

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิจัยและพัฒนาชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่

โดย

พันเอก รัตติพล ตันยา และคณะ

มิถุนายน 2560

สัญญาเลขที่ RDG5850103

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิจัยและพัฒนาชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่

คณะผู้วิจัย

พ.อ. รัตติพล ตันยา	สำนักวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
พ.ท. อำนาจ สารันต์	สำนักวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
พ.ท. ดร. ประทีป โภคินวงศ์	สำนักวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
พ.ท. กิตติศักดิ์ กาญจนะวสิต	สำนักวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
น.ส. ธนวรรณ มงคลหมู่	สำนักวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
ดร. พิมพา ลิ้มทองกุล	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. ศิวรักษ์ ศิวโมกษธรรม	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. วิศาล ลีลาวิวัฒน์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. จิราวรรณ มงคลทรรศ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. ภูวนารถ ปรมาพจน์	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร. กิตติพงษ์ เกษมสุข	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นาย ภัทรกร รัตนวรรณ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นาย เมทนี กิจเจริญ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นาย พีระพงศ์ ฟักเขียว	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
นาย มานพ มาสมทบ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

สนับสนุน โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายละเอียดโครงการ

สัญญาเลขที่ RDG580103
ชื่อโครงการ (ไทย) การวิจัยและพัฒนาชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่
ชื่อโครงการ (อังกฤษ) Research and Development of Battery Pack and Battery Charger
หัวหน้าโครงการ พันเอกรัตติพล ตันยา
สังกัด สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพบก
ผู้ประกอบการผู้ร่วมทุน ไม่มี
งบประมาณ 3,701,400 บาท
ระยะเวลา 1 สิงหาคม 2558 – 31 มกราคม 2560

Abstract

Current advancement in technology has prompted the usage of electronically and computer controlled instruments and equipments including that used in several munitions. Such electronically and computer controlled instruments/equipments rely on energy sources which the most commonly used one is battery. Cycle life and calendar life of batteries depends on the usage and storage conditions and when out of order, there is no replacement in Thailand and needed to be acquired from aboard which incur a very high cost in defense operation. One example is the battery packs used for the control system for a set of cannon at the Field Artillery Battalion, King's Guard, Fort Paholyothin, Lopburi Province. The original batteries are no longer available for purchasing and thus the cannot cannot be operated. This research team along with the users thus were interested in developing a battery pack prototype including the corresponding charging systems to replace the battery packs that are no longer available with the long term objectives of creating knowledge in Thailand while providing the high quality product with reduced cost and accessilibity to service maintenance.

This project is a collaborative project between the Department of Defense and the Department of Science and Technology. The project involves the development of lithium-ion battery pack and the corresponding charger to be used at the Department of Defence. The work was done in the following steps a. current usage condition data collection and analysis. b. study of commercially available lithium-ion battery cells c. Battery module and pack design and configurations both for cell and module arrangement d. Mechanical design for the container e. Battery management system development f. AC and DC charger. The research has resulted in the prototype battery packs with the following specification: dimension - 340x230x400 mm (LxWxH) Weight - 31 kg, Voltage - 24V, Capacity > 90 Ah with the charging time in the normal mode equals to 4 hrs and fast mode in 3-4 hrs. The charger designed also has a capability to balance the different cells and modules when used in the maintenance mode which will take approximiately 10 hr to finish. The pack and chargers developed in this worked has gone through several international standard testing in terms of properties and safety (TIS/IEC, MIL, EN) in the level of both cells and pack. The estimated cost for the set of battery pack including charger is approximated to be 500,000 to 1,200,000 baht lower than the imported counterpart. The battery sets have been delivered to and tested at the Field Artillery Battalion, King's Guard, Fort Paholyothin, Lopburi Province. At the end of the project, the research team has presented the preliminary results to the Department of Defense Committee and delivered 2 sets of battery pack and chargers to the Field Artillery Battalion, King's Guard, Fort Paholyothin, Lopburi Province for long term field testing. Results from the development and data collected will be used to improve the next version of the battery set and the technology will be transfered to the defense industrial partners who are interested.

Keyword Lithium-ion battery, Battery Pack, Charger, Battery management system

บทคัดย่อ

ปัจจุบันยุทโธปกรณ์ที่มีใช้ในหน่วยงานทหารมักจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ, และหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งการทำงานของยุทโธปกรณ์เหล่านี้อาศัยแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก แบตเตอรี่มีคุณสมบัติและอายุการใช้งานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่, วิธีการเก็บรักษา และวิธีการนำไปใช้งาน เมื่อชำรุดเสียหายทางหน่วยงานต้องจัดซื้อแบตเตอรี่ใหม่ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการจัดซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งในบางกรณีอาจราคาสูง จากการเยี่ยมชมและศึกษาข้อมูลแบตเตอรี่และวิธีใช้งานแบตเตอรี่สำหรับยุทโธปกรณ์ ที่ พล.ป./ป.พัน 31 รอ. พบว่าชุดแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์ควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานจำนวนมากและการจัดซื้อใหม่นั้นมีราคาสูงในระดับล้านบาทขึ้นไป ทางคณะวิจัยร่วมกับหน่วยผู้ใช้ จึงมีแนวคิดที่จะให้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่ รวมระบบชาร์จขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ทดแทนของเดิมที่เสื่อมสภาพโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อ ลดต้นทุนการนำเข้า ประหยัดงบประมาณ มีความสามารถซ่อมบำรุงเองได้ง่าย สร้างองค์ความรู้ด้านการวิจัยพัฒนาแบตเตอรี่ในประเทศ และเป็นการสร้างความร่วมมือด้านการวิจัยระหว่างหน่วยงานวิจัยกระทรวงวิทยาศาสตร์และกระทรวงกลาโหม

ในงานวิจัยนี้คณะวิจัยได้ทำการนำพัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนสำหรับการใช้งานร่วมกับระบบควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ ผ่านการ เก็บข้อมูลสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่เดิมที่ใช้งานอยู่กับปืนใหญ่ ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อทำการคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ออกแบบพัฒนา วงจรควบคุมแบตเตอรี่ ออกแบบ พัฒนาและทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ ออกแบบ พัฒนาและทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกลตาม และสุดท้ายประกอบและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่พร้อมเครื่องชาร์จ ที่มีคุณสมบัติ ขนาด 340x230x400 mm (LxWxH) น้ำหนัก 31 กิโลกรัม 24V/ ความจุ มากกว่า 90 Ah ซึ่งมีระยะเวลาการชาร์จ 6ช.ม. (normal), 3-4ช.ม. (fast) และมีระบบสมดุลความดันเพื่อรักษาสภาพ โดยผ่านการทดสอบคุณสมบัติ และความปลอดภัย ระดับเซลล์ และ ระดับแพ็ค (มอก./IEC, MIL, EN) จากการประเมินราคาเบื้องต้น 500,000 บาท ชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จนี้ ซึ่งคาดว่าถูกกว่าการจัดซื้อจากต่างประเทศอย่างน้อย 500,000 ถึง 1,200,000 บาท ส่งมอบให้ทาง ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน จังหวัดลพบุรี นำไปใช้ในเบื้องต้น และได้รับความพึงพอใจ โดย ก่อนสิ้นสุดโครงการ คณะวิจัยได้นำเสนอข้อมูลให้แก่คณะกรรมการ ทบ. เพื่อให้ทราบในเบื้องต้น และได้การส่งมอบต้นแบบชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ 2 ชุด ตามสัญญาของโครงการให้กับ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน จังหวัดลพบุรี เพื่อนำไปใช้งานจริงในภาคสนามและทำการเก็บข้อมูลระยะยาว ซึ่งคณะวิจัยจะดำเนินการเก็บข้อมูลต่อเนื่องเพื่อพัฒนาคุณภาพของอุปกรณ์ทั้งชุดให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพที่ดีกว่าเดิม รวมถึงมีแผนที่จะขยายผลพัฒนาเพิ่มเติม และถ่ายทอดให้ผู้สนใจในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เครื่องชาร์จ BMS แพ็คแบตเตอรี่

บทสรุปผู้บริหาร

ปัจจุบันยุทโธปกรณ์ที่มีใช้ในหน่วยงานทหารมักจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ, และหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งการทำงานของยุทโธปกรณ์เหล่านี้อาศัยแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก แบตเตอรี่มีคุณสมบัติและอายุการใช้งานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่, วิธีการเก็บรักษา และวิธีการนำไปใช้งาน เมื่อชำรุดเสียหายทางหน่วยงานต้องจัดซื้อแบตเตอรี่ใหม่ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการจัดซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งในบางกรณีอาจราคาสูง

จากการเยี่ยมชมและศึกษาข้อมูลแบตเตอรี่และวิธีใช้งานแบตเตอรี่สำหรับยุทโธปกรณ์ ที่ พล.ป./ป.พัน 31 รอ. พบว่าชุดแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์ควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ขนาด 105 มม. มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานจำนวนมากและการจัดซื้อใหม่นั้นมีราคาสูงในระดับหลายล้านบาท ทางคณะวิจัยร่วมกับหน่วยผู้ใช้ จึงมีแนวคิดที่จะให้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่ รวมระบบชาร์จขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ทดแทนของเดิมที่เสื่อมสภาพโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อ ลดต้นทุนการนำเข้า ประหยัดงบประมาณ มีความสามารถซ่อมบำรุงเองได้ง่าย สร้างองค์ความรู้ด้านการวิจัยพัฒนาแบตเตอรี่ในประเทศ และเป็นการสร้างความร่วมมือด้านการวิจัยระหว่างหน่วยงานวิจัยกระทรวงวิทยาศาสตร์และกระทรวงกลาโหม

ในระยะเวลาของการดำเนินการวิจัยทางคณะวิจัยได้ดำเนินการงานในแต่ละหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

ก. เก็บข้อมูลสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่เดิมที่ใช้งานอยู่กับปืนใหญ่
ข. ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อทำการคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่
ค. ออกแบบ พัฒนา วงจรควบคุมแบตเตอรี่
ง. ออกแบบ พัฒนาและทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ
จ. ออกแบบ พัฒนาและทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล
ฉ. ประกอบเพื่อพัฒนาและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่

ซึ่งทางคณะวิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งานชุดแบตเตอรี่เดิมที่ใช้งานอยู่กับปืนใหญ่ โดยได้ดำเนินการไปเก็บข้อมูลที่จังหวัดลพบุรี ได้ข้อมูลการใช้งานทั้งในภาคสนาม ระหว่างการใช้งานและการเคลื่อนย้ายและการเก็บรักษามาครบถ้วนเพื่อนำข้อมูลมาออกแบบชุดแบตเตอรี่เพื่อทดแทนชุดแบตเตอรี่เดิม ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิคและความสามารถในการจัดหาแบตเตอรี่ประเภทต่างๆและนำมาเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเสร็จสิ้น โดยได้ตัดสินใจที่ใช้แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน ประเภท LCO ยี่ห้อ Toriyama ด้วยเหตุผลด้านพลังงานจำเพาะ ความจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าประจุและกระแสไฟฟ้าขณะปล่อยประจุ ความสามารถในการบรรจุในพื้นที่ ความสามารถในการชาร์จและเคลื่อนย้ายและการบำรุงรักษา ประสิทธิภาพการรักษาความจุไฟฟ้า อายุการใช้งาน ความง่ายในการจัดหา และราคา ในส่วนของการออกแบบชุดแบตเตอรี่นี้ เป็นการออกแบบชุดแบตเตอรี่ให้มีแรงดันคงที่ 24 V และ มีอัตราการปล่อยกระแสปรกติในระดับ 3A ไม่เกิน 10 A และมีความจุประจุมากว่า 90 Ah ในส่วนการออกแบบพัฒนาวงจรควบคุมแบตเตอรี่ ทางคณะวิจัยได้ทำการพัฒนาชุด BMS ทั้งในระดับ Slave BMS และ Master BMS โดยมีความสามารถในการวัด เฝ้าระวัง ปรับสมดุลแรงดัน และระบบป้องกัน โดยมีตัวแปรเช่น กระแส แรงดัน และอุณหภูมิ ให้เซลล์แบตเตอรี่ โมดูลและชุดแบตเตอรี่สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพ สามารถจ่ายกระแสและประจุกระแสได้ในระดับที่ต้องการ มีการบ่งชี้สถานะความพร้อมของการใช้งาน และมีความปลอดภัยผ่านมาตรฐานการทดสอบทางไฟฟ้า และทางกล ทั้งในระดับเซลล์และระดับแพ็ค

การวิจัยพัฒนานี้ได้รวมถึงการพัฒนาระบบควบคุมการจ่ายไฟ (ชุดชาร์จแบตเตอรี่) ไปพร้อมกันด้วย ส่วนของการพัฒนาเครื่องและระบบชาร์จเป็นการพัฒนาเครื่องชาร์จที่สามารถจ่ายได้ทั้งกระแสสลับและกระแสตรง โดยสำหรับการพัฒนาระบบชาร์จแบบกระแสสลับจะมีฟังก์ชั่นการทำงานทั้งในระบบชาร์จปกติ (6 ช.ม.) ระบบชาร์จเร็ว (4 ช.ม.)

และระบบชาร์จแบบรักษาสภาพ (ประมาณ 10 ช.ม.) ในส่วนของการชาร์จแบบกระแสตรงซึ่งเป็นความต้องการของผู้ใช้นั้น ทางคณะวิจัยได้ดำเนินการพัฒนาให้สามารถทำงานได้กับการรับไฟจากแบตเตอรี่อื่นเช่น แบตเตอรี่รถบรรทุก โดยจะสามารถทำการชาร์จได้แบบในระบบการชาร์จปกติเท่านั้นโดยอัตราการชาร์จจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ที่ถูกต่อพ่วง

ด้านการออกแบบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล ทางคณะวิจัยได้ทำการออกแบบกล่องบรรจุ และได้ทำการผลิตเพื่อนำไปประกอบเป็นชุดแบตเตอรี่ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านความร้อนและทางกล โดยชุดแบตเตอรี่ที่ทำการประกอบ ได้ผ่านการทดสอบการใช้งานทั้งด้านประสิทธิภาพ และความปลอดภัย โดยได้ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้านสมรรถนะการปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิห้องตาม มอก. 2218-2548 (IEC61960:2003) ตามสภาวะการใช้งานจริงที่ 3A การทดสอบ EMC (EN 61000-6-2, EN 61000-6-4) การทดสอบทางกลด้านการสั่น (มอก. 2217-2548) การทดสอบทางกลด้านการตก (Drop test, MIL-STD-810G Testmethods 516.6) การทดสอบความสามารถในการกันฝุ่นและฝน (Rain and Dust test, มอก. 513-2553/IEC 60529) อีกทั้งได้ผ่านการทดสอบภาคสนามในหัวข้อ ก. ความสามารถในการประกอบกับตัวปืน ข. ความสามารถในการทำงานร่วมกับระบบเดิมของปืน ค. การทดสอบระบบชาร์จทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ เรียบร้อยแล้ว

คณะวิจัยได้ทำการนำเสนอต้นแบบโดยมีสรุปคุณสมบัติคร่าวดังต่อไปนี้

ขนาด 340x230x400 mm (LxWxH)
น้ำหนัก 31 กิโลกรัม
ประเภทแบตเตอรี่เป็น ประเภทลิเทียมไอออน
24V/ ความจุ >90 Ah (107Ah usable/124.8Ah Battery Capacity)
ระยะเวลาการชาร์จ 6ช.ม. (normal), 3-4ช.ม. (fast) และมีระบบสมดุลความดันเพื่อรักษาสภาพ
ผ่านการทดสอบคุณสมบัติ และความปลอดภัย (มอก./IEC, MIL, EN) ระดับเซลล์ และ ระดับแพ็ค
ราคาประเมินเบื้องต้น 500,000 บาท

ให้แก่คณะกรรมการ ทบ. เพื่อให้ทราบในเบื้องต้น และได้การส่งมอบต้นแบบชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ 2 ชุด ตามสัญญาของโครงการให้กับ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน จังหวัดลพบุรี เพื่อนำไปใช้งานจริงในภาคสนามและทำการเก็บข้อมูลระยะยาว ซึ่งคณะวิจัยจะดำเนินการเก็บข้อมูลต่อเนื่องเพื่อพัฒนาคุณภาพของอุปกรณ์ทั้งชุดให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพที่ดีกว่าเดิม รวมถึงมีแผนที่จะขยายผลพัฒนาเพิ่มเติมและถ่ายทอดให้ผู้สนใจในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำย่อ

BMS	Battery management system
CC	Constant current
CV	Constant voltage
A	Ampere
Ah	Ampere-Hour
AC	Alternativing Current
DC	Direct Current

สารบัญ

หน้า

บทสรุปผู้บริหาร vi

คำย่อ vii

สารบัญ viii

สารบัญตาราง xi

สารบัญรูปภาพ xii

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง 1

1.2 ทางเลือกการแก้ปัญหา 4

1.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 14

1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับเมื่อการดำเนินงานเสร็จสิ้น 14

1.5 แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน 14

1.6 แผนการดำเนินงาน 16

1.7 กระบวนการประสานความร่วมมือ และถ่ายทอดความรู้ 24

1.8 งบประมาณ 25

1.9 เอกสารอ้างอิง 26

บทที่ 2 การศึกษาเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน 28

2.1 การใช้งานของชุดแบตเตอรี่เดิม 28

2.2 รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางกลที่ชุดแบตเตอรี่ต้องถูกกระทำ-ปริมาณแรงสั่นสะเทือนระหว่างใช้งาน 30

บทที่ 3 การคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ 33

3.1 ศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน 33

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ 40

3.3 การออกแบบชุดแบตเตอรี่เบื้องต้น 53

3.4 การจัดซื้อแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน 54

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน 54

3.6 เอกสารอ้างอิง 54

บทที่ 4 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่ 56

4.1 รวบรวมและวิเคราะห์ ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่และแหล่งรับพลังงาน 56

4.2 ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS)....58
4.3 การออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมหลัก (Master BMS)....62
4.4 ระบบควบคุมการจ่ายไฟ (DC to DC converter)....73
4.5 สรุปผลการดำเนินงาน....77
บทที่ 5 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ....79
5.1 รวบรวมข้อมูลความต้องการในการชาร์จไฟฟ้า....79
5.2 การออกแบบระบบการชาร์จและการคัดเลือกอุปกรณ์....79
5.3 การพัฒนา และทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่1....91
5.4 การพัฒนา และทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2....96
5.5 สรุปการดำเนินงาน....107
บทที่ 6 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล....108
6.1 ออกแบบกล่องแบตเตอรี่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์....108
6.2 การสั่งผลิตกล่องแบตเตอรี่-กล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 1....111
6.3 ออกแบบชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่....112
6.4 การออกแบบกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2....113
6.5 การเลือกวัสดุกันกระแทกสำหรับกล่องแบตเตอรี่....114
6.6 สรุปการดำเนินงาน....115
6.7 เอกสารอ้างอิง....115
บทที่ 7 การประกอบเพื่อพัฒนาและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่....116
7.1 ประกอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์....116
7.2 การทดสอบการการจ่ายไฟและการชาร์จ....117
7.3 ทดสอบความทนทานแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G....137
7.4 การทดสอบชุดแบตเตอรี่ด้านการเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า....146
7.5 ทดสอบการเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับตัวปืน....147
7.5 สรุปผลการดำเนินการ....152
บทที่ 8 สรุปผลลัพธ์และประโยชน์ที่ได้รับ....153
8.1 ผลที่ได้จากงานวิจัย....153
8.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย....155
8.3 การนำไปใช้ประโยชน์ของผู้ประกอบการ....156
8.4 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์....156

8.5 ความเป็นไปได้ในการต่อยอดงานวิจัย 156
บทที่ 9 ข้อเสนอแนะ/ข้อมูลเพิ่มเติมจากการนำชุดแบตเตอรี่ต้นแบบไปทดสอบภาคสนาม และแนวทางการปรับปรุงต้นแบบแบตเตอรี่ชุดต่อไป 157
9.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชุดใหม่ที่ทางกองทัพจัดซื้อ 157
9.2 คำแนะนำในการปรับปรุงต้นแบบชุดแบตเตอรี่ของทีมวิจัยจากผู้ใช้ และแนวคิดในการออกแบบชุดต้นแบบชุดต่อไปจากต้นแบบที่ทางคณะวิจัยได้ทำการพัฒนา 158
ภาคผนวก 164
ก. แบบสั่งผลิตกล่องชาร์จ 164
ข. แผนผังการทำงานของเครื่องชาร์จ 167
ค. วงจรอิเล็คทรอนิคส์ควบคุมเครื่องชาร์จ 170
ง. แผนผังวงจรอิเล็คทรอนิคส์ควบคุมเครื่องชาร์จ 172
จ. ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ของเครื่องชาร์จแบบที่ 2 โดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 174
ฉ. แบบสั่งผลิตกล่องแบตเตอรี่ 221
ช. รายงานการทดสอบการป้องกันฝุ่นและน้ำจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 233
ซ. รายงานการทดสอบการสั่นสะเทือนจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 248
ฌ. รายงานการทดสอบการตกจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 258
ญ. ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ของชุดแบตเตอรี่ โดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 266
ฎ. รายการวัสดุ (BOM) ของกล่องแบตเตอรี่ 289
ฏ. รายการวัสดุ (BOM) ของกล่องชาร์จ 293

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่แต่ละประเภท [4] 8
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่แต่ละประเภทสำหรับการใช้งาน 9
ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน 17
ตารางที่ 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน) 23
ตารางที่ 1.5 งบประมาณและคาดการณ์การใช้งบประมาณเป็นงวด (6 เดือน) 25
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่แต่ละประเภท [2-3] 34
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างคุณสมบัติของแบตเตอรี่แต่ละรูปทรง [4-6] 35
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิค และราคาของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อต่างๆในท้องตลาด [6-11] 37
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางเทคนิค ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อต่างๆในท้องตลาด [6-11] 38
ตารางที่ 3.5 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อ/ชนิดเบื้องต้น 39
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แบตเตอรี่ 3 ยี่ห้อ ที่ถูกพิจารณาเลือกเพื่อวิเคราะห์ทดสอบ [1-3] 41
ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 50
ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิห้อง 51
ตารางที่ 3.9 สรุปผลการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักร 52
ตารางที่ 4.1 การจัดตำแหน่งขาของ FS312F-P: One cell Lithium-ion/polymer battery protection IC 59
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลจำเพาะของ FS312F-P: One cell Lithium-ion/polymer battery protection IC 60
ตารางที่ 4.3 การจัดตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ 65
ตารางที่ 4.4 รายการอุปกรณ์ Master BMS 66
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการควบคุมการสั่งเปิด-ปิด การทำงานของ DC/DC converter 74
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์ 75
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดันขาออกของ DC/DC converter เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ของ DC/DC converter 75
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการป้องกันการจ่ายกระแสเกินของ DC/DC converter 76
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ DC/DC converter 76
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเครื่องชาร์จสำหรับการชาร์จเร็ว 4 ยี่ห้อ 83
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบเครื่องชาร์จสำหรับการชาร์จปกติ 4 ยี่ห้อ 84
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงผลการทดสอบ EMC เครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 106
ตารางที่ 7.1 ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลจำนวน 30 โมดูลสำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ 128
ตารางที่ 7.2 ค่าความจุไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่และเวลา สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ 137
ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบป้องกันฝุ่นและน้ำจากทางสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 139
ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบป้องกันน้ำจากทางศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 140
ตารางที่ 7.5 เครื่องมือสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน 141
ตารางที่ 7.6 Procedure IV - Transit Drop 143
ตารางที่ 7.7 ตารางแสดงผลการทดสอบ EMC เครื่องชาร์จรุ่นที่2 146

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ปืนใหญ่ ขนาด 105 mm และแบตเตอรี่สำหรับปืนใหญ่ 1
รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมแบตเตอรี่ 3
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ตั้งแต่ระดับเซลล์ไปสู่การใช้งาน [1] 5
รูปที่ 1.4 ตัวอย่างความเร่งทางกลที่วัดได้จากแรงกระแทก [18] 13
รูปที่ 2.1 ลักษณะของแบตเตอรี่เดิม 28
รูปที่ 2.2 ก) แสดงตำแหน่งติดตั้งของปืนใหญ่ และ ข) แสดงตำแหน่งจุดยึดของแบตเตอรี่ 28
รูปที่ 2.3 ก) รูปแสดงเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) และ ข) รูปแสดงตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องวัดความเร่งบนกล่องแบตเตอรี่ 30
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาขณะยิงปืนใหญ่ 31
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่งที่เกิดขึ้นขณะยิงปืนใหญ่และเวลา 32
รูปที่ 2.6 รูปถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยแสงอินฟราเรด 32
รูปที่ 3.1 เซลล์แบตเตอรี่รูปแบบต่างๆ (ก) เซลล์แบบทรงกระบอก (ข) เซลล์แบบถุงกาแฟ (ค) เซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า 34
รูปที่ 3.2 กลุ่มการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ 3 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 16 เซลล์ 42
รูปที่ 3.3 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 43
รูปที่ 3.4 รางถ่านที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 43
รูปที่ 3.5 วัฏจักรอุณหภูมิในการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูง 44
รูปที่ 3.6 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิห้อง 44
รูปที่ 3.7 รางถ่านและเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง 44
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama สำหรับวัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าใน 1 รอบ 45
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama สำหรับวัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าด้วยรูปแบบการใช้งานจริงใน 1 รอบ 46
รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ กับค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Smasung และ Toriyama 47
รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุของเซลล์แบตเตอรี่ที่ 9 และ 12 ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรที่ 45 องศาเซลเซียส 49
รูปที่ 3.12 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (Discharge capacity) ของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 ทั้ง 3 ยี่ห้อ 50
รูปที่ 3.13 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยกระแสและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิห้อง ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 4 ยี่ห้อ (ก) Panasonic (ข) Samsung (ค) Toriyama 51
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบหลักภายในชุดแบตเตอรี่ 57
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเชื่อมต่อแบตเตอรี่โมดูล (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านล่าง 57
รูปที่ 4.3 ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) และสายไฟที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่โมดูล 58
รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบหลักของระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) ที่เลือกใช้ 58
รูปที่ 4.5 แผนภาพการต่อเชื่อม Battery protection IC รุ่น ICFS312F-P กับส่วนอื่นๆ 59

รูปที่ 4.6 การออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบจัดการลูกข่าย 60
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการป้องกันการปล่อยประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overdischarge protection) ..61
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการป้องกันการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด และการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า 62
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบอุณหภูมิ เมื่อเกิดการบาลานซ์เซลล์แบตเตอรี่ 62
รูปที่ 4.10 ส่วนประกอบของระบบควบคุมหลัก และอุปกรณ์ตรวจสอบ (sensor) ต่างๆ 63
รูปที่ 4.11 วงจรบอร์ด Master BMS version 1.1 69
รูปที่ 4.12 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.1 69
รูปที่ 4.13 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.1 70
รูปที่ 4.14 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.2 72
รูปที่ 4.15 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.2 72
รูปที่ 4.16 DC/DC converter GAIA สำหรับระบบควบคุมการจ่ายไฟ 73
รูปที่ 4.17 การทดสอบ DC/DC converter 74
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างรูปแบบการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ สำหรับชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ชั่วโมง 24 โวลต์ (ก) ฟังก์ชันการชาร์จเร็ว (ข) ฟังก์ชันการชาร์จปกติ 81
รูปที่ 5.2 ระบบการชาร์จรุ่นที่1.1 81
รูปที่ 5.3 เครื่องชาร์จที่พิจารณาเลือก (ก) ยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB1000-24 (การชาร์จเร็ว) (ข) ยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB600-24 (การชาร์จปกติ) 85
รูปที่ 5.4 การทดสอบเครื่องชาร์จ 85
รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบเครื่องชาร์จยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB600-24 (การชาร์จปกติ) (ก) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 1 (ข) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 2 (ค) แรงดันรวมของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จ 87
รูปที่ 5.6 ระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.2 87
รูปที่ 5.7 การทดสอบการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) 88
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบการชาร์จด้วย อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (ก) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 1 (ข) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 2 (ค) แรงดันรวมของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จ 89
รูปที่ 5.9 แรงดันรวมเฉลี่ยของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จเฉลี่ย จากการทดสอบการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 89
รูปที่ 5.10 ระบบการชาร์จรุ่นที่2 91
รูปที่ 5.11 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่1.1 92
รูปที่ 5.12 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่1.2 93
รูปที่ 5.13 ส่วนประกอบกล่องชาร์จแบตเตอรี่ รุ่นที่1.2 93
รูปที่ 5.14 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่1.3 94
รูปที่ 5.15 เครื่องชาร์จรุ่นที่1 94
รูปที่ 5.16 เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รุ่นที่1 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง 94
รูปที่ 5.17 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่2 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง 96
รูปที่ 5.18 หลักการประกอบอุปกรณ์ภายในกล่องชาร์จ รุ่นที่ 2 96

รูปที่ 5.19 แผนภาพการชาร์จด้วยฟังก์ชันการชาร์จต่างๆ (ก) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ฟังก์ชันการชาร์จปกติ และฟังก์ชันการชาร์จในโหมดซ่อมบำรุงในช่วงแรก (ข) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ฟังก์ชันการชาร์จเร็ว (ค) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงฟังก์ชันการในโหมดซ่อมบำรุงในช่วงที่แรงดันสูงกว่า 28.8 โวลต์ (ง) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 99
รูปที่ 5.20 แผนภาพการต่อเชื่อมของอุปกรณ์ภายในเครื่องชาร์จรุ่นที่2 100
รูปที่ 5.21 เครื่องชาร์จรุ่นที่2 101
รูปที่ 5.22 เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รุ่นที่1 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง 102
รูปที่ 5.23 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [PTEC] 103
รูปที่ 5.24 การทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่2 ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) 104
รูปที่ 6.1 กล่องแบตเตอรี่แบบเดิม 108
รูปที่ 6.2 รูปร่างและขนาดของกล่องแบตเตอรี่แบบใหม่ 108
รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยใช้แรงคงที่ขนาด 100 กิโลกรัม 109
รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์จ่ายไฟ 110
รูปที่ 6.5 ภาพของตัวล็อคของต้นแบบกล่องแบตเตอรี่ 111
รูปที่ 6.6 แบบสั่งผลิตเบื้องต้นของกล่องแบตเตอรี่ 111
รูปที่ 6.7 รูปถ่ายของต้นแบบแบตเตอรี่กล่องที่ 1 112
รูปที่ 6.8 รูปถ่ายของชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่ และแบบจำลอง 3 มิติในคอมพิวเตอร์ 112
รูปที่ 6.9 รูปถ่ายของชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการสั่นสะเทือน 113
รูปที่ 6.10 โฟมพอลิยูรีเทน [1] 115
รูปที่ 6.11 โฟม EVA [2] 115
รูปที่ 7.1 แผนภาพแสดงส่วนประภายในของกล่องแบตเตอรี่ 116
รูปที่ 7.2 รูปถ่ายแสดงลำดับการประกอบกล่องแบตเตอรี่สมบูรณ์ 117
รูปที่ 7.3 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 119
รูปที่ 7.4 ชุดแบตเตอรี่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 119
รูปที่ 7.5 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของ MCU Converter, Diode และ Polyswitch 120
รูปที่ 7.6 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในตู้อบ (Ambient) และอุณหภูมิของ DC/DC converter 120
รูปที่ 7.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 121
รูปที่ 7.8 ความจุไฟฟ้าแบบประจุ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 121
รูปที่ 7.9 อุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 122
รูปที่ 7.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 123
รูปที่ 7.11 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 123
รูปที่ 7.12 อุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 124
รูปที่ 7.13 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบแบตเตอรี่โมดูล ที่อุณหภูมิห้อง 126
รูปที่ 7.14 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ 126

รูปที่ 7.15 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการปล่อยประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ 127
รูปที่ 7.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ 127
รูปที่ 7.17 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบประจุกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องชาร์จ 129
รูปที่ 7.18 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ 130
รูปที่ 7.19 แรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ 130
รูปที่ 7.20 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง 131
รูปที่ 7.21 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง 132
รูปที่ 7.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง 132
รูปที่ 7.23 กระแสไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ .. 134
รูปที่ 7.24 แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ .. 134
รูปที่ 7.25 กระแสไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะปล่อยประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ 135
รูปที่ 7.26 แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะปล่อยประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ 135
รูปที่ 7.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test 136
รูปที่ 7.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test 136
รูปที่ 7.29 การทดสอบ IEC standard 60529 (IP Code) ที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 137
รูปที่ 7.30 แผนภูมิภาพแสดงรายละเอียดของรหัส IP 138
รูปที่ 7.31 การทดสอบโดยใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง 140
รูปที่ 7.32 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน ที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 141
รูปที่ 7.33 แสดงความเร่งและการเคลื่อนที่ระหว่างการทดสอบการสั่นสะเทือน 142
รูปที่ 7.34 รูปถ่ายแสดงการตกทั้ง 6 ด้านของกล่องแบตเตอรี่ และ ความเร่งระหว่างตก 145
รูปที่ 7.35 ถอดแบตเตอรี่เดิมที่ติดมากับตัวปืน เพื่อติดตั้งแบตเตอรี่ของทางทีมงาน 147
รูปที่ 7.36 จอแสดงสถานะหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ของทางทีมงาน 147
รูปที่ 7.37 การส่งมอบต้นแบบ และอบรมการใช้งาน เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ.2559 148
รูปที่ 7.38 การติดตามการใช้งานต้นแบบ เมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ.2560 149
รูปที่ 7.39 แบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ (ก) G003 (ข) G004 149
รูปที่ 7.40 การส่งมอบต้นแบบกล่องชาร์จรุ่นที่2 และการสาธิตการใช้งาน 150
รูปที่ 7.41 การทดสอบต่อเชื่อมต้นแบบชุดแบตเตอรี่กับตัวปืนเบื้องต้น (วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2560)..... 150
รูปที่ 7.42 การนำเสนอต้นแบบต่อคณะผู้เชี่ยวชาญ สกว. (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560)..... 151

รูปที่ 7.43 การทดสอบยิงปืนใหญ่ด้วยชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ มรกต12024V01 (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560) 152
รูปที่ 7.44 การเก็บข้อมูลของชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ มรกต12024V01 ขณะทดสอบยิงปืนใหญ่ (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560)..... 152
รูปที่ 8.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบของต้นแบบชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนาเทียบกับชุดแบตเตอรี่เดิม 153
รูปที่ 8.2 รายละเอียดโดยคร่าวของต้นแบบชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา 154
รูปที่ 8.3 คุณสมบัติเปรียบเทียบของต้นแบบเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่พัฒนาเทียบกับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่เดิม 154
รูปที่ 8.4 รายละเอียดโดยคร่าวของต้นแบบเครื่องชาร์จชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา..... 155
รูปที่ 9.1 ระบบการยึดแบบเดิมที่ติดมากับตัวปืน..... 157
รูปที่ 9.2 เครื่องชาร์จที่มาพร้อมกับแบตเตอรี่ที่ซื้อมาใหม่จากต่างประเทศ 158
รูปที่ 9.3 ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดที่ 1..... 159
รูปที่ 9.4 การประยุกต์ใช้ชุดตัวเสื้อสำหรับแบตเตอรี่สำเร็จรูป..... 159
รูปที่ 9.5 ตำแหน่งของแผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลสูงของโมดุลเวอร์ชั่นหนึ่ง 160
รูปที่ 9.6 การเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนตำแหน่งและการเพิ่มจำนวนช่องทาง..... 161
รูปที่ 9.7 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นเชื่อมต่อไฟฟ้า 162
รูปที่ 9.8 แนวทางการออกแบบโมดุลแบตเตอรี่เวอร์ชั่นสอง 162
รูปที่ 9.9 แผ่นนำไฟฟ้าสำเร็จรูปแบบมี Slot เพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมแบบ Spot Welding 163

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

เนื่องจากปัจจุบันยุทโธปกรณ์ที่มีใช้ในหน่วยงานทหารมักจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ, และหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์เป็นส่วนประกอบ และส่วนประกอบดังกล่าวต้องอาศัยแหล่งพลังงานเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ โดยแหล่งพลังงานดังกล่าวมักจะมาจากแบตเตอรี่เป็นหลักแต่เนื่องจากแบตเตอรี่นั้นมีคุณสมบัติและอายุการใช้งานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์แบตเตอรี่, วิธีการเก็บรักษา, และวิธีการนำไปใช้งาน เช่น การนำแบตเตอรี่ไปติดตั้งใช้งานกับยุทโธปกรณ์ที่มีแรงสั่นสะเทือน (Vibration) หรือ แรงกระแทกชั่วขณะ (Shock) สูง ๆ อาจจะทำให้ขั้วแบตเตอรี่หรือจุดต่อสายไฟต่างๆ เกิดรอยร้าวได้และทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ ถ้าเป็นแบตเตอรี่ที่สามารถประจุแบตเตอรี่ใหม่ได้ วิธีการประจุแบตเตอรี่ก็จะมีผลต่อการรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยเช่นกัน เมื่อมีการชำรุดและเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ก็จะส่งผลให้หน่วยงานทหารไม่สามารถใช้งานยุทโธปกรณ์ได้หรือใช้ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายจะต้องจัดซื้อแบตเตอรี่ใหม่จากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก

จากการเยี่ยมชมและศึกษาข้อมูลแบตเตอรี่และวิธีใช้งานแบตเตอรี่สำหรับยุทโธปกรณ์ ที่ พล.ป./ป.พัน 31 รอ. (รูปที่ 1.1) พบว่าชุดแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์ควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ขนาด 105 มม. มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานจำนวนมากและการจัดซื้อใหม่นั้นมีราคาสูงในระดับหลายล้านบาท ทาง สวพ. ทบ จึงมีแนวคิดที่จะให้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาแบตเตอรี่ขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ทดแทนของเดิมที่เสื่อมสภาพ



รูปที่ 0.1 ปืนใหญ่ ขนาด 105 mm และแบตเตอรี่สำหรับปืนใหญ่

โดยปืนใหญ่เบากระสุนวิถีโค้ง แบบ 49 ขนาด 105 มม.เอ็ม 119 (ปบค. 49 ขนาด 105 มม. M119 หรือ 105 มม. Light Gun 119) นั้น ทบ. ได้จัดหาตามโครงการตอบแทนกลับคืนเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ปี 2549 – 2550 โดยบริษัท BAE SYSTEMS จำนวนทั้งสิ้น 22 กระบอก มีรายละเอียดส่วนประกอบ ดังนี้ [1]

1. รถศูนย์อำนวยการยิงกองร้อยแบบยูนิมอก (Unimog) พร้อมติดตั้งระบบวิทยุและระบบคอมพิวเตอร์อำนวยการยิงระดับกองร้อย
2. ปืนใหญ่เบากระสุนวิถีโค้งแบบ 49 ขนาด 105 มม. เอ็ม 119 พร้อมติดตั้งระบบชี้ทิศอัตโนมัติ LINAPS และจอแสดงผลประจำหมู่ปืน FDDU

3. เครื่องมือกำหนดที่ตั้งเป้าหมายแบบดิจิตอล DFOS ประกอบด้วยกล้องตรวจการณ์แบบ Vector 21 Laser Range Finder กล้องตรวจการณ์ในเวลากลางคืน NVG เครื่องมือกำหนดพิกัดจากดาวเทียม GPS เครื่องมือวัดมุม Goniometer ซึ่งเครื่องมือคอมพิวเตอร์ประจำหมู่ตรวจการณ์จะเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์อำนวยการยิงกองร้อย LACS

<u>ข้อมูลทางเทคนิคของปืน</u>

- น้ำหนัก

น้ำหนักพร้อมยิง 1,977 กิโลกรัม
น้ำหนักไม่รวมฐานยิง 1,883 กิโลกรัม

- รถที่ใช้ลากจูง : สามารถลากจูงด้วยรถที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 750 กิโลกรัมขึ้นไป เช่น รถตระกูล HMMWV, M1069, M1037 รวมทั้งรถปืน M35 ที่ สพ.ทบ. ได้ทำการปรับปรุงขอเกาะห่วงพ่วงปืนให้สามารถพ่วงปืนได้
- ความยาวขณะลางกจูงในตำแหน่งพับท้าย (Folded Position) 4,877 มิลลิเมตร
- ความสูงขณะลางกจูงในตำแหน่งพับท้าย (Folded Position) 1,486 มิลลิเมตร
- เครื่องมือหาพิกัด/ตั้ง ป.ตรงทิศอัตโนมัติ แบบ LINAPS (Laser Inertial Automatic Pointing System)
- ระยะยิงไกลสุด 11.5 กิโลเมตร
- อัตราการยิงปกติ 6 นัด/นาที (นานถึง 2 นาที)
- อัตราการยิงต่อเนื่อง 3 นัด/นาที (นานถึง 30 นาที)
- อายุลำกล้อง 7,500 นัด หรือเทียบเท่า
- กล้องเล็ง แบบ Trilux L7A1
- กล้องข้อศอก แบบ L8A1
- มุมยิงสูงสุด 1,244 มิลเลียม
- มุมยิงต่ำสุด - 90 มิลเลียม
- มุมส่ายทางทิศซ้าย/ขวา 200 มิลเลียม (ใช้ฐานยิง plateform ส่ายได้ 6,400 มิลเลียม)

<u>กระสุนปืนใหญ่และชนวนที่ใช้</u>

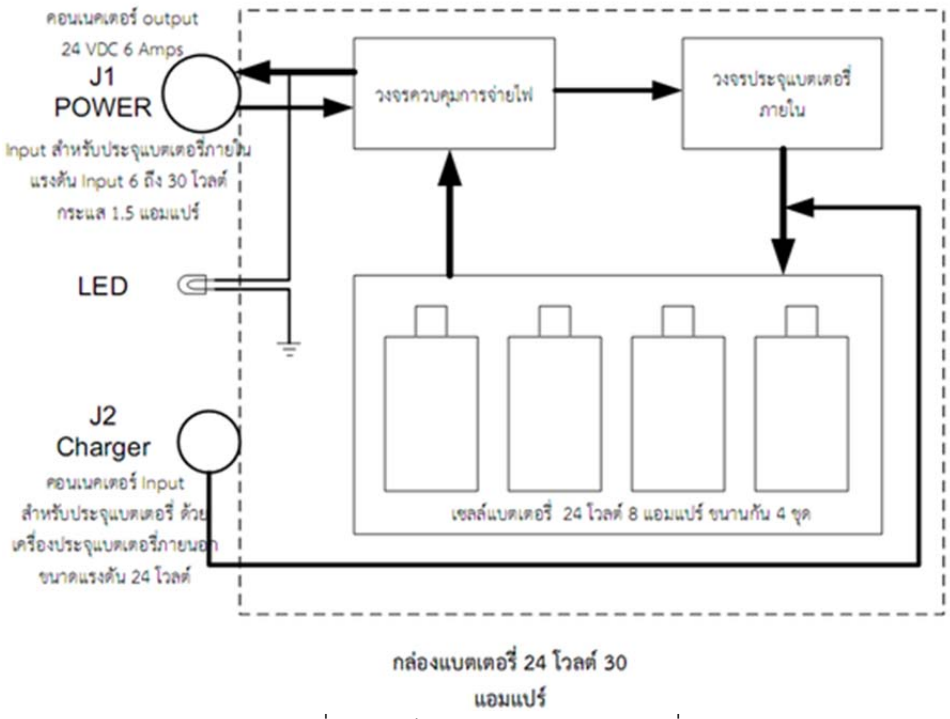
- กระสุนระเบิดแบบ L41, L57 (ประเทศสหราชอาณาจักร) กระสุนระเบิดแบบ M1 SERIES (ประเทศสหรัฐอเมริกา) ชนวนที่ใช้ M51, M500, M513, M520, L27; L62, L66, L85
- กระสุนควัน WP แบบ L42 (ประเทศสหราชอาณาจักร) ชนวนที่ใช้ M51, M520, M557, L85
- กระสุนควันขับทางท้ายแบบ L50 (ประเทศสหราชอาณาจักร) ชนวนที่ใช้ L34, L92
- กระสุนส่องสว่างแบบ L55 (ประเทศสวีเดน) ชนวนที่ใช้ L81

<u>คุณลักษณะของชุดแบตเตอรี่</u>

ชุดแบตเตอรี่ที่พล.ป./ป.พัน ๓๑ รอ. ใช้อยู่มีคุณลักษณะ และลักษณะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ตามรายละเอียดดังนี้(รูปที่ 1.2)

- แบตเตอรี่ภายใน: ชนิดNickel Cadmium
    - การบรรจุแบตเตอรี่: 4 pack 24V ต่อแบบขนาน และมีการฉีดโฟมภายใน
    - Normal Capacity: 30 Ah (4P – 8Ah)

- Normal Voltage: 24 VDC
- Output Current: 6 Amps
- ขนาดของชุด: 25 x 29 x 25 ซม.
- วงจรประจุแบตเตอรี่ภายใน: Input Voltage 9 to 30 VDC, Typical Input Current 1.5 Amps
- อายุการใช้งาน: ประมาณ 2 ปี



รูปที่ 0.2 บล็อกไดอะแกรมแบตเตอรี่

<u>ลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่</u>

- ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับระบบบังคับปืนโดยติดตั้งไว้บนตัวปืนด้านหลัง ตามรูปที่ 1.1 ซึ่งการยิงปืนจะมีลักษณะยิงแล้วเคลื่อนที่เพื่อป้องกันการถูกโจมตีกลับจากฝ่ายตรงข้าม
- ใช้งานภายได้แรงสั่นสะเทือนสูง เช่นสภาวะรับแรงสั่นสะเทือนจากการยิงปืนใหญ่, แรงสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนย้าย
- ความถี่การใช้งาน(กรณีซ้อมรบ) มีลักษณะการนำออกมาใช้ 1 ครั้ง แล้วเก็บรักษาไว้ประมาณ 3 เดือนแล้วนำกลับมาใช้ซ้อมรบอีกเมื่อถึงเวลาซ้อมรบ

Normal Capacity และ Normal Voltage เกิดจากการนำเซลล์แบตเตอรี่ Nickel-Cadmium 1.2 V 2000 mA มาต่อขนานและอนุกรมกันจนได้ Normal Capacity 30 Ah และ Normal Voltage 24 VDC ปัจจุบันแบตเตอรี่ดังกล่าวได้เสื่อมลงแล้ว และเนื่องจากราคาที่สูงมากของแบตเตอรี่แบบเดิมที่หากซื้อมาทดแทนจะมีราคาสูง ทางหน่วยจึงได้นำแบตเตอรี่รถบรรทุกขนาด 24V 100 Ah แบบเติมน้ำกลั่นมาประยุกต์ใช้แทนเป็นการชั่วคราว

แม้การใช้แบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วที่ใช้สำหรับรถบรรทุกนั้นจะสามารถทำให้อุปกรณ์ควบคุมปืนใหญ่ทำงานได้ชั่วคราว หากยังมีข้อจำกัดทั้งด้านอายุการใช้งานที่สั้นและขนาดที่ใหญ่กว่าแบตเตอรี่ของเดิมทำให้ไม่เหมาะกับการเคลื่อนย้ายเมื่อใช้งานจริง อีกทั้งแบตเตอรี่ดังกล่าวต้องมีการบำรุงรักษามากจากการต้องดูแลเติมน้ำกลั่นและต้องให้แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะที่มีประจุเต็มอยู่เสมอ อีกทั้งอาจมีไอระเหยของกรดระหว่างการใช้งาน

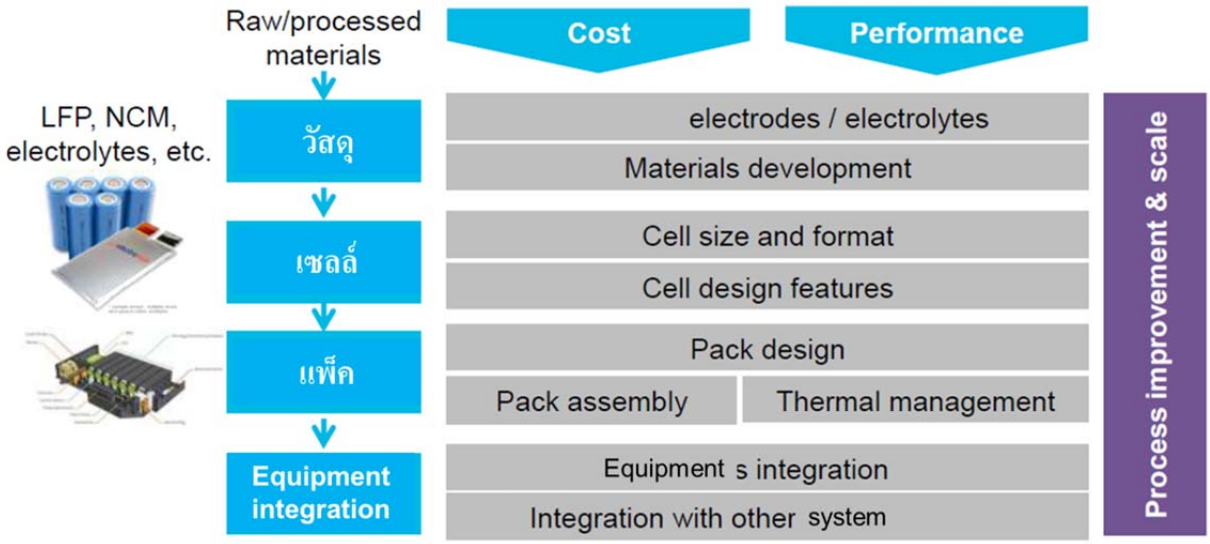
ทีมวิจัยและพัฒนาจากทาง สวทช. ซึ่งมีประสบการณ์ด้านการพัฒนา ผลิตและทดสอบแบตเตอรี่ประเภทชาร์จไฟใหม่ได้มากก่อนหากยังไม่เคยได้ผลิตเป็นต้นแบบพัฒนาที่ใช้ในประเทศสำหรับการทหาร จึงมีแนวคิดที่จะวิจัยและพัฒนาร่วมกับหน่วยทหารผลิตต้นแบบชุดแบตเตอรี่ ซึ่งรวมถึงชุดแบตเตอรี่ (battery pack) วงจรควบคุมทางไฟฟ้า (electronics) โครงสร้างภายนอก (module casing) รวมถึงชุดชาร์จ ขึ้นเองภายในประเทศโดยมีแนวคิดที่จะต้องการให้อุปกรณ์นี้มีความสามารถที่จะใช้ทดแทนชุดแบตเตอรี่เดิม โดยจะทำการพัฒนาให้อุปกรณ์นี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่ใช้ทดแทนชั่วคราวอยู่และมีความสามารถใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ชุดเดิมที่เสื่อมสภาพไปและต้องจัดหาชุดแบตเตอรี่จากต่างประเทศมาให้ราคาที่สูงในหน่วยเป็นชุดละหลายล้านบาท

1.) วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ภายในประเทศไทย
2.) เพื่อศึกษาความต้องการและสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับยุทโธปกรณ์
3.) เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับความต้องการและสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับยุทโธปกรณ์โดยเฉพาะกับระบบชี้ทิศอัตโนมัติสำหรับปืนใหญ่
4.) เพื่อให้ได้ต้นแบบชุดอุปกรณ์จ่ายพลังงานด้วยแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จสำหรับยุทโธปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่มีประสิทธิภาพทดแทนชุดแบตเตอรี่ที่นำเข้าจากต่างประเทศ
5.) เพื่อสร้างของบุคลากรในประเทศในการดูแลรักษาชุดแบตเตอรี่สำหรับการใช้งานในยุทโธปกรณ์ได้เองในประเทศ
6.) เพื่อสร้างความร่วมมือด้านการวิจัยระหว่างหน่วยงานวิจัยกระทรวงวิทยาศาสตร์และกระทรวงกลาโหม

1.2 ทางเลือกการแก้ปัญหา

จากปัญหาของการขาดแคลนชุดแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้กับระบบชี้ทิศอัตโนมัติของปืนใหญ่ การจัดซื้อชุดแบตเตอรี่ทดแทนซึ่งมีราคาสูง บุคลากรที่มีอยู่ไม่สามารถทำการซ่อมแซมหรือประกอบแบตเตอรี่ในลักษณะที่จะทดแทนชุดที่เสื่อมไป และการนำแบตเตอรี่ที่ใช้งานทั่วไปสำหรับสตาร์ทรถบรรทุกประเภทกรดตะกั่วมาทดแทนซึ่งเป็นการเลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ด้านอายุการใช้งานสั้น น้ำหนักและขนาดที่เกินความต้องการ ต้องมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ และอาจมีปัญหาเรื่องความปลอดภัย ทางทีมวิจัยได้เสนอการแก้ปัญหาในโดยการวิจัยพัฒนาแบตเตอรี่ชุดใหม่จากแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนทดแทนแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-แคดเมียมที่ใช้อยู่เดิมและเสื่อมสภาพ และแทนแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่ใช้ทดแทนชั่วคราว การออกแบบชุดแบตเตอรี่ตั้งแต่เซลล์ไปสู่การใช้งานนั้นประกอบไปด้วยสามส่วนหลักตามรูปที่ 1.3 คือ

ก. เซลล์แบตเตอรี่
ข. ชุดแบตเตอรี่ส่วนระบบควบคุมและระบบการชาร์จ
ค. ชุดแบตเตอรี่ส่วนการจัดการความร้อนและการรับแรงทางกล



รูปที่ 0.3 ขั้นตอนการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ตั้งแต่ระดับเซลล์ไปสู่การใช้งาน [1]

โดยทีมวิจัยขอกล่าวถึงรายละเอียดของการแก้ปัญหาและเหตุผลของการคัดเลือกวิธีการแก้ปัญหาตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. <u>ประเภทของเซลล์แบตเตอรี่และการเลือกใช้งาน</u>

การใช้งานแบตเตอรี่มีหลายประเภท ทั้งที่ใช้ในอุปกรณ์แบบพกพา และอยู่กับที่เช่น UPS สำหรับการใช้งานเพื่อเป็นระบบพลังงานสำหรับอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวได้ อย่างเช่นรถยนต์ หรือระบบบังคับทิศทางของปืนใหญ่ ได้มีการใช้งานแบตเตอรี่หลายประเภท เช่น แบตเตอรี่ประเภทกรด ตะกั่ว แบตเตอรี่นิกเกิล และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน คุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ะประเภททางคณะวิจัยคาดว่าที่เป็นทางเลือกสำหรับการใช้งานในระบบบังคับทิศทางจะถูกกล่าวถึงดังต่อไปนี้

1.) แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม

ชุดแบตเตอรี่เดิมที่ทางหน่วยทหารได้ใช้งานอยู่นั้นเป็นประเภทนิเกิล-แคดเมียม ซึ่งมีข้อดีอยู่ที่ไม่ต้องการการดูแลรักษามากนัก สามารถเติมประจุไฟได้เร็ว ใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำและค่าความต่างศักดิ์ขณะใช้งานคงที่ (ค่านี้มีความสำคัญเนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาให้ใช้กับค่าความต่างศักดิ์ที่คงที่เท่านั้น มิฉะนั้นจะต้องเพิ่มวงจรไฟฟ้าที่สามารถแปลงค่าความต่างศักดิ์ให้คงที่ได้) ข้อเสียคือราคาวัตถุดิบและราคาการผลิตแพงกว่าแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่วมาก อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมี Memory Effect คือการใช้งานต้องใช้แบตเตอรี่ให้หมดก่อนชาร์จไฟใหม่มิฉะนั้นแบตเตอรี่จะมีความจุลดลง หรือเสื่อมสภาพลงอยากรวดเร็ว จึงต้องระมัดระวังในการใช้ อีกทั้งมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่กรดตะกั่วหรือลิเทียมไอออน [2] เนื่องจากองค์ประกอบของแบตเตอรี่ประเภทนี้โดยเฉพาะแคดเมียมและมีความเป็นพิษสูงการใช้งานและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงไม่ได้รับการสนับสนุนมากนักและได้มีการลดการใช้งานลงมากจนมีอยู่ในตลาดน้อยกว่า 2% [3] เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ

2.) แบตเตอรี่กรดตะกั่ว

สำหรับแบตเตอรี่รถบรรทุกที่ใช้ทดแทนเป็นการชั่วคราวนั้นเป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วมีส่วนประกอบหลัก คือ แผ่นโลหะสองชนิด ขั้วบวกทำจากตะกั่วเปอร์ออกไซด์ ขั้วลบทำจากตะกั่วธรรมดา ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วทางไฟฟ้าและกรดกำมะถันเจือจาง (H_2SO_4) เป็นอิเล็กโตรไลต์ [2] ซึ่งจะมีค่าแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าเซลล์ละประมาณ 2.1 โวลต์ โดยแบตเตอรี่รถยนต์จะมี 6 เซลล์ ทำให้ได้

