

การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT

โดย

นายปวินท์ ปิยะโสวรรณ

นายปฐมยวีร์ ชยะกุลศิริ

นายพิทยุคม์ สิทธานุกูล

นายภานุพงษ์ แอ้วง

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายปวินท์ ปิยะโสวรรณ
2. นายปณยวีร์ ชยะกุลศิริ
3. นายพิทยุตม์ สิทธานุกูล
4. นายภาณุพงษ์ แซ่อ้วง





.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ )



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

( รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คคลิฟท์ไฟฟ้า

นายปวินท์	ปิยะโสวรรณ
นายบุญยวีร์	ชยะกุลศิริ
นายพิทยุตม์	สิทธิานุกูล
นายภาณุพงษ์	แซ่อ้วง
ผศ.ดร. เปี่ยมภูมิ	สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. พิชิต	ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการวิเคราะห์การใช้งานแบตเตอรี่ในโฟล์คคลิฟท์ซึ่งเป็นแบตเตอรี่รถยนต์ (Traction Battery) โดยใช้วิธีเก็บข้อมูลจากการติดตั้งจริงด้วยเครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะประจุและคายประจุ อุณหภูมิโดยรอบขณะใช้งาน และความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบขณะใช้งาน ซึ่งการเก็บข้อมูลนี้ได้อาศัยการรับส่งข้อมูลผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตออฟธิงส์ (Internet of Things : IoTs) โดยทำงานเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลธิงส์สปีค (ThingSpeak) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ในโฟล์คคลิฟท์ในโรงงาน และสร้างวงจรจำลองการประจุและคายจุแบตเตอรี่โดยใช้แบตเตอรี่ชนิดเดียวกันกับแบตเตอรี่ที่ได้นำเครื่องมือวัดไปติดตั้ง เพื่อวิเคราะห์วิธีการใช้งานแบตเตอรี่ที่เหมาะสมซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

## A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT

Mr. Pawin	Piyasowan
Mr. Punyawee	Chayakulkheeree
Mr. Pitayut	Sithanukul
Mr. Panupong	Saeaug
Asst.Prof. Piampoom	Sarikprueck Advisor
Assoc.Prof. Pichit	Lumyoung Co-Advisor

### Abstract

This project presents the analysis of the forklift battery (traction battery) use in term of battery performance and life. Four parameters including battery voltage, current, temperature, and humidity during charging and discharging cycles are collected from forklift battery as the actual operating condition using a proposed invented meter. The collected data is transferred to the cloud database in ThingSpeak platform via IoTs (Internet of Things) technology. These collected data are used to build a charging and discharging battery circuit considering the actual charging and discharging patterns. Finally, this study proposes the suitable battery using profile for prolonging the service life of forklift better.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	IV
ABSTRACT	V
สารบัญ	VI
สารบัญรูป	XI
สารบัญตาราง	XV
กิตติกรรมประกาศ	XVI
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์	4
2.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์	4
2.1.2 Arduino	5
2.1.3 Real Time Clock (RTC)	5
2.2 เซ็นเซอร์	6
2.2.1 เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	6

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.2.3 เทอร์โมคัปเปิล	7
2.2.4 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)	7
2.2.5 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล	8
2.3 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ( LEAD – ACID BATTERY )	9
2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	9
2.3.2 ประเภทของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	9
2.3.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	10
2.4 วิธีการประจุแบตเตอรี่	12
2.4.1. Constant Voltage Charging	12
2.4.2. Constant Current Charging	12
2.4.3 Taper Current Charging	13
2.4.4 Fast Charging	13
2.4.5 Trickle Charging	14
2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่	14
2.5.1 ผลจากอุณหภูมิ	14
2.5.2 ผลจากความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge)	14
2.5.3 ผลจากอัตราการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่	15
2.6 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	16
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	16
2.7 ตัวเก็บประจุ	17
2.7.1 ชนิดของตัวเก็บประจุ	17
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า	18
2.8 ไอจีบีที (IGBT)	18
2.9 วงจรเรียงกระแส	20

## สารบัญ (ต่อ)

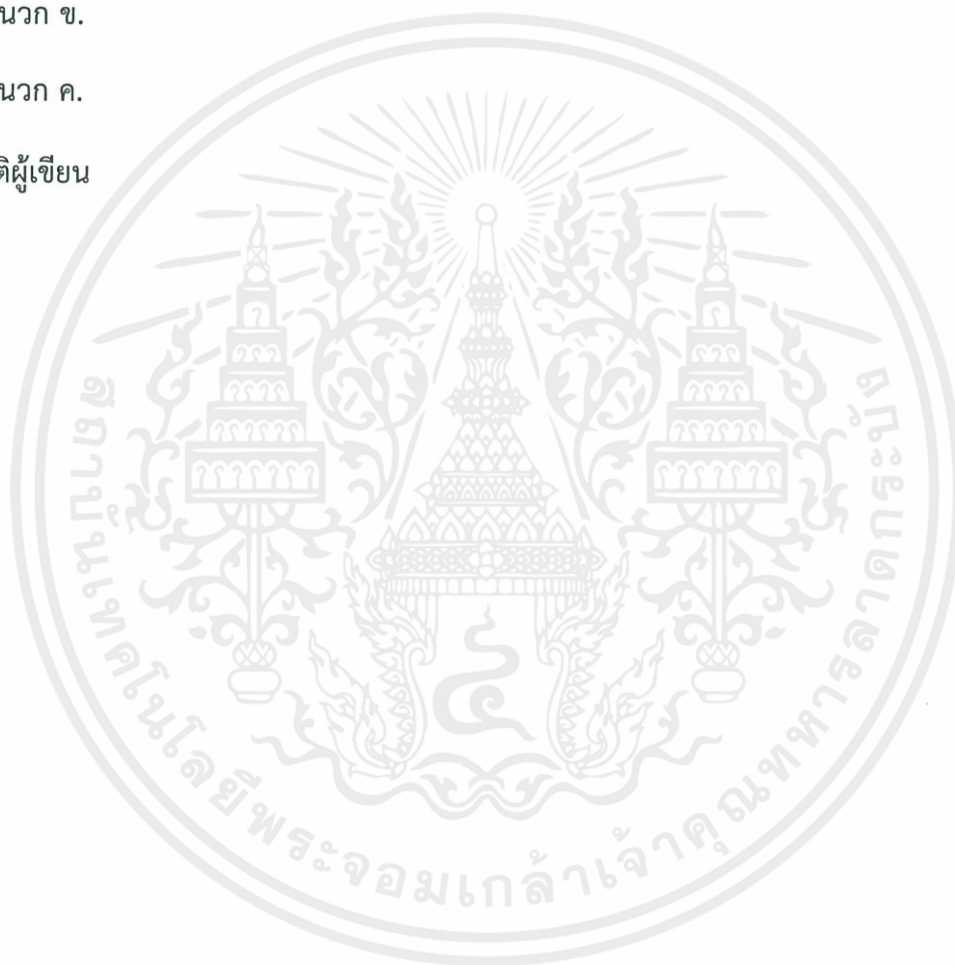
	หน้า
2.9.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น	20
2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	21
2.11 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (THE BUCK CONVERTER)	21
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส	21
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและประกอบสร้าง</b>	<b>25</b>
3.1 ภาพรวมของการออกแบบเครื่องวัดแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์	25
3.2 การออกแบบวิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์	25
3.2.1 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่	25
3.2.2 กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่	26
3.2.3 อุณหภูมิและความชื้นโดยรอบแบตเตอรี่	26
3.3 การออกแบบวงจรสำหรับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	26
3.3.1 การออกแบบวงจร Arduino Nano 1	26
3.3.2 การออกแบบวงจร Arduino Nano 2	27
3.4 การออกแบบการแสดงผลบน THINGSPEAK PLATFORM	30
3.5 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์	31
3.5.1 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่	31
3.5.2 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าขณะแบตเตอรี่ประจุและคายประจุ	33
3.5.3 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น	37
3.6 การออกแบบวงจรประจุแบตเตอรี่	40
3.6.1 ภาพรวมของวงจรประจุแบตเตอรี่	40
3.6.2 การออกแบบวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่	41
3.7 การออกแบบวงจรคายประจุแบตเตอรี่	43
3.7.1 ภาพรวมของวงจรคายประจุแบตเตอรี่	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.2 การออกแบบวงจรควบคุมวงจรรายประจุแบตเตอรี่	45
<b>บทที่ 4</b>	
<b>การทดสอบและผลการทดสอบ</b>	<b>49</b>
4.1 การทดสอบเบื้องต้นเครื่องมือวัดติดตั้งโพลีคลิฟท์ไฟฟ้า	49
4.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดโพลีคลิฟท์ไฟฟ้า	50
4.2.1 การติดตั้งเครื่องมือวัด	50
4.2.2 ผลลัพธ์จากการติดตั้งเครื่องมือวัด	51
4.2.3 ผลลัพธ์การแสดงผลบน ThingSpeak	53
4.3 วงจรประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ	55
4.4 การทดสอบวงจรประจุแบตเตอรี่	55
4.4.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์	56
4.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น	59
4.4.3 การทดสอบวงจรประจุแบตเตอรี่กับโหลดแบตเตอรี่	59
รูปที่ 4.11 แรงดันแบตเตอรี่ขณะประจุด้วยเครื่องประจุแบตเตอรี่จำลอง	62
4.5 การคายประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ	62
4.6 การทดสอบวงจรรายประจุแบตเตอรี่	64
4.7 การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานของแบตเตอรี่จากข้อมูลเครื่องวัด	67
4.8 การทดสอบโหลดสวิตซ์ิ่งและโหลดเชิงเส้น	74
<b>บทที่ 5</b>	
<b>สรุปผลการดำเนินงานโครงการ</b>	<b>77</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	77
5.1.1 เครื่องวัดแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์ไฟฟ้า	77
5.1.2 วงจรประจุแบตเตอรี่	77
5.1.3 วงจรรายประจุแบตเตอรี่	78

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและข้อจำกัด	78
5.3 ข้อเสนอแนะ	78
ภาคผนวก ก.	81
ภาคผนวก ข.	86
ภาคผนวก ค.	88
ประวัติผู้เขียน	105



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 Arduino รุ่น Nano	5
รูป 2.2 Real Time Clock module DS1302	5
รูปที่ 2.3 วงจรการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	6
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์ DHT22	8
รูปที่ 2.5 Schematic diagram ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	11
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์กระแสกับเวลาของการประจุ Constant Voltage Charging	12
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์กระแสกับเวลาของการประจุ Constant Current Charging	12
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์แรงดันกับเวลาของการประจุ Taper Current Charging	13
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แรงดันกับเวลาของการประจุ Fast Charging	13
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	14
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ (Cycle) ของแบตเตอรี่เทียบกับความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ (Depth of Discharge) ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid)	15
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการประจุ การคายประจุของแบตเตอรี่กับอายุของแบตเตอรี่ (Cycle) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion)	15
รูปที่ 2.13 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเหนียวน้ำ	16
รูปที่ 2.14 (ก) สัญลักษณ์ของไอจีบีที (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไอจีบีที	19
รูปที่ 2.15 รูปร่างทั่วไปของไอจีบีที	19
รูปที่ 2.16 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น	20
รูปที่ 2.17 ก แสดงวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ ข. วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ปิด ค. วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์เปิด	22
รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการออกแบบระบบเครื่องมือวัดการทำงานแบตเตอรี่รถโฟล์คลิฟต์	25
รูปที่ 3.2 Schematic Diagram ของเครื่องวัดแบตเตอรี่	28
รูปที่ 3.3 PCB ของวงจรที่ออกแบบ	29
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัด	29
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการแสดงผลใน Channel บน ThingSpeak platform	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 วงจรสำหรับการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า	31
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าปรับเทียบแรงดันไฟฟ้า	33
รูปที่ 3.8 วงจรสำหรับการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า	33
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่าปรับเทียบกระแสขณะประจุ	35
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงค่าปรับเทียบกระแสขณะคายประจุ	37
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-Hygrometer) รุ่น Testo 625	38
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าปรับเทียบอุณหภูมิ	39
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่าปรับเทียบความชื้นสัมพัทธ์	40
รูปที่ 3.14 Schematic Diagram ของวงจรประจุแบตเตอรี่	40
รูปที่ 3.15 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่	43
รูปที่ 3.16 Schematic Diagram ของวงจรคายประจุแบตเตอรี่	43
รูปที่ 3.17 Schematic Diagram ของวงจรโหลดตัวต้านทาน	45
รูปที่ 3.18 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่	48
รูปที่ 4.1 รถโฟล์คคลิฟต์ที่จะติดตั้ง	49
รูปที่ 4.2 บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือวัด	50
รูปที่ 4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด	50
รูปที่ 4.4 (ก) แรงดันไฟฟ้า	51
รูปที่ 4.4 (ข) กระแสไฟฟ้า	51
รูปที่ 4.4 (ค) อุณหภูมิ	52
รูปที่ 4.4 (ง) ความชื้น	52
รูปที่ 4.5 (ก) แรงดันไฟฟ้า	53
รูปที่ 4.5 (ข) กระแสไฟฟ้า	53
รูปที่ 4.5 (ค) อุณหภูมิ	54
รูปที่ 4.5 (ง) ความชื้น	54
รูปที่ 4.6 กระแสวงจรประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 (ก) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 10 %	56
รูปที่ 4.7 (ข) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 30 %	57
รูปที่ 4.7 (ค) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 50 %	57
รูปที่ 4.7 (ง) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 70 %	58
รูปที่ 4.7 (จ) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 90 %	58
รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุมวงจรถูกอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น	59
รูปที่ 4.9 (ก) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 10 %	60
รูปที่ 4.9 (ข) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 50 %	60
รูปที่ 4.9 (ค) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 90 %	61
รูปที่ 4.12 กระแสช่วงมอเตอร์สตาร์ท	63
รูปที่ 4.13 กระแสการทำงานโพล์ลิฟท์ไฟฟ้า	63
รูปที่ 4.15 กระแสจำลองช่วงสวิตช์จากตัวขับเคลื่อนมอเตอร์	65
รูปที่ 4.16 กระแสจำลองช่วงเชิงเส้น	66
รูปที่ 4.17 กระแสคายประจุจำลองแบตเตอรี่	66
รูปที่ 4.18 แรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุที่เวลาต่างๆ	67
รูปที่ 4.19 อายุขัย และ DoD	68
รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่มากกว่า DoD 80%	69
รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่ช่วงประจุทั้งหมด	70
รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ช่วงประจุทั้งหมด	70
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่	71
รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่	71
รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่	72
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิการใช้งานและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	73
รูปที่ 4.27 อุณหภูมิที่แบตเตอรี่ใช้งาน	73
รูปที่ 4.27 (ก) แรงดันคายประจุครั้งที่ 1	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 (ข) แรงดันคายประจุครั้งที่ 2	74
รูปที่ 4.27 (ค) แรงดันคายประจุครั้งที่ 3	75
รูปที่ 4.27 (ง) แรงดันคายประจุครั้งที่ 4	75
รูปที่ 4.27 (จ) แรงดันคายประจุครั้งที่ 5	76
รูปที่ 4.27 (ช) แรงดันคายประจุครั้งที่ 6	76



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	32
ตารางที่ 3.2 ตารางค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขณะแบตเตอรี่รับประจุ	34
ตารางที่ 3.3 ตารางค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขณะ Discharge	36
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ	38
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์	39
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์วงจรประจุแบตเตอรี่	41
ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์วงจรคายประจุแบตเตอรี่	44
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์วงจรโหลดความต้านทาน	45
ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่และ State of Charge	68

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จร่วรงไปได้ด้วยดีด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง รศ.พิชิต ล้ายอง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยโดยตลอดและได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัด ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับเงินสนับสนุนโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดีจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโพลีคลิฟท์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและคลังสินค้า และมีแนวโน้มที่จะถูกใช้งานมากยิ่งขึ้นในอนาคตเนื่องจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในภาคอุตสาหกรรม โพลีคลิฟท์ที่มีการใช้งานมีอยู่สองแบบคือโพลีคลิฟท์เครื่องยนต์ดีเซลและโพลีคลิฟท์เครื่องยนต์ไฟฟ้า ซึ่งโพลีคลิฟท์แบบเครื่องยนต์ไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้งานแทนที่แบบเครื่องยนต์ดีเซลมากขึ้น โดยส่วนที่มีมูลค่าสูงและทำให้เกิดความเสียหายได้มากที่สุดในโพลีคลิฟท์เครื่องยนต์ไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ ดังนั้นการใช้งานโพลีคลิฟท์อย่างไม่เหมาะสมจะส่งผลให้แบตเตอรี่ในโพลีคลิฟท์มีอายุการใช้งานที่สั้นลง การใช้งานที่เหมาะสมจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาโพลีคลิฟท์ลงได้เป็นอย่างมาก

เนื่องจากการได้สังเกตเห็นถึงปัญหาดังกล่าว จึงเป็นที่มาการศึกษาลักษณะการใช้งานของโพลีคลิฟท์ เพื่อวิเคราะห์ว่าการใช้งานแบบใดที่ส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่ และการใช้งานแบบใดที่จะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้ โดยตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมด 4 ตัวแปรคือ 1.แรงดันที่ชาร์จแบตเตอรี่ 2.กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ 3.ความชื้น และ 4.อุณหภูมิ โดยงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการสร้างเครื่องมือวัดค่าตัวแปรดังกล่าว และนำไปติดตั้งในโพลีคลิฟท์เป็นระยะเวลา 1 เดือนเพื่อเก็บข้อมูลการใช้งานจริง แล้วนำข้อมูลที่ได้กลับมาสร้างวงจรจำลองการประจุและคายประจุ (charge discharge) ของแบตเตอรี่ และวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานจากข้อมูลที่เก็บมาได้ เพื่อให้แบตเตอรี่ในโพลีคลิฟท์ถูกใช้งานได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ในโพลีคลิฟท์ออกไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและออกแบบการสร้างเครื่องมือวัดการใช้พลังงานแบตเตอรี่ที่สามารถเก็บค่าใน เอสดีการ์ด (SD card) และส่งข้อมูลที่เก็บค่าได้ขึ้นฐานข้อมูล ThingSpeak ได้
2. เพื่อศึกษาและออกแบบการสร้างวงจรจำลองการประจุและคายประจุ ของแบตเตอรี่
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การใช้งานจากข้อมูลที่ผ่านวงจรจำลอง และหาลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะครอบคลุมทั้งหมด 4 ตัวแปรด้วยกันคือ
  - 1.แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ 2.กระแสที่ขั้วแบตเตอรี่ 3.อุณหภูมิ และ4.ความชื้น
2. ในการเก็บข้อมูลของเครื่องมือวัดที่นำไปติดตั้งจะเก็บข้อมูลผ่านเอสดีการ์ดที่ติดอยู่กับเครื่องมือวัด และส่งข้อมูลที่เก็บค่าได้ เพื่อเก็บในฐานข้อมูล ThingSpeak
3. ในการจำลองวงจรการประจุและคายประจุ จะจำลองตามชนิดของแบตเตอรี่ ที่นำไปติดตั้งนั่นคือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด
4. การวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานจะเป็นการนำลักษณะการใช้งานที่ได้จากข้อมูลที่เก็บมานำมาวิเคราะห์และหาลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมกว่าเพื่อเป็นแนวทางให้กับผู้ใช้งานต่อไป

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดโดยเก็บข้อมูลที่ได้ลงเอสดีการ์ดและส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตจากซิมการ์ด (Sim card) เพื่อเก็บอยู่ในฐานข้อมูล ThingSpeak
2. นำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปทดสอบในสภาวะต่างๆว่าสามารถใช้งานได้จริง ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ
3. ติดต่อบริษัทโฟล์คลิฟท์ว่าจะนำอุปกรณ์ไปติดตั้ง รวมถึงขอข้อมูลของแบตเตอรี่รุ่นที่จะนำไปติดตั้ง
4. นำเครื่องมือวัดไปติดตั้งที่โฟล์คลิฟท์จริง เพื่อเก็บข้อมูลการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นระยะเวลา 1 เดือน
5. นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบ และสร้างวงจรจำลองการประจุและคายประจุ ของแบตเตอรี่ตามชนิดที่ได้นำไปติดตั้งจริง
6. ศึกษาและวิเคราะห์หาการใช้งานที่เหมาะสมจากวงจรจำลอง และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการใช้งานจริงว่าสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้จริงหากใช้งานอย่างเหมาะสม

## 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

หัวข้อ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ เช่น วงจรวัดแบตเตอรี่ แบตเตอรี่	↔								
2. ออกแบบวงจรวัดแบตเตอรี่		↔							
3. สร้างชิ้นงานเครื่องวัดแบตเตอรี่			↔						
4. ทดสอบชิ้นงานและนำชิ้นงานไปติดตั้งที่รถฟอร์คลิฟต์				↔					
5. ออกแบบวงจรจำลองการ Charge/Discharge แบตเตอรี่						↔			
6. สร้างวงจรจำลองการ Charge/Discharge แบตเตอรี่							↔		
7. ทดสอบวงจรจำลองการ Charge/Discharge แบตเตอรี่ และเก็บข้อมูล								↔	
8. สรุปผลและแก้ไขปัญหา									↔

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.สามารถหาวิธีการใช้งานโพล์คลิฟท์อย่างเหมาะสมในโรงงานอุตสาหกรรมหรือคลังสินค้า เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในส่วนของแบตเตอรี่ในโพล์คลิฟท์ลงได้
- 2.เป็นเครื่องมือวัดการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ต้นแบบที่สามารถเก็บค่าผ่านเอสดีการ์ดและส่งค่าผ่านอินเทอร์เน็ตขึ้นฐานข้อมูล ThingSpeak
- 3.เป็นวงจรต้นแบบสำหรับวงจรการประจุและคายประจุ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

##### 2.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กซึ่งอยู่ในรูปแบบของวงจรรวม Integrated Circuit (IC) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีความสามารถในการคำนวณ ประมวลผล รายการตัดสินใจต่างๆ ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบโดยสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระตามความต้องการของผู้ใช้งาน

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนสำคัญดังนี้

หน่วยประมวลผลกลาง หรือ Central Processing Unit (CPU) คือจอร์อิเล็กทรอนิกส์มีหน้าที่ในการประมวลผลคำสั่งโปรแกรมดูไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งอาจจะมีหน่วยประมวลผลกลางมากกว่าหนึ่งหน่วยได้

หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) คือหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บรวบรวมชุดคำสั่งหรือโปรแกรมที่ผู้ใช้งานเขียนขึ้น

หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) คือหน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล

อินพุท/เอาต์พุท พอร์ต (I/O ports) คือส่วนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อรับหรือส่งข้อมูลเช่นการเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์เพื่อรับสัญญาณหรือข้อมูลต่างๆหรือการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แสดงผลต่างๆ

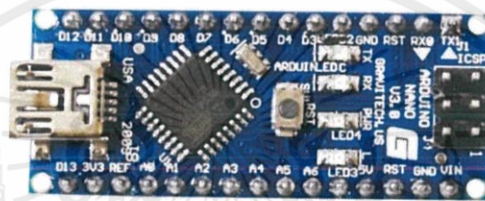
นอกจากส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนข้างต้นแล้วการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาสำหรับการกำหนดจังหวะในการประเมินผลและคำนวณต่างๆดังนั้นการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องมีการต่อกับอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณนาฬิกา

สัญญาณนาฬิกา (Clock) ทำหน้าที่กำหนดจังหวะการประมวลผลและการคำนวณของคอมพิวเตอร์ ค่าของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ขึ้นอยู่กับหน่วยประมวลผลกลางที่ได้ออกแบบไว้ โดยตัวสัญญาณ

นาฬิกาอาจอยู่ภายในตัวหน่วยประมวลผล หรือต่อจากภายนอก ซึ่งตัวอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่นิยมใช้มากที่สุดคือ คริสตอล

### 2.1.2 Arduino

Arduino คือโครงการที่นำชิป IC Microcontroller มาใช้ร่วมกันในภาษา C ที่มีลักษณะเฉพาะคือมีการเขียนไลบรารี (Library) ของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกันสามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานต่อการพัฒนางจรต่างๆ เช่นในรูปที่ 2.1 จะเป็น Arduino รุ่น Nano

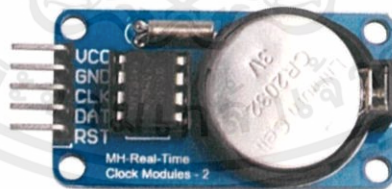


รูปที่ 2.1 Arduino รุ่น Nano

(ที่มา: <https://www.makerlab-electronics.com/product/arduino-nano/>)

### 2.1.3 Real Time Clock (RTC)

Real Time Clock คือ อุปกรณ์ที่ให้ค่าเวลาตามจริง โดยตรวจจับสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอล มีหน้าที่ให้ค่าเวลาตามจริงถึงแม้จะไม่มีไฟเลี้ยงวงจร เพราะในตัว Real Time Clock นั้นมีแหล่งพลังงานจากถ่านในวงจร เช่นในรูปที่ 2.2 จะเป็น RTC module DS1302



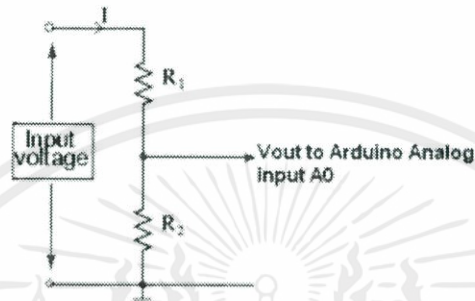
รูป 2.2 Real Time Clock module DS1302

(ที่มา: <http://www.dx.com/p/rtc-ds1302-real-time-clock-module-for-arduino-avr-arm-pic-smd-417961#>)

## 2.2 เซ็นเซอร์

### 2.2.1 เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

เซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับแบ่งแรงดันตามอัตราส่วนของตัวต้านทานทั้ง 2 ตัวที่นำมาต่ออนุกรมกัน โดยใช้วงจรในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

(ที่มา: <https://circuits4you.com/2016/05/13/dc-current-measurement-arduino/>)

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$V_{dc} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_{R2} \quad (2.1)$$

โดยที่

$V_{dc}$  = แรงดัน DC ขาเข้าวงจรการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$V_{R2}$  = แรงดันตกคร่อม R2 ขาออกเข้า Analog Input Arduino

$R_1$  = ความต้านทาน Shunt

$R_2$  = ความต้านทานเข้ามิเตอร์

### 2.2.2 เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

เซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้โดยทั่วไปซึ่งอุปกรณ์นี้จะใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าสายตัวนำ โดยการนำตัวเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า ณ บริเวณที่ต้องการทราบค่า

เซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

-เซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้าน (Current sensing resistors) ซึ่งมีหลักทำงาน คือ ต่อตัวต้านทานอนุกรมกับบริเวณที่ต้องการวัดค่ากระแสไฟฟ้า เรียกว่า ชันท์ (Shunt) เพื่อที่จะไม่กระทบ

กับค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร และนำโวลต์มิเตอร์มาต่อขนานกับขั้วเพื่อวัดแรงดัน จากนั้นนำค่าแรงดันที่ได้คำนวณผ่านกฎของโอห์ม (Ohm's law) เพื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้า

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)

$V_{shunt}$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานขั้ว (V)

$R_{shunt}$  คือ ค่าความต้านทานขั้ว ( $\Omega$ )

-เซ็นเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect sensor) ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1879 โดยนายเอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall) ซึ่งพบว่าเมื่อนำแผ่นตัวนำบางไปวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะทำให้พาหะประจุ (Charge carriers) ที่วิ่งภายในตัวนำจะเลี้ยวเบนออกจากแนวเดิม ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

### 2.2.3 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล คือ เซ็นเซอร์หรือเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force) เทอร์โมคัปเปิลประกอบไปด้วยลวดโลหะตัวนำ 2 ชนิด เมื่อปลายลวดโลหะหรือโลหะผสมกัน 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกันเชื่อมติดกัน แล้วมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดความต่างศักย์เป็นหน่วย ( $\mu V$ ) หรือ ( $mV$ )

### 2.2.4 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)

เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) คือ ตัวต้านทานชนิดหนึ่งที่มีค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลง เทอร์มิสเตอร์นิยมนำมาใช้ทำตัววัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) และยังถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง อาทิ อุปกรณ์จำกัดกระแสไฟฟ้า กระชาก (Inrush current limiter) , อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินชนิดรีเซ็ตได้ด้วยตัวเอง (Self-resetting overcurrent protector) เป็นต้น เทอร์มิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.2.4.1 เทอร์มิสเตอร์ชนิดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ หรือ Negative temperature coefficient (NTC) คือ เทอร์มิสเตอร์ที่มีค่าความต้านทานแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ อุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานจะลดลง และอุณหภูมิลดลง ความต้านทานจะสูงขึ้น

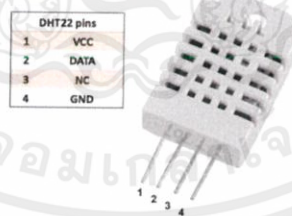
2.2.4.2 เทอร์มิสเตอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก (Positive Temperature Coefficient, PTC) คือ เทอร์มิสเตอร์ที่มีค่าความต้านทานแปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ อุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานจะเพิ่ม และอุณหภูมิลดลง ความต้านทานจะลดลง

### 2.2.5 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล

เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นคือ DHT22 Module เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล การส่งข้อมูลของ DHT22 คือ จะส่งทั้งหมด 40 บิต โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วน สองส่วนแรกส่วนละ 16 บิต และส่วนสุดท้าย 8 บิต ซึ่ง 16 บิตแรกและ 16 บิตที่สอง หมายถึงค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นตามลำดับ ที่รวมทั้งค่าหน้าและหลังทศนิยม โดย ตัวเลขหลักหน่วยจะหมายถึงตัวหลังทศนิยม และ 8 บิตสุดท้ายคือเป็นค่าสำหรับตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยมีตัวอย่างตามรูปที่ 2.4 ซึ่งคือ DHT22 module

โครงสร้างของ DHT22 Module มีส่วนประกอบดังนี้

- Resistive Humidity Sensing Component: เซ็นเซอร์ความชื้นที่จะวัดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าของตัวกลางดูดความชื้น การทำงานของเซ็นเซอร์ก็คือดูดซับไอน้ำและไอออนที่แตกตัวเป็นผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางเพิ่มขึ้น
- NTC Temperature Sensor Thermistor: เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิโดยวัดค่าจากตัวต้านทานที่มีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์ DHT22

(ที่มา: <https://leeselectronic.com/en/product/7375.html>)

## 2.3 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ( Lead – Acid Battery )

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดส่วนแบ่งทางการตลาดของแบตเตอรี่ชนิดนี้มากกว่าครึ่งของตลาดแบตเตอรี่ ทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิรวมกัน แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้สำหรับจุดระเบิดเครื่องยนต์ใช้เป็นหน่วยจ่ายพลังงานฉุกเฉินในขณะที่ไฟฟ้าดับหรือใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าในโรงงานที่อากาศไม่ถ่ายเทเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก เนื่องจากใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานยาวนานแม้ว่าสารตะกั่วจะเป็นพิษแต่ในขณะนี้ได้มีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดนี้อย่างจริงจัง โดย 95-98 เปอร์เซ็นต์ของตัวแบตเตอรี่ได้ถูกนำมาแปรรูปและใช้ใหม่ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด มีขั้วลบซึ่งทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน ( Porous Pb ) ส่วนขั้วบวกนั้นเป็นตะกั่วออกไซด์ ( PbO<sub>2</sub> ) ที่มีลักษณะพรุนเช่นกัน โดยมีกรดซัลฟิวริก ( H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> ) เข้มข้นเป็นอิเล็กโทรไลต์

### 2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

องค์ประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดประกอบด้วย

1. แผ่นธาตุบวก ( Positive Plate ) หมายถึง สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำด้วยตะกั่วไดออกไซด์ ( PbO<sub>2</sub> )
2. แผ่นธาตุลบ ( Negative Plate ) หมายถึง สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำด้วยตะกั่วพรุน ( Spongy Lead )
3. แผ่นกั้น ( Separator ) หมายถึง แผ่นที่อยู่ระหว่างแผ่นธาตุบวกกับแผ่นธาตุลบ เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุทั้งสองชนิดติดต่อกันเกิดการลัดวงจร
4. ขั้วแบตเตอรี่ ( Pole ) หมายถึง แท่งตะกั่วยื่นออกมาจากฝาครอบทั้ง 2 ขั้ว คือขั้วบวกและขั้วลบมีสัญลักษณ์มองเห็นได้ที่ฝาครอบหรือขั้วอย่างชัดเจน
5. เปลือกหม้อ ( Container ) หมายถึง ภาชนะบรรจุส่วนต่างๆ ของเซลล์แบตเตอรี่ เช่น แผ่นธาตุบวกแผ่นธาตุลบ แผ่นกั้นและน้ำกรดไว้ภายใน
6. ฝาครอบแบตเตอรี่ ( Cover ) หมายถึง ฝาครอบแบตเตอรี่ทำหน้าที่ป้องกันมิให้น้ำกรดหกออกจากแบตเตอรี่และป้องกันสิ่งแปลกปลอมต่างๆ จากภายนอกไม่ให้ตกลงไปในแบตเตอรี่
7. จุก ( Plug ) หมายถึง ช่องในฝาครอบแบตเตอรี่ที่ทำไว้เพื่อการเติมอิเล็กโทรไลต์ขณะปฏิบัติการบำรุงรักษาจุดนี้จะต้องมีช่องสำหรับระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ให้ระเหยออกไปได้ด้วย

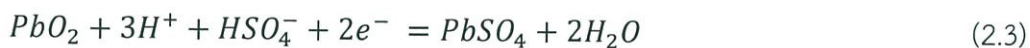
### 2.3.2 ประเภทของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมีคุณสมบัติเฉพาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะจัดแบ่งเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

