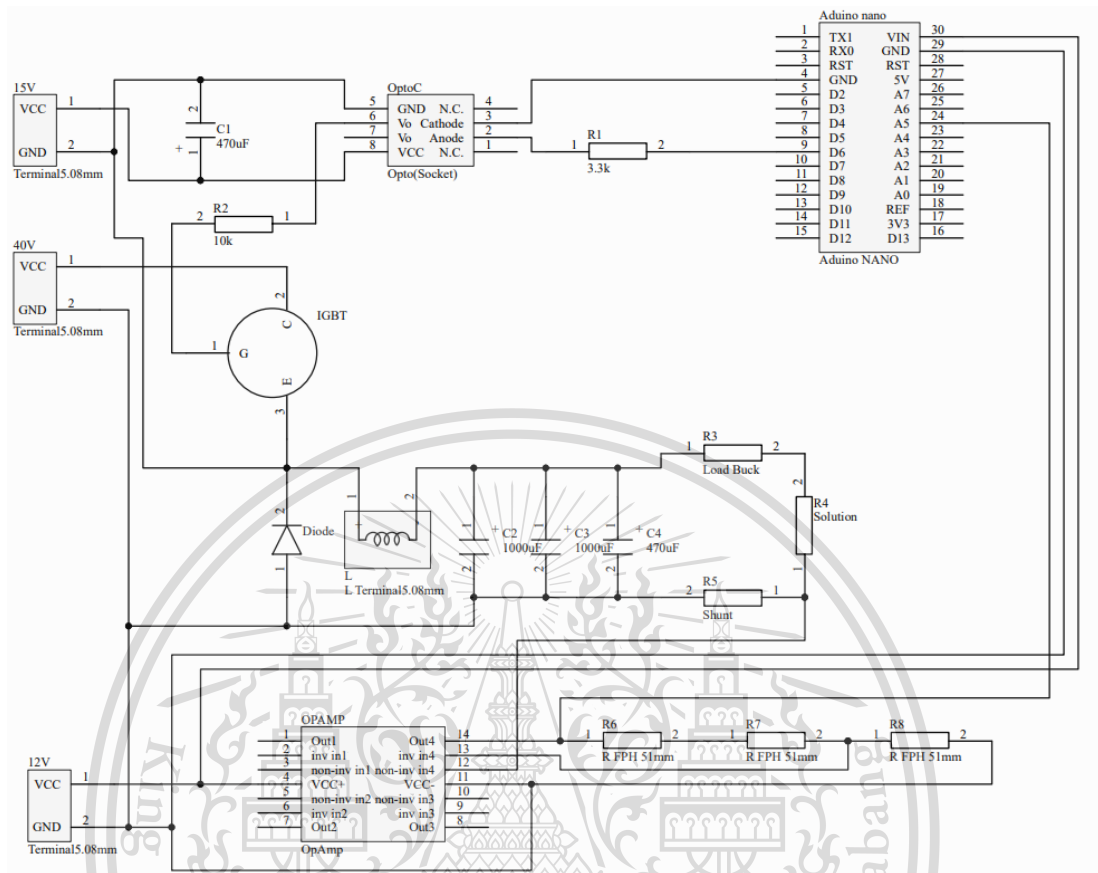




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

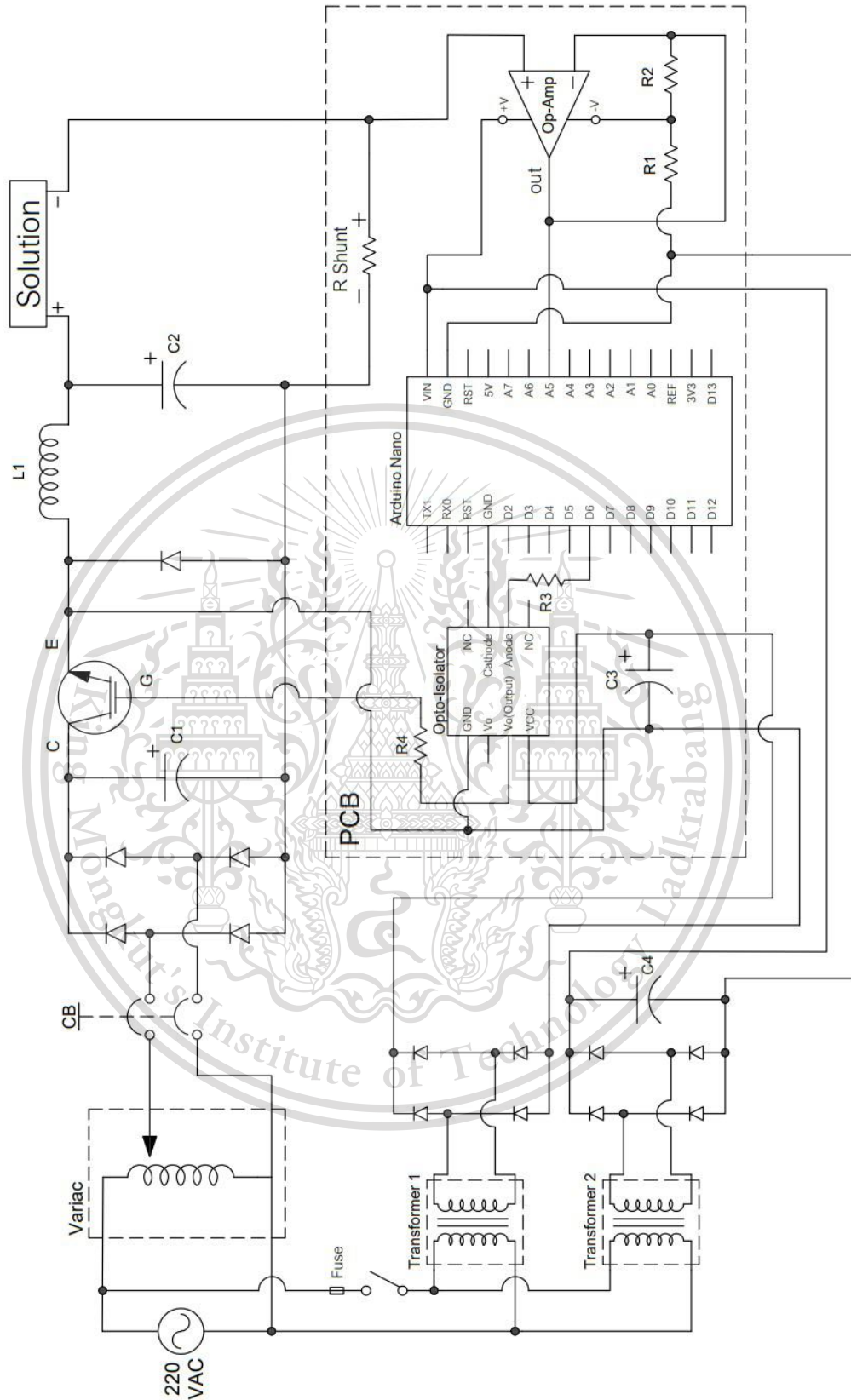


รูปที่ ข.1 ไดอะแกรมวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

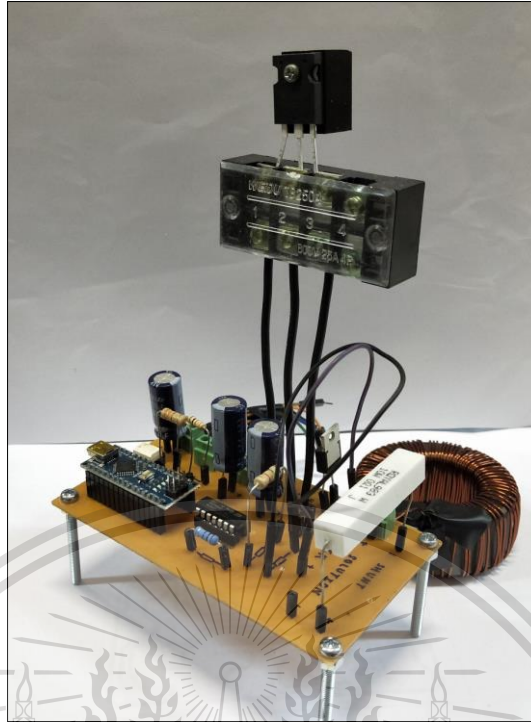
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