แรงดันไฟฟ้า 12.6 โวลต์ ในการชาร์จแบตเตอรี่ชนิด ตะกั่วกรดตะกั่วนั้นอาจเกิดความร้อนขึ้นก่อให้เกิดไอกรดกำมะถันขึ้นภายในแบตเตอรี่ ซึ่งกรดกำมะถันจะกลั่นตัวในช่องระบายและตกกลับเข้าในแบตเตอรี่ โดยจะมีเพียงแก๊สไฮโดรเจนออกผ่านรูระบายสู่ภายนอก แต่หากวาล์วมีคุณภาพไม่ดี ไอระเหยของกรดก็อาจจะหลุดรอดออกมาสู่บรรยากาศภายนอกได้

ขั้วแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วนี้มีลักษณะพรุนนี้เพื่อให้มีพื้นผิวที่จะทำปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าได้มากขึ้นและส่งผลให้มีกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น การปล่อยแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะที่ไฟหมดเป็นเวลานานทำให้เกิดผลึก $PbSO_4$ ขนาดใหญ่ซึ่งไปอุดตันรูพรุนเหล่านี้ ส่งผลให้ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วเพิ่มสูงขึ้นและเกิดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ไปในที่สุดจึงไม่ควรปล่อยให้แบตเตอรี่ประเภทนี้อยู่ในสภาวะที่หมดไฟเป็นเวลานาน แบตเตอรี่แบบกรดตะกั่วที่ใช้กันอยู่นั้นจริงๆแล้วมีอยู่หลายประเภทโดยสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆตามการใช้งานได้สามประเภท [2]

แบตเตอรี่รถยนต์ (Starting Lighting Ignition, SLI Battery) เป็นแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่มีสัดส่วนการใช้งานมากที่สุด มักใช้ในงานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงๆ ช่วงระยะสั้น เช่น สตาร์ตเครื่องยนต์ และเครื่องจักร แบตเตอรี่สำหรับสตาร์ตรถยนต์จะมีอายุการใช้งานสั้น ประมาณ 1.5-3 ปี

แบตเตอรี่กรดตะกั่วแบบ Deep Cycle เป็นแบตเตอรี่สำหรับใช้งานที่ต้องมีการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน เช่น รถไฟฟ้า รถกอล์ฟ รถยก (Forklift) อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือเก็บไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น จากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือกังหันลม

แบตเตอรี่กรดตะกั่วแบบ Stationary เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาให้สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต่างจากแบตเตอรี่ประเภท Deep Cycle คืออยู่ในสถานะเต็มตลอดเวลาและมีการใช้งานเป็นครั้งคราวเท่านั้น มักใช้เพื่อการสำรองไฟฟ้าเวลาฉุกเฉิน (UPS) และใช้งานอยู่กับที่ ดังนั้นเรื่องความจุพลังงานต่อน้ำหนักจึงไม่สำคัญเท่าแบตเตอรี่ประเภท deep cycle ที่ต้องใช้งานขณะเคลื่อนที่ แบตเตอรี่กรดตะกั่วแบบ Stationary จึงมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่นที่ความจุเดียวกัน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอายุการใช้งานนานกว่า 3 ปี และอาจจะถึง 5-10 ปี [4] ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้อาจเหมาะสมกับการใช้งานกับปืนใหญ่เมื่อเปรียบเทียบด้านราคา และอายุการใช้งานที่เพียงพอ แต่จะมีน้ำหนักและขนาดที่เทอะทะไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องมีการเคลื่อนย้าย

3.) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีการพัฒนามาจนมีคุณสมบัติทางด้านการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไปในน้ำหนักที่เท่ากัน สามารถชาร์จไฟได้รวดเร็วกว่าแบตเตอรี่แบบกรดตะกั่ว แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนประกอบด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ขั้วไฟฟ้า ประกอบไปด้วย ขั้วบวก (แคโทด) และขั้วลบ (แอโนด) แผ่นกั้นในแบตเตอรี่ (Separator) ช่วยป้องกันกระแสลัดวงจรโดยทำให้ขั้วแคโทดไม่สัมผัสกับขั้วแอโนด, อิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายที่มีเกลือของลิเทียมผสมอยู่ เป็นตัวนำที่ยอมให้ไอออนผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน ดังนั้นจึงเป็นตัวนำไอออนิกที่ดีแต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่ไม่ดี, ตัวรับกระแส (Current Collector) เป็นโลหะตัวนำทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอกและเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนรุ่นปัจจุบันใช้ $LiCoO_2$ หรือ $Li(Ni,Mn)O_2$ หรือ $LiFePO_4$ เป็นขั้วแคโทดและคาร์บอนหรือ $Li_2Ti_5O_7$ เป็นขั้วแอโนด มีสารละลายอินทรีย์ของเกลือที่มี Li^+เป็นส่วนประกอบเป็นอิเล็กโตรไลต์ ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดจากการแพร่ของ Li^+จากขั้วลบที่มีพลังงานศักดิ์ทางเคมีสูงไปยังขั้วบวกซึ่งมีพลังงานศักดิ์ต่ำกว่า หากแต่การแพร่ของสารนั้นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อประจุรวมของสารที่แพร่ทั้งหมด (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) นั้นเป็นกลาง เนื่องจากอิเล็กโตรไลต์ไม่สามารถเป็นสื่อ

นำอิเล็กตรอนได้ การแพร่ของ Li^+ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีวงจรภายนอกต่อให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ก่อให้เกิดไฟฟ้าที่เราสามารถนำไปใช้ได้นั่นเอง

เนื่องจากแบตเตอรี่แต่ละประเภทเหมาะกับการใช้งานที่ต่างกัน การเลือกใช้แบตเตอรี่แต่ละประเภทจะขึ้นกับลักษณะของงาน โดยต้องพิจารณาข้อมูลสำคัญของแบตเตอรี่

- ความจุพลังงานเมื่อเทียบกับขนาด (Volumetric Energy Density)
- ความจุพลังงานเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (Gravimetric Energy Density)
- กำลังไฟฟ้า
- ความเร็วในการชาร์จ
- ขนาด และน้ำหนัก
- ประสิทธิภาพการจ่ายประจุ (Efficiency) หน่วยเป็น %
- อัตราการสูญเสียประจุ (ในขณะที่ไม่ได้ใช้งาน) เมื่อไม่ถูกใช้งาน (Self-discharge Rate)
- อายุการใช้งาน - ครั้ง (Cycle Life)
- อายุการใช้งาน - ปี (Calendar Life)
- อุณหภูมิการใช้งาน (Operating Temperature)
- ความปลอดภัย
- การดูแลรักษา
- ราคา

โดยทางคณะวิจัยได้รวบรวมข้อมูลเปรียบเทียบของแบตเตอรี่ทั้งสามชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 1.1

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าไม่มีแบตเตอรี่ชนิดใดที่ดีกว่าชนิดใดสักทีเดียว ดังนั้น การเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับความต้องการและข้อจำกัดทางด้านการใช้งานเป็นหลัก หากเมื่อพิจารณาความต้องการการใช้งานด้านการทหารข้างต้นที่ได้เอ่ยถึงข้างต้น จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนอาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ทดแทนชุดแบตเตอรี่นิเกิล แคดเมียมชุดเดิม โดยมีคุณสมบัติเปรียบเทียบแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion) กับแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd) และ ประเภทกรดตะกั่ว (Pb-acid) อย่างง่ายตามตารางที่ 1.2

ตารางที่ 0.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่แต่ละประเภท [4]

คุณสมบัติหลัก	**ความหมายของคุณสมบัติ/หมายเหตุ**	**ประเภทของแบตเตอรี่**			
		กรดตะกั่ว	**Ni-Cd**	**ลิเธียมไอออน (*C/$LiCoO_2$)**	**ลิเธียมไอออน (*C/LiFePO4)**
ความจุต่อน้ำหนัก (Wh/kg)	ค่าสูง - เบา	25 - 55	45 - 80	100 - 175	80 - 100
ความจุต่อปริมาตร (W/L)	ค่าสูง – ขนาดเล็ก	60 - 110	100 - 180	210 - 360	220
กำลังไฟต่อน้ำหนัก (W/kg)	ค่าสูง – ชาร์จได้เร็วให้กระแสสูงเวลาใช้งาน	100 - 150	200	< 1,000	> 3,000
ความสูญเสียประจุ %	ค่าต่ำ – ไม่ต้องชาร์จบ่อยแม้ไม่ใช้งาน	6 – 8	10 (% 20 for 1st charge)	น้อยมาก	น้อยมาก
แรงดัน (v)	ค่าสูง – ไม่ต้องต่อหลายเซลล์เพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการ	2	1.31	3.6	3.3
Cycle life	ค่าสูง – ใช้งานได้นาน (หลายครั้ง)	~200 - 500	400 – 2,000	500 – 1,000	1,000 – 2,000
ราคา ($/kWh)	ค่าต่ำ– ราคาถูก	100 – 150	200 – 300	500 – 600	500 – 2,000
Cost ($/kWh-cycle)	ค่าต่ำ – ราคาถูก	0.2 – 0.75	0.1-0.75	0.5 – 1.2	0.1 - 2
ช่วงอุณหภูมิใช้งานและจัดเก็บ	ควรใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ	- 15 - 45°C	- 20 - 45°C	- 30 - 55°C	- 30 - 55°C
ข้อควรระวังในการใช้งานและการดูแลรักษา	ทุกแบตเตอรี่ไม่ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง การเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดอายุการใช้งานได้	ไม่จัดเก็บในสภาวะที่แบตเตอรี่หมด	ต้องใช้ให้หมดก่อนชาร์จทุกครั้งเพื่อกัน Memory effect	ต้องการการดูแลรักษาน้อยมาก หากต้องการยืดอายุให้เก็บไว้ที่ 40-60% ของความจุ	ต้องการการดูแลรักษาน้อยมาก หากต้องการยืดอายุให้เก็บไว้ที่ 40 – 60% ของความจุ

ตารางที่ 0.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่แต่ละประเภทสำหรับการใช้งาน

คุณสมบัติ	
น้ำหนักเบา	Li-ion > NiCd> Pb-acid
ขนาดเล็ก	Li-ion > NiCd> Pb-acid
Efficiency	Li-ion > NiCd> Pb-acid
ความเร็วในการชาร์จ	Li-ion = NiCd> Pb-acid
อัตราการเสียประจุเมื่อไม่ได้ใช้งาน	Li-ion > NiCd> Pb-acid
อายุการใช้งาน	Li-ion = NiCd> Pb-acid
การบำรุงรักษาน้อย	Li-ion > NiCd> Pb-acid
ความปลอดภัย*	Ni-Cd > Pb-acid > Li-ion
ราคาถูก	Pb-acid > NiCd > Li-ion

*ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

จากข้อมูลข้างต้น ทีมวิจัยจึงเลือกเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนในการนำมาประกอบเป็นชุดแบตเตอรี่ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับยุทโธปกรณ์ทางทหารดังกล่าวโดยจะคัดเลือกแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในตลาดที่มีคุณสมบัติตรงกับความต้องการในการใช้งานด้านเป็นหลัก และทำการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบการจัดวางและการออกแบบระบบควบคุมและการชาร์จต่อไป

- แรงดัน
- ความสามารถในการจ่ายกระแสคงที่
- ความสามารถในการจ่ายกระแสสูงสุด
- อัตราการชาร์จ
- Efficiency
- ขนาดและน้ำหนัก
- ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือได้
- ราคา

ข. ระบบควบคุมและระบบการชาร์จ

ระบบแบตเตอรี่สำหรับระบบควบคุมของอุปกรณ์ที่ต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น โทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์โน๊ตบุค, ปืนใหญ่ ฯลฯ นั้นประกอบด้วย แบตเตอรี่ซึ่งเป็นแหล่งพลังงาน และระบบการส่งถ่ายพลังงาน สำหรับควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่

ระบบส่งถ่ายพลังงานสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบได้แก่ ระบบการจ่ายพลังงาน, ระบบประจุพลังงาน และระบบป้องกันและจัดการแบตเตอรี่ แต่ละระบบประกอบด้วย วงจรอิเล็คทรอนิกส์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถควบคุมการจ่ายหรือรับพลังงานของแบตเตอรี่ได้ และตัวควบคุม (Controller) ที่ทำหน้าที่สั่งการวงจรอิเล็คทรอนิกส์ต่างๆให้ทำงาน

ระบบจ่ายพลังงาน ประกอบด้วย วงจรแปลงไฟฟ้า DC/DC และ ตัวควบคุม มีหน้าที่รักษาคุณภาพของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด โดยรักษาระดับแรงดันของระบบแบตเตอรี่ ที่ต่อกับโหลด (Output ของกล่องแบตเตอรี่) ให้คงที่ และป้องกันการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิน เพื่อป้องกันระบบแบตเตอรี่และโหลด

ระบบประจุพลังงาน หรือ Charging System เป็นระบบที่มีหน้าที่ควบคุมการประจุพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถประจุพลังงานได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ระบบประจุพลังงานนี้นั้นมีความหลากหลายของการออกแบบ ขึ้นอยู่กับความสะดวกในการนำไปใช้งาน และความปลอดภัย เช่น การประจุพลังงานของโทรศัพท์มือถือ ถูกออกแบบให้มีหัวต่อการชาร์จตำแหน่งเดียว และสามารถชาร์จได้ทั้งระบบไฟฟ้าสลับ และระบบไฟฟ้ากระแสตรง ระบบประจุพลังงานนี้จะประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบประจุพลังงานที่ถูกติดตั้งอยู่ในตัวโทรศัพท์มือถือ วงจรแปลงไฟฟ้า DC/DC และ ตัวควบคุมการประจุพลังงาน เพื่อการประจุพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (เช่น สายชาร์จ USB จากคอมพิวเตอร์, Battery Bank) และ อุปกรณ์การประจุพลังงานภายนอกจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (สายชาร์จมือถือ) ซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงไฟฟ้า AC/DC และ ตัวควบคุม ที่ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสตรง โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะถูกควบคุมให้มีความเหมาะสมกับวงจรแปลงไฟฟ้า DC/DC ของระบบประจุไฟฟ้าที่ตัวโทรศัพท์มือถือ แต่การประจุพลังงานของโทรศัพท์มือถือผู้ใช้จะไม่สามารถเลือก หรือ ควบคุมลักษณะการประจุพลังงานได้ รวมถึงระยะเวลาในการชาร์จพลังงาน (เลือก C-rate) เพื่อความปลอดภัย และความสะดวกสบาย และง่ายในการใช้งาน

ตัวควบคุมการประจุพลังงานของทั้ง 2 ระบบที่ควบคุมลักษณะหรือรูปแบบการชาร์จให้เป็นแบบกระแสคงที่ และ แรงดันคงที่ (Constant Current and Constant Voltage) กล่าวคือในช่วงแรกของการชาร์จจะเป็นแบบกระแสคงที่ จนกระทั่งแรงดันของแบตเตอรี่สูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง (พลังงานในแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น) การชาร์จจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบแรงดันคงที่ซึ่งกระแสชาร์จจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อพลังงานในแบตเตอรี่เต็ม (สังเกตได้จากแรงดันของแบตเตอรี่สูงถึงระดับที่กำหนด) [5-6]

แบตเตอรี่ลิเทียมที่เลือกใช้มีขีดจำกัดในการใช้งานเมื่อนำหลายๆเซลล์แบตเตอรี่มาต่อกัน เพื่อทำให้แบตเตอรี่ทำงานเต็มประสิทธิภาพ รวมถึงป้องกันความปลอดภัยของตัวแบตเตอรี่เอง เมื่อนำแบตเตอรี่ไปใช้งานจึงต้องมีระบบป้องกันและจัดการแบตเตอรี่ หรือ Battery Management System (BMS) ติดตั้งควบคู่ไปด้วย โดยทั่วไประบบนี้จะเป็นที่รู้จัก และนำไปใช้มากในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
พารามิเตอร์ที่สนใจคือ กระแส, แรงดัน และ อุณหภูมิของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ ฟังก์ชันที่จำเป็นของระบบ BMS นี้ประกอบด้วย 4 ฟังก์ชันคือ วัด (Meter), ประมวลผล (Monitor), บาลานซ์ (Balancing), และ ป้องกัน (Protection) นอกจากนี้ระบบนี้สามารถสื่อสารกับระบบจ่ายไฟ และ ระบบชาร์จไฟ เพื่อแจ้งสถานะของแบตเตอรี่ว่าพร้อมจ่าย หรือรับพลังงานหรือไม่

ระบบป้องกันและจัดการแบตเตอรี่นี้มีมาก หลายแบบในท้องตลาดตามแต่ระดับความสามารถในการทำงาน บางระบบจะทำหน้าที่เป็น Meter โดยวัดพารามิเตอร์ที่ต้องการ แล้วแสดงผลเท่านั้น หรือ ทำหน้าที่เป็น Battery Monitor ซึ่งนอกจากวัด แล้วจะประเมินด้วยว่าแบตเตอรี่อยู่ในสถานะปกติทำงานได้ หรือ ไม่ปลอดภัย และ แจ้งเตือนเพื่อให้ผู้ใช้ รับทราบและจัดการควบคุมต่อไป นอกจากนี้บางระบบจะทำหน้าที่จัดการ balancing แรงดันแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ให้ด้วย และบางระบบ BMS จะทำหน้าที่ครบถ้วนทั้ง 4 ฟังก์ชัน โดยจะมีหน้าที่ป้องกัน เช่น over voltage/current, under voltage/current, over temperature ฯลฯ นอกจากนี้บางระบบ BMS อาจมีการคำนวณ และแสดงผลระดับพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญด้วย

การบาลานซ์เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี [5], [7], [8] คือ
- Active Cell Balancing มี 2 วิธีย่อยคือ การถ่ายโอนประจุออกจากเซลล์ที่มีระดับพลังงาน หรือ แรงดันสูงกว่าเซลล์อื่น ไปยังเซลล์ที่มีระดับพลังงานหรือแรงดันต่ำกว่า หรือ เป็นการควบคุมการประจุ หรือ จ่ายพลังงานของแต่ละเซลล์

- Passive Cell Balancing หรือ Dissipative Techniques ประจุจะถูกดึงออกจาก เซลล์ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า จนกระทั่งระดับพลังงานเท่ากับเซลล์อื่นๆ ผ่านทาง ตัวต้านทาน (Resistive Element)

ตัวอย่างการประดิษฐ์ระบบควบคุมและป้องกันแบตเตอรี่ [9] โดยการวัดและควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ ประจุของเซลล์ที่ระดับแรงดันสูงกว่าเซลล์อื่นๆจะถูกถ่ายโอนไปให้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) แรงดันของแต่ละเซลล์จะถูกวัดโดยการนำ Analog to Digital Converter (ADC) และ Processor จะทำหน้าที่ประมวลผล และส่งสัญญาณไปยังระบบอื่นๆ ซึ่งทำให้ค่าแรงดันที่วัดได้มีความแม่นยำ และ ระบบควบคุมมีความเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น

การป้องกัน และควบคุมแบตเตอรี่มักจะถูกคำนึงถึง หรือให้ความสำคัญ ขณะประจุแบตเตอรี่ บางระบบควบคุมและป้องกันแบตเตอรี่ จะมีการเพิ่มการควบคุมการชาร์จไฟเป็นหนึ่งในฟังก์ชั่นด้วย เพื่อให้สะดวกในการควบคุมป้องกัน แต่อาจจะมีความยากในการพัฒนาอุปกรณ์ หรือวงจรควบคุม [1] ระบบควบคุมการชาร์จไฟจึงอาจถูกแยกออกมาต่างหาก เพื่อความง่ายในการพัฒนา แต่ด้วยการประจุพลังงาน จำเป็นจะต้องทำงานร่วมกับระบบควบคุมและป้องกันแบตเตอรี่ (โดยเฉพาะการบาลานซ์) ทำให้อาจมีการเพิ่มฟังก์ชันการบาลานซ์เข้าไปรวมอยู่ในระบบการประจุพลังงานเลยก็ได้ เช่น การเพิ่ม การ Balancing ระหว่างการชาร์จเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยเป็นการพัฒนาจากระบบการประจุพลังงาน (Battery Charger) ที่รู้จักของ Motorola Inc. (European patent no. 0731545) [10]

โดยทั่วไประบบจะประกอบด้วย ระบบวัดและประมวลผล (Monitoring Circuit) เพื่อส่งแจ้งเตือนเมื่อเซลล์ไม่บาลานซ์ และระบบการ charging/discharging circuit ที่จะมีหน้าที่ควบคุมและส่งการให้มีการ charge หรือ discharge แต่ละเซลล์ที่มีปัญหา จนกระทั่งเกิดการบาลานซ์ [10-13]แต่วิธีการบาลานซ์จะแตกต่างกันไป เช่น บริษัท Saft ได้มีการพัฒนาระบบชาร์จ และการบาลานซ์เซลล์ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมเพื่อใช้ในทางทหาร โดยการควบคุมการชาร์จของแต่ละเซลล์ [11] หรือ การบาลานซ์จะทำโดยใช้ multiplexed analog input and tri-state digital output กล่าวคือถ้าค่าแรงดันที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด ตัว multiplexed analog input and tri-state digital output จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ที่ low state เพื่อนำประจุออกจากแบตเตอรี่ ในทางกลับกันเมื่อแรงดันที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด ตัว multiplexed analog input and tri-state digital output จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ที่ high state ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายถ่ายเทประจุให้กับแบตเตอรี่ [5] หรือ การใช้ตัวต้านทานในการบาลานซ์ โดยทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ต่อตัวต้านทานเข้ากับเซลล์แบตเตอรี่ที่มีประจุหรือระดับพลังงานสูงกว่าเซลล์อื่นๆ เพื่อดึงพลังงงานออกจากเซลล์แบตเตอรี่นั้นๆจนกระทั่งมีประจุเท่ากับเซลล์อื่นๆ [7]

นอกจากนี้ ยังมีการใช้ตัวเก็บประจุในการการบาลานซ์ เพื่อถ่ายเทประจุระหว่างเซลล์ การออกแบบนี้ไม่มีการวัดแรงดันของแต่ละเซลล์ จะวัดแรงดัน และกระแสรวมของทั้งตัวแบตเตอรี่ (battery stack) เพื่อต้องการควบคุมลักษณะการชาร์จ constant current and constant voltage ให้การเปลี่ยนจาก constant current เป็น constant voltage ได้ง่ายขึ้น [8]

ในส่วนของกล่องแบตเตอรี่เพื่อปืนใหญ่นี้ ระบบการควบคุมและการชาร์จอย่างคร่าวจะถูกออกแบบระบบประจุพลังงานจะถูกออกแบบให้สามารถชาร์จได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับเช่นเดียวกัน แต่หัวต่อการชาร์จของแต่ละระบบจะแยกกัน (ที่กล่องแบตเตอรี่จะมีช่องการชาร์จ 2 ช่อง) ซึ่งเป็นแบบเดียวกับกล่องแบตเตอรี่เดิม จึงเป็นที่คุ้นเคย และสะดวกกับผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่ออกแบบและพัฒนาง่ายในระยะเวลาอันจำกัด การชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง ที่ประกอบด้วย วงจรแปลงไฟฟ้า DC/DC และ ตัวควบคุมการประจุพลังงาน และการประจุพลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกออกแบบให้บรรจุอยู่ในกล่องชาร์จแบตเตอรี่ซึ่งแยกออกมาจากกล่องแบตเตอรี่ เพื่อความสะดวก ประกอบด้วย วงจรแปลงไฟฟ้า AC/DC

และ ตัวควบคุมการประจุพลังงาน นอกจากนี้ผู้ใช้จะสามารถเลือก C-rate หรือ ระยะเวลาในการประจุพลังงานได้ด้วย โดยจะถูกออกแบบให้มี 2-3 ตัวเลือก

ในระบบแบตเตอรี่สำหรับปืนใหญ่นี้ จะถูกออกแบบให้มีระบบป้องกัน และจัดการแบตเตอรี่ด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ฟังก์ชัน คือ วัด ประมวลผล และบาลานซ์ ในที่นี้แรงดันของแต่ละเซลล์และอุณหภูมิของตัวแบตเตอรี่ ถูกวัด และมีการบาลานซ์แต่ละเซลล์โดยวิธี Passive balancing cell ถ้าไม่สามารถทำการบาลานซ์ได้จะมีการแจ้งเตือน นอกจากนี้ระดับพลังงานจะถูกคำนวณ และแสดงผลด้วยเช่นกัน

ค. <u>ระบบการจัดการความร้อนและการรับแรงทางกล</u>

ระบบแบตเตอรี่ขนาดใหญ่นั้น อุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมากต่อทั้งอายุการใช้งาน ประสิทธิภาพ ความปลอดภัย รวมถึงราคาของแบตเตอรี่ [14] อุณหภูมิขณะใช้งานและอุณหภูมิตอนเก็บรักษาของแบตเตอรี่นั้น ส่งผลกระทบอย่างมากต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่โดยรวม ดังนั้นการจัดการกับความร้อนในแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญอย่างมากเพื่อที่จะ

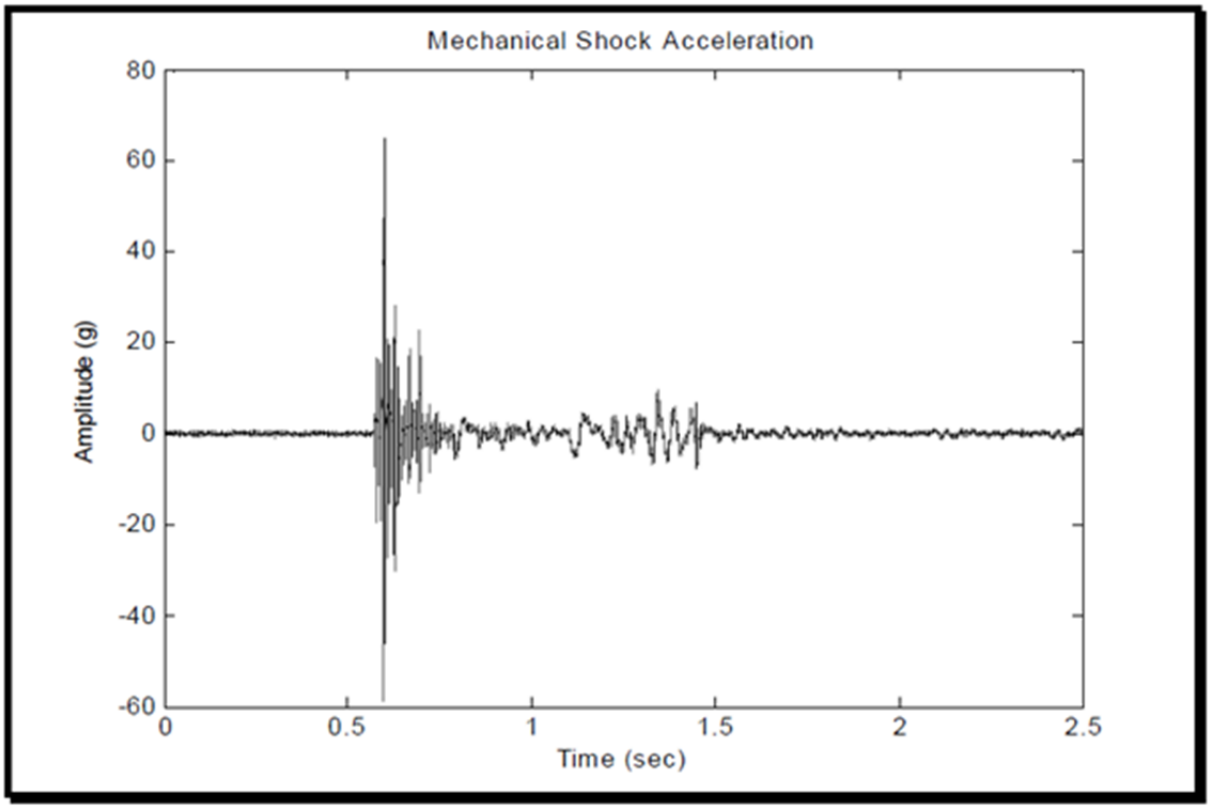
- รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน
- ลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแต่ละเซลล์ ในแบตเตอรี่
- ป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงหรือต่ำเกินไป
- สามารถใช้แบตเตอรี่ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

การกระแทกทางการกล (Shock) นั้นอาจส่งผลกระทบร้ายแรงต่อรูปร่างและลักษณะทางกายภาพรวมถึงการทำงานของวัสดุทั้งหมด [15] โดยทั่วไประดับของผลกระทบนั้นจะมีผลจากทั้งขนาดและระยะเวลาของการกระแทก ระยะเวลาของการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของวัสดุ หรือส่วนของความถี่ในการกระแทกที่สอดคล้องกับถี่ธรรมชาติของวัสดุจะขยายผลกระทบโดยรวมของวัสดุทั้งทางกายภาพและการทำงาน ผลกระทบที่เกิดจากแรงทางกล

- ความล้มเหลวของวัสดุที่เป็นผลจากการเของแรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนหรือรบกวนระหว่างชิ้นส่วนด้วยกันเอง
- การเปลี่ยนแปลงในความเป็นฉนวนวัสดุ การสูญเสียของความต้านทานฉนวนกันความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงในความแรงของสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิต
- ความผิดปกติของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แผงวงจรเกิดความเสียหายและความล้มเหลวการเชื่อมต่ออิเล็กทรอนิกส์ (เนื่องในโอกาสที่แผงวงจรที่มีอาจเกิดไฟฟ้าลัดวงจรภายใต้การตอบสนองของวัสดุที่เกิดการกระแทก)
- การเปลี่ยนรูปร่างไปจากเดิมเนื่องจากความเครียด (Stress) ของโครงสร้าง
- เกิดการแตกหักเนื่องจากการที่วัสดุได้รับแรงมากเกินไป
- เร่งให้เกิดความล้า (Fatigue) ของวัสดุ ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

ขั้นตอนการออกแบบกล่องบรรจุแบตเตอรี่สำหรับทางกองทัพ เริ่มจากการศึกษาข้อมูลจากแบตเตอรี่ตัวเดิมที่ใช้อยู่ ซึ่งจะต้องมีการวัดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างใช้งาน โดยจะมีการติดมาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) ไว้ที่ตำแหน่งของแบตเตอรี่ เพื่อวัดความเร่งกับระยะเวลาที่สั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ตามตัวอย่างในรูปที่ 1.5 แสดงความเร่งทางกลที่วัดได้จากแรงกระแทก นอกจากนั้นจะต้องทำการวัดขนาดต่างๆ รวมทั้งจุดยึดและน้ำหนัก เนื่องจากทางเราต้องการที่จะผลิตของใหม่ที่สามารถนำไปใช้แทนที่ของเก่าได้เลย จึงเป็นที่จะต้องมีจุดยึดที่ตำแหน่งเดียวกับของเดิม และเพื่อให้การขนย้ายทางอากาศไม่เสียสมดุลจึงจะต้องมีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันด้วย ในการออกแบบนั้นเราจะใช้โปรแกรม Computer Aid Design (CAD) [16] เข้ามา

ช่วยในการออกแบบ เพื่อให้ทราบถึงขนาดและน้ำหนักจากการคำนวณ หลังจากที่ได้แบบที่ต้องการ ทั้งยังช่วยในการจัดเรียงชิ้นส่วนต่างภายในของชุดแบตเตอรี่ ซึ่งจะมีผลต่อการจัดการทางความร้อน (thermal management systems) จะมีการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม Computer Aid Engineering (CAE) [17] เพื่อวัดความแข็งแรง และใช้ Computational Fluid Dynamic (CFD) เพื่อดูผลของ thermal management systems เมื่อได้ผลลัพธ์ความแข็งแรงทางกล และ thermal management systems ที่พอใจจึงจะนำไปเขียนแบบสั่งผลิตและผลิตจริง



รูปที่ 0.4 ตัวอย่างความเร่งทางกลที่วัดได้จากแรงกระแทก [18]

ในเบื้องต้นกล่องแบตเตอรี่จะถูกทดสอบความทนทานแบบปล่อยตก (Drop test) เพื่อทดสอบความทดทานต่อแรงกระแทก โดยจะมีการเพิ่มน้ำหนักของกล่องให้ใกล้เคียงกับของจริง ในขณะที่ทำการทดสอบจะมีการติดมาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) ทั้งด้านนอกและด้านในกล่อง เนื่องจากการสั่นสะเทือนและการกระแทกจะส่งผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ เพื่อวัดแรงและเวลาที่เกิดจากการกระแทก การที่เราเลือกการทดสอบแบบปล่อยตก เพราะว่าสามารถทำได้ง่าย และมีค่าใช้จากในการทดสอบที่ต่ำ

ขั้นตอนการทดสอบทางกลตามวิธี Mil-Std-810G [18] หลังจากที่ประกอบชุดแบตเตอรี่แบบสมบูรณ์แล้ว ทั้งชุดแบตเตอรี่จะถูกส่งไปทดสอบความทนทานทางกลที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G ซึ่งในโครงการนี้จะทำการทดสอบความทนทาน 3 วิธีที่จำเป็นเบื้องต้น คือ

- Rain (Test Method 506.5)
- Dust and Sand (Test Method 510.5)
- Shock (Test Method 516.6)

1.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

โครงการวิจัยและพัฒนาต้นแบบแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่นี้ เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาแบตเตอรี่สำหรับใช้กับยุทโธปกรณ์ทางทหาร เพื่อการลดต้นทุนการนำเข้าแบตเตอรี่ ประหยัดงบประมาณ, และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีใช้เองในประเทศอย่างยั่งยืน จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าราคาของชุดอุปกรณ์แบตเตอรี่เดิมนั้นอยู่ในหลักชุดละ 2 ล้านบาท ในขณะที่จากข้อมูลตลาดของอุปกรณ์ต่างๆ รวมแบตเตอรี่นั้นน่าจะอยู่ไม่เกิน 500,000 บาท เครื่องชาร์จ 1 ชุด ชุดละ 50,000 บาทเท่านั้น หากโครงการนี้สำเร็จคาดว่าจะลดราคาของชุดอุปกรณ์นี้ได้มากกว่า 4 เท่าตัว

1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับเมื่อการดำเนินงานเสร็จสิ้น

ก. องค์ความรู้ด้านการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ภายในประเทศไทย
ข. เพื่อศึกษาความต้องการและสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับยุทโธปกรณ์
ค. องค์ความรู้ด้านการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับความต้องการและสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับยุทโธปกรณ์โดยเฉพาะกับระบบชี้ทิศอัตโนมัติสำหรับปืนใหญ่
ง. ต้นแบบชุดอุปกรณ์จ่ายพลังงานด้วยแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จสำหรับยุทโธปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่มีประสิทธิภาพทดแทนชุดแบตเตอรี่ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ประกอบด้วยแบตเตอรี่จำนวน 2 ชุด และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ จำนวน 2 เครื่อง
จ. บุคลากรในประเทศที่มีความสามารถในการดูแลรักษาชุดแบตเตอรี่สำหรับการใช้งานในยุทโธปกรณ์ได้เองในประเทศ
ฉ. เกิดความร่วมมือด้านการวิจัยระหว่างหน่วยงานวิจัยกระทรวงวิทยาศาสตร์และกระทรวงกลาโหม

1.5 แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.) การศึกษาเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่สำหรับยุทโธปกรณ์
   ก. รับทราบปัญหาการใช้งานแบตเตอรี่ของภาคทหาร พล.ป./ป.พัน 31 รอ.ในเรื่องราคา ที่สูง มีอายุการใช้งานต่ำ และการนำเข้าที่ต้องใช้เวลาเมื่อแบตเตอรี่ มาถึงก็เหลืออายุการใช้งานน้อยแล้ว
   ข. เยี่ยมชมและศึกษาข้อมูลแบตเตอรี่ที่พล.ป./ป.พัน 31 รอ. ศึกษาข้อมูลลักษณะการใช้งาน พร้อมชมการสาธิตการใช้งาน โดยนำอุปกรณ์ไปเก็บข้อมูลในเบื้องต้น
   ค. ออกแบบการกระบวนการ และอุปกรณ์ทดสอบเพื่อทดสอบสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่สำหรับยุทโธปกรณ์
   ง. เลือกซื้ออุปกรณ์วัดและเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน
   จ. รวบรวม และวิเคราะห์ การใช้งานของชุดแบตเตอรี่ปัจจุบัน
   ฉ. รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางกลที่ชุดแบตเตอรี่ต้องถูกกระทำ
      i. ทดสอบยิงปืนใหญ่เพื่อทำการเก็บค่ารูปแบบแรงสะท้อนของปืนใหญ่ (Shock pattern) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนการยิงทดสอบคือ
         1. ยิงลม (ไม่มีกระสุน)
         2. ยิงด้วยกระสุนจริง จำนวน 2 ครั้ง 6 นัด ประกอบด้วย
            - ยิง 1 นัด จำนวน 1 ครั้ง

- ยิงเป็นชุด ชุดละ 5 นัด จำนวน 1 ครั้ง

ii. เก็บค่าแรงที่กระทำต่อแบตเตอรี่

iii. วิเคราะห์ค่าแรงกระทำในรูปแบบกราฟ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.) การคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่

ก. วิเคราะห์ข้อมูลของแบตเตอรี่เทคโนโลยีที่ต้องการใช้ และศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในตลาด

ข. จัดซื้อแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

ค. ทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่

3.) การออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่

ก. รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ และ แหล่งรับพลังงาน

ข. ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุม (ระบบ BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบป้องกัน)

ค. จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับวงจรควบคุมแบตเตอรี่

ง. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบ Battery management system (BMS) ครั้งที่ 1

จ. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบ Battery management system (BMS) ครั้งที่ 2

ฉ. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ รวมถึงระบบป้องกันการจ่ายไฟเกิน ครั้งที่ 1

ช. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ และระบบป้องกัน ครั้งที่ 2

4.) การออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ

ก. รวบรวมข้อมูลความต้องการในการชาร์จไฟฟ้า

ข. AC system: ออกแบบกล่องใส่ระบบชาร์จไฟ, ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุมการชาร์จไฟฟ้า รวมถึงออกแบบฟังก์ชันการชาร์จ

ค. จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับการพัฒนาเครื่องและระบบชาร์จ

ง. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ DC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 1

จ. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ DC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 2

ฉ. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ AC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 1 (ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60950 และ EN 61000-6-2)

ช. พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ AC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 2

5.) การออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล

ก. ออกแบบกล่องแบตเตอรี่

ข. ผลิตกล่องแบตเตอรี่

ค. ออกแบบชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่

ง. ทดสอบความแข็งแรงของกล่องและจุดยึด โดยจำลองน้ำหนักและสภาพการใช้งาน

จ. ออกแบบกล่องแบตเตอรี่ ครั้งที่ 2

ฉ. ผลิตกล่องแบตเตอรี่ชิ้นที่ 2 และ 3 เพื่อบรรจุแบตเตอรี่ สำหรับทดสอบและใช้จริง

ช. เลือกวัสดุกันกระแทกสำหรับกล่องแบตเตอรี่

6.) การประกอบเพื่อพัฒนาและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่

ก. ประกอบและทดสอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์ (ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่, BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบควบคุมการชาร์จไฟ) ชุดที่ 1

ข. ประกอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์ (ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่, BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบควบคุมการชาร์จไฟ) ชุดที่ 2

ค. ทดสอบชุดแบตเตอรี่ ตามมาตรฐานทางกล Mil-Std-810G ในหัวข้อต่อไปนี้

i. Rain (Test Method 506.5)

ii. Dust and Sand (Test Method 510.5)

iii. Shock (Test Method 516.6)

และ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นการชาร์จไฟ และการจ่ายไฟ

ง. ทดสอบชุดแบตเตอรี่กับระบบบังคับทิศทางของปืนใหญ่จริง โดยทำสอบภาคสนามโดยเชิญคณะกรรมการทบ. ซึ่งประกอบด้วย กรมฝ่ายเสนาธิการ และกรมฝ่ายยุทธบริการที่รับผิดชอบ รวมถึงหน่วยใช้ร่วมทำการทดสอบ โดยการยิงทดสอบในภาคสนามนั้นจะทำการยิงทดสอบจำนวน 2 รอบ รวม 12 นัด โดยในแต่ละรอบประกอบด้วย

- ยิงครั้งละ 1 นัด จำนวน 1 ครั้ง
- ยิงเป็นชุด ชุดละ 5 นัด จำนวน 1 ครั้ง

7.) จัดทำรายงาน และคู่มือการใช้งาน และส่งมอบต้นแบบ

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.3 แสดงแผนการดำเนินงานในโครงการ ตารางที่ 1.4 แสดงผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

ตารางที่ 0.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	**การศึกษาเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน**																				
1.1	**เลือกซื้ออุปกรณ์วัดและเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน**	-DAQ, Accelerometer	1																		
1.2	**รวบรวม และวิเคราะห์ การใช้งานของชุดแบตเตอรี่ปัจจุบัน**	- ข้อมูลทางกายภาพเช่น ขนาด น้ำหนัก ของชุดแบตเตอรี่ จุดยึดและวิธีการวางและติดตั้งชุดแบตเตอรี่ - ข้อมูลทางไฟฟ้า เช่น ก. ค่ากระแส และ แรงดัน สูงสุด และ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ในการจ่ายและรับพลังงานของแบตเตอรี่ ข. กระแส และ แรงดันที่ต้องการของโหลด ต. ค่ากระแส และ/หรือ แรงดัน สูงสุด และต่ำสุดที่ยอมรับได้ของโหลด - ข้อมูลการชาร์จ จำนวนครั้งที่ใช้งานต่อการชาร์จ ความถี่ในการชาร์จ ข้อจำกัดระยะเวลาในการชาร์จที่เป็นอยู่แล้วต้องการ - ข้อมูลสภาวะการใช้งานชุดแบตเตอรี่ เช่น ข้อมูลด้านอุณหภูมิการใช้งาน สภาวะการเก็บรักษาและการขนย้าย ระยะเวลาการใช้งานต่อครั้ง	1																		
1.3	**รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางกลที่ชุดแบตเตอรี่ต้องถูกกระทำ**	-ปริมาณแรงสั่นสะเทือนระหว่างใช้งาน	2																		
2	**การคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่**																				
2.1	**วิเคราะห์ข้อมูลของแบตเตอรี่เทคโนโลยีที่ต้องการใช้ และศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในตลาด**	- ข้อมูลทางเทคนิคและราคาของเซลล์แบตเตอรี่ที่ต้องการที่สามารถเลือกใช้และหาซื้อได้	1																		
2.2	**จัดซื้อแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน**	- เซลล์แบตเตอรี่ที่จะนำมาทดสอบและประกอบเป็นชุดแบตเตอรี่	1-3																		
2.4	**ทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่**	-ข้อมูลคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่สำหรับการออกแบบและพัฒนาวงจรควบคุมแบตเตอรี่ เช่น - ขนาด น้ำหนักจริง กราฟแรงดันและความจุไฟฟ้าที่ค่า c-rate (และอุณหภูมิต่างๆ)	3-4																		

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน **(ต่อ)**

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	**<u>การออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่</u>**																				
3.1	**รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ และ แหล่งรับพลังงาน**	- ค่ากระแส และ แรงดัน มากที่สุด และ น้อยที่สุดในการจ่ายและรับพลังงานของแบตเตอรี่ - กราฟแรงดันที่ค่า c-rate และอุณหภูมิต่างๆ - กระแส และ แรงดันที่ต้องการของโหลด - ค่ากระแส และ/หรือ แรงดัน สูงสุด และต่ำสุดที่ยอมรับได้ของโหลด	1-4																		
3.2	**ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุม (ระบบ BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบป้องกัน)**	- Block diagram, electrical diagram (การต่อเชื่อมกัน และ การสื่อสารระหว่างกัน) - ขนาด และน้ำหนัก ของวงจร ที่จะใส่กล่องแบตเตอรี่ - รายการอุปกรณ์ ทั้งหมด	1-4																		
3.3	**จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมการจ่ายไฟ (เผื่อระยะเวลาเคลียร์ของ 37 วัน)**	- อุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อพัฒนาวงจรควบคุมการจ่ายไฟ	1-4																		
3.4	**จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับระบบ BMS, ระบบป้องกัน**	- อุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อพัฒนาวงจรระบบ BMS, ระบบป้องกัน	4																		
3.5	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบ Battery management system (BMS) ครั้งที่ 1**	- ข้อมูลการทดสอบ ระบบ BMS วงจรที่ 1 เพื่อ วิเคราะห์ ปรับปรุง และพัฒนา	5-6																		
3.6	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบ Battery management system (BMS) ครั้งที่ 2 (หากจำเป็น)**	- ระบบ BMS ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่	6-7																		
3.7	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ รวมถึงระบบป้องกันการจ่ายไฟเกิน ครั้งที่ 1**	- ข้อมูลการทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ วงจรที่ 1 เพื่อ วิเคราะห์ ปรับปรุง และ พัฒนา	7																		
3.8	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ รวมถึงระบบป้องกันการจ่ายไฟเกิน ครั้งที่ 2 (หากจำเป็น)**	- ระบบควบคุมการจ่ายไฟ ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่	8																		

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน **(ต่อ)**

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4	**<u>การออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ</u>**																				
4.1	**รวบรวมข้อมูลความต้องการในการชาร์จไฟฟ้า**	- ลักษณะ ฟังก์ชันการชาร์จไฟที่ต้องการ - ระยะเวลาในการชาร์จไฟสูงสุดที่ยอมรับได้	1																		
4.2	**AC system: ออกแบบกล่องใส่ระบบชาร์จไฟ, ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุมการชาร์จไฟฟ้า รวมถึงออกแบบฟังก์ชันการชาร์จ**	- ลักษณะ ขนาด รูปลักษณ์ของ กล่องชาร์จ - วิธีการสั่งงาน และแสดงสถานะการชาร์จ ตาม ฟังก์ชันการชาร์จ ที่ออกแบบ - Block diagram, electrical diagram (การต่อเชื่อมกัน และ การสื่อสารระหว่างกัน) - ลิสอุปกรณ์ ทั้งหมด	1-2																		
4.3	**DC system: เลือกซื้อระบบอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุมการชาร์จไฟฟ้า**	- รายละเอียดของวงจรที่เลือกซื้อ - ขนาด และน้ำหนัก ของระบบชาร์จ DC ที่จะใส่กล่องแบตเตอรี่ - วิธีและรายละเอียดในการใช้งาน (สำหรับทำคู่มือการชาร์จ)	1																		
4.4	**จัดซื้ออุปกรณ์สำหรับการพัฒนาเครื่องและระบบชาร์จ**	- อุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อพัฒนาวงจร	2-6																		
4.5	**ทดสอบ ระบบชาร์จ DC และระบบป้องกัน (จากอุปกรณ์ที่ซื้อว่าใช้ได้ตามต้องการหรือไม่)**	- ระบบชาร์จ DC และระบบป้องกัน ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่	7																		
4.7	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ AC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 1 (ทดสอบโดย PTEC)**	- ข้อมูลการทดสอบ ระบบชาร์จ AC วงจรที่ 1 เพื่อ วิเคราะห์ ปรับปรุง และ พัฒนา (ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60950 และ EN 61000-6-2)	4-6																		
4.8	**พัฒนา และ ทดสอบ ระบบชาร์จ AC และระบบป้องกัน ครั้งที่ 2 (ทดสอบโดย PTEC) (หากจำเป็น)**	- กล่องชาร์จแบตเตอรี่ (AC system) พร้อมใช้งาน (ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60950 และ EN 61000-6-2)	7-9																		

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน **(ต่อ)**

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	**การออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล**																				
5.1	**ออกแบบกล่องแบตเตอรี่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**	- แบบสั่งผลิตสำหรับกล่องแบตเตอรี่	1-2																		
5.2	**สั่งผลิตกล่องแบตเตอรี่**	-กล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 1	2-3																		
5.3	**ออกแบบชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่**	-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่	3-4																		
5.4	**ทดสอบความแข็งแรงของกล่องและจุดยึด โดยจำลองน้ำหนักและสภาพการใช้งาน**	-ข้อมูลความทนทานของกล่องและจุดยึดจากการออกแบบชุดที่ 1	4-5																		
5.5	**ออกแบบกล่องแบตเตอรี่ ครั้งที่ 2 (หากจำเป็น)**	-กล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2	5-6																		
5.7	**ทดสอบความแข็งแรงของกล่องและจุดยึด โดยจำลองน้ำหนักและสภาพการใช้งาน ครั้งที่ 2**	-ข้อมูลความทนทานของกล่องและจุดยึดจากการออกแบบชุดที่ 2	7																		
5.6	**ผลิตกล่องแบตเตอรี่ชิ้นที่ 2 และ 3 เพื่อบรรจุแบตเตอรี่สำหรับทดสอบและใช้จริง**	-กล่องแบตเตอรี่สำหรับบรรจุแบตเตอรี่ทดสอบ 1 ชิ้น และใช้จริง 1ชิ้น	5-9																		
5.8	**เลือกวัสดุกันกระแทกสำหรับกล่องแบตเตอรี่ รวมถึงการทำแบบจำลองทดสอบความแข็งแรง**	-ได้วัสดุกันกระแทกและการประกอบใส่และจัดวางวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสมสำหรับกล่องแบตเตอรี่ -ข้อมูลจุดอ่อน จุดแข็งของการออกแบบ	9-10																		

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน **(ต่อ)**

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	**การประกอบเพื่อพัฒนาและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่**																				
6.1	**ประกอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์ (ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่, BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบควบคุมการชาร์จไฟ) ชุดที่ 1**	-ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดที่ 1	11-12																		
6.2	**ทดสอบชุดแบตเตอรี่ครั้งที่ 1 ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G - Rain (Test Method 506.5) - Dust and Sand (Test Method 510.5) - Shock (Test Method 516.6) และ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นการชาร์จไฟและการจ่ายไฟ**	-ข้อมูลความทนทานของชุดแบตเตอรี่ว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่	13-14																		
6.3	**ทดสอบชุดแบตเตอรี่กับระบบบังคับทิศทางของปืนใหญ่จริง**	-ข้อมูลการใช้งานชุดแบตเตอรี่พร้อมเครื่องชาร์จ ภาคสนาม	14-17																		
6.4	**พัฒนา และทดสอบ วงควบคุมแบตเตอรี่ และระบบการชาร์จไฟ ระบบ DC (หากจำเป็น)**	- ระบบ BMS ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่ - ระบบควบคุมการจ่ายไฟ ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่ - ระบบชาร์จ DC และระบบป้องกัน ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่	14																		
6.5	**ประกอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์ (ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่, BMS, ระบบควบคุมการจ่ายไฟ, ระบบควบคุมการชาร์จไฟ) ชุดที่ 2**	-ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดที่ 2	15-16																		

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานรายเดือน **(ต่อ)**

	Activities	Expected Output	เดือนที่	เดือนที่																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6.6	**ทดสอบชุดแบตเตอรี่ครั้งที่ 2** **ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G** **- Rain (Test Method 506.5)** **- Dust and Sand (Test Method 510.5)** **- Shock (Test Method 516.6)** **และ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นการชาร์จไฟ** **และการจ่ายไฟ**	-ข้อมูลความทนทานของชุดแบตเตอรี่ว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่	16-17																		
7	**รายงานความก้าวหน้า**	-รายงานความก้าวหน้าราย 6 เดือน และ 12 เดือน	6, 12																		
8	**รายงานฉบับสมบูรณ์**		18																		

ตารางที่ 0.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
1-6	ศึกษาเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน	- องค์ความรู้เกี่ยวกับสภาวะการใช้งานแบตเตอรี่ที่เป็นอยู่
	คัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่	- ข้อมูลทางเทคนิคและราคาของเซลล์แบตเตอรี่ที่ต้องการที่สามารถเลือกใช้และหาซื้อได้และคุณสมบัติ
	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่	- แบบและต้นแบบวงจร BMS ที่ 1 - ข้อมูลการวิเคราะห์ทดสอบเพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนา
	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ	-รายละเอียดวงจร AC และ ระบบชาร์จ AC - รายละเอียดวงจร DC และ ระบบชาร์จ DC -อุปกรณ์การพัฒนาวงจร - ต้นแบบระบบชาร์จ AC พร้อมระบบป้องกัน พร้อมข้อมูลการทดสอบ AC แบบที่ 1
	รายงานความก้าวหน้า	- รายงานความก้าวหน้า 6 เดือน
	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล	-ข้อมูลการพัฒนาต้นแบบกล่องแบตเตอรี่ - รายละเอียดแบบของกล่องแบตเตอรี่ - ต้นแบบกล่องแบตเตอรี่ชุดที่ 1 - ผลการทดสอบความทนทานในการใช้งานของกล่อง
7-12	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่	- แบบและต้นแบบวงจร BMS ที่ 2 (หากแบบที่ 1 ไม่ผ่าน) - ระบบ BMS ที่พร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่ - ข้อมูลการทดสอบ ระบบควบคุมการจ่ายไฟ วงจรที่ 1 เพื่อ วิเคราะห์ ปรับปรุง และพัฒนา - ระบบควบคุมการจ่ายไฟที่ร้อมประกอบลงกล่องแบตเตอรี่
	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ	-รายละเอียดวงจร AC และ ระบบชาร์จ AC แบบที่ 2 - ต้นแบบระบบชาร์จ AC พร้อมระบบป้องกัน พร้อมข้อมูลการทดสอบ AC แบบที่ 2 - กล่องชาร์จแบตเตอรี่ (AC system) พร้อมใช้งาน (ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60950 และ EN 61000-6-2)
	รายงานความก้าวหน้า	- รายงานความก้าวหน้า 12 เดือน
	ออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล	- รายละเอียดแบบของกล่องแบตเตอรี่ - ต้นแบบกล่องแบตเตอรี่ชุดที่ 2 พร้อมวัสดุกันกระแทก และข้อมูลด้านการรับแรงทางกลจากการออกแบบ
12-18	ประกอบเพื่อพัฒนา ผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่ และทดสอบภาคสนาม	-ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ ชุดที่ 1 (แบตเตอรี่ BMS, ระบบชาร์จ) พร้อมข้อมูลการทดสอบทางกล และการใช้งานกับระบบบังคับทิศทางของปืนจริง -ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ ชุดที่2 (แบตเตอรี่ BMS, ระบบชาร์จ) พร้อมข้อมูลการทดสอบทางกล และการใช้งานกับระบบบังคับทิศทางของปืนจริง
	รายงานฉบับสมบูรณ์	- รายงานฉบับสมบูรณ์

1.7 กระบวนการประสานความร่วมมือ และถ่ายทอดความรู้

การประสานความร่วมมือกันระหว่างทีมวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ กับ สวพ.ทบ. ในโครงการนี้จะมีการประชุมติดตามความคืบหน้ารวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ในระหว่างการออกแบบตลอดจนการทดสอบอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้งซึ่งในขั้นตอนการทดสอบใช้งานจริงนั้นทางทีมวิจัยสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติจะส่งต้นแบบให้สวพ.ทบ. ไปทำการทดสอบ โดยทีมวิจัยสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติจะเป็นผู้ดำเนินการจัดการอบรม

นอกจากนี้ได้มีการประสานความร่วมมือในการถ่ายทอดองค์ความรู้ด้วยการส่งนักวิจัยของ สวพ.ทบ. เข้าร่วมการปฏิบัติงานร่วมกับนักวิจัยของ สวทช. เพื่อแลกเปลี่ยนเรียนรู้ในการดำเนินการวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นโครงการจนจบโครงการ โดยในขั้นเริ่มต้นของการศึกษาข้อมูล คัดเลือก และทดสอบเซลล์แบตเตอรี่จะให้นักวิจัยร่วมทางทหารเข้าไปศึกษาข้อมูล รูปแบบ เครื่องมือในการทดสอบแบตเตอรี่ เพื่อให้ทราบข้อมูลพื้นฐานในการดำเนินการเบื้องต้นของแบตเตอรี่ ส่วนขั้นตอนการออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์ต จะให้นักวิจัยร่วมทางทหารร่วมเรียนรู้ และให้ข้อคิดเห็นในการออกแบบ รวมถึงการออกแบบ พัฒนา ทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล ซึ่งทางนักวิจัยทางทหาร และหน่วยใช้ต้องเข้าไปให้ข้อคิดเห็นในการใช้งานพร้อมเรียนรู้ในการออกแบบและพัฒนาในการเลือกใช้วัสดุ รูปแบบการทดสอบ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเพื่อให้นักวิจัยทางทหารสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบหรือออกแบบการใช้งานให้เหมาะสมกับการดำเนินการของทหารต่อไปได้ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นการพัฒนาทักษะ และเพิ่มพูนความรู้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ หรือถ่ายทอดให้กับกำลังพลอื่นๆ ได้ พร้อมกันนี้ได้มีการกำหนดให้มีการจัดการอบรมให้กับกำลังพลในหน่วยที่เกี่ยวข้องและในหน่วยที่มีความสนใจ เพื่อเป็นการถ่ายทอดองค์ความรู้ และสร้างโอกาสในการต่อยอดไปสู่การผลิต และขยายผลไปสู่การแก้ไขปัญหาเรื่องแบตเตอรี่ให้กับยุทโธปกรณ์อื่นๆ ต่อไปได้ รวมถึงมีการจัดทำคู่มือในการดำเนินการปรนนิบัตรรักษาแบตเตอรี่เบื้องต้น เพื่อให้หน่วยใช้ได้นำไปปฏิบัติใช้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

1.8 งบประมาณ

ตารางที่ 0.5 งบประมาณและคาดการณ์การใช้งบประมาณเป็นงวด (6 เดือน)

รายการ	**งวดที่ 1** (เดือนที่ 1-6)	**งวดที่ 2** (เดือนที่ 7-12)	**งวดที่ 3** (เดือนที่ 13-18)	**งวดที่ 4** (เบิกจ่ายหลังโครงการเสร็จสิ้น)	**รวม**
ค่าตอบแทนนักวิจัย	**260,000**	**210,000**	**130,000**	**80,000**	**680,000**
หัวหน้าโครงการ (พ.อ.รัตติพล ตันยา)	60,000	60,000	30,000	30,000	180,000
นักวิจัย คนที่ 1 (ดร.พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์)	40,000	40,000	20,000	20,000	120,000
นักวิจัย คนที่ 2 (ดร.พิมพา ลิ้มทองกุล)	15,000	15,000	7,500	7,500	45,000
นักวิจัย คนที่ 3 (ดร.วิศาล ลีลาวัฒน์)	22,500	22,500	11,250	11,250	67,500
นักวิจัย คนที่ 4 (ดร.จิราวรรณ มงคลธนทรรศ)	22,500	22,500	11,250	11,250	67,500
นักวิจัย คนที่ 5 (พ.ท. อำนาจ สารันต์)	50,000	25,000	11,250	11,250	100,000
นักวิจัย คนที่ 6 (พ.ท. ประทีป โภคินวงศ์)	50,000	25,000	11,250	11,250	100,000
ค่าจ้าง	**172,000**	**86,000**	**86,000**	**-**	**344,000**
ผู้ช่วยวิจัย คนที่ 1 (พ.ท. กิติศักดิ์ กาญจนะวสิต)	50,000	25,000	25,000		100,000
ผู้ช่วยวิจัย คนที่ 2 (น.ส. ธนวรรณ มงคลหมู่)	50,000	25,000	25,000		100,000
ผู้ช่วยวิจัย คนที่ 3 (นาย ภัทรกร รัตนวรรณ์)	72,000	36,000	36,000		144,000
ค่าใช้สอย	**383,600**	**398,600**	**543,600**	**-**	**1,325,800**
ค่าเดินทาง *[1]	18,000	18,000	18,000		54,000
ค่าอาหาร/ของว่างการประชุม 6 ครั้ง ครั้งละ 30 นาย	9,000	9,000	9,000		27,000
ค่าที่พักในการไปทดสอบ 1 คืน (1,200 บาท/ห้อง) จำนวน 10 ห้อง 3 ครั้ง	15,600	15,600	15,600		46,800
ค่าติดต่อสื่อสาร	6,000	6,000	6,000		18,000
ค่าจัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์		15,000	15,000		30,000
ค่าทดสอบต้นแบบทางไฟฟ้าและเครื่องกล	325,000	325,000			650,000
ค่าทดสอบต้นแบบภาคสนาม (รวมค่ากระสุนปืนใหญ่)			470,000		470,000
ค่าอุปกรณ์สำนักงาน	10,000	10,000	10,000		30,000
ค่าวัสดุวิจัย (สำหรับแบตเตอรี่ 4 ชุด) *[2]	**1,552,000**	**-**	**-**	**-**	**1,552,000**
เซลล์แบตเตอรี่ (Li-on Pack cell) 4 ชุด	720,000				720,000
AC to DC Converter 4 ชุด	140,000				140,000
วัสดุทำกล่องบรรจุแบตเตอรี่ 4 ชุด	200,000				200,000
Power Connector 4 ชุด	24,000				24,000
วัสดุกันสะเทือนและความร้อน 4 ชุด	88,000				88,000

รายการ	งวดที่ 1 (เดือนที่ 1-6)	งวดที่ 2 (เดือนที่ 7-12)	งวดที่ 3 (เดือนที่ 13-18)	งวดที่ 4 (เบิกจ่ายหลังโครงการเสร็จสิ้น)	รวม
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรชาร์จแบตเตอรี่ภายใน 4 ชุด	120,000				120,000
อุปกรณ์อิเล็กรอนิกส์สำหรับวงจรควบคุมการทำงานชองแบตเตอรี่ 4 ชุด	80,000				80,000
อุปกรณ์อิเล็กรอนิกส์สำหรับวงจรชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก 4 ชุด	180,000				180,000
รวมค่าใช้จ่าย	**2,367,600**	**694,600**	**759,600**	**80,000**	**3,901,800*[3]**

หมายเหตุ

รายละเอียดประมาณการงบประมาณการทดสอบและรายการทดสอบตามเอกสารแนบที่ 2 โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 รอบ

*[1] ค่าเดินทางรวมการเดินทางทั้งหมดโดยจ้างเหมารถตู้ (ค่าเช่ารถตู้ 2,000 บาท/วัน ค่าน้ำมัน 1,000 บาท/รอบ) ไป-กลับ กรุงเทพ-ลพบุรี 6 ครั้ง ครั้งละ 2 วัน (ค้าง 1 คืน) ระยะทางประมาณ 300 ก.ม.