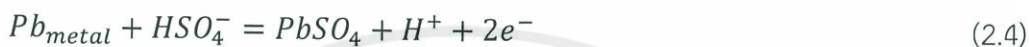
1. แบตเตอรี่รถยนต์ (Starting Lighting and Ignition : SLI) เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาใช้กับงานลักษณะการคายประจุน้อย (Shallow Cycle) ใช้กับระบบรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีแผ่นเพลทบางทั้งเพลทบวกและลบ ลักษณะการออกแบบแบบนี้เพื่อเพิ่มพื้นที่การทำปฏิกิริยาการพิเศษมีพื้นที่ทำปฏิกิริยามากต่อเซลล์ ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้จ่ายกระแสสูงในช่วงเวลาสั้นๆได้ ถึงแม้ว่าไม่ได้รับการออกแบบให้มีอายุการใช้งานนานกับลักษณะการคายประจุแบบลึก (Deep Cycle) ก็ยังมีการนำมาใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศที่กำลังพัฒนาที่มีอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่เพียงชนิดเดียว
2. แบตเตอรี่รถไฟฟ้า (Motive Power or Traction Battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่มีการคายประจุมาก ส่วนใหญ่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า รถยกไฟฟ้า รถไฟฟ้าในสนามกอล์ฟ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีจำนวนเพลทต่อเซลล์น้อยกว่าแบบที่ใช้กับรถยนต์ แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะเพลทจะหนาและทนทาน ในยุคแรกๆ จะใช้ตะกั่ว-แอนติโมนีเพื่อให้สามารถคายประจุได้มาก
3. แบตเตอรี่สำหรับสำรองไฟ (Stationary Battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าสำรอง (UPS) เพื่อจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับระบบคอมพิวเตอร์ ระบบโทรศัพท์ และระบบไฟฟ้าอื่นๆ แบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้ามักมีคุณลักษณะคล้ายกับทั้งแบตเตอรี่รถยนต์และแบตเตอรี่รถไฟฟ้า แล้วจะออกแบบให้มีการคายประจุมาก

### 2.3.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

แผ่นธาตุบวกเป็นตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (Lead Peroxide,  $PbO_2$ ) แผ่นธาตุลบเป็นตะกั่วบริสุทธิ์ (Sponge Lead,  $Pb$ ) เมื่อเติมสารละลายตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (Diluted Sulfuric Acid) ลงไปให้ท่วมแผ่นธาตุแล้ว แบตเตอรี่ลูกดังกล่าวก็พร้อมที่จะใช้งาน แต่จะไม่มีกระแสไฟเนื่องจากยังไม่ครบวงจรไฟฟ้าและพลังงานที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่ขณะนี้คือพลังงานเคมีหลังจากที่ต่อภาชนะภายนอกให้ครบวงจรแล้วแล้วกรดซัลฟิวริกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำปฏิกิริยากับตะกั่วปอกไซด์ของแผ่นธาตุบวกและตะกั่วบริสุทธิ์ของแผ่นธาตุลบ ทำให้แผ่นธาตุทั้งคู่เริ่มเปลี่ยนเป็น ตะกั่วซัลเฟต (Lead Sulfate,  $PbSO_4$ ) ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นน้ำมากขึ้น ปฏิกิริยาเคมีนี้ให้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำให้เกิดการไหลของกระแสภายในวงจรนั้นขึ้นมา ในอีกวิธีหนึ่งที่จะสามารถอธิบายหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด คือในขณะที่แบตเตอรี่กำลังทำการจ่ายไฟได้เป็นอย่างดีคือการอธิบายด้วยสมการเคมีในขณะที่แบตเตอรี่กำลังทำการจ่ายกระแสไฟให้กับภาชนะภายนอกนั้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่แผ่นธาตุบวกระหว่างตะกั่วเปอร์ออกไซด์และกรดซัลฟิวริก จะทำให้ตะกั่วเปอร์ออกไซด์กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต, กรดซัลฟิวริกกลายเป็นน้ำ และได้ออกซิเจนที่ไม่เสถียร (Nascent Oxygen) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.3



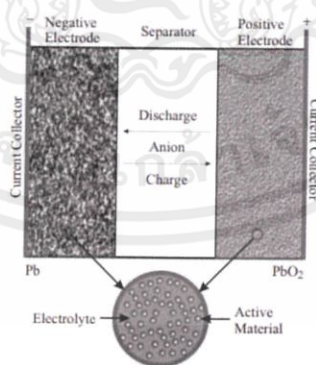
ในขณะที่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่แผ่นธาตุลบระหว่างตะกั่วบริสุทธิ์ และกรดซัลฟิวริกจะทำให้ตะกั่วบริสุทธิ์เปลี่ยนเป็นตะกั่วซัลเฟต และได้ผลิตผลเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.4



จะเห็นว่าสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 เกิดขึ้นในที่เดียวกัน ดังนั้นออกซิเจนในสมการที่ 2.1 และไฮโดรเจนในสมการที่ 2.2 ที่ไม่เสถียรจะรวมกันเป็นน้ำ ซึ่งมีความเสถียรดังนั้นเมื่อรวมทั้งสองสมการข้างต้นเข้าด้วยกันจะได้ปฏิกิริยาเคมีที่สมดุลดังสมการที่ 2.5



ถ้าปล่อยให้กระแสไหลเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึงสภาวะหนึ่ง ที่สารตั้งต้นทางด้านซ้ายมือของสมการที่ 2.5 หหมดไป ปฏิกิริยาทางเคมีก็จะไม่เกิดขึ้นอีก และจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วบวกและขั้วลบอีกต่อไป ที่สภาวะเช่นนี้ถ้ากรดซัลฟิวริกถูกใช้หมดก่อน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็จะกลายเป็นเพียงน้ำบริสุทธิ์เท่านั้นส่วนแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบจะเกิดการสะสมของตะกั่วซัลเฟต



รูปที่ 2.5 Schematic diagram ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

(ที่มา : Christopher D. Rahn – Battery Systems Engineering)

## 2.4 วิธีการประจุแบตเตอรี่

### 2.4.1. Constant Voltage Charging

Constant Voltage Charging จะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าแน่นอน ให้กับแบตเตอรี่ กระแสประจุขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการประจุ ในตอนต้นที่เริ่มประจุจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ยังมีค่าต่ำดังแสดงในภาพที่ 2.6 ข.



ก. แรงดันชาร์จในคาบเวลา

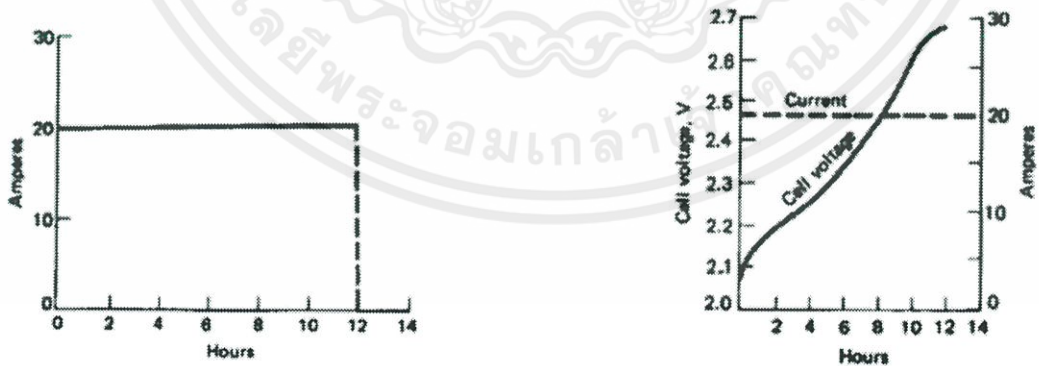
ข. แรงดันกับกระแสในคาบเวลาขณะชาร์จ

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์กระแสกับเวลาของการประจุ Constant Voltage Charging

(ที่มา : Christopher D. Rahn – Battery Systems Engineering)

### 2.4.2. Constant Current Charging

Constant Current Charging จะใช้ค่าความต้านทานค่ามากๆ (เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่) ต่ออนุกรมกับวงจรเพื่อกำจัดค่ากระแสโดยต้องใช้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสูงเพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าประจุมีค่าคงที่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไป ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันกับกระแสต่อคาบเวลาแสดงในภาพที่ 2.7 ข.



ก. กระแสชาร์จในคาบเวลา

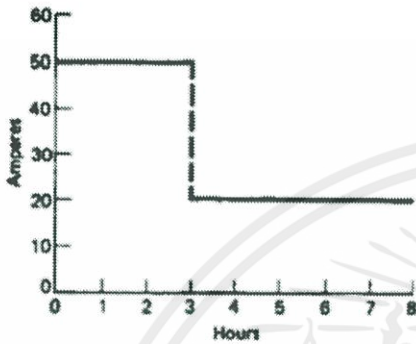
ข. แรงดันกับกระแสในคาบเวลาขณะชาร์จ

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์กระแสกับเวลาของการประจุ Constant Current Charging

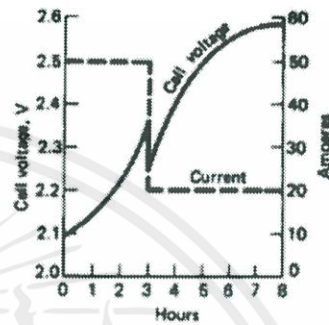
(ที่มา: Christopher D. Rahn – Battery Systems Engineering)

### 2.4.3 Taper Current Charging

การประจุแบบนี้กระแสไฟฟ้าประจุเริ่มต้นสูงและค่อยๆลดลง การลดลงของกระแสไฟฟ้า (Taper) มีผลเนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นขณะประจุ ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันกับกระแสต่อคาบเวลาแสดงในภาพที่ 2.8 ข.



ก. กระแสชาร์จในคาบเวลา

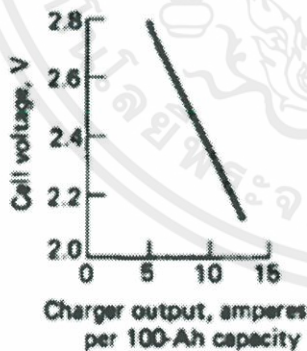


ข. แรงดันกับกระแสในคาบเวลาขณะชาร์จ

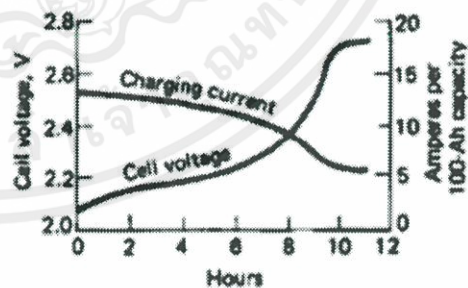
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์แรงดันกับเวลาของการประจุ Taper Current Charging (ที่มา: Christopher D. Rahn – Battery Systems Engineering)

### 2.4.4 Fast Charging

Fast Charging เป็นการประจุในระยะเวลาสั้นๆ ใช้กระแสไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้แบตเตอรี่เสื่อมคุณภาพเร็ว



ก. ลักษณะของแรงดันกับกระแสการชาร์จ



ข. แรงดันกับกระแสในคาบเวลาขณะชาร์จ

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แรงดันกับเวลาของการประจุ Fast Charging (ที่มา: Christopher D. Rahn – Battery Systems Engineering)

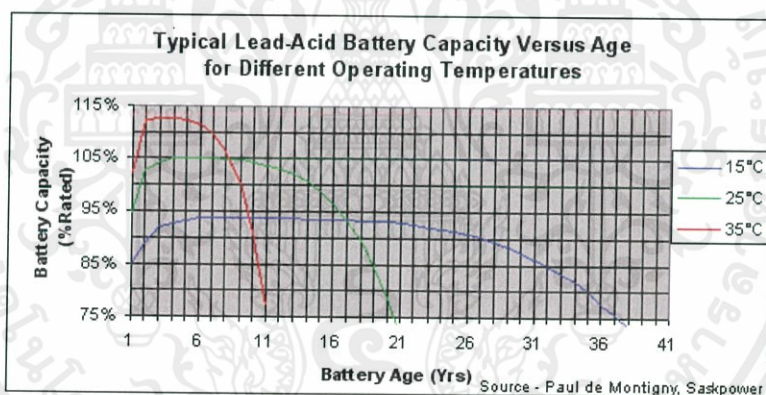
### 2.4.5 Trickle Charging

Trickle Charging เป็นการประจุโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่แบตเตอรี่เพียงเล็กน้อย หรือเรียกว่า กระแส Trick เพื่อให้แบตเตอรี่มีไฟเต็มตลอดเวลาโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ 1.100- 1.125 เท่าของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ วิธีการนี้ยังช่วยลดการเกิดซัลเฟชันด้วย

## 2.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่

### 2.5.1 ผลจากอุณหภูมิ

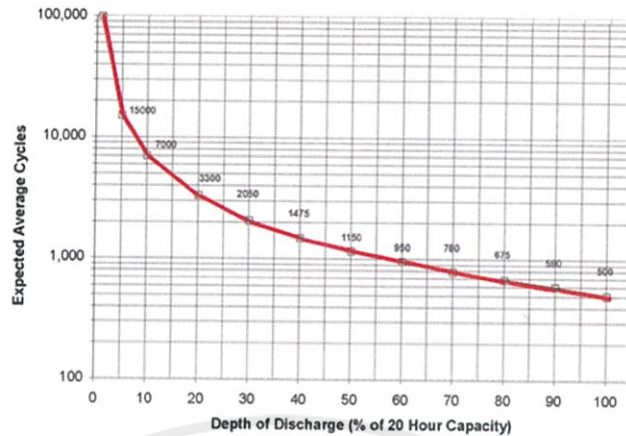
อุณหภูมิและเวลา เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ไม่ว่าจะแบตเตอรี่นั้นจะถูกใช้งานบ่อยหรือไม่ก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพแบตเตอรี่ แต่ในเวลาเดียวกันปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นก็ถูกเร่งให้เกิดเช่นกัน เกิดเป็นการคายประจุในตัวเอง (Self-Discharge) ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่ออายุการเก็บรักษา (Shelf life) และอายุวงจรชีวิตแบตเตอรี่ (Cycle life) เป็นไปตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (ที่มา: <https://www.mpoweruk.com/life.htm>)

### 2.5.2 ผลจากความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge)

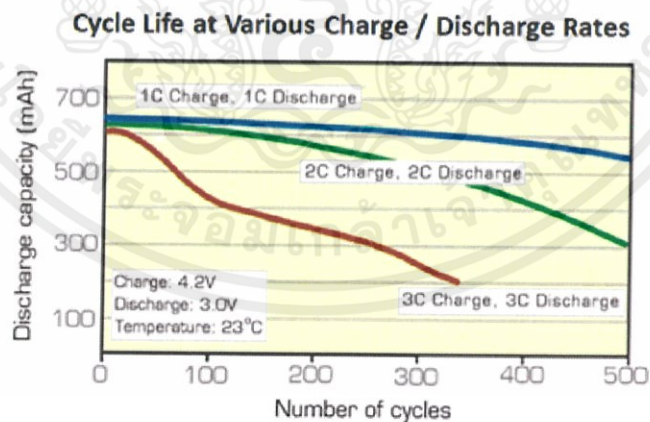
ค่าความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge) คือค่าที่บ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความจุแบตเตอรี่ที่ได้คายประจุออกไป การประจุแบตเตอรี่ที่ใช้งานจนเหลือค่าความจุที่ต่ำหรือความลึกของการคายประจุมาก จะทำให้อายุวงจรชีวิตแบตเตอรี่ลดลงสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ (Cycle) ของแบตเตอรี่เทียบกับความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ (Depth of Discharge) ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid)



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ (Cycle) ของแบตเตอรี่เทียบกับความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ (Depth of Discharge) ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid)  
(ที่มา : <https://www.mpoweruk.com/life.htm>)

### 2.5.3 ผลจากอัตราการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่

ที่อัตราการประจุและคายประจุที่สูงจะส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าความจุลดลงมาจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่จำเป็นเมื่อเกิดการกระแสไฟฟ้าสูง ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการชาร์จแบบเร็ว (Fast Charging) จำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูง สามารถส่งผลให้เกิดการย่อยสลาย (Breakdown) ของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำให้ค่าความจุลดลง สามารถสังเกตตัวอย่างความสัมพันธ์ของอัตราการประจุและคายประจุที่มีต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้จากรูปที่ 2.12



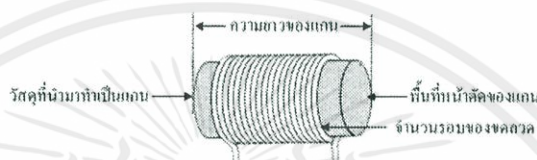
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการประจุ การคายประจุของแบตเตอรี่กับอายุของแบตเตอรี่ (Cycle) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion)  
(ที่มา: <https://www.mpoweruk.com/life.htm>)

## 2.6 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นชิ้นส่วนในวงจรไฟฟ้าแบบพาสซีฟสองขั้วไฟฟ้า มีคุณสมบัติในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดแล้วจะทำให้ขดลวดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry)

### 2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการตามรูปที่ 2.13 คือ



รูปที่ 2.13 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

(ที่มา: <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/inductor.html>)

1. จำนวนรอบของขดลวด ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตาม ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
2. ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นแกน วัสดุแต่ละชนิดมีค่าความซาบซึม (permeability) แตกต่างกัน หากใช้วัสดุที่มีค่าความซาบซึมมากในการใช้เป็นแกน ก็จะมีค่าความเหนี่ยวนำมาก
3. พื้นที่หน้าตัดของแกน ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตาม ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
4. ความยาวของแกน ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อยตาม ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

โดยความสัมพันธ์ของทั้งสี่ตัวแปรจะต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.6)$$

เมื่อ

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

$\mu$  คือ ค่าความขบขิมของวัสดุ (เฮนรี่ต่อเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (ตารางเมตร)

l คือ ความยาวของแกน (เมตร)

## 2.7 ตัวเก็บประจุ

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นระหว่างคู่ฉนวน ตัวเก็บประจุนั้นประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว แต่ละขั้วจะเก็บประจุชนิดตรงกันข้ามกัน ทั้งสองขั้วมีสภาพความจุ และมีไดอิเล็กตริกเป็นตัวแยกคั่นกลาง ประจุนั้นถูกเก็บไว้ที่ผิวหน้าของเพลต โดยมีไดอิเล็กตริกกันเอาไว้ เนื่องจากแต่ละเพลตจะเก็บประจุชนิดตรงกันข้าม แต่มีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นประจุสุทธิในตัวเก็บประจุจึงมีค่าเท่ากับ ศูนย์

### 2.7.1 ชนิดของตัวเก็บประจุ

1. ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ (Paper capacitor) ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ นำไปใช้งานซึ่งต้องการค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง
2. ตัวเก็บประจุแบบไมก้า (Mica capacitor) มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ และ ความถี่ดี มีค่าตัวประกอบการสูญเสียต่ำ และสามารถทำงาน ได้ดีที่ความถี่สูง
3. ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก (Ceramic capacitor) ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดนี้ มีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครฟารัด และเป็นตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่มีขั้ว
4. ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic capacitor) ให้ค่าความจุสูง มีขั้วบวกลบ โครงสร้างภายในคล้ายกับแบตเตอรี่ นิยมใช้กับงานความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อเสียคือกระแสรั่วไหลและความผิดพลาดสูงมาก
5. ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอทิลีน (Polyethylene capacitor)
6. ตัวเก็บประจุ แทนทาลัม (Tantalum capacitor) ให้ค่าความจุสูงในมีขนาดเล็ก และมีอายุในการเก็บรักษาดี การนำไปใช้งานต่างๆ ประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรส่งผ่านสัญญาณ

### 2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า

ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ประการ คือ

1. แรงดันสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก ถ้าแรงดันสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นตาม ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับแรงดันสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก
2. พื้นที่หน้าตัดของเพลท ถ้าพื้นที่หน้าตัดของเพลท มีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นตาม ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของเพลท
3. ความยาวระหว่างเพลท ถ้าความยาวระหว่างเพลทมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าน้อยตาม ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความยาวระหว่างเพลท

โดยความสัมพันธ์ของทั้งสามตัวแปรจะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.7)$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (ฟารัด)

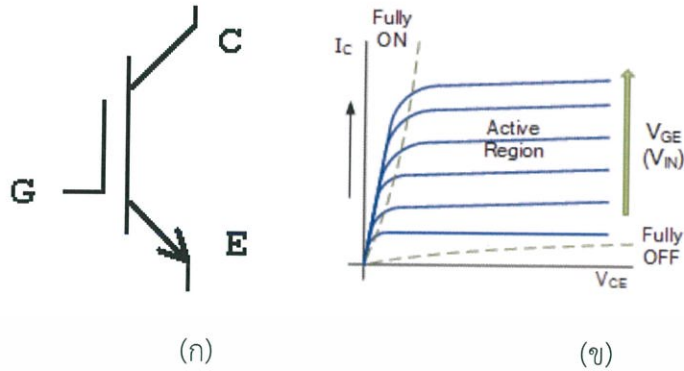
$\epsilon$  คือ แรงดันสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (ฟารัดต่อเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเพลท (ตารางเมตร)

d คือ ความยาวระหว่างเพลท (เมตร)

### 2.8 ไอจีบีที (IGBT)

IGBT ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้เพื่อการสวิตช์ ถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานแบบประสิทธิภาพสูงและสวิตช์ซึ่งความเร็วสูง ไอจีบีทีจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมให้นำกระแสและควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต โดยสัญลักษณ์จะเป็นดังรูป 2.14ก และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะเป็นดังรูป 2.14ข



รูปที่ 2.14 (ก) สัญลักษณ์ของไอจีบีที (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไอจีบีที

(ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Insulated\\_gate\\_bipolar\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Insulated_gate_bipolar_transistor),  
<https://www.electronics-tutorials.ws/power/igbt2.gif>)

ไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลังซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูง ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่า 2-3 โวลต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 1000 โวลต์ นอกจากนั้นไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้ ไอจีบีทีจะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที รูปร่างทั่วไปของไอจีบีทีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปร่างทั่วไปของไอจีบีที

(ที่มา: [https://www.electronicweekly.com/news/business/igbts-critical-ev-cost-2018-](https://www.electronicweekly.com/news/business/igbts-critical-ev-cost-2018-05/)

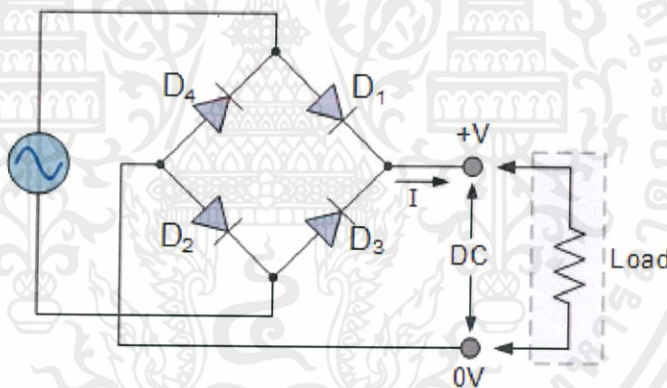
05/)

## 2.9 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยต้องการให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีความเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด วงจรเรียงกระแสมีทางที่เป็นแบบ ครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น แบบครึ่งคลื่นมักจะใช้เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าที่มีโหลดต่ำ ตัวเรียงกระแสมีการใช้ หลายแบบ แต่มักจะพบทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟ DC

### 2.9.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นใช้ไดโอด 4 ตัว เป็นไปตามรูปที่ 2.16 หลักการทำงานคือ เมื่อขาบนเป็นบวก ขาล่างเป็นลบ กระแสไหลผ่านไดโอด 2 ตัวนอก เมื่อคลื่นลบ ขาบนเป็นลบ ขาล่างเป็นบวก กระแสไหล ไดโอด 2 ตัวกลาง ได้กระแสไฟเต็มที่



รูปที่ 2.16 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น

(ที่มา: <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode20.gif>)

ค่าเฉลี่ยและค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเป็นไปตามสมการที่ 2.7 และ 2.9

$$V_{av} = \frac{2V_{peak}}{\pi} \quad (2.7)$$

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

## 2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

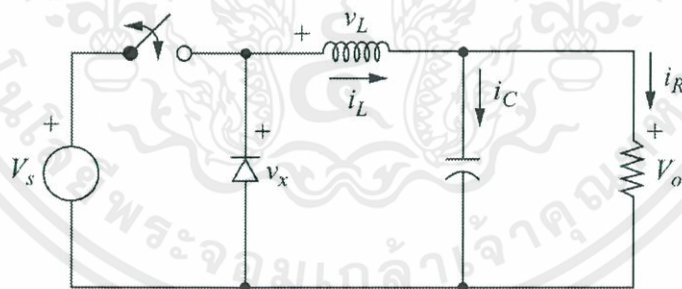
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสตรงในระดับที่แตกต่าง

## 2.11 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (The Buck Converter)

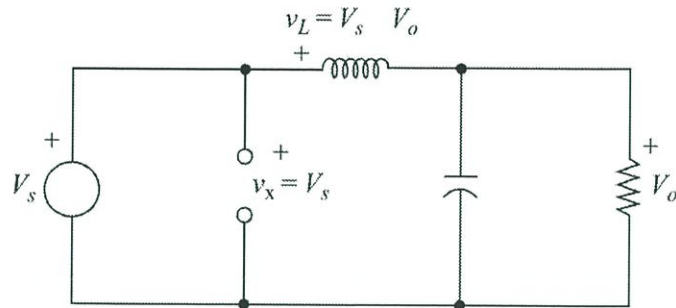
เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต เป็นหนึ่งในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยการควบคุมสัญญาณแรงดันพัลส์ โดยการนำไปใช้งานได้ดีในงานเช่นการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง แต่ส่วนใหญ่ใช้เพื่อควบคุมระดับแรงดันขาออกให้ออกมาเป็นกระแสตรง โดยจากรูปวงจรใน รูปที่ 2.7ก โดยการใส่วงจรรองความถี่ภายหลังสวิตช์ จากรูปที่ 2.7ก ไดโอดในการเปิดทางไหลกระแสตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์ทำการเปิด วงจรนี้เรียกว่า วงจรลดทอนแรงดัน เพราะแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าแรงดันอินพุต

## 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส

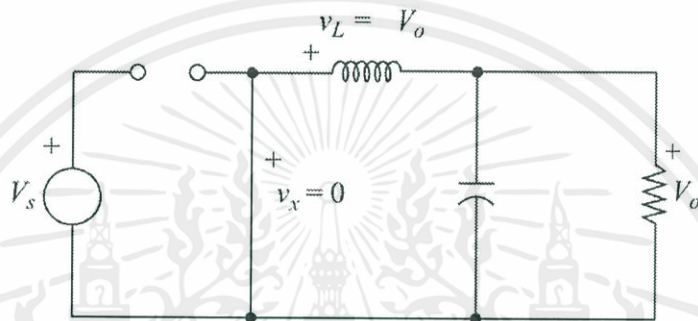
หากวงจรรองความถี่เป็นอุดมคติ แรงดันเอาต์พุตจะเป็นแรงดันเฉลี่ยของแรงดันอินพุต จากรูปที่ 2.17 ก แสดงวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ จากรูปที่ 2.17ข แสดงการทำงานวงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ปิด 2.17ค แสดงการทำงานวงจรสมมูลเมื่อสวิตช์เปิด



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 2.17 ก แสดงวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ ข. วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ปิด ค. วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์เปิด

(ที่มา: Daniel W. Hart, Power Electronics, McGraw Hill; 2010, 199p.)

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์มีคุณลักษณะในการทำงานในภาวะคงตัวดังนี้

1. กระแสตัวเหนี่ยวนำมีการขึ้นเป็นคาบ

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (2.9)$$

2. แรงดันตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.10)$$

3. กระแสตัวเก็บประจุเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.11)$$

4. กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไปถึงโหลดในกรณีอุดมคติ

$$P_S = P_o \quad \text{อุดมคติ} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_s = P_o + \text{การสูญเสีย} \quad \text{ไม่อุดมคติ} \quad (2.13)$$

จากการทำงานของส่วนประกอบต่างๆภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์สามารถสรุปได้เป็นสูตรที่ 3.x

$$V_o = V_s D \quad (2.14)$$

$V_s$  = แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

$V_o$  = แรงดันเอาต์พุต

$D$  = Duty Cycle

จากสมการที่ 2.14 จะสังเกตได้ว่า วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์จะก่อให้เกิดแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันอินพุต

การทำงานจากสูตร จะสามารถทำงานได้หากการทำงานของ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ทำงานได้ช่วงที่กระแสตัวเหนี่ยวนำมีความต่อเนื่องซึ่งสามารถคำนวณตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ที่สุดที่กระแสจะยังต่อเนื่องคือ

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$L_{min}$  คือ ตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดที่กระแสจะต่อเนื่อง

$D$  คือ Duty Cycle

$R$  คือ โหลดความต้านทาน

$f$  คือ ความถี่สวิตชิง

แรงดันไฟฟ้าริปเปิล (Ripple Voltage) อาจที่เกิดจากวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งานจึงต้องคำนวณ ขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าริปเปิลที่ยินยอมได้จากสมการที่ 2.16

$$C = \frac{1-D}{8L\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)f^2} \quad (2.16)$$

เมื่อ

C คือ ตัวเก็บประจุ

L คือ ตัวเหนี่ยวนำ

D คือ Duty Cycle

f คือ ความถี่สวิตชิง

$\Delta V_o$  คือ แรงดันเอาต์พุตตรีปเปิล

$V_o$  คือ แรงดันเอาต์พุต



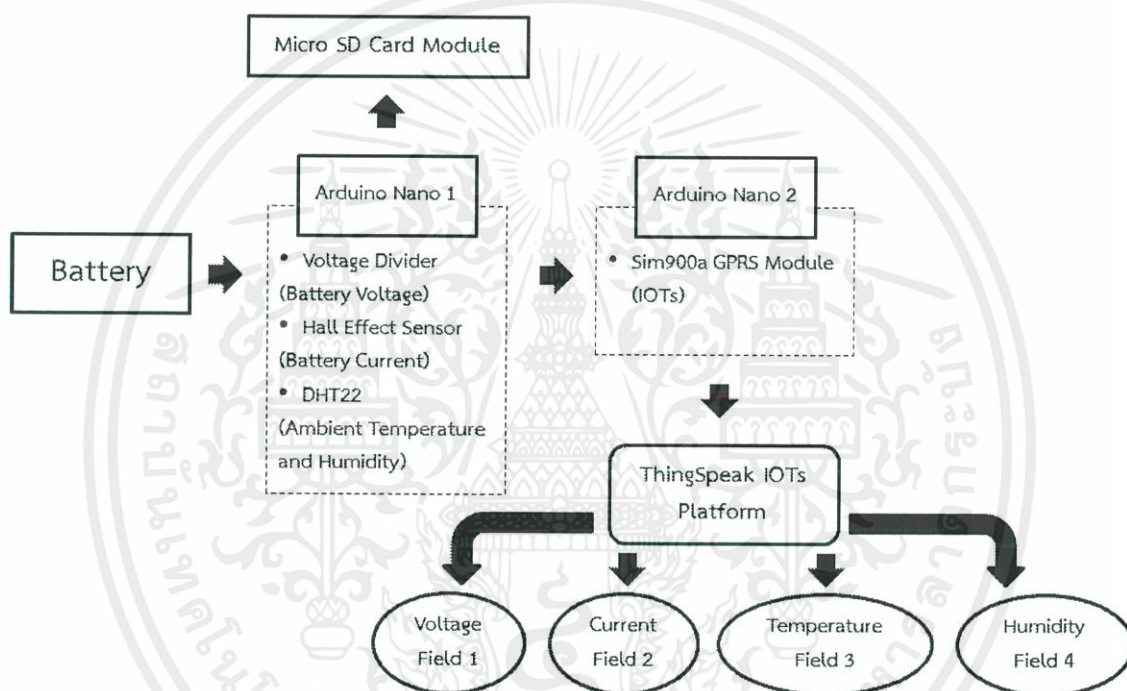
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและประกอบสร้าง

#### 3.1 ภาพรวมของการออกแบบเครื่องวัดแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์

ภาพรวมการทำงานของวงจรเครื่องวัด การรับแต่ละพารามิเตอร์และเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล เป็นไปตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการออกแบบระบบเครื่องมือวัดการทำงานแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์

#### 3.2 การออกแบบวิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่โพลีคลิฟท์

##### 3.2.1 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่

ใช้วงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งติดตั้งเพื่อตรวจวัดค่าแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ในสถานะต่างๆว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติหรือไม่

### 3.2.2 กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่

ใช้เซ็นเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งติดตั้งเพื่อทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วที่เข้าสู่แบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จรถโฟล์คคลิพท์ และค่ากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายออกไปเมื่อเดินเครื่องรถโฟล์คคลิพท์ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการชาร์จและการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่

### 3.2.3 อุณหภูมิและความชื้นโดยรอบแบตเตอรี่

ใช้ dht22 module โดยติดตั้งเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นโดยรอบของแบตเตอรี่เพื่อวิเคราะห์ผลจากสภาวะแวดล้อมที่มีต่อแบตเตอรี่ในรถโฟล์คคลิพท์

## 3.3 การออกแบบวงจรสำหรับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

การออกแบบวงจรสำหรับกับทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซ็นเซอร์ คณะผู้จัดทำได้เลือกใช้โปรแกรม Fritzing ในการออกแบบ ซึ่งออกแบบในลักษณะ Schematic design ก่อน แล้วจึงออกแบบในลักษณะแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board (PCB)) โดยเครื่องวัดแบตเตอรี่ในโฟล์คคลิพท์ใช้อาร์ดูโนชนิดนาโน (Arduino Nano) 2 ตัว เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลวงจร สามารถแบ่งการออกแบบวงจรได้ดังนี้

### 3.3.1 การออกแบบวงจร Arduino Nano 1

Arduino Nano 1 มีหน้าที่ในการวัดแรงดันแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าขณะชาร์จและดิสชาร์จ อุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม รวมถึงบันทึกข้อมูลที่ได้ลงใน Micro SD card และส่งข้อมูลสู่ Arduino Nano 2