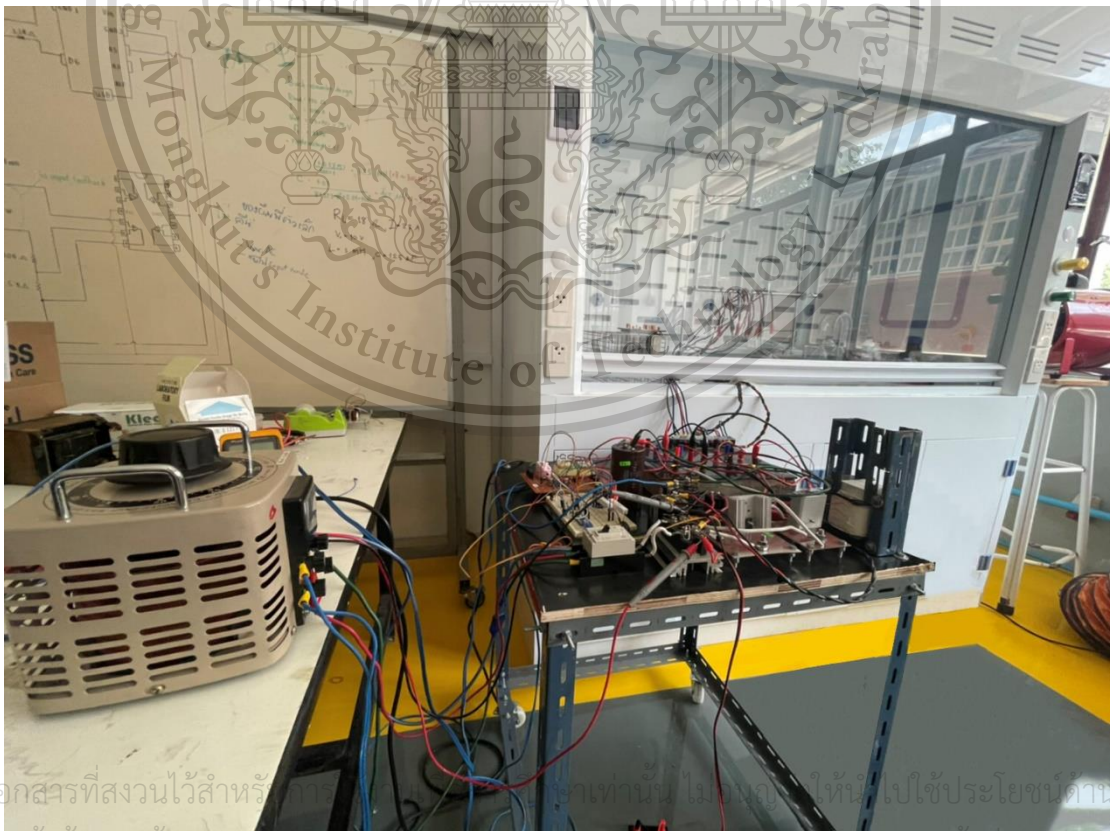
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ข.2** ไดอะแกรมวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.3 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก



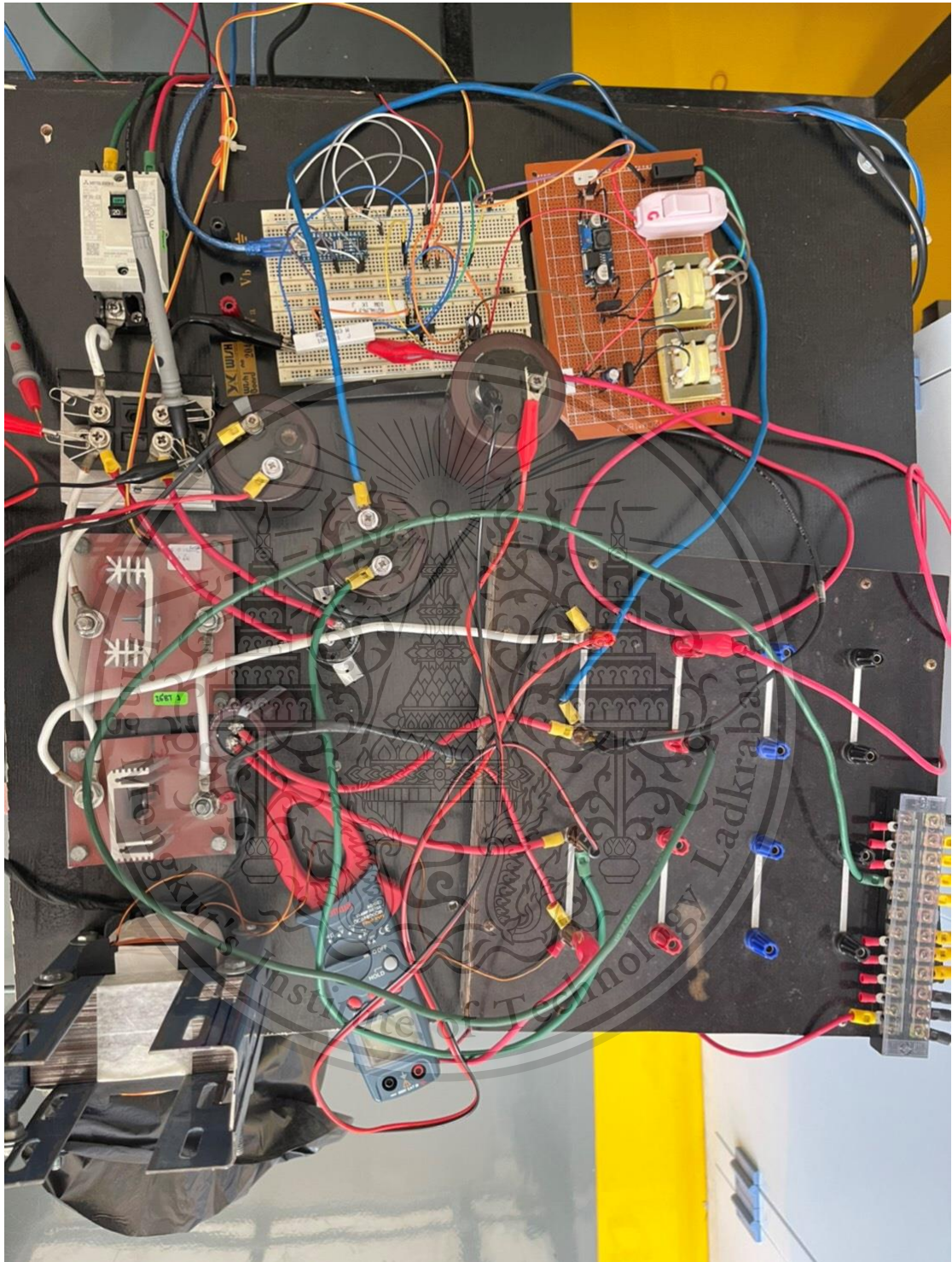
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.4 ชุดแบบจำลองต้นแบบของกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.5 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. OPTO-COUPLER TLP250