*[2] ราคางบประมาณวัสดุวิจัยสำหรับทำชุดแบตเตอรี่ 4 ชุด (รวมอุปกรณ์ชาร์จ) แบ่งเป็น

ก. ต้นแบบวิจัยสำหรับใช้ทดสอบ 2 ชุด

ข. ต้นแบบพร้อมทดสอบใช้งานกับปืนใหญ่ได้อีก 2 ชุด

*[3] กองทัพจะให้การสนับสนุนงบประมาณในหมวดค่าใช้สอย ส่วนค่าทดสอบต้นแบบภาคสนาม (รวมค่ากระสุนปืนใหญ่) จำนวน 470,000 บาท **คงเหลืองบประมาณ 3,431,800 บาท**

1.9 เอกสารอ้างอิง

[1] Chueng, A, Electric Vehicle Revolutionized Energy, *Bloomberg New Energy Finance Submit,* 6 April 2001.

[2] พิมพา ลิ้มทองกุล Rechargeable Batteries: ทางเลือกของพลังงานแบบพกพา วารสารวัสดุ ฉบับที่ 30 ม.ค. – มี.ค. 2546 หน้า 47

[3] Frost & Sullivan, “Battery Market”, 2009

[4] พิมพา ลิ้มทองกุล สารพันความรู้ด้านพลังงาน: รู้จักแบตเตอรี่ ตอนที่ 2, วารสารวัสดุ ฉบับที่ 75 ม.ค. – มี.ค. 2558 หน้า 65

[5] Andrea D., *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*. Artech House, 2010.

[6] Elias M. F. M., Nor K. M., and Arof A. K., “Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Batteries,” in *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005*, 2, 1485–1490, 2005

[7] Moore S. W. and Schneider P. J., “A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems,” SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2001-01-0959, Mar. 2001.

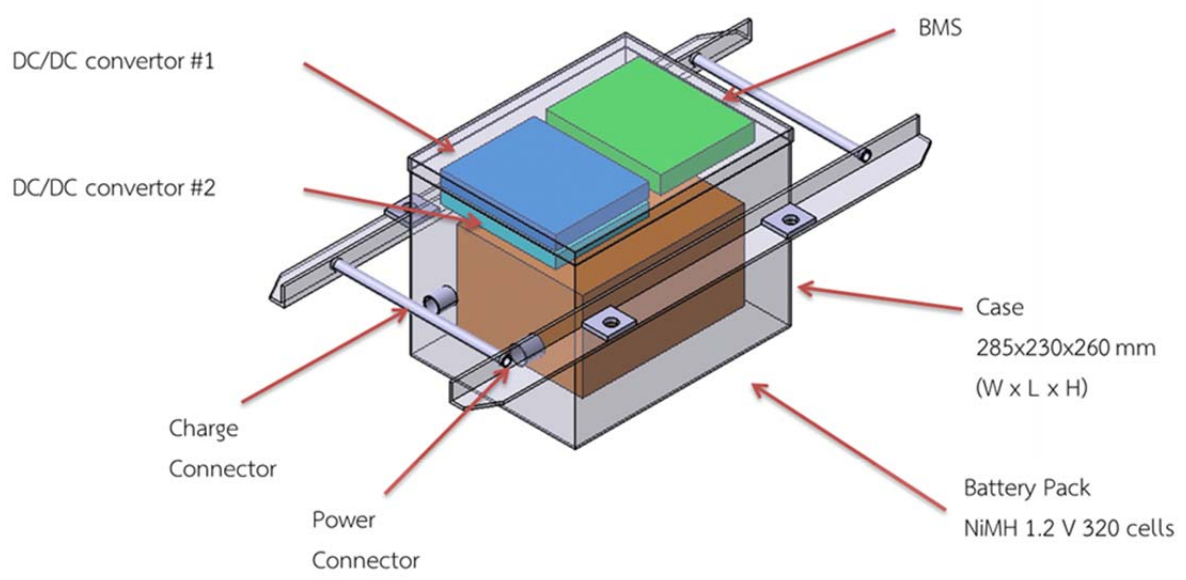
[8] Hsieh Y.-H., Liang T.-J., Chen S.-M. O., Horng W.-Y., and Chung Y.-Y., "A Novel High-Efficiency Compact-Size Low-Cost Balancing Method for Series-Connected Battery Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(12) 5927–5939, 2013.
[9] Liu L. and Li G., "Battery cell monitoring and balancing circuit," US8237411 B2, 07-Aug-2012.
[10] Collar S., Stratmoen S., Sutowski R. J., and Trainor M. J., "Balanced battery charger," EP0863598 B1, 03-Sep-2003.
[11] Sack T. T., Tice J. C., and Reynolds R., "Segmented battery charger for high energy 28 V lithium ion battery," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, 16(9), 15–18, 2001.
[12] Hoff M., "Battery charger with integrated cell balancing," US8098048 B2, 17-Jan-2012.
[13] Merritt L.V., Sunnyvale, Calif., "Battery charger for charging a stack of multiple lithium ion battery cells.", US006121751A, 19-Sep-2000
[14] Nietoa N., Díaza L., Gastelurrutiaa J., Blancoa F., Ramosb J. C., Rivas A. Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, 272, 291-302 (2014).
[15] Martin J. Brand, et al., "Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells," *Journal of Power Sources*, 288, 62-69 (2015).
[16] Avdeev I. and Gilaki M., "Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact," *Journal of Power Sources* 271, 382-391 (2014)
[17] Low K.H., "Drop-impact cushioning effect of electronics products formed by plates," *Advances in Engineering Software* 34(1), 31-50. (2003).
[18] MIL-STD-810G: Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, October 2008, Department of Defense

บทที่ 2 การศึกษาเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งาน

2.1 การใช้งานของชุดแบตเตอรี่เดิม

2.1.1 ข้อมูลทางกายภาพ

ลักษณะของแบตเตอรี่เดิมนั้นมีขนาด กว้าง 285 มม. ยาว 230 มม. และ สูง 260 มม. ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีน้ำหนักรวมประมาณ 25 กิโลกรัม ด้านในถูกบรรจุด้วยแบตเตอรี่ nickel–cadmium (NiCd battery) ขนาด 1.2 V จำนวน 320 ก้อน



รูปที่ 0.1 ลักษณะของแบตเตอรี่เดิม

โดยตำแหน่งการติดตั้งของแบตเตอรี่นั้นจะติดอยู่ที่ด้านท้ายของปืนใหญ่ ดังที่แสดงในรูป 2.2 ก. และจะมีตำแหน่งจุดยึดแสดงในรูปที่ 2.2 ข. เพื่อจ่ายพลังงานให้กับ ระบบควบคุมของปืนใหญ่ (ปรับตำแหน่ง และทิศทางในการยิง), หน้าจอ และ ล้อ



ก) ข)

รูปที่ 0.2 ก) แสดงตำแหน่งติดตั้งของปืนใหญ่ และ ข) แสดงตำแหน่งจุดยึดของแบตเตอรี่

2.1.2 ข้อมูลทางไฟฟ้า

โดยปกติปืนใหญ่จะมีการใช่กระแสไฟฟ้าโดยเฉลียอยู่ที่ 3 แอมแปร์ แต่จะมีบ้างช่วงที่ปืนมีการใช้ไฟสูงขึ้น เช่น ช่วงการปรับทิศของปืนใหญ่ และ ขณะทำการยิง โดยจะใช้กระแสประมาณ 6 แอมแปร์ ในช่วงเวลาสั้น (น้อยกว่า 1 วินาที)

2.1.3 ข้อมูลการชาร์จ

ลักษณะการชาร์จกล่องแบตเตอรี่ ขนาด 30 แอมแปร์ชั่วโมง (แบตเตอรี่เดิม) มี 2 ลักษณะคือ

1. การชาร์จด้วยจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีกล่องชาร์จทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงให้เหมาะสมกับชุดแบตเตอรี่ รวมถึงควบคุมการชาร์จด้วย การชาร์จแบบนี้จะเป็นการชาร์จที่โรงเก็บแบตเตอรี่เท่านั้น
2. การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการชาร์จชุดแบตเตอรี่เมื่อออกซ้อมภาคสนาม โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (แบตเตอรี่รถยนต์) จะถูกต่อเข้ากับกล่องชาร์จ และ ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ต่อไป โดยกล่องชาร์จจะทำหน้าที่ควบคุมการชาร์จเท่านั้น การชาร์จแบบนี้นั้นมีกระแส (C-rate) อยู่ที่ C/20 หรือ เท่ากับ 1.5 แอมแปร์ ดังนั้นการชาร์จชุดแบตเตอรี่ 30 แอมแปร์ชั่วโมง จะใช้เวลา 20 ชั่วโมง

2.1.4 ข้อมูลสภาวะการใช้งานชุดแบตเตอรี่

ลักษณะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่มี 2 ลักษณะ คือ

1. การใช้งานประจำ (Routine test) เป็นการใช้ชุดแบตเตอรี่เพื่อทดสอบระบบต่างๆของปืนใหญ่ ซึ่งนำแบตเตอรี่ต่อกับระบบปืนใหญ่ที่โรงเก็บปืนใหญ่ ซึ่งไม่ได้อยู่กลางแดด จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าการใช้งานภาคสนามเล็กน้อย โดยมีความถี่ในการใช้งานเท่ากับ 1 ครั้ง/สัปดาห์ (10 นาที/วัน) โดยมีการชาร์จไฟใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งาน ซึ่งสามารถคิดได้เป็นจำนวนรอบการใช้งานชุดแบตเตอรี่ 30 แอมแปร์.ชั่วโมง (กล่องแบตเตอรี่เดิม) เท่ากับ 52 รอบ/ปี
2. การใช้งานจริงภาคสนาม เป็นการใช้งานในการทดสอบยิงปืนจริง ถือเป็นการใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูง ความถี่ในการฝึกซ้อมภาคสนามเท่ากับ 2-3 ครั้ง/ปี, 3 วัน/ครั้ง และวันละประมาณ 8 ชั่วโมง นั่นคือแบตเตอรี่ขนาด 30 แอมแปร์.ชั่วโมง (กล่องแบตเตอรี่เดิม) มีจำนวนวงรอบการใช้งานเท่ากับ 6-9 รอบ/ปี ดังนั้น จำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่ รวม 58-61 รอบ/ปี

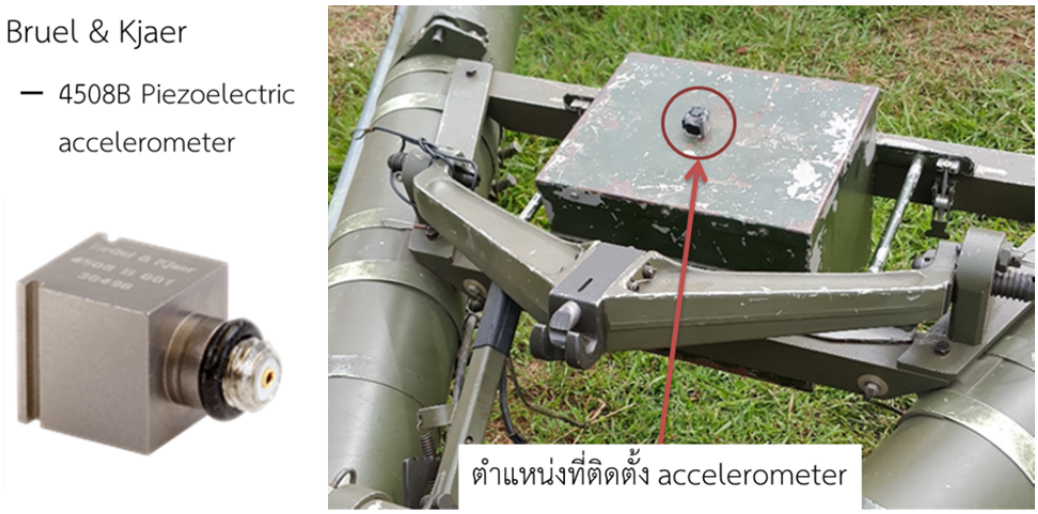
เมื่อไม่ได้ถูกใช้งาน กล่องแบตเตอรี่จะถูกเก็บไว้ในห้องเก็บแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นห้องพัดลม และไม่ได้เปิดพัดลมตลอดเวลา อุณหภูมิห้อง ในวันที่ไปเยี่ยมชมห้องเก็บแบตเตอรี่ (วันที่ 27 สิงหาคม 2558) อุณหภูมิภายในห้องประมาณ 32 °C และจากการสัมภาษณ์ อุณหภูมิในห้องเก็บจะสูงสุดที่ประมาณ 38-39°C

ในการขนย้ายชุดปืนใหญ่นั้น แบตเตอรี่จะไม่ได้ถูกติดตั้งไว้กับปืนใหญ่ จะบรรทุกแยกไปบนรถลากปืนใหญ่ และจะถูกติดตั้งอีกครั้งที่สนามซ้อมยิง

2.2 รวบรวม และวิเคราะห์ ข้อมูลทางกลที่ชุดแบตเตอรี่ต้องถูกกระทำ-ปริมาณแรงสั่นสะเทือนระหว่างใช้งาน

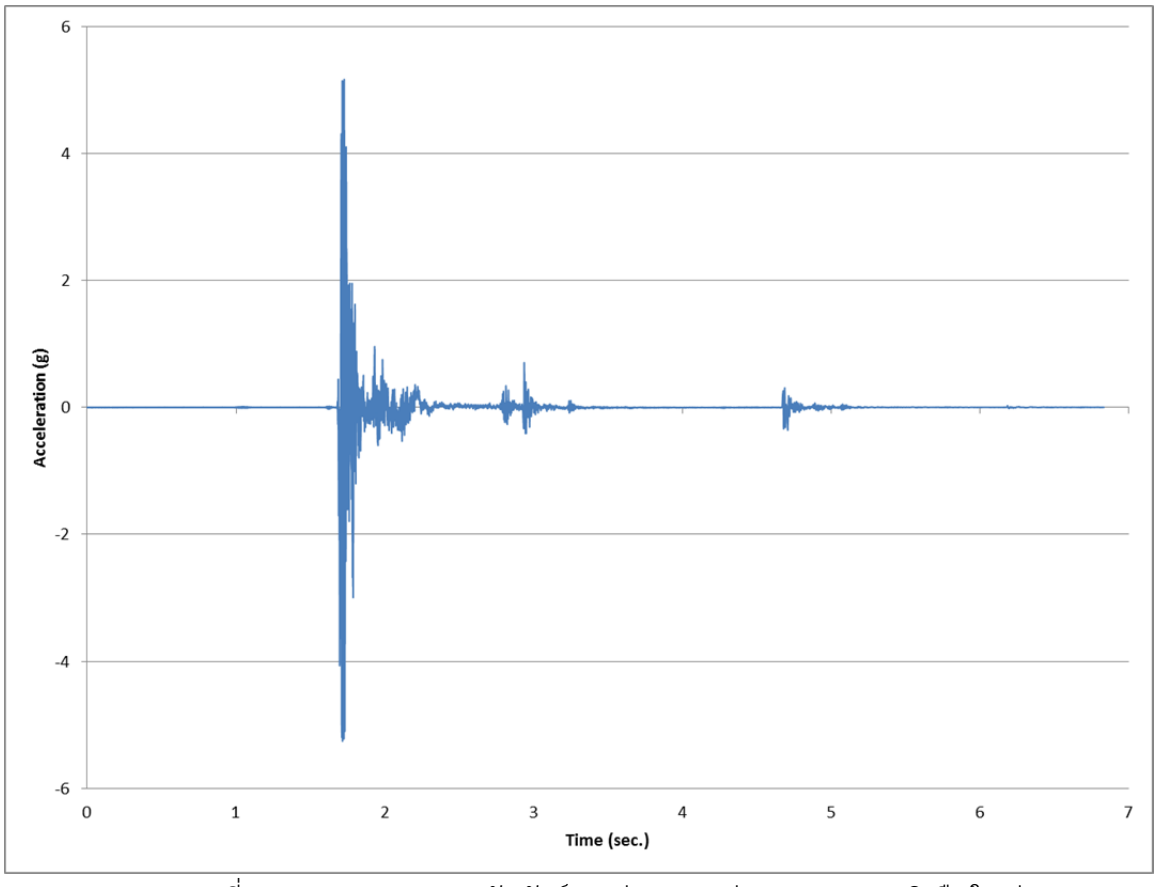
2.2.1 แรงกระแทกที่กระทำต่อแบตเตอรี่ขณะยิง

ขณะทำการทดสอบยิงปืนใหญ่ เราได้ทำการติดเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) ตามรูปที่ 2.3 ก. ไว้ที่แบตเตอรี่ปืนใหญ่ ตามรูปที่ 2.3 ข. ขณะที่ทำการยิงทดสอบเพื่อวัดแรงกระแทกและระยะเวลาที่สั่นเมื่อทำการยิงปืนใหญ่ ซึ่งหลังจากที่ทำการทดสอบยิงพบว่า แรงสั่นสะเทือนที่ทำกับแบตเตอรี่เมื่อทำการยิงปืนใหญ่นั้นมีค่าไม่มากและมีลักษณะคล้ายๆ กัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่งที่เกิดขึ้นขณะยิงปืนใหญ่และเวลา โดยลักษณะของกราฟนั้นจะพบว่า จะมีความเร่งเกิดขึ้นในเวลาที่สั้นๆ และมีความแรงไม่มากแต่เกิดขึ้นที่ความถี่สูง



ก) ข)

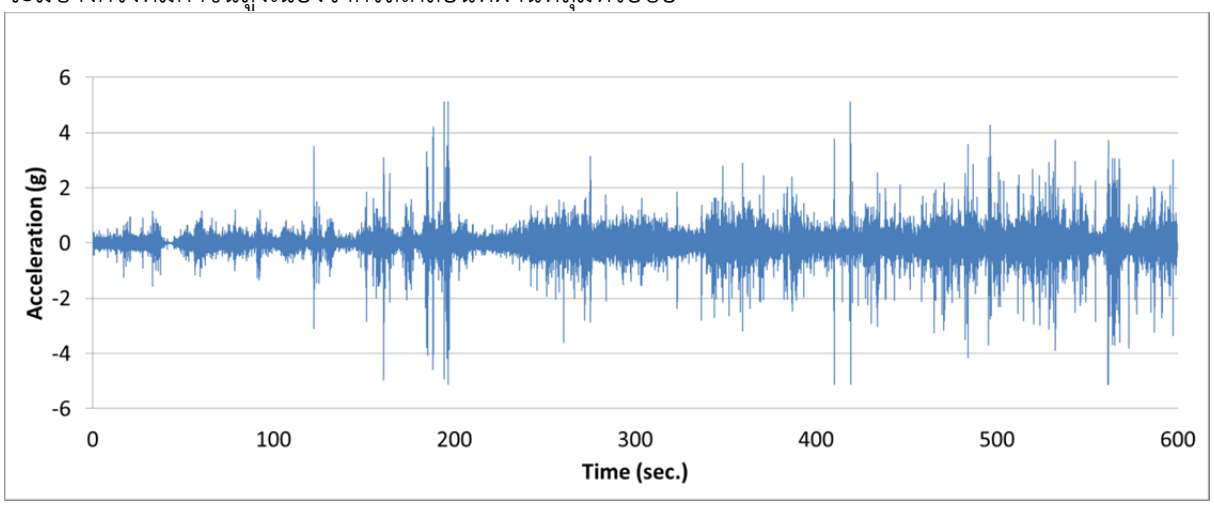
รูปที่ 0.3 ก) รูปแสดงเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) และ ข) รูปแสดงตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องวัดความเร่งบนกล่องแบตเตอรี่



รูปที่ 0.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาขณะยิงปืนใหญ่

2.2.2 แรงกระแทกที่กระทำต่อแบตเตอรี่ขณะทำการเคลื่อนย้ายปืน

ทางคณะวิจัยได้ทำการติดเครื่องวัดความเร่งไว้ที่แบตเตอรี่ปืนใหญ่ระหว่างที่ทำการเคลื่อนย้ายปืนไปเก็บ โดยใช้รถลากจูง ซึ่งทางทหารได้ทำการขับผ่านเส้นทางที่มีความขรุขระ มากกว่าปกติ เพื่อที่จะสามารถหาค่าความเร่งสูงสุดที่จะกระทำต่อแบตเตอรี่ หลังจากการทดสอบพบว่าแรงกระแทกที่กระทำระหว่างเคลื่อนที่นั้นจะมีระยะเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งขึ้นกับระยะเวลาของการขนย้าย และแรงที่กระทำนั้นมีลักษณะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศระหว่างขนย้าย ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่งที่เกิดขึ้นขณะยิงปืนใหญ่และเวลา จากรูปพบว่าค่าความเร่งที่เกิดมีค่าไม่ได้มากเป็นส่วนใหญ่ซึ่งน้อยกว่า 2G แต่จะมีบางครั้งที่มีค่าขึ้นสูงเนื่องจากรถเคลื่อนที่ผ่านหลุมหรือบ่อ

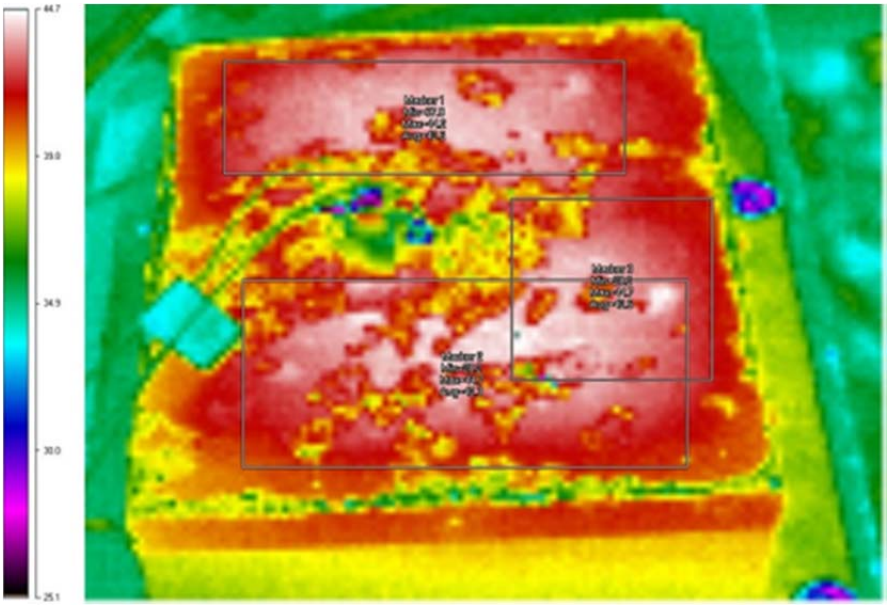


รูปที่ 0.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่งที่เกิดขึ้นขณะยิงปืนใหญ่และเวลา

จากผลการวัดแรงกระแทกพบว่า แรงกระแทกที่เกิดจากการยิงนั้นไม่น่ามีผลต่อการออกแบบกล่องเนื่องจากพลังงานที่ส่งมาถึงตัวกล่องแบตเตอรี่นั้นน้อยมาก รวมทั้งกระสั่นสะเทือนขณะที่ใช้รถลากปืนใหญ่เองก็มีขนาดไม่ได้มาก ข้อมูลดังกล่าวจึงไม่น่าส่งผลต่อการออกแบบกล่องแบตเตอรี่ ดังนั้นการออกแบบกล่องแบตเตอรี่จะยึดแรงกระแทกตาม MIL-STD-810G ในหัวข้อ 516.6 เป็นหลัก

2.2.3 ข้อมูลด้านการะบายความของแบตเตอรี่

ในวันที่ทำการทดสอบยิง อุณหภูมิภายนอกนั้นอยู่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งในวันนั้นไม่ได้มีแสงแดดจัด แต่พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของแบตเตอรี่นั้นมีอุณหภูมิขึ้นสูงถึง 47 องศาเซลเซียส ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นภาพของกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยแสงอินฟราเรด ดั้งนั้นในการออกแบบกล่องแบตเตอรี่จึงไม่ควรที่จะมีครีบระบายความร้อนติดอยู่ที่ด้านนอกของกล่องแบตเตอรี่ เพราะว่าจะเป็นการเพิ่มพื้นที่รับความร้อนของกล่องแบตเตอรี่



รูปที่ 0.6 รูปถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยแสงอินฟราเรด

บทที่ 3 การคัดเลือกและทดสอบเซลล์แบตเตอรี่

เซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ได้ถูกพิจารณาเลือก ในการนำมาประกอบเป็นชุดแบตเตอรี่ ดังรายละเอียดการพิจารณาคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ในบทที่ 1 อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ มีหลากหลายรูปแบบ และหลายประเภทแตกต่างกันมากมาย การพิจารณาเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่ให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญ เพื่อให้การเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่สำหรับชุดแบตเตอรี่นี้ตรงตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้ และคุ้มค่าในการลงทุน

ในการพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ชนิดชนิดลิเทียมไอออนที่มีความเหมาะสมนี้ จะพิจารณาจากการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน จากเอกสารทางเทคนิค และการวิเคราะห์ทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ในห้องปฏิบัติการ เมื่อพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีคุณสมบัติตามต้องการแล้ว จึงออกแบบชุดแบตเตอรี่เบื้องต้น และจัดซื้อชุดแบตเตอรี่เพื่อประกอบชุดแบตเตอรี่

3.1 ศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

จุดประสงค์ของการศึกษานี้คือ พิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีอยู่ในท้องตลาด 3 ประเภท เพื่อนำมาวิเคราะห์ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในขั้นถัดไป โดยในขั้นตอนการคัดเลือกนี้จะอาศัยข้อมูลจาก 3 ส่วนคือ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติชุดแบตเตอรี่ที่ต้องการ, จากการศึกษาคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ และการศึกษาข้อมูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในท้องตลาด

3.1.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เซลล์แบตเตอรี่ทุติยภูมิระบบลิเทียม ได้พลังงานทางไฟฟ้าจากการออกซิเดชั่น และการรีดักชัน ของลิเทียม [1] ซึ่งเป็นเซลล์ที่สามารถปล่อยประจุ (Discharge) และ ประจุพลังงาน (Charge) ได้หลายครั้ง คุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณาเซลล์แบตเตอรี่ ได้แก่

ก. แรงดันไฟฟ้าระบุ (Nominal voltage) หมายถึง ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว มีหน่วยคือ โวลต์ (V)

ข. พลังงานจำเพาะ (Specific energy) หมายถึง ค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก มีหน่วยคือ วัตต์. ชั่วโมง/กิโลกรัม (Wh/kg)

ค. ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (Capacity) หมายถึงความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่จำนวนชั่วโมงหนึ่งมีหน่วยคือ แอมแปร์ชั่วโมง (Ah)

ง. กระแสไฟฟ้าประจุ และ กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ โดยปกติค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์แบตเตอรี่จะแสดงเป็นจำนวนเท่าของค่าความจุไฟฟ้า (C-rate) หรือ ในรูปของ C/ตัวเลข เช่น 0.2C หรือ C/5, 0.5C หรือ C/2, 1C เป็นต้น (ตามมาตรฐาน มอก. จะแสดงในรูปแบบ C_n ซึ่ง n หมายถึง ตัวเลข) ตัวเลขที่ห้อยท้ายนี้จะหมายถึง จำนวนชั่วโมงในการประจุ และปล่อยประจุที่กระแสไฟฟ้าคงที่ ขนาดของกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ อัตราส่วนระหว่างขนาดความจุไฟฟ้า และตัวเลข (n) มีหน่วยคือ แอมแปร์ (A)

จ. ความคงทนเป็นวัฏจักร หรือ อายุการใช้งาน ซึ่งแสดงเป็นจำนวนรอบของวัฏจักรการประจุ/ปล่อยประจุที่เซลล์แบตเตอรี่สามารถคงทนอยู่ได้ก่อนที่ความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจะลดลง เหลือประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของความจุไฟฟ้าที่กำหนด มีหน่วยคือ รอบ (cycle)

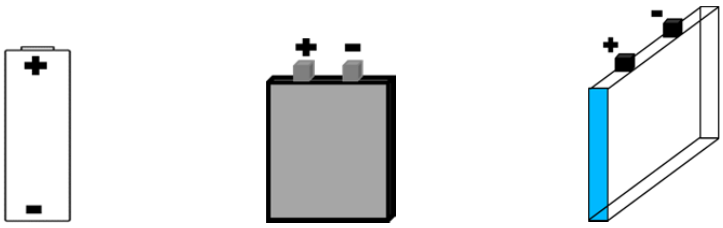
แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีหลายประเภทประกอบไปด้วย แคโทดต่างชนิดกัน เช่น Lithium cobalt oxide (Li-CoO_2 – LCO), Lithium manganese oxide (Li- (Ni,Mn)O_2 - LMO), Lithium Nickel

Cobalt Manganese Oxide ($Li(Ni,Mn,Co)O_2$ – NCM หรือ NMC), Lithium-iron phosphate ($Li\text{-}FePO_4$ – LFP) หรือแอโนดต่างชนิดกัน เช่น Carbon หรือ $Li_2Ti_5O_{12}$ ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 0.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิด LCO มีแรงดันไฟฟ้าระบุ และพลังงานจำเพาะ สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่มีกระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ และ กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุน้อยกว่าชนิดอื่น

ตารางที่ 0.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่แต่ละประเภท [2-3]

Li-ion chemistry	Li-Cobalt	Li-manganese	Li-phosphate	Li-titanate
แรงดันไฟฟ้าระบุ (โวลต์) (Nominal Voltage; V)	3.6	3.6	3.2	2.4
พลังงานจำเพาะ (วัตต์.ชั่วโมง/กิโลกรัม) (Specific energy; Wh/kg)	150-250	100-150	90-120	70-80
กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ (แอมแปร์) (C-rate Discharge; A)	0.5C-1C	1C-5C	2C-10C	2C-10C
กระแสไฟฟ้าประจุ (แอมแปร์) (C-rate Charge; A)	0.5C-1C	0.5C-1C	1C-5C	2C-12C
ความคงทนเป็นวัฏจักร (รอบ) (Life cycle; cycles)	500-1000	500-1000	1000-2000	3000-7000

นอกจากนี้ เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมี 2 รูปทรง ตามมาตรฐานมอก. 2218-2548 [1] ได้แก่ ทรงกระบอก (Cylindrical cell) และทรงเหลี่ยม (เช่น เซลล์แบบถุงกาแฟ (Pouch-bag cell) และเซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Prismatic cell)) ดังรูปที่ 0.1 ตัวอย่างคุณสมบัติของแบตเตอรี่ทั้ง 3 รูปแบบ ที่มีในท้องตลาดแสดงดังตารางที่ 0.2 จะเห็นได้ว่า เซลล์แบตเตอรี่ทรงกระบอกมีความจุจำเพาะสูงกว่าเซลล์แบตเตอรี่รูปแบบอื่น แต่มีความจุไฟฟ้าที่กำหนดน้อยกว่ารูปแบบอื่น เพราะขนาดเล็กกว่า



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 0.1 เซลล์แบตเตอรี่รูปแบบต่างๆ (ก) เซลล์แบบทรงกระบอก (ข) เซลล์แบบถุงกาแฟ (ค) เซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากข้อมูลเบื้องต้น เซลล์แบตเตอรี่ที่พิจารณาต่อไป คือ เซลล์รูปแบบทรงกระบอก เนื่องจากขนาดที่ไม่ใหญ่เหมือนกับเซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ขนาดไม่พอเหมาะสำหรับประกอบ และติดตั้งได้ในกล่องแบตเตอรี่ในขนาดที่กำหนด นอกจากนี้ความยุ่งยากในการประกอบน้อยกว่าเซลล์แบบถุงกาแฟ เซลล์แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกนี้ มักจะเป็นเซลล์แบตเตอรี่ประเภท LCO, LMO หรือ LFP

ตารางที่ 0.2 ตัวอย่างคุณสมบัติของแบตเตอรี่แต่ละรูปทรง [4-6]

แบตเตอรี่	รูปทรง	แรงดันไฟฟ้าระบุ (โวลต์)	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (แอมแปร์ชั่วโมง)	พลังงาน (วัตต์.ชั่วโมง)	ขนาด			น้ำหนัก (กรัม)	พลังงานจำเพาะ (วัตต์.ชั่วโมง/กิโลกรัม)
					ความสูง (มม.)	ความกว้าง (มม.)	ความยาว (มม.)		
ก	กระบอก	3.7	3	11	65	18.25 (เส้นผ่านศูนย์กลาง)	-	48	229.17
ข	ถุงกาแฟ	3.65	17.5	64	172	5.8	253	430	148.84
ค	กล่องสี่เหลี่ยม	3.75	63	240	125	45	173	1990	120.60

3.1.2 วิเคราะห์ความต้องการ/คุณสมบัติของชุดแบตเตอรี่

คุณสมบัติของชุดแบตเตอรี่ที่ต้องการดังรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2 จะถูกนำมาวิเคราะห์ และเชื่อมโยงกับคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. แรงดัน (Nominal voltage) 24 โวลต์ เซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีระดับแรงดันอยู่ในช่วง 3.2-3.8 โวลต์ นั่นคือ เซลล์แบตเตอรี่หลายๆ เซลล์จะต้องต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันที่กำหนด

ข. ความจุไฟฟ้า 90 แอมแปร์ชั่วโมง เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยปกติ 3 แอมแปร์ เป็นเวลาประมาณ 30 ชั่วโมง ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ ของเซลล์แบตเตอรี่ในสภาวะการใช้งาน เท่ากับ C/30 แอมแปร์

ค. กระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบโหลดเท่ากับ 6 แอมแปร์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าปล่อยประจุสูงสุดเท่ากับ C/15

ง. การประจุไฟฟ้า ต้องประจุไฟฟ้าเร็วที่สุด 3-4 ชั่วโมง นั่นคือ เซลล์แบตเตอรี่ต้องสามารถประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าประจุเท่ากับ C/3-C/4 แอมแปร์

จ. อายุการใช้งานของชุดแบตเตอรี่อย่างน้อย 3 ปี โดยมีการใช้งาน 58-61 รอบ/ปี แต่ในการใช้งานจริง มีการใช้ชุดแบตเตอรี่ 2 ชุด สลับกัน ดังนั้นจำนวนครั้งในการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ 1 ชุด สูงสุดเท่ากับ 31 รอบ/ปี นั่นคืออายุการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่ต้องมากกว่า 93 รอบ

นอกจากคุณสมบัติของชุดแบตเตอรี่ดังที่กล่าวมาข้างต้นที่มีผลต่อการพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ ลักษณะการใช้งานชุดแบตเตอรี่ และการเก็บรักษาชุดแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิสูงยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้อายุการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่สั้นลง (โดยปกติคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่จะระบุอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

3.1.3 ศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในท้องตลาด

จากการพิจารณาเซลล์แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกที่มีในท้องตลาด สามารถสรุปรายละเอียดของข้อมูลทางเทคนิค และราคา ของแบตเตอรี่ทั้งหมด 6 ยี่ห้อ ได้ดังตารางที่ 0.3 และ ตารางที่ 0.4 แบตเตอรี่ที่ 1 ถึง 5 เป็นแบตเตอรี่ชนิด 18650 หรือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 มิลลิเมตร ส่วนแบตเตอรี่ที่ 6 เป็นเซลล์ขนาด 26650 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 26 มิลลิเมตร แบตเตอรี่ที่มีความจุไฟฟ้าที่กำหนด ความหนาแน่นทางพลังงาน และ พลังงานจำเพาะสูงสุด คือเซลล์แบตเตอรี่ที่ 1 (Panasonic) แต่มีราคาสูง

เมื่อพิจารณาความคงทนเป็นวัฏจักร ในตารางที่ 0.4 จะเห็นได้ว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่ 1 ถึง 5 มีอายุการใช้งาน,กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ และกระแสไฟฟ้าประจุ ที่น้อยกว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ 6 (A123) แต่เซลล์นี้มี

ราคาสูง, ความจุไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์แบตเตอรี่อื่น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า ซึ่งทำให้เซลล์แบตเตอรี่นี้ไม่สามารถประกอบกันให้ได้ชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ชั่วโมง และบรรจุได้ในกล่องแบตเตอรี่ขนาดเดิม ต้องมีการขยายขนาดของกล่องแบตเตอรี่ ส่วนเซลล์แบตเตอรี่ที่ 1 ถึง 5 สามารถประกอบให้ได้ชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ชั่วโมง และบรรจุได้ในกล่องแบตเตอรี่ขนาดเดิม ดังนั้น ในเบื้องต้นจะพิจารณาเฉพาะเซลล์แบตเตอรี่ที่ 1 ถึง 5

กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุ และกระแสไฟฟ้าประจุ สูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ในตารางที่ 0.4 นั้น สูงกว่าข้อมูลคุณสมบัติการปล่อยประจุ และการประจุไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ในหัวข้อ 3.1.2 ดังนั้นเซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมดสามารถใช้เพื่อประกอบชุดแบตเตอรี่ที่ต้องการได้

ตารางที่ 0.3 ข้อมูลทางเทคนิค และราคาของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อต่างๆในท้องตลาด [6-11]

แบตเตอรี่	ยี่ห้อแบตเตอรี่ - รุ่น	แรงดันไฟฟ้าระบุ (โวลต์)	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (แอมแปร์ชั่วโมง)	พลังงาน (วัตต์.ชั่วโมง)	ขนาด (มิลลิเมตร)		น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่นทางพลังงาน (วัตต์.ชั่วโมง/ลิตร)	พลังงานจำเพาะ (วัตต์.ชั่วโมง/กิโลกรัม)	ราคา (ดอลลาร์สหรัฐ)
					ความสูง	เส้นผ่านศูนย์กลาง				
1	Panasonic - NCR18650B	3.6	3.35	12	65.3	18.5	48.5	687.07	248.66	7
2	Samsung - ICR18650-26F	3.7	2.6	10	65	18.4	47	556.59	204.68	4.75
3	Sony - SE US18650GR	3.7	2.2	8.14	65.1	18.35	44	472.80	185.00	6
4	LG - ICR18650C2	3.7	2.8	10	65.05	18.4	50	598.94	207.20	6.75
5	Toriyama - CMICR 18650F	3.7	2.6	10	65	18.4	44	556.59	218.64	4
6	A123 - ANR26650M1A	3.3	2.5	8	65	26	76	239.06	108.55	9.25

ตารางที่ 0.4 ข้อมูลทางเทคนิค ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อต่างๆในท้องตลาด [6-11]

แบตเตอรี่	ยี่ห้อแบตเตอรี่ - รุ่น	แรงดันไฟฟ้าระบุ (โวลต์)	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (แอมแปร์ชั่วโมง)	กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุระบุ (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้าประจุระบุ (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้าประจุสูงสุด (แอมแปร์)	ความคงทนเป็นวัฏจักร (รอบ) ที่ 25 °C
1	Panasonic - NCR18650B	3.6	3.35	0.2C	0.5C	1C	0.5C	300 (80% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)
2	Samsung - ICR18650-26F	3.7	2.6	0.2C	0.5C	2C	1C	299 (70% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)
3	Sony - SE US18650GR	3.7	2.2	0.2C	0.5C	2C	1C	500 (60% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)
4	LG - ICR18650C2	3.7	2.8	0.2C	0.5C	2C	1C	300 (80% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)
5	Toriyama - CMICR 18650F	3.7	2.6	0.5C	0.5C	1C	1C	300 (80% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)
6	A123 - ANR26650M1A	3.3	2.5	0.5C	1C	20C	4C	>1,000 (80% ความจุไฟฟ้าที่กำหนด)

ตารางที่ 0.5 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อ/ชนิดเบื้องต้น

แบตเตอรี่	ยี่ห้อแบตเตอรี่ - รุ่น	เกณฑ์การประเมินเซลล์แบตเตอรี่เบื้องต้น							
		ความหนาแน่นทางพลังงาน และพลังงานจำเพาะ	กระแสไฟฟ้าประจุ และปล่อยประจุ	กระแสไฟฟ้าประจุ และปล่อยประจุสูงสุด	ความคงทนเป็นวัฏจักร	ราคา	ความง่ายในการจัดซื้อ	ผ่านการทดสอบ มอก.	สามารถประกอบ ได้ความจุที่กำหนด และสามารถใส่บรรจุในกล่องแบตเตอรี่ขนาดเดิม
1	Panasonic - NCR18650B	+++	+	+	+	+++	++	X	✓
2	Samsung - ICR18650-26F	+++	+	++	+	+++	++	X	✓
3	Sony - SE US18650GR	+++	+	++	+	+++	+	X	✓
4	LG - ICR18650C2	+++	+	++	+	+++	+	X	✓
5	Toriyama - CMICR 18650F	+++	++	+	+	+++	+++	✓	✓
6	A123 - ANR26650M1B	+	+++	+++	+++	++	++	X	X

หมายเหตุ: +++ หมายถึง ดีมาก, ++ หมายถึง พอใช้, + หมายถึง ไม่ดี, ✓ หมายถึง มี, และ X หมายถึง ไม่มี

ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งในการพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสมในการประกอบชุดแบตเตอรี่นั้น คือ ความสามารถในการซื้อ ถ้าพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่เฉพาะจากข้อมูลทางเทคนิค แต่ไม่สามารถหาซื้อได้ หรือมีความลำบากในการซื้อ จะส่งผลต่อการประกอบชุดแบตเตอรี่ได้ โดยทีมวิจัยได้หาข้อมูลของสินค้าในท้องตลาดโดยการสอบถามผู้จัดจำหน่ายเซลล์แบตเตอรี่ และสำรวจแบตเตอรี่ที่มีขายในท้องตลาดทางอินเตอร์เน็ต พบว่า เซลล์แบตเตอรี่ที่หาซื้อง่ายในท้องตลาดคือ เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ A123 (แบตเตอรี่ที่ 1, 2 และ 6) ส่วนเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Sony และ LG (แบตเตอรี่ที่ 3 และ 4) จะทำการจัดซื้อยาก และมีเฉพาะบางรุ่นเท่านั้น และเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama (แบตเตอรี่ที่ 5) เป็นเซลล์แบตเตอรี่ที่นำเข้าโดยบริษัท Oskabatt และ เป็นเซลล์แบตเตอรี่ที่ผ่านการทดสอบมาตรฐาน มอก. ซึ่งจะทำให้การติดต่อสามารถทำได้ง่ายที่สุด

จากการประเมินข้อมูลทางเทคนิค และความสามารถในการจัดซื้อจากตารางที่ 0.3 และ ตารางที่ 0.4 สามารถสรุปการประเมินเซลล์แบตเตอรี่แต่ละชนิดเบื้องต้น ได้ดัง

ตารางที่ 0.5 ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดเซลล์แบตเตอรี่เบื้องต้นที่ถูกพิจารณาเลือก 3 ยี่ห้อ เพื่อศึกษาและทดสอบคุณสมบัติต่อไป คือ Panasonic, Samsung และ Toriyama

3.1.4 สรุปผลการศึกษา

จากการพิจารณาเบื้องต้นจากเอกสารทางเทคนิค และข้อมูลของสินค้าในท้องตลาดเบื้องต้น สามารถพิจารณาเลือกเซลล์รูปทรงกระบอก ขนาด 18650 3 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ Panasonic - NCR18650B, Samsung - ICR18650-26F และ Toriyama - CMICR 18650F เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเทคนิคตรงตามต้องการ สามารถประกอบ ได้ความจุที่กำหนด และสามารถได้บรรจุในกล่องแบตเตอรี่ขนาดเดิม และสามารถซื้อหาได้ง่าย

เซลล์แบตเตอรี่ทั้ง 3 ยี่ห้อ จะถูกวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบในหัวข้อถัดไป เพื่อพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดในการประกอบชุดแบตเตอรี่

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่

เนื่องจากแบตเตอรี่จะต้องจ่ายกระแสในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีผลต่อ ความคงทนเป็นวัฏจักร หรือ อายุการใช้งาน ของเซลล์แบตเตอรี่ แต่เนื่องจากเอกสารทางเทคนิคไม่ได้ระบุไว้แน่ชัด เกี่ยวกับคุณสมบัติดังกล่าว ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถคัดเลือกเซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสม สำหรับประกอบชุดแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงได้ โดยการทดสอบคุณสมบัติเซลล์แบตเตอรี่ที่พิจารณาเลือกในหัวข้อที่ 3.1 ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง

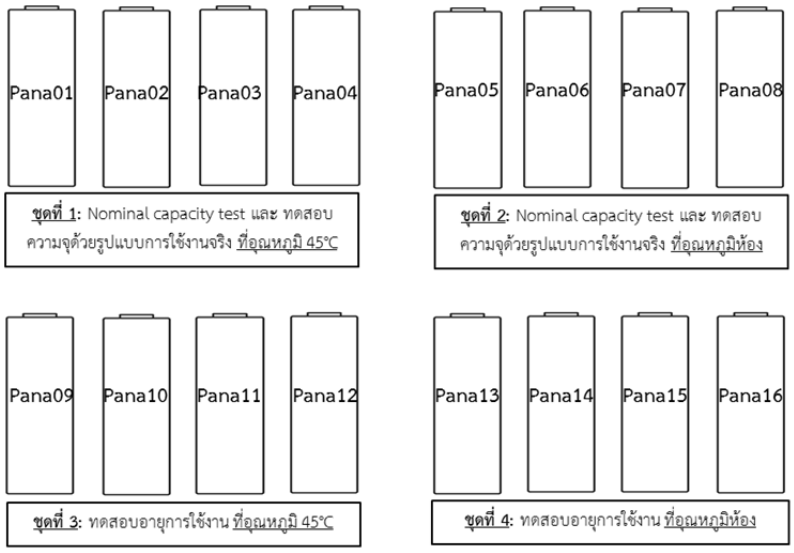
จุดประสงค์ของการทดสอบนี้คือ การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน 3 ยี่ห้อ ได้แก่ Panasonic, Samsung และ Toriyama ดังรายละเอียดเบื้องต้นในตารางที่ 0.6 โดยการวิเคราะห์ทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบความจุไฟฟ้า (Nominal capacity test) เปรียบเทียบกับ ค่าความจุไฟฟ้าที่ระบุในเอกสารคุณสมบัติของแบตเตอรี่ (datasheet), การทดสอบความจุไฟฟ้าที่สภาวะการใช้งานจริง และ การทดสอบอายุการใช้งานที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 0.6 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แบตเตอรี่ 3 ยี่ห้อ ที่ถูกพิจารณาเลือกเพื่อวิเคราะห์ทดสอบ [1-3]

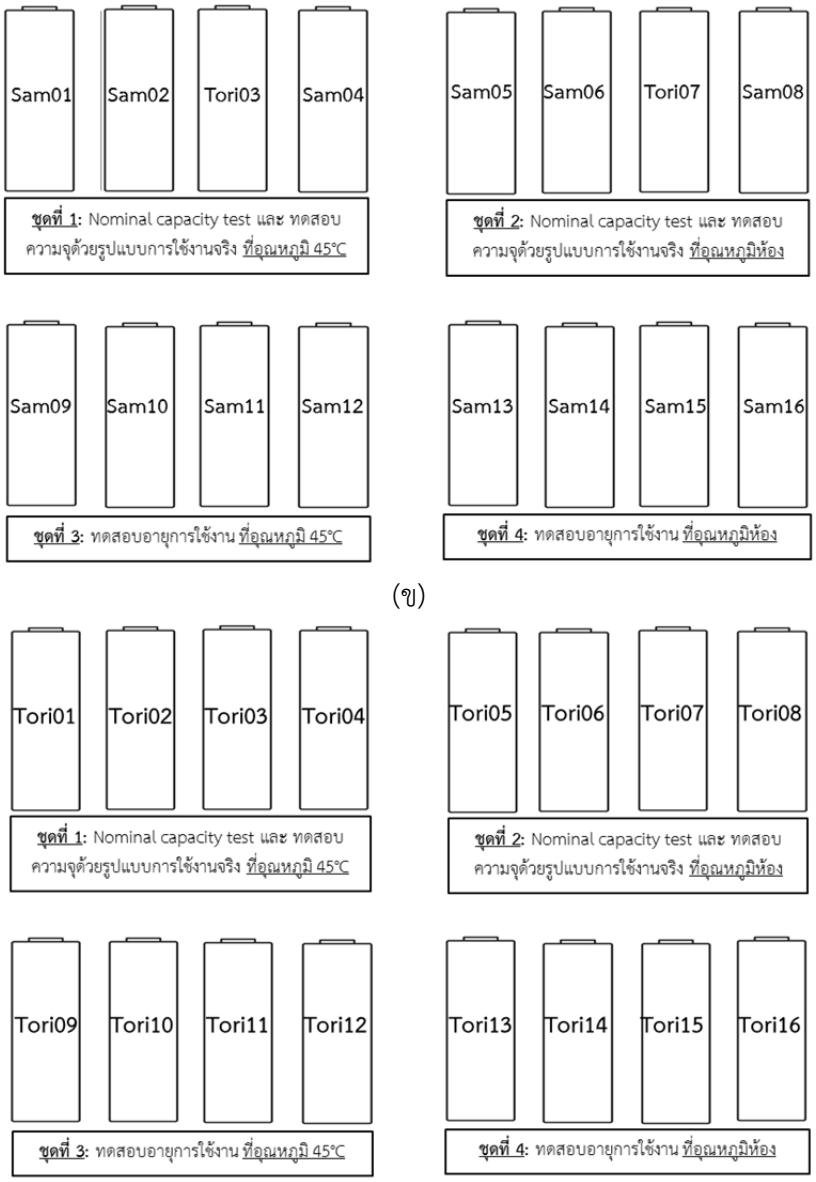
แบตเตอรี่	ยี่ห้อแบตเตอรี่ - รุ่น	แรงดันไฟฟ้าระบุ (โวลต์)	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (แอมแปร์ชั่วโมง)	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้าย (Charge voltage) (โวลต์)	แรงดันปล่อยประจุสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage) (โวลต์)
1	Panasonic - NCR18650B	3.6	3.35	4.2	2.5
2	Samsung - ICR18650-26F	3.7	2.6	4.2	2.75
3	Toriyama - CMICR 18650F	3.7	2.6	4.2	3

3.2.1 การทดสอบ

เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อละ 16 เซลล์ ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 4 เซลล์ ดังรูปที่ 0.2 เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ใช้สำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้า (แอมแปร์ชั่วโมง) ของเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องตามลำดับ เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 ใช้สำหรับการทดสอบอายุการใช้งาน ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ



(ก)



รูปที่ 0.2 กลุ่มการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ 3 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 16 เซลล์
(ก) Panasonic (ข) Samsung (ค) Toriyama

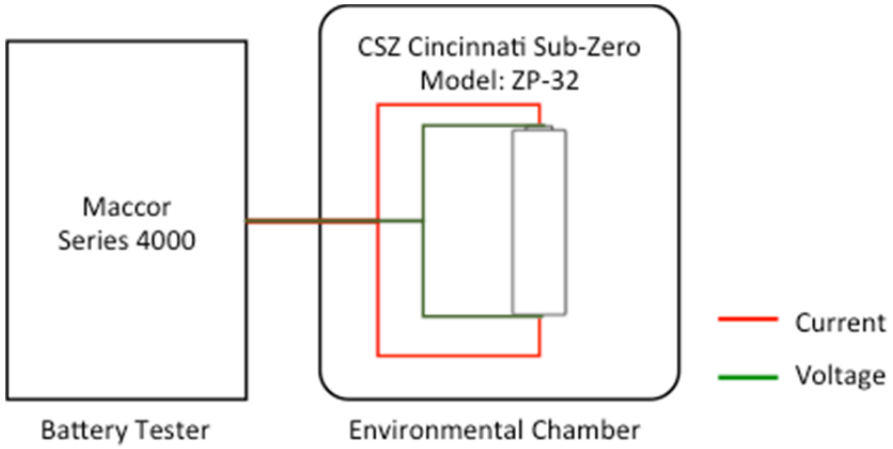
3.2.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่