- Arduino Analog Port 0: สำหรับรับค่าแรงดันแบตเตอรี่ จากวงจรแบ่งแรงดัน
- Arduino Analog Port 2: สำหรับรับค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จ จากHall Effect sensor
- Arduino Analog Port 3: สำหรับรับค่ากระแสไฟฟ้าขณะดิสชาร์จ จากHall Effect sensor
- Arduino Digital Port 2, 3, 4: สำหรับรับค่าเวลาจาก RTC Module ผ่านการรับส่งแบบ SPI โดยแต่ละพอร์ตทำงานดังนี้
  - Arduino Digital Port 2: Chip select Pin
  - Arduino Digital Port 3: Data Pin
  - Arduino Digital Port 4: Clock Pin
- Arduino Digital Port 5: สำหรับส่งค่าเพื่อบันทึกใน Micro SD card

- Arduino Digital Port 6: สำหรับรับค่าอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม จาก DHT 22
- Arduino Digital Port 8: สำหรับส่งสัญญาณไฟ LED แฉ่งเตือนเมื่อไม่ได้ใส่ Micro SD card
- Arduino Digital Port 9: สำหรับส่งค่า ให้ Arduino Nano 2
- Arduino Digital Port 10: สำหรับรับค่า จาก Arduino Nano 2

### 3.3.2 การออกแบบวงจร Arduino Nano 2

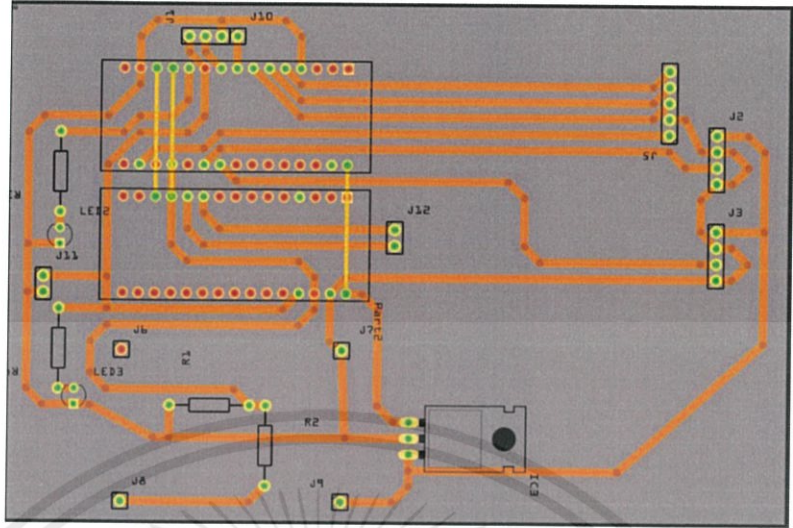
Arduino Nano 2 เป็นส่วนในการรับค่าข้อมูลจาก Arduino Nano 1 เป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการส่งค่าไปยังฐานข้อมูล ThingSpeak ซึ่งเป็น IOTs Platform โดยใช้รับค่าจาก Arduino Nano 1 และส่งค่าให้ Sim900a GPRS Module ผ่าน Software Serial โดยเชื่อมกับ Arduino Nano 2 และ Sim900a GPRS Module ดังนี้

- Arduino Digital Port 7: สำหรับรับค่าจาก Sim900a GPRS Module
- Arduino Digital Port 8: สำหรับส่งค่าไป Sim900a GPRS Module
- Arduino Digital Port 9: สำหรับรับค่าจาก Arduino Nano 1
- Arduino Digital Port 10: สำหรับส่งค่าไป Arduino Nano 1

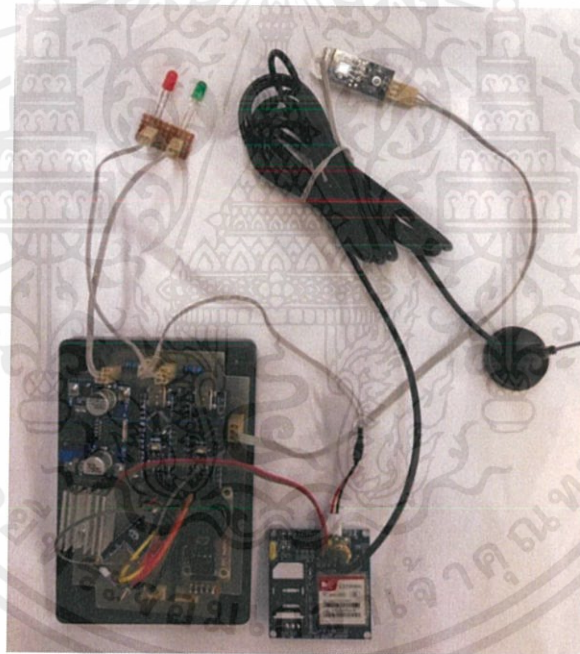
การเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ถูกแสดงเป็นภาพโดยรวมการต่อวงจรดังรูปที่

3.2 เพื่อแสดงให้เห็นภาพรวมของวงจรเครื่องวัดทั้งหมด





รูปที่ 3.3 PCB ของวงจรที่ออกแบบ



รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบการแสดงผลบน ThingSpeak platform

ระบบติดตามการใช้งานแบตเตอรี่ในโพลีคลิฟท์ได้ใช้ ThingSpeak เป็นแพลตฟอร์มในการส่งผ่านข้อมูล โดยในแพลตฟอร์มนี้ได้ออกแบบไว้เป็น 1 ช่อง (Channel) 4 ฟیلด์ (Field) ดังนี้

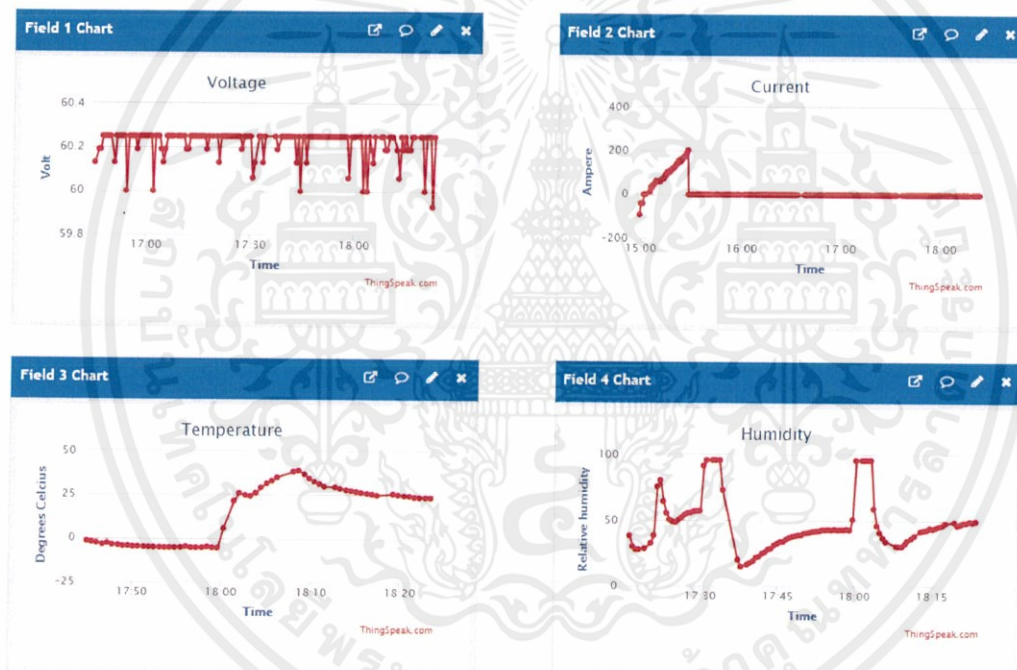
ฟیلด์ที่ 1 จะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่

ฟیلด์ที่ 2 จะแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่

ฟیلด์ที่ 3 จะแสดงค่าอุณหภูมิโดยรอบของแบตเตอรี่

ฟیلด์ที่ 4 จะแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบของแบตเตอรี่

สามารถดูตัวอย่างการแสดงผลบนเว็บไซต์ได้ดังรูปที่ 3.5

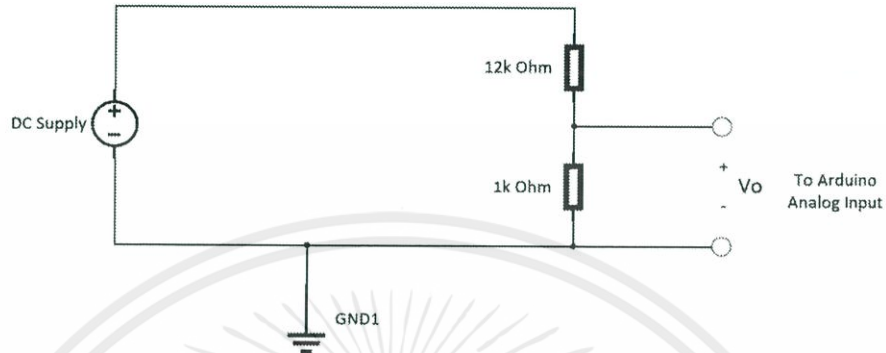


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการแสดงผลใน Channel บน ThingSpeak platform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์

#### 3.5.1 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่



รูปที่ 3.6 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.6 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ แล้ววัดค่าที่ได้จาก Arduino และทำการเปรียบเทียบให้ได้เท่ากับค่าจากมัลติมิเตอร์ (Multimeter) รุ่น Fluke 110 จึงได้ค่าเปรียบเทียบ โดยได้เลือกทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในย่าน 60 V เพื่อให้วัดได้ครอบคลุมพิสัยวัดแรงดันของแบตเตอรี่ที่จะนำไปติดตั้ง

ค่าเปรียบเทียบ = 0.0641

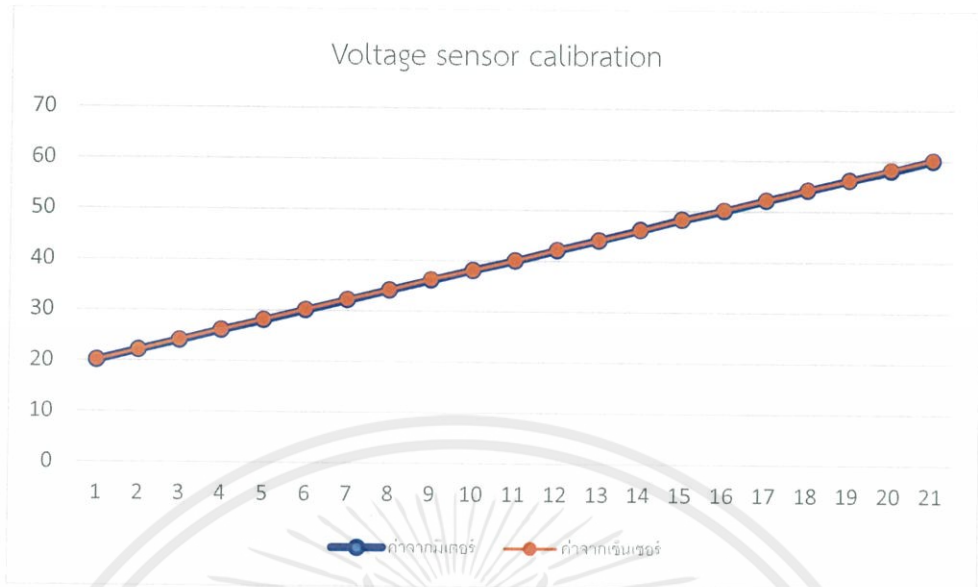
ทำการเปรียบเทียบจึงวัดค่าใหม่เทียบค่าจาก Arduino เทียบกับเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์โดยปรับแรงดันไฟฟ้าอินพุทเป็นขั้น ขั้นละ 2 V จาก 20 V ถึง 60 V

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

From Multimeter	From Sensor
20.1	20.17
22.11	22.11
24.05	24.18
26.05	26.18
28.05	28.18
30.09	30.25
32.1	32.26
34.06	34.13
36.08	36.33
38.1	38.13
40.06	40.12
42.1	42.25
44.1	44.17
46.2	46.17
48.3	48.29
50.1	50.28
52.2	52.28
54.2	54.33
56.2	56.2
58.1	58.38
60.1	60.25

$$\text{ความแม่นยำ(Accuracy)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 100 - \frac{|y - \hat{y}|}{y} \times 100 \right) = 99.7098 \%$$

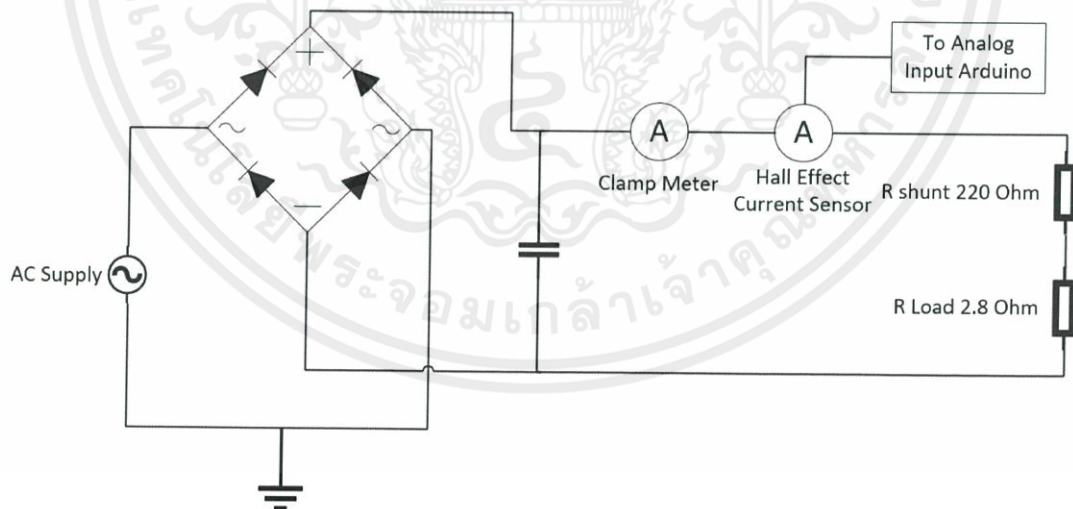
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า

จากกราฟที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้รับหลังการปรับเทียบมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น และมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากมัลติมิเตอร์

### 3.5.2 การปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าขณะแบตเตอรี่ประจุและคายประจุ



รูปที่ 3.8 วงจรสำหรับการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2.1 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าขณะแบตเตอรี่ประจุ

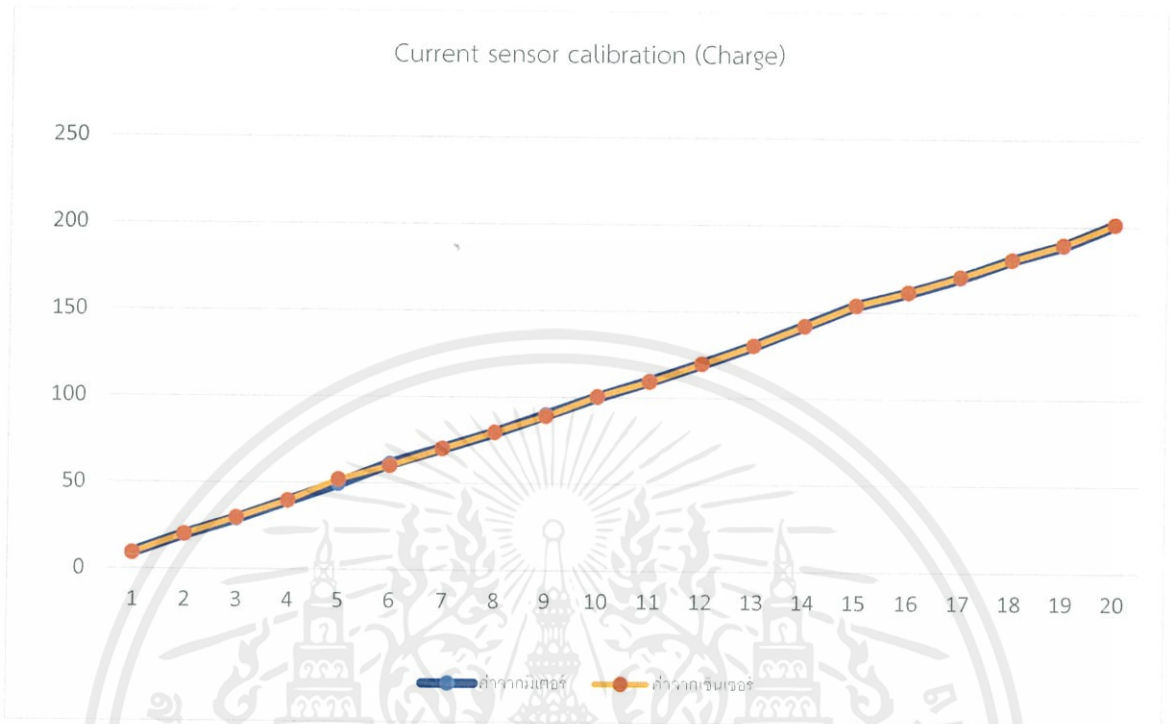
ต่อ Hall Effect Sensor ดังรูปที่ 3.8 ให้กระแสไหลในทิศทางที่เปรียบเสมือนการชาร์จแบตเตอรี่ ทำการวัดค่าที่ได้จาก Arduino และทำการเปรียบเทียบให้ได้เท่ากับค่าจากแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) จึงได้ค่าเปรียบเทียบเป็น 0.257816936

หลังจากทำการเปรียบเทียบจึงวัดค่าใหม่เทียบค่าจาก Arduino และ Clamp Meter โดยปรับให้ค่ากระแสเป็นขั้น ขั้นละ 10 A จาก 10 A ถึง 200 A เพื่อให้ครอบคลุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้เมื่อโพล์คลิฟท์ทำงานที่พิกัดกำลังสูงสุด

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขณะแบตเตอรี่รับประจุ

From Clamp meter	From Hall effect sensor
9.3	9.21
20	20.01
29.2	29.74
39.5	39.75
49.6	52.12
61.1	59.99
70.2	70.13
79.5	79.67
89.8	89.2
100.2	100.55
109.7	109.31
119.9	119.88
130.4	130.46
142.1	141.8
153.9	153.92
161.4	161.65
170.3	170.67
180.9	180.73
189.1	189.5
201.3	201.36

$$\text{ความแม่นยำ(Accuracy)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (100 - \frac{|y-y_i|}{y} \times 100) = 99.3461 \%$$



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบกระแสขณะประจุ

จากกราฟที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้รับหลังการปรับเทียบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ได้จาก Clamp Meter

### 3.5.2.2 การปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าขณะเบตเตอร์คายประจุ

ต่อ Hall Effect Sensor ดังรูปที่ 3.8 ให้กระแสไหลในทิศทางที่เปรียบเสมือนการชาร์จเบตเตอร์ทำการวัดค่าที่ได้จาก Arduino และทำการปรับเทียบให้ได้เท่ากับค่าจากแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) จึงได้ค่าปรับเทียบ

ค่าปรับเทียบ = 0.2511234

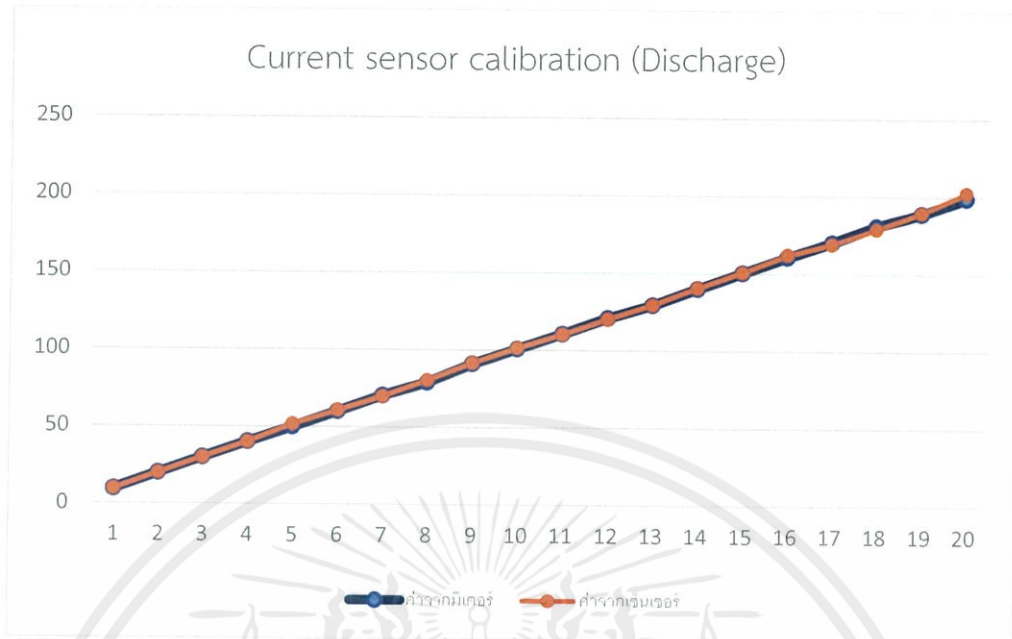
หลังจากทำการปรับเทียบจึงวัดค่าใหม่เทียบค่าจาก Arduino และแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) โดยปรับ ให้ค่ากระแสเป็นขั้น ขั้นละ 10 A จาก 10 A ถึง 200 A เพื่อให้ครอบคลุมกระแสที่ใช้เมื่อทำงานที่พิกัดกำลังสูงสุดของโพล์คลิฟท์

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสดังขณะ Discharge

From Clamp meter	From Hall effect sensor
9.6	9.57
19.9	19.91
30	30
40.2	40.09
50	51.72
60	60.77
70.5	69.81
79	80.36
91.1	91.66
100.8	101.45
110.5	110.24
121	120.29
129.4	129.58
140.2	140.88
150.6	150.93
160.7	162.23
170.2	169.26
181.1	179.05
189.2	189.85
199	202.66

$$\text{ความแม่นยำ(Accuracy)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 100 - \frac{|y - \hat{y}|}{y} \times 100 \right) = 99.2098 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบกระแสขณะคายประจุ

จากกราฟที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้รับหลังการปรับเทียบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ได้จากแคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)

### 3.5.3 การปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

ทำการวัดค่าที่ได้จาก DHT22 ที่ต่อกับ Analog Input Arduino และทำการปรับเทียบให้ได้เท่ากับค่าจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple type K) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-Hygrometer) รุ่น Testo 625 ดังรูปที่ 3.11 จึงได้ค่าปรับเทียบ

$$\text{ค่าปรับเทียบ(อุณหภูมิ)} = 1.02$$

$$\text{ค่าปรับเทียบ(ความชื้น)} = 0.96$$

หลังจากทำการปรับเทียบจึงวัดค่าใหม่เทียบค่าจาก DHT22 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-Hygrometer) รุ่น Testo 625



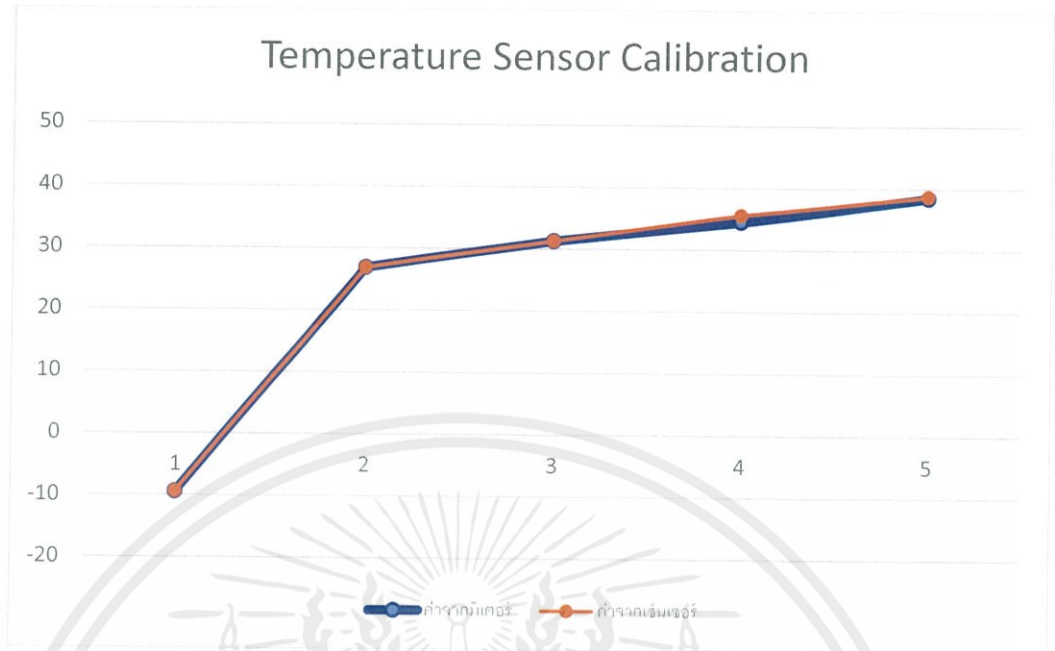
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-Hygrometer) รุ่น Testo 625  
(ที่มา: <https://www.rapidonline.com/testo-0563-6251-625-thermo-hygrometer-57-4413>)

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

From Thermocouple	From DHT22 sensor
-9.4	-9.38
26.9	26.93
31.3	31.31
34.5	35.6
38.5	38.76

$$\text{ความแม่นยำ(Accuracy)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 100 - \frac{|y - \hat{y}|}{y} \times 100 \right) = 99.1560 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์

From Testo 625	From DHT22 sensor
19.4	18.7
29.5	31.58
44.4	46.75
50.8	51.26
66.2	66.05
91.2	89.57

$$\text{ความแม่นยำ(Accuracy)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (100 - \frac{|y-y_i|}{y} \times 100) = 96.8548 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรประจุแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยห้าส่วนสำคัญเรียงจากอินพุตไปที่เอาต์พุต

1. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น (Full Wave Bridge Rectifier) ทำหน้าที่ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง
2. วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (The Buck Converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต ควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยการควบคุมสัญญาณแรงดันพัลส์จาก Arduino 1
3. วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น (Half bridge Inverter) ทำหน้าที่ควบคุม duty cycle ขาออกเข้าแบตเตอรี่ และควบคุมให้อาต์พุตทำงานแบบ 150 Hz โดยควบคุมไอจีบีทีสองตัวจาก Arduino 2
4. วงจรกรองความถี่ไรโซแนนซ์ ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน
5. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น (Full Wave Bridge Rectifier) ทำหน้าที่ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรประจุแบตเตอรี่เป็นไปดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์วงจรประจุแบตเตอรี่

Buck Switching Frequency	1 kHz
Output Frequency	150 Hz
Resonant Inductor	29 mH
Resonant Capacitor	70 $\mu$ F
Inverter Capacitors	1500 $\mu$ F
Buck Capacitor	1500 $\mu$ F
Buck Inductor	3.2 mH

### 3.6.2. การออกแบบวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่

การออกแบบวงจรทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขับเคลื่อน คณะผู้จัดทำได้เลือกใช้โปรแกรม Fritzing ในการออกแบบ ซึ่งออกแบบในลักษณะ Schematic design ก่อน แล้วจึงออกแบบในลักษณะแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board (PCB)) โดยวงจรประจุแบตเตอรี่ใช้อาร์ดูโนชนิดนาโน (Arduino

Nano) 2 ตัว เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่ สามารถแบ่งการออกแบบวงจรได้ดังนี้

### 3.6.2.1 การออกแบบวงจร Arduino Nano 1

Arduino Nano 1 มีหน้าที่ในควบคุมไอจีบีทีของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

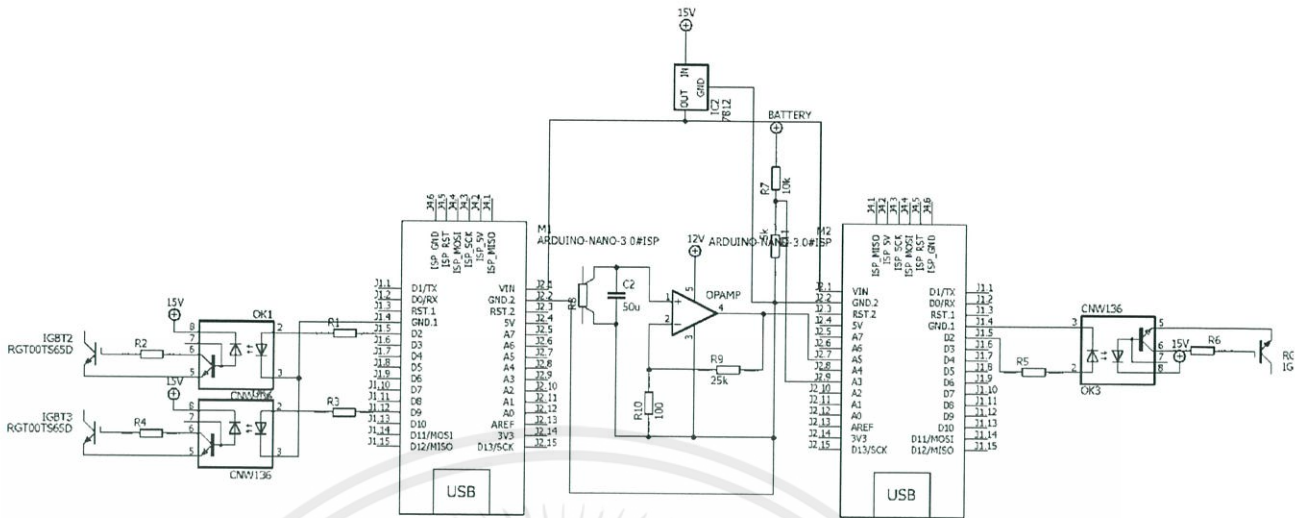
- Arduino Analog Port 3: สำหรับรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุม duty cycle ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์
- Arduino Analog Port 5: สำหรับรับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Shunt Resistor เป็นสัญญาณควบคุม duty cycle ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์
- Arduino Digital Port 6: สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที โดยการส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ด้วยความถี่สวิตซ์ 1 kHz

### 3.6.2.2 การออกแบบวงจร Arduino Nano 2

Arduino Nano 2 มีหน้าที่ในควบคุมไอจีบีทีของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่นเพื่อการควบคุมกระแสขาออกให้เป็นกระแสที่มีความถี่ 150 Hz

- Arduino Digital Port 2: สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที โดยการส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ความถี่สวิตซ์ 75 Hz
- Arduino Digital Port 9: สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที โดยการส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ความถี่สวิตซ์ 75 Hz

การเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ถูกแสดงเป็นภาพรวมการต่อวงจรดังรูปที่ 3.15 เพื่อแสดงให้เห็นภาพรวมของวงจรประจุแบตเตอรี่ทั้งหมด

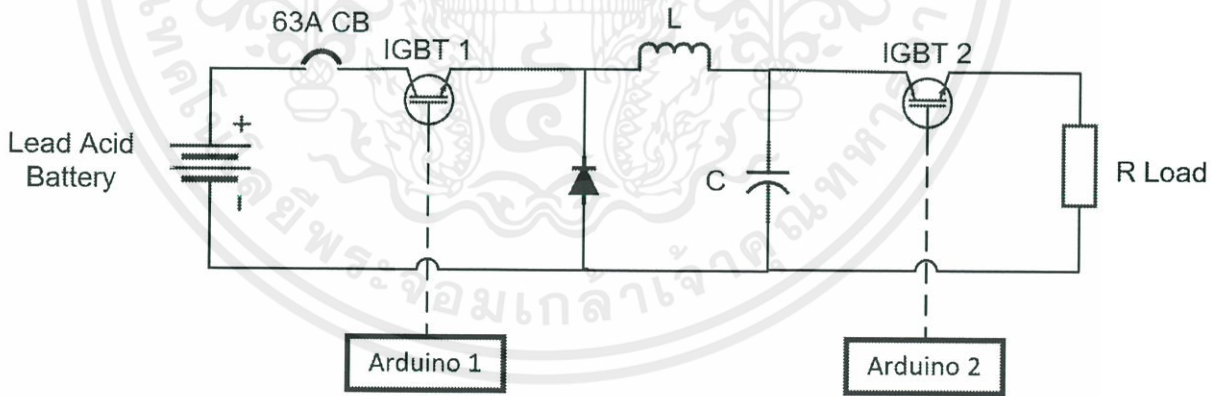


รูปที่ 3.15 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่

### 3.7 การออกแบบวงจรคายประจุแบตเตอรี่

#### 3.7.1. ภาพรวมของวงจรคายประจุแบตเตอรี่

ภาพรวมของวงจรคายประจุแบตเตอรี่เป็นไปตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 Schematic Diagram ของวงจรคายประจุแบตเตอรี่

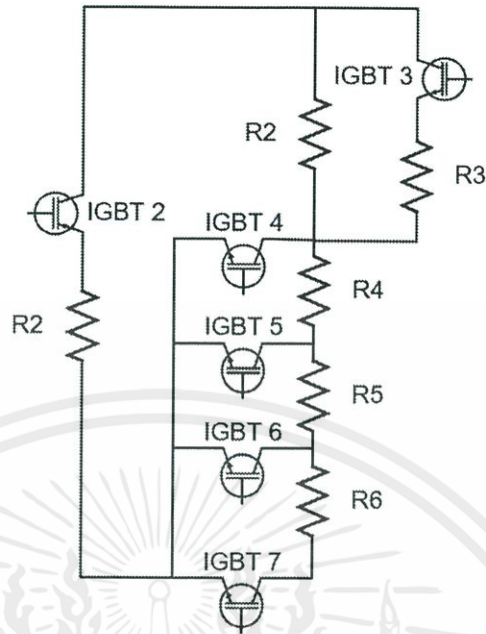
วงจรคายประจุแบบเตอรีประกอบไปด้วยสามส่วนสำคัญเรียงจากอินพุตไปที่เอาต์พุต

1. วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (The Buck Converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต ควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยการควบคุม duty cycle ขาออกแบบเตอรีด้วยสัญญาณจาก Arduino 1
2. ไอจีบีที (IGBT) ทำหน้าที่ปรับขนาดแรงดันช่วงสวิตซึ่งอย่างละเอียด เพื่อความแม่นยำโดยควบคุมไอจีบีทีจาก Arduino 2
3. โหลดความต้านทาน ทำหน้าที่ดึงกระแสไหลออกจากขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดย Schematic Diagram ของวงจรโหลดตัวต้านทานจะเป็นดังรูปที่ 3.17

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรประจุแบบเตอรีเป็นไปดังตารางที่ 3.7 และวงจรโหลดความต้านทานดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์วงจรคายประจุแบบเตอรี