**TOSHIBA**

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

**TLP250**

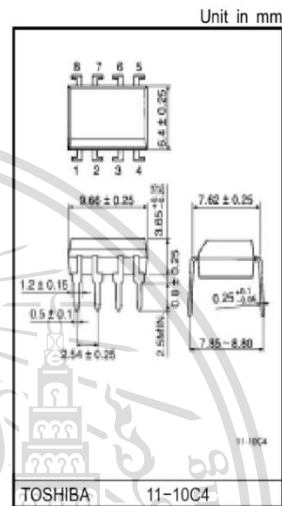
Transistor Inverter  
 Inverter For Air Conditionor  
 IGBT Gate Drive  
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP package.  
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

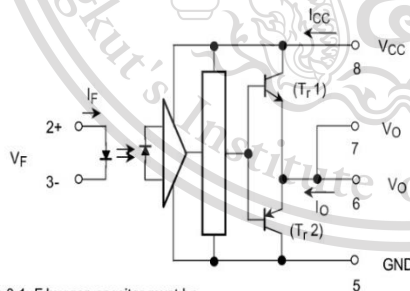
- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA(max.)}$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA(max.)}$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A(max.)}$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s(max.)}$
- Isolation voltage:  $2500V_{rms(min.)}$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type  
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823  
 Maximum operating insulation voltage:  $630V_{PK}$   
 Highest permissible over voltage:  $4000V_{PK}$

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance:  $6.4\text{mm(min.)}$
- Clearance:  $6.4\text{mm(min.)}$

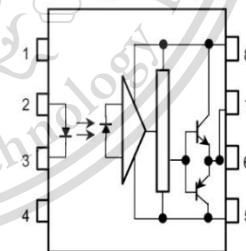


Schmatic



A 0.1 $\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 :  $V_O$  (Output)
- 7 :  $V_O$
- 8 :  $V_{CC}$

Truth Table

	Tr1	Tr2
Input LED On	On	Off
Input LED Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ 2004-06-25

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**TOSHIBA**

TLP250

**Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)**

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	$I_F$	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A	
	Reverse voltage	$V_R$	5	V	
	Junction temperature	$T_J$	125	°C	
Detector	"H" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15\text{kHz}$ ) (Note 2)	$I_{OPH}$	-1.5	A	
	"L" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15\text{kHz}$ ) (Note 2)	$I_{OPL}$	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_O$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_{CC}$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Junction temperature	$T_J$	125	°C	
	Operating frequency (Note 3)	$f$	25	kHz	
Operating temperature range	$T_{opr}$	-20~85	°C		
Storage temperature range	$T_{stg}$	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	$T_{sol}$	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	$BV_S$	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width  $P_W \leq 1\mu s$ , 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform,  $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$ ,  $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

**Recommended Operating Conditions**

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30   20	V
Peak output current	$I_{OPH}/I_{OPL}$	—	—	±0.5	A
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70   85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร 2004-06-25 การนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Input forward voltage	V <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V	
Temperature coefficient of forward voltage	ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C	
Input reverse current	I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA	
Input capacitance	C <sub>T</sub>	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*1)	I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>B-6</sub> = 4V	-0.5	-1.5	A
	"L" level	I <sub>OPL</sub>	2		I <sub>F</sub> = 0 V <sub>B-5</sub> = 2.5V	0.5	2	
Output voltage	"H" level	V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V <sub>OL</sub>	5	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	I <sub>CCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I <sub>CCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage	V <sub>CC</sub>	—	—	—	10	—	35	V
Capacitance (input-output)	C <sub>S</sub>	—	—	V <sub>S</sub> = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)	R <sub>S</sub>	—	—	V <sub>S</sub> = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*1): Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**TOSHIBA**

TLP250

**Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)**

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	$t_{pLH}$	6 $I_F = 8\text{mA}$ (Note 7) $V_{CC1} = +15\text{V}, V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$	—	0.15	0.5	$\mu\text{s}$
	H→L	$t_{pHL}$		—	0.15	0.5	
Output rise time	$t_r$			—	—	—	
Output fall time	$t_f$			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	$C_{MH}$	7	$V_{CM} = 600\text{V}, I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}, T_a = 25^\circ\text{C}$	-5000	—	—	V / $\mu\text{s}$
Common mode transient immunity at low level output	$C_{ML}$	7	$V_{CM} = 600\text{V}, I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}, T_a = 25^\circ\text{C}$	5000	—	—	V / $\mu\text{s}$

\* All typical values are at Ta = 25°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5  $\mu\text{s}$ .

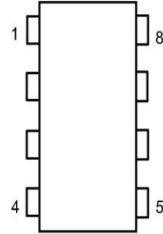
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

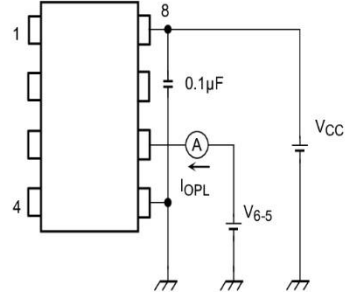
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**TOSHIBA****TLP250**

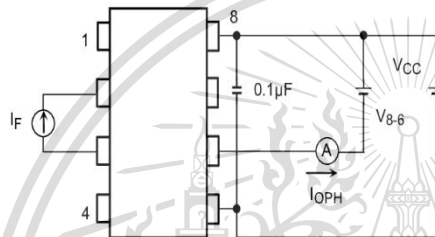
Test Circuit 1 :



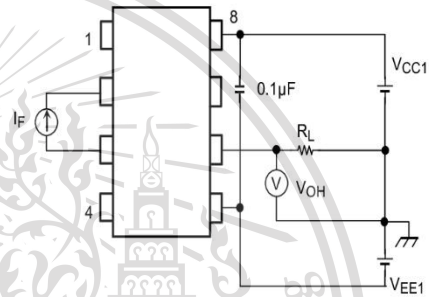
Test Circuit 2 : IOPL



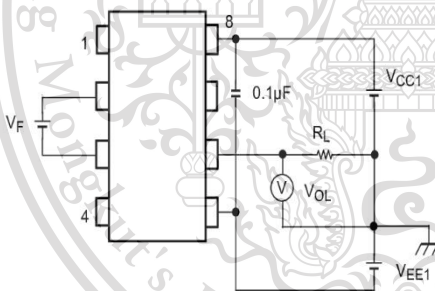
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH

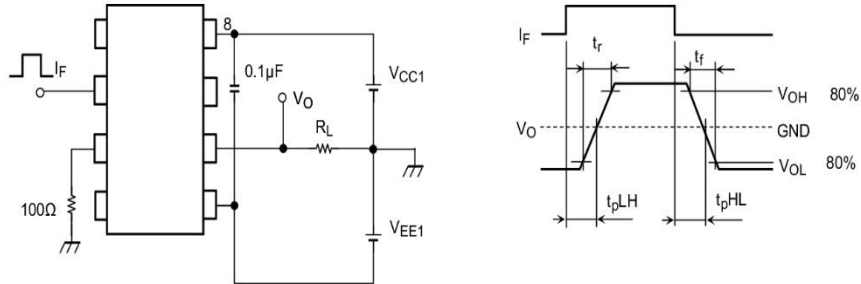


Test Circuit 5 : VOL

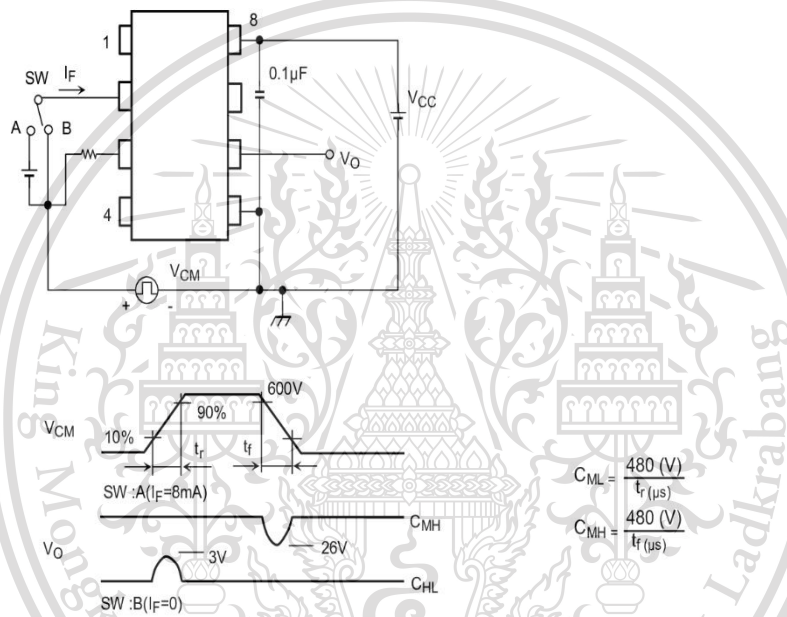


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$



Test Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



$C_{ML}(C_{MH})$  is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2. IGBT RGTH00TS65D



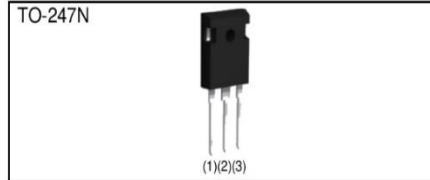
# RGTH00TS65D

650V 50A Field Stop Trench IGBT

Data Sheet

$V_{CES}$	650V
$I_C(100^\circ\text{C})$	50A
$V_{CE(sat)}$ (Typ.)	1.6V
$P_D$	277W

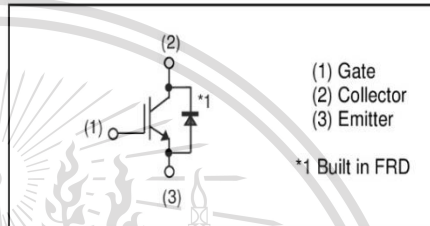
### ●Outline



### ●Features

- 1) Low Collector - Emitter Saturation Voltage
- 2) High Speed Switching
- 3) Low Switching Loss & Soft Switching
- 4) Built in Very Fast & Soft Recovery FRD (RFN - Series)
- 5) Pb - free Lead Plating ; RoHS Compliant

### ●Inner Circuit



### ●Applications

PFC  
UPS  
Power Conditioner  
IH

### ●Packaging Specifications

Packaging	Tube
Reel Size (mm)	-
Tape Width (mm)	-
Basic Ordering Unit (pcs)	450
Taping Code	C11
Marking	RGTH00TS65D

### ●Absolute Maximum Ratings (at $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Value	Unit	
Collector - Emitter Voltage	$V_{CES}$	650	V	
Gate - Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 30$	V	
Collector Current	$T_C = 25^\circ\text{C}$	$I_C$	85	A
	$T_C = 100^\circ\text{C}$	$I_C$	50	A
Pulsed Collector Current	$I_{CP}^{*1}$	200	A	
Diode Forward Current	$T_C = 25^\circ\text{C}$	$I_F$	50	A
	$T_C = 100^\circ\text{C}$	$I_F$	30	A
Diode Pulsed Forward Current	$I_{FP}^{*1}$	200	A	
Power Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$	$P_D$	277	W
	$T_C = 100^\circ\text{C}$	$P_D$	138	W
Operating Junction Temperature	$T_J$	-40 to +175	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	$T_{stg}$	-55 to +175	$^\circ\text{C}$	

\*1 Pulse width limited by  $T_{jmax}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.rohm.com

© 2014, ROHM Co., Ltd. All rights reserved.

1/11

2014.05 - Rev.B

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## RGTH00TS65D

## Data Sheet

## ● Thermal Resistance

Parameter	Symbol	Values			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Thermal Resistance IGBT Junction - Case	$R_{\theta(j-c)}$	-	-	0.54	°C/W
Thermal Resistance Diode Junction - Case	$R_{\theta(j-c)}$	-	-	1.42	°C/W

● IGBT Electrical Characteristics (at  $T_j = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Collector - Emitter Breakdown Voltage	$BV_{CES}$	$I_C = 10\mu\text{A}, V_{GE} = 0\text{V}$	650	-	-	V
Collector Cut - off Current	$I_{CES}$	$V_{CE} = 650\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}$	-	-	10	$\mu\text{A}$
Gate - Emitter Leakage Current	$I_{GES}$	$V_{GE} = \pm 30\text{V}, V_{CE} = 0\text{V}$	-	-	$\pm 200$	nA
Gate - Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 34.7\text{mA}$	4.5	5.5	6.5	V
Collector - Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $T_j = 175^\circ\text{C}$	-	1.6 2.1	2.1 -	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RGTH00TS65D

## Data Sheet

●IGBT Electrical Characteristics (at  $T_j = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Input Capacitance	$C_{ies}$	$V_{CE} = 30\text{V}$	-	2740	-	pF
Output Capacitance	$C_{oes}$	$V_{GE} = 0\text{V}$	-	106	-	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{res}$	$f = 1\text{MHz}$	-	43	-	
Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{CE} = 300\text{V}$	-	94	-	nC
Gate - Emitter Charge	$Q_{ge}$	$I_C = 50\text{A}$	-	22	-	
Gate - Collector Charge	$Q_{gc}$	$V_{GE} = 15\text{V}$	-	31	-	
Turn - on Delay Time	$t_{d(on)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{CC} = 400\text{V}$	-	39	-	ns
Rise Time	$t_r$	$V_{GE} = 15\text{V}, R_G = 10\Omega$	-	63	-	
Turn - off Delay Time	$t_{d(off)}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	143	-	
Fall Time	$t_f$	Inductive Load	-	50	-	
Turn - on Delay Time	$t_{d(on)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{CC} = 400\text{V}$	-	39	-	ns
Rise Time	$t_r$	$V_{GE} = 15\text{V}, R_G = 10\Omega$	-	63	-	
Turn - off Delay Time	$t_{d(off)}$	$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	159	-	
Fall Time	$t_f$	Inductive Load	-	62	-	
Reverse Bias Safe Operating Area	RBSOA	$I_C = 200\text{A}, V_{CC} = 520\text{V}$ $V_P = 650\text{V}, V_{GE} = 15\text{V}$ $R_G = 60\Omega, T_j = 175^\circ\text{C}$	FULL SQUARE			-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.rohm.com