เครื่องทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชุด ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง

ก. การทดสอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส: แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 0.3 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ ยี่ห้อ MACCOR รุ่น Series 4000 และตู้อบควบคุมบรรยากาศ (Environmental Chamber) ยี่ห้อ CSZ Cincinnati Sub-Zero รุ่น ZP-32 รางถ่านที่ใช้สำหรับทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ แสดงในรูปที่ 0.4 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ทุกๆ 1 วินาที เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิภายในตู้อบทุกๆ 1 นาที เนื่องจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิของตู้อบสามารถควบคุมบรรยากาศได้คงที่ ในการทดสอบที่อุณหภูมิสูงนี้จึงไม่ได้ทำการเก็บ

ข้อมูลของอุณหภูมิภายในตู้อบและอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบ

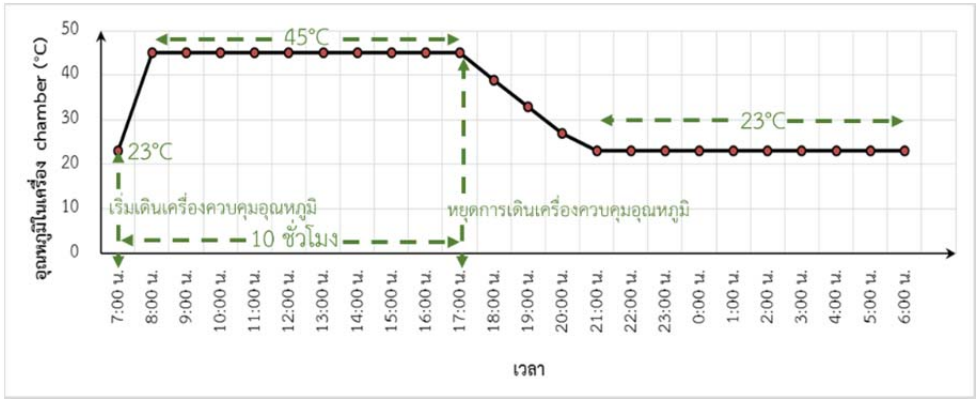
เพื่อจำลองสภาพการใช้งานจริง การทดสอบในแต่ละวันเซลล์แบตเตอรี่จะอยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทั้งหมดประมาณ 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นตู้ควบคุมอุณหภูมิจะหยุดงานทำงาน อุณหภูมิภายในตู้อบจะค่อยๆ ลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้องหรือประมาณ 23 องศาเซลเซียส วัฏจักรอุณหภูมิในการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูง แสดงดังรูปที่ 0.5 โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิของตู้อบสามารถเพิ่มอุณหภูมิจาก 23 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10-15 นาที และใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ในการลดอุณหภูมิลงจาก 45 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 0.3 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

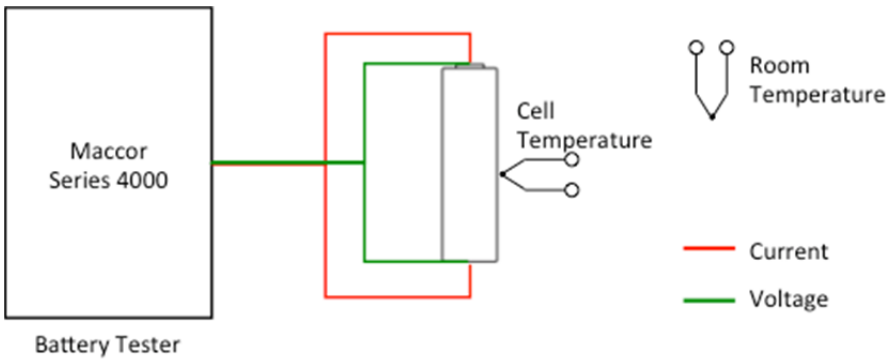


รูปที่ 0.4 รางถ่านที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

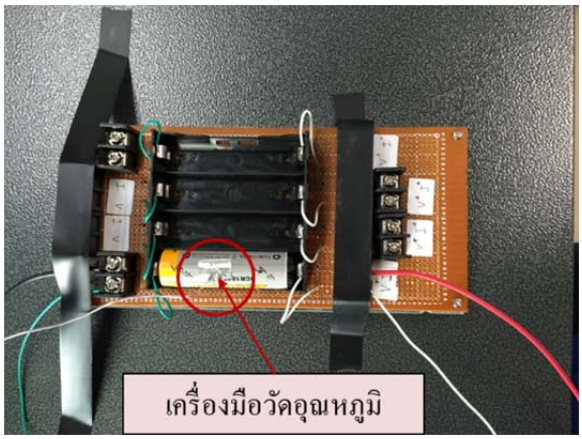


รูปที่ 0.5 วัฏจักรอุณหภูมิในการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสูง

ข. การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง: เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ ยี่ห้อ MACCOR รุ่น Series 4000 จำนวน 1 เครื่องและรางถ่านสำหรับทดสอบเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 1 ชุด เครื่องทดสอบแบตเตอรี่บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ ทุกๆ 1 วินาที เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิด T (Type T Thermocouple) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ รูปที่ 0.6 แสดงแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 0.7 แสดงรางถ่านและเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 0.6 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 0.7 รางถ่านและเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง

เนื่องจากเซลล์แบตเตอรี่ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งควบอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ อุณหภูมิห้องไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ตลอดเวลา ดังนั้น ในการทดสอบที่อุณหภูมิห้องนี้จึงทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบ

3.2.1.2 วัฏจักรการทดสอบการประจุและปล่อยประจุ

เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมดจะถูกทดสอบประจุและปล่อยประจุเป็นวัฏจักร (cycle) ใน 1 วัฏจักรของการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน คือ การประจุ การพักการทดสอบ การปล่อยประจุ และการพักการทดสอบ วัฏจักรการทดสอบนี้มีทั้งหมด 2 แบบ ตามรูปแบบการปล่อยประจุ คือ วัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ (การปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/5) และวัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าด้วยรูปแบบการใช้งานจริง (การปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/30) ดังตัวอย่าง รูปที่ 0.8 และ รูปที่ 0.9 ตามลำดับ ในการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่นี้ จะเน้นพิจารณาการวัดความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (Discharge capacity) ที่สภาวะต่างๆ เป็นหลัก รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบของแต่ละวัฏจักรมีดังต่อไปนี้

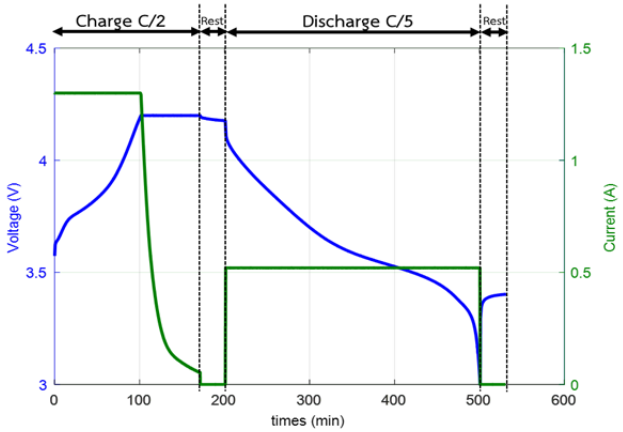
ก. วัฏจักรแบบที่ 1 การทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ (Nominal capacity test):

ขั้นตอนที่ 1 ประจุเซลล์แบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV, Constant Current/Constant Voltage) กล่าวคือ ประจุเซลล์แบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/2 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้า สูงสุดในการประจุสุดท้าย (Charge voltage) 4.2 โวลต์ จากนั้นประจุเซลล์แบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ คือ เท่ากับ 4.2 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ประจุเซลล์แบตเตอรี่จะลดลงจนถึงค่า 0.02C จึงหยุดการประจุ

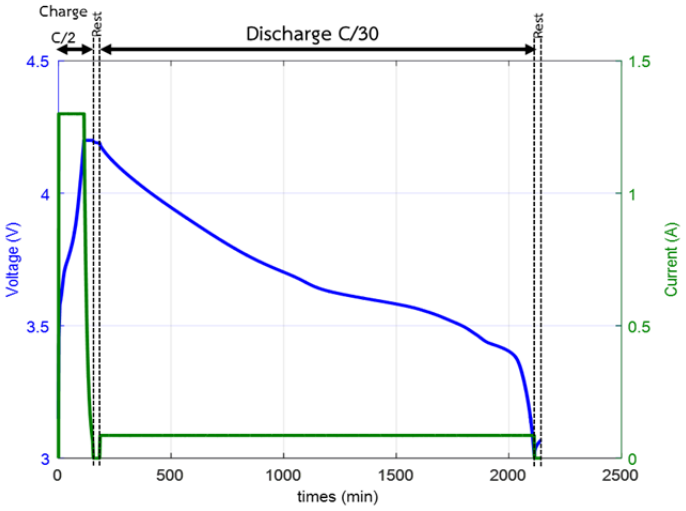
ขั้นตอนที่ 2 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบการปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/5 แรงดันของแบตเตอรี่จะลดลงจาก 4.2 โวลต์ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เท่ากับแรงดันปล่อยประจุสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage) จึงหยุดการทดสอบการปล่อยประจุ

ขั้นตอนที่ 4 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 0.8 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama สำหรับวัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าใน 1 รอบ



รูปที่ 0.9 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama สำหรับวัฏจักรการทดสอบความจุไฟฟ้าด้วยรูปแบบการใช้งานจริงใน 1 รอบ

ข. วัฏจักรแบบที่ 2 การทดสอบความจุไฟฟ้าด้วยรูปแบบการใช้งานจริง

ขั้นตอนที่ 1 ประจุเซลล์แบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV, Constant Current/Constant Voltage) กล่าวคือ ประจุเซลล์แบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/2 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้า สูงสุดในการประจุสุดท้าย (Charge voltage) 4.2 โวลต์ จากนั้นประจุเซลล์แบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ คือ เท่ากับ 4.2 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ประจุเซลล์แบตเตอรี่จะลดลงจนถึงค่า 0.02C จึงหยุดการประจุ

ขั้นตอนที่ 2 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบการปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/30 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะลดลงจาก 4.2 โวลต์ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เท่ากับแรงดันปล่อยประจุสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage) จึงหยุดการทดสอบการปล่อย

ขั้นตอนที่ 4 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที

โดยในแต่ละขั้นตอนของทั้ง 2 วัฏจักรการทดสอบ จะมีข้อแตกต่างกันในแต่ละยี่ห้อดังนี้

- แรงดันปล่อยประจุสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage) ที่บ่งชี้การหยุดการทดสอบการปล่อยประจุ ในขั้นตอนที่ 3 (การปล่อยประจุ) มีค่าแตกต่างกันในแต่ละยี่ห้อ ตารางที่ 0.6
- ค่ากระแสประจุ และค่ากระแสปล่อยประจุ จะระบุในรูปของ C-rate ซึ่งเท่ากันทุกยี่ห้อ แต่ค่ากระแสในหน่วยแอมแปร์จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด เช่น กระแสไฟฟ้าปล่อยประจุคงที่ C/5 (ในที่นี้ C หมายถึง ค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด) ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung, Toriyama มีค่ากระแสเท่ากับ 0.67, 0.52, 0.52แอมแปร์ ตามลำดับ

3.2.2 ผลการทดสอบ

เซลล์แบตเตอรี่ทั้ง 16 เซลล์ (4 กลุ่ม) แต่ละยี่ห้อได้ถูกทดสอบ ตามขั้นตอนและวิธีการทดสอบดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบดังต่อไปนี้

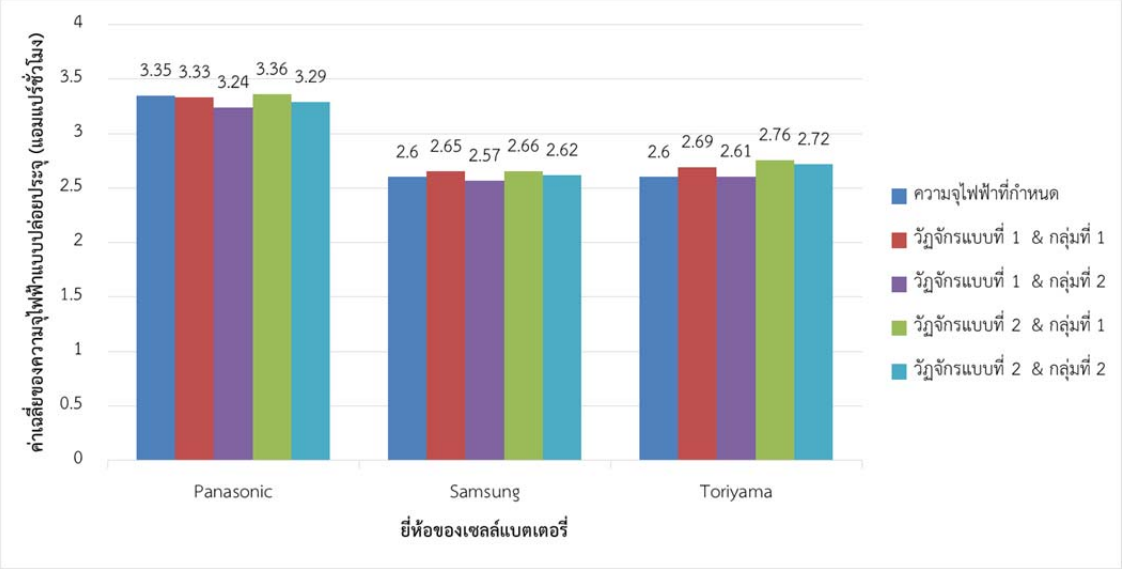
3.2.2.1 ความจุไฟฟ้าระบุ และความจุไฟฟ้าที่สภาวะการใช้งานจริง

เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1 และเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 2 แต่ละยี่ห้อ ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ ด้วยวัฏจักรแบบที่ 1 (C/5 discharge rate) จำนวน 2 รอบ (Cycle#1, Cycle#2) และด้วยวัฏจักรแบบที่ 2 (C/30 discharge rate) จำนวน 2 รอบ (Cycle#3, Cycle#4)

จากการพิจารณาความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อัตราการปล่อยประจุ และอุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 0.10 พบว่า

ก. เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยประจุ ความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะลดลง นั่นคือ ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุของการทดสอบวัฏจักรแบบที่ 1 มีค่าน้อยกว่า ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุของการทดสอบวัฏจักรแบบที่ 2 แต่ความแตกต่างกันไม่มาก สำหรับแบตเตอรี่ทุกยี่ห้อ และที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง

ข. ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1 (ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส) มีความจุไฟฟ้ามากกว่าเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 2 (ที่อุณหภูมิห้อง) ทั้งอัตราการปล่อยประจุ C/5 (วัฏจักรแบบที่ 1) และ C/30 (วัฏจักรแบบที่ 2) สำหรับแบตเตอรี่ทุกยี่ห้อ



รูปที่ 0.10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ กับค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1 และ 2 ของแบตเตอรี่ทั้ง 3 ยี่ห้อ กับค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนดที่ระบุไว้ในแผ่นข้อมูล (ดังตารางที่ 0.6) พบว่า

- ที่อุณหภูมิห้อง (เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 2) และมีอัตราการปล่อยประจุ C/5 (วัฏจักรแบบที่ 1) ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์แบตเตอรี่จากการทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama และ Samsung แต่สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ มีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ระบุไว้ในแผ่นข้อมูล

- ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1) ทั้งอัตราการปล่อยประจุ C/5 (วัฏจักรแบบที่ 1) และอัตราการปล่อยประจุ C/30 (วัฏจักรแบบที่ 2 หรือสภาวะการใช้งานจริง) มีค่าสูงกว่าความจุไฟฟ้าที่ระบุในแผ่นข้อมูล ยกเว้นเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic ที่อัตราการปล่อยประจุ C/5

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ค่าความจุไฟฟ้าระบุ (Nominal capacity) ตรงตามที่ระบุในแผ่นข้อมูลของบริษัท (datasheet) สำหรับการปล่อยประจุในอัตรา C/5 (C/5 discharge rate) แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่อัตราการปล่อยประจุ C/30 (สภาวะการใช้งานจริง) มีค่ามากกว่าที่ระบุในแผ่นข้อมูล

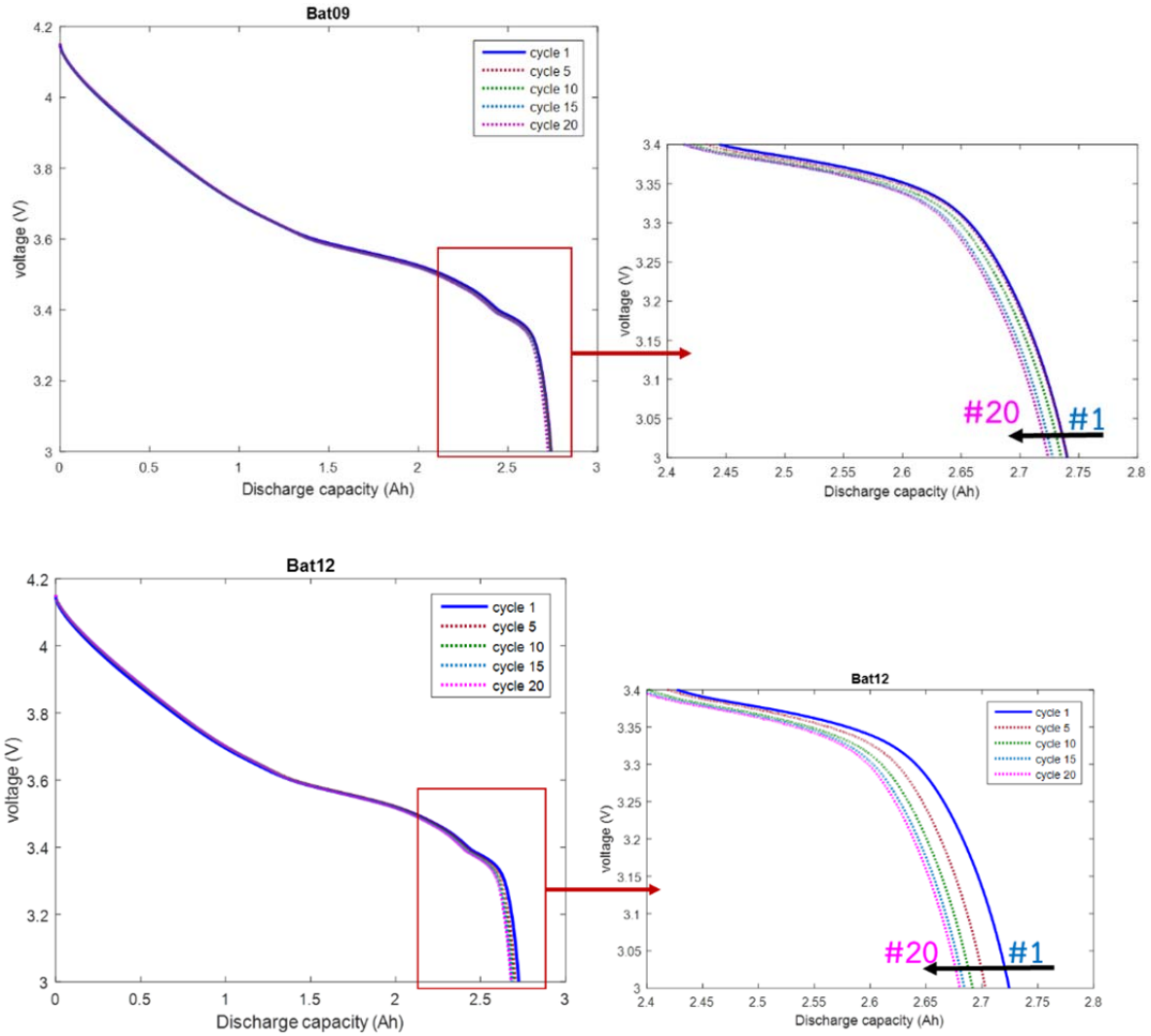
ข. จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยประจุ ความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะลดลง อย่างไรก็ตามในการทดสอบวัฏจักรแบบที่ 1 และ วัฏจักรแบบที่ 2 ของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 1 ทั้ง 2 ยี่ห้อ ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุมีความแตกต่างกันไม่มาก

3.2.2.2 การทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักร

การทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรใช้เพื่อศึกษาอายุการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่ เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 และ 4 ถูกทดสอบด้วยวัฏจักรแบบที่ 1 (C/5 discharge rate) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

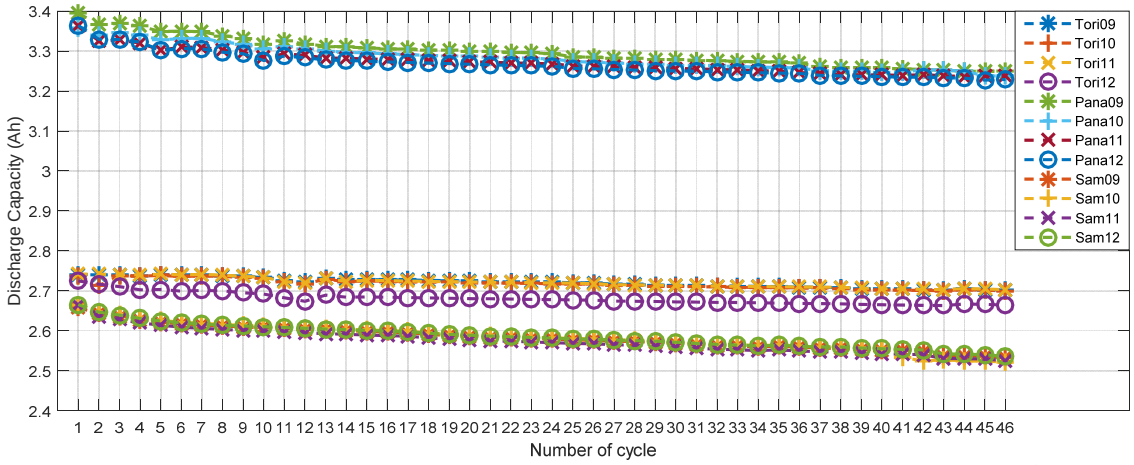
ก. การทดสอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส: เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 ทั้ง 3 ยี่ห้อ ถูกทดสอบด้วยวัฏจักรแบบที่ 1 (C/5 discharge rate) จำนวน 46 รอบ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama ที่ 9 และ 12 ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรที่ 45 องศาเซลเซียส แสดงใน

ข. รูปที่ 0.11 ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 จะค่อยๆลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุและจำนวนรอบการทดสอบแสดงในรูปที่ 0.12 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ในกลุ่มที่ 3 ของแบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic และ Samsung ใกล้เคียงกันทั้ง 4 เซลล์ แต่เซลล์แบตเตอรี่ที่ 12 ของยี่ห้อ Toriyama (Tori12) มีคุณสมบัติแตกต่างจากเซลล์แบตเตอรี่ที่เหลือในกลุ่มที่ 3 ของแบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama อย่างเห็นได้ชัด หรืออาจกล่าวได้ว่า เซลล์แบตเตอรี่ชุดนี้มีจำนวน 25% ที่มีความจุไฟฟ้าไม่คงที่ มีความต้านทานภายในแบตเตอรี่สูง ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทำสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Cell balancing) ในกรณีที่ต่ออนุกรมกันหลายๆ เซลล์



รูปที่ 0.11 แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุของเซลล์แบตเตอรี่ที่ 9 และ 12 ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรที่ 45 องศาเซลเซียส

ค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยของเซลล์แบตเตอรี่ที่ 9 ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama (Pana09, Sam09, Tori09) ในรอบที่ 46 ลดลง 4.24%, 4.76% และ 1.41% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความจุไฟฟ้าเฉลี่ยของเซลล์แบตเตอรี่ทั้ง 4 เซลล์ในกลุ่มที่ 3 ของแต่ละยี่ห้อ ในวงรอบที่ 46 เทียบกับ รอบที่ 1 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama ลดลง 3.9%, 5.07% และ 1.6% ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama เท่ากับ 0.087%/รอบ, 0.113%/รอบ และ 0.035%/รอบ ตามลำดับ ดังตารางที่ 0.7



รูปที่ 0.12 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (Discharge capacity) ของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 ทั้ง 3 ยี่ห้อ

ตารางที่ 0.7 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

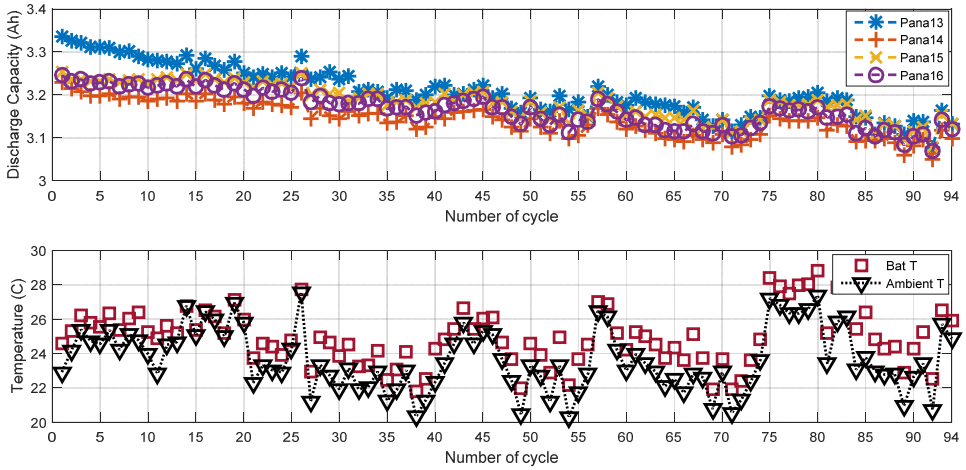
ยี่ห้อของแบตเตอรี่	ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 (แอมแปร์ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 46 (แอมแปร์ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความจุไฟฟ้า ในรอบที่ 46 เมื่อเทียบกับค่าความจุในรอบที่ 1 (%)	อัตราการลดลงของความจุไฟฟ้า (%/รอบ)
Panasonic	3.3702	3.2389	3.896%	0.087%
Samsung	2.6633	2.5283	5.069%	0.113%
Toriyama	2.7357	2.6920	1.597%	0.035%

ข. การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง: เซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 4 ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องปรับอากาศ ด้วยวัฏจักรแบบที่ 1 (C/5 discharge rate) จำนวน 94 รอบ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่และอุณหภูมิห้อง สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic และ Samsung แต่สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama หลังจากวัฏจักรที่ 31 เป็นต้นไป มีบันทึกค่าเฉพาะอุณหภูมิห้องเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนเครื่องมือวัดอุณหภูมิ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิห้องตลอดการทดสอบทั้ง 52 รอบ เท่ากับ 23.22 องศาเซลเซียส

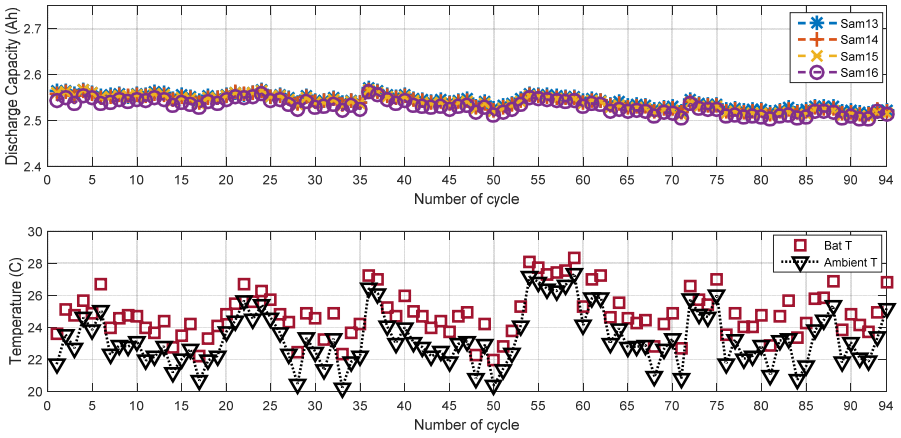
ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 4 ทั้ง 3 ยี่ห้อ จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าแบบปล่อยกระแสและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิห้อง ของเซลล์แบตเตอรี่ Toriyama ดังรูปที่ 0.13 (ก) พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในช่วงจำนวนรอบที่ 1 ถึง 10 อาจจะเนื่องมาจากการสร้างเซลล์แบตเตอรี่ในช่วงเริ่มต้นไม่ดี (poor formation) หลังจากนั้นความจุไฟฟ้าเริ่มลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง ในจำนวนรอบที่เหลือ ดังนั้นค่าความจุที่จำนวนรอบสุดท้ายของการทดสอบ หรือ รอบที่ 94 ของแบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama จะถูกเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าในรอบที่ 10 ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic และ Samsung จะถูกเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 อย่างไรก็ตาม ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ทั้ง 3 ยี่ห้อ จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่เป็นระยะๆ ตามอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิห้องสูงขึ้น ความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 0.13 (ก) - (ค)

อัตราการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama เท่ากับ 0.048%/รอบ, 0.016%/รอบ และ 0.019%/รอบ ตามลำดับ ดังตารางที่ 0.8 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิห้อง

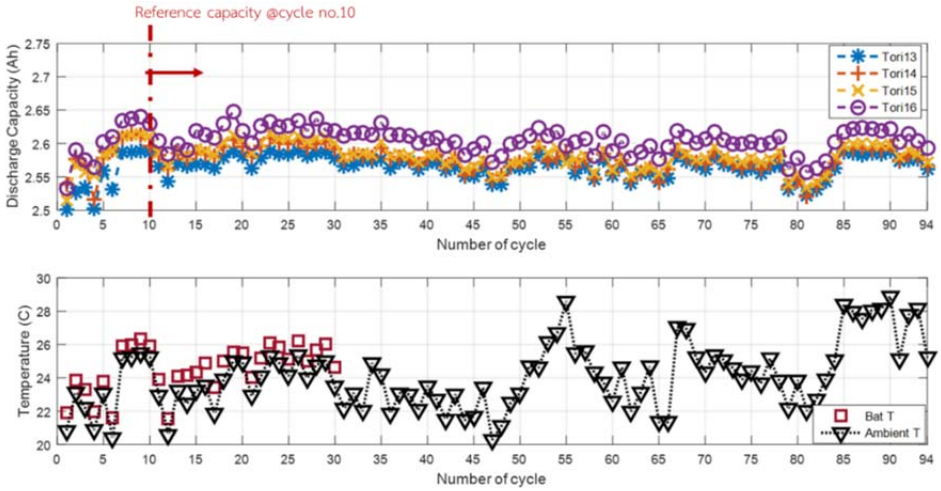
และอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่เฉลี่ยตลอดการทดสอบพบว่า เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 1.318, 1.557, 0.984 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 0.13 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยกระแสและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิห้อง ในการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 4 ยี่ห้อ (ก) Panasonic (ข) Samsung (ค) Toriyama

ตารางที่ 0.8 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิห้อง

ยี่ห้อของแบตเตอรี่	ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 (10) (แอมแปร์ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 94 (แอมแปร์ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความจุไฟฟ้า ในรอบที่ 94 เมื่อเทียบกับค่าความจุในรอบที่ 1 (10) (%)	อัตราการลดลงของความจุไฟฟ้า (%/รอบ)	อุณหภูมิห้องเฉลี่ย (°C)	อุณหภูมิเซลล์แบตเตอรี่เฉลี่ย (°C)
Panasonic	3.2662	3.1205	4.461%	0.048%	23.618	24.935
Samsung	2.5568	2.5176	1.533%	0.016%	23.277	24.834
Toriyama	2.6135	2.5728	1.557%	0.019%	23.578	24.562

ผลการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักรของเซลล์แบตเตอรี่กลุ่มที่ 3 และ 4 ทั้ง 3 ยี่ห้อ และค่าความจุและอายุการใช้งานที่ระบุไว้ในแผ่นข้อมูล สามารถสรุปได้ ดัง**ตารางที่ 0.9** เพื่อพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่เพียงหนึ่งยี่ห้อ จะเห็นได้ว่า เซลล์แบตเตอรี่ทุกยี่ห้อมีความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ ที่อุณหภูมิห้อง ใกล้เคียงกับค่าความจุที่ระบุในแผ่นข้อมูล อายุการใช้งานที่ระบุไว้ในแผ่นข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ยี่ห้อ

นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่า เซลล์แบตเตอรี่ทุกยี่ห้อมีอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง โดยอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณ 0.035 %/รอบ และของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Samsung มีค่ามากที่สุด 0.113 %/รอบ อัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิห้องของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Samsung น้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณ 0.016 %/รอบ และของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic มีค่ามากที่สุด 0.048 %/รอบ

ตารางที่ 0.9 สรุปผลการทดสอบความคงทนเป็นวัฏจักร

ยี่ห้อของแบตเตอรี่	Panasonic	Samsung	Toriyama
ข้อมูลที่ระบุไว้ในแผ่นข้อมูล (Datasheet)			
- ค่าความจุไฟฟ้าที่กำหนด (แอมแปร์ชั่วโมง)	3.35	2.6	2.6
- จำนวนรอบที่กำหนดเมื่อความจุไฟฟ้าลดลงเหลือ 80% ของความจุเริ่มต้น (ที่อุณหภูมิ 25°C)	300	299	300
- ราคา (บาท/เซลล์)	320	210	295
- ผ่านการรับรองตามมาตรฐาน มอก.2218-2548	X	X	✓
ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (จำนวนรอบการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 45°C 46 รอบ)			
- ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 ที่อุณหภูมิ 45°C (แอมแปร์ชั่วโมง)	3.370	2.663	2.736
- อัตราการลดลงของความจุไฟฟ้า (%/รอบ) ที่อุณหภูมิ 45°C	0.087	0.113	0.035
ผลการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (จำนวนรอบการทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง 94 รอบ)			
- ค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าในรอบที่ 1 (10) (แอมแปร์ชั่วโมง)	3.266	2.557	2.614
- อัตราการลดลงของความจุไฟฟ้า (%/รอบ) ที่อุณหภูมิห้อง	0.048	0.016	0.019

จากผลการทดสอบจึงพิจารณา เลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่ Toriyama 2600mAh เพื่อไปประกอบเป็นโมดูล และ แพ็คต่อไป เนื่องจาก ผ่านการรับรองตามมาตรฐาน มอก. 2218-2548 และอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama น้อยที่สุด

3.2.3 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ค่าความจุไฟฟ้าระบุ (Nominal capacity) ตรงตามที่ระบุในแผ่นข้อมูลของบริษัท (datasheet) สำหรับการปล่อยประจุในอัตรา C/5 (C/5 discharge rate) แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่อัตราการปล่อยประจุ C/30 (สภาวะการใช้งานจริง) มีค่ามากกว่าที่ระบุในแผ่นข้อมูล

ข. อุณหภูมิห้องมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าแบบแปรผันตรง คือ เมื่ออุณหภูมิห้องเปลี่ยนแปลง 1 องศาเซลเซียส ความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยประมาณ 0.012 แอมแปร์ชั่วโมง

ค. เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic มีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด แต่มีราคาแพงที่สุด รวมถึงมีอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สูงที่สุด ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Samsung และ Toriyama มีค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ระบุในแผ่นข้อมูล และจากการทดสอบใกล้เคียงกัน มีอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุน้อยที่สุดที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ง. คุณภาพของเซลล์แบตเตอรี่ Toriyama ในกลุ่มที่ 3 มี 1 เซลล์ (25% ของจำนวนตัวอย่าง) ที่ค่าความจุไฟฟ้าไม่คงที่ มีความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่สูง ซึ่งจะมีผลต่อการทำสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Cell balancing) ในกรณีที่ต่ออนุกรมกันหลายๆ เซลล์

จ. เนื่องจากสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่นี้คือในที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้น ในโครงการนี้จึงพิจารณาเลือก เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama ในการประกอบชุดแบตเตอรี่ เนื่องจาก ผ่านการรับรองตามมาตรฐาน มอก. 2218-2548 และอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส น้อยที่สุด

3.3 การออกแบบชุดแบตเตอรี่เบื้องต้น

เมื่อพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ที่จะนำมาจัดทำชุดแบตเตอรี่ได้แล้วในหัวข้อที่ 3.2 ขั้นตอนต่อไป คือ การออกแบบ และจัดซื้อชุดแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ 90 แอมแปร์.ชั่วโมง จากเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama 2600mAh ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 0.6 เพื่อให้ได้ชุดแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ และมีขนาดช่วงแรงดันเหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ที่จะมาต่อเชื่อมต่างๆ จะต้องนำเซลล์แบตเตอรี่ Toriyama มาต่ออนุกรมกัน 7 เซลล์ นั่นคือ จะได้ชุดแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน Nominal voltage 25.9 โวลต์ แรงดันต่ำสุด (Cut-off discharge voltage) 21 โวลต์ และ แรงดันสูงสุดในการประจุ (Charge voltage) เท่ากับ 29.4 โวลต์

ในการออกแบบเซลล์แบตเตอรี่ให้ได้ความจุในการปล่อยประจุอย่างน้อย 90 แอมแปร์.ชั่วโมง นั้นจะพิจารณาถึงช่วงการทำงานแบตเตอรี่ (Depth of discharge) เพื่อความปลอดภัย และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ร่วมด้วย ดังนั้นในโครงการนี้จะนำเซลล์แบตเตอรี่มาต่อขนานกัน 48 เซลล์ ซึ่งจะทำให้ได้ความจุประมาณ 124.8 แอมแปร์.ชั่วโมง

ชุดแบตเตอรี่ที่เกิดจากการต่อเซลล์แบตเตอรี่อนุกรมกัน 7 เซลล์ และ ขนานกัน 48 เซลล์ (เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมด 336 เซลล์) หรือ สามารถแทนด้วยสัญลักษณ์ 7S48P (S หมายถึงการต่ออนุกรม (Series) และ P หมายถึงการต่อขนานกัน (Parallel)) จะถูกแบ่งออกเป็นชุดแบตเตอรี่ย่อยทั้งหมด 6 ชุดย่อย ชุดละ 56 เซลล์ เพื่อความสะดวกในการประกอบ และการควบคุมจัดการ โดยในแต่ละชุดย่อยเซลล์แบตเตอรี่ 56 เซลล์ จะต่อเชื่อมกันแบบอนุกรมกัน 7 เซลล์ และ ขนานกัน 8 เซลล์ หรือ 7S8P และนำชุดแบตเตอรี่ย่อย 7S8P ทั้ง 6 ชุด นี้มาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ชุดแบตเตอรี่ 7S48P ตามต้องการ โดยรายละเอียดการออกแบบชุดแบตเตอรี่ย่อย 7S8P และการทดสอบจะนำเสนอในบทที่ 4

3.4 การจัดซื้อแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

จากข้อมูลการออกแบบชุดแบตเตอรี่ จึงได้ติดต่อประสานงานกับบริษัทผู้ประกอบชุดแบตเตอรี่ (บริษัท ออสก้า โฮลดิ้ง จำกัด) เพื่อสั่งผลิต โดยราคาของชุดแบตเตอรี่ย่อย 7S8P เท่ากับ 25,241.30 บาท นั่นคือราคารวมของชุดแบตเตอรี่ 7S48P เท่ากับ 151,447.80 บาท ซึ่งได้จัดซื้อทั้งหมด 32 ชุด เพื่อใช้วิเคราะห์ทดสอบและเพื่อประกอบชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ จำนวน 4 ต้นแบบ

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน

จากข้อมูลละเอียดที่ได้จากการทดสอบและเก็บข้อมูลสภาวะการใช้งานแบตเตอรี่ชุดเดิม และเทคโนโลยีที่มีอยู่ในท้องตลาด ทางคณะวิจัยได้ทำการได้ศึกษาเชิงลึกสำหรับแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนเป็นหลักเนื่องจากคุณสมบัติด้านแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ พลังงานจำเพาะ ความจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าประจุและกระแสไฟฟ้าขณะปล่อยประจุ อายุการใช้งาน ราคา และความสามารถในการบรรจุในพื้นที่ตรงกับความต้องการที่มากที่สุด จากการศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่หาได้ในตลาดที่มีองค์ประกอบทางเคมีในแคโทดและแอโนด รวมถึงรูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่างกัน ทางคณะวิจัยได้คัดเลือกเซลล์รูปทรงกระบอก ขนาด 18650 ยี่ห้อ Panasonic - NCR18650B, Samsung - ICR18650-26F และ Toriyama - CMICR 18650F คือ Panasonic, Samsung และ Toriyama จากเหตุผลด้านคุณสมบัติทางเทคนิคและความสามารถในการจัดหาเพื่อนำมาประกอบ เพื่อนำมาทำการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพณ ที่ทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ก่อนคัดเลือกมาประกอบเป็นชุดแบตเตอรี่ที่ต้องการ ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic, Samsung และ Toriyama พบว่าเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Panasonic มีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด แต่มีราคาแพงที่สุด รวมถึงมีอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สูงที่สุด ในขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Samsung และ Toriyama มีค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ระบุในแผ่นข้อมูล และจากการทดสอบใกล้เคียงกัน มีอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุน้อยที่สุดที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เนื่องจากสภาวะการใช้งานของชุดแบตเตอรี่นี้คือในที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้น ในโครงการนี้จึงพิจารณาเลือก เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama ที่ผ่านการรับรองตามมาตรฐาน มอก. 2218-2548 และอัตราการลดลงของความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส น้อยที่สุด ในการจัดทำชุดแบตเตอรี่ ขนาด 24 โวลต์ 90 แอมแปร์.ชั่วโมง ซึ่งจากการออกแบบเบื้องต้น จะใช้เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมด 336 เซลล์ ที่เชื่อมต่อกันแบบ อนุกรมกัน 7 เซลล์ และขนานกัน 48 เซลล์ (7S48P) โดยจะแบ่งออกเป็นชุดแบตเตอรี่ย่อย 7S8P จำนวน 6 ชุดต่อขนานกัน

3.6 เอกสารอ้างอิง

[1] “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีอิเล็กโทรไลต์แอลคาไลน์หรืออิเล็กโทรไลต์อื่นที่ไม่ใช่กรด – เซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิระบบลิเทียม สำหรับการใช้งานแบบพกพา.”, มอก. 2218-2548., ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ ๓๖๐๑ (พ.ศ. ๒๕๔๙)

[2] M. S. Whittingham, “History, Evolution, and Future Status of Energy Storage,” *Proc. IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1518–1534, 2012.

[3] “Types of Lithium-ion Batteries – Battery University.” http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Accessed: 23-Feb-2015]

[4] “CE175-360 Moxie+ Prismatic Cell,” *EnerDel*.,http://www.enerdel.com/ce175-360-

[5] “Automotive (Electric Vehicle) Prismatic Battery Cells | Samsung SDI.”, http://www.samsungsdi.com/automotive-battery/battery-cells.

[6] Energy Business Division., Samsung SDI Co.,Ltd., “Specification of product for Lithium-ion Rechargeable Cell Model : ICR18650-26F.”, November 2009.

[7] “Cylindrical type | Industrial Devices & Solutions | Panasonic.”, http://industrial.panasonic.com/ww/products/batteries/secondary-batteries/lithium-ion/cylindrical-type?reset=1

[8] “Lithium Ion Cells | Cylindrical Cells | 26650 Lithium Cells.”, http://www.a123systems.com/lithium-ion-cells-26650-cylindrical-cell.htm.

[9] “Centrix International Category Listing - Lithium-Ion Batteries.”, http://centrix-intl.com/list.asp?Parent2ID=3&CategoryID=221.

[10] “LG Lithium (NMC) 18650 Rechargeable Cell,” BatterySpace.com/AA Portable Power Corp., http://www.batteryspace.com.

[11] “Lithium Ion Rechargeable Cell - CMICR 18650F - 2600mAh”, TORIYAMA Battery Technology Co. Ltd., www.toriyamabattery.com

บทที่ 4 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่

4.1 รวบรวมและวิเคราะห์ ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่และแหล่งรับพลังงาน

เนื่องจากเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมที่ใช้ในการออกแบบชุดแบตเตอรี่ใหม่ แตกต่างจากชุดแบตเตอรี่เดิมซึ่งเป็นแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลแคดเมียม ทางคณะวิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูล กำหนดความต้องการจากผู้ใช้เพื่อรออกแบบส่วนประกอบหลักสำหรับระบบจัดการและวงจรควบคุมภายในชุดแบตเตอรี่ใหม่ทั้งหมดซึ่งรายละเอียดในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

4.1.1 การกำหนดความต้องการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ใหม่

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน 24 โวลต์
- กระแสไฟฟ้าสำหรับปล่อยประจุ 3 แอมแปร์
- กระแสไฟฟ้าสำหรับประจุสูงสุด 34.7 (C/3) แอมแปร์ สำหรับประจุเร็ว (fast charge) และ 21 (C/5) แอมแปร์ สำหรับการประจุแบบปกติ (normal charge)
- ความจุไฟฟ้า 90 แอมแปร์ ชั่วโมง (107Ah usable/124.8Ah Battery Capacity)

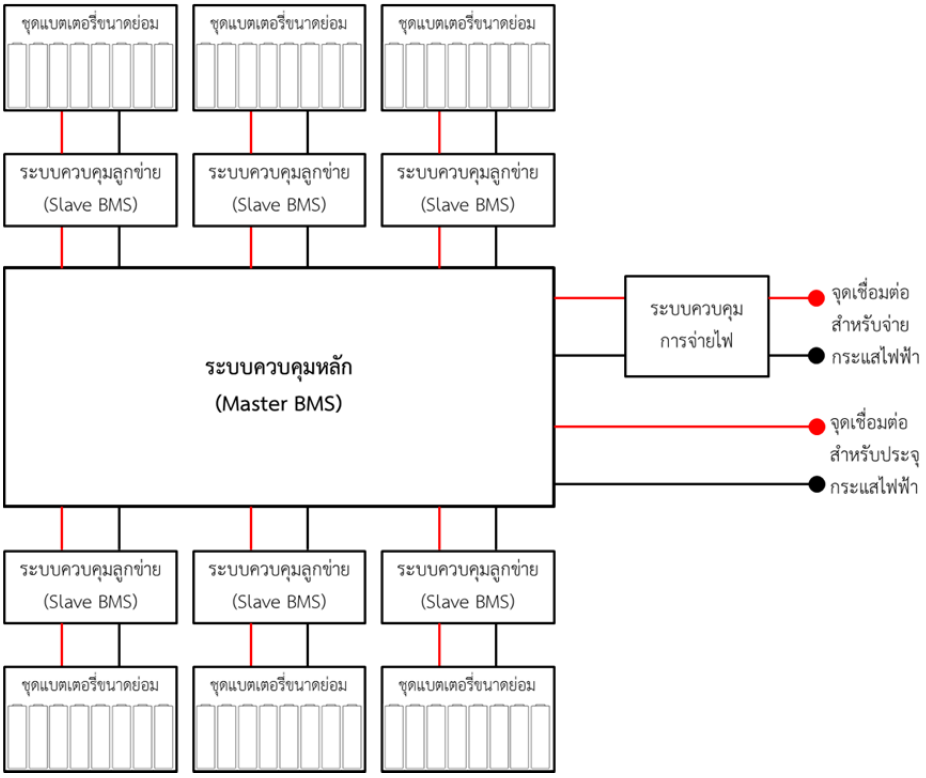
4.1.2 ส่วนประกอบหลักภายในชุดแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ลิเทียมที่เลือกใช้มีขีดจำกัดในการใช้งานเมื่อนำหลายๆเซลล์แบตเตอรี่มาต่อกัน เพื่อทำให้แบตเตอรี่ทำงานเต็มประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย ในการใช้งานชุดแบตเตอรี่จึงมีการออกแบบให้มีส่วนประกอบของระบบจัดการและวงจรควบคุมหลักดังแสดงใน รูปที่ 0.1

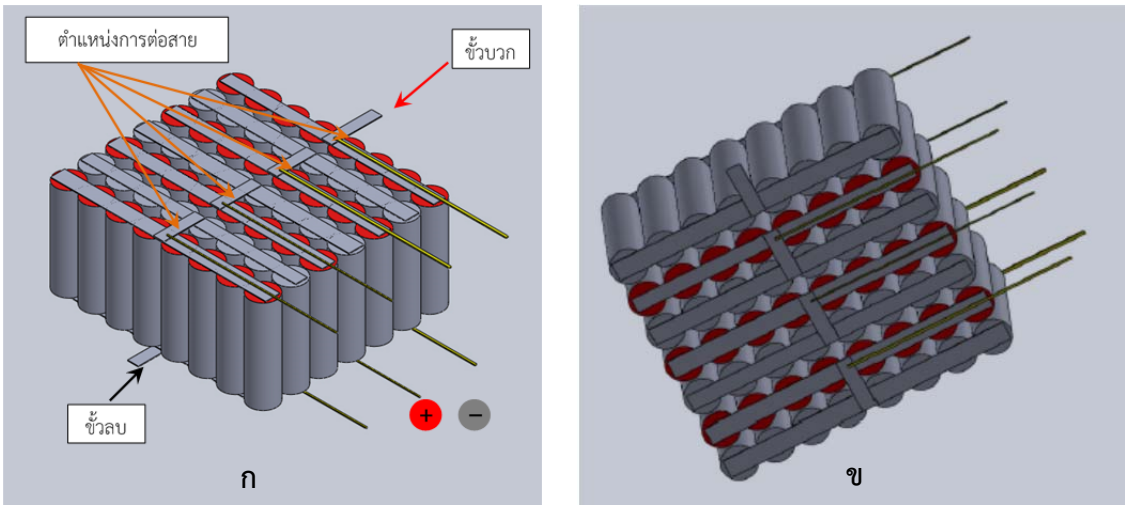
ชุดแบตเตอรี่ย่อยที่ใช้ในการประกอบลงกล่องแบตเตอรี่ มีทั้งหมด 6 ชุด แต่ละชุดมีเซลล์แบตเตอรี่ Toriyama 2600 mAh จำนวน 56 เซลล์ รูปที่ 0.2 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อชุดแบตเตอรี่ย่อย โครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่มีการเชื่อมต่อกันแบบ 7S8P กล่าวคือ เซลล์แบตเตอรี่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม 7 แถว ในแต่ละแถวมีเซลล์แบตเตอรี่ต่อขนานกัน 8 เซลล์ ดังนั้นแบตเตอรี่แต่ละโมดูลจะมีความจุไฟฟ้าระบุ 20.8 แอมแปร์·ชั่วโมง สายไฟที่ต่อเข้าระบบควบคุมลูกข่าย (Slave BMS) ติดตั้งที่ตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อเซลล์แบตเตอรี่ในแต่ละแถว โดยใช้สายไฟขนาด 22 AWG จำนวน 7 เส้น ขั้วบวกและขั้วลบของชุดแบตเตอรี่ขนาดย่อมต่อออกจากปลายทั้งสองด้านของชุดแบตเตอรี่ โดยใช้สายไฟสีแดงและสีดำ ขนาด 12 AWG ดังแสดงในรูปที่ 0.2

ระบบจัดการ (Slave BMS) และสายไฟที่ต่อเข้าระบบควบคุมลูกข่าย แสดงในรูปที่ 0.3 ระบบจัดการลูกข่ายของแบตเตอรี่โมดูลนี้มีหน้าที่หลักที่สำคัญ 4 อย่าง คือ การวัดแรงดันไฟฟ้า (meter), การเฝ้าระวัง (monitor), สมดุลย์แรงดันไฟฟ้า (balancing), และระบบป้องกัน (protection) ในที่นี่แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ จะถูกวัดและมีการทำสมดุลย์แต่ละเซลล์โดยวิธี Passive balancing cell

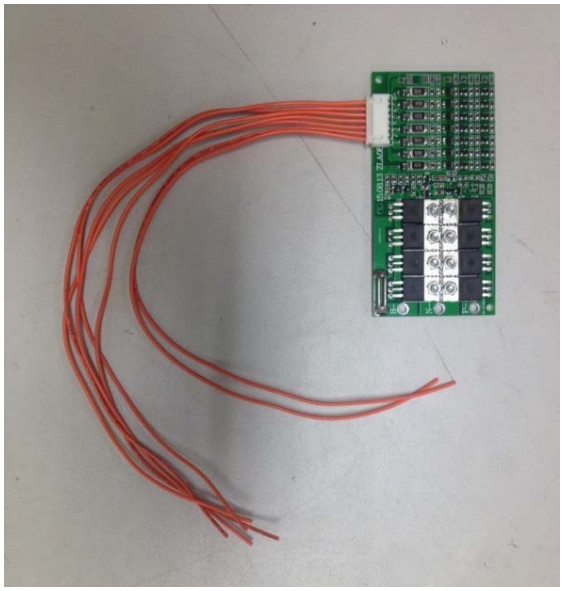
ระบบควบคุมหลักทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ การเฝ้าระวัง (monitor), สมดุลย์แรงดันไฟฟ้า (balancing), และระบบป้องกัน (protection) และ สื่อสารระหว่างชุดแบตเตอรี่กับระบบประจุแบตเตอรี่ ส่วนระบบควบคุมการจ่ายไฟ ทำหน้าที่ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่คงที่ตลอดเวลางานใช้งาน



รูปที่ 0.1 ส่วนประกอบหลักภายในชุดแบตเตอรี่



รูปที่ 0.2 รูปแบบการเชื่อมต่อแบตเตอรี่โมดูล (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านล่าง



รูปที่ 0.3 ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) และสายไฟที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่โมดูล

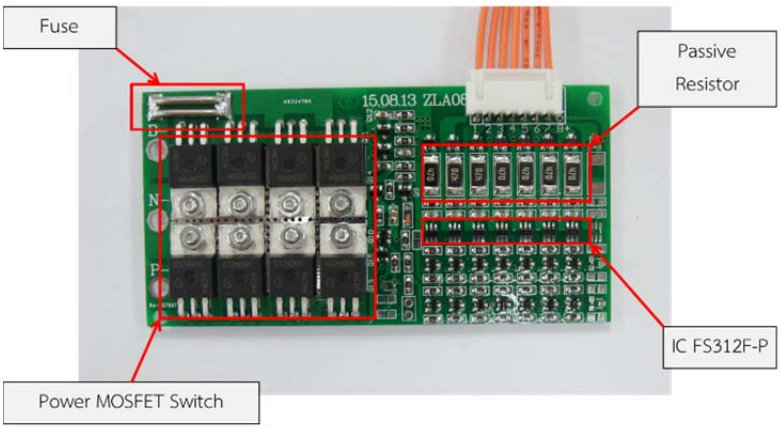
4.2 ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS)

คณะวิจัยได้พิจารณาเลือกใช้ ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด เนื่องจากด้วยระยะเวลาที่จำกัด และ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาในส่วนของระบบควบคุมหลัก (Master BMS) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

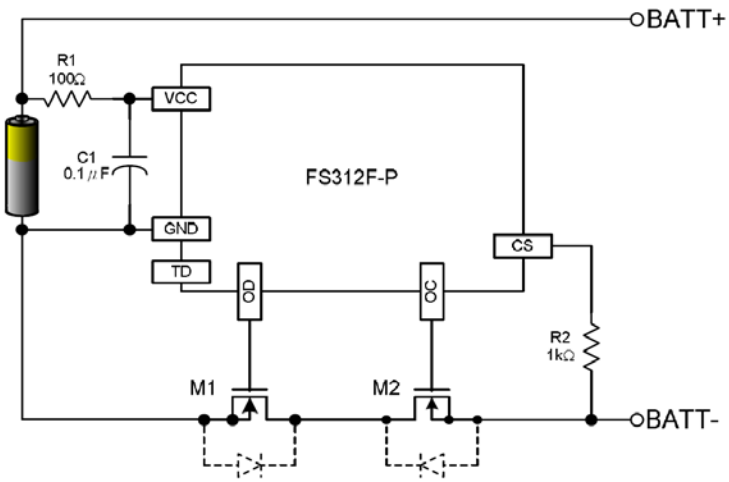
4.2.1 ข้อมูลจำเพาะของระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS)

ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) ที่พิจารณาเลือกใช้ คือ SP-BMS 24V7S60A Lithium BMS โดยมีส่วนประกอบหลักของระบบจัดการลูกข่าย แสดงในรูปที่ 0.4 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้