Buck Switching Frequency	400 Hz
Output Frequency	400 Hz
Buck Capacitor	1500 $\mu$ F
Buck Inductor	0.08 mH



รูปที่ 3.17 Schematic Diagram ของวงจรโหนดตัวต้านทาน

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์วงจรโหนดความต้านทาน

R1	0.087 $\Omega$
R2	1 $\Omega$
R3	1 $\Omega$
R4	1 $\Omega$
R5	1 $\Omega$
R6	1 $\Omega$

### 3.7.2 การออกแบบวงจรควบคุมวงจรจ่ายประจุแบตเตอรี่

การออกแบบวงจรทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรขับเคลื่อน คณะผู้จัดทำได้เลือกใช้โปรแกรม Fritzing ในการออกแบบ ซึ่งออกแบบในลักษณะ Schematic design ก่อน แล้วจึงออกแบบในลักษณะแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board (PCB)) โดยวงจรประจุแบตเตอรี่ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino

Mega) 2 ตัว เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่ สามารถแบ่งการออกแบบวงจรได้ดังนี้

### 3.7.2.1 การออกแบบวงจร Arduino Mega 1

Arduino Mega 1 มีหน้าที่ในควบคุมไอจีบีทีของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ และควบคุมไอจีบีทีของวงจรปรับขนาดโหลดความต้านทาน

- Arduino Digital Port 5 (PE3): สำหรับอ่านค่าจาก Micro SD Card
- Arduino Digital Port 9 (PH6): สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที 1 โดยการส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ด้วยความถี่สวิดซิ่ง 400 Hz
- Arduino Digital Port 10 (PB4): สำหรับส่งสัญญาณไฟ LED แสดงสถานะของ Micro SD Card
- Arduino Digital Port 11 (PB5): สำหรับส่งสัญญาณไฟ LED แสดงสถานะในโหมดการทำงานแบบสวิดซิ่ง
- Arduino Digital Port 12 (PB6): สำหรับส่งสัญญาณไฟ LED แสดงสถานะในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 24 (PA2): สำหรับส่งสัญญาณไปยัง Arduino Mega 2 เพื่อทำงานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 33 (PC4): สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที 3 เพื่อปรับขนาดโหลดความต้านทานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 35 (PC2): สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที 4 เพื่อปรับขนาดโหลดความต้านทานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 37 (PC0): สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที 5 เพื่อปรับขนาดโหลดความต้านทานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 38 (PD7): สำหรับส่งสัญญาณไปยัง Arduino Mega 2 เพื่อทำงานในโหมดการทำงานแบบสวิดซิ่ง
- Arduino Digital Port 39 (PG2): สำหรับควบคุมวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมไอจีบีที 6 เพื่อปรับขนาดโหลดความต้านทานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น

- Arduino Digital Port 40 (PG1): สำหรับรับสัญญาณจาก Arduino Mega 2 เมื่อพร้อมเริ่มทำงาน
- Arduino Digital Port 41 (PG0): สำหรับควบคุมวงจรขั้วเกดที่จะควบคุมไอจีบีที 7 เพื่อปรับขนาดโหลดความต้านทานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น

### 3.7.2.2 การออกแบบวงจร Arduino Mega 2

Arduino Mega 2 มีหน้าที่ในควบคุมไอจีบีทีที่ขนาดของโหลดขณะทำงานโหมดสวิตชิง

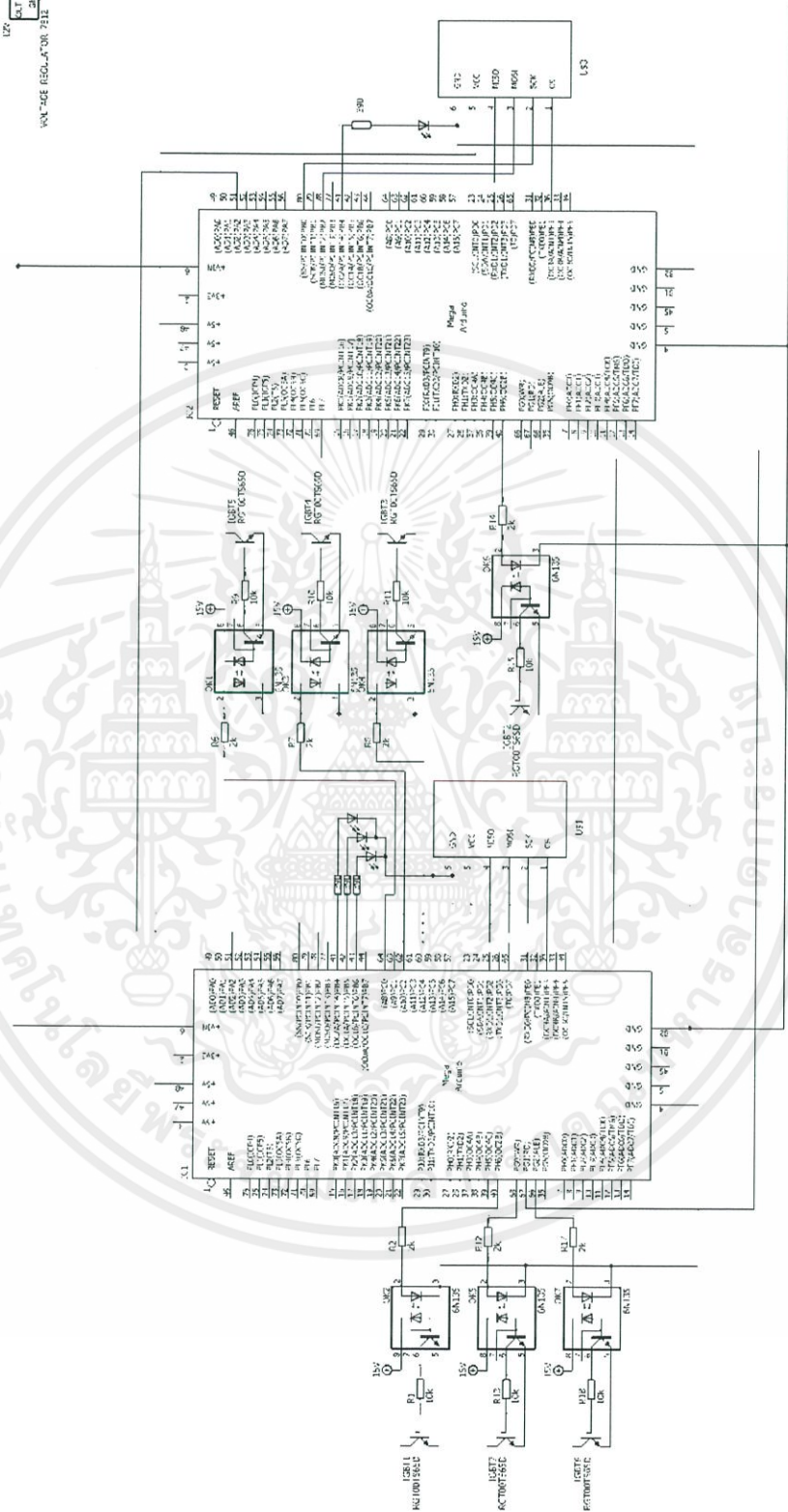
- Arduino Digital Port 5 (PE3): สำหรับอ่านค่าจาก Micro SD Card
- Arduino Digital Port 9 (PH6): สำหรับควบคุมวงจรขั้วเกดที่จะควบคุมไอจีบีที 2 โดยการส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ควบคุมขนาดโหลดขณะทำงานโหมดสวิตชิงด้วยความถี่สวิตชิง 400 Hz
- Arduino Digital Port 10 (PB4): สำหรับส่งสัญญาณไฟ LED แสดงสถานะของ Micro SD Card
- Arduino Digital Port 24 (PA2): สำหรับรับสัญญาณจาก Arduino Mega 1 เพื่อทำงานในโหมดการทำงานแบบเชิงเส้น
- Arduino Digital Port 40 (PG1): สำหรับส่งสัญญาณไปยัง Arduino Mega 1 เมื่อพร้อมเริ่มทำงาน
- Arduino Digital Port 42 (PL7): สำหรับรับสัญญาณจาก Arduino Mega 2 เพื่อทำงานในโหมดการทำงานแบบสวิตชิง

การเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ถูกแสดงเป็นภาพโดยรวมการต่อวงจรดังรูปที่

3.18 เพื่อแสดงให้เห็นภาพรวมของวงจรประจุแบตเตอรี่ทั้งหมด

15

VOL-TAGE REGULATOR 7812



รูปที่ 3.18 Schematic Diagram ของวงจรควบคุมวงจรประจุแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 4.1 การทดสอบเบื้องต้นเครื่องมือวัดติดตั้งโพล์คลิฟท์ไฟฟ้า

สำหรับเครื่องมือวัดโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าติดตั้งที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริง จำกัด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยมีการทดสอบเบื้องต้นที่สถานที่ติดตั้งจริง 4 สัปดาห์ก่อนการติดตั้ง โดยการทดสอบเบื้องต้นทำดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบสภาพอุณหภูมิและความชื้นบริเวณที่ติดตั้งจริง
2. พื้นที่และขนาดที่มีในการติดตั้งกล่องเครื่องมือวัด
3. แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดของแบตเตอรี่โพล์คลิฟท์
4. ขนาดของมอเตอร์ในโพล์คลิฟท์เพื่อทำการคำนวณกระแสสูงสุดที่ใช้ เพื่อเลือกขนาดของหม้อแปลงกระแส โดยในโพล์คลิฟท์จะประกอบไปด้วยมอเตอร์ทั้งหมดสามตัว

โดยโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าที่ติดตั้งจริงจะเป็นรูปที่ 4.1 และบริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือวัดจะเป็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รถโพล์คลิฟท์ที่จะติดตั้ง

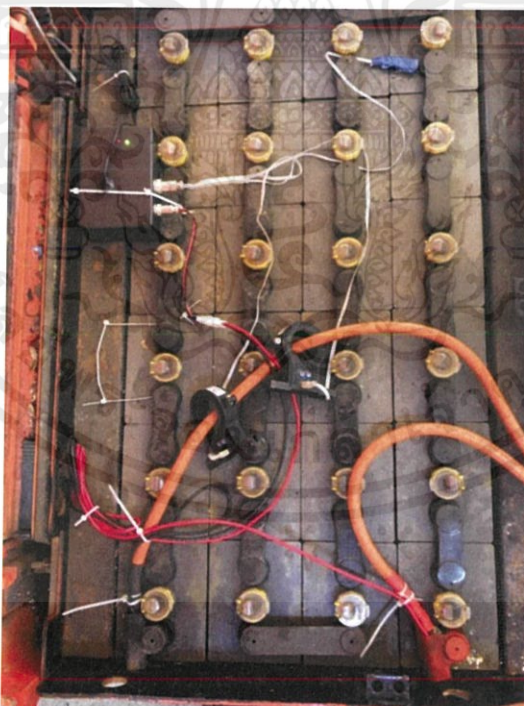


รูปที่ 4.2 บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือวัด

#### 4.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดโพล์คลิฟท์ไฟฟ้า

##### 4.2.1 การติดตั้งเครื่องมือวัด

การติดตั้งจริงจะติดตั้งเครื่องมือวัดกับโพล์คลิฟท์ และใช้เวลาเก็บข้อมูล 4 สัปดาห์โดยเก็บข้อมูลบรรจุใน MicroSD และ ThingSpeak โดยใช้ ThingSpeak เป็นการตรวจสอบระยะไกล รูปการติดตั้งจริงเป็นดังรูปที่ 4.3

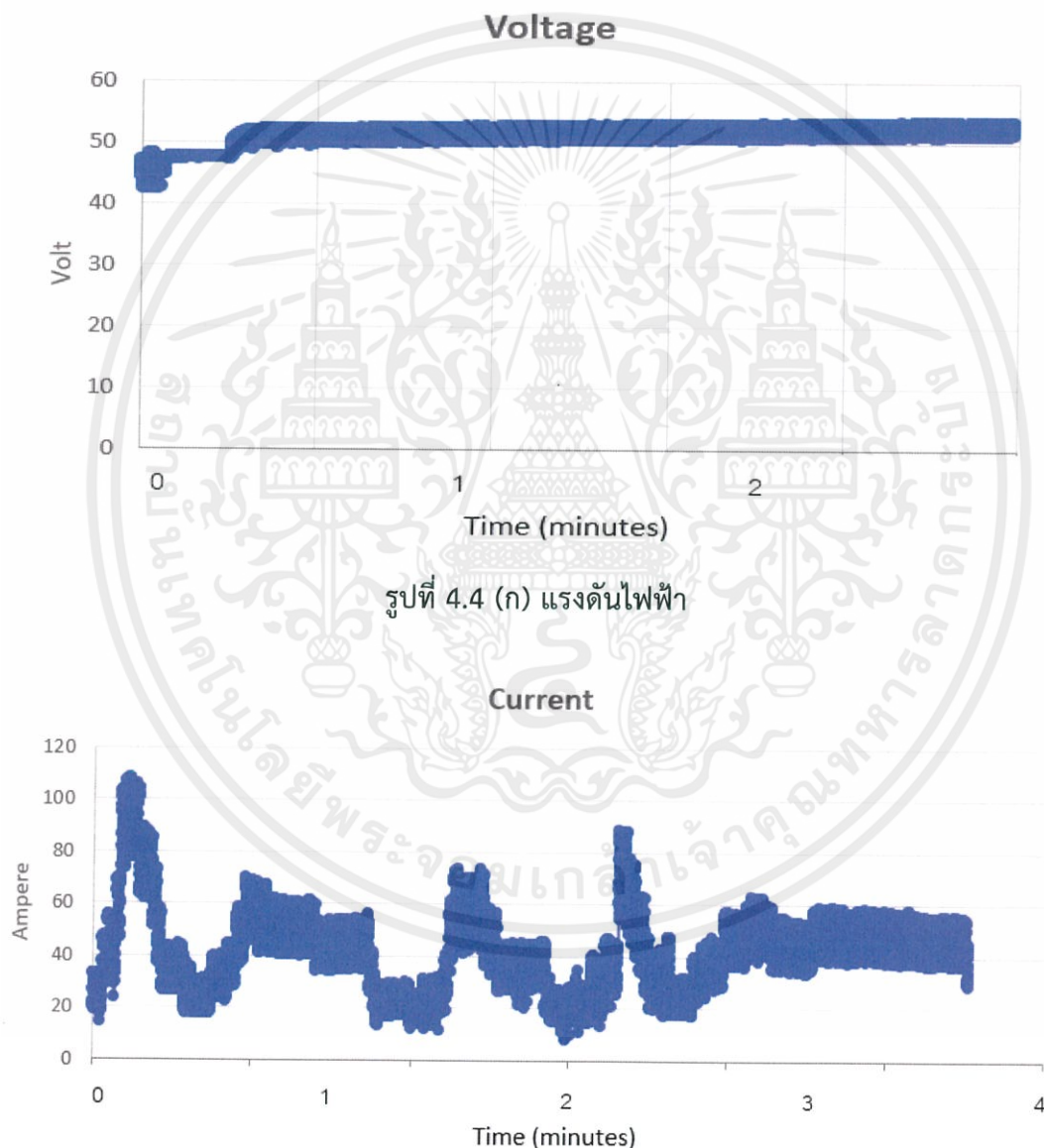


รูปที่ 4.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

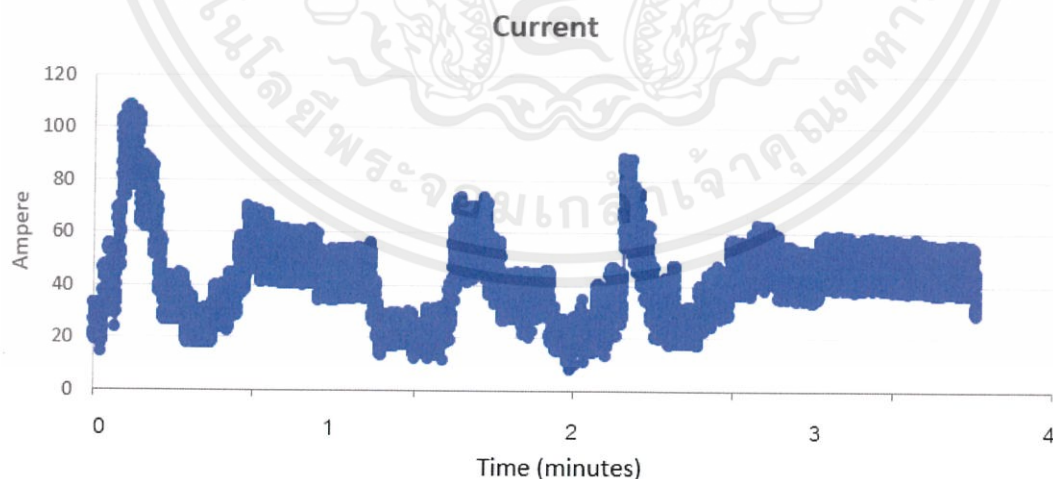
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลลัพธ์จากการติดตั้งเครื่องมือวัด

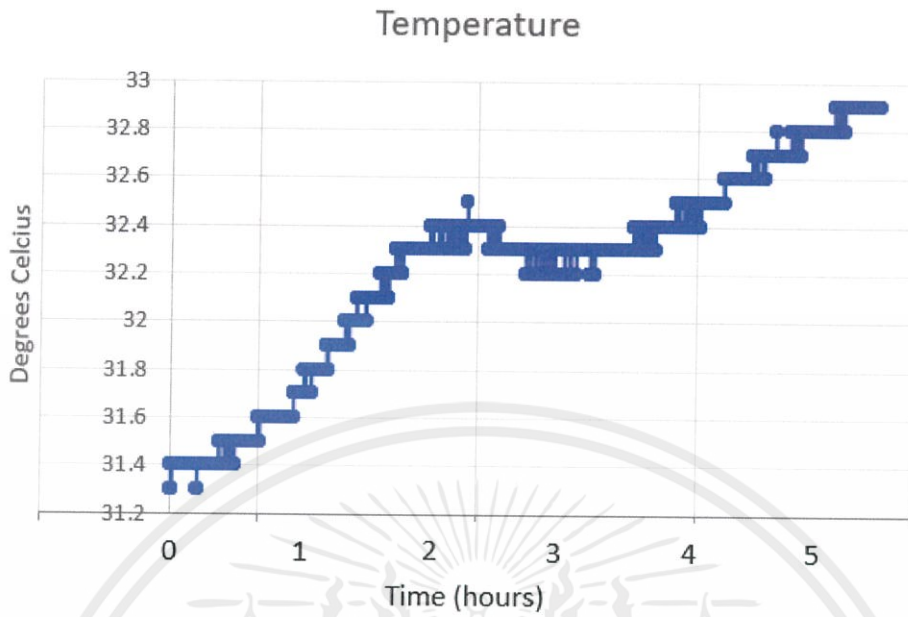
ผลลัพธ์ที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัด พารามิเตอร์สี่พารามิเตอร์ คือแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิ, และความชื้น ถูกเก็บข้อมูลภายใน MicroSD ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ตรวจวัดได้ของเครื่องมือวัดติดตั้งไฟล์คลิกไฟฟ้าจะมีการบันทึกในรูปแบบไฟล์ข้อมูลชนิด Comma separated value (CSV) ซึ่งสามารถเปิดไฟล์ข้อมูลนี้ได้ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยสามารถแสดงข้อมูลผลการทดสอบ พล็อตตัวอย่างจากข้อมูลที่เก็บมาบางส่วนได้ดังรูปที่ 4.4 (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแส (ค) อุณหภูมิ (ง) ความชื้น



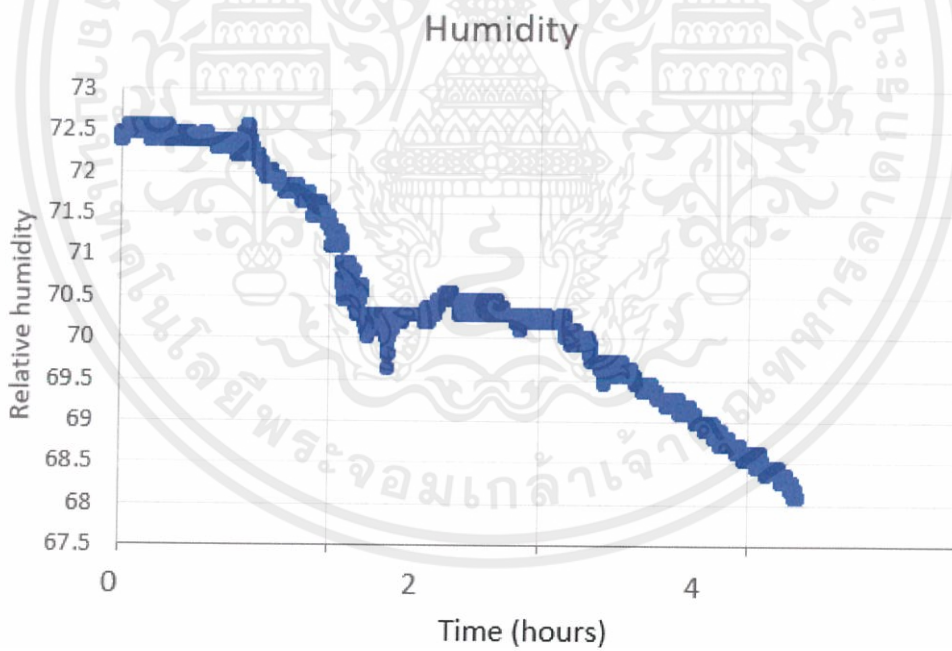
รูปที่ 4.4 (ก) แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 (ข) กระแสไฟฟ้า

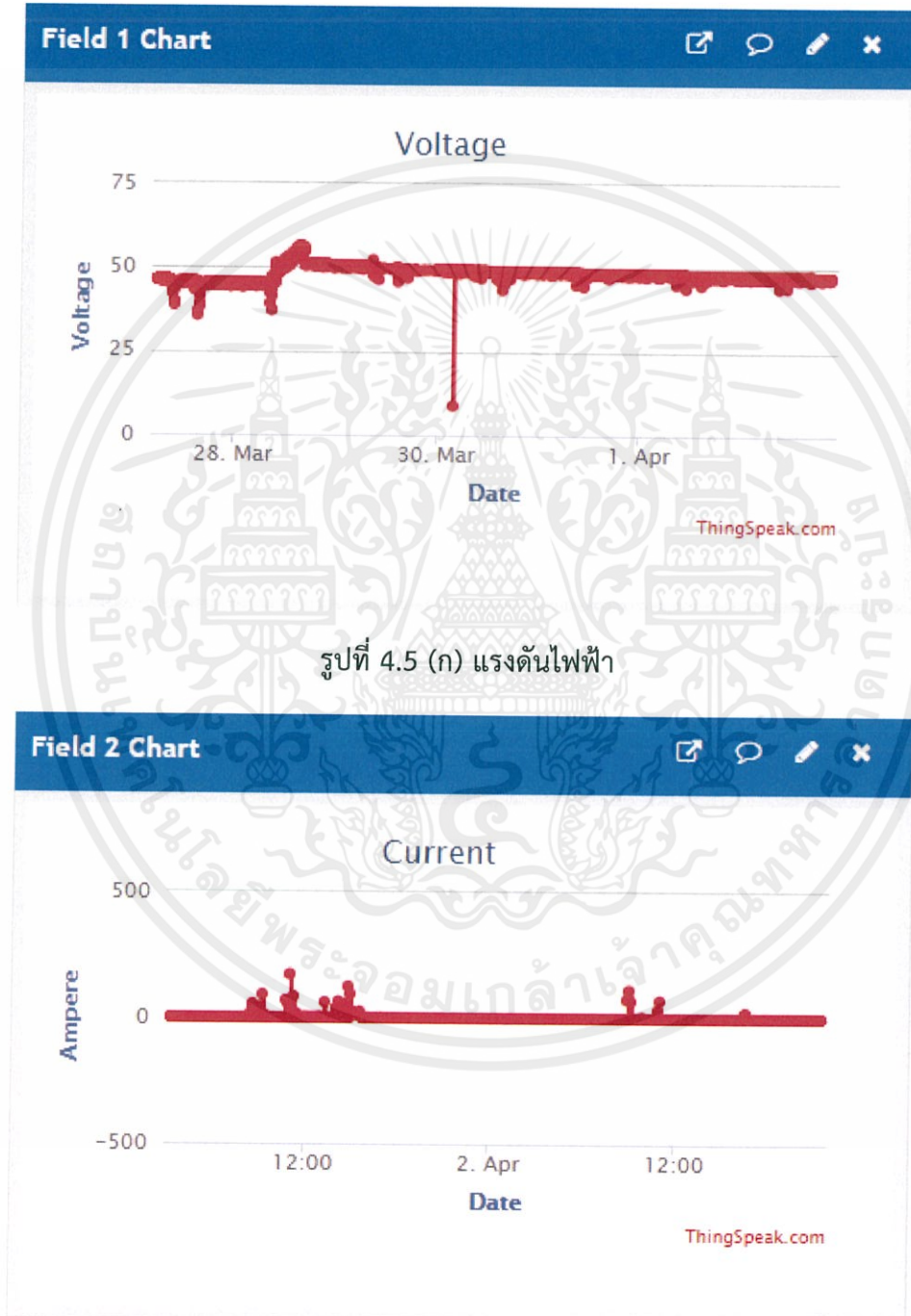


รูปที่ 4.4 (ค) อุณหภูมิ



#### 4.2.3 ผลลัพธ์การแสดงผลบน ThingSpeak

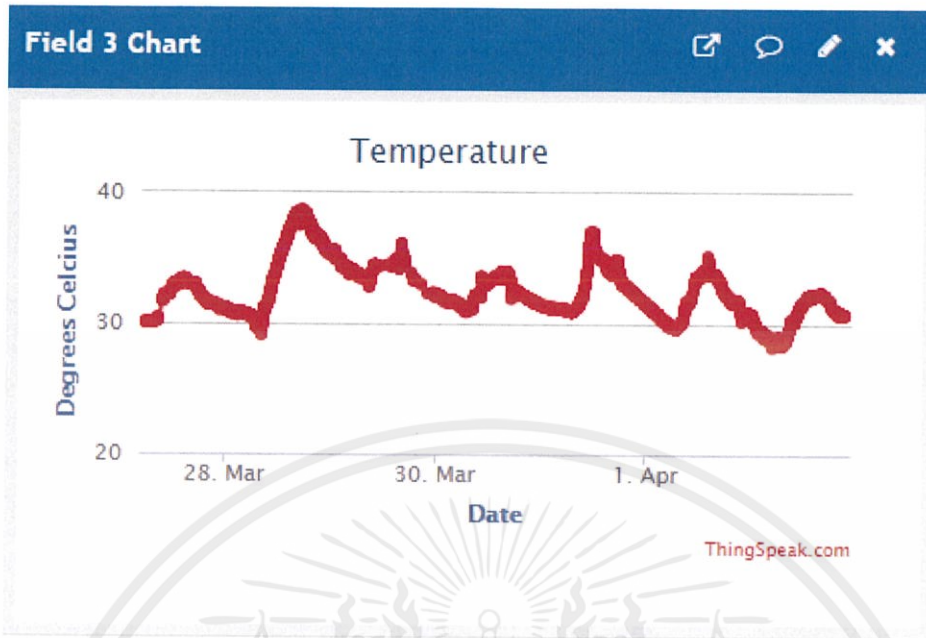
สำหรับการแสดงผลบน ThingSpeak platform นั้นจะแสดงผลในรูปแบบของกราฟของข้อมูลเทียบกับเวลา ในรูปของ ระยะเวลาปัจจุบัน สามารถแสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆบนเตียงประกอบได้ดังรูปที่ 4.5 (ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแส (ค) อุณหภูมิ (ง) ความชื้น



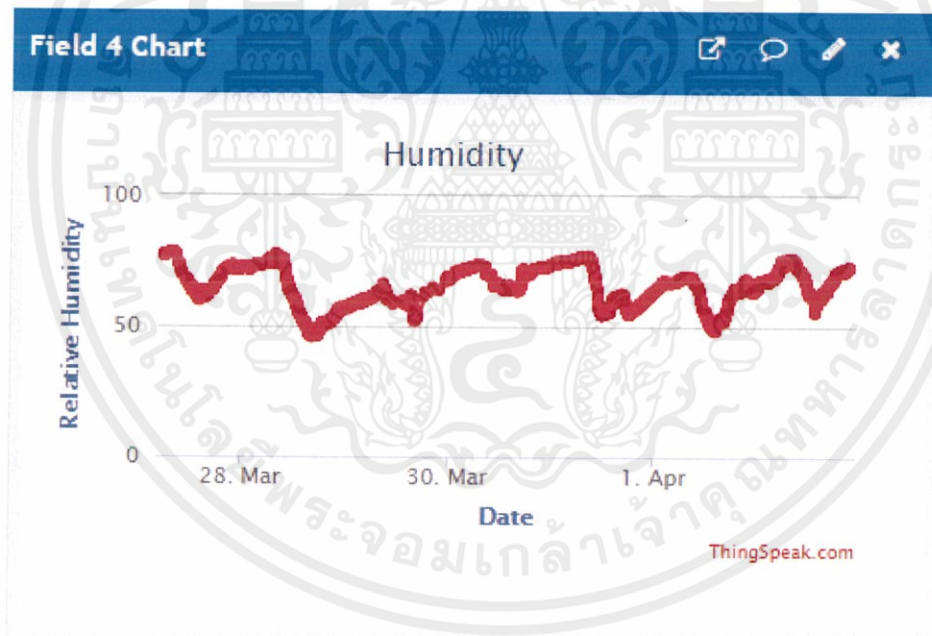
รูปที่ 4.5 (ก) แรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 (ข) กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ค) อุณหภูมิ

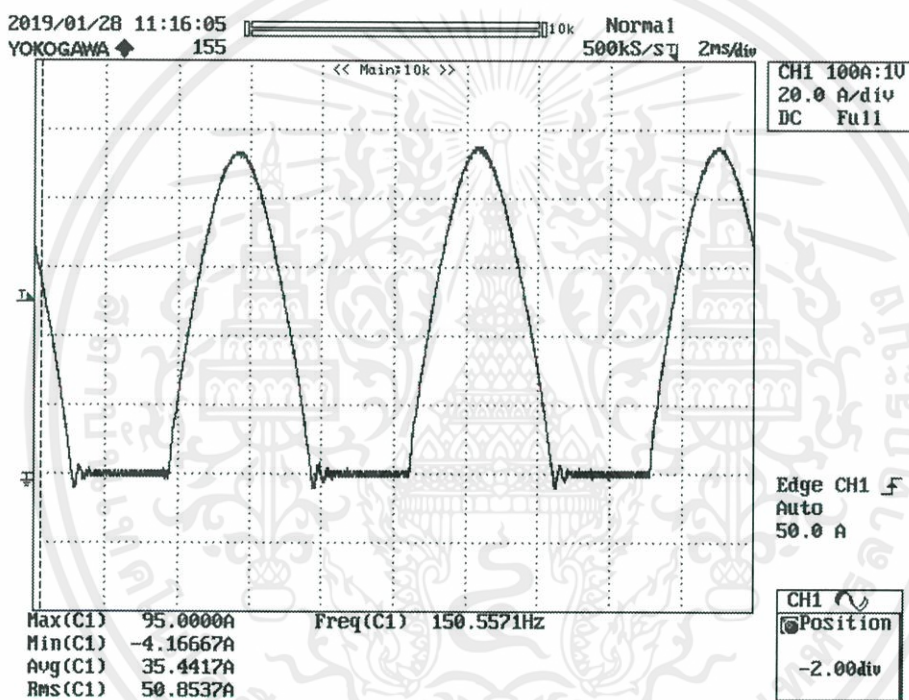


รูปที่ 4.5 (ง) ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วงจรประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ

จากการทดสอบเบื้องต้นที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ทางผู้จัดทำได้ทำการเก็บภาพกระแสไฟฟ้าขณะประจุแบตเตอรี่ของเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ได้ภาพดังรูปที่ 4.5 จากเครื่องมือวัดโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าที่ทำติดตั้งที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ได้ทำการเก็บข้อมูล 4 พารามิเตอร์ พารามิเตอร์กระแสเมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟจะสามารถกระแสของการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ได้ โดยเมื่อวิเคราะห์การประจุแบตเตอรี่จากต้นแบบจะทราบได้ว่าต้นแบบประจุแบตเตอรี่แบบใด



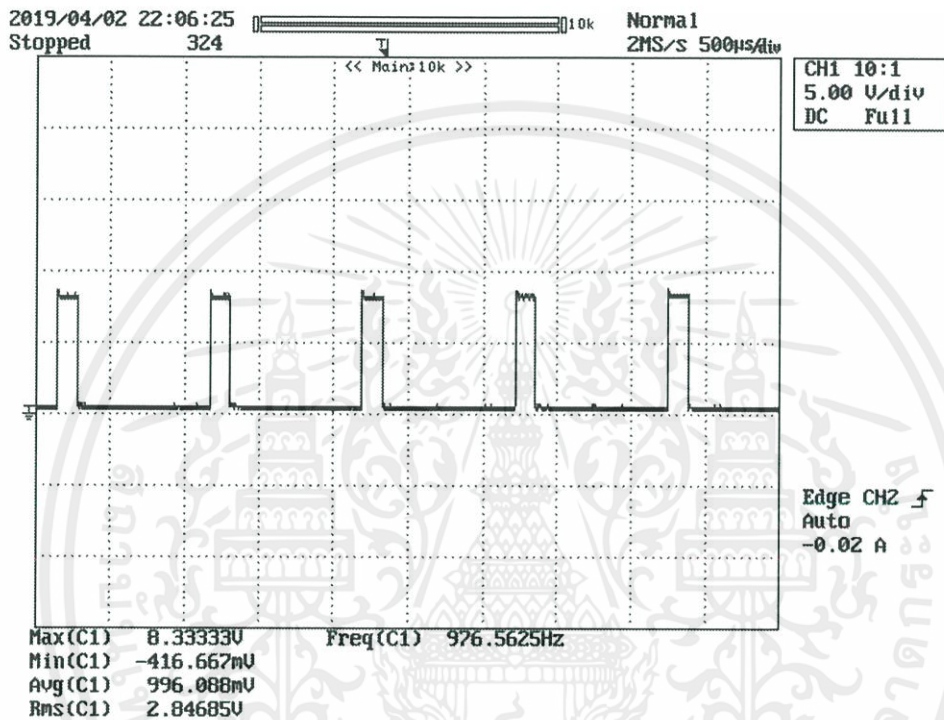
รูปที่ 4.6 กระแสวงจรประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ