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

3/11



2014.05 - Rev.B

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## RGTH00TS65D

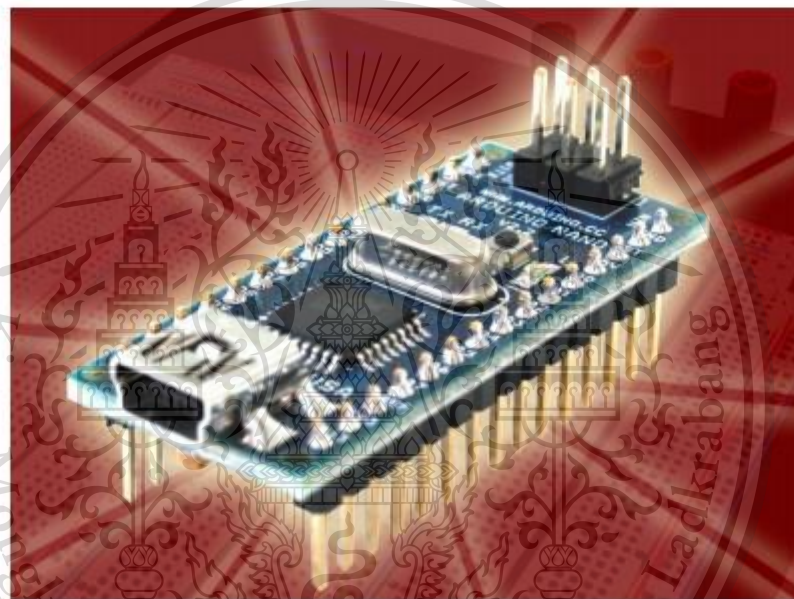
## Data Sheet

●IGBT Electrical Characteristics (at  $T_j = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Diode Forward Voltage	$V_F$	$I_F = 30\text{A}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$	-	1.45	2.0	V
		$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	1.25	-	
Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$I_F = 30\text{A}$	-	54	-	ns
Diode Peak Reverse Recovery Current	$I_{rr}$	$V_{CC} = 400\text{V}$ $di_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	7.4	-	A
Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	0.22	-	$\mu\text{C}$
Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$I_F = 30\text{A}$	-	225	-	ns
Diode Peak Reverse Recovery Current	$I_{rr}$	$V_{CC} = 400\text{V}$ $di_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	12.8	-	A
Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$	$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	1.60	-	$\mu\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. Arduino Nano

*Arduino Nano (V2.3)**User Manual*

Released under the Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 License  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>

More information:

[www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

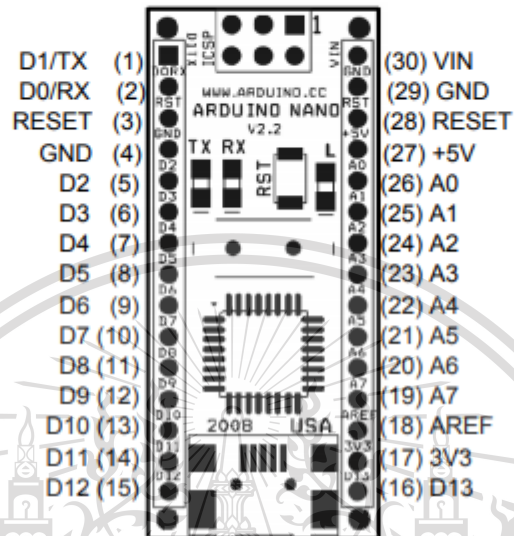
Rev. 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### Arduino Nano Pin Layout



Pin No.	Name	Type	Description
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digital input/output port 0 to 13
3, 28	RESET	Input	Reset (active low)
4, 29	GND	PWR	Supply ground
17	3V3	Output	+3.3V output (from FTDI)
18	AREF	Input	ADC reference
19-26	A7-A0	Input	Analog input channel 0 to 7
27	+5V	Output or Input	+5V output (from on-board regulator) or +5V (input from external power supply)
30	VIN	PWR	Supply voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Arduino Nano Bill of Material**

Item Number	Qty.	Ref. Dest.	Description	Mfg. P/N	MFG	Vendor P/N	Vendor
1	5	C1,C3,C4,C7,C9	Capacitor, 0.1uF 50V 10%	C0805C104K5RACTU	Kemet	80-C0805C104K5R	Mouser
2	3	C2,C8,C10	Capacitor, 4.7uF 10V 10%	T491A475K010AT	Kemet	80-T491A475K010	Mouser
3	2	C5,C6	Capacitor, 18pF 50V 5%	C0805C180J5GACTU	Kemet	80-C0805C180J5G	Mouser
4	1	D1	Ceramic NOP/COG 0805	MBR0520LT1G	ONSeml	863-MBR0520LT1G	Mouser
5	1	J1,J2	Diode, Schottky 0.5A 20V	68000-136HLF	FCI	649-68000-136HLF	Mouser
6	1	J4	Headers, 36Pis 1 Row	67503-1020	Molex	538-67503-1020	Mouser
7	1	J5	Connector, Mini-B Recept RT. Angle	67996-272HLF	FCI	649-67996-272HLF	Mouser
8	1	LD1	Headers, 72PS 2 Rows LED, Super Bright RED 100mcd 640nm 120degree 0805	APT20125RCPRV	Kingbright	604-APT20125RCPRV	Mouser
9	1	LD2	LED, Super Bright Green 50mcd 570nm 110degree 0805	APHCM2012CGCK-F01	Kingbright	604-APHCM2012CGCK	Mouser
10	1	LD3	LED, Super Bright Orange 160mcd 601nm 110degree 0805	APHCM2012SECK-F01	Kingbright	04-APHCM2012SECK	Mouser
11	1	LD4	LED, Super Bright Blue 80mcd 470nm 110degree 0805	LTST-C170TBKT	Lite-On Inc	160-1579-1-ND	Digikey
12	1	R1	Resistor Pack, 1K +/-5%	YC164-JR-071KL	Yageo	YC164J-1.0KCT-ND	Digikey
13	1	R2	62.5mW 4RES SMD Resistor Pack, 680 +/-5%	YC164-JR-07680RL	Yageo	YC164J-680CT-ND	Digikey
14	1	SW1	62.5mW 4RES SMD Switch, Momentary Tact SPST-150gf 3.0x2.5mm	B3U-1000P	Omron	SW1020CT-ND	Digikey
15	1	U1	IC, Microcontroller RISC 16kB Flash, 0.5KB EEPROM, 23 I/O Pins	ATmega168-20AU	Atmel	556-ATMEGA168-20AU	Mouser
16	1	U2	IC, USB to SERIAL UART 28 Pins SSOP	FT232RL	FTDI	895-FT232RL	Mouser
17	1	U3	IC, Voltage regulator 5V, 500mA SOT-223	UA78M05CDCYRG3	TI	595-UA78M05CDCYRG3	Mouser
18	1	Y1	Crystal, 16MHz +/-20ppm HC-49/UJ Low Profile	ABL-16.000MHZ-B2	Abracon	815-ABL-16-B2	Mouser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. OP-AMP LM324N

Product Folder
 Sample & Buy
 Technical Documents
 Tools & Software
 Support & Community

**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D - MARCH 2000 - REVISED JANUARY 2015

---

**LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers**

### 1 Features

- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain) 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
  - Single Supply 3 V to 32 V
  - or Dual Supplies ±1.5 V to ±16 V
- Very Low Supply Current Drain (700 µA) —Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Biasing Current 45 nA (Temperature Compensated)
- Low Input Offset Voltage 2 mV and Offset Current: 5 nA
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing 0 V to V\* – 1.5 V
- **Advantages:**
  - Eliminates Need for Dual Supplies
  - Four Internally Compensated Op Amps in a Single Package
  - Allows Direct Sensing Near GND and V<sub>OUT</sub> also Goes to GND
  - Compatible With All Forms of Logic
  - Power Drain Suitable for Battery Operation
  - In the Linear Mode the Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage
  - Can Swing to Ground, Even Though Operated from Only a Single Power Supply Voltage
  - Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated
  - Input Bias Current is Also Temperature Compensated

### 2 Applications

- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks
- Conventional Op Amp Circuits

### 3 Description

The LM124-N series consists of four independent, high-gain, internally frequency compensated operational amplifiers designed to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split-power supplies is also possible and the low-power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124-N series can directly operate off of the standard 5-V power supply voltage which is used in digital systems and easily provides the required interface electronics without requiring the additional ±15 V power supplies.