- ฟิวส์ สำหรับป้องกันกระแสไม่ให้เกินกว่าค่าที่กำหนด
- Passive resistor สำหรับปล่อยประจุพลังงานออกจากแบตเตอรี่ เมื่อแรงดันเกินกว่าที่กำหนด
- Power MOSFET Switch สำหรับตัด/ต่อ เชื่อมเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์
- Battery protection IC รุ่น ICFS312F-P มีหน้าที่ในการวัด และตรวจสอบแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ รวมถึงควบคุมการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ การเชื่อมต่อของ IC กับอุปกรณ์ส่วนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 0.5 โดยความหมายของอักษรย่อแสดงใน**ตารางที่ 0.1**



รูปที่ 0.4 ส่วนประกอบหลักของระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) ที่เลือกใช้



รูปที่ 0.5 แผนภาพการต่อเชื่อม Battery protection IC รุ่น ICFS312F-P กับส่วนอื่นๆ

ตารางที่ 0.1 การจัดตำแหน่งขาของ FS312F-P: One cell Lithium-ion/polymer battery protection IC

Symbol	Description
OD	MOSFET gate connection pin for discharge control
CS	Input pin for current sense, charger detect
OC	MOSFET gate connection pin for charge control
TD	Test pin for reduce delay time
VCC	Power supply, through a resistor (R1)
GND	Ground pin

ระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS) จะมีคุณสมบัติในการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าและป้องกันเซลล์แบตเตอรี่ตามคุณสมบัติของ Battery protection IC ซึ่งมีแสดงข้อมูลจำเพาะของ FS312F-P ดังแสดงใน **ตารางที่ 0.2** กล่าวคือ เมื่อทำการประจุแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เซลล์ใดเซลล์หนึ่งในแบตเตอรี่โมดูลสูงกว่าแรงดันสูงสุดในการประจุของ IC (Overcharge detection voltage) 4.250±0.025 โวลต์ หรือช่วงแรงดัน 4.225-4.275 โวลต์ ระบบจัดการลูกข่ายแบตเตอรี่ (Slave BMS) จะหยุดการประจุชั่วคราว จากนั้นจะทำการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าโดยการดึงพลังงานออกจากเซลล์แบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่เซลล์ใดเซลล์หนึ่งน้อยกว่าแรงดันปล่อยสำหรับการประจุของ IC (Overcharge release voltage) 4.145±0.05 โวลต์ หรือ ช่วงแรงดัน 4.095-4.195 โวลต์ จะหยุดการบาลานซ์ และเริ่มการประจุไฟฟ้าใหม่

ในส่วนของการปล่อยประจุ ระบบจัดการลูกข่ายนี้จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ปล่อยประจุต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (Overdischarge protection) แบตเตอรี่โมดูลจะหยุดปล่อยประจุ เมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่เซลล์ใดเซลล์หนึ่งต่ำกว่าแรงดันน้อยที่สุดในการปล่อยประจุของ IC (Overdischarge detection voltage) 2.90±0.08 โวลต์ หรือ ช่วงแรงดัน 2.82-2.98 โวลต์ และจะสามารถปล่อยประจุใหม่ได้เมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่เซลล์ใดเซลล์หนึ่งมากกว่าแรงดันปล่อยสำหรับการปล่อยประจุของ IC (Overdischarge release voltage) 3.0±0.08 โวลต์ หรือ ช่วงแรงดัน 2.92-3.08 โวลต์ ระบบจัดการลูกข่ายที่เลือกใช้นี้ไม่สามารถทำการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์แบตเตอรี่เมื่อปล่อยประจุ

ตารางที่ 0.2 ข้อมูลจำเพาะของ FS312F-P: One cell Lithium-ion/polymer battery protection IC

Model	Package SOT-23-6	Overcharge detection voltage [VOCP] (V)	Overcharge release voltage [VOCR] (V)	Overdischarge detection voltage [VODP] (V)	Overdischarge release voltage [VODR] (V)	Overcurrent detection voltage [VOI1] (mV)
FS312F-P	FS312F-P	4.250±0.025	4.145±0.050	2.90±0.080	3.0±0.080	150±30

4.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบจัดการลูกข่าย (Slave BMS)

วัตถุประสงค์ในการทดสอบ คือ ตรวจสอบการทำงานของระบบจัดการลูกข่ายตามที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของสินค้า โดยจะตรวจสอบการทำงานของ Slave BMS ดังนี้

- การป้องการการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overdischarge protection)
- การป้องการการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overcharge protection)
- การทำสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าเซลล์แบตเตอรี่ (Cell balancing)

รูปที่ 0.6 แสดงการออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบจัดการลูกข่าย จากภาพระบบจัดการลูกข่ายกับเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกัน 7 เซลล์ และขนานกัน 6 เซลล์ (7S6P) และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและ/หรือโหลดกระแสตรง โดยทำการวัดและบันทึกข้อมูล กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ และอุณหภูมิของระบบจัดการลูกข่าย



รูปที่ 0.6 การออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบจัดการลูกข่าย

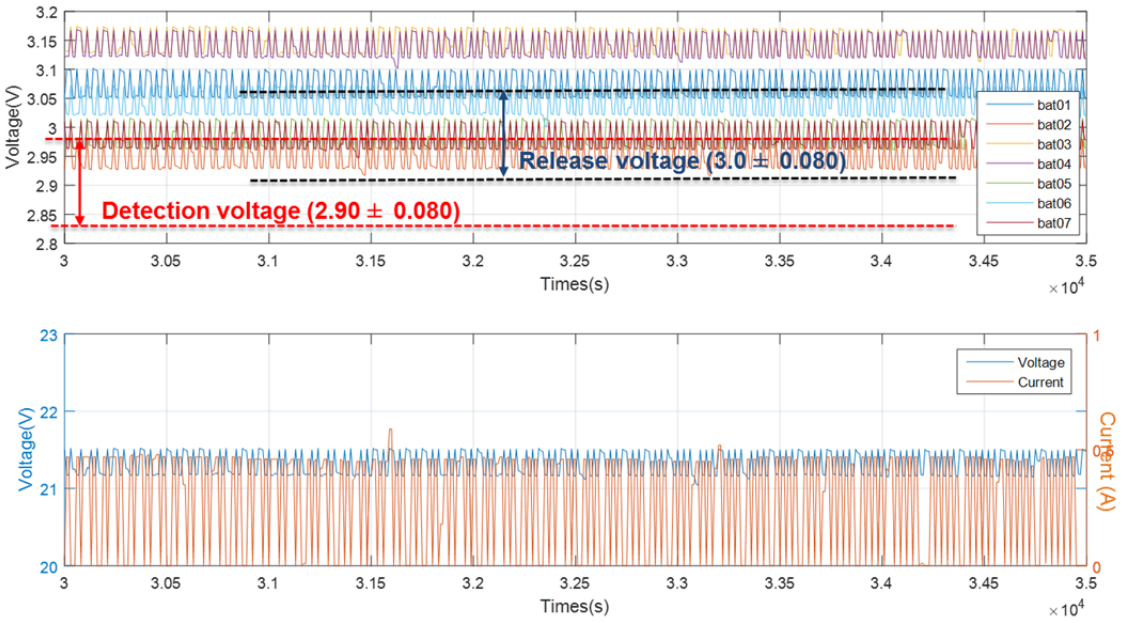
รูปที่ 0.7 แสดงผลการทดสอบการป้องกันการปล่อยประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overdischarge protection) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบจัดการลูกข่ายสามารถทำงานได้ตามที่ระบุไว้นั่น คือ หยุดการปล่อยประจุหรือกระแสไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันอยู่ในช่วง Over discharge detection voltage 2.82-2.98 โวลต์ และสามารถเริ่มการปล่อยประจุได้ใหม่ หรือปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์ เมื่อแรงดันอยู่ในช่วง Over discharge release voltage โวลต์ 2.92-3.08 โวลต์

ในส่วนของการทดสอบการป้องกันการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overcharge protection) จะต่อระบบแบตเตอรี่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (power supply) ซึ่งสามารถ จ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 30 โวลต์ และ กระแสไฟฟ้าคงที่ 3 แอมแปร์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 0.8 จะเห็นได้ว่าระบบจัดการลูกข่าย

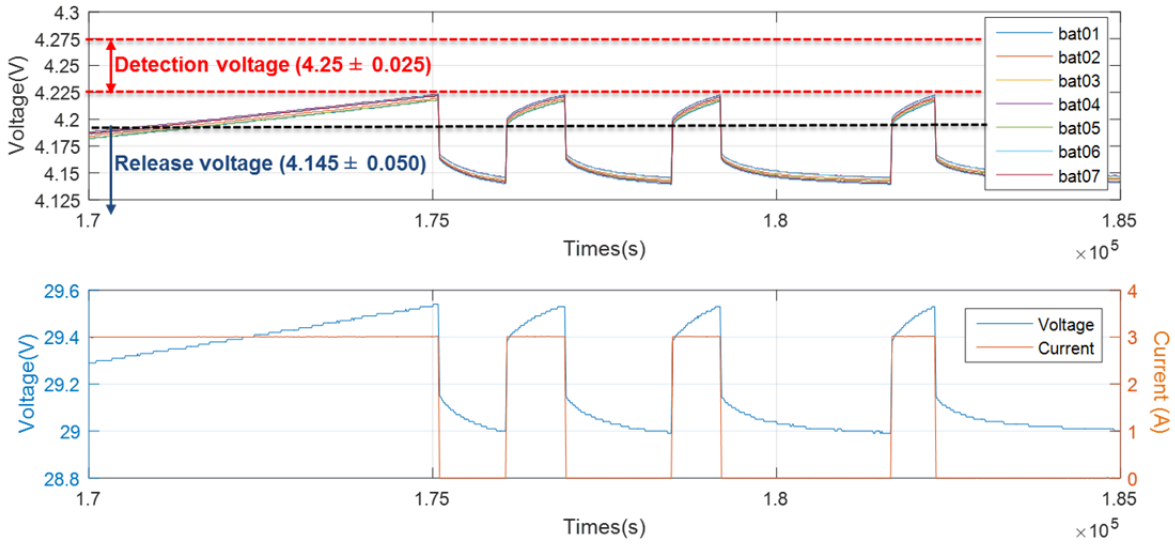
สามารถทำงานได้ตามที่ระบุไว้เช่นเดียวกัน โดยเมื่อหยุดการประจุ แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง Overcharge detection voltage 4.095-4.195 โวลต์ และสามารถเริ่มการปล่อยประจุได้ใหม่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง Overcharge release voltageโวลต์ 4.225-4.275 โวลต์ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเซลล์แบตเตอรี่จะมีแรงดันที่ค่อยๆลดลงในแต่ละครั้งที่กลับไปประจุใหม่ เนื่องจากเกิดการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า เซลล์แบตเตอรี่ถูกดึงพลังงานออกทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ลดลง เมื่อมีการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าอุณหภูมิของอุปกรณ์บนระบบจัดการลูกข่ายจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จากตัวความต้านทาน (Passive resistor) ดังสังเกตได้จากวงกลมสีแดง ซึ่งแสดงในรูปที่ 0.9 (ข) เมื่อไม่เกิดสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิของระบบจัดการลูกข่ายจะไม่เพิ่มสูงขึ้นดัง รูปที่ 0.9 (ก)

ดังนั้นจากผลการทดสอบระบบจัดการลูกข่ายสามารถสรุปได้ว่า

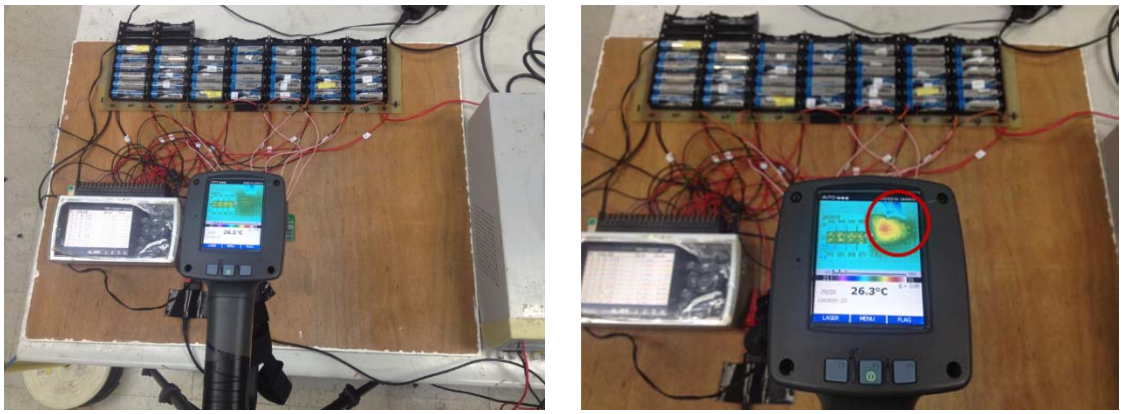
- ระบบจัดการลูกข่ายสามารถทำงานได้ตามที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของบริษัท
- ระบบจัดการลูกข่ายสามารถทำสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ได้ที่ 4.25 ± 0.25 โวลต์
- ระบบจัดการลูกข่ายไม่สามารถทำสมดุลย์ความศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันได้



รูปที่ 0.7 ผลการทดสอบการป้องกันการปล่อยประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overdischarge protection)



รูปที่ 0.8 ผลการทดสอบการป้องกันการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด และการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า



(ก) (ข)

รูปที่ 0.9 ผลการทดสอบอุณหภูมิ เมื่อเกิดการบาลานซ์เซลล์แบตเตอรี่
(ก) เมื่อไม่เกิดการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า (ข) เมื่อเกิดการสมดุลย์แรงดันไฟฟ้า

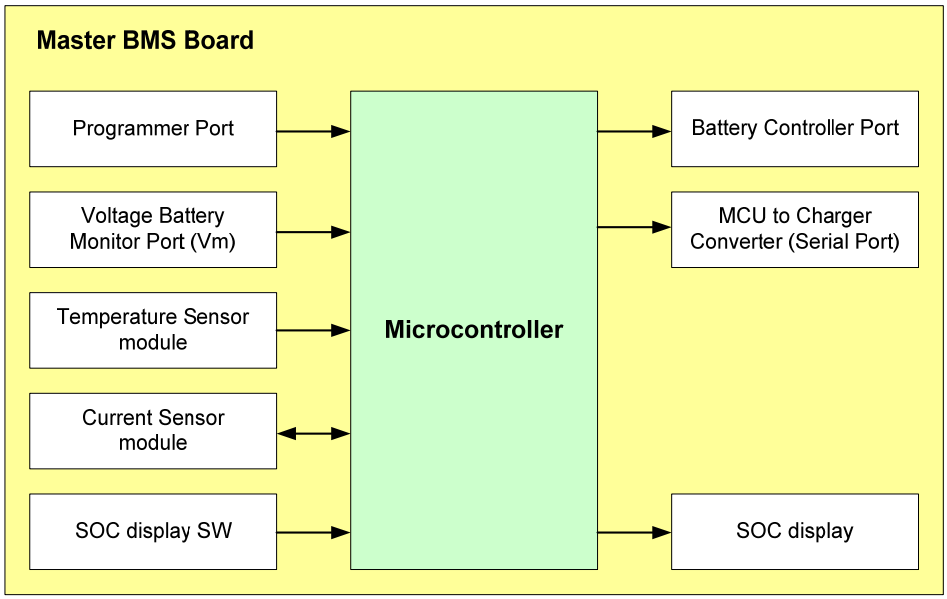
4.3 การออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมหลัก (Master BMS)

4.3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบบอร์ด Master BMS กับอุปกรณ์วัดและตรวจวัดต่างๆ

บอร์ด Master BMS ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และอุปกรณ์ตรวจวัด (sensor) ต่างๆ ที่ติดต่อสื่อสารกัน ดังรูปที่ 0.10 โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

- Programmer Port: ทำหน้าที่รับโค้ดจากคอมพิวเตอร์ เพื่อโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ให้ทำงานตามที่กำหนด
- Voltage Battery Monitor Port (Vm): ทำหน้าที่วัด และส่งค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ต่างๆ ไปให้ MCU ประมวลผล ซึ่งค่าแรงดันจะถูกลดทอนอัตราการขยาย เพื่อให้ MCU อ่านค่าได้ไม่เกินระดับแรงดันอ้างอิงของ AVDD (Analog Voltage Drain Drain) ซึ่งหมายถึง ไฟเลี้ยงของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

- Temperature Sensor module: ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ และส่งค่าที่วัดได้ไปให้ MCU ในรูปแบบของค่าแรงดัน เพื่อให้ MCU ประมวลผล
- Current Sensor module: ทำหน้าที่ส่งค่ากระแสที่วัดได้จากโมดูลวัดกระแส ไปให้ MCU ประมวลผล
- SOC display SW: ทำหน้าที่รองรับการกดสวิตช์จากผู้ใช้งาน เพื่อตรวจสอบค่าระดับพลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่ ผ่านทาง SOC display
- SOC display: ทำหน้าที่แสดงระดับพลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่ (จากการคำนวณจากค่าแรงดันรวมเฉลี่ยของแบตเตอรี่) โดงแสดงผลผ่านทางหลอดไฟแสดงผล (LED) 4 ระดับ
- Battery Controller Port: ทำหน้าที่ตัด/ต่อเชื่อมแบตเตอรี่แต่ละชุดกับระบบ
- MCU to Charger Converter: ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเพื่อติดต่อและควบคุมเครื่องประจุ (Charger)



รูปที่ 0.10 ส่วนประกอบของระบบควบคุมหลัก และอุปกรณ์ตรวจสอบ (sensor) ต่างๆ

4.3.2 การจัดการขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Mapping pins)

ในส่วนของบอร์ด Master BMS พิจารณาเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC16F5015 เป็นตัวหลักในการควบคุมการทำงาน ซึ่งมีการจัดการของขาต่างๆ ดัง

ตารางที่ 0.3

ตารางที่ 0.3 การจัดตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์

I/O	Ana./Dig.	Function	Port	Pin	dsPIC30F5015	Pin	Port	Function	Ana./Dig.	I/O
O	Dig.	BMS_slave_control_6	RE5	1		64	RE4	BMS_slave_control_5	Dig.	O
				2		63	RE3	BMS_slave_control_4	Dig.	O
				3		62	RE2	BMS_slave_control_3	Dig.	O
I	Dig.	Current sensor Clock	SCK	4		61	RE1	BMS_slave_control_2	Dig.	O
I	Dig.	Current sensor Rx	MOSI	5		60	RE0	BMS_slave_control_1	Dig.	O
O	Dig.	Current sensor Tx	MISO	6		59				
System		MCLR	MCLR	7		58				
I	Dig.	Current sensor CS	CS	8		57	VDD	VDD	System	
System		VSS	GND	9		56	GND	VSS	System	
System		VDD	VDD	10		55				
I	Ana.	Temp_1	RB5	11		54				
I	Ana.	Temp_2	RB4	12		53	RD5	DC to DC SW	Dig.	I
I	Ana.	Temp_3	RB3	13		52	RD4	LED1	Dig.	O
I	Ana.	Temp_4	RB2	14		51	RD3	LED2	Dig.	O
I	Ana.	Temp_5	RB1	15		50	RD2	LED3	Dig.	O
I	Ana.	Temp_6	RB0	16	dsPIC30F5015	49	RD1	LED4	Dig.	O
System		PGC	PGC	17		48				
System		PGD	PGD	18		47				
System		AVDD	VDD	19		46	RD0	LED5	Dig.	O
System		AVSS	GND	20		45				
I	Ana.	V_pack_sensing	A8	21		44				
I	Ana.	V_M1_sensing	A9	22		43	INT2	Interrupt SW	Dig.	I
I	Ana.	V_M2_sensing	A10	23		42	INT1	Interrupt SW	Dig.	I
I	Ana.	V_M3_sensing	A11	24		41	GND	VSS	System	
System		VSS	GND	25		40	OSC.	OSC2	System	
System		VDD	VDD	26		39	OSC.	OSC1	System	
I	Ana.	V_M4_sensing	A12	27		38	VDD	VDD	System	
I	Ana.	V_M5_sensing	A13	28		37				
I	Ana.	V_M6_sensing	A14	29		36				
				30		35				
				31		34	Rx	UART_Rx	Dig.	I
				32		33	Tx	UART_Tx	Dig.	O

4.3.3 รายการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบควบคุมหลัก

ในการพัฒนา Master BMS ที่ออกแบบไว้ จะต้องซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ดังตารางที่ 0.4

ตารางที่ 0.4 รายการอุปกรณ์ Master BMS

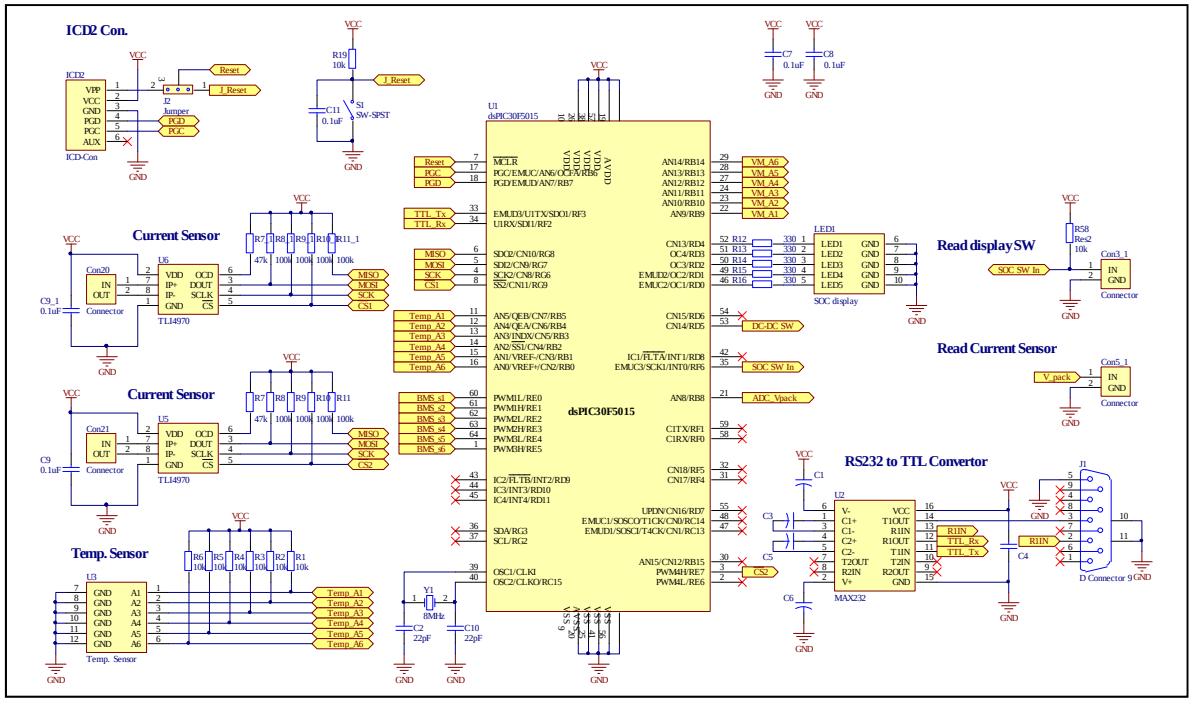
Footprint	Comment	Designator	Description	Quantity
Lock_Socket_2	M2	Con1		1
Lock_Socket_2	M4	Con2		1
Lock_Socket_2	M6	Con3		1
Lock_Socket_2	M1	Con4		1
Lock_Socket_2	M3	Con5		1
Lock_Socket_2	M5	Con6		1
FSV2060L	Diode	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	Default Diode	12
1N5226B-TAP	1N5226B-TAP	D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19	Schottky Rectifier	7
F2	Fuse 1	F1, F2, F3, F4, F5, F6	Fuse	6
CHIP_1206	Res2	R17, R18, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31	Resistor	14
CHIP_0805	Cap2	C1, C3, C5, C6	Capacitor	4
CHIP_0805	22pF	C2, C10	Capacitor	2
CHIP_0805	Cap	C4, C7, C8, C9, C11	Capacitor	5
Wafer_Con_2_R	Connector	Con3_1		1
HV_OUT	Connector	Con21		1
HDR1X3H	Header 3H	Con_UART	Header, 3-Pin	1
DIODE-0.7	D Zener	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	Zener Diode	8
ICD2_Socket	ICD-Con	ICD2		1
Jumper	Jumper	J2		1
SOC_display_5ch_R	SOC display	LED1		1
CHIP_1206	Res2	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R19, R58	Resistor	18
SPST_SMD	SW-SPST	S1	Single-Pole	1
dsPIC30F5015_TQFP64	dsPIC30F5015	U1		1
SOIC_MAX232	MAX232	U2		1
Temp. sensor_6ch	Temp. Sensor	U3		1
TLI4970	TLI4970	U5		1
XTAL_488mm	8MHz	Y1	Crystal Oscillator	1

ตารางที่ 4.4 รายการอุปกรณ์ Master BMS (ต่อ)

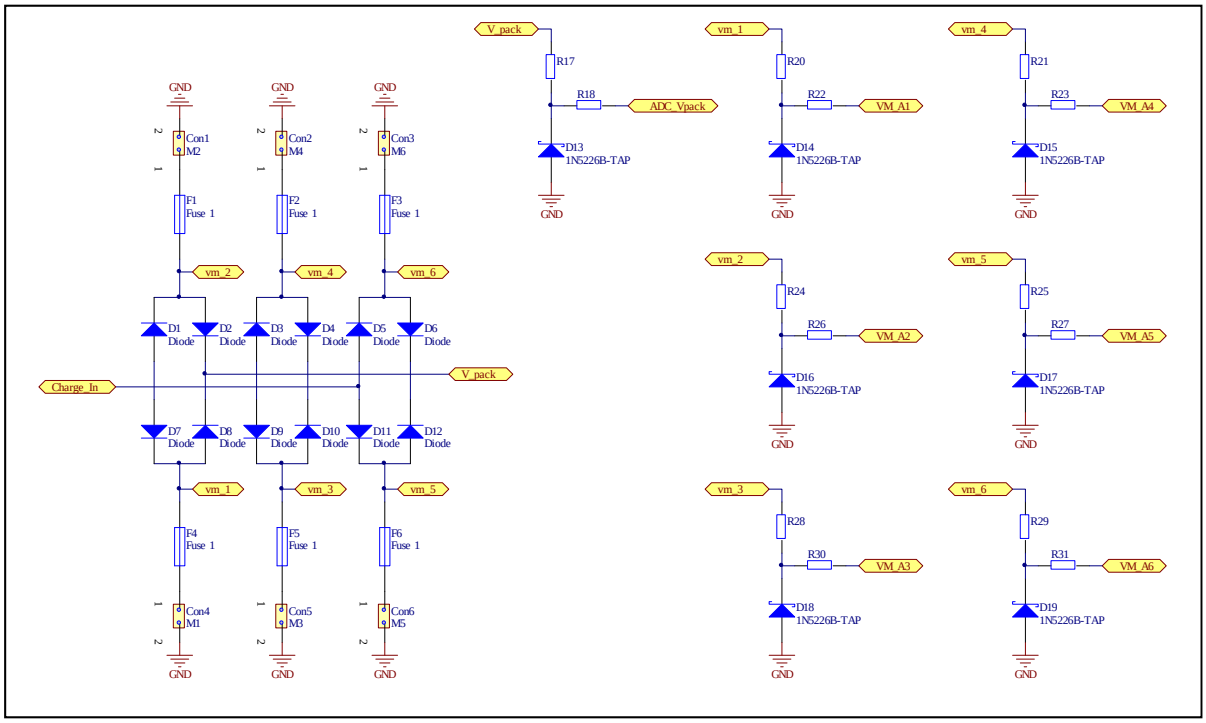
Footprint	Comment	Designator	Description	Quantity
Wafer_Con_2_R	Connector	Con3_2, Con3_3, Con3_4, Con3_5, Con7, Con8, Con9, Con10, Con11, Con12, Con13, Con14, Con15, Con16, Con17, Con18, Con19		17
DIODE-0.7	D Zener	D3, D4, D5, D6	Zener Diode	4
CHIP_1206	330	R32, R34, R36, R38, R40, R42, R44, R46, R48, R50, R52, R54, R54_1, R54_2, R56	Resistor	15
CHIP_1206	2.2k	R33, R35, R37, R39, R41, R43, R45, R47, R49, R51, R53, R55, R55_1, R55_2, R57	Resistor	15
CHIP_1206	Res2	R58_1, R58_2, R58_3, R58_4	Resistor	4
DIP-4	Optoisolator1	U4, U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13, U14, U15, U16, U17, U17_1, U17_2, U18	4-Pin Phototransistor Optocoupler	15

4.3.4 การพัฒนาระบบ Master BMS ครั้งที่ 1

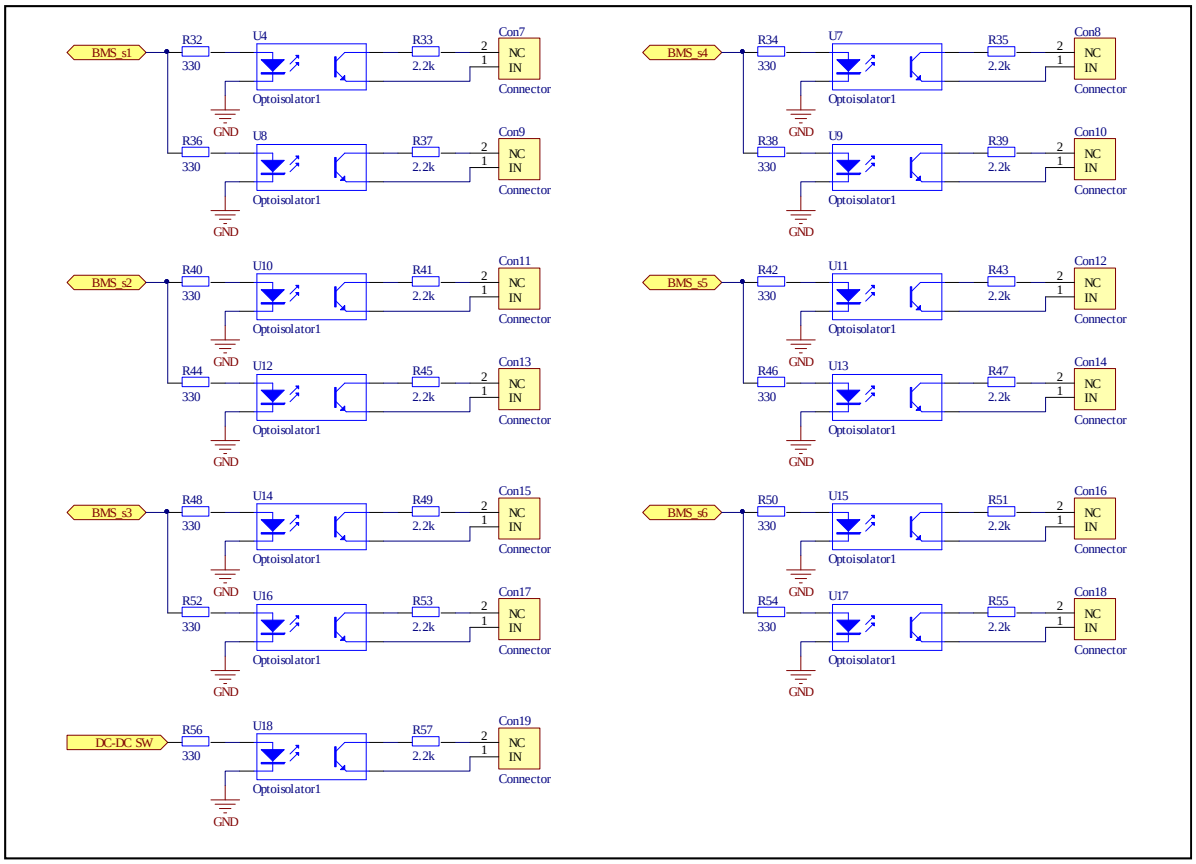
การออกแบบส่วนของวงจร Master BMS และแผ่นวงจรพิมพ์ ให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ตรวจสอบ (sensor) ต่างๆ ซึ่งใน Master BMS version 1.1 ได้ออกแบบวงจรไว้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งสามารถพัฒนาออกมาได้เป็นต้นแบบ Master BMS version 1.1 ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



(ก)

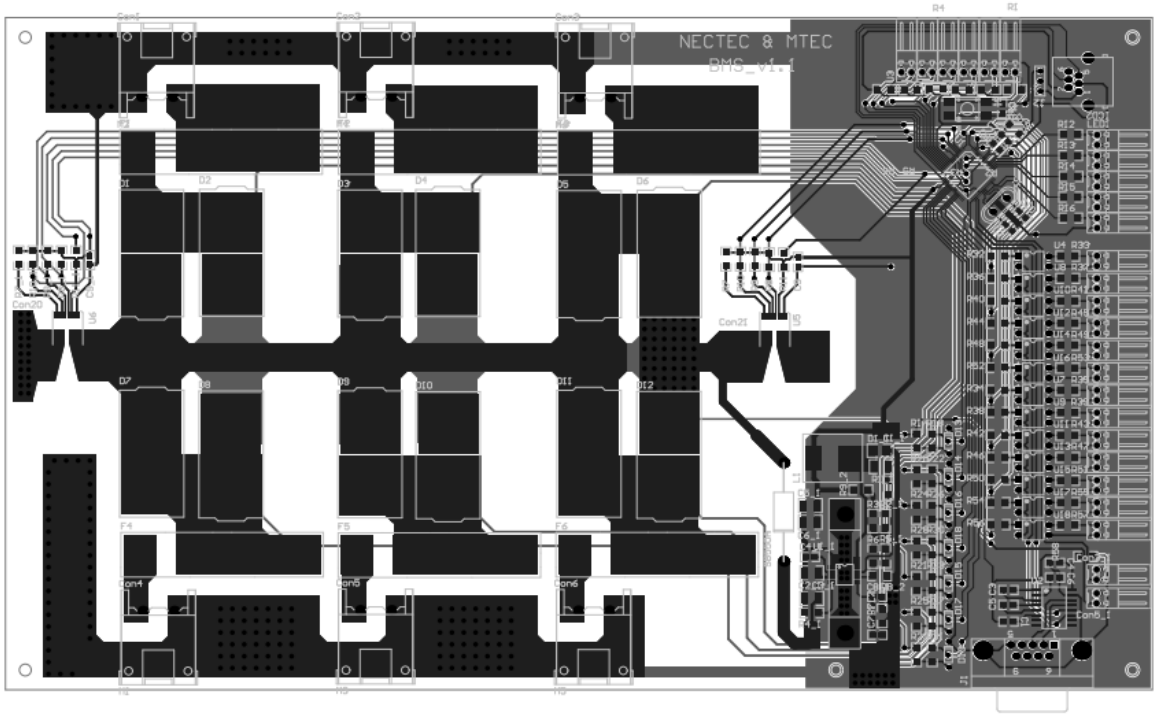


(ข)

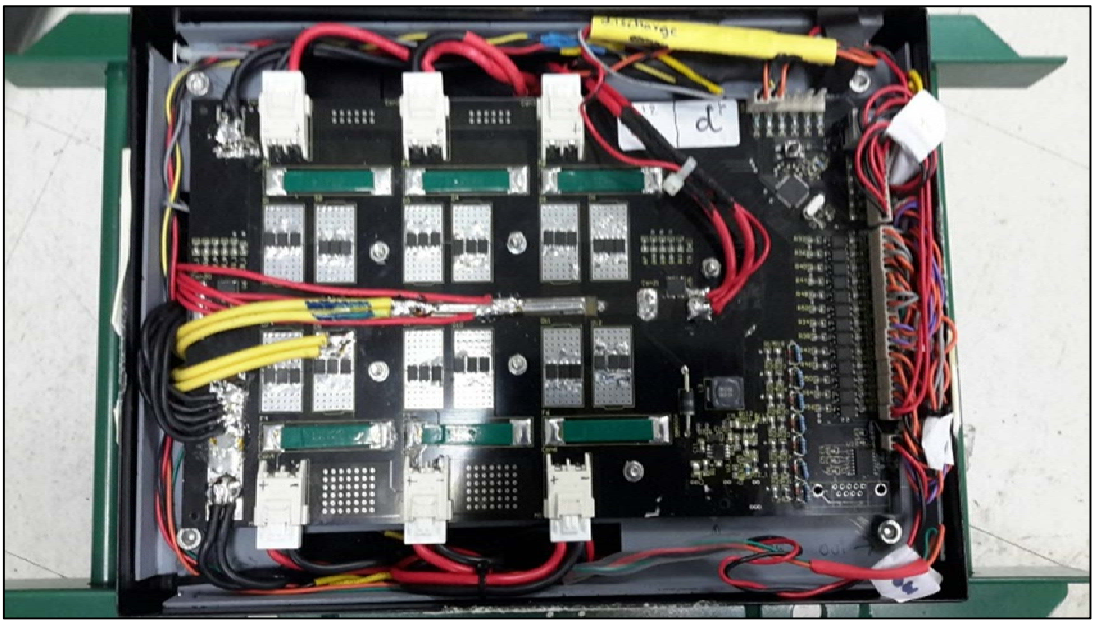


(ค)

รูปที่ 0.11 วงจรบอร์ด Master BMS version 1.1



รูปที่ 0.12 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.1



รูปที่ 0.13 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.1

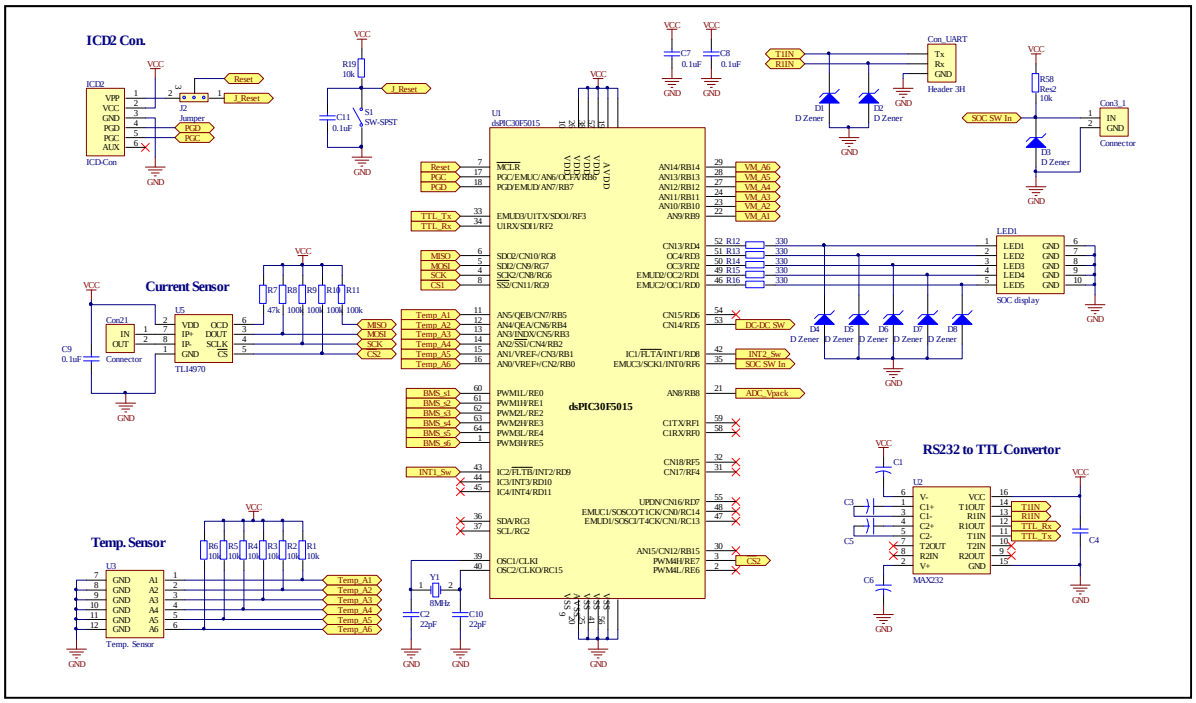
4.3.5 การพัฒนาและทดสอบ ระบบ Battery management system (BMS) ครั้งที่ 2

จากต้นแบบระบบ Master BMS version 1.1 ที่ได้ถูกพัฒนาดังนำเสนอในหัวข้อที่ 4.4.4 นั้น ถูกนำไปทดสอบตามรายละเอียดในหัวข้อ 7.2 จำเป็นต้องการปรับปรุง และพัฒนาให้ได้ระบบ Master BMS ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น จึงได้ออกแบบ และพัฒนา Master BMS version 1.2 ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 โดยคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

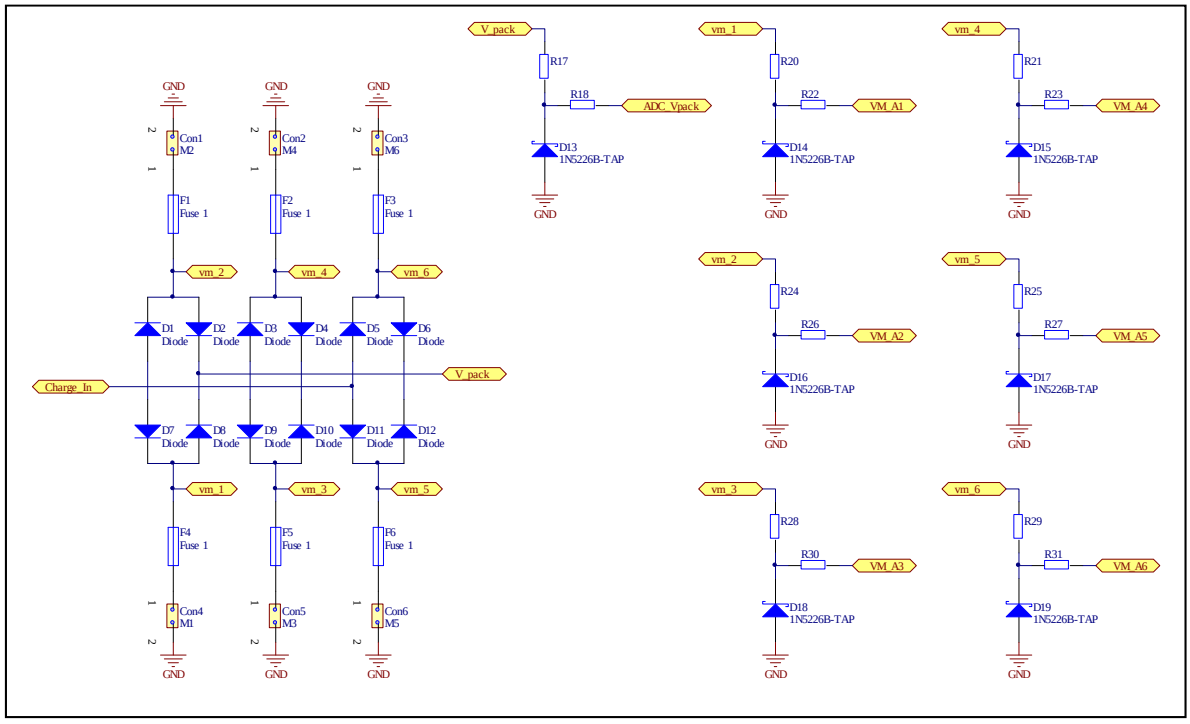
1) เปลี่ยนสายสัญญาณที่บัดกรีลงบอร์ดทั้งหมด เป็น คอนเนคเตอร์ เพื่อให้สะดวกต่อการประกอบและการซ่อมบำรุงในภายหลัง

2) เพิ่มอุปกรณ์ส่วนรักษาระดับแรงดันที่พอร์ตอินพุต / เอาท์พุต ให้มีระดับแรงดันคงที่

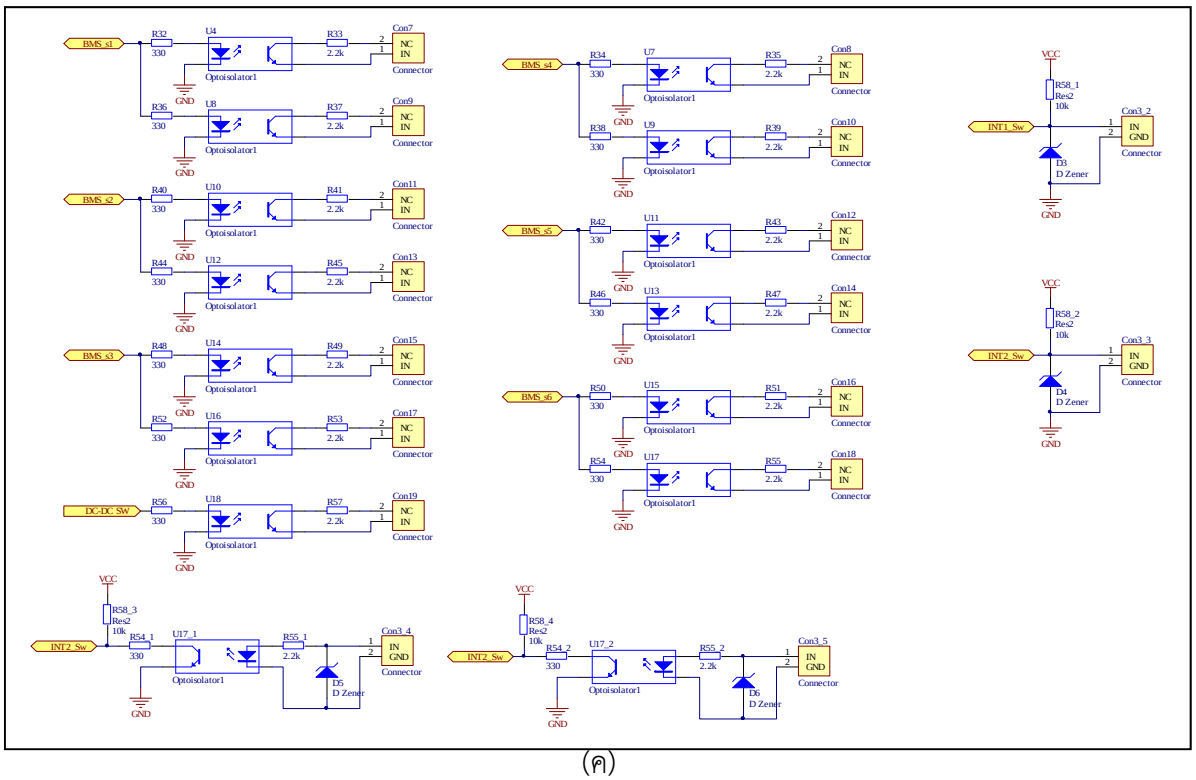
3) เพิ่มวงจร Isolate ระหว่าง MCU และพอร์ตที่รับค่าด้านอินพุต / เอาท์พุต


ICD2 Con.
Current Sensor
Temp. Sensor
RS232 to TTL Convertor
dsPIC30F5015
SOC display
Connector
Header 3H
MAX232
TLI4970
Temp. Sensor

(ก)

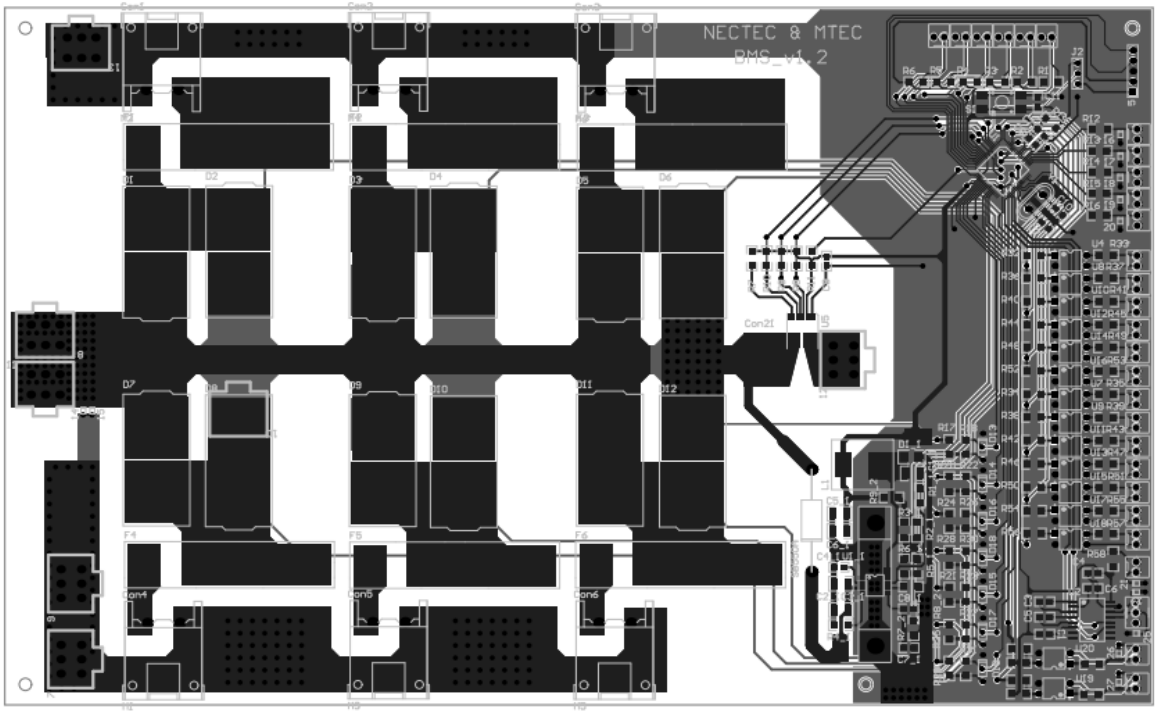

V_pack
ADC_Vpack
vm_1
VM_A1
vm_4
VM_A4
vm_2
VM_A2
vm_5
VM_A5
vm_3
VM_A3
vm_6
VM_A6
Charge_In
1N5226B-TAP
Diode
Fuse 1
GND

(ข)



(ค)

รูปที่ 0.14 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.2



รูปที่ 0.15 แผ่นวงจรพิมพ์ Master BMS version 1.2

4.4 ระบบควบคุมการจ่ายไฟ (DC to DC converter)

ระบบควบคุมการจ่ายไฟ (DC to DC converter) เป็นรายการหนึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรควบคุมการจ่ายไฟ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้งานต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน MIL จึงมีเพียงบริษัทเดียวที่เสนอราคา และสามารถจัดหาอุปกรณ์ที่ต้องการให้ได้ในระยะเวลาที่กำหนด ทางคณะวิจัยจึงเลือกใช้ระบบควบคุมการจ่ายไฟของ GAIA ลักษณะกายภาพแสดงในรูปที่ 0.16

4.4.1 ข้อมูลจำเพาะของ DC/DC converter GAIA

- แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input voltage) 9-45 VDC (MIL-STD-704A/D/F@28 VDC)
- แรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) 24 VDC
- กระแสไฟฟ้าสูงสุด 8.4 แอมแปร์
- ช่วงอุณหภูมิที่ทำงานได้ -40 ถึง 105 องศาเซลเซียส
- ประสิทธิภาพการทำงาน 90%



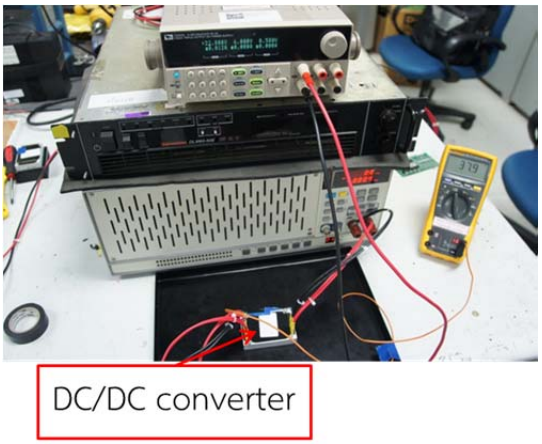
รูปที่ 0.16 DC/DC converter GAIA สำหรับระบบควบคุมการจ่ายไฟ

4.4.2 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการจ่ายไฟ

การพัฒนาและทดสอบระบบควมคุมการจ่ายไฟ จะทำการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของ DC/DC converter โดยต่อเชื่อม DC/DC converter กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และโหลดกระแสตรง ดังรูปที่ 0.17 โดยสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 การทดสอบคือ

1. การทดสอบฟังก์ชัน ซึ่งจะทดสอบดังรายการต่อไปนี้
    - ควบคุมการสั่งเปิด-ปิด การทำงานของ DC/DC converter
    - การทดสอบการป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์ (Temperature protection)
    - การทดสอบแรงดันขาออกของ DC/DC converter เมื่อปรับแรงดันขาเข้า ของ DC/DC converter (Output Voltage Regulation @ 3A Current Output)
    - การทดสอบการป้องกันการจ่ายกระแสเกินของ DC/DC converter (Output Current Protection)

2. การทดสอบประสิทธิภาพ



รูปที่ 0.17 การทดสอบ DC/DC converter

4.4.3 การทดสอบการควบคุมการสั่งเปิด-ปิด การทำงานของ DC/DC converter

DC/DC converter จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ด้านขาเข้า และต่อกับโหลดที่ด้านขาออก ดังรูปที่ 0.17 โดยจะทำการสั่งเปิดและปิด DC/DC converter ที่สถานการณ์มีโหลด (no load) และ ไม่มีโหลด (load) และวัดกระแสที่ด้านขาเข้า ตารางที่ 0.5 แสดงผลการทดสอบการควบคุมการสั่งเปิด-ปิด การทำงานของ DC/DC converter ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีโหลด และสั่งปิด DC/DC converter กระแสที่ด้านขาเข้ามีค่าน้อยที่สุด แต่ไม่เท่ากับศูนย์ และกระแสที่ด้านขาเข้าสูงสุดเมื่อ สั่งเปิด DC/DC converter และต่อกับโหลด

ตารางที่ 0.5 ผลการทดสอบการควบคุมการสั่งเปิด-ปิด การทำงานของ DC/DC converter

คำสั่งเปิด-ปิด	กระแส Output (A)		กระแส Input (A)
	No Load	Load	
ปิด	✓		0.012
เปิด	✓		0.029
ปิด		✓	0.033
เปิด		✓	3.72

4.4.4 การทดสอบการป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์ (Temperature protection)

ในหัวข้อนี้จะทดสอบผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของอุปกรณ์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของระบบการทดสอบ ดังรูปที่ 0.17 จาก 60 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดแรงดัน และกระแสที่ด้านขาออกของ DC/DC converter ตารางที่ 0.6 แสดงผลการทดสอบการป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า DC/DC converter ทำงานปกติในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ประมาณ 24.4 โวลต์ และจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส แต่จะหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 0.6 ผลการทดสอบการป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์

อุณหภูมิ °C	แรงดันที่ด้านขาออก (โวลต์)	กระแสที่ด้านขาออก (แอมแปร์)
60	24.4	3
70	24.4	3
80	24.4	3
90	24.3	3
100	0	0

4.4.5 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออกของ DC/DC converter เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ของ DC/DC converter (Output Voltage Regulation @ 3A Current Output)

เนื่องจากหน้าที่หลักของ DC/DC converter คือ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของ DC/DC converter เมื่อมีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของ DC/DC converter (ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง) ซึ่งเปรียบเสมือนแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลที่จะเปลี่ยนแปลงไปขณะปล่อยประจุอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะถูกปรับตั้งแต่ 20 โวลต์ ถึง 29 โวลต์ ตารางที่ 0.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันขาออกของ DC/DC converter มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ที่ 24.4 โวลต์ตลอด นั่นคือ DC/DC converter สามารถควบคุมให้แรงดันขาออกของระบบแบตเตอรี่มีค่าคงที่ได้ตามที่ออกแบบไว้

ตารางที่ 0.7 ผลการทดสอบแรงดันขาออกของ DC/DC converter เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ของ DC/DC converter

แรงดันขาเข้า (โวลต์)	แรงดันขาออก (โวลต์)
20	24.4
21	24.4
22	24.4
23	24.5
24	24.4
25	24.4
26	24.4
27	24.4
28	24.3
29	24.4

4.4.6 การทดสอบการป้องกันการจ่ายกระแสเกินของ DC/DC converter (Output Current Protection)

เนื่องจาก DC/DC converter มีหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลด เพื่อป้องกันไม่ให้ชุดแบตเตอรี่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงมากเกินไป ในกรณีที่ เกิดการลัดวงจรภายนอก (Short circuit) หรือเกิดจากกระแสไฟฟ้าขาออกที่สูงเกินไป รวมถึงเพื่อป้องกันระบบแบตเตอรี่เมื่อต่อกับโหลดที่กินกระแสมากกว่าที่กำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบถึงการป้องกันการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินของอุปกรณ์ ตารางที่ 0.8