### 4.4 การทดสอบวงจรประจุแบตเตอรี่

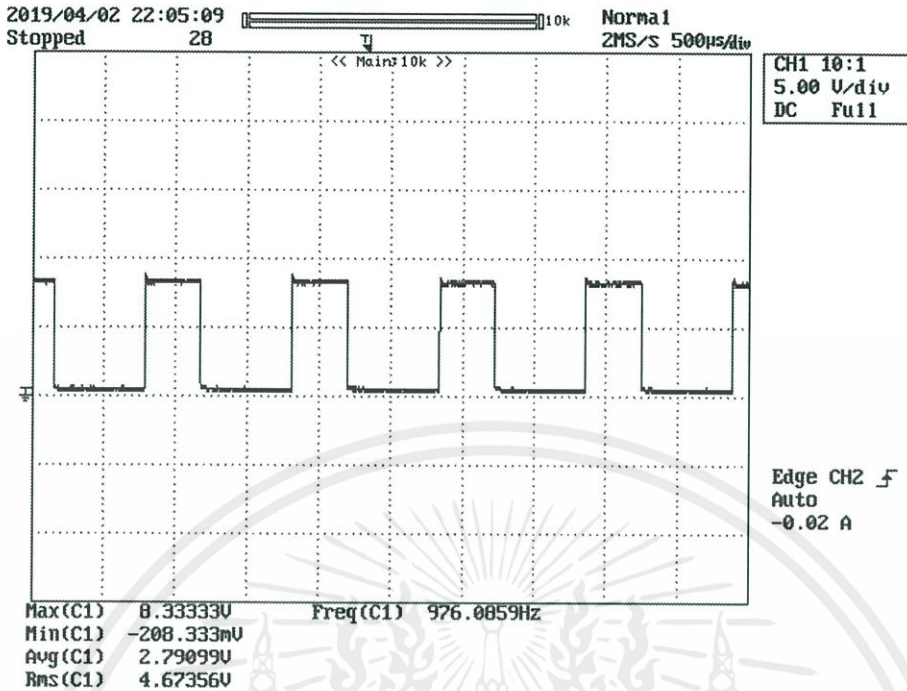
วงจรถประจุแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยห้าส่วนสำคัญคือ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น วงจรกรองความถี่เรโซแนนซ์และ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นโดยในวงจรทั้งหมดจะประกอบไปด้วยไอซีบีทีทั้งหมด 3 ตัว

#### 4.4.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

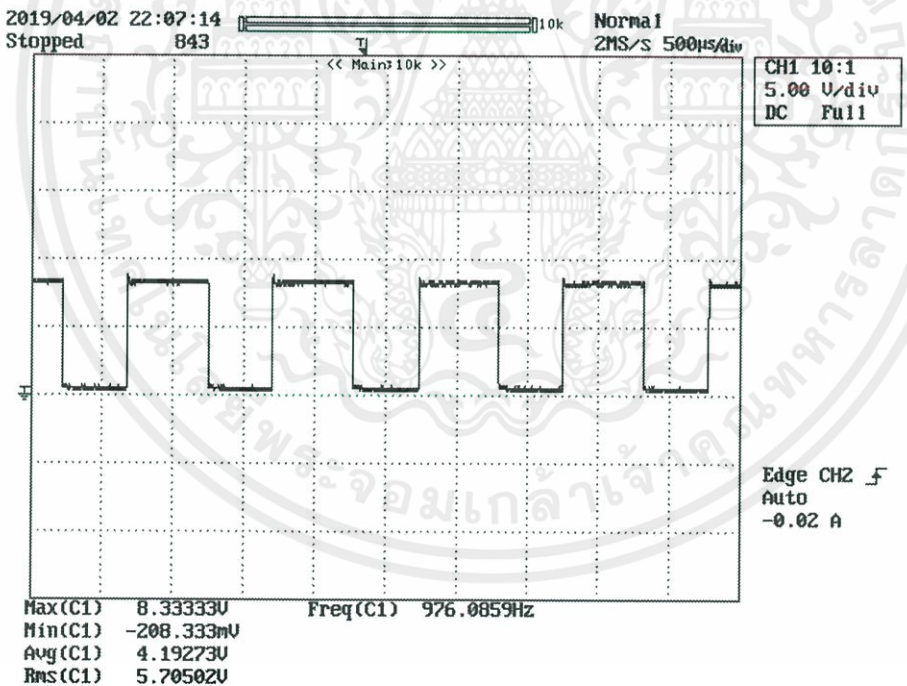
วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ใช้ไอจีบีที 1 ตัว ส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิทัลปรับ duty cycle ได้ ควบคุมวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ด้วยความถี่สวิทซ์ 1 kHz โดยสัญญาณแรงดันจากตัวขับเคลื่อนเข้าไอจีบีทีจะเป็นดังรูปที่ 4.7 (ก) duty cycle 10 % (ข) duty cycle 30 % (ค) duty cycle 50 % (ง) duty cycle 70 % (จ) duty cycle 90 %



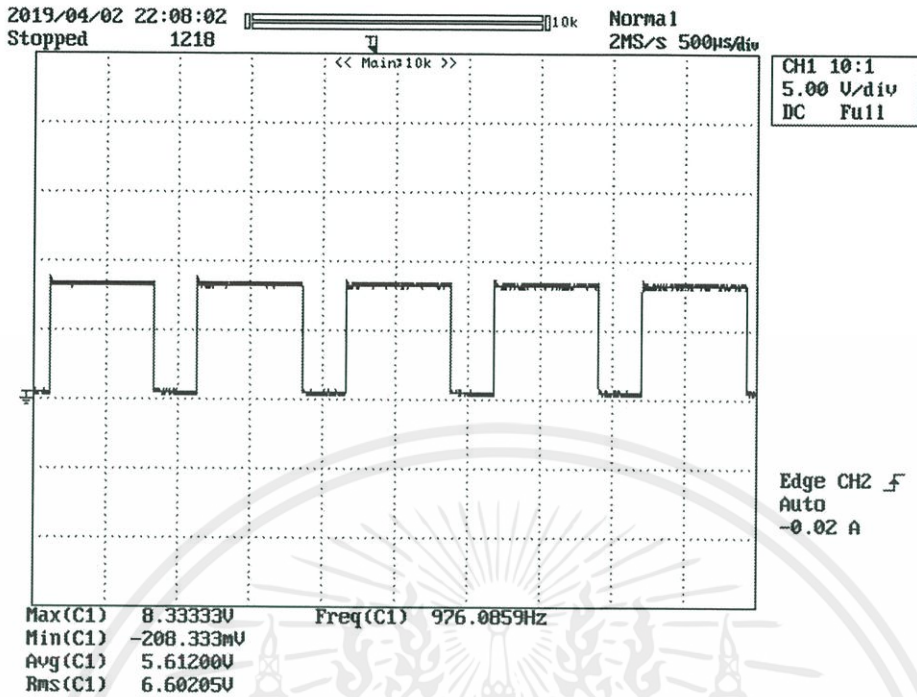
รูปที่ 4.7 (ก) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 10 %



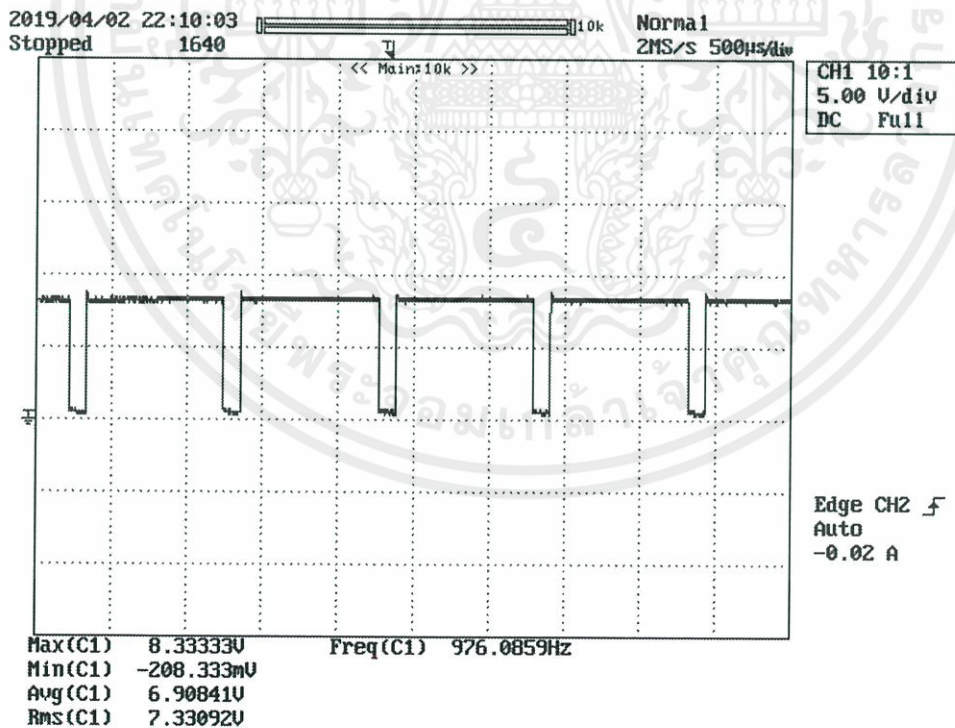
รูปที่ 4.7 (ข) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 30 %



รูปที่ 4.7 (ค) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 50 %



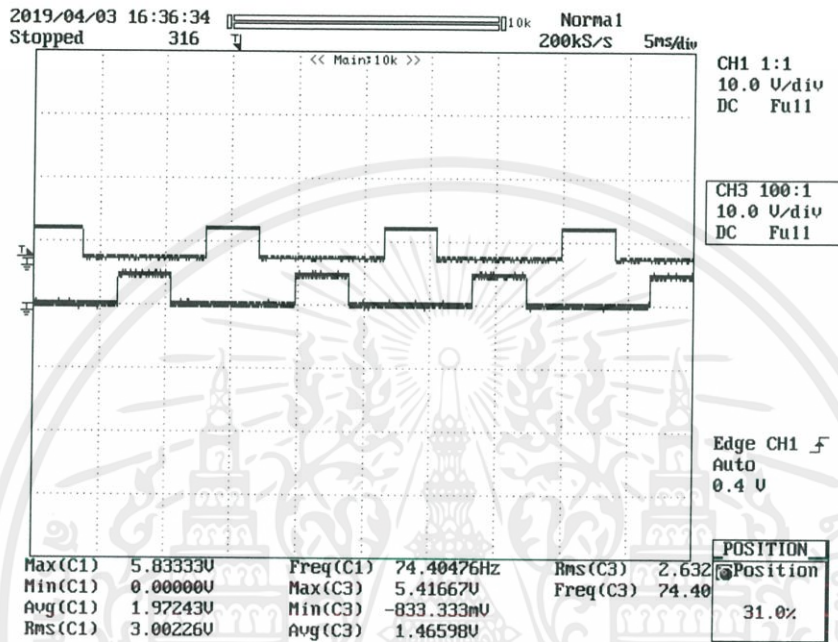
รูปที่ 4.7 (ง) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 70 %



รูปที่ 4.7 (จ) สัญญาณแรงดันตัวขับเคลื่อน duty cycle 90 %

#### 4.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น

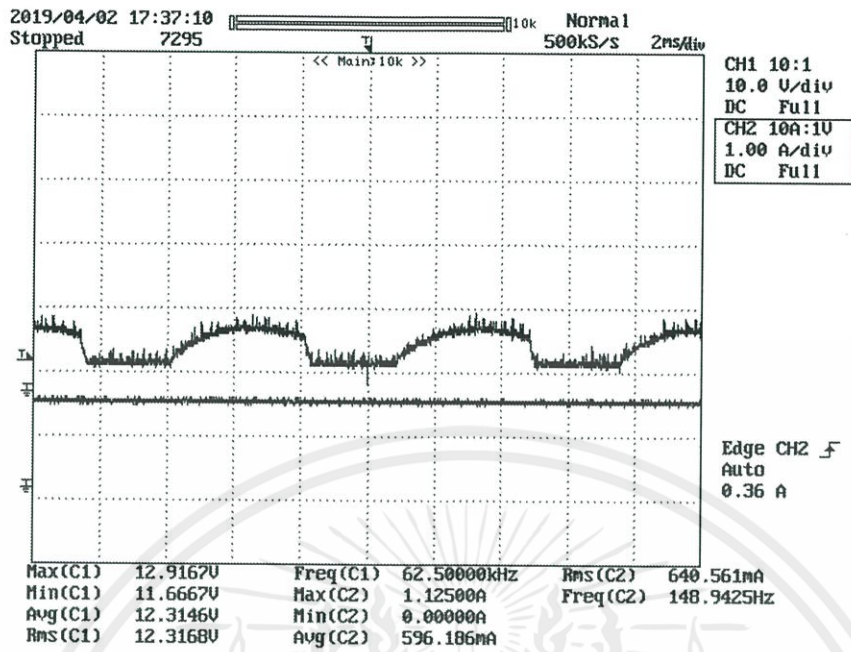
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่นใช้ไอจีบีที 2 ตัว ส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิทัล โดยสัญญาณแรงดันจากตัวขับเคลื่อนเข้าไอจีบีทีทั้งสองตัวจะสลับกันทำงาน โดยไอจีบีทีหนึ่งตัวจะทำงานที่ความถี่ 75 Hz และเมื่อทำงานสลับกันจะได้จะเป็นสัญญาณเอาต์พุต 150 Hz ตามเครื่องประจุแบตเตอรี่ สัญญาณควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 4.8



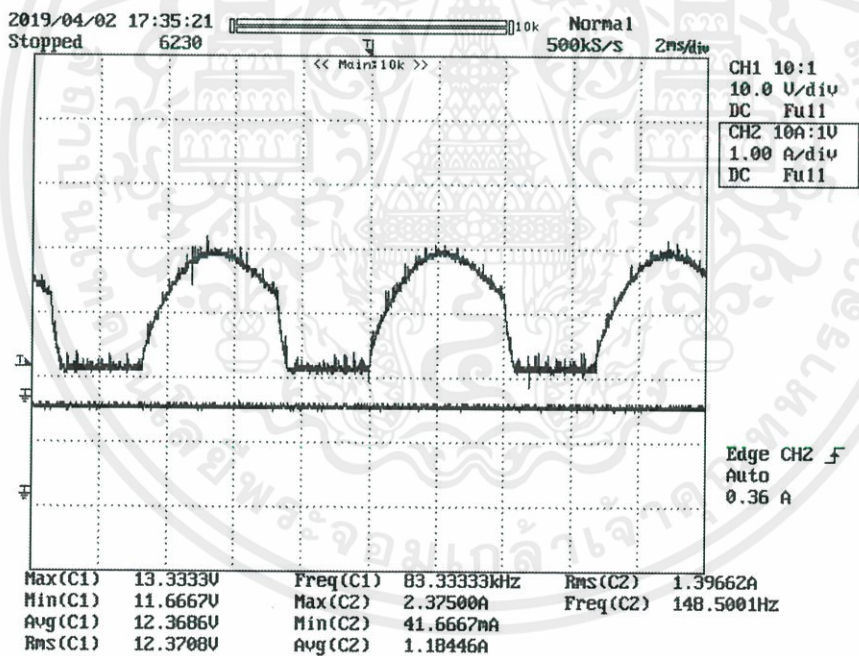
รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุมวงจรมอเตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น

#### 4.4.3 การทดสอบวงจรประจุแบตเตอรี่กับโหลดแบตเตอรี่

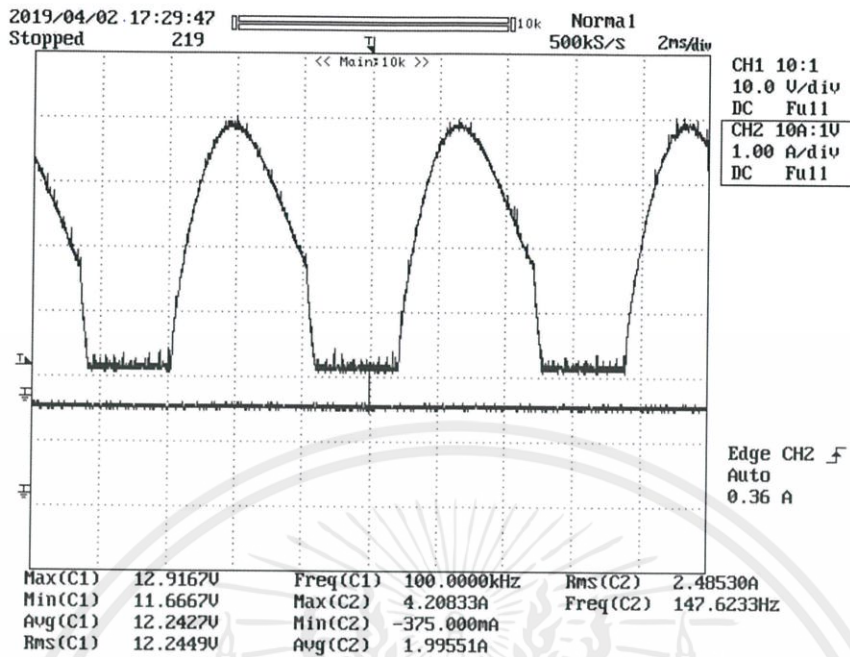
เมื่อต่อวงจรประจุแบตเตอรี่เข้ากับโหลดแบตเตอรี่การทำงานให้ได้กระแสเอาต์พุต 150 Hz วงจรรองความถี่เรโซแนนซ์เพื่อรองความถี่ และวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นเพื่อให้กระแสเป็นกระแสตรง ขนาดของกระแสประจุแบตเตอรี่สามารถควบคุมจากการปรับ duty cycle ของวงจรถูกทอดระดับแรงดันแบบบักกั้ได้ดังรูปที่ 4.9 (ก) duty cycle 10 % (ข) duty cycle 50 % (ค) duty cycle 90 %



รูปที่ 4.9 (ก) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 10 %



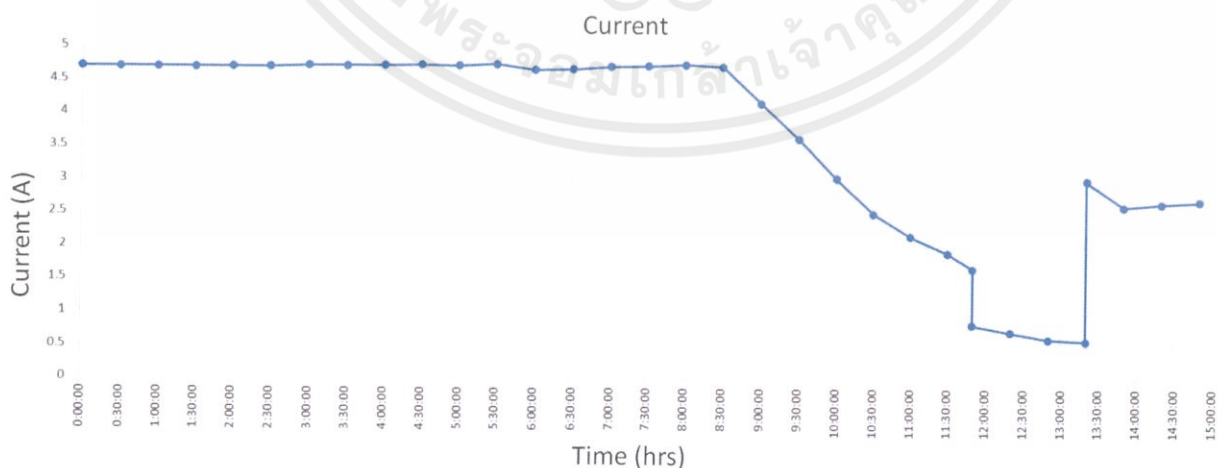
รูปที่ 4.9 (ข) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 50 %



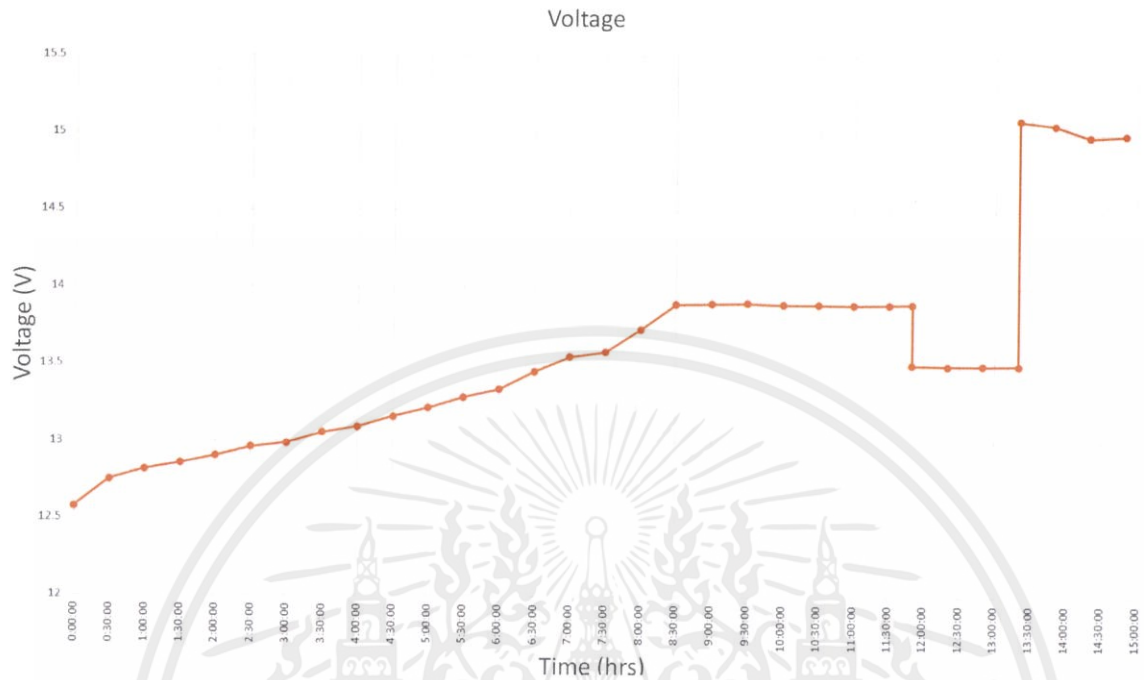
รูปที่ 4.9 (ค) กระแสประจุแบตเตอรี่ duty cycle 90 %

ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าขนาดกระแสสามารถควบคุมได้จากการปรับ Duty Cycle ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

ในการประจุแบตเตอรี่จริงโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าใช้แบตเตอรี่ขนาด 380 Ah แต่ทางคณะผู้จัดทำใช้แบตเตอรี่ขนาด 50 Ah และใช้การประจุแบบเทียบเท่า C ใช้แบ่งช่วงการประจุแบตเตอรี่เป็น 4 ระดับคือประจุกระแสคงที่ ประจุแรงดันคงที่ Float Charge และ Equalizing Charge ตามลำดับโดยแบ่งตามระดับแรงดันของแบตเตอรี่เวลาที่ประจุ และเมื่อประจุแบตเตอรี่ขนาดกระแส C เทียบเท่าแบตเตอรี่ 380 Ah ที่ 50 Ah จะได้ขนาดกระแสแต่ละระดับตามรูปที่ 4.10 และขนาดแรงดันแต่ละระดับตามรูปที่ 4.11



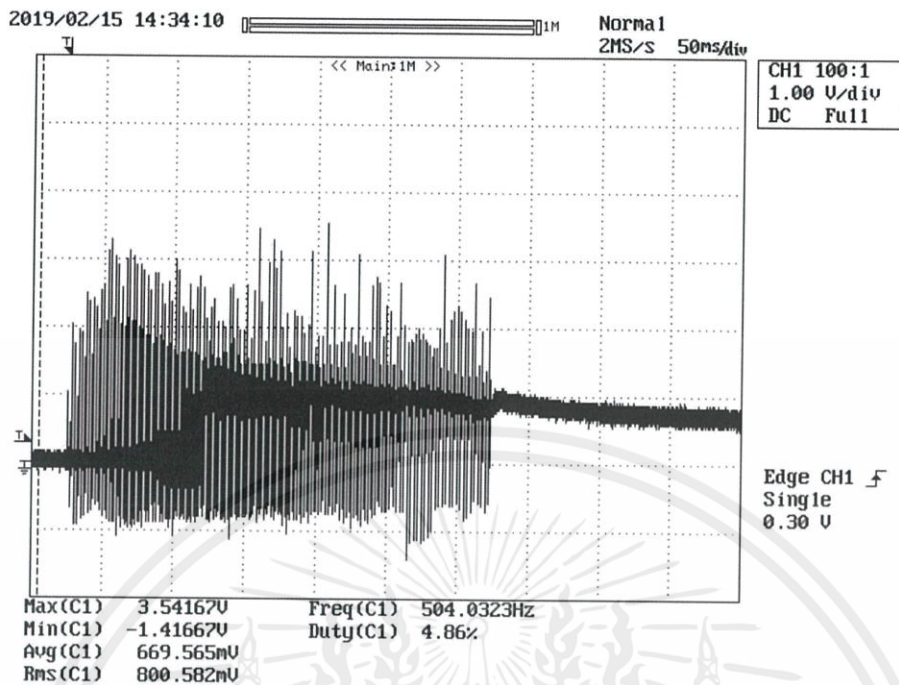
รูปที่ 4.10 กระแสแบตเตอรี่ขณะประจุด้วยเครื่องประจุแบตเตอรี่จำลอง



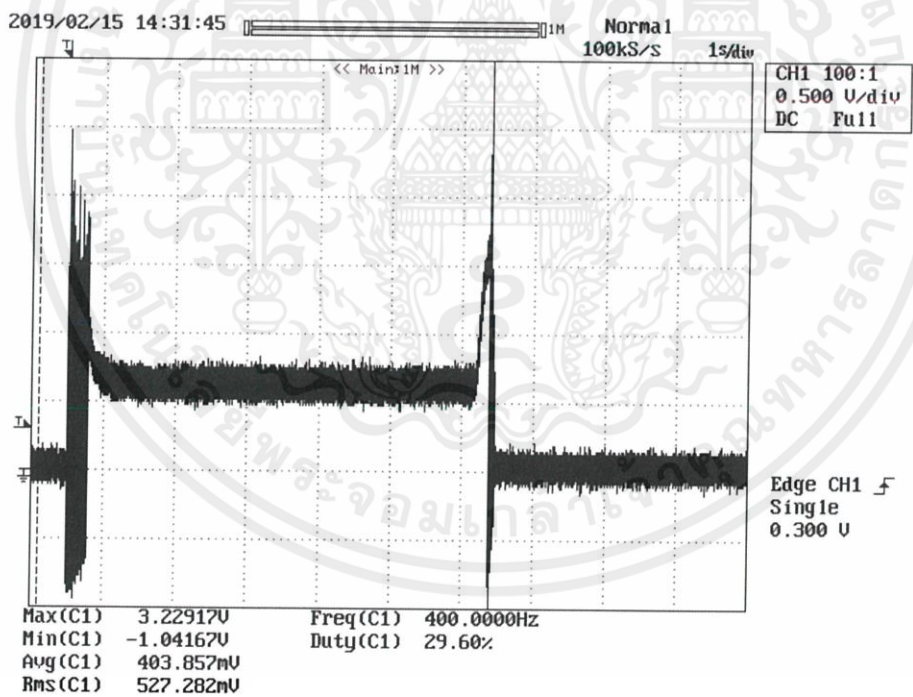
รูปที่ 4.11 แรงดันแบตเตอรี่ขณะประจุด้วยเครื่องประจุแบตเตอรี่จำลอง

#### 4.5 การคายประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ

จากการทดสอบเบื้องต้นที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ทางผู้จัดทำได้ทำการเก็บภาพกระแสไฟฟ้าขณะคายประจุแบตเตอรี่ขณะโพล์คลิฟท์ไฟฟ้ากำลังทำงาน โดยเก็บภาพในช่วงมอเตอร์เริ่มสตาร์ทและช่วงกระแสการทำงานโพล์คลิฟท์ไฟฟ้า ได้ภาพดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



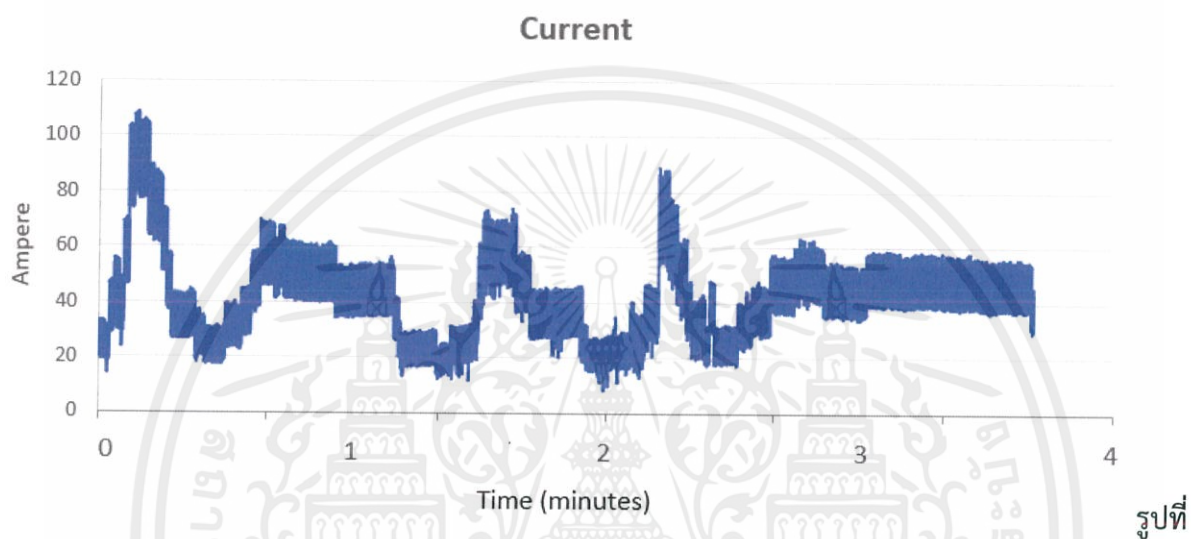
รูปที่ 4.12 กระแสช่วงมอเตอร์สตาร์ท



รูปที่ 4.13 กระแสการทำงานโพล์คลิฟท์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเครื่องมือวัดโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าที่ติดตั้งที่ บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริง จำกัด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ได้ทำการเก็บข้อมูล 4 พารามิเตอร์ พารามิเตอร์กระแสเมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟจะสามารถเห็นกระแสของการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ได้ โดยเมื่อวิเคราะห์การใช้งานของโพล์คลิฟท์ไฟฟ้าผ่านการดูข้อมูลกระแสและแรงดันก็สามารถทราบพฤติกรรมการใช้งานที่มีรูปแบบได้ ทางผู้จัดทำจึงได้เลือกช่วงการใช้งานช่วงหนึ่งเพื่อมาทำการสร้างวงจรคายประจุแบตเตอรี่จำลองตามข้อมูลจากเครื่องมือวัด เลือกช่วงกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ช่วงกระแสคายประจุต้นแบบจากเครื่องมือวัด

#### 4.6 การทดสอบวงจรคายประจุแบตเตอรี่

เมื่อเลือกช่วงการคายประจุแบตเตอรี่ได้จึงทำการออกแบบวงจรคายประจุแบตเตอรี่ โดยวงจรคายประจุแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยสามส่วนสำคัญคือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ ไอจีบีที และโหลดความต้านทานที่มีการเปลี่ยนขนาดจากการสวิตซ์ของไอจีบีทีโดยใช้ไอจีบีที 5 ตัว

##### 4.6.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ใช้ไอจีบีที 1 ตัว ส่งเป็นสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลปรับ duty cycle ได้ ควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ด้วยความถี่สวิตซ์ 400 Hz โดยสัญญาณแรงดันจากตัวขับเคลื่อนเข้า ไอจีบีที

##### 4.6.2 ไอจีบีที

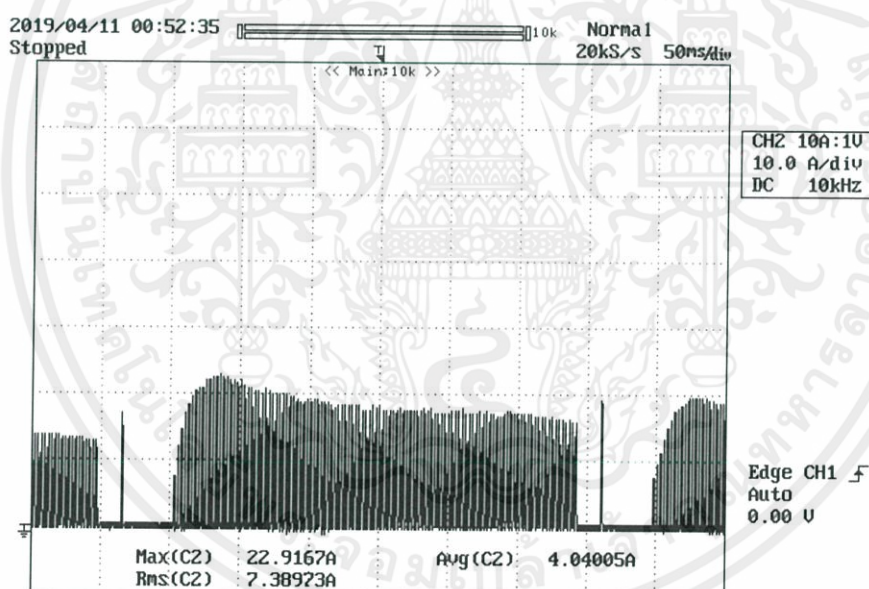
ไอจีบีที (IGBT) ทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าคร่อมโพลดิโอดขณะทำงานโหมดสวิตชิง เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่อย่างถูกต้อง โดยสัญญาณแรงดันจากตัวขับเคลื่อนเข้าไอจีบีที