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM124-N	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
LM224-N	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
LM324-N	PDIP (14)	19.177 mm × 6.35 mm
	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm
LM2902-N	PDIP (14)	19.177 mm × 6.35 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

**Schematic Diagram**

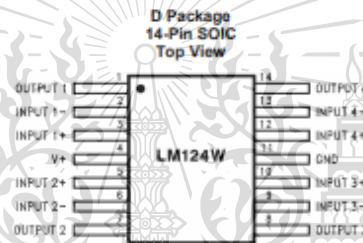
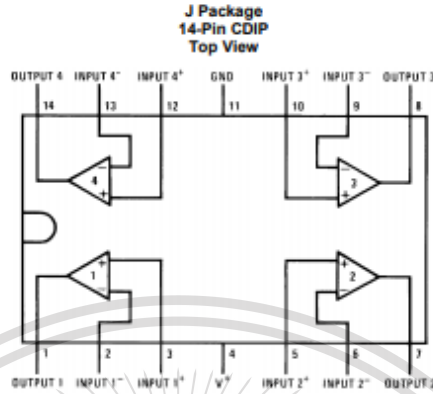
An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN NO.	TYPE	DESCRIPTION
OUTPUT1	1	O	Output, Channel 1
INPUT1 <sup>-</sup>	2	I	Inverting Input, Channel 1
INPUT1 <sup>+</sup>	3	I	Noninverting Input, Channel 1
V <sup>+</sup>	4	P	Positive Supply Voltage
INPUT2 <sup>+</sup>	5	I	Noninverting Input, Channel 2
INPUT2 <sup>-</sup>	6	I	Inverting Input, Channel 2
OUTPUT2	7	O	Output, Channel 2
OUTPUT3	8	O	Output, Channel 3
INPUT3 <sup>-</sup>	9	I	Inverting input, Channel 3
INPUT3 <sup>+</sup>	10	I	Noninverting Input, Channel 3
GND	11	P	Ground or Negative Supply Voltage
INPUT4 <sup>+</sup>	12	I	Noninverting Input, Channel 4
INPUT4 <sup>-</sup>	13	I	Inverting Input, Channel 4
OUTPUT4	14	O	Output, Channel 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.


**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

## 6 Specifications

### 6.1 Absolute Maximum Ratings

See (1)(2).

		LM124-N/LM224-N/LM324-N LM124A/LM224A/LM324A		LM2902-N		
		MIN	MAX	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage, $V^*$		32		26	V	
Differential Input Voltage		32		26	V	
Input Voltage		-0.3	32	-0.3	26	V
Input Current ( $V_{IN} < -0.3$ V) <sup>(3)</sup>		50		50	mA	
Power Dissipation <sup>(4)</sup>	PDIP	1130		1130	mW	
	CDIP	1260		1260	mW	
	SOIC Package	800		800	mW	
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) <sup>(5)</sup>		$V^* \leq 15$ V and $T_A = 25^\circ\text{C}$		Continuous	Continuous	
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)		260		260	$^\circ\text{C}$	
Soldering Information	Dual-In-Line Package	Soldering (10 seconds)		260	$^\circ\text{C}$	
		Vapor Phase (60 seconds)		215	$^\circ\text{C}$	
	Small Outline Package	Infrared (15 seconds)		220	$^\circ\text{C}$	
				220	$^\circ\text{C}$	
Storage temperature, $T_{stg}$		-65	150	-65	150	$^\circ\text{C}$

- (1) Refer to RETS124AX for LM124A military specifications and refer to RETS124X for LM124-N military specifications.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the  $V^*$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than  $-0.3$  V (at  $25^\circ\text{C}$ ).
- (4) For operating at high temperatures, the LM324-N/LM324A/LM2902-N must be derated based on a  $125^\circ\text{C}$  maximum junction temperature and a thermal resistance of  $88^\circ\text{C/W}$  which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224-N/LM224A and LM124-N/LM124A can be derated based on a  $150^\circ\text{C}$  maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.
- (5) Short circuits from the output to  $V^*$  can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of  $V^*$ . At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

### 6.2 ESD Ratings

	VALUE	UNIT
$V_{ESD}$ Electrostatic discharge Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup>	$\pm 250$	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 800-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage ( $V^* - V^-$ ): LM124-N/LM124A/LM224-N/LM224A/LM324-N/LM324A	3	32	V
Supply Voltage ( $V^* - V^-$ ): LM2902-N	3	26	V
Operating Input Voltage on Input pins	0	$V^+$	V
Operating junction temperature, $T_J$ : LM124-N/LM124A	-55	125	$^\circ\text{C}$
Operating junction temperature, $T_J$ : L2902-N	-40	85	$^\circ\text{C}$
Operating junction temperature, $T_J$ : LM224-N/LM224A	-25	85	$^\circ\text{C}$
Operating junction temperature, $T_J$ : LM324-N/LM324A	0	70	$^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC <sup>(1)</sup>	LM124-N / LM224-N	LM324-N / LM2902-N	UNIT
	J/C/DIP	D/SOIC	
	14 PINS	14 PINS	
R <sub>θJA</sub> Junction-to-ambient thermal resistance	88	88	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the IC Package Thermal Metrics application report, [SPRA953](#).

6.6 Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N

V<sup>+</sup> = +5.0V, <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(2)</sup>		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current <sup>(3)</sup>	I <sub>INP1</sub> of I <sub>INP2</sub> ; V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	I <sub>INP1</sub> of I <sub>INP2</sub> ; V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N V <sup>+</sup> = 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C	0	V <sup>+</sup> - 1.5		0	V <sup>+</sup> - 1.5		0	V <sup>+</sup> - 1.5		V
Supply Current	Over Full Temperature Range R <sub>L</sub> = ∞ On All Op Amps V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N V <sup>+</sup> = 26 V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	V <sup>+</sup> = 5 V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15V, R <sub>L</sub> = 2 kΩ, f = 1 V to 11 V, T <sub>A</sub> = 25°C		50	100		25	100		25	100	V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, V <sub>CM</sub> = 0 V to V <sup>+</sup> - 1.5 V, T <sub>A</sub> = 25°C		70	85		65	85		50	70	dB
Power Supply Rejection Ratio	V <sup>+</sup> = 5 V to 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 5 V to 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C		65	100		65	100		50	100	dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling <sup>(5)</sup>	f = 1 kHz to 20 kHz, T <sub>A</sub> = 25°C (Input Referred)		-120			-120			-120		dB

- (1) These specifications are limited to -55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +125°C for the LM124-N/LM124A. With the LM224-N/LM224A, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C, the LM324-N/LM324A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +70°C, and the LM2902-N specifications are limited to -40°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C.
- (2) V<sub>CC</sub> = 1.4V, R<sub>S</sub> = 0 Ω with V<sup>+</sup> from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to V<sup>+</sup> - 1.5 V) for LM2902-N, V<sup>+</sup> from 5 V to 26 V.
- (3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- (4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is V<sup>+</sup> - 1.5 V (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2902-N), independent of the magnitude of V<sup>+</sup>.
- (5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N (continued)**

V<sup>+</sup> = +5.0V, <sup>(1)</sup> unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT			
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
Output Current	Source	V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C			20	40		20	40		mA			
	Sink	V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C			10	20		10	20		mA			
		V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 200 mV, T <sub>A</sub> = 25°C			12	50		12	50		µA			
Short Circuit to Ground	V <sup>+</sup> = 15 V, T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(6)</sup>				40	60		40	60		mA			
Input Offset Voltage	See <sup>(2)</sup>					7			9		mV			
V <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω					7			7		µV/°C			
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>OS</sub> = 0 V					100			150		nA			
I <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω					10			10		pA/°C			
Input Bias Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub>				40	300		40	500		nA			
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(3)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)				0	V <sup>+</sup> -2		0	V <sup>+</sup> -2		V			
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15 V (V <sub>O</sub> Swing = 1V to 11V), R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ				25			15			V/mV			
Output Voltage Swing	V <sub>OH</sub>	V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V), R <sub>L</sub> = 2 kΩ			26			26			V			
	V <sub>OL</sub>	V <sup>+</sup> = 5 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ			27	28		27	28		23	24		
		V <sup>+</sup> = 5 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ				5	20		5	20		5	100	mV
Output Current	Source	V <sub>O</sub> = 2 V, V <sub>IN+</sub> = 1 V, V <sub>IN-</sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V			10	20		10	20		10	20	mA	
	Sink	V <sub>O</sub> = 1 V, V <sub>IN+</sub> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V			5	8		5	8		5	8	mA	