แสดงผลการทดสอบการป้องกันการจ่ายกระแสเกินของ DC/DC converter ซึ่งทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าคงที่ 24 โวลต์ และปรับค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (ปรับค่าโหลด) ตั้งแต่ 3 ถึง 11 แอมแปร์ พบว่าอุปกรณ์สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 10 แอมแปร์ เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 11 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของอุปกรณ์จะลดลง และหยุดการทำงาน

ตารางที่ 0.8 ผลการทดสอบการป้องกันการจ่ายกระแสเกินของ DC/DC converter

แรงดันขาเข้า (โวลต์)	**กระแสขาออก (แอมแปร์)**	**Safety Protection**
24	3	normal
24	4	normal
24	5	normal
24	6	normal
24	7	normal
24	8	normal
24	9	normal
24	10	normal
↓	11	Shut down

4.4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

เนื่องจาก DC/DC converter เป็นส่วนหนึ่งของระบบจ่ายพลังงานให้โหลด ซึ่งเป็นการถ่ายโอนพลังงานจากชุดแบตเตอรี่ไปให้โหลด แต่เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงงานจากการทำงานของอุปกรณ์ ทำให้พลังงานจากชุดแบตเตอรี่ไม่สามารถถ่ายโอนไปยังโหลดได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องมีตรวจสอบประสิทธิภาพของ DC/DC converter เพื่อพิจารณาว่าชุดแบตเตอรี่ที่ออกแบบนี้สามารถจ่ายโหลดได้เวลานานตามที่ต้องการหรือไม่ โดยทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าขาออก 3 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าตั้งแต่ 20 โวลต์ ถึง 29 โวลต์ ตารางที่ 0.9 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ DC/DC converter ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าขาเข้าจะลดลง ประสิทธิภาพการทำงานจะสูงสุดที่ 87.19% เมื่อแรงดันขาเข้าเท่ากับ 23 โวลต์ และช่วงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ในช่วง 23-24 โวลต์ หรือช่วงแรงดันที่ใกล้เคียงกับแรงดันขาออก ประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการทำงานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 85.56% เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 29 โวลต์

ตารางที่ 0.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ DC/DC converter

Input		Output		ประสิทธิภาพ
Volt	Current	Volt	Current	
20	4.2	24.4	3	87.14
21	4.01	24.4	3	86.93
22	3.83	24.4	3	86.87
23	3.65	24.4	3	87.19
24	3.52	24.4	3	86.65
25	3.39	24.4	3	86.37
26	3.27	24.4	3	86.1
27	3.15	24.4	3	86.07
28	3.03	24.3	3	85.93
29	2.95	24.4	3	85.56

4.5 สรุปผลการดำเนินงาน

ในส่วนของการดำเนินการออกแบบ พัฒนา และทดสอบวงจรควบคุมแบตเตอรี่ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วน คือ ก. แบตเตอรี่โมดูลจำนวน 6 ชุด ข. ระบบควบคุมลูกข่าย (Slave BMS) จำนวน 6 ชุด ค. ระบบควบคุมหลัก (Master BMS) 1 ชุด และ ง. ระบบควบคุมการจ่ายไฟ (DC/DC converter) 1 ชุด ในการออกแบบทางคณะวิจัยได้กำหนดคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชุดใหม่ตามความต้องการของผู้ใช้คือ 24 V, 3 A (ปล่อยประจุ) กระแสไฟฟ้าสำหรับประจุสูงสุด 34.7 (C/3) แอมแปร์ สำหรับประจุเร็ว (fast charge) และ 21 (C/5) แอมแปร์ สำหรับการประจุแบบปกติ (normal charge) และมีความจุไฟฟ้า 90 แอมแปร์ ชั่วโมง (107Ah usable/124.8Ah Battery Capacity)

โดยคณะวิจัยได้ออกแบบในชุดแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ แบตเตอรี่หนึ่งโมดูลประกอบไปด้วยเซลล์แบตเตอรี่ 56 เซลล์ ซึ่งมีการเชื่อมต่อแบบ 7S8P โดย 6 โมดูลถูกประกอบเป็นแบตเตอรี่ 1 ชุดที่มีความสามารถในการใช้งานตามคุณลักษณะข้างต้นที่ออกแบบไว้ โดยการจัดการแบตเตอรี่โมดูลนั้น สำหรับระบบจัดการลูกข่ายทาง คณะวิจัยพิจารณาเลือกใช้ระบบที่มีอยู่ในตลาดและได้นำมาพัฒนาต่อให้ได้ฟังก์ชั่นการทำงานที่ต้องการโดยได้ทำการเลือกใช้ SP-BMS 24V7S60A Lithium BMS และนำมาพัฒนา ระบบจัดการลูกข่ายของแบตเตอรี่โมดูลนี้มีหน้าที่หลักที่สำคัญ 4 อย่าง คือ การวัดแรงดันไฟฟ้า (meter), การเฝ้าระวัง (monitor), สมดุลย์แรงดันไฟฟ้า (balancing), และระบบป้องกัน (protection) ในที่นี่แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ จะถูกวัดและมีการทำสมดุลย์แต่ละเซลล์โดยวิธี Passive balancing cell ซึ่งจากดำเนินการทดสอบการป้องการจ่ายประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overdischarge protection) การป้องการประจุมากเกินกว่าที่กำหนด (Overcharge protection) และการทำสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าเซลล์แบตเตอรี่ (Cell balancing) ผลทดสอบพบว่าระบบจัดการลูกข่ายที่เลือกใช้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

ในส่วนของระบบควบคุมหลักถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ การเฝ้าระวัง (monitor) ระบบป้องกัน (protection) และการสื่อสารระหว่างแบตเตอรี่โมดูลและระหว่างชุดแบตเตอรี่กับระบบประจุแบตเตอรี่ เพื่อดูแรงดัน กระแส อุณหภูมิ และทำการประมวลผลแสดงระดับพลังงานที่เหลือ

ส่วนระบบควบคุมการจ่ายไฟ ทำหน้าที่ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่คงที่ตลอดเวลางานใช้งาน ผลการทดสอบระบบการจ่ายไฟ พบว่า เมื่อไม่มีโหลด และสั่งปิดระบบควบคุมการจ่ายไฟ กระแสไฟฟ้าที่ด้านขาเข้ามีค่าน้อยที่สุด แต่ไม่เท่ากับ ศูนย์ ในขณะที่เมื่อสั่งเปิดระบบควบคุมการจ่ายไฟและต่อกับโหลด กระแสไฟฟ้าที่ด้านขาเข้าจะมีค่าสูงสุด นอกจากนั้นยังพบว่า ระบบควบคุมการจ่ายไฟหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และอุปกรณ์นี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 10 แอมแปร์ เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 11 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของอุปกรณ์จะลดลง และหยุดการทำงานซึ่งเป็นการทำงานตามที่ต้องการ

บทที่ 5 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบเครื่องและระบบชาร์จ

5.1 รวบรวมข้อมูลความต้องการในการชาร์จไฟฟ้า

การชาร์จไฟฟ้าค่อนข้างเกี่ยวข้องกับผู้ใช้ ดังนั้น เพื่อให้การชาร์จไฟฟ้าสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด ทางทีมวิจัยจึงได้มีการสอบถาม และประชุมตกลงกับผู้ใช้งาน ถึงคุณสมบัติการชาร์จที่ต้องการ ในวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2558 โดยสรุปลักษณะการชาร์จไฟฟ้าสำหรับชุดแบตเตอรี่ขนาด 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ที่ผู้ใช้ต้องการ และเห็นชอบร่วมกับทางทีมวิจัย ได้แก่

ก. สามารถชาร์จได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
ข. กล่องชาร์จแบตเตอรี่จะต้องใช้งานง่าย และซ่อมบำรุงง่าย
ค. ผู้ใช้ต้องการระบบการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีออกภาคสนาม
ง. ในการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เบื้องต้นผู้ใช้ต้องการให้เป็นการชาร์จเร็ว ซึ่งมีระยะเวลาในการชาร์จไม่เกิน 2 ชั่วโมง นั่นคือ กระแสประจุจะต้องสูงกว่า 1C หรือ มากกว่า 90 แอมแปร์ แต่การจัดหาอุปกรณ์การชาร์จที่มีขายในท้องตลาดสำหรับกระแสสูงๆนี้ ไม่สามารถทำได้ จะต้องเป็นการออกแบบ และจัดทำพิเศษเฉพาะ ทำให้มีราคาสูง และการซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ทำได้ยาก รวมถึงจะมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ทีมวิจัยจึงได้เสนอให้มี 2 ฟังก์ชัน คือ การชาร์จเร็ว ด้วยระยะเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง และระยะเวลาในการชาร์จปกติไม่เกิน 6 ชั่วโมง ซึ่งผู้ใช้เห็นชอบด้วย

จากข้อมูลชุดแบตเตอรี่ และความต้องการของในการชาร์จไฟฟ้า ทีมวิจัยได้ออกแบบระบบชาร์จให้แยกออกมาจากกล่องแบตเตอรี่ โดยระบบชาร์จทั้งหมดจะติดตั้งในกล่องชาร์จ ที่สามารถชาร์จชุดแบตเตอรี่ได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ระบบชาร์จที่ออกแบบนี้จะแตกต่างจากรูปแบบที่นำเสนอในข้อเสนอโครงการ โดยแต่เดิมระบบการชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกออกแบบให้บรรจุอยู่ในกล่องแบตเตอรี่ ซึ่งจะใช้เวลาในการชาร์จนาน เพราะกระแสประจุสูงสุดเท่ากับ C/30 หรือ 3 แอมแปร์ เท่านั้น อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของกระแสชาร์จของตัวอุปกรณ์ รวมถึงการคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากการชาร์จภายในกล่องแบตเตอรี่ ดังนั้นเพื่อให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้เร็วขึ้น และความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะประจุไฟฟ้าภายในกล่องแบตเตอรี่ลดลง ระบบการชาร์จนี้จึงถูกแยกออกมาจากกล่องแบตเตอรี่ และติดตั้งในกล่องชาร์จแบตเตอรี่แทน อย่างไรก็ตามข้อเสียเปรียบของระบบชาร์จแบบใหม่นี้ คือการต้องนำกล่องชาร์จไปในการออกภาคสนามด้วย

5.2 การออกแบบระบบการชาร์จและการคัดเลือกอุปกรณ์

จากข้อมูลความต้องการในการชาร์จไฟฟ้าที่ได้รวบรวม ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การออกแบบระบบชาร์จ รายละเอียด และการทดสอลวัสดุอุปกรณ์สำคัญที่ต้องใช้ เพื่อให้สามารถชาร์จได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงสามารถเลือกฟังก์ชันการชาร์จระหว่างการชาร์จเร็ว (ระยะเวลาการชาร์จ 4 ชั่วโมง) หรือ ชาร์จแบบปกติ (ระยะเวลาการชาร์จ 6 ชั่วโมง) สำหรับการชาร์จจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

5.2.1 รูปแบบการชาร์จ

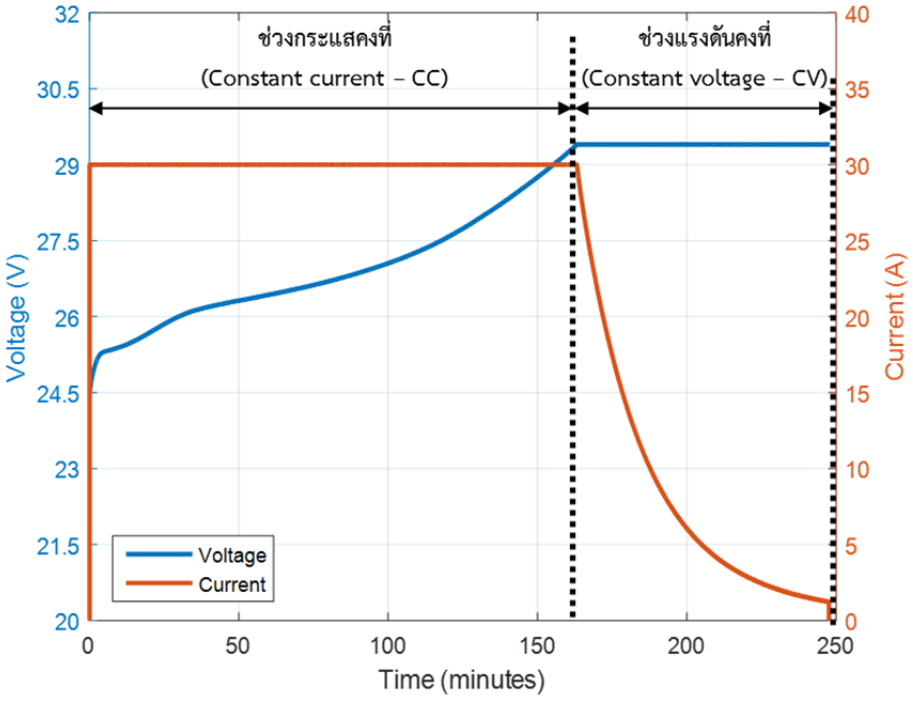
รูปแบบการชาร์จด้วยระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนคือ แบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV, Constant Current/Constant Voltage)

กล่าวคือ ในช่วงแรกจะประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยมีขนาดตามฟังก์ชันการชาร์จที่เลือก แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้าย (Charge voltage) จากนั้นจะประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้าย กระแสไฟฟ้าที่ประจุเซลล์แบตเตอรี่จะลดลงจนถึงค่าที่กำหนด โดยประมาณเท่ากับ C/50 จึงหยุดการประจุ รูปแบบการชาร์จนี้จะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมการชาร์จ เพื่อความปลอดภัย และเหมาะสมกับชุดแบตเตอรี่

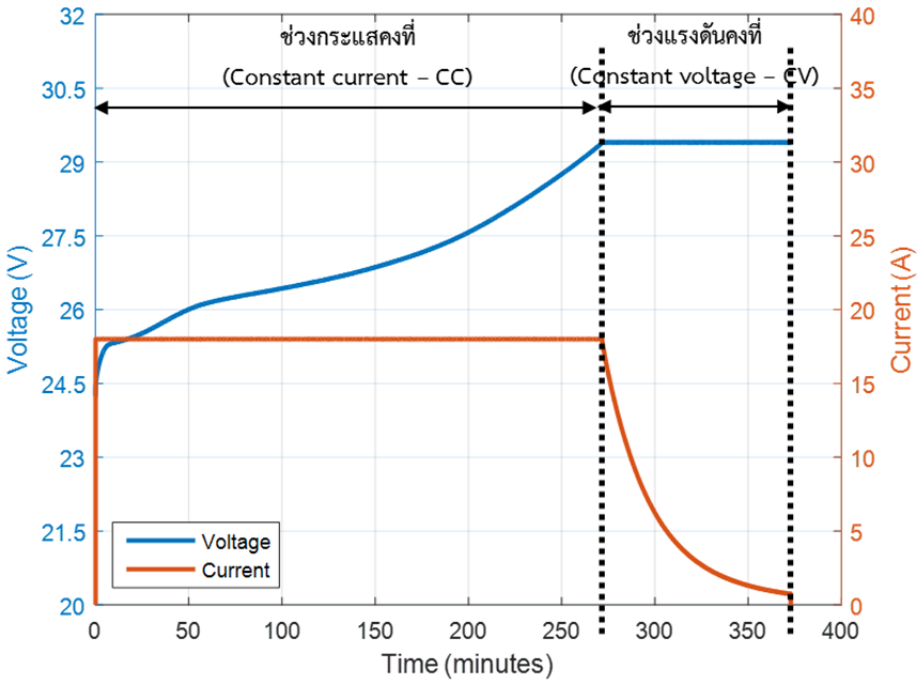
จากข้อมูลเซลล์แบตเตอรี่ที่พิจารณาในบทที่ 3 ทั้ง 3 ยี่ห้อ ชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 24 โวลต์ จะประกอบด้วย เซลล์แบตเตอรี่ต่ออนุกรมกัน 7 เซลล์ และขนานกันประมาณ 48 เซลล์ ดังนั้นรูปแบบการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่สำหรับชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 0.1 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้ายของเซลล์แบตเตอรี่เท่ากับ 4.2 โวลต์ ดังนั้น ชุดแบตเตอรี่ จะมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้ายเท่ากับ 29.4 โวลต์ (7x4.2 โวลต์) และค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดเพื่อหยุดการประจุ C/50 เท่ากับ 1.8 แอมแปร์ ส่วนกระแสประจุในช่วงแรกที่ประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ จะขึ้นอยู่กับลักษณะฟังก์ชันการชาร์จ ซึ่งมี 2 ฟังก์ชัน ดังนี้

ก. การชาร์จเร็ว (Fast charge): กระแสประจุ เท่ากับ C/3 ในช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่ หรือ ใช้เวลารวมในส่วนการชาร์จในส่วน CV ด้วยจะใช้ในการชาร์จประมาณ 4 ชั่วโมง สำหรับชุดแบตเตอรี่ขนาดความจุ 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง กระแสประจุสูงสุดเท่ากับ 30 แอมแปร์

ข. การชาร์จแบบปกติ: กระแสประจุ เท่ากับ C/5 ในช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่ หรือ ใช้เวลารวมในส่วนการชาร์จในส่วน CV ด้วยจะ ใช้เวลาในการชาร์จประมาณไม่เกิน 6 ชั่วโมง สำหรับชุดแบตเตอรี่ขนาดความจุ 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง กระแสประจุสูงสุดเท่ากับ 18 แอมแปร์



(ก)

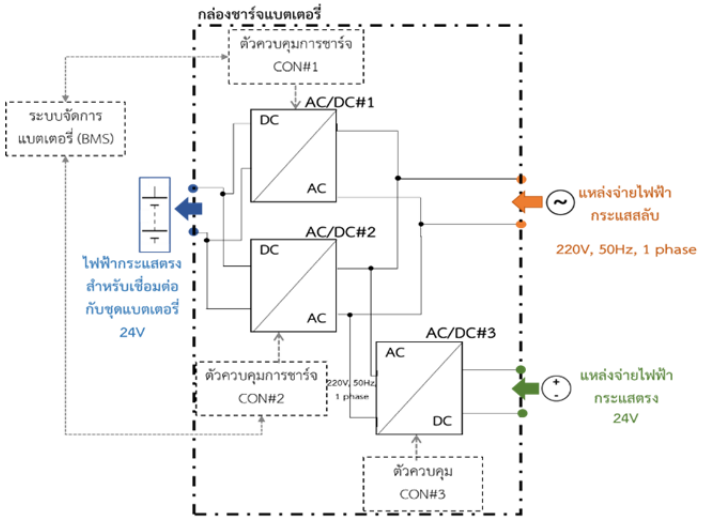


(ข)

รูปที่ 0.1 ตัวอย่างรูปแบบการชาร์จแบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ สำหรับชุดแบตเตอรี่ 90 แอมแปร์ต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 24 โวลต์ (ก) ฟังก์ชันการชาร์จเร็ว (ข) ฟังก์ชันการชาร์จปกติ

5.2.2 ระบบการชาร์จรุ่นที่ 1

จากความต้องการของผู้ใช้งาน สามารถออกแบบระบบการชาร์จรุ่นที่1.1 ได้ดังรูปที่ 0.2 ซึ่งประกอบด้วย ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง (AC/DC) และตัวควบคุม ทั้งหมด 3 ชุด โดย ตัวแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และตัวควบคุม ชุดที่ 1 และ 2 (AC/DC#1+CON#1 และ AC/DC#2+CON#2) จะทำหน้าที่แปลงระบบกระแสไฟฟ้า และควบคุมรูปแบบการชาร์จให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด เพื่อความปลอดภัย และเหมาะสมกับชุดแบตเตอรี่ ส่วนตัวแปลงและชุดควบคุม ชุดที่ 3 (AC/DC#3+CON#3) จะทำหน้าแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเหมาะสมกับ ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าตัวที่ 2 หรือ ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต 1 เฟส



รูปที่ 0.2 ระบบการชาร์จรุ่นที่1.1

5.2.1.1 ระบบการชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC system)

ระบบการชาร์จนี้สำหรับการชาร์จที่โรงเก็บแบตเตอรี่ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น จากรูปที่ 0.2 พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกถ่ายโอนไปยังชุดแบตเตอรี่โดยผ่านตัวแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ตัวที่ 1 หรือ 2 (AC/DC#1 หรือ AC/DC#2) ซึ่งจะควบคุมรูปแบบการชาร์จด้วย ตัวควบคุม 1 และ 2 ตามลำดับ (CON#1 หรือ CON#2) นั่นคือ การชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามารถเลือกฟังก์ชันการชาร์จได้ อย่างไรก็ตามทีมวิจัยได้แนะนำผู้ใช้ว่าควรชาร์จด้วยฟังก์ชั่นนี้เป็นปกติ ถ้าไม่จำเป็นไม่ควรใช้ฟังก์ชันการชาร์จเร็ว เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

5.2.1.2 ระบบการชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC system)

จากรูปที่ 0.2 การชาร์จด้วยระบบนี้จะรับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และถูกแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยตัวแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ตัวที่ 3 (AC/DC#3) และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีขนาดเท่ากับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต โดยตัวควบคุมตัวที่ 3 (CON#3) หลังจากนั้นพลังงานนี้จะถูกส่งผ่านไปยังชุดแบตเตอรี่โดยผ่านทาง ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ตัวที่ 2 (AC/DC#2) โดยควบคุมรูปแบบการชาร์จด้วย ตัวควบคุม 2 (CON#2)

ลักษณะการชาร์จด้วยจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ไม่สามารถเลือกฟังก์ชัน หรือ ระยะเวลาในการชาร์จได้ จะชาร์จด้วยฟังก์ชันปกติ ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงเท่านั้น ไม่สามารถทำการชาร์จเร็วได้ และ ไม่สามารถทำการประจุไฟฟ้าพร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าไปพร้อมกันได้

5.2.1.3 การคัดเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน

ในการจัดหาอุปกรณ์นั้น ตัวแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ 1 (AC/DC#1) และ ตัวควบคุมการชาร์จที่ 1 (CON#1) ในรูปที่ 0.2 จะรวมกันเป็น เครื่องชาร์จ A (Charger A) สำหรับฟังก์ชันการชาร์จเร็ว และตัวแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ 2 (AC/DC#2) และตัวควบคุมการชาร์จที่ 2 (CON#2) จะรวมกันเป็น เครื่องชาร์จ B (Charger B) สำหรับฟังก์ชันการชาร์จแบบปกติ ซึ่งเครื่องชาร์จทั้ง 2 จะต้องมีคุณสมบัติตามฟังก์ชันการชาร์จ ดังนี้

ก. การชาร์จเร็ว (Fast charge): กระแสประจุ เท่ากับ C/3 หรือ ใช้เวลาในการชาร์จประมาณ 3-4 ชั่วโมง กระแสประจุสูงสุดเท่ากับ 30 แอมแปร์ ดังนั้น ดังนั้นเครื่องชาร์จ A จะต้องรองรับกระแสได้อย่างน้อย 30 แอมแปร์

ข. การชาร์จแบบปกติ: กระแสประจุ เท่ากับ C/5 หรือ ใช้เวลาในการชาร์จประมาณ 5-6 ชั่วโมง กระแสประจุสูงสุดเท่ากับ 18 แอมแปร์ ดังนั้น เครื่องชาร์จ B จะต้องรองรับกระแสได้อย่างน้อย 18 แอมแปร์

จากข้อมูลลักษณะฟังก์ชันการชาร์จที่ระบุดังกล่าวข้างต้น จึงได้ทำการจัดหาเครื่องชาร์จ A และ B มีจำหน่ายสำเร็จรูปทั่วไปในท้องตลาดของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้สามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องชาร์จยี่ห้อต่างๆ ด้วยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- Output specification: Boost charge voltage, Float charge voltage, Output current, etc.
- Input specification: Voltage range, Frequency range, Efficiency, etc.
- Protection: Over voltage, over temperature, etc.
- Function: Remote control, Fast charge, etc.
- Environment: Working temperature, Working humidity, vibration, etc.
- Safety & EMC: Safety standards, Withstand voltage, Isolation resistance, etc.

ตารางที่ 0.1 การเปรียบเทียบเครื่องชาร์จสำหรับการชาร์จเร็ว 4 ยี่ห้อ

Specifications		Fast Charge			
		Mean Well PB-1000-24	WhisperPower 24V/30A	SIC Divisione Elettronica EPC40002	Xantrex TRUECHARGE2 30
Output	Boost charge voltage	28.8 V	28.4 - 31V	28.0 - 28.6 V	28.4 - 31.0 V
	Recommended battery capacity	120 ~ 350 Ah	n/a	450 Ah	n/a
	Battery type	Open & Sealed Lead Acid, Li-ion Battery (with 2/3 state selection)	Open Lead Acid, AGM, GEL, Lithium	Open Lead Acid, GEL	Flooded, AGM, GEL, Lead-calcium batteries
	Output current	34.7 A	30A (Max)	30A	30 A
	Leakage current from battery (Typ.)	<1mA	<2mA (Parasitic current)	n/a	n/a
Input	Voltage range	91 ~ 264 AC, 127 ~ 370 VDC	90 - 265 VAC	230 VAC ± 10%	90 - 265 VAC
	Efficiency (Typ.)	88%	>82%	90%	>80%
Protection	Over voltage / Over charge	32 ~ 35 V	n/a	n/a	n/a
		✓ (re-power on to recover)	✓	n/a	✓
	Over temperature	✓(recovers automatically after temperature goes down)	✓	n/a	✓
	Short circuit	✓	✓	✓	n/a
	Reverse polarity	✓	✓	n/a	✓
Environment	Working temperature	-20 ~ +60 °C (refer to "Derating curve")	-20 ~ 60 °C (refer to "Derating curve")	-10 ~ 45 °C	0 ~ 60 °C
	Vibration	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1 cycle, 60 min. each along X, Y, Z axes	n/a	n/a	n/a
	Ingress Protection	n/a	IP32	IP225	IP32
Safety & EMC	Safety standards	✓	✓	n/a	✓
	Withstand voltage	✓	n/a	n/a	n/a
	Isolation resistance	✓	n/a	n/a	n/a
	EMC emission	✓	✓	n/a	CE marked
	EMC immunity	✓	n/a	n/a	CE marked
Others	Mean time between failures (MTBF)	127.4K hrs min., MIL-HDBK-217F (25°C)	n/a	n/a	n/a
	Dimension (LxWxH)	300 x 184 x 70 mm	356 x 206 x 99 mm	330 x 230 x 80 mm	340 x 170 x 90 mm
	Packing	3.5 kg; 4 pcs/15 Kg/ 1.83 CUFT	4.0 kg	2.467 kg / 6.072 litres	4.5 kg

ตารางที่ 0.2 การเปรียบเทียบเครื่องชาร์จสำหรับการชาร์จปกติ 4 ยี่ห้อ

Specifications		Normal Charge	
		Mean Well PB-600-24	Xantrex TRUECHARGE2 20
Output	Boost charge voltage	28.8 V	28.4 - 31.0 V
	Recommended battery capacity	70 - 210 Ah	80 Ah
	Battery type	Open & Sealed Lead Acid, Li-ion Battery (with 2/3 state selection)	Flooded, AGM, GEL, Lead-calcium batteries
	Output current	21 A	20 A
	Leakage current from battery (Typ.)	1mA	n/a
Input	Voltage range	90 ~ 264 AC, 127 ~ 370 VDC	90 - 265 VAC
	Efficiency (Typ.)	87%	>80%
Protection	Over voltage / Over charge	32 ~ 35 V	n/a
		✓ (re-power on to recover)	✓
	Over temperature	✓ (recovers automatically after temperature goes down)	✓
	Short circuit	n/a	n/a
	Reverse polarity	n/a	✓
Environment	Working temperature	-20 ~ +60 ℃ (refer to output load derating curve)	0 ~ 60 ℃
	Vibration	10 ~ 500Hz, 2G 10min./1 cycle, 60 min. each along X, Y, Z axes	n/a
	Ingress Protection	n/a	IP32
Safety & EMC	Safety standards	✓	✓
	Withstand voltage	✓	n/a
	Isolation resistance	✓	n/a
	EMI conduction & radiation	✓	n/a
	Harmonic current	✓	n/a
	EMC emission	n/a	CE marked
	EMC immunity	✓	CE marked
Others	Mean time between failures (MTBF)	135.6K hrs min., MIL-HDBK-217F (25℃)	n/a
	Dimension (LxWxH)	230 × 158 × 67 mm	250 × 170 × 70 mm
	Packing	2.2 kg; 6 pcs/14.2 Kg/ 1.76 CUFT	2.2 kg

เครื่องชาร์จ A (การชาร์จเร็ว) ทั้งหมด 4 ยี่ห้อ Mean Well, WhisperPower, SIC Divisione Elettronica, และ Xantrex ได้ถูกเปรียบเทียบ จากตารางที่ 0.1 คณะวิจัยได้พิจารณาเลือก Mean Well รุ่น PB-1000-24 (ดังรูปที่ 0.3 (ก)) เนื่องจากมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่ายี่ห้ออื่น รวมถึงมีการทดสอบรับรองความปลอดภัย จากการเปรียบเทียบเครื่องชาร์จ B (การชาร์จปกติ) ทั้งหมด 2 ยี่ห้อ ได้แก่ Mean Well และ Xantrex ดัง

ตารางที่ 0.2 คณะวิจัยได้พิจารณาเลือกใช้เครื่องชาร์จ ยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB-600-24 (ดังรูปที่ 0.3 (ข)) เนื่องจากมีกระแสสูงกว่า และสามารถนำมาปรับใช้กับการชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้



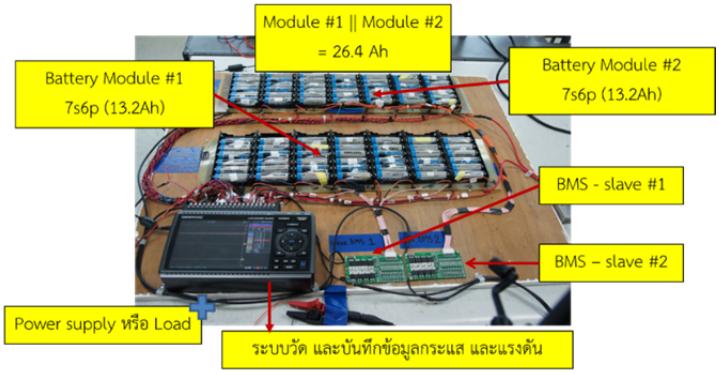
(ก) (ข)

รูปที่ 0.3 เครื่องชาร์จที่พิจารณาเลือก (ก) ยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB1000-24 (การชาร์จเร็ว) (ข) ยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB600-24 (การชาร์จปกติ)

5.2.1.4 การทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ภายใน

เครื่องชาร์จแบบปกติ และแบบชาร์จเร็ว PB-600-24 และ PB1000-24 ที่ได้พิจารณาเลือกในหัวข้อ 5.2.1.3 ได้ถูกทดสอบเบื้องต้น ก่อนดำเนินการประกอบและพัฒนาเป็นชุดชาร์จ โดยเครื่องชาร์จปกติยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB-600-24 (ดังรูปที่ 0.3 (ข)) ได้ถูกทดสอบกับเซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama2200mAh ที่ต่อเชื่อมกันแบบ 7S6P ขนานกัน 2 ชุด (ระบบจัดการแบตเตอรี่ – BMS 2 ตัว) ดังรูปที่ 0.4 โดยวัดแรงดันแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ แรงดันรวมของแต่ละชุดแบตเตอรี่ กระแส และอุณหภูมิ ทุกๆ 200 มิลลิวินาที

ในที่นี้ใช้ เซลล์แบตเตอรี่ยี่ห้อ Toriyama2200mAh เนื่องจากต้องการทดสอบเพื่อพิสูจน์เบื้องต้นว่าเครื่องชาร์จที่พิจารณาเลือกสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยใช้เซลล์แบตเตอรี่ที่ทางทีมวิจัยมีอยู่แล้ว รวมถึงมีคุณสมบัติด้านแรงดันเหมือนกับเซลล์แบตเตอรี่ Toriyama2600mAh ที่เลือกใช้

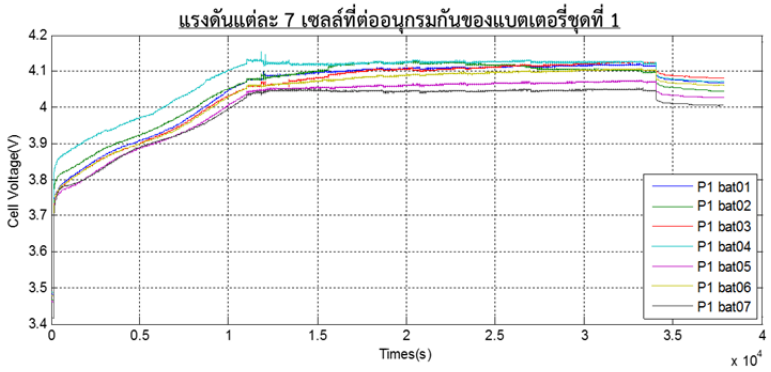


รูปที่ 0.4 การทดสอบเครื่องชาร์จ

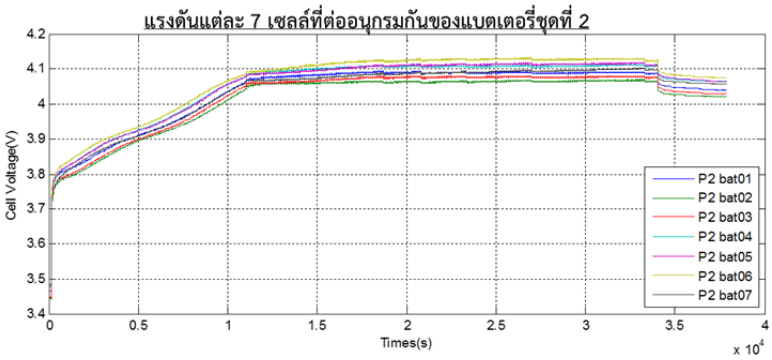
จาก รูปที่ 0.5(ค) พบว่า ในช่วงแรกของการชาร์จด้วยกระแสคงที่เท่ากับ 21 แอมแปร์ และเมื่อแรงดันรวมของชุดแบตเตอรี่เท่ากับ 28.4 โวลต์ จะเข้าสู่การชาร์จแบบแรงดันคงที่ กระแสชาร์จจะค่อยๆ ลดลง แรงดัน

รวมของชุดแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และหยุดการชาร์จเมื่อกระแสเท่ากับ 2 แอมแปร์ อุณหภูมิขณะชาร์จสูงสุดเท่ากับ 32.5 องศาเซลเซียส (ณ อุณหภูมิห้องเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส) นั่นคือสามารถสรุปได้ว่า เครื่องชาร์จที่พิจารณาเลือกสามารถใช้งานได้ แต่เนื่องจากไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของการชาร์จของเครื่องชาร์จได้ แรงดันสูงสุดของชุดแบตเตอรี่จึงเท่ากับ 28.4 โวลต์ นั่นคือถือว่าชาร์จแบตเตอรี่ไม่เต็ม แรงดันแต่ละเซลล์แบตเตอรี่จะอยู่ในช่วง 4.05-4.12 โวลต์ รูปที่ 5.4 (ก) และ (ข) ซึ่งยังไม่อยู่ในช่วงของการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่ ซึ่งควรจะทำงานเมื่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการชาร์จลักษณะนี้ถือว่ามีความปลอดภัย จะไม่เกิดการ Overcharge ของแบตเตอรี่ และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่อีกด้วย

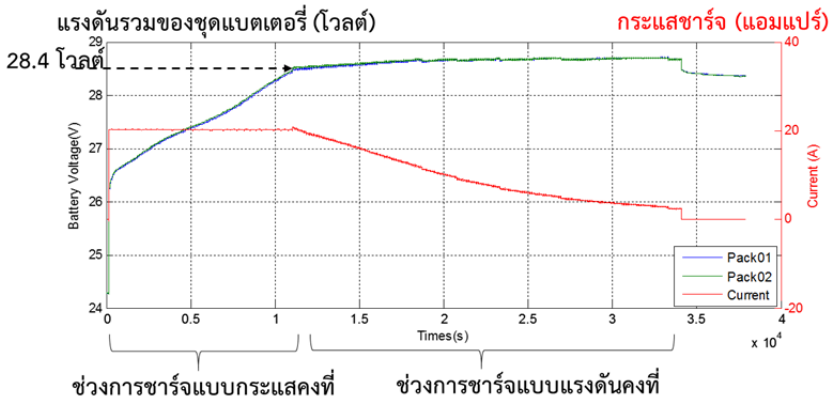
เครื่องชาร์จเร็ว Mean Well รุ่น PB-1000-24 ได้ถูกทดสอบในเบื้องต้นว่าทำงานได้ โดยมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับ การทดสอบเครื่องชาร์จ PB-600-24 นั่นคือ ไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของการชาร์จของเครื่องชาร์จได้ นั่นคือถือว่าชาร์จแบตเตอรี่ไม่เต็ม



(ก)

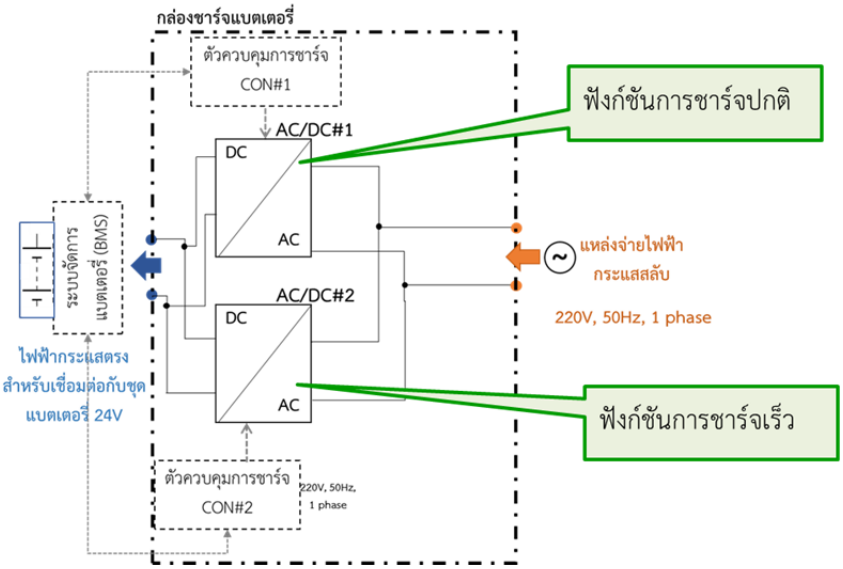


(ข)



(ค)

รูปที่ 0.5 ผลการทดสอบเครื่องชาร์จยี่ห้อ Mean Well รุ่น PB600-24 (การชาร์จปกติ) (ก) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 1 (ข) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 2 (ค) แรงดันรวมของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จ



รูปที่ 0.6 ระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.2

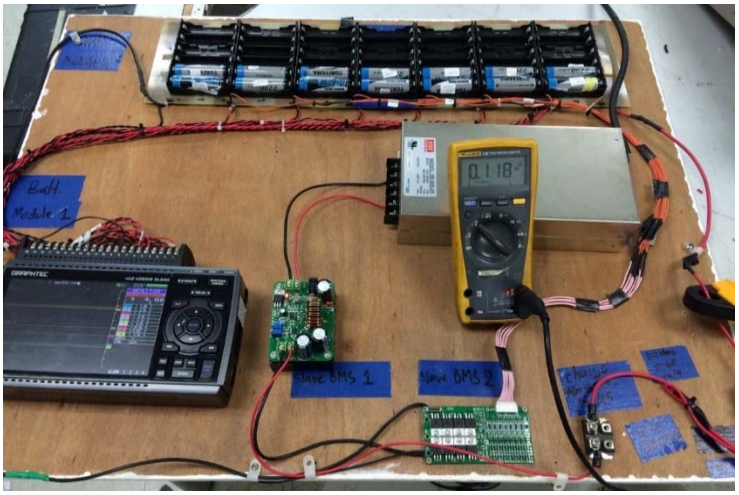
เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ผู้ใช้ต้องการนำไปทดสอบในภาคสนาม เครื่องชาร์จรุ่นที่ 1 (ระบบการชาร์จรุ่นที่1) นี้ จึงไม่มีระบบการชาร์จแบบไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.1 ดังรูปที่ 0.2 จึงถูกปรับเป็นระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.2 ดังรูปที่ 0.6 โดยสามารถชาร์จได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น ด้วย 2 ฟังก์ชันการชาร์จ โดยระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.2 นี้ได้ถูกประกอบเพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องชาร์จรุ่นที่ 1 ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.3

อย่างไรก็ตาม ระบบชาร์จจะถูกพัฒนาเพิ่มเติม เป็น ระบบการชาร์จรุ่นที่ 2 เพื่อให้สามารถชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เต็ม และระบบจัดการแบตเตอรี่สามารถทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันของแบตเตอรี่ให้เท่ากันได้ (เพิ่มแรงดันแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงของการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่) โดยจะต้องใช้อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ที่สามารถทำงานแบบ CC-CV ได้เพิ่มเติม ดังรายละเอียดในหัวข้อ 5.2.3

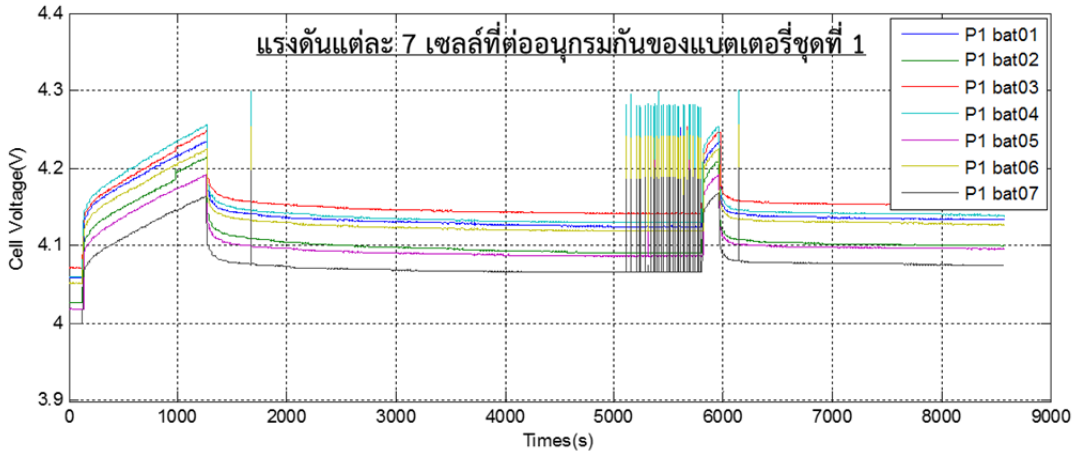
5.2.3 ระบบการชาร์จรุ่นที่ 2

จากผลการทดสอบเครื่องชาร์จ Mean Well รุ่น PB600-24 และ รุ่น PB1000-24 พบว่าไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เต็ม และแรงดันแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ไม่อยู่ในช่วงของการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่ ดังนั้นในการแก้ปัญหา เพื่อให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เต็ม และระบบจัดการแบตเตอรี่สามารถทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันของแบตเตอรี่ให้เท่ากันได้ จะต้องใช้อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ที่สามารถทำงานแบบ CC-CV ได้ ดังนั้นในเบื้องต้นจึงลองทดสอบชุดแบตเตอรี่ กับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ดังรูปที่ 0.7 ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 0.8 (ค) จะเห็นว่ากระแสชาร์จจะคงที่เท่ากับ 6 แอมแปร์ (เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์) ในช่วงแรก แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีเซลล์ใดเซลล์หนึ่งมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 4.225 โวลต์ ในรูปที่ 0.8 (ข) ระบบจัดการแบตเตอรี่จะทำงาน และเกิดการตัดต่อระหว่างอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าและชุดแบตเตอรี่ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงของการชาร์จแบบ

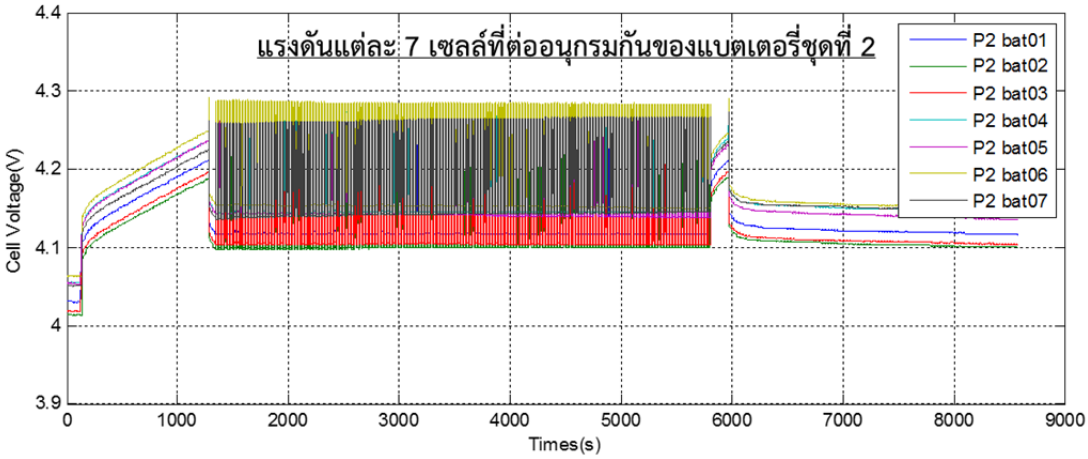
แรงดันคงที่ กระแสเฉลี่ยใน 1 วินาที จะมีค่าน้อย แรงดันรวมของแบตเตอรี่ชุดที่ 2 จะค่อนข้างคงที่ที่ 29 โวลต์ ดังรูปที่ 0.9 นั่นคือในช่วงของการชาร์จแบบกระแสคงที่ด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ระบบจัดการแบตเตอรี่จะเป็นตัวควบคุม อุณหภูมิขณะชาร์จสูงสุดเท่ากับ 36.5 องศาเซลเซียส ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้แบตเตอรี่ถูกชาร์จเต็ม และระบบจัดการแบตเตอรี่ทำงานอย่างไรก็ตามการชาร์จด้วยอุปกรณ์นี้จะต้องมีการออกแบบระบบควบคุมการชาร์จเพิ่มเติม มีการป้องกันการ Over charge รวมถึงการจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย



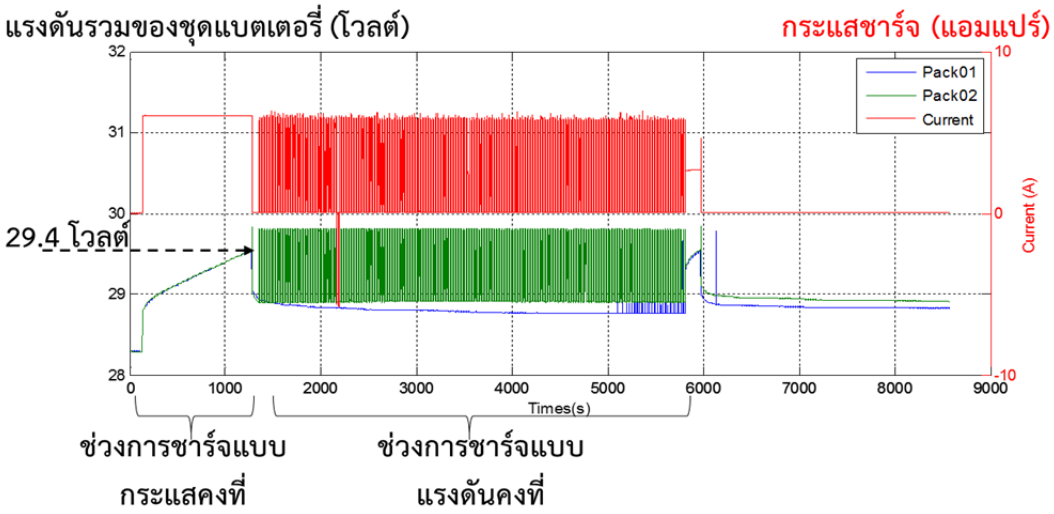
รูปที่ 0.7 การทดสอบการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)



(ก)

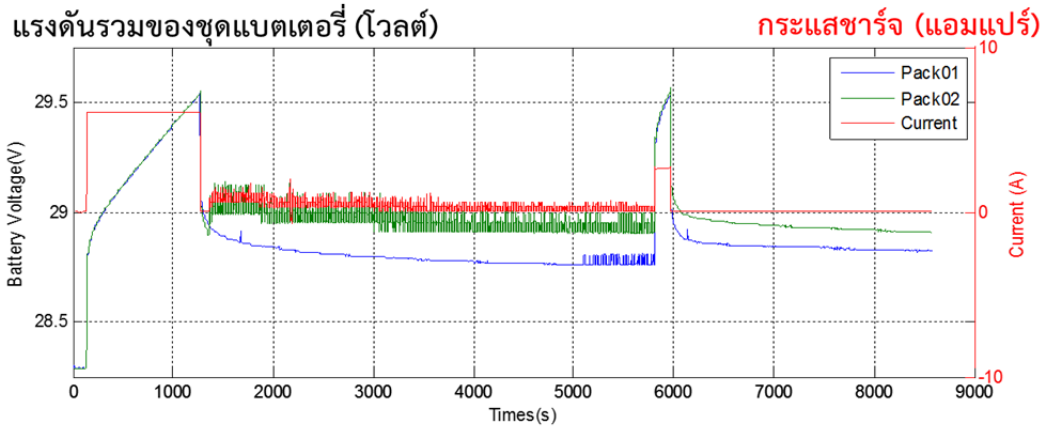


(ข)



(ค)

รูปที่ 0.8 ผลการทดสอบการชาร์จด้วย อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (ก) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 1 (ข) แรงดันแต่ละเซลล์ของ 7 เซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของแบตเตอรี่ชุดที่ 2 (ค) แรงดันรวมของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จ



รูปที่ 0.9 แรงดันรวมเฉลี่ยของแบตเตอรี่แต่ละชุด และกระแสชาร์จเฉลี่ย จากการทดสอบการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แต่เนื่องจากการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผลกระทบต่ออายุการใช้งาน และความปลอดภัย ดังนั้นในการออกแบบระบบการชาร์จรุ่นที่2 นี้ จะไม่เปลี่ยนจาก เครื่องชาร์จ Mean Well รุ่น PB600-24 และ รุ่น PB1000-24 เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แต่จะใช้อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับ เครื่องชาร์จแบบฟังก์ชันการชาร์จปกติ (PB600-24) ในการทำงานฟังก์ชันใหม่อีกฟังก์ชันหนึ่ง นั่นคือ ฟังก์ชันการซ่อมบำรุง (Maintenance charge) โดยมีหลักการทำงานคือ ในช่วงแรงดันของชุดแบตเตอรี่ต่ำกว่า 28.8 โวลต์ การชาร์จจะถูกควบคุมโดย เครื่องชาร์จ PB600-24 และชาร์จด้วย อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในช่วงแรงดันของชุดแบตเตอรี่ระหว่าง 28.8-29 โวลต์ โดยใช้เวลาในการชาร์จด้วยอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 3 ชั่วโมง เพื่อให้วงจร balancing ทำการปรับสมดุลแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ในโมดูล

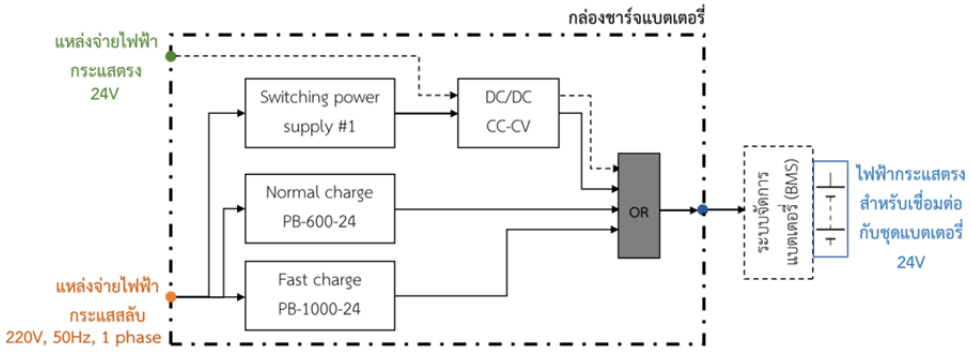
โดยสรุประบบการชาร์จรุ่นที่ 2 สามารถชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 0.10 โดยการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย 3 ฟังก์ชันการชาร์จ ดังนี้

ก. การชาร์จเร็ว (Fast charge): กระแสประจุ เท่ากับ C/3 ใช้ในการชาร์จประมาณ 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชาร์จ PB-1000-24 ซึ่งมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 34.7 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่ / แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)

ข. การชาร์จแบบปกติ (Normal charge): กระแสประจุ เท่ากับ C/5 ใช้เวลาในการชาร์จประมาณไม่เกิน 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชาร์จ PB-600-24 ซึ่งมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 21 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่ / แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)

ค. การชาร์จในโหมดซ่อมบำรุง (Maintenance charge): สำหรับการชาร์จเมื่อต้องการให้วงจร balancing ทำการปรับสมดุลแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ในโมดูล โดยมีกระแสประจุ เท่ากับ C/5 ในช่วงชาร์จด้วยกระแสคงที่ หรือ ใช้เวลารวมในส่วนการชาร์จในส่วน CV ด้วยจะ ใช้เวลาในการชาร์จประมาณไม่เกิน 10 ชม. ด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วนคือ

1. เครื่องชาร์จ PB-600-24 ซึ่งมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 21 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)
2. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC power supply) ที่ประกอบด้วย ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงตัว (Switching power supply) และวงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC) ที่สามารถทำงานในโหมดกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ได้ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage) ซึ่งมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 3 แอมแปร์



รูปที่ 0.10 ระบบการชาร์จรุ่นที่2

สำหรับการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับการชาร์จในพื้นที่ภาคสนาม โดยกระแสประจุเท่ากับ 3 แอมแปร์ ด้วย วงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC) ซึ่งมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 3 แอมแปร์, รองรับช่วงแรงดันไฟฟ้า 28.8-29.4 โวลต์ และสามารถทำงานในโหมดกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ได้ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)

5.3 การพัฒนา และทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่1

เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลา และการชาร์จแบบไฟฟ้ากระแสตรงยังไม่มีความจำเป็นในเบื้องต้นของการทดสอบชุดแบตเตอรี่ ในเบื้องต้นทีมวิจัยจึงพิจารณาเลือกพัฒนาระบบการชาร์จรุ่นที่ 1.2 ดังรูปที่ 0.6 เพื่อให้ได้เครื่องชาร์จรุ่นที่ 1 สำหรับให้ผู้ใช้ได้ทดลองใช้ร่วมกับต้นแบบชุดแบตเตอรี่ก่อน โดยจะสามารถชาร์จได้จากระบบการชาร์จแบบไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น ส่วนประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในสำหรับกล่องชาร์จรุ่นที่ 1 ได้แก่

1. เครื่องชาร์จ รุ่น PB-600-24 โดยมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 21 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)
2. เครื่องชาร์จ รุ่น PB-1000-24 โดยมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 34.7 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV Constant Current/ Constant Voltage)
3. ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC) เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรควบคุมการทำงาน
4. วงจรควบคุมการทำงาน

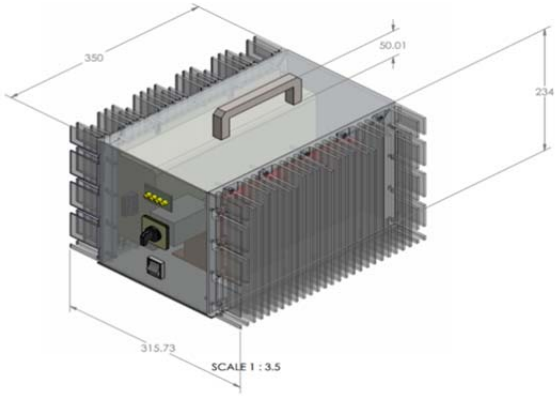
เนื่องจากระบบชาร์จ และอุปกรณ์ภายในกล่องชาร์จได้ถูกออกแบบไว้เบื้องต้นแล้วดังรายละเอียดในหัวข้อ 5.2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบกล่องชาร์จภายนอกแบบต่างๆ ฟังก์ชั่นการทำงาน และการพัฒนาและทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่1

5.3.1 การออกแบบกล่องชาร์จ

5.3.1.1 กล่องชาร์จรุ่นที่ 1.1

จากความต้องการของผู้ใช้งาน ทีมวิจัยจะออกแบบให้การใช้งานกล่องชาร์จนี้เรียบง่ายที่สุด โดยมีลักษณะภายนอก ดังรูปที่ 0.11 เบื้องต้นออกแบบให้ใกล้เคียงกับกล่องชาร์จเดิม (กล่องชาร์จสำหรับชุดแบตเตอรี่นิเกิลแคดเมียม) พร้อมทั้งมีที่จับเพื่อให้เคลื่อนย้ายได้สะดวก และปุ่มสวิตช์เปิด-ปิดระบบชาร์จ นอกจากนี้จะมีไฟแสดงสถานะของการชาร์จชุดแบตเตอรี่ทั้งหมด 4 สถานะคือ กล่องชาร์จทำงาน (power on),