#### 4.6.3 โหลดความต้านทาน

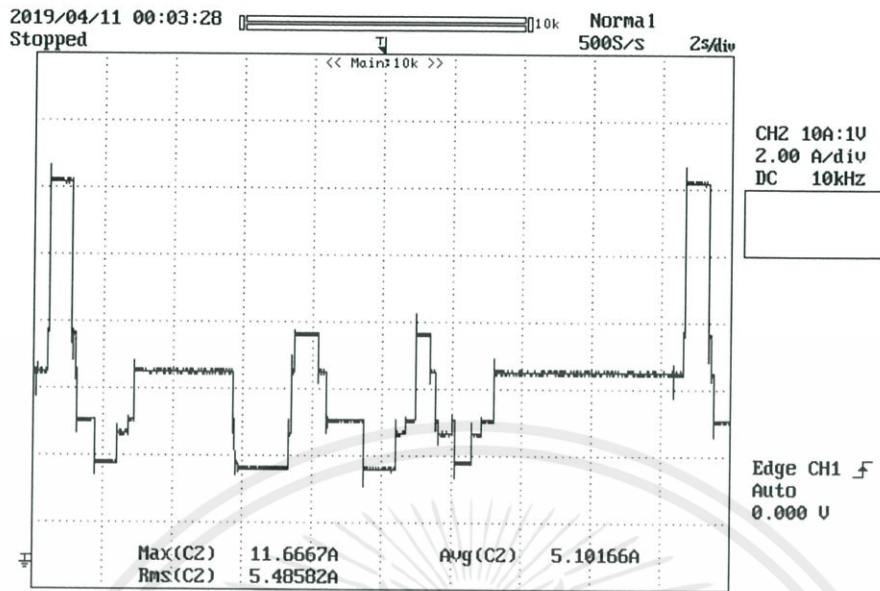
โหลดความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้จากการสวิตชิงของไอจีบีทีโดยใช้ไอจีบีที 5 ตัว

#### 4.6.4 การทดสอบวงจรคายประจุแบตเตอรี่กับโหลดความต้านทาน

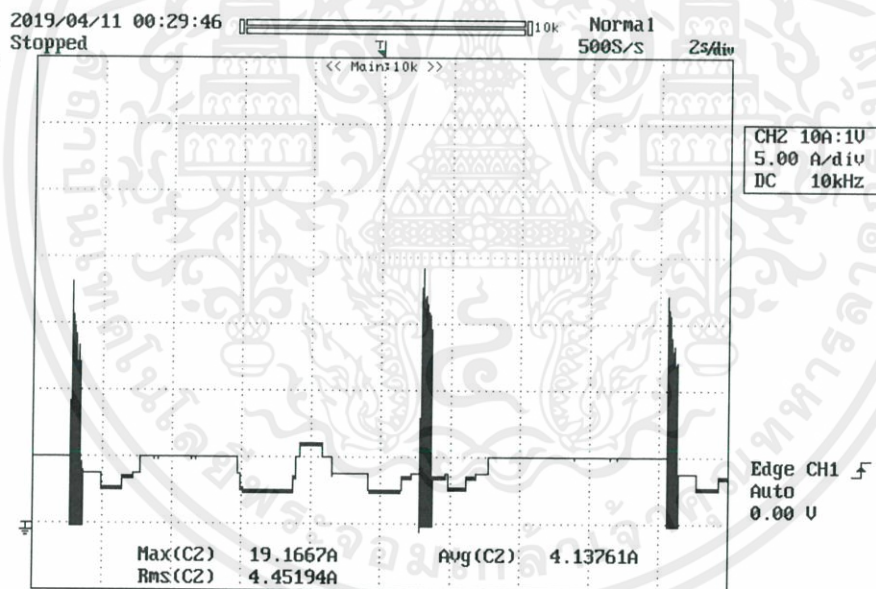
เมื่อประกอบวงจรคายประจุแบตเตอรี่เข้ากับวงจรโหลดความต้านทาน โดยแบ่งช่วงของกระแสเป็นช่วงการสวิตชิงและช่วงเชิงเส้น ช่วงการสวิตชิงเกิดจากช่วงตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ทำงานตอนเริ่มสตาร์ทโดยมีความถี่สวิตชิง 400 Hz และช่วงเชิงเส้นเกิดในช่วงกระแสมอเตอร์คงตัว โดยแสดงกระแสจำลองช่วงสวิตชิงได้ดังรูปที่ 4.15 กระแสจำลองช่วงเชิงเส้นดังรูปที่ 4.16 และรูปกระแสคายประจุจำลองของแบตเตอรี่ทั้งหมดดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 กระแสจำลองช่วงสวิตชิงจากตัวขับเคลื่อนมอเตอร์

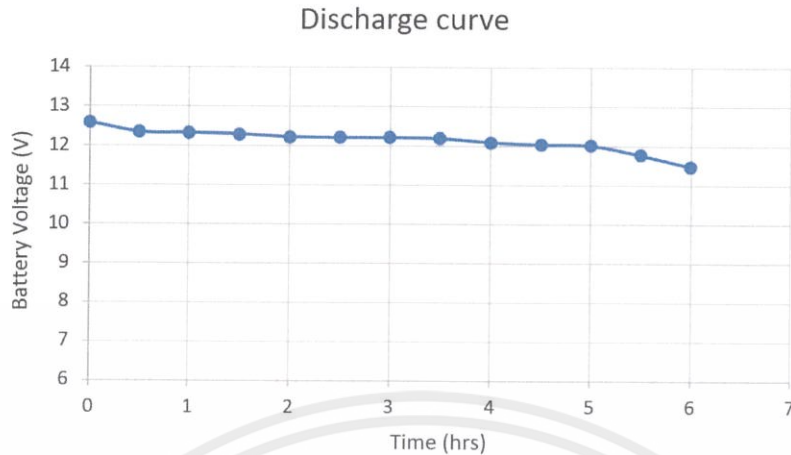


รูปที่ 4.16 กระแสจำลองช่วงเชิงเส้น



รูปที่ 4.17 กระแสคายประจุจำลองแบตเตอรี่

โดยในรูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นการจำลองช่วงกระแสคายประจุต้นแบบจากเครื่องวัดในรูปที่ 4.15 ซึ่งจะมีช่วงตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ทำงานตอนเริ่มสตาร์ท สลับกับช่วงเชิงเส้น



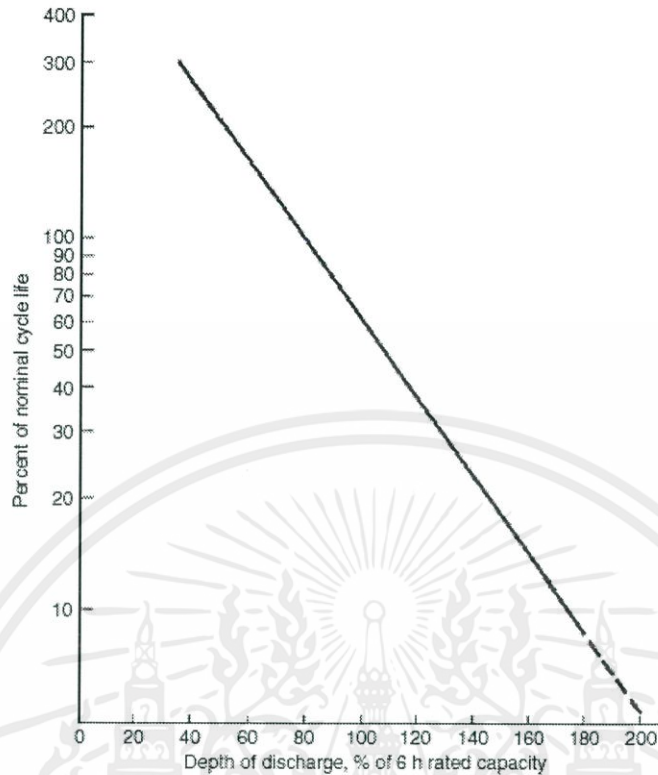
รูปที่ 4.18 แรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุที่เวลาต่างๆ

เมื่อทดสอบวงจรคายประจุแบตเตอรี่กับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 50Ah กับช่วงกระแสคายประจุต้นแบบจากเครื่องวัดตามรูปที่ 4.15 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แรงดันแบตเตอรี่ที่เวลาต่างๆเป็นดังรูปที่ 4.18

#### 4.7 การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานของแบตเตอรี่จากข้อมูลเครื่องวัด

การใช้งานแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบแบตเตอรี่โพลีคลิฟไฟฟ้า (Traction Battery) มีความต้องการหลักคือมีวงจรชีวิตการใช้งานสูงสุด มีพฤติกรรมการใช้งานที่มีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่หลายปัจจัย แต่ข้างต้นนี้คือพฤติกรรมการใช้งานที่มีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่จากข้อมูลเครื่องวัดมีดังต่อไปนี้

1. การใช้งาน DoD (Depth of Discharge) เกิน 80 % การใช้ DoD มากมีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่และวงจรชีวิตการใช้งานสูงสุด การใช้งานแบตเตอรี่ไม่ควรเกิน 80 % หากต้องการอายุขัยการใช้งานเต็ม กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % DoD และ % ของอายุขัยการใช้งานปกติแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 อายุขัย และ DoD

(Source: Thomas Reddy - Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition-McGraw-Hill Professional (2010) p.16.51)

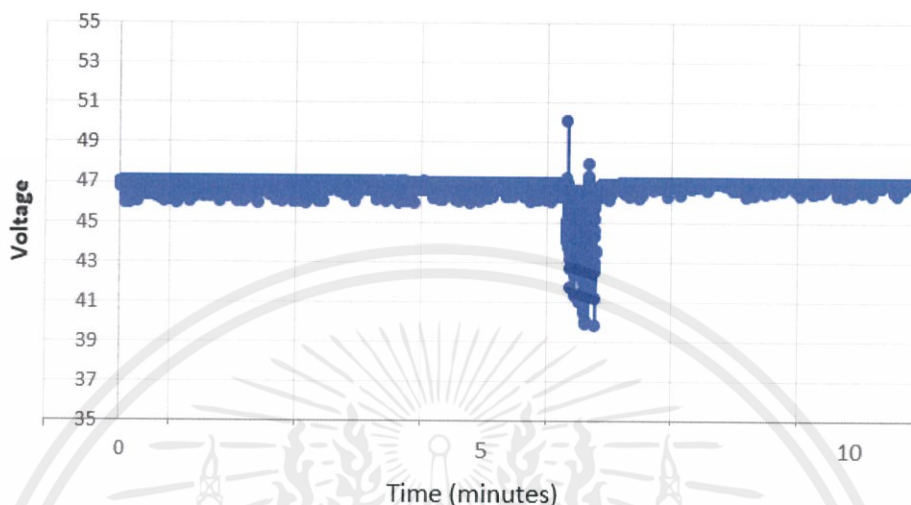
โดยการวัด DoD จะตรงข้ามกับ SoC (State of Charge) และการคาดการณ์ SoC ด้วยวิธีวัด แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่จะเป็นดังข้อมูลตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่และ State of Charge

State-of-Charge	Open circuit voltage	
	2V	48 V
100%	2.1	50.4
75%	2.08	49.92
50%	2.04	48.96
25%	2.01	48.24
0%	1.98	47.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

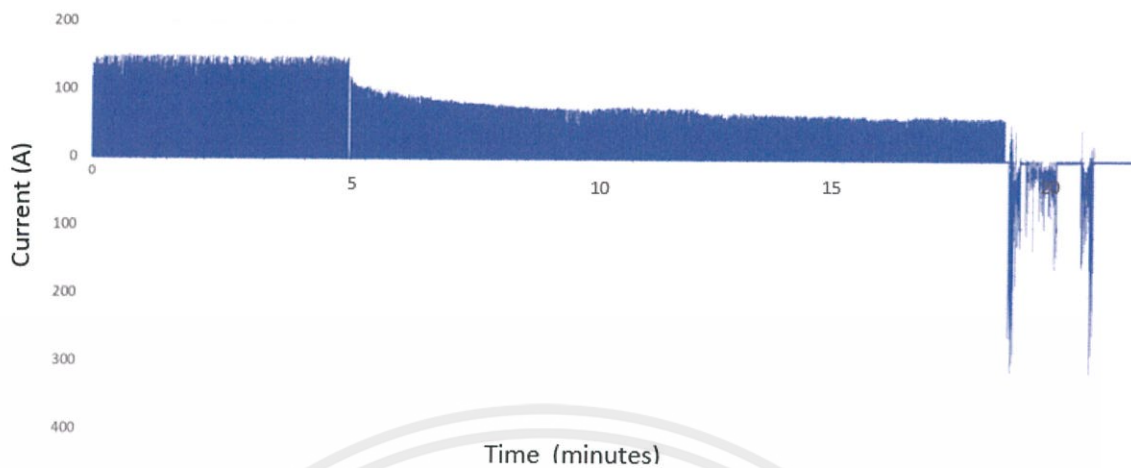
โดยมีตัวอย่างการใช้งานที่ได้จากข้อมูลเครื่องวัด แรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.20



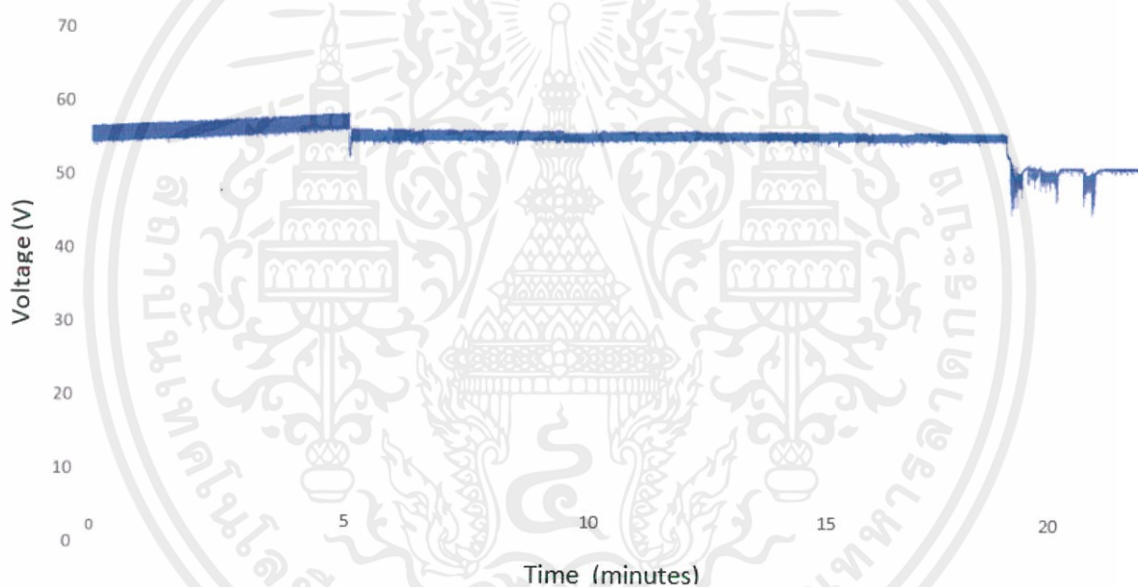
รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่มากกว่า DoD 80%

จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 4.24 แรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่ที่วัดได้มีค่าประมาณ 47 V ซึ่งอ้างอิงจากรายที่ 4.1 จะพบว่า มี SoC ที่ต่ำกว่าที่ตารางระบุไว้ หรือมี DOD มากกว่า 80% ซึ่งจะส่งผลให้ลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

2. การไม่ทำ Equalizing Charge หยุดการประจุแบตเตอรี่หลังจากการทำแรงดันไฟฟ้าคงที่ Equalizing Charge คือการจ่ายแรงดันแก่แบตเตอรี่หลังการประจุแบตเตอรี่ 2.5 V ต่อเซลล์เพื่อให้ทุกเซลล์ของแบตเตอรี่มีศักย์ไฟฟ้าในระดับเดียวกัน การ Equalizing Charge คือการอัดไฟฟ้าเกินเพื่อกำจัดซัลเฟตคริสตัลที่เกาะบริเวณเพลทของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด การเกาะของซัลเฟตคริสตัลสามารถลดความจุโดยรวมของแบตเตอรี่ได้โดยมีตัวอย่างการใช้งานที่ได้จากข้อมูลเครื่องวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่ช่วงประจุทั้งหมด



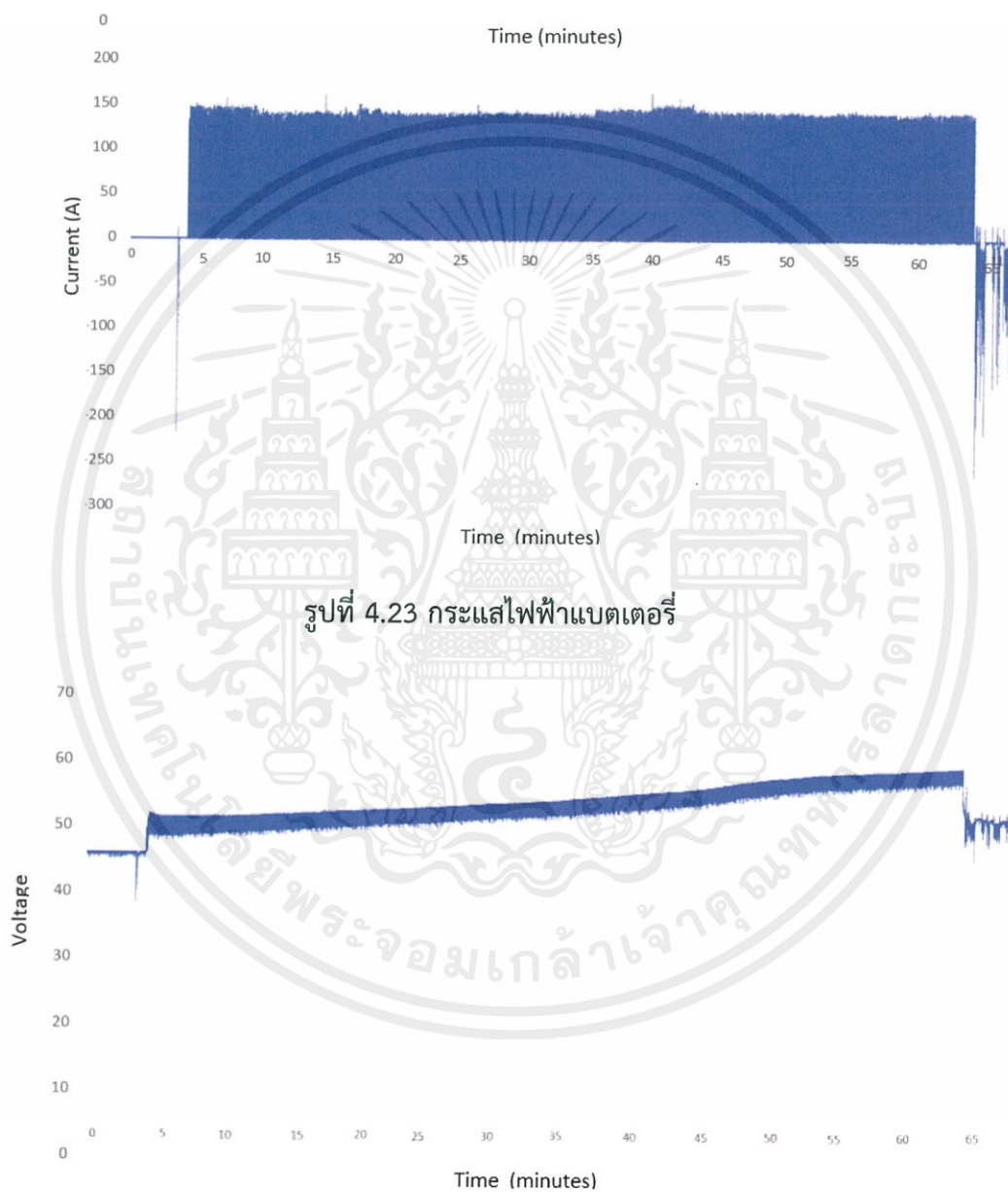
รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ช่วงประจุทั้งหมด

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าตั้งแต่ 0-5 นาที เป็นช่วง Constant Current, ช่วง 5-19 นาที เป็นช่วง Constant Voltage สังเกตได้ว่าตั้งแต่ 19 นาทีเป็นต้นไปเป็นการหยุดการประจุแบตเตอรี่แบบทันที โดยไม่มีช่วง Equalizing Charge

3. การหยุดประจุแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้งานในขณะที่ยังประจุไม่เต็ม โดยการประจุแบตเตอรี่จะแบ่งออกเป็นสามลำดับขั้นตอน คือ ประจुरूแสคงที่ ประจुरूแรงดันคงที่ และ Equalizing Charge ตามลำดับ หากเลิกประจุแบตเตอรี่ขณะที่แบตเตอรี่ยังไม่ได้รับการประจุเต็มที่จะเป็นผลให้เกิดซัลเฟตคริสตัล (Sulfation) ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกาะบริเวณเพลาของแบตเตอรี่ที่กะวักกรต การเกาะของซิลเฟตคริสตัลลดความจุโดยรวมของแบตเตอรี่ซึ่งคืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยตัวอย่างจากข้อมูลเครื่องวัดแสดงให้เห็นการหยุดประจุแบตเตอรี่ระหว่างอยู่ในช่วงประจุกระแสคงที่ ตัวอย่างการใช้งานที่ได้จากข้อมูลเครื่องวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



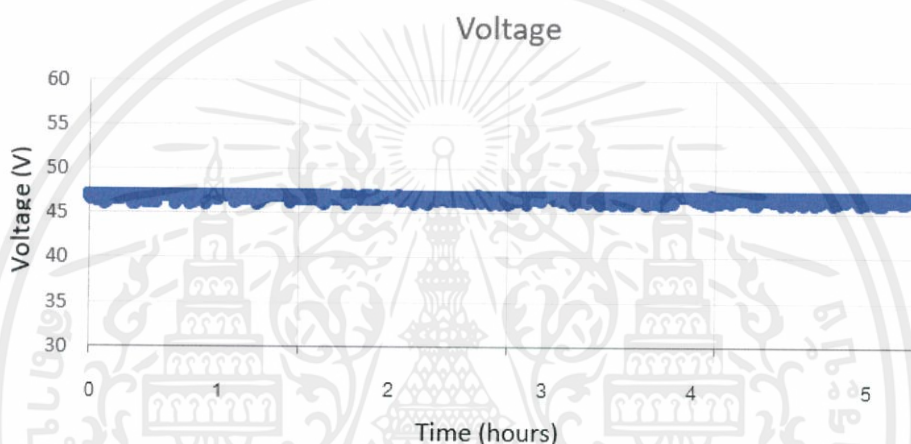
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่

รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

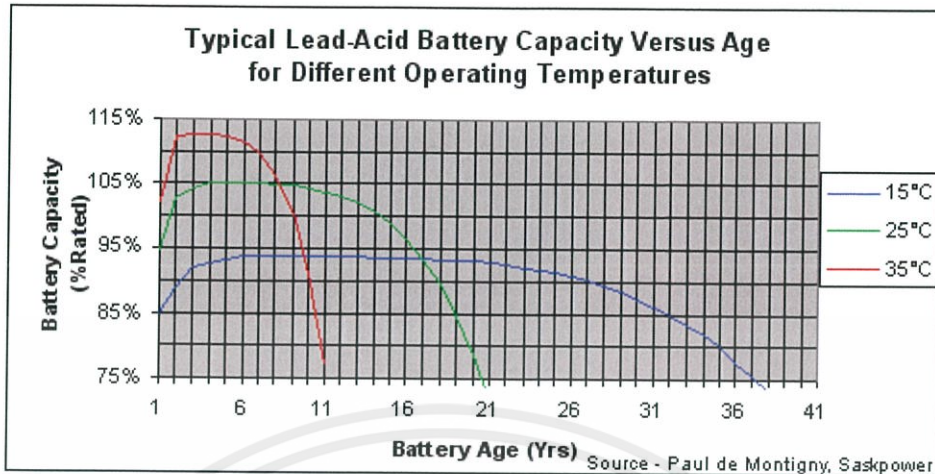
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าเป็นการประจุแบตเตอรี่ในช่วง Constant Current จากนั้นหยุดประจุแบตเตอรี่ทันทีโดยที่ยังไม่ถึงช่วง Constant Current และ Equalizing Charge หรือเป็นการหยุดประจุแบตเตอรี่ทั้งที่ยังไม่เต็ม

4. การปล่อยแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะไร้ประจุอยู่เป็นเวลานาน ควรนำแบตเตอรี่ไปประจุเมื่อใช้งานเสร็จ โดยการเก็บแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในสถานะไร้ประจุจะก่อให้เกิดคริสตัลซัลเฟตที่บริเวณเพลทของแบตเตอรี่ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของการใช้งานแบตเตอรี่ ตัวอย่างจากข้อมูลเครื่องวัด แรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.25



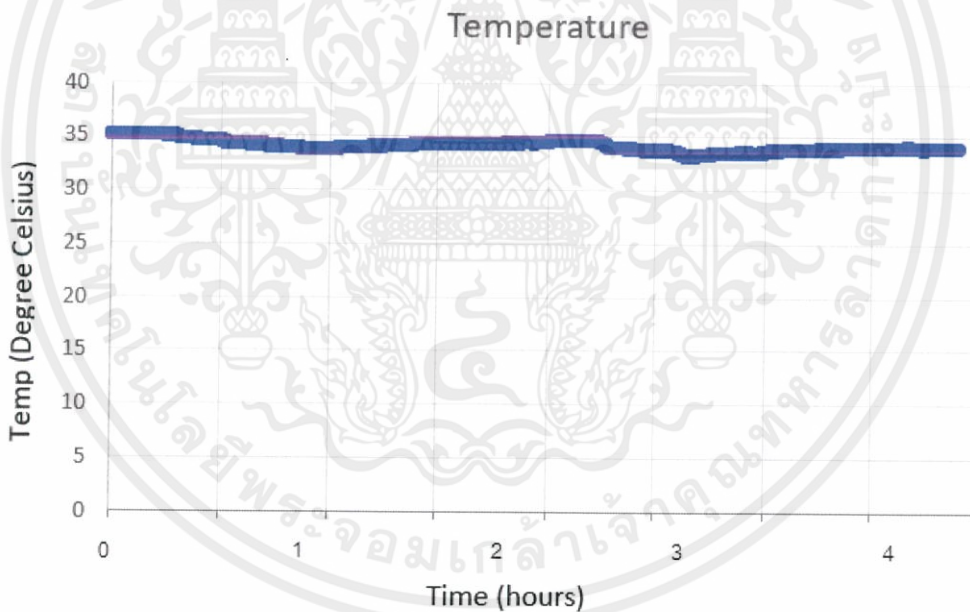
รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่

5. การใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูง สำหรับทุกๆ  $10^{\circ}\text{C}$  ที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอายุการใช้งานจะสั้นลงครึ่งหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.26 อุณหภูมิในการทำงานที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดคือ  $25^{\circ}\text{C}$  โดยวัดจากข้อมูลเครื่องวัดใช้งานแบตเตอรี่อยู่ที่อุณหภูมิ  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิตัวอย่างจากข้อมูลเครื่องวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิการใช้งานและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

(Source: <https://www.mpoweruk.com/life.htm>)

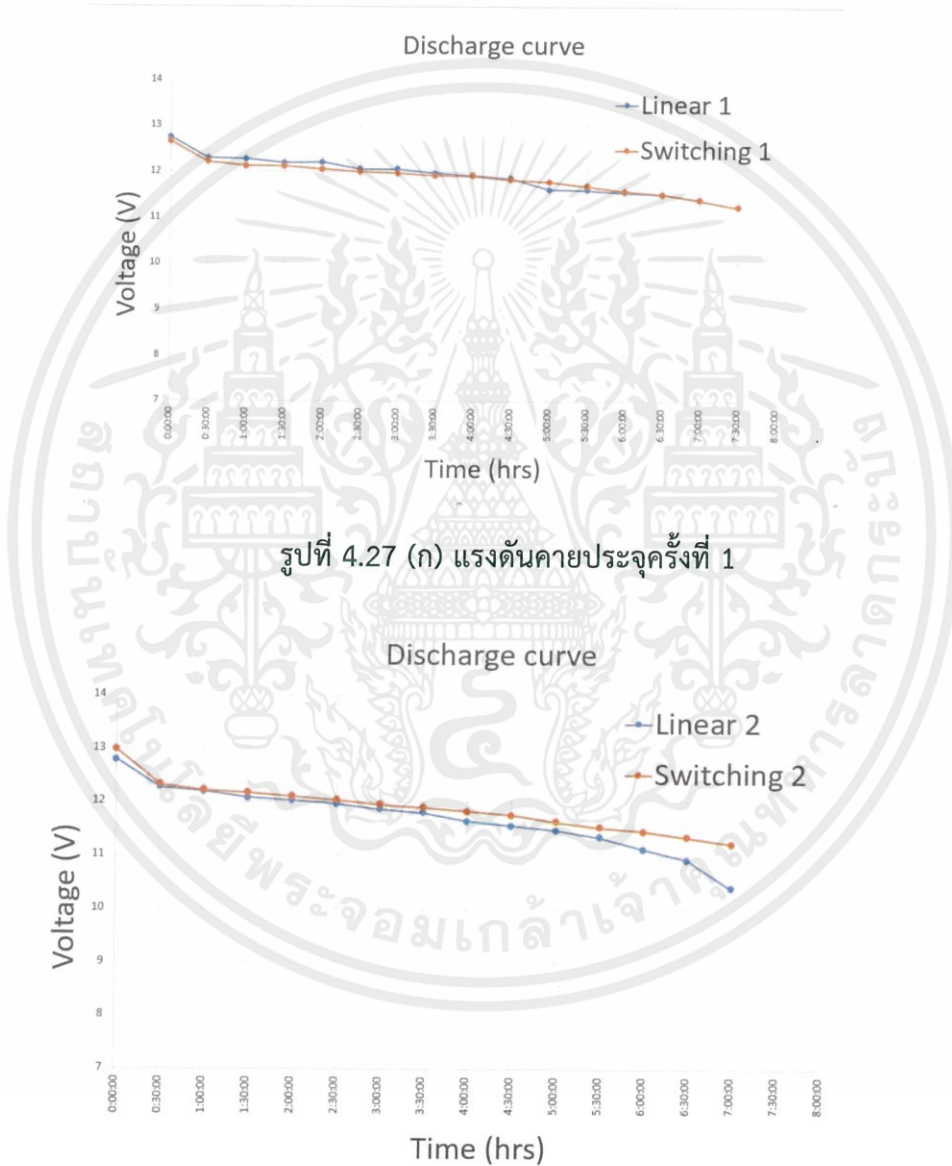


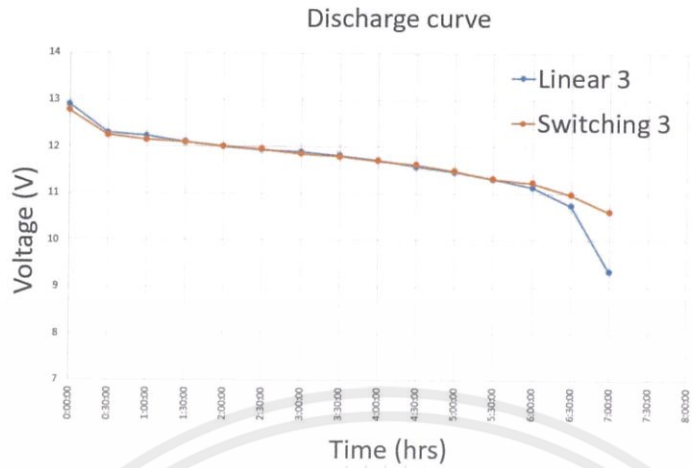
รูปที่ 4.27 อุณหภูมิที่แบตเตอรี่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

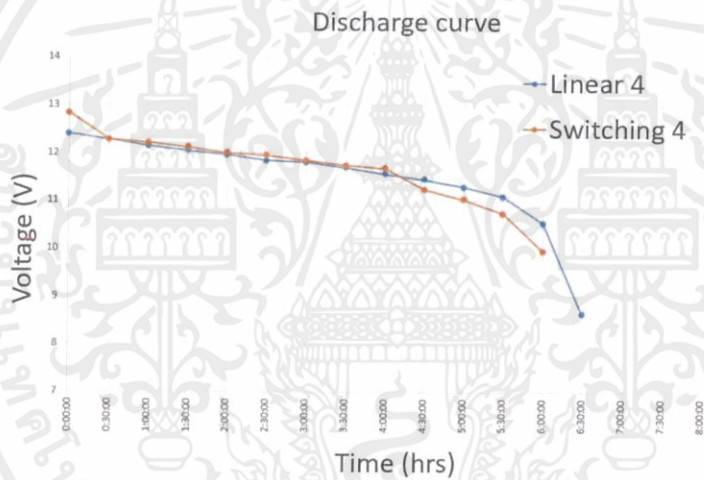
### 4.8 การทดสอบโหลดสวิตชิงและโหลดเชิงเส้น

การใช้แบตเตอรี่โพลีคลิฟท์ไฟฟ้า มีโหลดกระแสที่มีสวิตชิงที่เป็นผลจากมอเตอร์ไครฟ์ ทางผู้จัดทำจึงมี สันนิษฐานถึงผลกระทบของสวิตชิงโหลดต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จึงทดสอบด้วยการคายประจุแบตเตอรี่ แบบเชิงเส้นและแบบสวิตชิง ได้ผลของแรงดันไฟฟ้าขณะคายประจุดังรูปที่ 4.28 (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5 (ช) ครั้งที่ 6