(6) Short circuits from the output to V<sup>+</sup> can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V<sup>+</sup>. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5. DIODE RHRP15120

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR®

**RHRP15120**

Data Sheet

November 2013

### 15 A, 1200 V, Hyperfast Diode

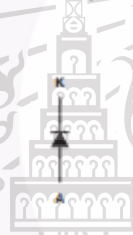
The RHRP15120 is a hyperfast diode with soft recovery characteristics. It has the half recovery time of ultrafast diodes and is silicon nitride passivated ionimplanted epitaxial planar construction. These devices are intended to be used as freewheeling/ clamping diodes and diodes in a variety of switching power supplies and other power switching applications. Their low stored charge and hyperfast soft recovery minimize ringing and electrical noise in many power switching circuits reducing power loss in the switching transistors.

#### Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
RHRP15120	TO-220AC-2L	RHR15120

NOTE: When ordering, use the entire part number.

#### Symbol



#### Features

- Hyperfast Recovery  $t_r = 75$  ns (@  $I_r = 15$  A)
- Max Forward Voltage,  $V_f = 3.2$  V (@  $T_c = 25^\circ\text{C}$ )
- 1200 V Reverse Voltage and High Reliability
- Avalanche Energy Rated
- RoHS Compliant

#### Applications

- Switching Power Supplies
- Power Switching Circuits
- General Purpose

#### Packaging



#### Absolute Maximum Ratings $T_c = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

	RHRP15120	UNIT
Peak Repetitive Reverse Voltage	$V_{RRM}$ 1200	V
Working Peak Reverse Voltage	$V_{RWM}$ 1200	V
DC Blocking Voltage	$V_R$ 1200	V
Average Rectified Forward Current ( $T_c = 140^\circ\text{C}$ )	$I_{F(AV)}$ 15	A
Repetitive Peak Surge Current (Square Wave, 20 kHz)	$I_{FRM}$ 30	A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Halfwave, 1 Phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$ 200	A
Maximum Power Dissipation	$P_D$ 100	W
Avalanche Energy (See Figures 10 and 11)	$E_{AVL}$ 20	mJ
Operating and Storage Temperature	$T_{STG}, T_J$ -65 to 175	$^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## RHRP15120

Electrical Specifications  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_F$	$I_F = 15\text{ A}$	-	-	3.2	V
	$I_F = 15\text{ A}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2.6	V
$I_R$	$V_R = 1200\text{ V}$	-	-	100	$\mu\text{A}$
	$V_R = 1200\text{ V}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	500	$\mu\text{A}$
$T_{rr}$	$I_F = 1\text{ A}, dI_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	-	65	ns
	$I_F = 15\text{ A}, dI_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	-	75	ns
$t_a$	$I_F = 15\text{ A}, dI_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	36	-	ns
$t_b$	$I_F = 15\text{ A}, dI_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	28	-	ns
$Q_{rr}$	$I_F = 15\text{ A}, dI_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	150	-	nC
$C_J$	$V_R = 10\text{ V}, I_F = 0\text{ A}$	-	55	-	pF
$R_{\theta JC}$		-	-	1.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$

## DEFINITIONS

$V_F$  = Instantaneous forward voltage ( $p_w = 300\ \mu\text{s}$ ,  $D = 2\%$ ).

$I_R$  = Instantaneous reverse current.

$t_{rr}$  = Reverse recovery time (See Figure 9), summation of  $t_a + t_b$ .

$t_a$  = Time to reach peak reverse current (See Figure 9).

$t_b$  = Time from peak  $I_{RM}$  to projected zero crossing of  $I_{RM}$  based on a straight line from peak  $I_{RM}$  through 25% of  $I_{RM}$  (See Figure 9).

$Q_{rr}$  = Reverse recovery charge.

$C_J$  = Junction capacitance.

$R_{\theta JC}$  = Thermal resistance junction to case.

$p_w$  = pulse width.

$D$  = duty cycle.

## Typical Performance Curves

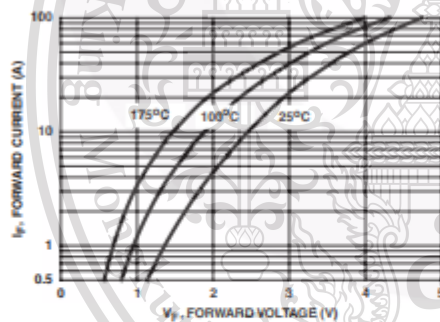


FIGURE 1. FORWARD CURRENT vs FORWARD VOLTAGE

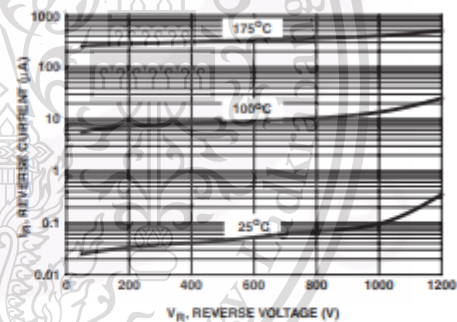


FIGURE 2. REVERSE CURRENT vs REVERSE VOLTAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ง

โปรแกรม Arduino สำหรับควบคุมการป้อนกลับของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1. โปรแกรม Arduino feedback สำหรับจ่ายกระแสคงที่ 0.55 A

```

double CurrentCon = 0.55;
double dutyC = 0.5 ;
double CurrentRead2 = 0;
int feedback_V = A3;
int feedback_I = A5;
int pwm = 0;
void setup() {
  pinMode(feedback_I, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  delay(5000);
}
void loop() {
  double CurrentRead = analogRead(A5);
  if (analogRead(A5) < 300) {
    CurrentRead2 = ((CurrentRead/200)/88)/0.1 ;
    analogWrite(6, dutyC * 255);
    Serial.print("Current I: ");
    Serial.print(CurrentRead2);
    Serial.print("Duty : ");
    Serial.print(dutyC * 100);
    Serial.print("analogA5 0-1023 : ");
    Serial.println(analogRead(A5));
    delay(500);
  }
  else if(analogRead(A5) >= 300){
    CurrentRead = ((CurrentRead/200)/88)/0.1 ;
    if (CurrentRead > CurrentCon)
    {
      dutyC = dutyC-0.005;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

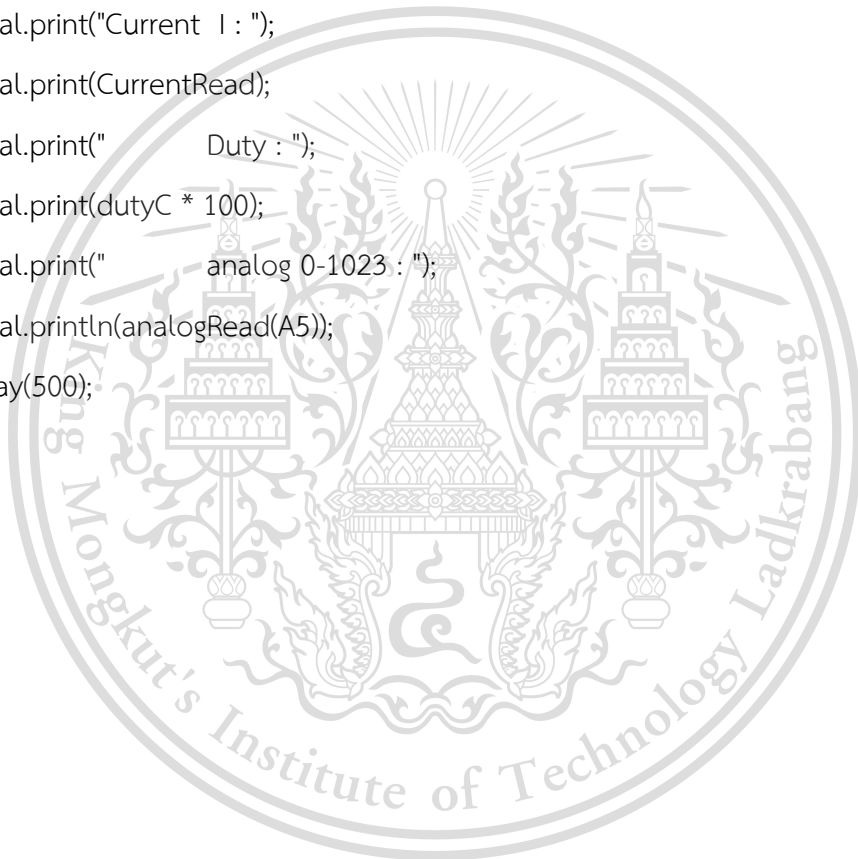
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

    pwm = constrain(dutyC, 1, 254);
  }
  if (CurrentRead < CurrentCon)
  {
    dutyC = dutyC+0.005;
    pwm = constrain(dutyC, 1, 254);
  }
  analogWrite(6, dutyC * 255);
  Serial.print("Current I : ");
  Serial.print(CurrentRead);
  Serial.print("    Duty : ");
  Serial.print(dutyC * 100);
  Serial.print("    analog 0-1023 : ");
  Serial.println(analogRead(A5));
  delay(500);
}
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2. โปรแกรม Arduino feedback สำหรับจ่ายกระแสคงที่ 1.1 A