กำลังชาร์จ, ชาร์จได้ระดับพลังงาน 50% ของพลังงานทั้งหมด และ ชาร์จเต็ม/แบตเตอรี่เต็มอยู่แล้วไม่ต้องชาร์จ โดยจะไม่มีหน้าจอแสดงผล และจากการออกแบบให้มี 2 ฟังก์ชันการชาร์จ ที่หน้ากล่องชาร์จจึงมีปุ่มสำหรับเลือกฟังก์ชันการชาร์จที่ต้องการ สำหรับระบบการชาร์จด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC system) เท่านั้น



รูปที่ 0.11 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่ 1.1

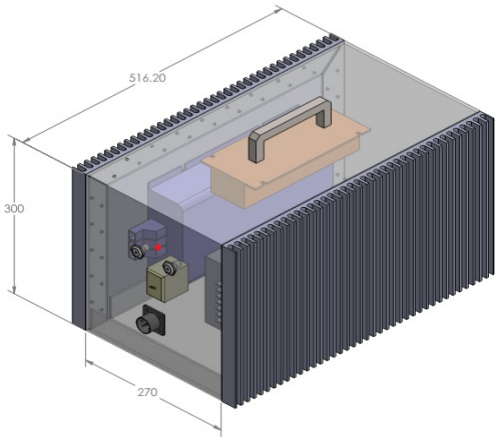
วัสดุอุปกรณ์สำหรับภายนอกกล่องชาร์จ ได้แก่

ก. กล่องชาร์จ พร้อมอุปกรณ์ระบายความร้อน (Heatsink)
ข. สวิตซ์เปิด-ปิดกล่องชาร์จ (SW Power)
ค. Selector
ง. LED
จ. ที่จับ (Handle)
ฉ. หัวต่อสำหรับประจุชุดแบตเตอรี่ (O/P VDC)
ช. หัวต่อสำหรับต่อเชื่อมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (I/P 220VAC)
ซ. หัวต่อสำหรับต่อเชื่อมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (I/P VDC)
ฌ. สายชาร์จสำหรับเชื่อมต่อกล่องแบตเตอรี่กับกล่องชาร์จ

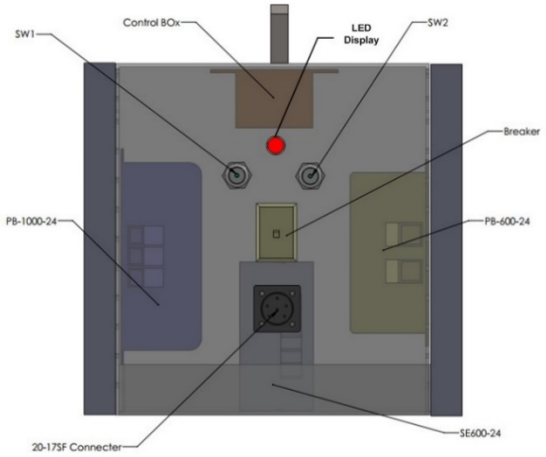
จากการสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้งาน ได้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่าต้องการให้กล่องชาร์จสามารถกันน้ำได้ และทีมวิจัยไม่สามารถจัดหา Selector switch ที่ผ่าน MIL standard ได้ จึงทำการเปลี่ยน Selector switch เป็น Push button switch ในรุ่นที่ 1.2

5.3.1.2 การออกแบบกล่องชาร์จรุ่นที่1.2 (ดังรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2)

เนื่องจากผู้ใช้มีความต้องการให้กล่องชาร์จสามารถกันน้ำได้ รวมถึงวัสดุอุปกรณ์บางส่วนของกล่องชาร์จรุ่นที่1.1 ไม่สามารถจัดหาได้ตามต้องการ ทีมวิจัยจึงได้ออกแบบกล่องชาร์จใหม่ เป็นกล่องชาร์จรุ่นที่ 1.2 ดังรูปที่ 0.12 และ รูปที่ 0.13 ซึ่งมีขนาดกว้าง 270 มิลลิเมตร ยาว 516.20 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 0.12 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่1.2



รูปที่ 0.13 ส่วนประกอบกล่องชาร์จแบตเตอรี่ รุ่นที่1.2

วัสดุอุปกรณ์สำหรับภายนอกกล่องชาร์จ ได้แก่

ก. กล่องชาร์จ พร้อมอุปกรณ์ระบายความร้อน (Heatsink)

ข. สวิตซ์เปิด-ปิดกล่องชาร์จ (Breaker)

ค. Push button switch 2 ตัว สำหรับเลือกฟังก์ชันการชาร์จปกติ และการชาร์จเร็ว

ง. LED 1 ดวง

จ. ที่จับ (Handle)

ฉ. หัวต่อสำหรับประจุชุดแบตเตอรี่ (O/P VDC)

ช. หัวต่อสำหรับต่อเชื่อมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (I/P 220VAC)

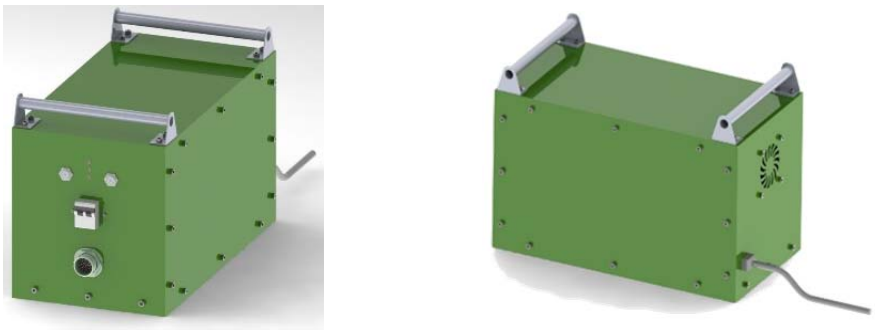
ซ. สายชาร์จสำหรับเชื่อมต่อกล่องแบตเตอรี่กับกล่องชาร์จ

โดยมีฟังก์ชันการทำงานคือ เมื่อผู้ใช้งานเปิด เบรกเกอร์ หลอดไฟ LED แสดงสถานะจะกระพริบประมาณ 10 วินาที เพื่อรอการเลือกโหมดการชาร์จจากผู้ใช้งาน หากไม่เลือก จะเข้าสู่ โหมดชาร์จปกติ (Normal charge) หลอดไฟ LED แสดงสถานะจะเปลี่ยนจากการกระพริบสีแดง เป็นติดสีแดงค้าง ระบบจะเลือกชาร์จ ด้วย เครื่องชาร์จรุ่น PB-600-24 เมื่อชาร์จเต็ม LED แสดงสถานะ จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว หากผู้ใช้งานเลือก โหมดการชาร์จเร็ว (Fast charge) โดยการกดปุ่ม SW1 หลอดไฟ LED ภายใน SW1 จะติด หลอดไฟ LED แสดงสถานะจะเปลี่ยนจากการกระพริบสีแดง เป็นติดสีแดงค้าง ระบบจะเลือกชาร์จ ด้วยเครื่องชาร์จรุ่น PB-1000-24 เมื่อชาร์จเต็ม LED แสดงสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว

อย่างไรก็ตามเมื่อสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้ ได้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการแสดงสถานะของการชาร์จเพิ่มเติมคือควรมี LED 3 ดวง ที่แสดงสถานการณ์ชาร์จ 3 สถานะ ได้แก่ ความพร้อมสำหรับการชาร์จ, กำลังชาร์จ และชาร์จเต็ม แยกกัน

5.3.1.3 การออกแบบกล่องชาร์จรุ่นที่1.3

กล่องชาร์จรุ่นที่ 1.2 จึงถูกปรับเพื่อให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากขึ้น เป็นกล่องชาร์จรุ่นที่ 1.3 ดังรูปที่ 0.14 โดยส่วนประกอบต่างๆ จะคล้ายกับกล่องชาร์จรุ่นที่ 1.2 เพียงแต่เพิ่มจำนวน LED จาก 1 ดวง เป็น 3 ดวง ซึ่งกล่องชาร์จรุ่นที่ 1.3 นี้ จะถูกพัฒนาเป็นเครื่องชาร์จรุ่นที่ 1 ต่อไป



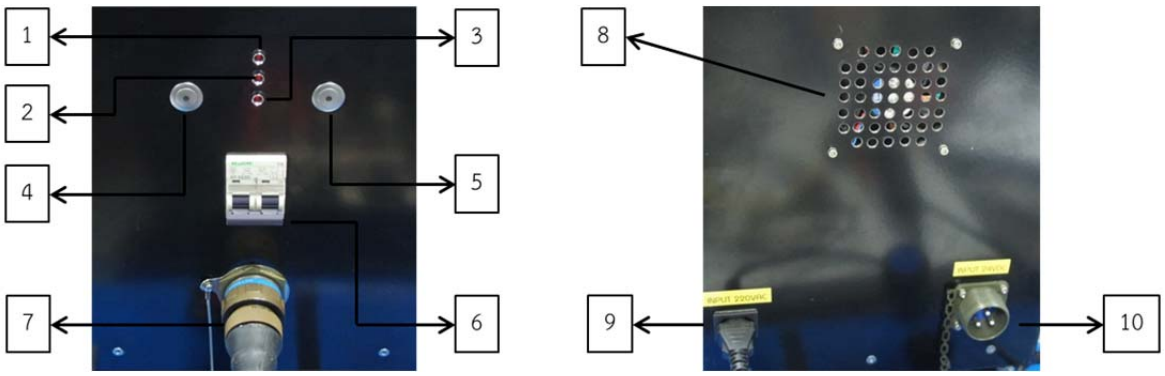
รูปที่ 0.14 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่1.3

5.3.2 การพัฒนา และทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่1

จากรายละเอียดวัสดุอุปกรณ์ภายใน และวัสดุอุปกรณ์สำหรับภายนอกกล่องชาร์จ สามารถประกอบพัฒนาได้กล่องชาร์จรุ่นที่1 ดัง รูปที่ 0.15 ที่มีขนาด กว้าง 275 มิลลิเมตร ยาว 510 มิลลิเมตร และสูง 320 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก 25 กิโลกรัม



รูปที่ 0.15 เครื่องชาร์จรุ่นที่1



(ก) (ข)

รูปที่ 0.16 เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รุ่นที่1 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

โดยกล่องชาร์จรุ่นที่1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ภายนอก ดังรูปที่ 0.16 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

- หมายเลข 1 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ เต็ม
- หมายเลข 2 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ กำลังชาร์จ
- หมายเลข 3 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ ความพร้อมสำหรับการชาร์จ
- หมายเลข 4 สวิตซ์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge)
- *หมายเลข 5 สวิตซ์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (maintenance charge) (กล่องชาร์จรุ่นที่1 ยังไม่สามารถชาร์จด้วยฟังก์ชันนี้ได้ แต่ได้จัดทำเผื่อไว้ในการพัฒนาต่อ)*
- หมายเลข 6 สวิตซ์เปิด-ปิด สำหรับเปิดปิดเครื่องชาร์จ
- หมายเลข 7 ขั้วต่อสำหรับสายเชื่อมชาร์จแบตเตอรี่
- หมายเลข 8 พัดลมระบายอากาศ
- หมายเลข 9 ขั้วต่อสายไฟขาเข้ากระแสสลับ 220 โวลต์
- หมายเลข 10 ขั้วต่อสายไฟขาเข้ากระแสตรง 24 โวลต์ *(กล่องชาร์จรุ่นที่1 ยังไม่สามารถชาร์จด้วยฟังก์ชันนี้ได้ แต่ได้จัดทำเผื่อไว้ในการพัฒนาต่อ)*

ฟังก์ชันการทำงานที่ออกแบบไว้คือ เมื่อผู้ใช้งานเปิด เบรกเกอร์ หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ หมายเลข 3 ดังรูปที่ 0.16 จะกระพริบ ประมาณ 10 วินาที เพื่อรอการเลือกโหมดการชาร์จจากผู้ใช้งาน หากไม่เลือก จะเข้าสู่ โหมดชาร์จปกติ (Normal charge) เมื่อระบบพร้อมชาร์จหลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ ความพร้อมสำหรับการชาร์จหมายเลข 3 ในรูปที่ 0.16 ที่กล่องชาร์จจะติดสว่าง และเมื่อระบบเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ กำลังชาร์จหมายเลข 2 ของเครื่องชาร์จ จะติดสว่าง โดยระบบจะเลือกชาร์จ ด้วย เครื่องชาร์จรุ่น PB-600-24 เมื่อแบตเตอรี่ถูกชาร์จเต็ม หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ เต็ม หมายเลข 1 ของเครื่องชาร์จจะติดสว่าง แล้วหลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ กำลังชาร์จหมายเลข 2 ของเครื่องชาร์จจะดับ

หากผู้ใช้เลือก โหมดการชาร์จเร็ว (Fast charge) โดยการกดปุ่ม หมายเลข 4 ในรูปที่ 0.16 หลอดไฟ LED ที่สวิตซ์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge) หมายเลข 4 จะติดสว่างเป็นสีเขียว ซึ่งหมายถึงสถานะการชาร์จแบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge) ได้ถูกเลือกแล้ว เมื่อระบบเริ่มชาร์จแบตเตอรี่ หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ กำลังชาร์จหมายเลข 2 จะติดสว่าง โดยระบบจะเลือกชาร์จ ด้วยเครื่องชาร์จรุ่น PB-1000-24 เมื่อแบตเตอรี่ถูกชาร์จเต็ม หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ เต็ม หมายเลข 1 ของเครื่องชาร์จจะติดสว่าง แล้วหลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ กำลังชาร์จหมายเลข 2 ของเครื่องชาร์จจะดับ

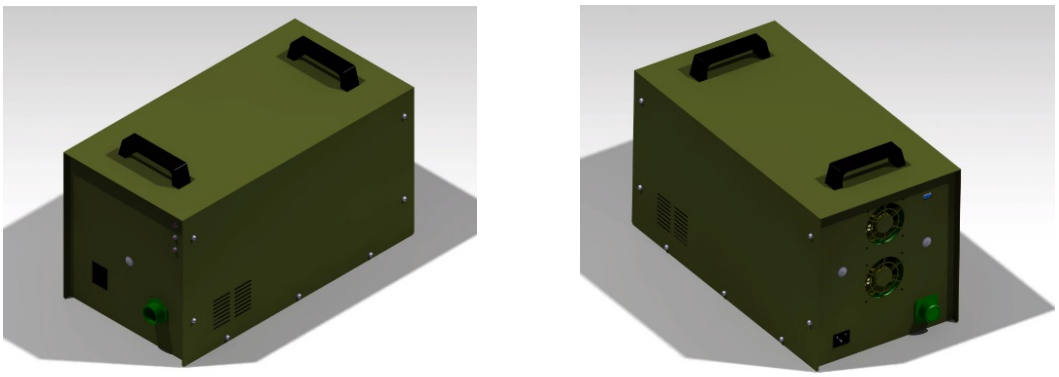
หลังจากประกอบ ได้ทดสอบการทำงานตามฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ โดยทดสอบร่วมกับชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ พบว่าเครื่องชาร์จรุ่นที่1 นี้สามารถทำงานได้ตามที่กำหนด จึงส่งมอบให้ผู้ใช้ ได้ใช้งานร่วมกับต้นแบบชุดแบตเตอรี่ 2 ชุด เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2559 พร้อมอบรมการใช้งานก่อนเบื้องต้น ซึ่งจากการศึกษาแบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ พบว่าเครื่องชาร์จสามารถทำงานในโหมดการชาร์จปกติได้ตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันการทำงานที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมได้แก่ ฟังก์ชันการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (maintenance charge) และ การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากผู้ใช้คือ ไม่ต้องการให้เริ่มการชาร์จทันทีเมื่อเปิด เบรกเกอร์ แต่ควรมีการกดปุ่มเพื่อเริ่มการชาร์จ และเมื่อเกิดความผิดปกติกับเครื่องชาร์จหรือแบตเตอรี่ควรมีไฟแสดงสถานะเหตุผิดปกติให้ผู้ใช้งานทราบ ดังนั้นข้อเสนอแนะนี้จึงได้ถูกพัฒนาต่อในเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2

5.4 การพัฒนา และทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2

ในการพัฒนาเครื่องชาร์จให้มีฟังก์ชันการชาร์จครบถ้วนตามต้องการ และตรงตามความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้น ทีมวิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องชาร์จรุ่นที่2 โดยมีการปรับรูปลักษณ์ภายนอกของกล่อง หลักการทำงานของเครื่องชาร์จ และเพิ่มอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ภายในกล่องชาร์จ เพื่อให้เครื่องชาร์จนี้สามารถชาร์จได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มี 3 ฟังก์ชันการชาร์จ ได้แก่ การชาร์จแบบปกติ การชาร์จเร็ว และการชาร์จในโหมดซ่อมบำรุง และเมื่อมีการเปิดเบรกเกอร์ เครื่องชาร์จจะไม่ทำการชาร์จแบตเตอรี่ทันทีโดยอัตโนมัติ แต่จะส่งสัญญาณให้ผู้ใช้งานกดสวิตซ์เริ่มชาร์จ

5.4.1 การออกแบบกล่องชาร์จรุ่นที่ 2

เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลาทีมวิจัยจึงได้ออกแบบกล่องชาร์จรูปแบบใหม่ที่มีความง่ายในการประกอบและการซ่อมบำรุง โดยกล่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้มีขนาด กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 520 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 0.17 และมีรายละเอียดดังเอกสารอ้างอิง 1 อุปกรณ์ภายในกล่องชาร์จจะถูกประกอบเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 0.18 เพื่อความสะดวก และใช้เวลาน้อยในการประกอบ



(ก) (ข)

รูปที่ 0.17 กล่องชาร์จแบตเตอรี่ภายนอก รุ่นที่2 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



รูปที่ 0.18 หลักการประกอบอุปกรณ์ภายในกล่องชาร์จ รุ่นที่ 2

5.4.2 การพัฒนาเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2

เครื่องชาร์จรุ่นที่2 มีฟังก์ชันการทำงานหลัก 3 ส่วน คือ

ก. การควบคุมการชาร์จ: เครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้จะมีระบบการชาร์จรุ่นที่ 2 ดังรูปที่ 0.10 โดยสามารถประจุด้วย ไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับซึ่ง มี 3 ฟังก์ชันการชาร์จ ได้แก่ การชาร์จแบบปกติ การชาร์จเร็ว และการชาร์จในโหมดซ่อมบำรุง นั่นคือ 4 รูปแบบการชาร์จ

ข. การวัด และแสดงผล (Monitoring) สถานะของระบบชาร์จ สถานะความพร้อมของแบตเตอรี่ในการชาร์จ และสถานะของการชาร์จ ได้แก่ ไม่สามารถชาร์จได้, กำลังชาร์จ, และชาร์จเต็ม

ค. การรักษาความปลอดภัยในการชาร์จ (Safety) โดยเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้ จะมีระบบป้องกัน 2 ฟังก์ชันคือ

- เครื่องชาร์จจะไม่ให้ทำการชาร์จด้วยฟังก์ชันการชาร์จเร็ว ถ้าแบตเตอรี่โมดูล (7S8P) เสียเกิน 2 โมดูล หรือ ชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบด้วย 6 โมดูล เหลือแบตเตอรี่โมดูลที่ทำงานได้เพียง 4 โมดูล เนื่องจากแบตเตอรี่โมดูลที่เหลือจะต้องรองรับกระแสชาร์จที่สูงมากเกินกว่า กระแสชาร์จสูงสุดของแบตเตอรี่โมดูล ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่โมดูลเกิดความเสียหาย และเกิดอันตรายได้
- เครื่องชาร์จจะไม่ทำการชาร์จ หรือหยุดการชาร์จ หากเกิดความผิดปกติของอุณหภูมิในโมดูลแบตเตอรี่

หลักการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆของระบบการชาร์จรุ่นที่ 2 ที่ออกแบบไว้หัวข้อ 5.2.3 สำหรับ 4 รูปแบบการชาร์จ มีรายละเอียดดังรูปที่ 0.19 เมื่อชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และไม่ได้เลือกฟังก์ชันการชาร์จด้วยรูปแบบอื่น ระบบจะทำการชาร์จด้วยฟังก์ชันการชาร์จปกติ โดยเลือกชาร์จ ด้วยเครื่องชาร์จรุ่น PB-600-24 ดังรูปที่ 0.19 (ก) ในกรณีที่เลือกฟังก์ชันการชาร์จแบบชาร์จเร็ว ระบบจะเลือกชาร์จด้วยเครื่องชาร์จรุ่น PB-1000-24 ดังรูปที่ 0.19 (ข) และถ้าเลือกการชาร์จด้วยโหลดซ่อมบำรุง ระบบจะเลือกชาร์จด้วยเครื่องชาร์จรุ่น PB-600-24 ดังรูปที่ 0.19 (ก) ถ้าแรงดันของชุดแบตเตอรี่ต่ำกว่า 28.8 โวลต์ และเมื่อแรงดันของชุดแบตเตอรี่สูงกว่า 28.8 โวลต์ ระบบจะเลือกชาร์จ ด้วยตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงตัว (Switching power supply) และวงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC) ดังรูปที่ 0.19 (ค) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้วงจร balancing ทำการปรับสมดุลแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ในโมดูล สำหรับการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องชาร์จจะทำงานทันที ด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC) ดังรูปที่ 0.19 (ง)

จากฟังก์ชันการทำงานของเครื่องชาร์จ และระบบชาร์จรุ่นที่ 2 ที่ได้ออกแบบไว้นั้น สามารถจัดทำรายการวัสดุอุปกรณ์ได้ดังเอกสารอ้างอิง BOM โดยมีการต่อเชื่อมของอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 0.20 ส่วนประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน ที่สำคัญได้แก่

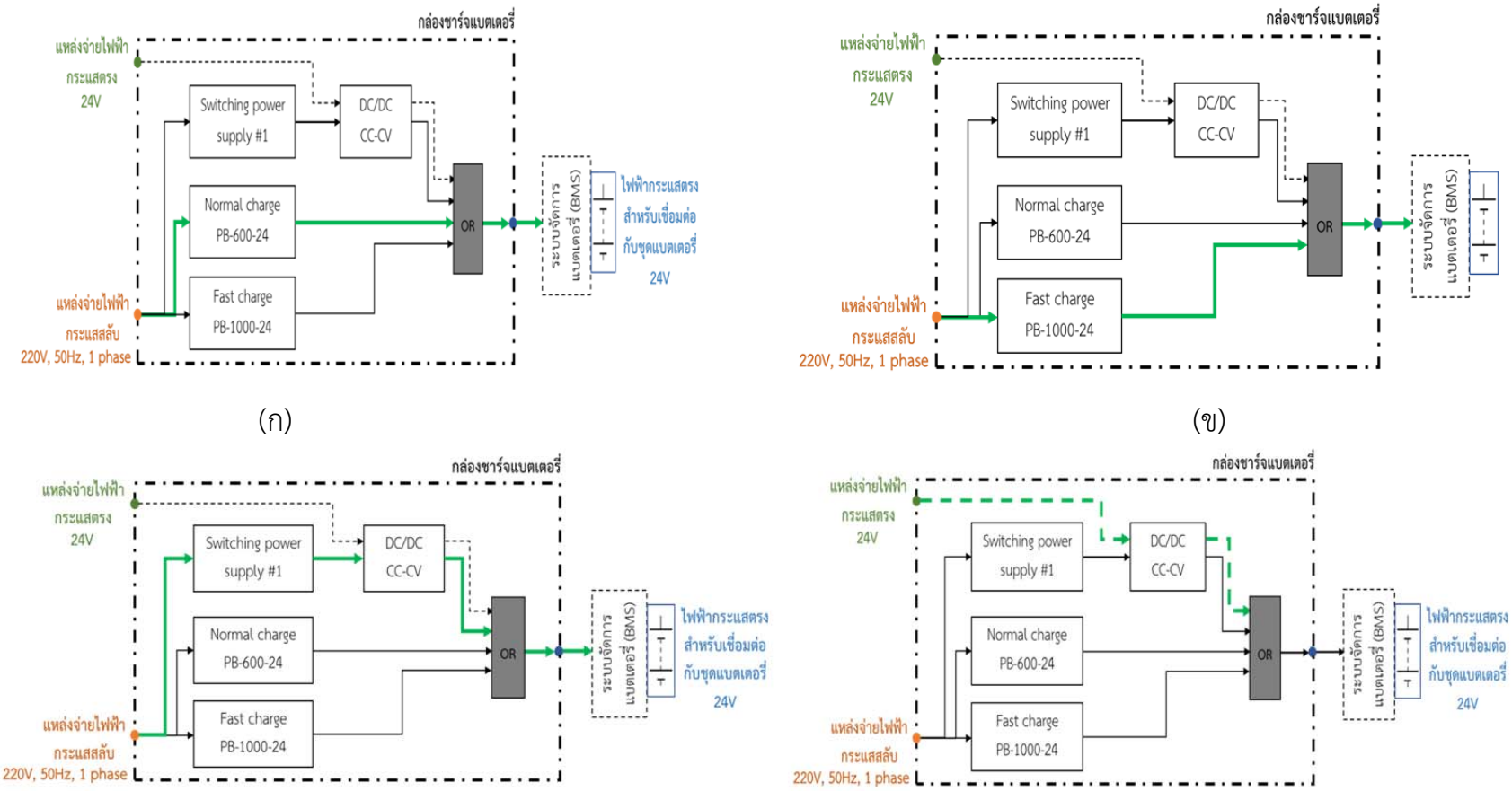
1. เครื่องชาร์จ รุ่น PB-600-24 โดยมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 21 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV)
2. เครื่องชาร์จ รุ่น PB-1000-24 โดยมีคุณสมบัติ รองรับกระแส 34.7 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้าสูงสุด ประจุสุดท้ายเท่ากับ 28.8 โวลต์ และรูปแบบการชาร์จแบบกระแสคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV)
3. ตัวแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงตัว (AC/DC) รุ่น SE-350-24 จำนวน 2 ตัว โดยตัวที่ 1 (switching power supply#1) ทำหน้าที่ร่วมกับ วงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC) ในฟังก์ชันการทำงานในโหมดซ่อมบำรุง และตัวที่ 2 (switching power supply#2) ทำหน้าที่ในการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรควบคุม
4. วงจรคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC)

5. วงจรควบคุมการทำงาน เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องชาร์จให้เป็นไปตาม 3 ฟังก์ชันการทำงานหลัก ซึ่งจะมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ดังเอกสารอ้างอิง BOM

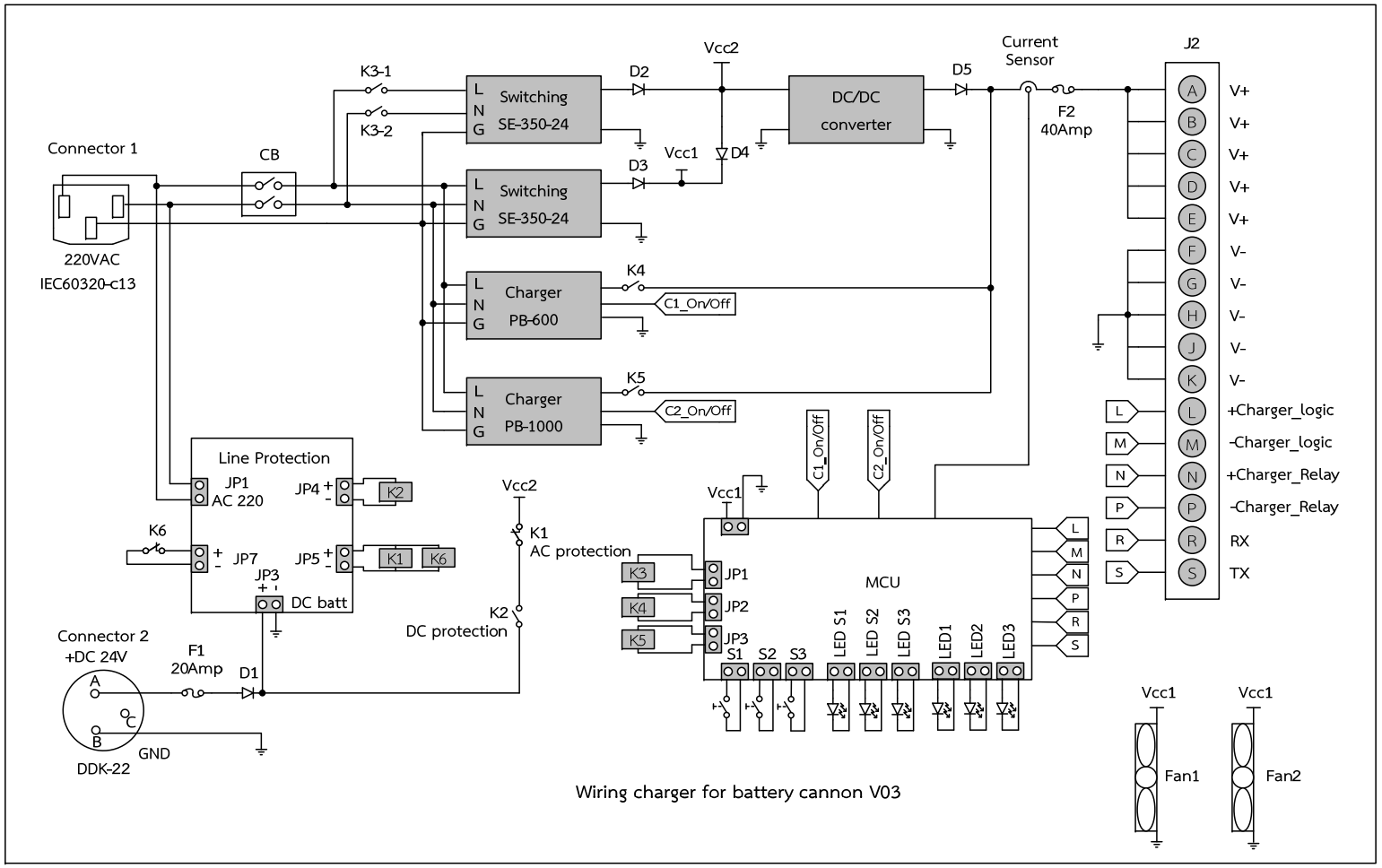
วัสดุอุปกรณ์สำหรับภายนอกกล่องชาร์จได้แก่

ก. กล่องชาร์จ พร้อมอุปกรณ์ระบายความร้อน (Heatsink)
ข. สวิตซ์เปิด-ปิดกล่องชาร์จ (Breaker)
ค. Push button switch 3 ตัว สำหรับกดเริ่มการชาร์จ เลือกฟังก์ชันการชาร์จปกติ และเลือกฟังก์ชันการชาร์จเร็ว
ง. LED 3 ดวง สำหรับแสดงสถาะการชาร์จ สำหรับทั้ง 4 รูปแบบการชาร์จ
จ. ที่จับ (Handle)
ฉ. พัดลม 2 ตัว
ช. หัวต่อสำหรับประจุชุดแบตเตอรี่ (O/P VDC)
ซ. หัวต่อสำหรับต่อเชื่อมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (I/P 220VAC)
ฌ. หัวต่อสำหรับต่อเชื่อมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (I/P VDC)
ญ. สายชาร์จสำหรับเชื่อมต่อกล่องแบตเตอรี่กับกล่องชาร์จ

ทั้งนี้ในการออกแบบเครื่องชาร์จนั้นทางทีมวิจัยยังได้คำนึงถึงความสามารถในการชาร์จที่สามารถใช้เครื่องชาร์จในฟังก์ชั่นการชาร์จแบบต่าง ๆ แทนฟังก์ชั่นการชาร์จที่ชำรุดได้ในกรณีฉุกเฉิน เช่น หากเครื่องชาร์จในฟังก์ชั่นการชาร์จแบบปกติ (normal charge) ชำรุด ผู้ใช้งานสามารถใช้การชาร์จด้วยฟังก์ชั่นการชาร์จแบบชาร์จเร็ว (fast charge) แทนได้ หรือการชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ เนื่องจากภายในเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่ออกแบบนั้นประกอบด้วยเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ย่อย 3 เครื่องที่สามารถทำงานแยกอิสระจากกันได้ และยังง่ายสำหรับการซ่อมบำรุงเมื่อเครื่องชาร์จเกิดความเสียหาย



รูปที่ 0.19 แผนภาพการชาร์จด้วยฟังก์ชันการชาร์จต่างๆ (ก) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ฟังก์ชันการชาร์จปกติ และฟังก์ชันการชาร์จในโหมดซ่อมบำรุงในช่วงแรก (ข) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงฟังก์ชันการชาร์จเร็ว (ค) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงฟังก์ชันการในโหมดซ่อมบำรุงในช่วงที่แรงดันสูงกว่า 28.8 โวลต์ (ง) การชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



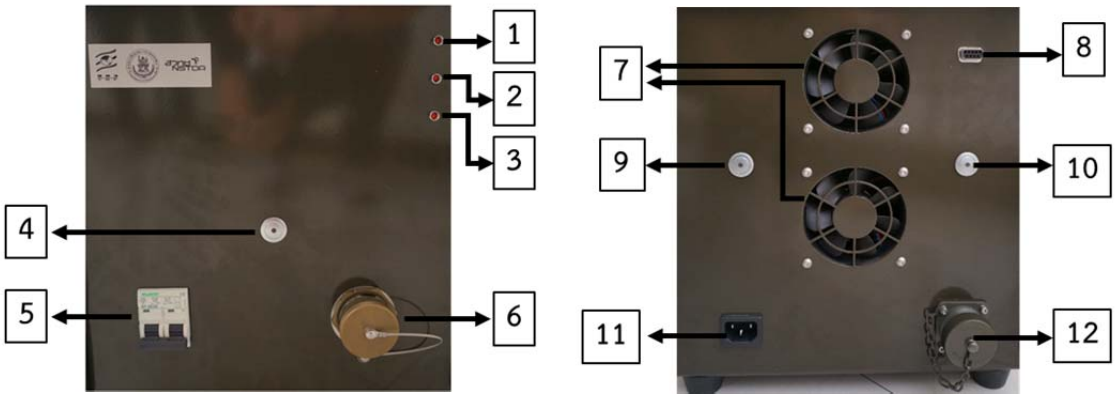
รูปที่ 0.20 แผนภาพการต่อเชื่อมของอุปกรณ์ภายในเครื่องชาร์จรุ่นที่2

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน และวัสดุอุปกรณ์ภายนอก ได้ถูกประกอบลงกล่องชาร์จรุ่นที่2 และได้เครื่องชาร์จรุ่นที่2 ดังรูปที่ 0.21 ขนาดกว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 520 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร น้ำหนัก 22 กิโลกรัม และมีลักษณะของอุปกรณ์ภายนอกเครื่องชาร์จ ดังรูปที่ 0.22 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จปกติ (Normal Charge)
หมายเลข 2 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge)
หมายเลข 3 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (Maintenance charge)
หมายเลข 4 สวิตซ์สำหรับเริ่มต้นการชาร์จ
หมายเลข 5 สวิตซ์เปิด-ปิด สำหรับเปิดปิดเครื่องชาร์จ
หมายเลข 6 ขั้วต่อสำหรับสายเชื่อมชาร์จแบตเตอรี่
หมายเลข 7 พัดลมระบายอากาศ
หมายเลข 8 ขั้วต่อสำหรับตรวจสอบการทำงานเครื่องชาร์จ
หมายเลข 9 สวิตซ์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge)
หมายเลข 10 สวิตซ์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (Maintenance charge)
หมายเลข 11 ขั้วต่อสายไฟขาเข้ากระแสสลับ 220 โวลต์
หมายเลข 12 ขั้วต่อสายไฟขาเข้ากระแสตรง 24 โวลต์



รูปที่ 0.21 เครื่องชาร์จรุ่นที่2



(ก) (ข)

รูปที่ 0.22 เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รุ่นที่1 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

วงจรควบคุมการทำงานเครื่องชาร์จมีหลักการทำงานดังเอกสารอ้างอิง 2 โดยขั้นตอนแรกจะตรวจสอบชนิดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ถ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องชาร์จจะเริ่มทำการชาร์จทันที เมื่อต่อเชื่อมชุดแบตเตอรี่กับเครื่องชาร์จรุ่นที่2 แล้ว หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จปกติ (Normal Charge) หมายเลข 1 จะกระพริบ และเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็ม หลอดไฟ LED หมายเลข 1 จะติดสว่าง แต่ถ้าหลังจากผู้ใช้งานเปิด เบรกเกอร์แล้ว และระบบตรวจสอบพบว่าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องชาร์จจะอยู่ในสถานะเตรียมพร้อมการชาร์จ โดย LED ที่สวิตช์สำหรับเริ่มต้นการชาร์จ หมายเลข 4 จะกระพริบ และเมื่อกดสวิตช์สำหรับเริ่มต้นการชาร์จ หมายเลข 4 ระบบจะทำการตรวจสอบสถานะฟังก์ชันการชาร์จที่เลือก ถ้าตรวจสอบไม่พบว่ามีการเลือกฟังก์ชันการชาร์จ เครื่องชาร์จจะเริ่มทำการชาร์จทันที ด้วยรูปแบบการชาร์จแบบปกติ แต่ถ้าตรวจสอบพบว่ามีการเลือกชาร์จด้วยฟังก์ชันการชาร์จเร็ว หรือการชาร์จในโหมดซ่อมบำรุง เครื่องชาร์จจะทำการชาร์จตามรูปแบบที่เลือก การเลือกฟังก์ชันการชาร์จทำได้โดย การกดสวิตช์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จเร็ว หมายเลข 9 หรือสวิตช์เลือกฟังก์ชั่นการชาร์จแบบการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (Maintenance charge) หมายเลข 10

ถ้าเครื่องชาร์จอยู่ในสถานะกำลังชาร์จ หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จปกติ (Normal Charge) หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จเร็ว (Fast Charge) หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ แบบการชาร์จด้วยฟังชั่นซ่อมบำรุง (Maintenance charge) หมายเลข 1 ถึง 3 หลอดใดหลอดหนึ่งจะกระพริบตามฟังก์ชันการชาร์จที่เลือก และเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็ม หลอดไฟ LED ตามสถานะการชาร์จ หลอดใดหลอดหนึ่งจะติดสว่าง ในกรณีที่เครื่องชาร์จไม่สามารถทำการชาร์จได้ หลอดไฟ LED แสดงสถานะการชาร์จ ทั้ง 3 ดวงจะติดสว่าง

5.4.3 การทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2

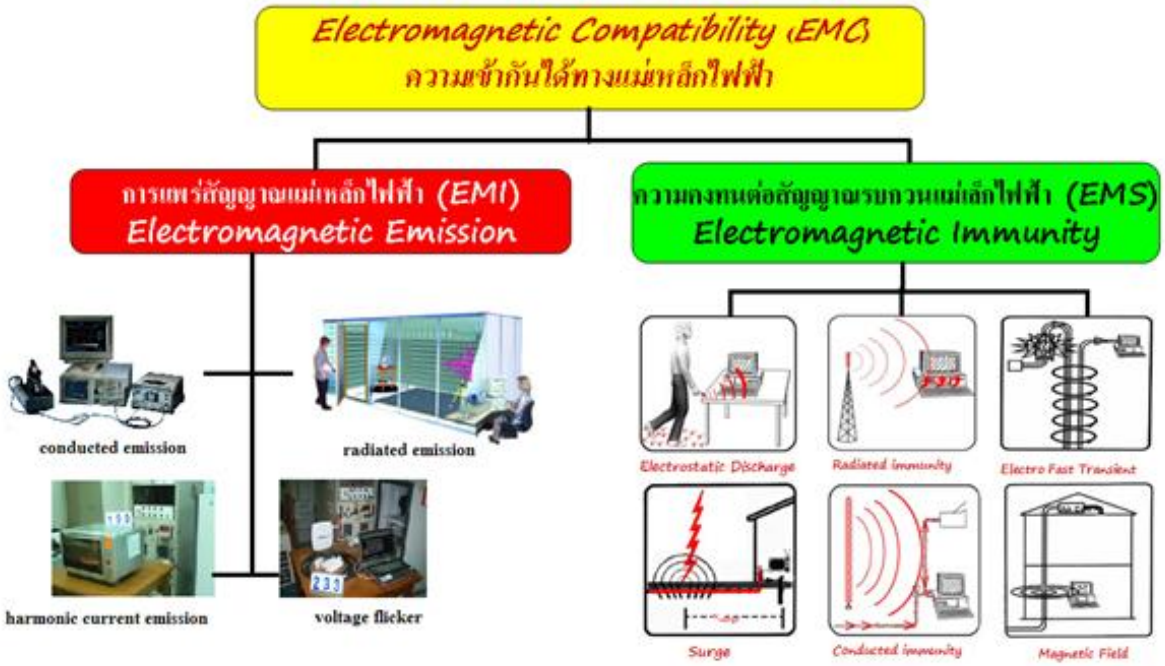
เครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 ได้ถูกทดสอบการทำงานตามฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ โดยทดสอบร่วมกับชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ พบว่าเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้สามารถทำงานได้ตามที่กำหนด

เนื่องจากเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบนั้นประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น หม้อแปลงความถี่ ขดลวด และวงจรสวิตช์ชิ่งซึ่งมีการทำงานเป็นจังหวะ (ตัด-ต่อ) เมื่ออุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวภายในเครื่องชาร์จทำงานจะมีการสร้างสัญญาณความถี่ หรือมีการสร้างสนามแม่เหล็ก ที่อาจจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ออกมาจากเครื่องชาร์จได้ ทั้งการแพร่ออกทางอากาศ หรือการเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง ระดับความแรงของสัญญาณรบกวนที่สูงมากที่เกิดจากเครื่องชาร์จ อาจจะรบกวนการ

ทำงาน หรืออาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มีความอ่อนไหว และอยู่ในระยะใกล้ หรือ ต่อเชื่อมอยู่กับระบบไฟฟ้าเดียวกันกับเครื่องชาร์จ นอกจากเครื่องชาร์จอาจจะสามารถสร้างสัญญาณรบกวนต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ ดังกล่าวแล้ว เครื่องชาร์จเองก็สามารถถูกรบกวน หรือได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน

เนื่องจากเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้ จะต้องถูกนำไปใช้ในสนามรบซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็คทรอนิกส์ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ อุปกรณ์สื่อสาร เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ตรวจจับเรดาร์ต่าง ๆ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ อาจถูกรบกวนจากสัญญาณที่ปล่อยจากเครื่องชาร์จได้ และในทางกลับกันเครื่องชาร์จก็อาจจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ต่างๆ ได้เช่นกัน รวมถึงเครื่องชาร์จนี้จะต้องต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง (220 โวลต์ 50 เฮิร์ต) ภายในโรงเก็บปืน หรือพื้นที่ภายนอกต่างๆ เครื่องชาร์จจึงควรที่จะไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนใดๆในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นต้นแบบเครื่องชาร์จรุ่นที่ 2 นี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องถูกทดสอบ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ประเภท ดังรูปที่ 0.23 คือ

- การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Emission; EMI) ซึ่งจะทดสอบสัญญาณรบกวนที่ปล่อยออกจากเครื่องชาร์จ ว่าอยู่ในระดับมาตรฐานที่จะไม่รบกวนการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆหรือไม่ โดยในโครงการนี้จะทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 61000-6-4
- ความคงทนต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Immunity; EMS) ซึ่งจะทดสอบเครื่องชาร์จว่าสามารถทำงานได้ปกติ ทนทานในสภาวะการทำงานที่มีสัญญาณรบกวนตามมาตรฐานหรือไม่ โดยในโครงการนี้จะทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 61000-6-2



รูปที่ 0.23 การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [PTEC]



รูปที่ 0.24 การทดสอบเครื่องชาร์จรุ่นที่2 ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)

โดยต้นแบบเครื่องชาร์จรุ่นที่2 นี้ ได้ถูกส่งทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ดังรูปที่ 0.24 โดยมีการทดสอบทั้งหมด 10 หัวข้อ รายละเอียดการทดสอบ วิธีการทดสอบ และผลการทดสอบ ดังเอกสารแนบ รายงานการทดสอบเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ MORAKOT-Pack Charger จาก PTEC โดยมีรายละเอียดเบื้องต้นของการทดสอบแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

- Emission Testing (ตามมาตรฐาน EN 61000-6-4): การทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission) ของผลิตภัณฑ์
    - Conducted Emission: การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยขณะทดสอบเครื่องชาร์จจะเปิดใช้งานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบ สังเกตการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนที่ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าของเครื่องชาร์จ ถ้าขนาดของสัญญาณรบกวน(Amplitude) ที่ความถี่ต่างๆ น้อยกว่าค่ามาตรฐานถือว่าผ่านการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบเครื่องชาร์จผ่านตามมาตรฐาน
    - Radiated Emission: การทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศ โดยขณะทดสอบเครื่องชาร์จจะเปิดใช้งานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบ สังเกตการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนที่แพร่กระจายในอากาศภายในห้องทดสอบ ถ้าขนาดของสัญญาณรบกวน (Amplitude) ที่ความถี่ต่างๆ น้อยกว่าค่ามาตรฐานถือว่าผ่านการทดสอบ ซึ่งเครื่องชาร์จรุ่นที่2 ไม่ผ่านตามมาตรฐาน อาจเนื่องมาจากสายชาร์จที่ต่อเชื่อมระหว่างเครื่องชาร์จ และชุดแบตเตอรี่ โดยวิธีการแก้ไขคือ การใช้สายชาร์จที่มีฉนวนกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shield)
    - Harmonic Emission: การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนกระแสฮาร์มอนิกส์ โดยขณะทดสอบเครื่องชาร์จจะเปิดใช้งานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบ และวัดกระแสฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นที่ลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 40 ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งค่าฮาร์โมนิคส์ทุกลำดับจะต้องน้อยกว่าค่ามาตรฐาน IEC61000-3-2 จึงจะถือว่าผ่านการทดสอบ โดยเครื่องชาร์จรุ่นที่2 ผ่านการทดสอบ

- Voltage Fluctuation การทดสอบการกระเพื่อมและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้า (flicker testing) โดยขณะทดสอบเครื่องชาร์จจะเปิดใช้งานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ต้นแบบ และวัดการกระเพื่อมและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้า ซึ่งการกระเพื่อมของแรงดันจะต้องน้อยกว่าค่ามาตรฐาน IEC61000-3-3 โดยเครื่องชาร์จรุ่นที่2 ผ่านการทดสอบ

- Immunity Testing (ตามมาตรฐาน EN 61000-6-2): การทดสอบเพื่อหาระดับภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถทนต่อการรบกวนได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่
  - Conducted Immunity: การทดสอบภูมิคุ้มกันการรบกวนคลื่นวิทยุผ่านสายตัวนำไฟฟ้า เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของความถี่วิทยุที่มาทางสายตัวนำไฟฟ้าและช่องสายสัญญาณอื่นๆ ที่มีขนาดของคลื่น 3 โวลต์ ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ต ถึง 230 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเครื่องชาร์จสามารถทำงานได้ในสภาวะที่ทดสอบ
  - Radiated Immunity: การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Radiated Immunity) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนโดยคลื่นวิทยุ โดยการทดสอบจะรบกวนการทำงานของเครื่องชาร์จด้วยคลื่นวิทยุที่ระดับความเข้มระนาบสนามไฟฟ้าที่มีระดับความเข้มสนามต่างๆ กันตามมาตรฐาน โดยด้วยอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรบกวน RF power ที่วางห่างจากเครื่องชาร์จ 0.8 เมตร โดย มี 3 สถานการณ์การทดสอบได้แก่ ขนาดของสัญญาณ 10V/m ความถี่ 80MHz-1000MHz, 3V/m ความถี่ 1.4GHz-2GHz, 1V/m ความถี่ 2GHz-2.7GHz
  - Power Frequency Magnetic Field คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง (Power Magnetic Field Immunity) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของสนามแม่เหล็กแบบความเข้มสูงผ่านทางอากาศ โดยใช้ induction coil หมุนรอบเครื่องชาร์จขณะกำลังทำงาน
  - Electrostatic Discharge คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันทางไฟฟ้าสถิต เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์สู่ตัวผลิตภัณฑ์ โดยการจำลองการคายประจุไฟฟ้าแบบสัมผัส (contact discharge) ที่ 15 จุด บนเครื่องชาร์จที่คาดว่าจะเป็นบริเวณที่จะถูกสัมผัสโดยผู้ใช้ และการจำลองคายประจุไฟฟ้าผ่านอากาศ (air discharge) ที่ 8 จุดบนเครื่องชาร์จ
  - Electrical Fast Transient การทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งการรบกวนทางสายตัวนำไฟฟ้า (AC line) และการเหนี่ยวนำผ่านสายควบคุม (control line)
  - Voltage Dips การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อแรงดันไฟฟ้าตก โดยสังเกตุการทำงานของเครื่องชาร์จว่าสามารถทำงานได้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าหายไปชั่วขณะ (Voltage short interruptions) และ แรงดันไฟฟ้าแกว่ง (Voltage Fluctuation) หรือไม่

ตารางที่ 0.3 ตารางแสดงผลการทดสอบ EMC เครื่องชาร์จรุ่นที่ 2

Test Item	Test Specification	Test Method	Result
Conducted Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	PASS
Radiated Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	FAIL
Harmonic Emission	EN 61000-3-2:2014	IEC/EN 61000-3-2:2014	PASS
Voltage Fluctuation	EN 61000-3-3:2013	IEC/EN 61000-3-3:2013	PASS
Conducted Immunity	EN61000-6-2:2005 0.15MHz to 80 MHz, 3V 1KHz 80% AM, Criterion A	IEC 61000-4-6:2008 (Ed 3.0)	PASS
Radiated Immunity	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A	IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1)	PASS
	EN61000-6-2:2005,1400MHz to 2000 MHz, 3V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
	EN61000-6-2:2005,2000MHz to 2700 MHz, 1V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
Power frequency Magnetic	EN61000-6-2:2005, 30A/m 50Hz, Criterion A	EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0)	PASS
Electrostatic Discharge	EN61000-6-2:2005, 8kV air, 4kV contact, Criterion B	IEC61000-4-2:2008 (Ed 2.0)	PASS
Electrical Fast Transient	EN61000-6-2:2005, 1kV 5/50ns 5kHz, Criterion B	IEC 61000-4-4:2004 (Ed 2.0)	PASS
Voltage Dips	EN61000-6-2:2005, Dip 60% 10P, Dip30% 25P, Interrupt 0.5P, Criterion C	IEC61000-4-11:2004 (Ed2.0)	PASS

- ผลการทดสอบในทุกหัวข้อสามารถสรุปได้ดังImmunity Testing (ตามมาตรฐาน EN 61000-6-2): การทดสอบเพื่อหาระดับภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถทนต่อการรบกวนได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่
    - Conducted Immunity: การทดสอบภูมิคุ้มกันการรบกวนคลื่นวิทยุผ่านสายตัวนำไฟฟ้า เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของความถี่วิทยุที่มาทางสายตัวนำไฟฟ้าและช่องสายสัญญาณอื่นๆ ที่มีขนาดของคลื่น 3 โวลต์ ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ต ถึง 230 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเครื่องชาร์จสามารถทำงานได้ในสภาวะที่ทดสอบ
    - Radiated Immunity: การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Radiated Immunity) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนโดยคลื่นวิทยุ โดยการทดสอบจะรบกวนการทำงานของเครื่องชาร์จด้วยคลื่นวิทยุที่ระดับความเข้มระนาบสนามไฟฟ้าที่มีระดับความเข้มสนามต่างๆ กันตามมาตรฐาน โดยด้วยอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรบกวน RF power ที่วางห่างจากเครื่องชาร์จ 0.8 เมตร โดย มี 3 สถานการณ์การทดสอบได้แก่ ขนาดของสัญญาณ 10V/m ความถี่ 80MHz-1000MHz, 3V/m ความถี่ 1.4GHz-2GHz, 1V/m ความถี่ 2GHz-2.7GHz
    - Power Frequency Magnetic Field คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง (Power Magnetic Field Immunity) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของสนามแม่เหล็กแบบความเข้มสูงผ่านทางอากาศ โดยใช้ induction coil หมุนรอบเครื่องชาร์จขณะกำลังทำงาน

- Electrostatic Discharge คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันทางไฟฟ้าสถิต เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์สู่ตัวผลิตภัณฑ์ โดยการจำลองการคายประจุไฟฟ้าแบบสัมผัส (contact discharge) ที่ 15 จุด บนเครื่องชาร์จที่คาดว่าจะเป็นบริเวณที่จะถูกสัมผัสโดยผู้ใช้ และการจำลองคายประจุไฟฟ้าผ่านอากาศ (air discharge) ที่ 8 จุดบนเครื่องชาร์จ
- Electrical Fast Transient การทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งการรบกวนทางสายตัวนำไฟฟ้า (AC line) และการเหนี่ยวนำผ่านสายควบคุม (control line)
- Voltage Dips การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อแรงดันไฟฟ้าตก โดยสังเกตุการทำงานของเครื่องชาร์จว่าสามารถทำงานได้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าหายไปชั่วขณะ (Voltage short interruptions) และ แรงดันไฟฟ้าแกว่ง (Voltage Fluctuation) หรือไม่

ตารางที่ 0.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผ่านการทดสอบ 9 หัวข้อ และไม่ผ่านการทดสอบ 1 หัวข้อ ในหัวข้อ Radiated Emission หรือ การทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ ที่แพร่กระจายออกไปแพร่กระจายออกไปในอากาศ อันเกิดจากสายชาร์จที่ต่อเชื่อมระหว่างเครื่องชาร์จ และชุดแบตเตอรี่ แต่เครื่องชาร์จก็ยังสามารถทำงานได้ปกติซึ่งคณะวิจัยได้ดำเนินการแก้ไขโดย การใช้สายชาร์จที่มีฉนวนกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shield) แล้ว

5.5 สรุปการดำเนินงาน

ระบบการชาร์จได้ถูกออกแบบโดยคำนึงถึงความต้องการของผู้ใช้ โดยสามารถชาร์จได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยสำหรับการพัฒนาระบบชาร์จแบบกระแสสลับจะมีฟังก์ชั่นการทำงานทั้งในระบบชาร์จปกติ (6 ช.ม.) ระบบชาร์จเร็ว (4 ช.ม.) และระบบชาร์จแบบรักษาสภาพ (ประมาณ 10 ช.ม.) ในส่วนของการชาร์จแบบกระแสตรงซึ่งเป็นความต้องการของผู้ใช้นั้น ทางคณะวิจัยได้ดำเนินการพัฒนาให้สามารถทำงานได้กับการรับไฟจากแบตเตอรี่อื่นเช่นแบตเตอรี่รถบรรทุก โดยจะสามารถทำการชาร์จได้แบบในระบบการชาร์จปกติเท่านั้นโดยอัตราการชาร์จจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ที่ถูกต่อพ่วง ทั้งนี้ชุดชาร์จที่ได้พัฒนาได้ผ่านการทดสอบด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 61000-6-4

บทที่ 6 การออกแบบ พัฒนา และทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางกล

6.1 ออกแบบกล่องแบตเตอรี่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

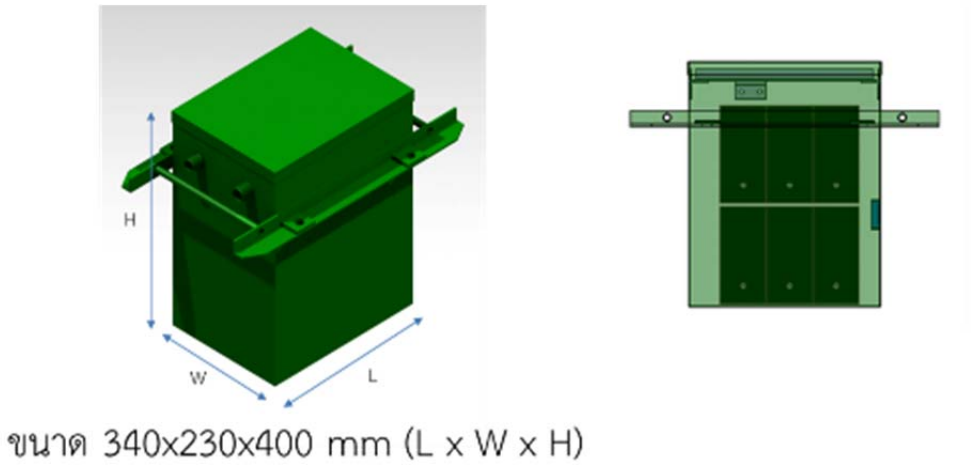
6.1.1 ออกแบบกล่องแบตเตอรี่

ในเบื้องต้นทีมงานวิจัยได้ทำการออกแบบกล่องแบตเตอรี่ใหม่โดยอ้างอิงจากขนาด และจุดยึดต่างๆ จากแบตเตอรี่เดิม ดังรูปที่ 0.1 โดย แต่เนื่องจากความต้องการของผู้ใช้งาน ที่ต้องการความจุของแบตเตอรี่ที่มากขึ้นจากเดิม โดยต้องการให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายไฟได้ตลอด 3 วัน (วันละ 8 ชั่วโมง) โดยไม่ต้องชาร์จ ซึ่งทำให้กล่องแบตเตอรี่แบบเดิมไม่สามารถใช้กันได้ โดยจะต้องมีการเพิ่มขนาดของกล้องแบตเตอรี่เพื่อให้สามารถรับกับจำนวนแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นมาได้