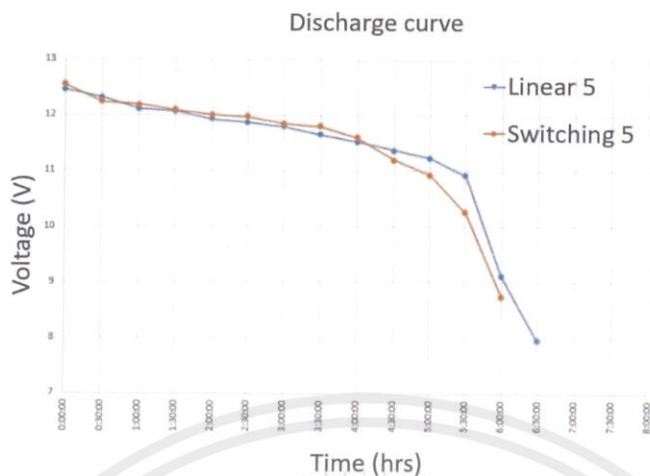


รูปที่ 4.27 (ค) แรงดันคายประจุครั้งที่ 3

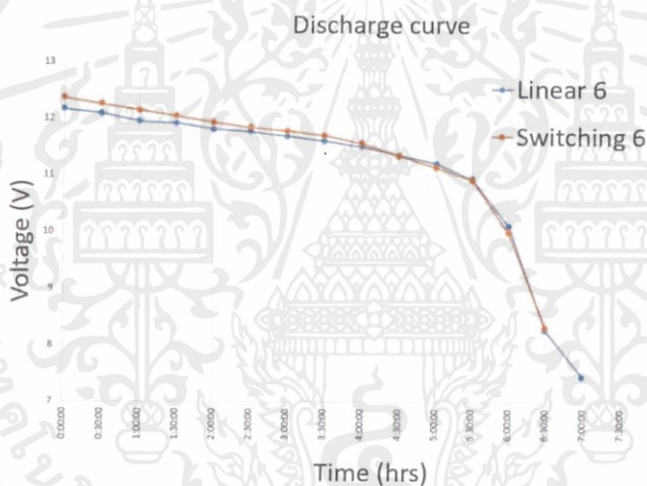


รูปที่ 4.27 (ง) แรงดันคายประจุครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 (จ) แรงดันคายประจุครั้งที่ 5



รูปที่ 4.27 (ข) แรงดันคายประจุครั้งที่ 6

จากผลลัพธ์ที่ได้ การตกของแรงดันที่เร็วกว่าในการคายประจุรอบมีการสลับกัน บางครั้งโหลด สวิตซิงแรงดันตกเร็วกว่าบางครั้งโหลดเชิงเส้นแรงดันตกเร็วกว่า จึงสรุปว่าการจ่ายโหลดทั้งสองแบบของแบตเตอรี่ ไม่มีความแตกต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

##### 5.1.1 เครื่องวัดแบตเตอรี่รถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

โครงการการศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าได้ดำเนินการ ออกแบบและก่อสร้างวงจรเครื่องวัดและสามารถติดตั้งวงจรเครื่องวัดเข้ากับโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า ทำการเก็บข้อมูลและติดตามผลระยะไกลจาก ThingSpeak platform การทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการทำงานของเครื่องวัดติดตั้งโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ได้แก่

- สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 พารามิเตอร์ของการทำงานโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า และทำการส่งข้อมูลไปพื้นฐานข้อมูล ThingSpeak platform ได้
- สามารถแสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆในรูปของกราฟข้อมูลเทียบกับเวลา
- สามารถบันทึกข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน Micro SD Card ได้และทั้งในกรณีที่มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและในกรณีที่ขาดการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

เครื่องวัดนี้จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะและติดตามการเก็บข้อมูลโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องอยู่ที่จุดติดตั้งโฟล์คลิฟท์นั้นอีกทั้งยังทำให้ทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นและวางแผนการบำรุงรักษาได้ทัน่วงทีซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตรวจสอบ

##### 5.1.2 วงจรประจุแบตเตอรี่

โครงการการศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าได้ดำเนินการ ออกแบบและก่อสร้างวงจรประจุแบตเตอรี่ และวงจรสามารถประจุแบตเตอรี่ได้รูปกระแสตามรูปกระแสเครื่องประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ การทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการทำงานวงจรประจุแบตเตอรี่สามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ได้แก่

- สามารถประจุแบตเตอรี่ได้กระแสเฉลี่ยเช่นเดียวกับกระแสเครื่องประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ
- สามารถประจุแบตเตอรี่ได้กระแสที่ความถี่ 150 Hz เช่นเดียวกับกระแสเครื่องประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ
- สามารถควบคุมแอมพลิจูดของกระแสประจุแบตเตอรี่

### 5.1.3 วงจรคายประจุแบตเตอรี่

โครงการการศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าได้ดำเนินการ ออกแบบและก่อสร้างวงจรคายประจุแบตเตอรี่ และวงจรสามารถคายประจุแบตเตอรี่ได้รู้กระแสตามรูปกระแสการใช้งานจริงของโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องมือวัด การทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการทำงานของวงจรประจุแบตเตอรี่สามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ได้แก่

- สามารถคายประจุแบตเตอรี่ได้รู้กระแสตามรูปกระแสการใช้งานจริงของโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องมือวัด
- สามารถคายประจุแบตเตอรี่ได้ทั้งแบบสวิตชิงและแบบเชิงเส้น
- สามารถควบคุมแอมพลิจูดของกระแสคายประจุแบตเตอรี่

## 5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

จากการดำเนินโครงการการศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้ามีปัญหาและข้อจำกัดดังนี้

- ปัญหาการสร้างเครื่องวัดติดตั้งโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า เนื่องจากสถานที่ที่นำไปติดตั้งมีสภาพแวดล้อมที่มีฝนและฝุ่น จึงต้องออกแบบเครื่องมือวัดให้สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆได้
- ปัญหาเสถียรภาพของการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเนื่องจากเป็นจุดอับสัญญาณ บางสถานที่ที่โฟล์คลิฟท์ที่นำเครื่องมือวัดไปติดตั้งทำงาน เป็นจุดอับสัญญาณโทรศัพท์มือถือทำให้การติดตามระยะไกลด้วย ThingSpeak มีการขาดช่วงทำให้ไม่สามารถติดตามผลได้ตลอดเวลา

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาและข้อจำกัดข้างต้น สามารถปรับปรุงแก้ไข และพัฒนา เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้ดังนี้

- การส่งข้อมูล ThingSpeak ถูกจำกัดที่ 15 วินาที ต่อการส่งข้อมูล 1 รอบ หากสมัครสมาชิกของ ThingSpeak จะสามารถเพิ่มความถี่ในการส่งข้อมูลได้
- การปรับปรุงเสถียรภาพในการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและการเลือกเครือข่ายของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตที่มีเสถียรภาพ

- การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องวัดให้มีขนาดเล็กลง เพื่อลดการกินพื้นที่ของส่วนที่นำไปติดตั้ง
- วงจรประจุไม่มีการป้องกัน อุณหภูมิเกินและแรงดันไฟฟ้าเกิน สามารถออกแบบให้มีส่วนป้องกันทั้งอุณหภูมิเกินและแรงดันไฟฟ้าเกิน
- ออกแบบให้วงจรประจุวงจรคายประจุและวงจรควบคุมของวงจรประจุวงจรคายประจุให้มีขนาดเล็กลง และกินพื้นที่น้อยลงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน
- ออกแบบการสวิตซ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้นและออกแบบให้มีการปรับได้ง่ายขึ้น
- เพิ่มหน้าจอแสดงผลกระแสเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ยขณะทำการประจุและคายประจุแบตเตอรี่

นอกจากนี้หลักการการทำงานของเครื่องวัด วงจรประจุและวงจรคายประจุยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและประกอบสร้างอุปกรณ์อื่นๆได้ เช่น เครื่องวัดวัตต์ฮาวมิเตอร์ (Watt-hour meter) หรือเครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Data Logger) และวงจรประจุแบตเตอรี่ชนิดที่ไม่ใช่ตะกั่วกรด เป็นต้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. G. Vutetakis and H. Wu, "The effect of charge rate and depth of discharge on the cycle life of sealed Lead-Acid aircraft batteries", IEEE 35th International Power Sources Symposium, 1992.
- [2] Tobias Blank, Julia Badeda, Julia Kowal and Dirk Uwe Sauer, "Deep Discharge Behavior of Lead-Acid Batteries and Modeling of Stationary Battery Energy Storage Systems", Intelec 2012, 2012.
- [3] Ying-Chun Chuang, Hung-Shiang Chuang and Jyun-Han Wu, "A Sinusoidal Charging Strategy for Battery Energy Storage Systems Use in Light Electric Vehicles", 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2016.
- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, พ.ศ.2538, เครื่องประจุแบตเตอรี่, มอก.1293
- [5] Daniel W. Hart, Power Electronics, McGraw Hill; 2010, 199p.
- [6] Thomas Reddy - Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition-McGraw-Hill Professional, 2010.
- [7] Andreas Lohner, Eckhard Karden, Rick Doncker, "Charge Equalizing and Lifetime Increasing with a New Charging Method for VRLA Batteries", Proceedings of Power and Energy Systems in Converging Markets, 1997.
- [8] รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงินและคณะ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS), กรุงเทพฯ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสมรรถนะและอายุของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้า

### A STUDY OF BATTERY'S PERFORMANCE AND LIFE FOR ELECTRIC FORKLIFT

ปวินท์ ปิยะโสวรรณ<sup>1</sup> อนุชวีร์ ชยะกุลศิริ<sup>2</sup> พิทยุทธ์ สิทธานุกูล<sup>3</sup> และ กานุพงษ์ แซ่อ่าง<sup>4</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ถลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการวิเคราะห์การใช้งานแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ซึ่งเป็นแบตเตอรี่รถยก (Traction Battery) โดยใช้วิธีเก็บข้อมูลจากการติดตั้งจริงด้วยเครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะประจุและคายประจุ อุณหภูมิโดยรอบขณะใช้งาน และความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบขณะใช้งาน ซึ่งการเก็บข้อมูลนี้ได้อาศัยการรับส่งข้อมูลผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสิ่ง (Internet of Things : IoTs) โดยทำงานเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลซิงค์สปีค (ThingSpeak) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์ในโรงงาน และสร้างวงจรจำลองการประจุและคายจุแบตเตอรี่โดยใช้แบตเตอรี่ชนิดเดียวกันกับแบตเตอรี่ที่ได้นำเครื่องมือวัดไปติดตั้งเพื่อวิเคราะห์วิธีการใช้งานแบตเตอรี่ที่เหมาะสมซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

#### Abstract

This project presents the analysis of the forklift battery (traction battery) use in term of battery performance and life. Four parameters including battery voltage, current, temperature, and humidity during charging and discharging cycles are collected from forklift battery as the actual operating condition using a proposed invented meter. The collected data is transferred to the cloud database in ThingSpeak platform via IoTs (Internet of Things) technology. These collected data are used to build a charging and discharging battery circuit considering the actual charging and discharging patterns. Finally, this study proposes the suitable battery using profile for prolonging the service life of forklift better.

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันรถโฟล์คลิฟท์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและคลังสินค้า รถโฟล์คลิฟท์แบบเครื่องยนต์ไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้งานแทนที่แบบเครื่องยนต์ดีเซลมากขึ้น การใช้งานรถโฟล์คลิฟท์อย่างไม่เหมาะสมจะส่งผลให้แบตเตอรี่ในรถโฟล์คลิฟท์มีอายุการใช้งานที่สั้นลง การใช้งานอย่างเหมาะสมจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาโฟล์คลิฟท์ลงได้ จากการได้สังเกตเห็นถึงปัญหาดังกล่าว จึงเป็นที่มาการศึกษาลักษณะการใช้งานของรถโฟล์คลิฟท์เพื่อวิเคราะห์หาการใช้งานแบบใดที่ส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่ และการใช้งานแบบใดที่จะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้

#### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

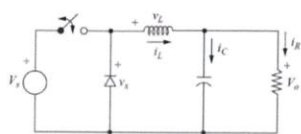
##### 2.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดส่วนแบ่งทางการตลาดของแบตเตอรี่ชนิดนี้มากกว่าครึ่งของตลาดแบตเตอรี่ ทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิรวมกัน แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้สำหรับจุดระเบิดเครื่องยนต์ใช้เป็นหน่วยจ่ายพลังงานฉุกเฉินในขณะไฟฟ้าดับหรือใช้ในรถยนต์ส่งไฟฟ้าในโรงงานที่อากาศไม่ถ่ายเทเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก เนื่องจากใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานยาวนานแม้ว่าสารตะกั่วจะเป็นพิษ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด มีขั้วลบซึ่งทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน (Porous Pb) ส่วนขั้วบวกนั้นเป็นตะกั่วออกไซด์ ( $PbO_2$ ) ที่มีลักษณะพรุนเช่นกัน โดยมีกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้นเป็นอิเล็กโทรไลต์

##### 2.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคคิก (The Buck Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต่ำกว่าแรงดันอินพุตโดยจากรูปวงจรใน รูปที่ 2.1

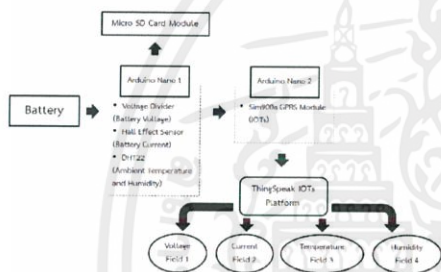


รูปที่ 2.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัค

### 3. การออกแบบและประกอบสร้าง

#### 3.1 การออกแบบเครื่องวัดแบตเตอรี่รีฟโวลต์ลิฟท์

ภาพรวมการทำงานของวงจรเครื่องวัด การรับแต่ละพารามิเตอร์และเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลเป็นไปตามรูปที่ 3.1

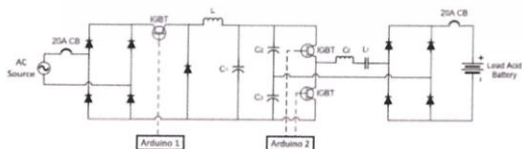


รูปที่ 3.1 ภาพรวมการทำงานของวงจรเครื่องวัด

รับค่าทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ แรงดันไฟฟ้ารับผ่านวงจรแบ่งแรงดัน กระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์ อลูมิเนียม และความชื้นจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น โดยเก็บข้อมูลในรูปแบบ MicroSD และขณะเดียวกันส่งข้อมูลในฐานข้อมูลคลัสสิกส์ปิคเพื่อติดตามผลได้ตลอดเวลา

#### 3.2 การออกแบบวงจรประจุแบตเตอรี่

ภาพรวมของวงจรประจุแบตเตอรี่เป็นไปตามรูปที่ 3.2

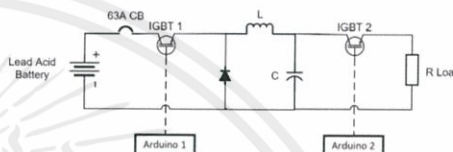


รูปที่ 3.2 ภาพรวมของวงจรประจุแบตเตอรี่

วงจรประจุแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยสี่ส่วนสำคัญได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่น (Full Wave Bridge Rectifier) วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัค (The Buck Converter) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น (Half bridge Inverter) วงจรกรองความถี่ไรเซนเนสซ์

### 3.3 การออกแบบวงจรจ่ายประจุแบตเตอรี่

ภาพรวมของวงจรจ่ายประจุแบตเตอรี่เป็นไปตามรูปที่ 3.3



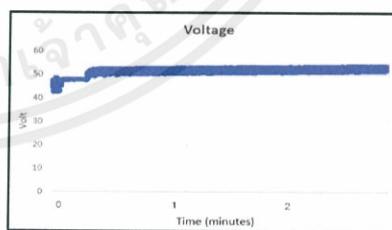
รูปที่ 3.3 ภาพรวมของวงจรจ่ายประจุแบตเตอรี่

วงจรจ่ายประจุแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยสามส่วนสำคัญได้แก่ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัค (The Buck Converter) ไอจีบีที (IGBT) โหลดความต้านทาน

### 4. การทดสอบและผลการทดสอบ

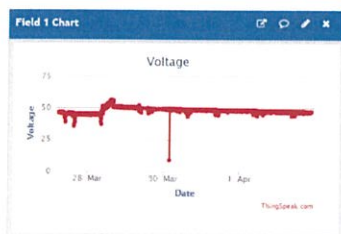
#### 4.1 ผลลัพธ์จากการติดตั้งเครื่องมือวัด

ผลลัพธ์ที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัด พารามิเตอร์ที่พารามิเตอร์ คือ แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิ, และความชื้น ถูกเก็บข้อมูลภายใน MicroSD สามารถแสดงข้อมูลผลการทดสอบ พล็อตตัวอย่างจากข้อมูลที่เก็บมาบางช่วงได้ดังรูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้า

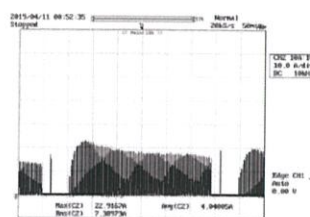


รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้า

สำหรับการแสดงผลบน ThingSpeak platform นั้นจะแสดงผลในรูปแบบของกราฟของข้อมูลเทียบกับเวลาในรูปแบบของ ๓ เวลา ปัจจุบัน สามารถแสดงผลตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้า



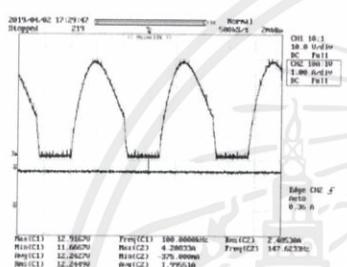
รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้า



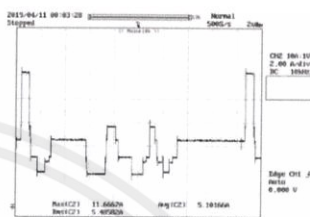
รูปที่ 4.5 กระแสจำลองช่วงสวิตชิ่งจากตัวขับเคลื่อนมอเตอร์

#### 4.2 ผลลัพธ์วงจรประจุแบตเตอรี่

รูปคลื่นของกระแสประจุแบตเตอรี่แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นกระแสเป็นการพัลส์ซ้ำจริง



รูปที่ 4.3 กระแสประจุแบตเตอรี่



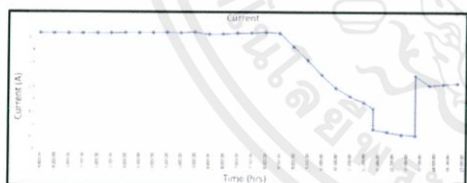
รูปที่ 4.6 กระแสจำลองช่วงเชิงเส้น

#### 4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานของแบตเตอรี่จากข้อมูลเครื่องวัด

การใช้งานที่มีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่หลายปัจจัยข้างต้นนี้คือพฤติกรรมการใช้งานที่มีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่จากข้อมูลเครื่องวัด

ลำดับการประจุแบตเตอรี่ที่ได้จากข้อมูลเครื่องมือวัดมี 2 ลำดับคือ Constant Current และ Constant Voltage โดยผลลัพธ์การประจุจากวงจรประจุแบตเตอรี่สามารถทำได้ทั้ง Constant Current Constant Voltage และ Equalizing Charge แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 กระแส

1. การใช้งาน DoD (Depth of Discharge) เกิน 80 % การใช้งาน DoD มากมีผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่และวงจรชีวิตการใช้งานสูงสุด
2. การไม่ทำ Equalizing Charge เพื่อกำจัดซัลเฟตคริสตัลที่เกาะบริเวณเพลทของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด
3. การหยุดประจุแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้งานในขณะที่ยังประจุไม่เต็ม ผลให้เกิดซัลเฟตคริสตัล (Sulfation) ที่เกาะบริเวณเพลทของแบตเตอรี่
4. การปล่อยแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะไร้ไร้ประจุอยู่เป็นเวลานาน การเก็บแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในสถานะไร้ประจุจะก่อให้เกิดคริสตัลซัลเฟตที่บริเวณเพลทของแบตเตอรี่
5. อุณหภูมิในการทำงานที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดคือ 25 °C โดยวัดจากข้อมูลเครื่องวัดใช้งานแบตเตอรี่อยู่ที่อุณหภูมิ 30-40°C



รูปที่ 4.4 กระแสแบตเตอรี่ขณะประจุด้วยเครื่องประจุแบตเตอรี่จำลอง

#### 4.3 ผลลัพธ์วงจรคายประจุแบตเตอรี่

กระแสไหลของโพล์ไฟฟ้าไฟฟ้ามักมีการสวิตชิ่งเกิดจากช่วงตัวขับเคลื่อนทำงานคอนเริ่มสตาร์ทโดยมีความถี่สวิตชิ่ง 400 Hz และช่วงเชิงเส้นเกิดในช่วงแอมอเตอร์คงตัว โดยแสดงกระแสจำลองช่วงสวิตชิ่งได้ดังรูปที่ 4.5 กระแสจำลองช่วงเชิงเส้นดังรูปที่ 4.6

## 5.สรุปผลการดำเนินงาน

การศึกษาการใช้งานแบตเตอรี่ในรถโฟล์คทริคไฟฟ้าได้ดำเนินการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องมีอวด วงจรประจุแบตเตอรี่และวงจรคายประจุแบตเตอรี่ ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวงจรเครื่องมีอวดนี้สามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ซึ่งได้แก่ สามารถวัดค่าและบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 พารามิเตอร์และทำการส่งข้อมูลไปที่ฐานข้อมูล ThingSpeak platform ได้ ส่วนวงจรประจุแบตเตอรี่ สามารถประจุแบตเตอรี่ได้กระแสเฉลี่ยเช่นเดียวกับกระแสเครื่องประจุแบตเตอรี่ต้นแบบ ส่วนวงจรคายประจุแบตเตอรี่สามารถคายประจุแบตเตอรี่ได้รูปกระแสตามรูปกระแสการใช้งานจริงของโฟล์คทริคไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องมีอวด ทั้งแบบสวิตซ์และแบบเชิงเส้น

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จรุดังไปได้ด้วยดีด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง รศ.พิชิต สายทอง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยโดยตลอด

ขอขอบคุณบริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับติดตั้งเครื่องมีอวด ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับเงินสนับสนุน โครงงาน

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] D. G. Vutetakis and H. Wu, "The effect of charge rate and depth of discharge on the cycle life of sealed Lead-Acid aircraft batteries", IEEE 35<sup>th</sup> International Power Sources Symposium, 1992.
- [2] Ying-Chun Chuang, Hung-Shiang Chuang and Jyun-Han Wu, "A Sinusoidal Charging Strategy for Battery Energy Storage Systems Use

in Light Electric Vehicles", 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2016.

[3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, พ.ศ.2538, เครื่องประจุแบตเตอรี่, มอก.1293

[4] Daniel W. Hart, Power Electronics, McGraw Hill; 2010, 199p.

[5] Thomas Reddy - Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition- McGraw-Hill Professional, 2010.

### ประวัติผู้เขียน



นายปวินท์ ปิยะโสวรรณ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนสตรีวิทยา 2  
การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายปุณชวีร์ ชะกุลศิริ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนดินทรเดชา-  
(สิงห์ สิงหเสนี)๒  
การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพิทยุต์ม์ สิทธนานุกูล

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนสารสาสน์-  
วิเทศร่วมเกล้า  
การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายอานนพงษ์ แซ่อึ้ง

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนราชวินิตบาง-  
แก้ว  
การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Study of Battery's Performance and Life for Electric Forklift

Pawin Piyasowan<sup>1</sup>, Punyawee Chayakulkheeree<sup>2</sup>, Pitayut Sithanukul<sup>3</sup>,  
Panupong Saeung<sup>4</sup>, and Asst.Prof. Piampoom Sarikprueck<sup>5</sup>

## Abstract

This project presents the analysis of the forklift battery (traction battery) use in term of battery performance and life. Four parameters including battery voltage, current, temperature, and humidity during charging and discharging cycles are collected from forklift battery as the actual operating condition using a proposed invented meter. The collected data is transferred to the cloud database in ThingSpeak platform via IoTs (Internet of Things) technology. These collected data are used to build a charging and discharging battery circuit considering the actual charging and discharging patterns. Finally, this study proposes the suitable battery using profile for prolonging the service life of forklift battery.

## Introduction

In modern industrialized world the use and development of the forklift truck have significantly expanded worldwide. Forklifts have become an indispensable piece of equipment in manufacturing and warehousing. The use of electric forklifts has been increasing, and the core part which is the most valuable and could cause major damage to the forklift is the battery. An inappropriate usage of battery could shorten the service life and substantially reduce the battery health. Therefore, a proper behavior of the battery usage could improve the health and prolonged the service life of battery in forklift. Disciplined behaviors could also reduce maintenance costs.

## Methodology

A data collecting device in MicroSD form were made with 4 parameters including Voltage, Current, Temperature, and Relative Humidity for the purpose of analyzing the usage of the battery which is shown in Figure 1. Data transmitting of 4 parameters to ThingSpeak platform were performed for the purpose of remote monitoring. After analyzing the collected data, the Charge and Discharge circuit were designed and constructed for simulating the usage behavior of the battery which the schematic diagram can be shown in Figure 2 and 3.

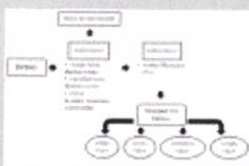


Figure 1. Measurement Device Schematic Diagram

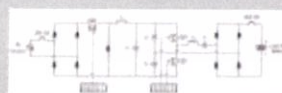


Figure 2. Charge Circuit Schematic Diagram

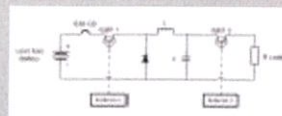


Figure 3. Discharge Circuit Schematic Diagram

## Results

Data collected in MicroSD and ThingSpeak are shown below in Figure 4 and 5. The charge current of Charge circuit which distribute into 3 stages including Constant Current, Constant Voltage, and Equalizing Charge from simulation circuit are shown below. The discharge current of Discharge circuit simulating the usage from electric forklift is shown in Figure 7.



Figure 4. Data in MicroSD



Figure 5. Data from ThingSpeak



Figure 6. Charge Current

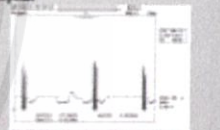


Figure 7. Discharge Current

## Conclusion

The data collected in this project shows that patterns of Electric Forklift's behaviors which affect Lead acid battery's service life are listed below.

1. Use Lead Acid battery with a percentage of Depth of Discharge higher than 80%
2. Not doing equalizing charge when using Traction Battery which leads to sulfation
3. Undercharge of battery. Stop charging mid way of the charging process which may lead to sulfation of the plate.
4. Store the lead acid battery in discharged state.
5. Using the battery in a temperature higher than the optimum temperature of 25°C shortens battery's life

## References

- [1] Daniel W. Hart, Power Electronics, McGraw Hill: 2010
- [2] Thomas Reddy, Linden's Handbook of Batteries, McGraw Hill Professional: 2010

## Acknowledgement

- [1] Namsang Engineering Co., Ltd.
- [2] Center of Excellence on Hazardous Substance Management, Chulalongkorn University.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA**

GT60M303

TOSHIBA INSULATED GATE BIPOLEAR TRANSISTOR SILICON N CHANNEL IGBT

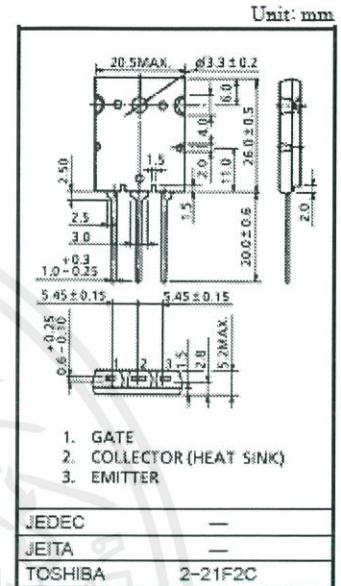
**GT60M303**

## HIGH POWER SWITCHING APPLICATIONS

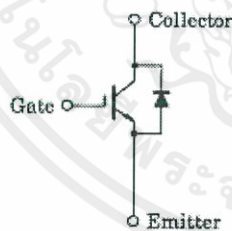
- Fourth generation IGBT
- FRD included between emitter and collector
- Enhancement mode type
- High speed IGBT :  $t_f = 0.25\mu\text{s}$  (TYP.)  
FRD :  $t_{rr} = 0.7\mu\text{s}$  (TYP.)
- Low saturation voltage :  $V_{CE(sat)} = 2.1\text{V}$  (TYP.)

MAXIMUM RATINGS ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

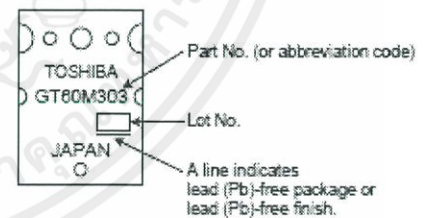
CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	900	V
Gate-Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 25$	V
Collector Current	DC	$I_C$	60
	1ms	$I_{CP}$	120
Emitter-Collector Forward Current	DC	$I_{ECF}$	15
	1ms	$I_{ECFP}$	120
Collector Power Dissipation ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	$P_C$	170	W
Junction Temperature	$T_j$	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55~150	$^\circ\text{C}$
Screw Torque	—	0.8	N·m



## EQUIVALENT CIRCUIT



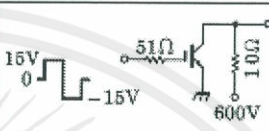
## MARKING



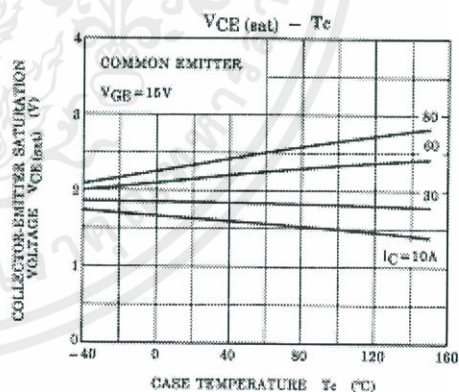
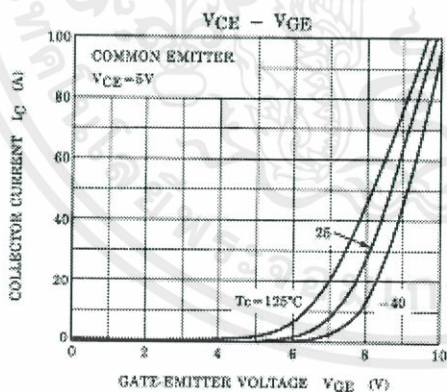
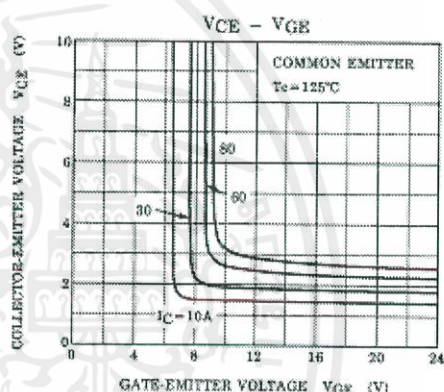
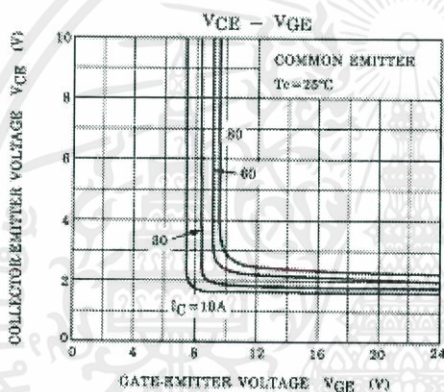
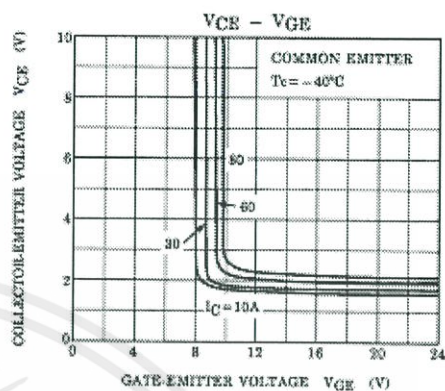
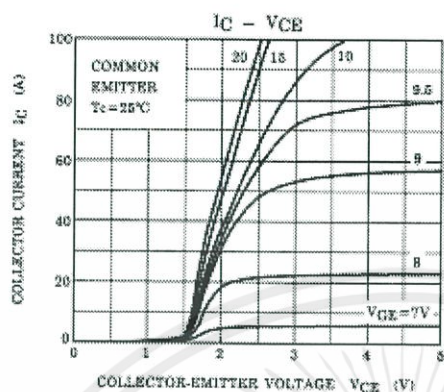
**TOSHIBA**

GT60M303

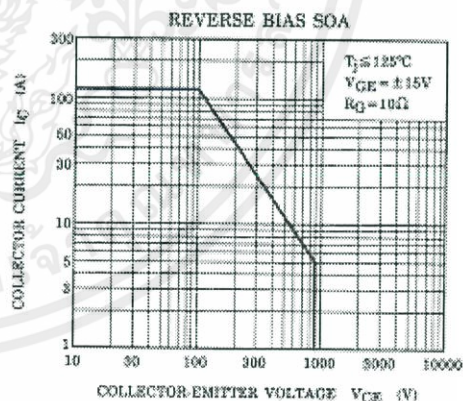
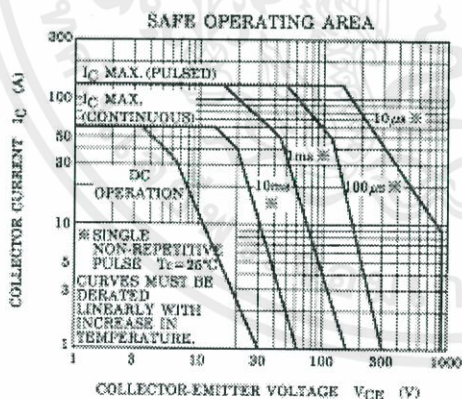
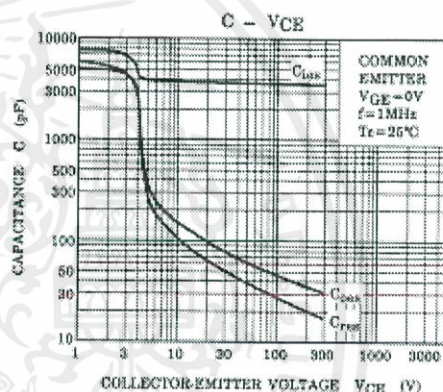
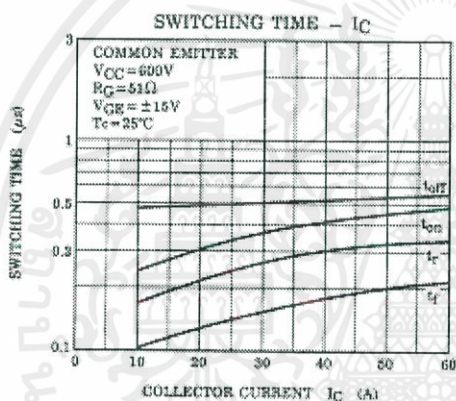
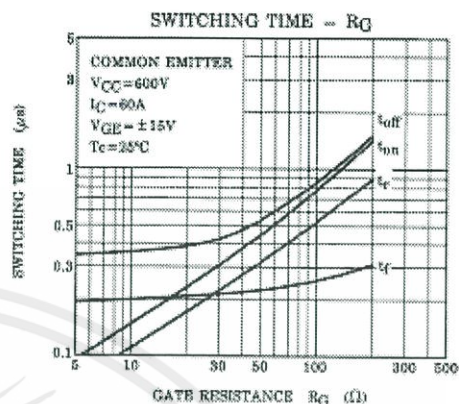
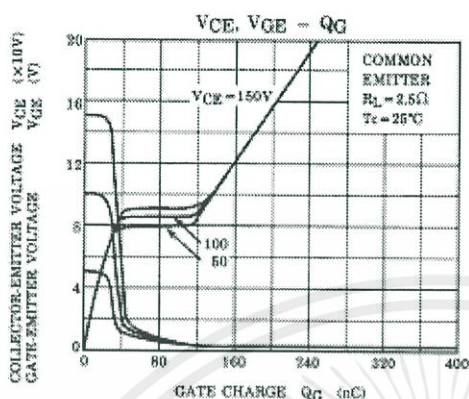
## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)