```

double CurrentCon = 1.1;
double dutyC = 0.5 ;
double CurrentRead2 = 0;
int feedback_V = A3;
int feedback_I = A5;
int pwm = 0;
void setup() {
  pinMode(feedback_I, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  delay(5000);
}
void loop() {
  double CurrentRead = analogRead(A5);
  if (analogRead(A5) < 300){
    CurrentRead2 = ((CurrentRead/205)/34)/0.1;
    analogWrite(6, dutyC * 255);
    Serial.print("Current I: ");
    Serial.print(CurrentRead2);
    Serial.print("    Duty : ");
    Serial.print(dutyC * 100);
    Serial.print("    analogA5 0-1023 :");
    Serial.println(analogRead(A5));
    delay(500);
  }
  else if(analogRead(A5) >= 300){
    CurrentRead = ((CurrentRead/205)/34)/0.1;
    if (CurrentRead > CurrentCon)
    {
      dutyC = dutyC-0.005;
    }
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

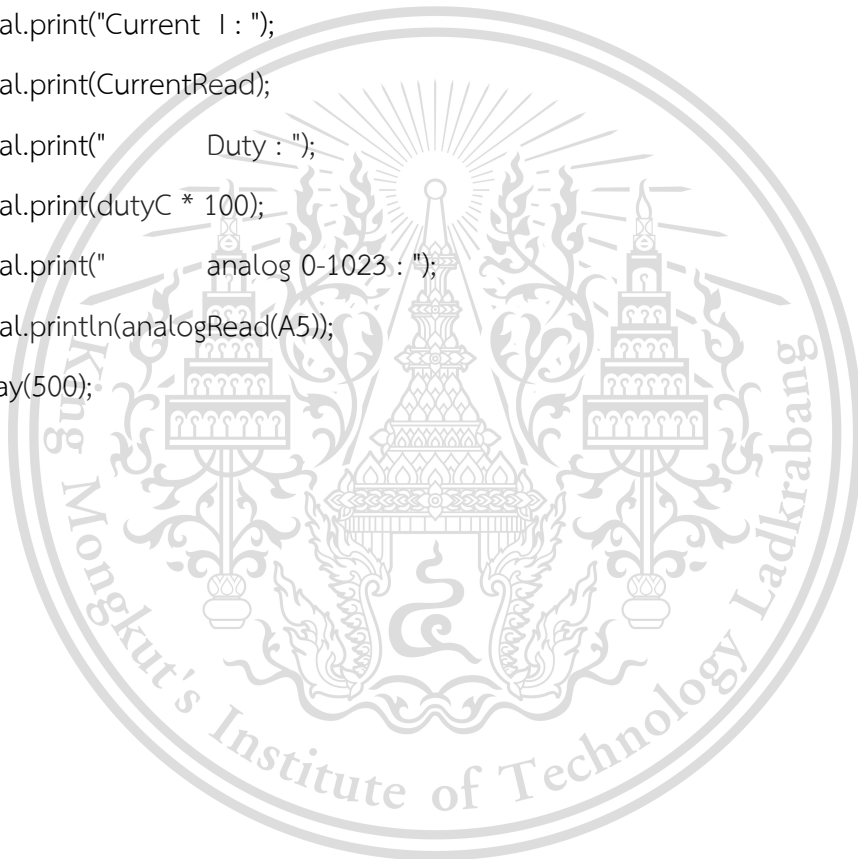
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

    pwm = constrain(dutyC, 1, 254);
  }
  if (CurrentRead < CurrentCon)
  {
    dutyC = dutyC+0.005;
    pwm = constrain(dutyC, 1, 254);
  }
  analogWrite(6, dutyC * 255);
  Serial.print("Current I : ");
  Serial.print(CurrentRead);
  Serial.print("    Duty : ");
  Serial.print(dutyC * 100);
  Serial.print("    analog 0-1023 : ");
  Serial.println(analogRead(A5));
  delay(500);
}
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3. โปรแกรม Arduino feedback สำหรับจ่ายกระแสคงที่ 3.3 A

```

double CurrentCon = 3.3;
double dutyC = 0.5 ;
int feedback_V = A3;
int feedback_I = A5;
int pwm = 0;
void setup() {
    pinMode(feedback_V, INPUT);
    pinMode(feedback_I, INPUT);
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    double CurrentRead = analogRead(A5);
    CurrentRead = ((CurrentRead/51)/34)/0.1;
    if (CurrentRead > CurrentCon)
    {
        dutyC = dutyC-0.005;
        pwm = constrain(dutyC, 1, 254);
    }
    if (CurrentRead < CurrentCon)
    {dutyC = dutyC+0.005;
    pwm = constrain(dutyC, 1, 254);}
    analogWrite(6, dutyC * 255);
    Serial.print("Current I : ");
    Serial.print(CurrentRead);
    Serial.print("      Duty : ");
    Serial.print(dutyC * 100);
    Serial.print("      analog 0-1023 : ");
    Serial.println(analogRead(A5));
    ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
    delay(500); }

```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียน



นายกรวิษฐ์ บุญศรี

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนพรตพิทยพยัต

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวกฤติมา เชตสุริยา

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายกฤษฏากร ปัญญา

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

แผนกมัธยม

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายชวกร คำนวนศิลป์

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา :

โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย ตรัง

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ปรากฏไว้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



นายสุวรรณชาติ ยานสุวรรณ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนอนุกุลนารี

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายอเนชา บัวแย้ม

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนตรุณสิกขาลัย

โครงการ วมว.

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายอภิรักษ์ เกตุพงษ์

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนระยองวิทยาคม

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวอรัทัย ครุฑหุ่น

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนตากพิทยาคม

การศึกษาระดับปริญญาตรี : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.