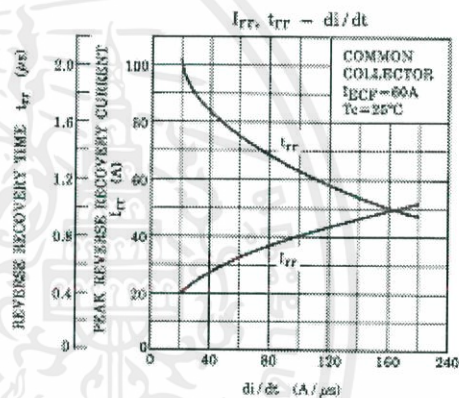
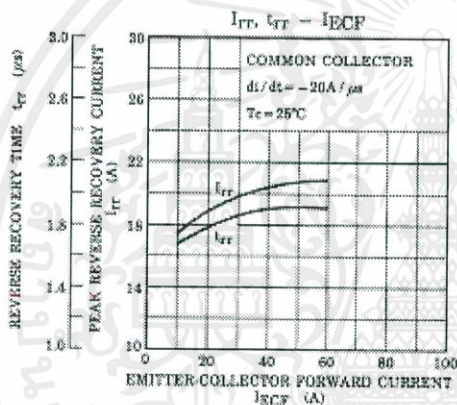
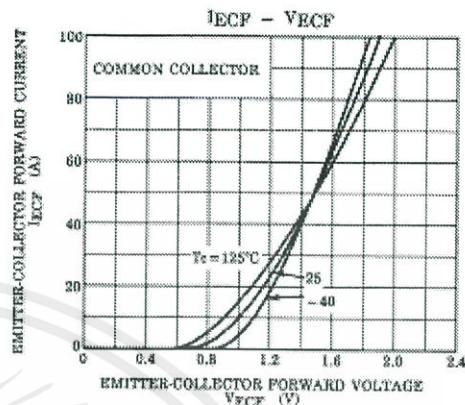
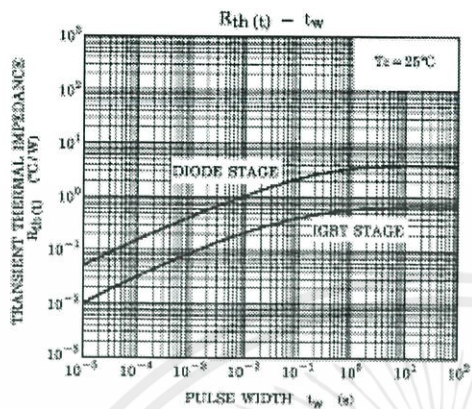
CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT
Gate Leakage Current		$I_{GES}$	$V_{GE} = \pm 25V, V_{CE} = 0$	—	—	$\pm 500$	nA
Collector Cut-off Current		$I_{CES}$	$V_{CE} = 900V, V_{GE} = 0$	—	—	1.0	mA
Gate-Emitter Cut-off Voltage		$V_{GE(OFF)}$	$I_C = 60mA, V_{CE} = 5V$	3.0	—	6.0	V
Collector-Emitter Saturation Voltage		$V_{CE(sat)(1)}$	$I_C = 10A, V_{GE} = 15V$	—	1.6	2.2	V
Collector-Emitter Saturation Voltage		$V_{CE(sat)(2)}$	$I_C = 60A, V_{GE} = 15V$	—	2.1	2.7	V
Input Capacitance		$C_{ies}$	$V_{CE} = 10V, V_{GE} = 0, f = 1MHz$	—	3800	—	pF
Switching Time	Rise Time	$t_r$		—	0.35	0.60	μs
	Turn-On Time	$t_{on}$		—	0.46	0.75	
	Fall Time	$t_f$		—	0.25	0.40	
	Turn-Off Time	$t_{off}$		—	0.60	0.70	
Emitter-Collector Forward Voltage		$V_{ECF}$	$I_{EC} = 15A, V_{GE} = 0$	—	1.5	2.0	V
Reverse Recovery Time		$t_{rr}$	$I_F = 15A, V_{GE} = 0$ $di/dt = -20A/\mu s$	—	0.7	2.5	μs
Thermal Resistance		$R_{th(j-c)}$	IGBT	—	—	0.74	°C/W
Thermal Resistance		$R_{th(j-d)}$	Diode	—	—	4.0	°C/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# RGT00TS65D

650V 50A Field Stop Trench IGBT

Datasheet

$V_{CES}$	650V
$I_{C(100^{\circ}C)}$	50A
$V_{CE(sat)} (Typ.)$	1.65V
$P_D$	277W

## ●Features

- 1) Low Collector - Emitter Saturation Voltage
- 2) Low Switching Loss
- 3) Short Circuit Withstand Time 5 $\mu$ s
- 4) Built in Very Fast & Soft Recovery FRD (RFN - Series)
- 5) Pb - free Lead Plating ; RoHS Compliant

## ●Applications

General Inverter  
UPS  
Power Conditioner  
Welder

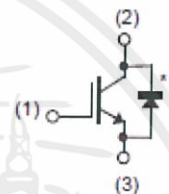
## ●Outline

TO-247N



(1)(2)(3)

## ●Inner Circuit



(1) Gate  
(2) Collector  
(3) Emitter

\*1 Built in FRD

## ●Packaging Specifications

Type	Packaging	Tube
	Reel Size (mm)	-
	Tape Width (mm)	-
	Basic Ordering Unit (pcs)	450
	Packing code	C11
	Marking	RGT00TS65D

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

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	$V_{CES}$	650	V
Gate - Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 30$	V
Collector Current	$T_C = 25^{\circ}C$	$I_C$	85 A
	$T_C = 100^{\circ}C$	$I_C$	50 A
Pulsed Collector Current	$I_{CP}^{*1}$	150	A
Diode Forward Current	$T_C = 25^{\circ}C$	$I_F$	50 A
	$T_C = 100^{\circ}C$	$I_F$	30 A
Diode Pulsed Forward Current	$I_{FP}^{*1}$	150	A
Power Dissipation	$T_C = 25^{\circ}C$	$P_D$	277 W
	$T_C = 100^{\circ}C$	$P_D$	138 W
Operating Junction Temperature	$T_J$	-40 to +175	$^{\circ}C$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-55 to +175	$^{\circ}C$

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

● 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	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 34.7\text{mA}$	5.0	6.0	7.0	V
Collector - Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$	-	1.65	2.1	V
		$T_J = 25^\circ\text{C}$	-	2.2	-	
		$T_J = 175^\circ\text{C}$	-	-	-	

## RGT00TS65D

## 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	$C_{ies}$	$V_{CE} = 30\text{V}$	-	2770	-	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	$t_{d(on)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{CC} = 400\text{V}$	-	42	-	ns
Rise Time	$t_r$	$V_{GE} = 15\text{V}, R_G = 10\Omega$	-	68	-	
Turn - off Delay Time	$t_{d(off)}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-	137	-	
Fall Time	$t_f$	Inductive Load	-	62	-	
Turn - on Delay Time	$t_{d(on)}$	$I_C = 50\text{A}, V_{CC} = 400\text{V}$	-	42	-	ns
Rise Time	$t_r$	$V_{GE} = 15\text{V}, R_G = 10\Omega$	-	68	-	
Turn - off Delay Time	$t_{d(off)}$	$T_J = 175^\circ\text{C}$	-	149	-	
Fall Time	$t_f$	Inductive Load	-	76	-	
Reverse Bias Safe Operating Area	RBSOA	$I_C = 150\text{A}, V_{CC} = 520\text{V}$ $V_P = 650\text{V}, V_{GE} = 15\text{V}$ $R_G = 50\Omega, T_J = 175^\circ\text{C}$	FULL SQUARE			-
Short Circuit Withstand Time	$t_{sc}$	$V_{CC} \leq 360\text{V}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$	5	-	-	$\mu\text{s}$

●FRD 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	-	$\mu\text{C}$

### ●Electrical Characteristic Curves

Fig.1 Power Dissipation vs. Case Temperature

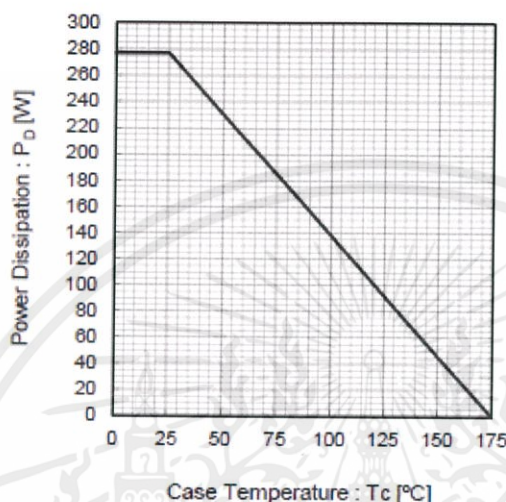


Fig.2 Collector Current vs. Case Temperature

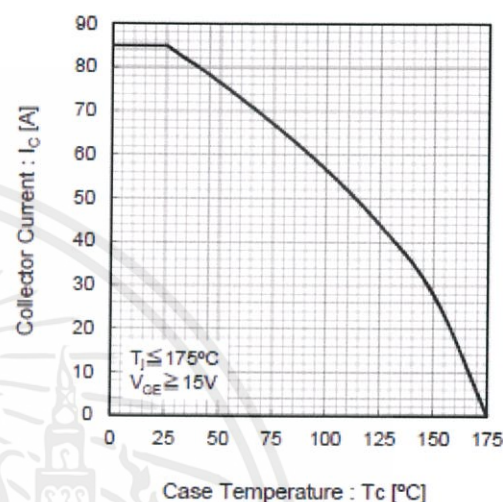


Fig.3 Forward Bias Safe Operating Area

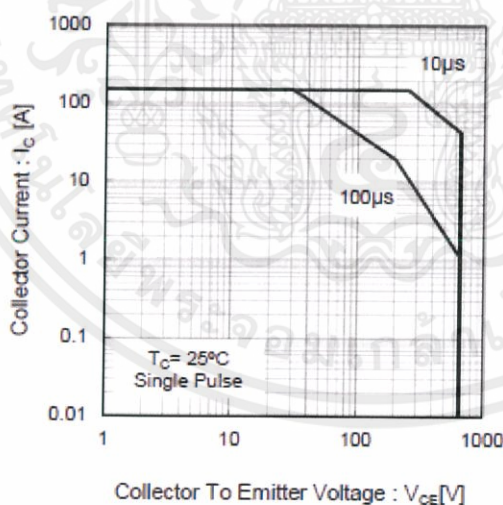
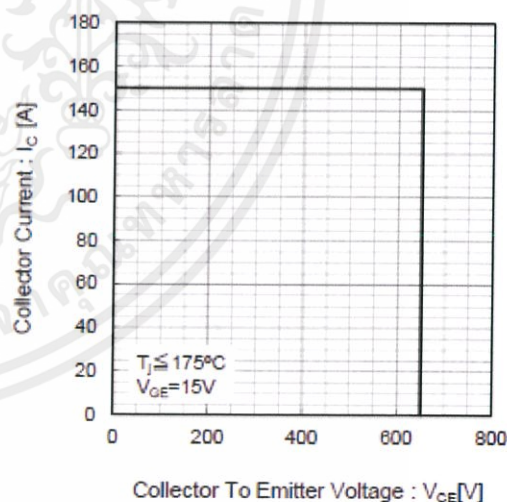


Fig.4 Reverse Bias Safe Operating Area



### ●Electrical Characteristic Curves

Fig.5 Typical Output Characteristics

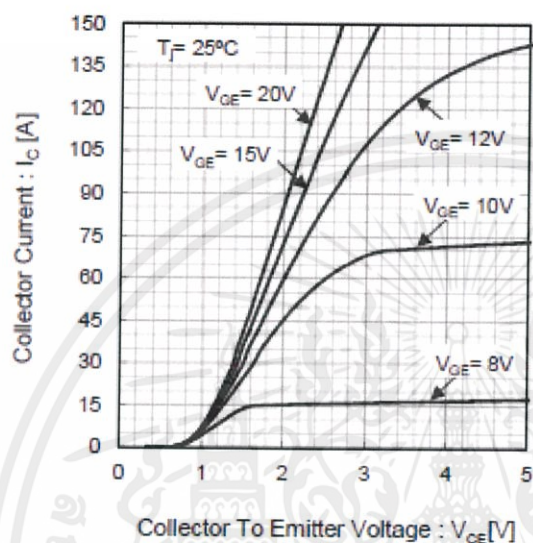


Fig.6 Typical Output Characteristics

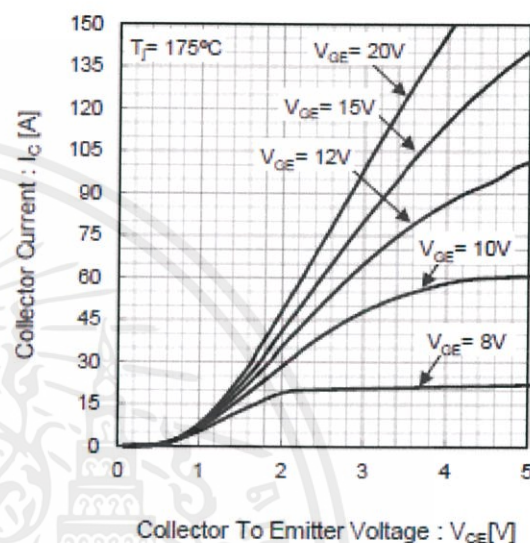


Fig.7 Typical Transfer Characteristics

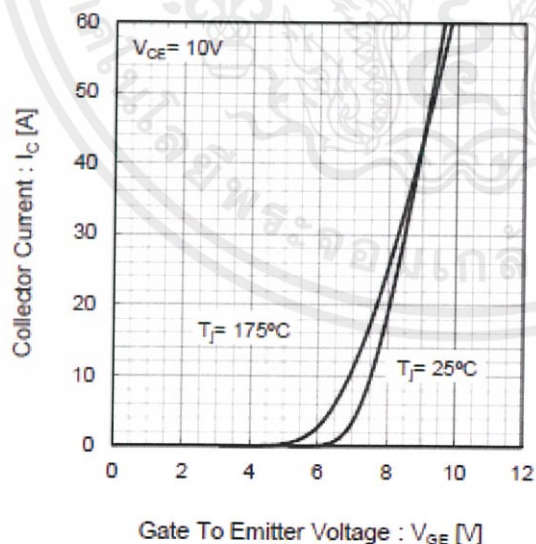
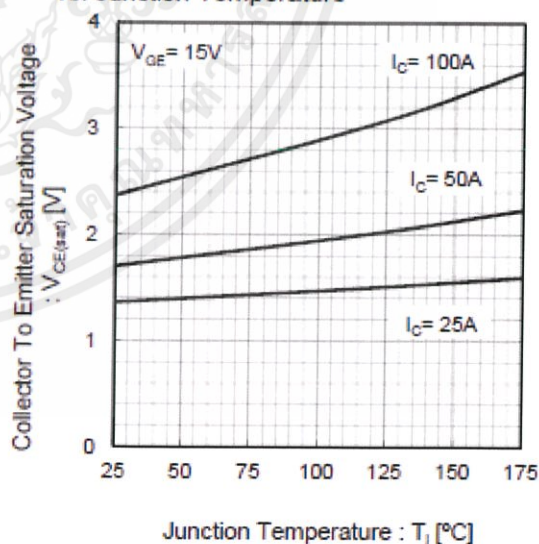


Fig.8 Typical Collector To Emitter Saturation Voltage vs. Junction Temperature



●Electrical Characteristic Curves

Fig.9 Typical Collector To Emitter Saturation Voltage vs. Gate To Emitter Voltage

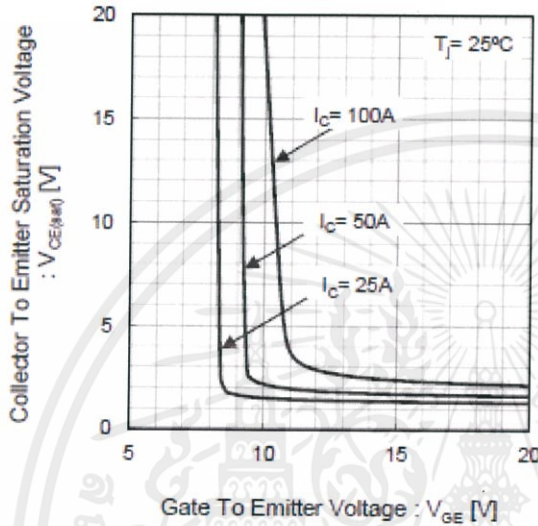


Fig.10 Typical Collector To Emitter Saturation Voltage vs. Gate To Emitter Voltage

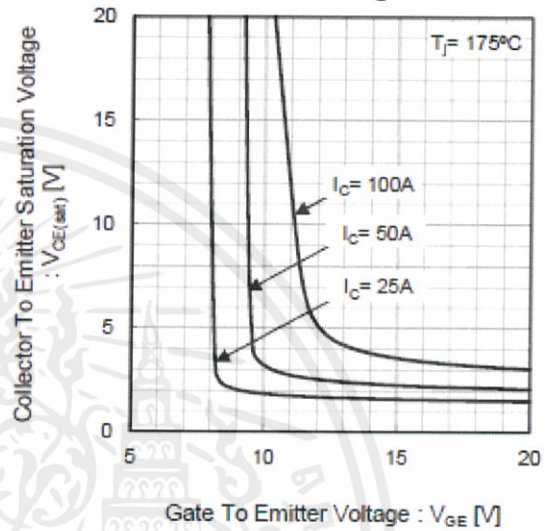


Fig.11 Typical Switching Time vs. Collector Current

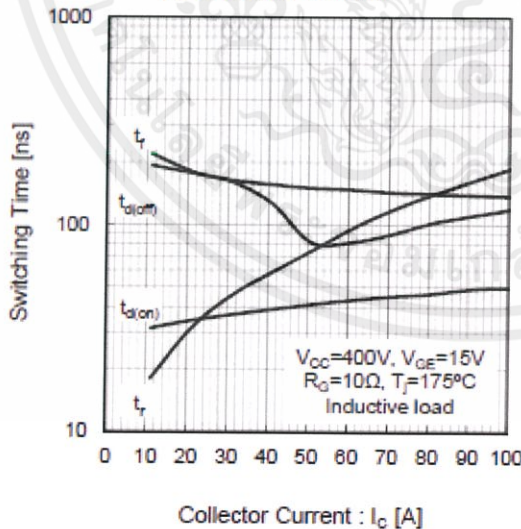
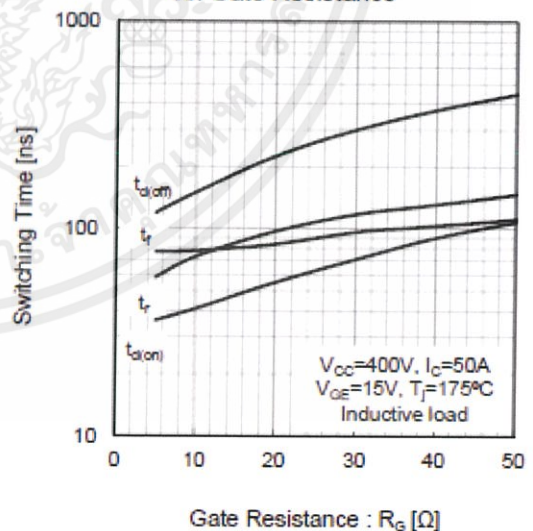


Fig.12 Typical Switching Time vs. Gate Resistance



●Electrical Characteristic Curves

Fig.13 Typical Switching Energy Losses vs. Collector Current

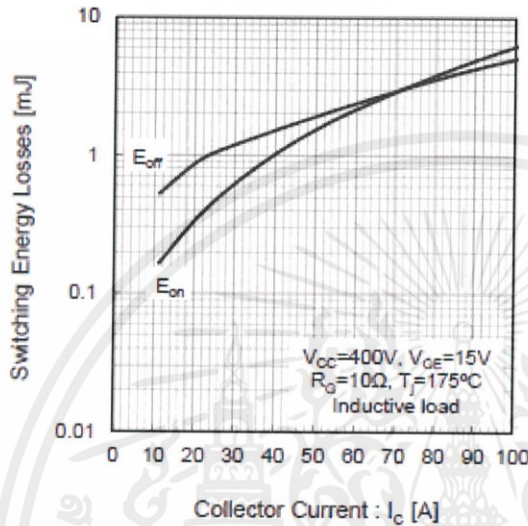


Fig.14 Typical Switching Energy Losses vs. Gate Resistance

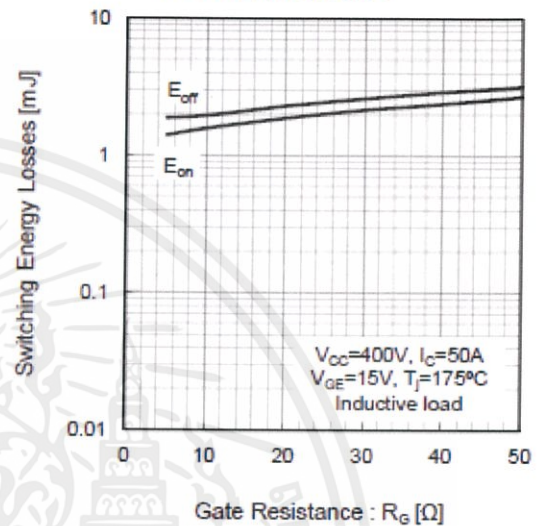


Fig.15 Typical Capacitance vs. Collector To Emitter Voltage

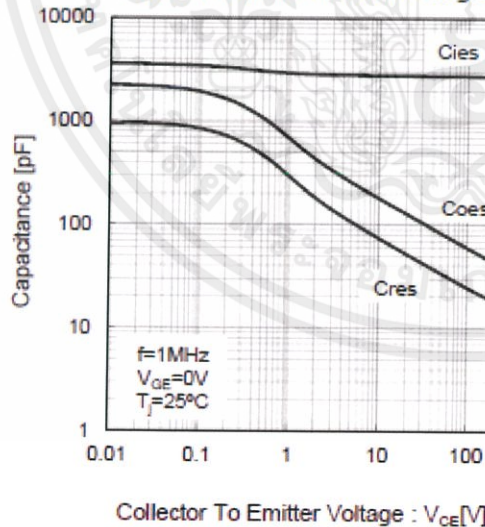
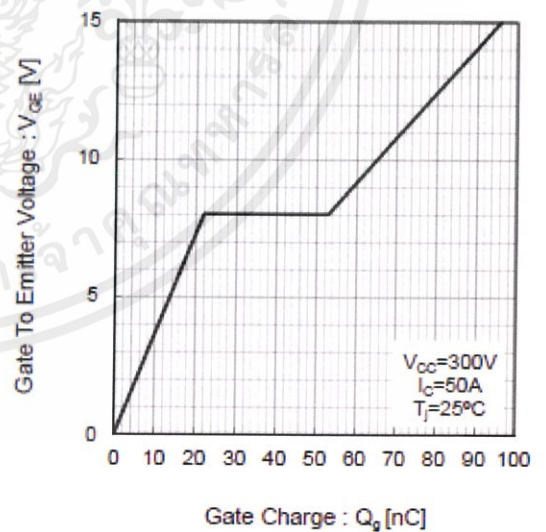


Fig.16 Typical Gate Charge



● Electrical Characteristic Curves

Fig.17 Typical Diode Forward Current vs. Forward Voltage

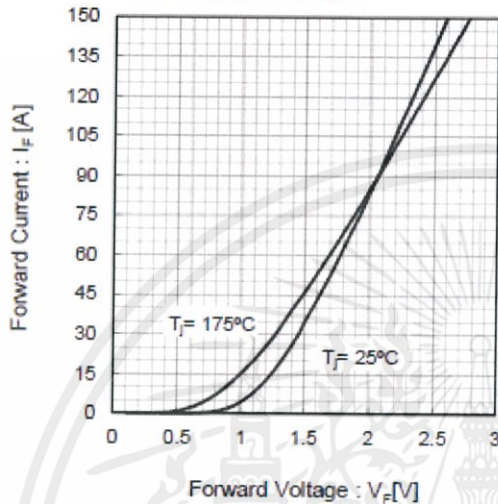


Fig.18 Typical Diode Reverse Recovery Time vs. Forward Current

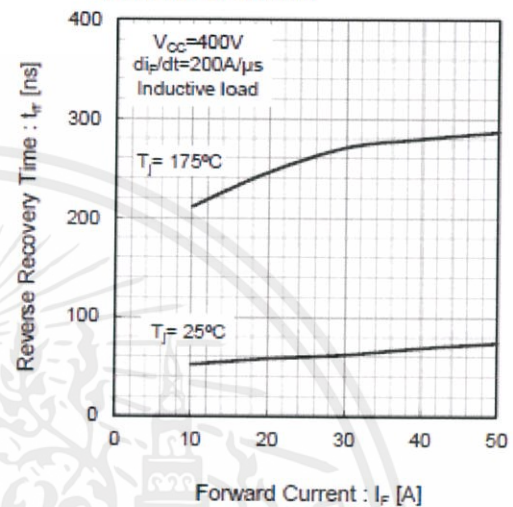


Fig.19 Typical Diode Reverse Recovery Current vs. Forward Current

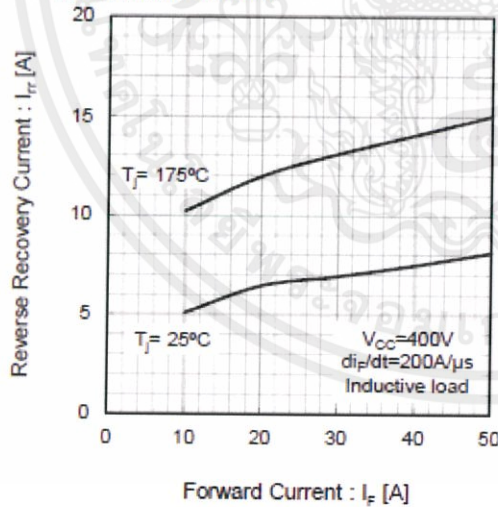
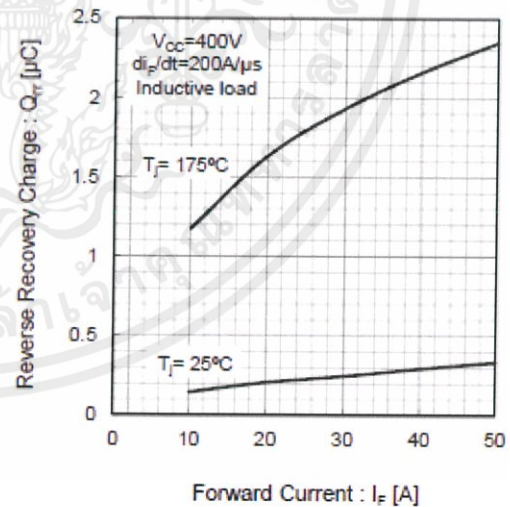


Fig.20 Typical Diode Reverse Recovery Charge vs. Forward Current



●Electrical Characteristic Curves

Fig.21 IGBT Transient Thermal Impedance

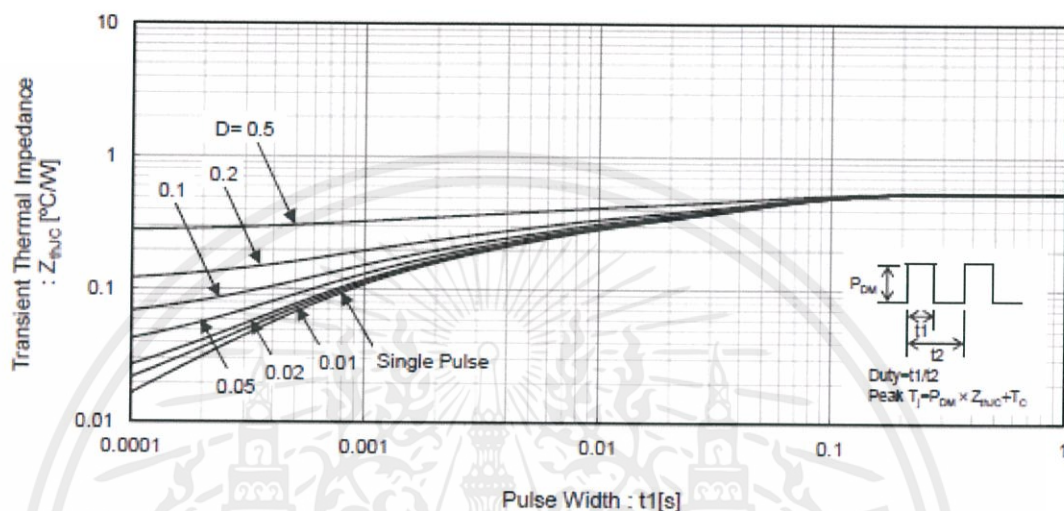
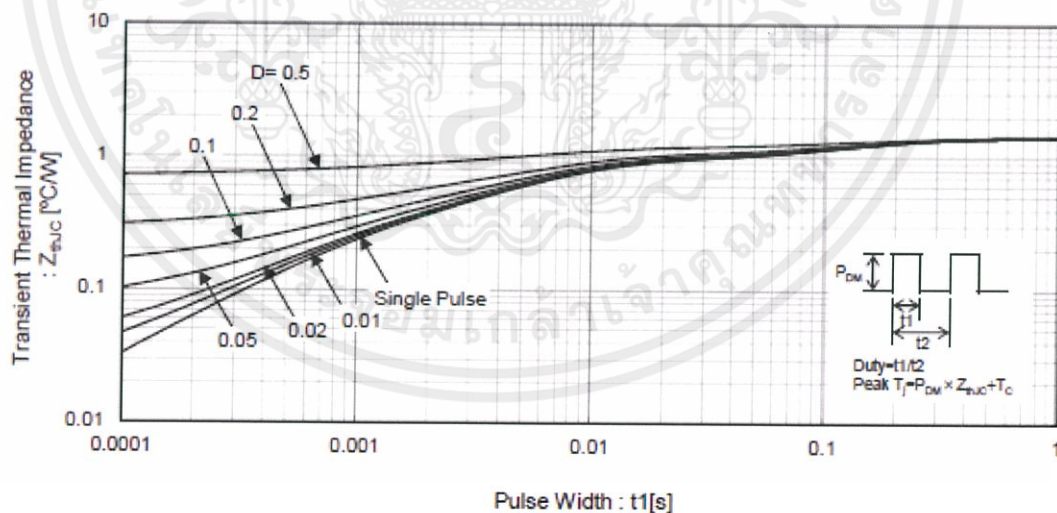


Fig.22 Diode Transient Thermal Impedance



● Inductive Load Switching Circuit and Waveform

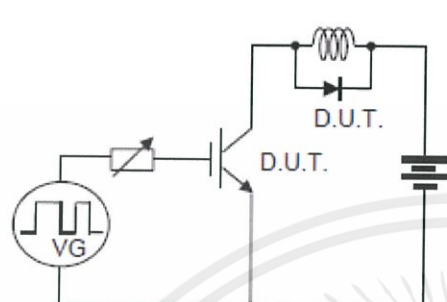


Fig.23 Inductive Load Circuit

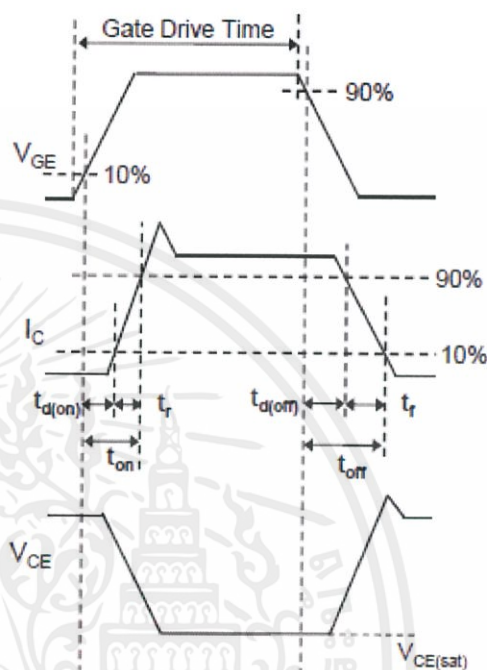


Fig.24 Inductive Load Waveform

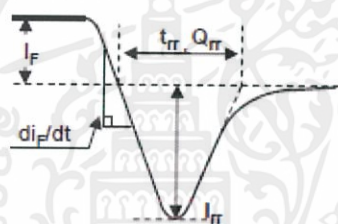


Fig.25 Diode Reverse Recovery Waveform

## ประวัติผู้เขียน



นายปวินท์ ปิยะโสวรรณ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสตรีวิทยา 2

การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายบุญยวีร์ ชยะกุลศิริ

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)๒

การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพิฑูตม์ สิทธานุกูล

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนสารสาสน์วิเทศร่มเกล้า

การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายภานุพงษ์ แซ่อ้วง

การศึกษาระดับมัธยมศึกษา: โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว

การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้