รูปที่ 0.1 กล่องแบตเตอรี่แบบเดิม

ดังนั้นกล่องแบตเตอรี่แบบใหม่จึงต้องมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถลองรับกับความจุของแบตเตอรี่ที่เพิ่มมากขึ้นได้ เพื่อให้สามารถใส่แบตเตอรี่ได้มากถึง 6 โมดูล โดยรูปร่างและขนาดของกล่องแบตเตอรี่แบบใหม่ถูกแสดงในรูปที่ 0.2 ซึ่งมีขนาด 340 x 230 x 400 มม. (L x W x H) ยังต้องมีขนาดและจุดยึดอยู่ที่เดียวกับกล่องแบบดั้งเดิม เพื่อที่จะให้กล่องแบบใหม่สามารถใสแทนกล่องแบตเตอรี่แบบเดิมได้

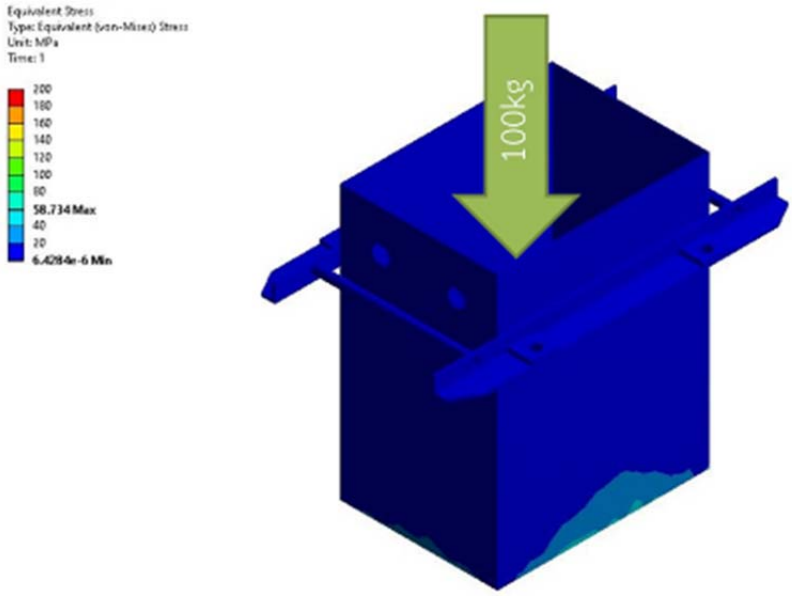


รูปที่ 0.2 รูปร่างและขนาดของกล่องแบตเตอรี่แบบใหม่

6.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล่องแบตเตอรี่แบบใหม่

6.1.2.1 แบบจำลองความแข็งแรงของโครงสร้าง

ในการออกแบบกล่องแบตเตอรี่ทางทีมวิจัยได้คำนึงถึงความแข็งแรงของกล่องแบตเตอรี่เป็นสำคัญด้วย ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์หาความแข็งแรงจึงถูกนำมาใช้ช่วยในการออกแบบด้วย ทางทีมวิจัยจึงเลือกใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของ Ansys มาวิเคราะห์หาความแข็งแรงของกล่องที่ออกแบบไว้ โดยถูกแสดงไวในรูปที่ 0.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยใช้แรงคงที่ขนาด 100 กิโลกรัมมาวิเคราะห์ จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกล่องแบตเตอรี่จากการรับน้ำหนักขนาด 100 กิโลกรัม พบว่า ความเค้นสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 58.73 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดครากของเหล็กที่เป็นวัสดุทำกล่องอยู่มาก โดยจุดครากของเหล็กจะอยู่ที่ 210 MPa ดั้งนั้นกล่องที่ถูกออกแบบมาใหม่นั้นมีความแข็งแรงและสามารถที่จะลองรับน้ำหนักของแบตเตอรี่ได้



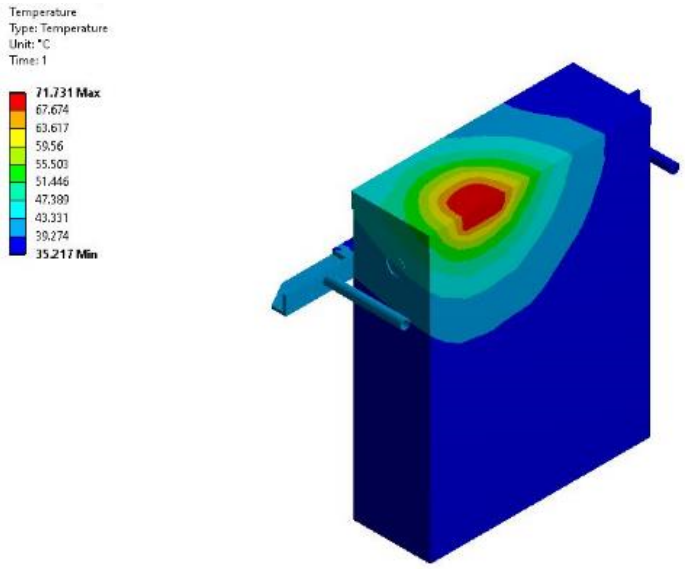
รูปที่ 0.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยใช้แรงคงที่ขนาด 100 กิโลกรัม

6.1.2.2 แบบจำลองทางความร้อนของกล่องแบตเตอรี่

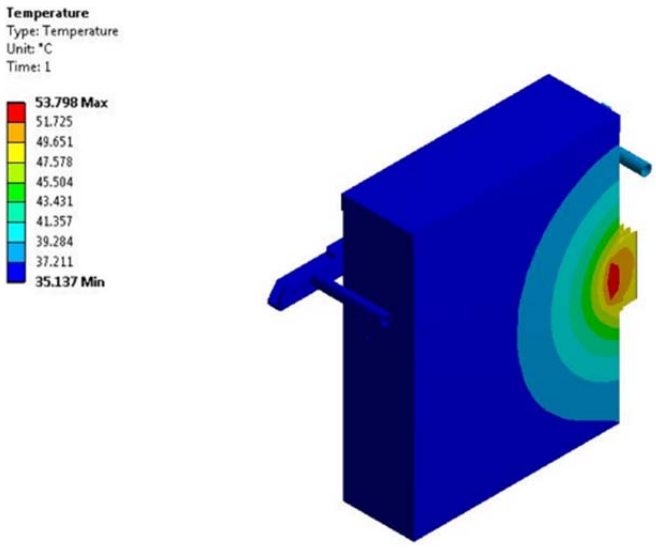
ในการออกแบบของกล่องแบตเตอรี่นั้น ทางทีมวิจัยยังได้คำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของกล่องแบตเตอรี่ด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้แบตเตอรี่และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องแบตเตอรี่เสื่อมสะภาพก่อนเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจึงถูกนำมาใช้ช่วยในการออกแบบด้วย ทางทีมวิจัยจึงเลือกใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ของ Ansys มาวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของกล่องที่ออกแบบไว้ โดยถูกแสดงไวในรูปที่ 0.4

ทางทีมวิจัยพบว่าอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าแบบปรับแรงดันคงที่ (DC to DC convertor) นั้นมีพลังงานความร้อนขณะที่ทำงานอยู่สูงที่สุดในกล่องแบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อไม่มีการระบายความร้อน อุณหภูมิที่ตัวอุปกรณ์นั้นจะสูงถึง 80°C ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องทำการระบายความร้องออกไปสู่ภายนอกของตัวกล่องแบตเตอรี่ ในตอนแรก ทางทีมวิจัยมีความคิดที่จะให้ตัวฝาของกล่องแบตเตอรี่ เป็นตัวช่วยในการระบายความร้อนของตัวอุปกรณ์จ่ายไฟ โดยได้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการตัดสินใจ ตามรูปที่ 0.4 ก.) แสดงถึงอุณหภูมิภายในกล่องแบตเตอรี่ ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าอยู่ที่ 71.7°C ซึ่งยังมีค่าที่ค่อนข้างสูงมาก

จากผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน ทางทีมวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงแบบของกล่องแบตเตอรี่ โดยมีการเพิ่มเติมในส่วนของครีบระบายความร้อน ซึ่งทางทีมวิจัยได้ทำการติดตั้งครีบระบายความร้อนไว้ที่ด้านข้างของตัวกล่องแบตเตอรี่ เนื่องจากสองเหตุผล 1. การทดสอบการปล่อยตกจากที่สูง ซึ่งถ้าหากมีครีบระบายความร้อนอยู่ที่ด้านบนของกล่องแบตเตอรี่นั้น อาจจะทำให้เกิดการเสียหายของครีบระบายความร้อน ขณะทำการทดสอบการตกได้ 2. ในขณะที่แบตเตอรี่ใช้งานอยู่ในภาคสนาม แสงแดดจะส่องโดนที่ด้านบนกล่องเป็นส่วนมาก ซึ่งทำให้การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ด้านบนของตัวกล่องแบตเตอรี่ไม่เป็นผลดีต่อการระบายความร้อน ดั้งนั้นทางทีมวิจัยจึงได้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีส่วนของครีบระบายความร้อนขึ้นมา เพื่อใช้ในการตัดสินใจ ตามรูปที่ 0.4 ข.) พบว่าการเพิ่มเติมในส่วนของครีบระบายความร้อนนั้นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นมาก โดยมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 53.8°C



ก.)



ข.)

รูปที่ 0.4 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์จ่ายไฟ

6.1.3 การออกแบบชุดติดตั้งของกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบ

ในการออกแบบชุดติดตั้งของกล่องแบตเตอรี่นั้น ทางทีมวิจัยได้ออกแบบให้ใช้ได้กับตัวล็อคของแบตเตอรี่แบบดั้งเดิมดั้งที่แสดงในรูปที่ 0.5 โดยจะมีตัวล็อคแบบนี้อยู่ 4 ตัว เพื่อใช้ในการยึดแบตเตอรี่ให้อยู่กับที่ โดยตัวล็อคลักษณะนี้ใช้งานได้สะดวก เพราะสามารถถอดและประกอบได้รวดเร็ว



รูปที่ 0.5 ภาพของตัวล็อคของต้นแบบกล่องแบตเตอรี่

6.2 การสั่งผลิตกล่องแบตเตอรี่-กล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 1

ในเบื้องต้นทีมงานวิจัยได้ ได้เลือกวัสดุที่ใช้ทำกล้องแบตเตอรี่เป็นเหล็กแผ่น (Steel Plate) หนา 1.5 มม. ซึ่งจะมีความแข็งแรง โดยจะทำการเคลือบสีสองชั้นเพื่อความทดทาน โดยทางทีมงานวิจัยได้เขียนแบบสั่งผลิตสำหรับกล่องแบตเตอรี่ไว้แล้วตามรูปที่ 0.6 โดยแบบสั่งผลิตทั้งหมดถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และรูปที่ 6.5 แสดงรูปถ่ายของต้นแบบแบตเตอรี่รุ่นที่1

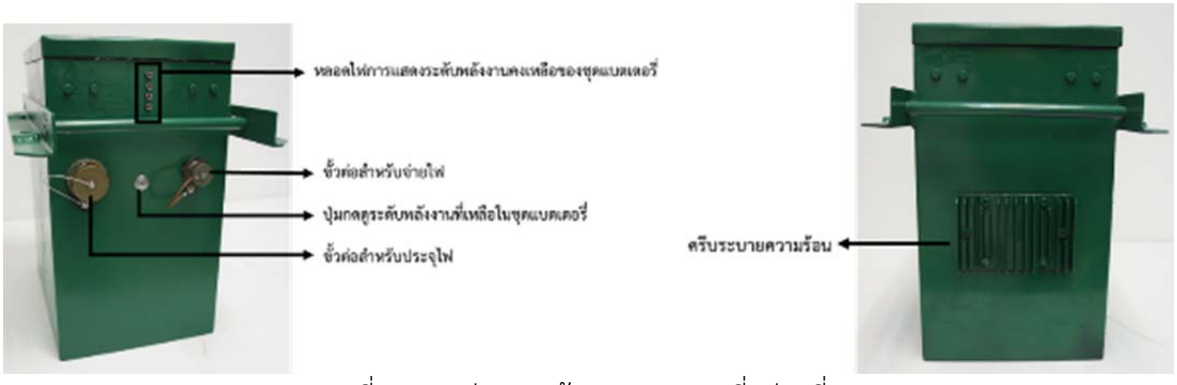


รูปที่ 0.6 แบบสั่งผลิตเบื้องต้นของกล่องแบตเตอรี่

6.2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของต้นแบบกล่องแบตเตอรี่

โดยองค์ประกอบที่สำคัญของต้นแบบกล่องแบตเตอรี่ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 0.7 ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

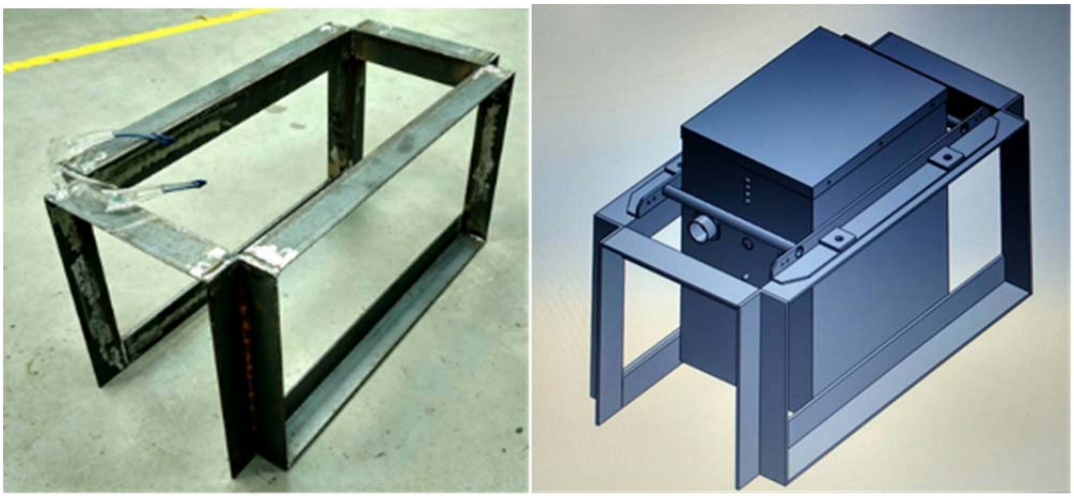
- หลอดไฟ LED แสดงระดับพลังงานคงเหลือของชุดแบตเตอรี่
- ปุ่มกดดูสถานะของระดับพลังงานคงเหลือของชุดแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกใช้งาน
- ขั้วต่อสำหรับจ่ายไฟ
- ขั้วต่อสำหรับประจุไฟ
- ครีบระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์จ่ายไฟ



รูปที่ 0.7 รูปถ่ายของต้นแบบแบตเตอรี่กล่องที่ 1

6.3 ออกแบบชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่

การออกแบบออกแบบชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่และชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่ที่ใช้นั้น ในเบื้องต้นได้ออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับแท่นวางแบตเตอรี่ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 โดยรูปที่ 0.8 แสดงรูปถ่ายของชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่ โดยชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่นั้นถูกออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของกล่องแบเตอรี่ เพื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกล่องแบตเตอรี่จะถูกยึดอยู่บนชุดทดสอบตามรูปที่ 0.8 แล้วจึงทำการวางน้ำหนังถ่วงลงไปในกล่องแบตเตอรี่ เพื่อดูว่ากล่องแบตเตอรี่นั้นจะสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ถูกคำนวนไว้ และชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่ยังถูกใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วย ตามรูปที่ 0.9 โดยชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่จะถูกนำไปติดตั้งบนแท่นของเครื่องที่สร้างแรงสั่นสะเทือน เพื่อทำการทดสอบความทนทานต่อแรงสั่นสะเทือน (บทที่ 7)



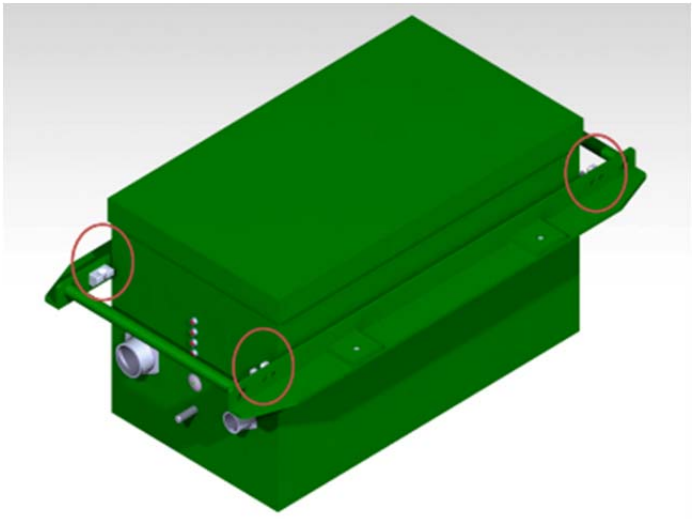
รูปที่ 0.8 รูปถ่ายของชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่และแบบจำลอง 3 มิติในคอมพิวเตอร์



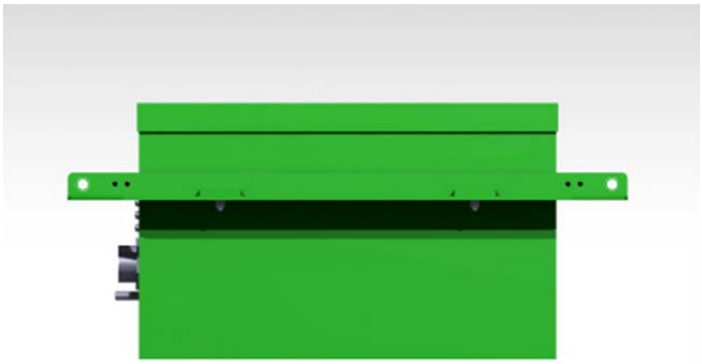
รูปที่ 0.9 รูปถ่ายของชุดทดสอบกล่องแบตเตอรี่-ชุดทดสอบความทนทานของกล่องแบตเตอรี่ขณะทดสอบการสั่นสะเทือน

6.4 การออกแบบกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2

หลังจากที่ทีมวิจัยได้ทำการทดลองติดตั้งของกล่องแบตเตอรี่ (บทที่ 7) ทางผู้ใช้มีความเป็นห่วงเรื่องความสูงของกล่องแบตเตอรี่ต้นรุ่นที่1 รวมถึงความยุ่งยากในการถอดและติดตั้งแบตเตอรี่เนื่องจากต้องใช้ สกรูในการยึด ดั้งนั้นทางทีมวิจัยจึงทำการออกแบบกล่องแบตเตอรี่รุ่นที่ 2 ไว้ เพื่อจะสามารถปรับปรุงต้นแบบให้ดีขึ้น โดยออกแบบกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2 ถูกแสดงในรูปที่ 0. โดยมีขนาดกว้าง 225 มม. ยาว 410 มม. และสูง 240 มม. ซึ่งมีขนาดเตี้ยกว่ากล่องต้นรุ่นที่1 มาก และกล่องต้นแบบที่สองจะถูกออกแบบให้ถอดและประกอบง่าย โดยจะมีกลไกการล๊อคแบบไม่ใช้สกูลที่ แสดงอยู่ในวงกลมของรูปที่ 0. ก.) ซึ่งเป็นกลไกล็อคแบบดั้งเดิม และเดือยเสียบแทนในรูปที่ 0. ข.) จึงไม่จำเป็นต้องใช้สกรูในการยึด ซึ่งจะทำให้การถอดและติดตั้งสะดวกและรวดเร็ว แต่กล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2 ยังอยู่ในระหว่างการออกแบบและจะเป็นงานที่สามารถพัฒนาในโครงการต่อเนื่องต่อไป



ก.)



ข.)

รูปที่ 0.10 แสดงแบบจำลอง 3 มิติของกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2

6.5 การเลือกวัสดุกันกระแทกสำหรับกล่องแบตเตอรี่

ในการเลือกวัสดุกันกระแทกสำหรับกล่องแบตเตอรี่ทางทีมวิจัยได้คำนึงถึงคุณสมบัติดังนี้

- ทนต่อแรงกระแทกได้ดี
- มีความต้านทานต่อน้ำสูง ไม่ดูดซับน้ำและความชื้น
- ทดต่ออุณหภูมิสูงและต่ำ
- ติดไฟได้ยาก

ดังนั้น ทางทีมวิจัยจึงทำการคัดเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุกันกระแทกของงานนี้ได้ 2 ชนิด

6.5.1 โฟมพอลิยูรีเทน

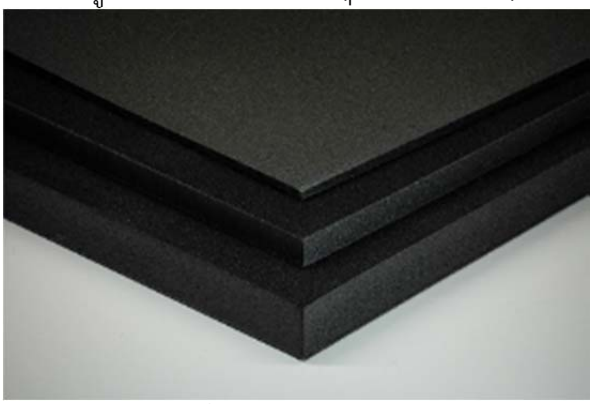
โครงสร้างมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดจนถึงมีเซลล์ปิด แต่ยอมให้อากาศหนีออกเมื่อได้รับแรงกระแทกและดูดอากาศกลับเมื่อหมดแรง กระแทก การคืนรูปดีมากทำให้เป็นวัสดุกันกระแทกที่ดี ไม่ดูดซับความชื้นในอากาศ ทนต่ออุณหภูมิสูงและต่ำ และสามารถมีการใช้งานขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าไปขยายตัวในช่องว่าง ในกรณีขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดให้เข้าไปขยายตัวในช่องว่าง การใช้เครื่องเติมโฟมประเภทฉีดจะช่วยให้ทำงานสะดวกมากขึ้น



รูปที่ 0.10 โฟมพอลิยูรีเทน [1]

6.5.2 โฟม EVA

โฟม EVA เป็นโฟมเซลล์ปิดที่ทำจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและพอลิเมอร์ผสม. แต่ก็มีระดับสูงของสารเคมีข้ามการเชื่อมโยง ทนต่อทั้งอุณหภูมิสูงและต่ำ ผลที่ได้คือผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งที่มีโครงสร้างเซลล์ปรับเครื่องแบบที่เหมาะสำหรับการใช้งานในหลากหลายสถานการณ์และการประยุกต์ใช้ เหมาะสำหรับการดูดซึมการสั่นสะเทือน โดย EVA โฟม นั้นจะเป็นโฟมชนิดขึ้นรูปจากแม่แบบมาก่อน (precast foam) ซึ่งจะยุ่งยากในการใช้งาน



รูปที่ 0.11 โฟม EVA [2]

6.6 สรุปการดำเนินงาน

กล่องแบบเตอรี่ได้ถูกออกแบบโดยคำนึงถึงการใช้งานเป็นหลัก โดยกล่องแบตเตอรี่จะต้องมีความทนทานต่อการใช้งาน และยังต้องสามารถผ่านการทดสอบทางกลตามมาตรฐานด้าน vibration drop ฝุ่นและน้ำ โดยทางทีมวิจัยได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการออกแบบกล่องแบบเตอรี่ที่ความทนทานเพียงพอที่จะสามารถผ่านการทดสอบทางกลได้ โดยในโครงการวิจัยนี้ กล่องแบบเตอรี่ชุดต้นรุ่นที่ 1 ได้ทำการผลิตและทดลองติดตั้ง และทดสอบแล้ว ส่วนกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2 นั้นได้ถูกออกแบบโดยคำนึงถึงความต้องการของผู้ใช้ ที่ต้องการให้กล่องแบตเตอรี่มีขนาดของความสูงที่ลดลง โดยกล่องแบตเตอรี่ต้นแบบชุดที่ 2 ยังอยู่ในระหว่างการออกแบบ และทำการเขียนแบบสั่งผลิต เผื่อที่จะผลิตขึ้นมาทดสอบและติดตั้งจริงต่อไป

6.7 เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.industrial-goods.com/show/468369/

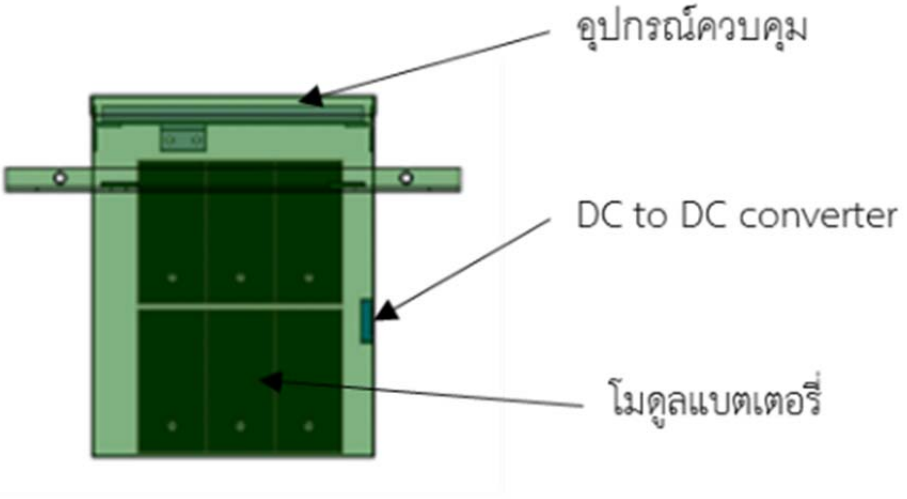
[2] http://cosplayshop.be/product/eva-foam-eva-100kg/

บทที่ 1. การประกอบเพื่อพัฒนาและผลิตเป็นชุดแบตเตอรี่

หลังจากที่คณะวิจัยได้ดำเนินการออกแบบส่วนประกอบต่างๆของชุดแบตเตอรี่เรียบร้อยแล้ว คณะวิจัยได้ดำเนินการประกอบชุดแบตเตอรี่ให้สมบูรณ์ ในบทนี้จะกล่าวถึงการได้ดำเนินการประกอบ และทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่างที่ออกแบบไว้ทั้งด้านการทำงานและความปลอดภัย

7.1 ประกอบชุดแบตเตอรี่สมบูรณ์

กล่องแบตเตอรี่ทีสมบูรณ์นั้นจะประกอบไปด้วยโมดูลแบตเตอรี่จำนวน 6 โมดูล DC to DC converter และอุปกรณ์ควบคุม (BMS) ซึ่งจะถูกประกอบขึ้นเป็นชุดแบตเตอรี่ภายในกล่องตามรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของส่วนประกอบภายในกล่องแบตเตอรี่

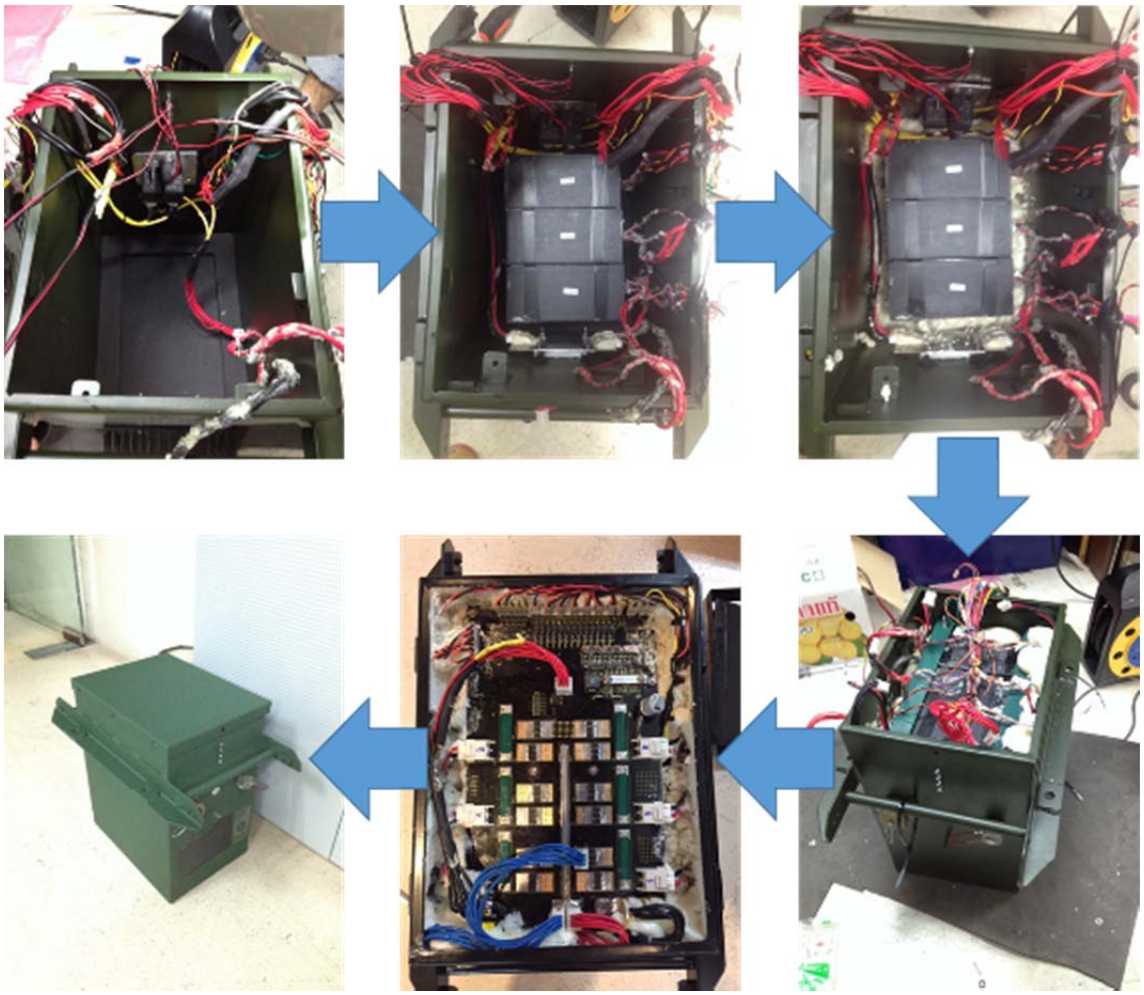


รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงส่วนประภายในของกล่องแบตเตอรี่

7.1.1 ขั้นตอนการประกอบ

การประกอบกล่องแบตเตอรี่นั้นจะเป็นการประกอบจากด้านล่างขึ้นบน ตามรูปที่ 1.2 โดยจะมีขั้นตอนการประกอบดังนี้

1. ติดตั้ง connector J1 J2 และ DC to DC convertor รวมถึงสายไฟต่างๆ
2. ลองพื้นด้านล่างด้วย EVA โฟม
3. ติดตั้งโมดูลแบตเตอรี่ที่ด้านล่าง
4. ทำการฉีดโพลียูรีเทนโฟม ที่ด้านล่าง
5. ติดตั้งโมดูลแบตเตอรี่ชั้นที่ 2 แล้ว ทำการยึดโมดูลแบตเตอรี่ไว้กับกล่อง
6. ทำการฉีดโพลียูรีเทนโฟมอีกครั้ง
7. ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม (Master BMS) แล้ว ทำการเชื่อมต่อสายไฟ
8. ทำการปิดฝากล่อง



รูปที่ 1.2 รูปถ่ายแสดงลำดับการประกอบกล่องแบตเตอรี่สมบูรณ์

7.2 การทดสอบการการจ่ายไฟและการชาร์จ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบการการจ่ายไฟและการชาร์จ คือ การสร้างความเชื่อมั่นว่าชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นมีการทำงานได้ตรงตามที่ออกแบบไว้ โดยก่อนประกอบแบตเตอรี่โมดูลลงกล่องแบตเตอรี่ จะมีการทดสอบการตรวจสอบการทำงานของแบตเตอรี่โมดูลและระบบจัดการลูกข่าย ด้วยกระบวนการการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ เพื่อดูว่าแบตเตอรี่โมดูลมีความจุไฟฟ้าตรงตามที่ระบุไว้หรือไม่และระบบจัดการลูกข่ายทำงานถูกต้องหรือไม่ หลังจากประกอบเสร็จสมบูรณ์ จะมีการทดสอบประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ และทดสอบการปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง เพื่อให้มั่นใจว่าชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นมีการทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ จากนั้น เมื่อชุดแบตเตอรี่ผ่านการทดสอบ Drop Test จะมีการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ เพื่อให้มั่นใจว่าชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นมีการทำงานได้ปกติตามที่ออกแบบไว้ ในการทดสอบวัฏจักรการใช้งานนี้ชุดแบตเตอรี่จะทดสอบการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ และทดสอบการปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง ด้วยวิธีเดียวกับการทดสอบหลังจากประกอบชุดแบตเตอรี่เสร็จสมบูรณ์

7.2.1 การทดสอบการใช้งานระบบควบคุมหลัก ในสภาวะจำลองอุณหภูมิภายในกล่องแบตเตอรี่ที่ 45 องศาเซลเซียส

เนื่องจากการเก็บข้อมูลการใช้งานจริง พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของชุดแบตเตอรี่นั้น มีอุณหภูมิขึ้นสูงถึง 47 องศาเซลเซียส (หัวข้อ 2.2.3) สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงนี้ อาจทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดการขัดข้องและ/หรือเสียหายขณะใช้งานได้มากที่สุด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ คือ การทดสอบการใช้งานระบบควบคุมหลักในสภาวะจำลองอุณภูมิภายในกล่องแบตเตอรี่ที่ 45 องศาเซลเซียส เพื่อดูว่าระบบควบควบคุมหลักที่ออกแบบมานั้นสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความปลอดภัยในการใช้งาน โดยทำการทดสอบความจุไฟฟ้าแบบประจุ (Charge capacity test) และการทดสอบความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (Discharge capacity test) ในสภาวะจำลองอุณหภูมิภายในกล่องแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

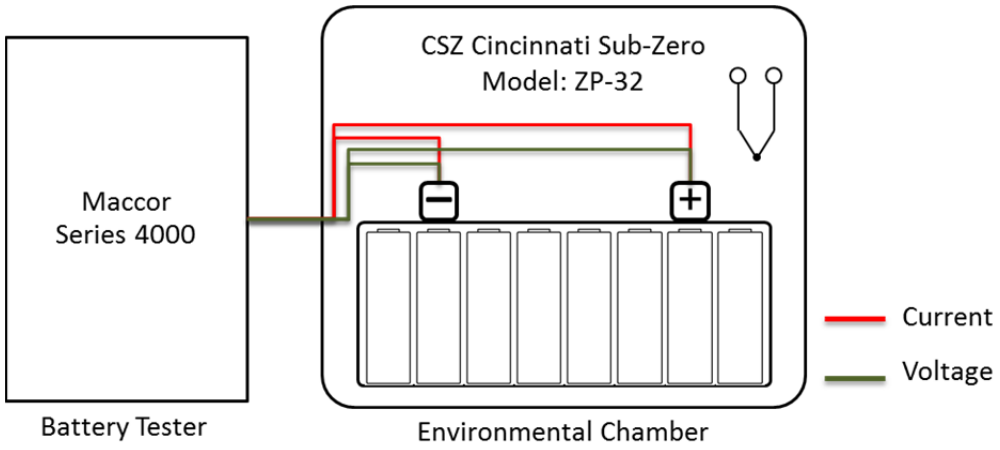
ก. การทดสอบความจุไฟฟ้าแบบประจุ (Charge capacity test) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 1.3 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ ยี่ห้อ MACCOR รุ่น Series 4000 และตู้อบควบคุมบรรยากาศ (Environmental Chamber) ยี่ห้อ CSZ Cincinnati Sub-Zero รุ่น ZP-32 ชุดแบตเตอรี่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 1.4 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของ MCU Converter, Diode และ Polyswitch แสดงใน รูปที่ 1.5 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในตู้อบ (Ambient) และอุณหภูมิของ DC/DC converter แสดงในรูปที่ 1.6 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ค่ากระแสไฟฟ้า (Current) และอุณหภูมิ ทุกๆ 1 วินาที ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

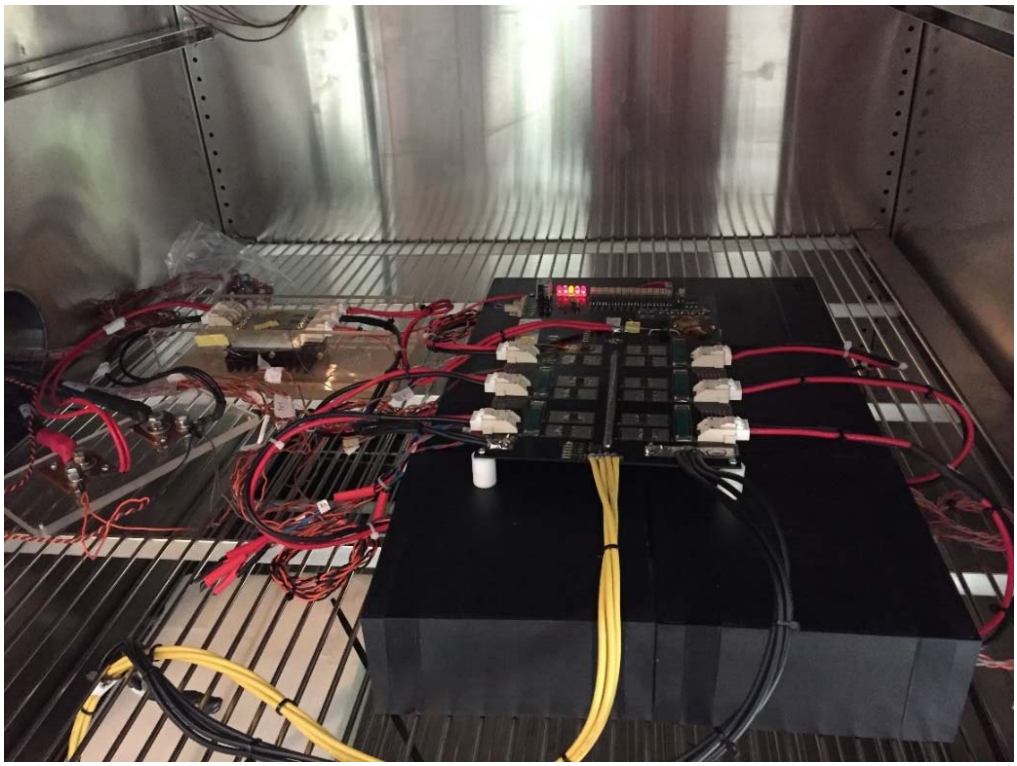
ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ประจุเซลล์แบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC/CV, Constant Current/Constant Voltage) กล่าวคือ ประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/5 (24.96 แอมแปร์) แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้าย (Cut-off charge voltage) 29.4 โวลต์ จากนั้นประจุชุดแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 29.4 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ประจุเซลล์แบตเตอรี่จะลดลงจนถึงค่า 0.02C (2.5 แอมแปร์) จึงหยุดการทดสอบ

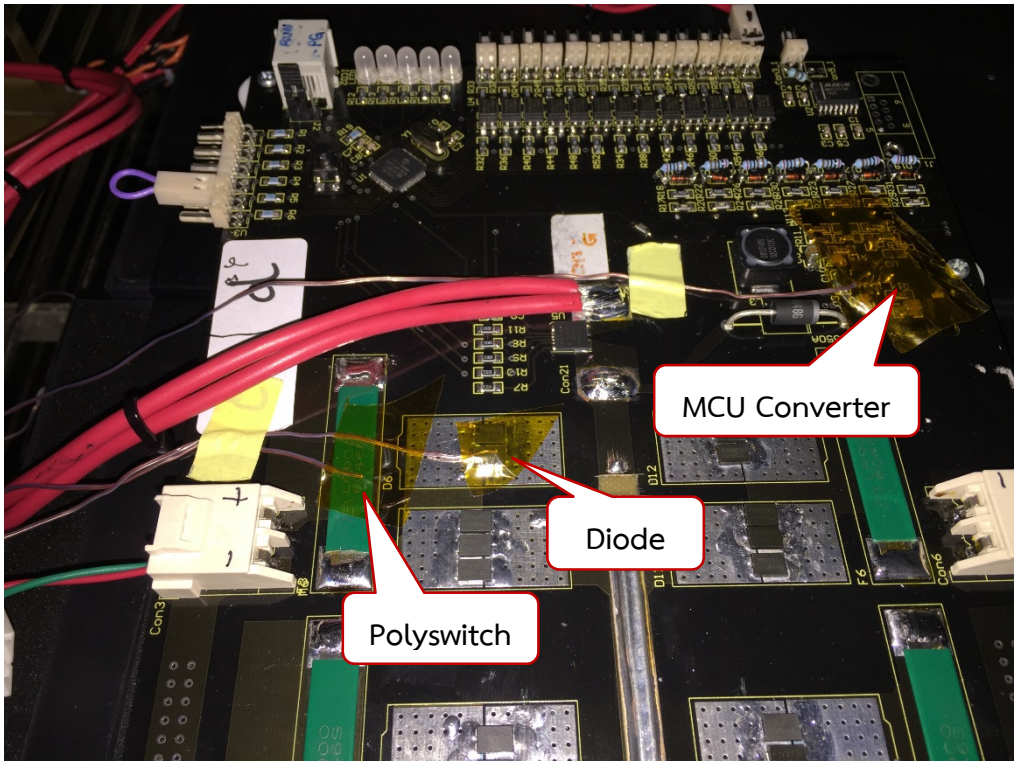
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 1.7 ความจุไฟฟ้าแบบประจุ และอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 1.8 และรูปที่ 1.9 จากการทดสอบพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีค่าความจุไฟฟ้าแบบประจุ 125.7 แอมแปร์-ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการประจุทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง 43 นาที อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ขณะทำการประจุอยู่ที่ ตัวไดโอด (Diode) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ใช้มีค่าสูง จากผลการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมหลักสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มกระบวนการประจุชุดแบตเตอรี่จนเสร็จสิ้นกระบวนการประจุไฟ อีกทั้งชุดแบตเตอรี่ที่ออกแบบมีความปลอดภัยในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง



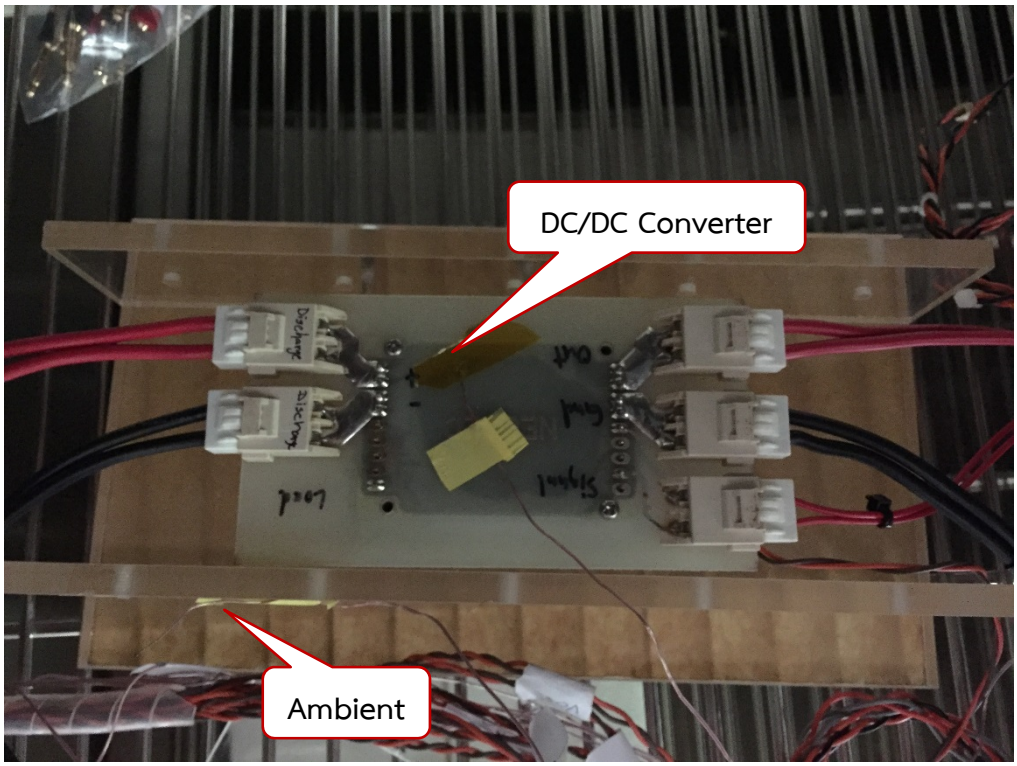
รูปที่ 1.3 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



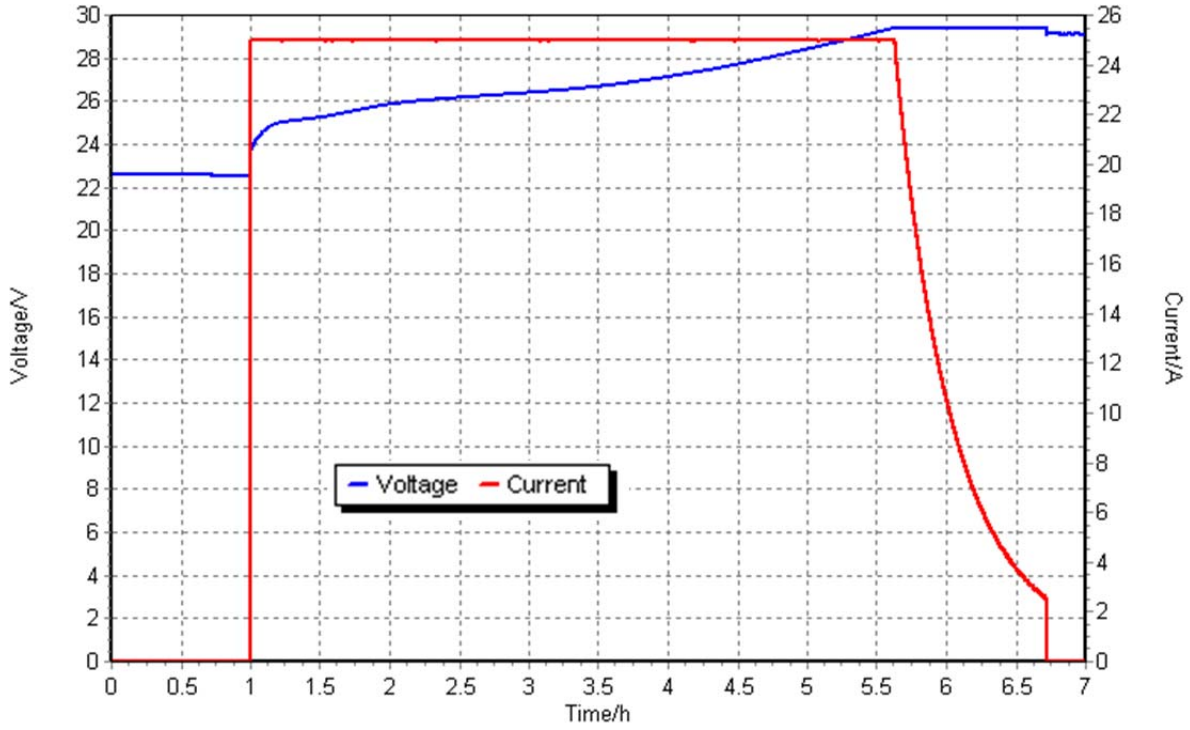
รูปที่ 1.4 ชุดแบตเตอรี่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ



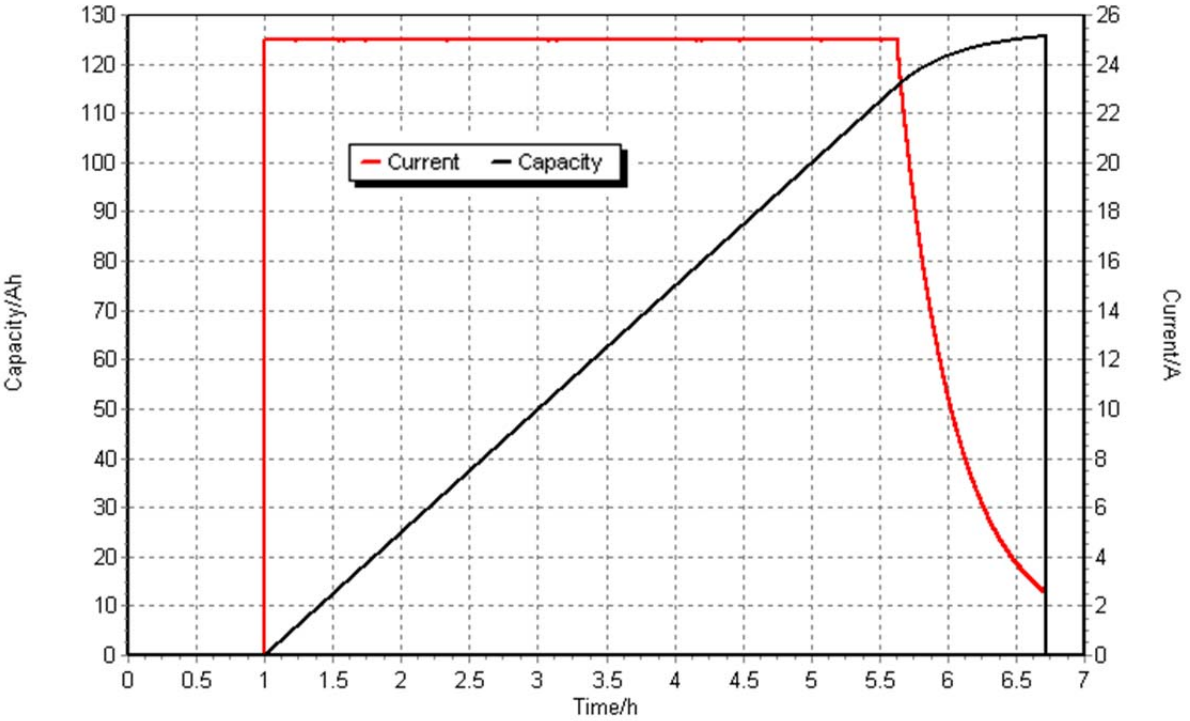
รูปที่ 1.5 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของ MCU Converter, Diode และ Polyswitch



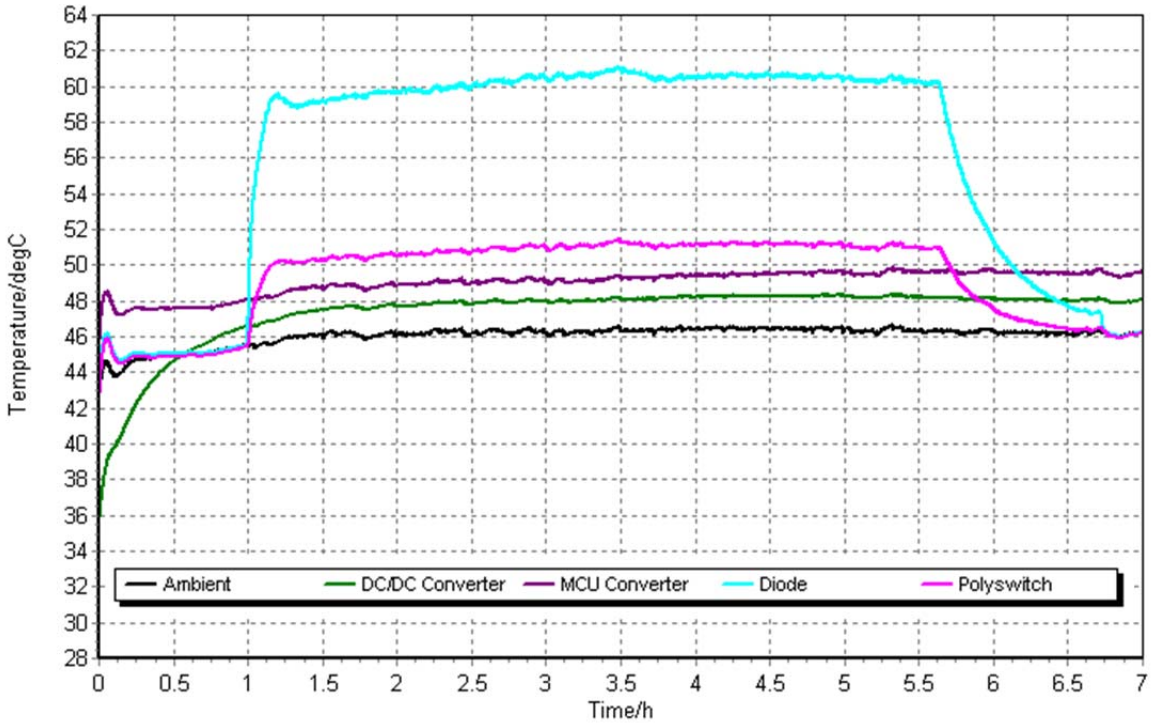
รูปที่ 1.6 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในตู้อบ (Ambient) และอุณหภูมิของ DC/DC converter



รูปที่ 1.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.8 ความจุไฟฟ้าแบบประจุ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.9 อุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

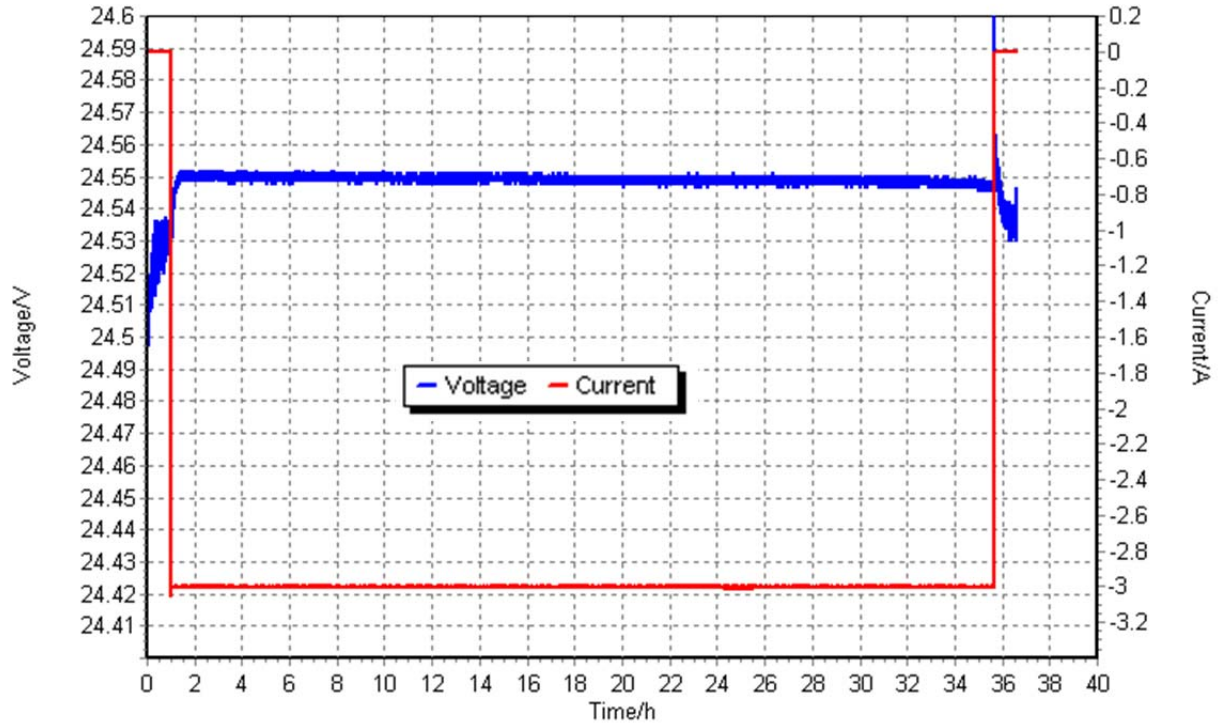
ข. การทดสอบความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (Discharge capacity test) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่ สำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 1.3 ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

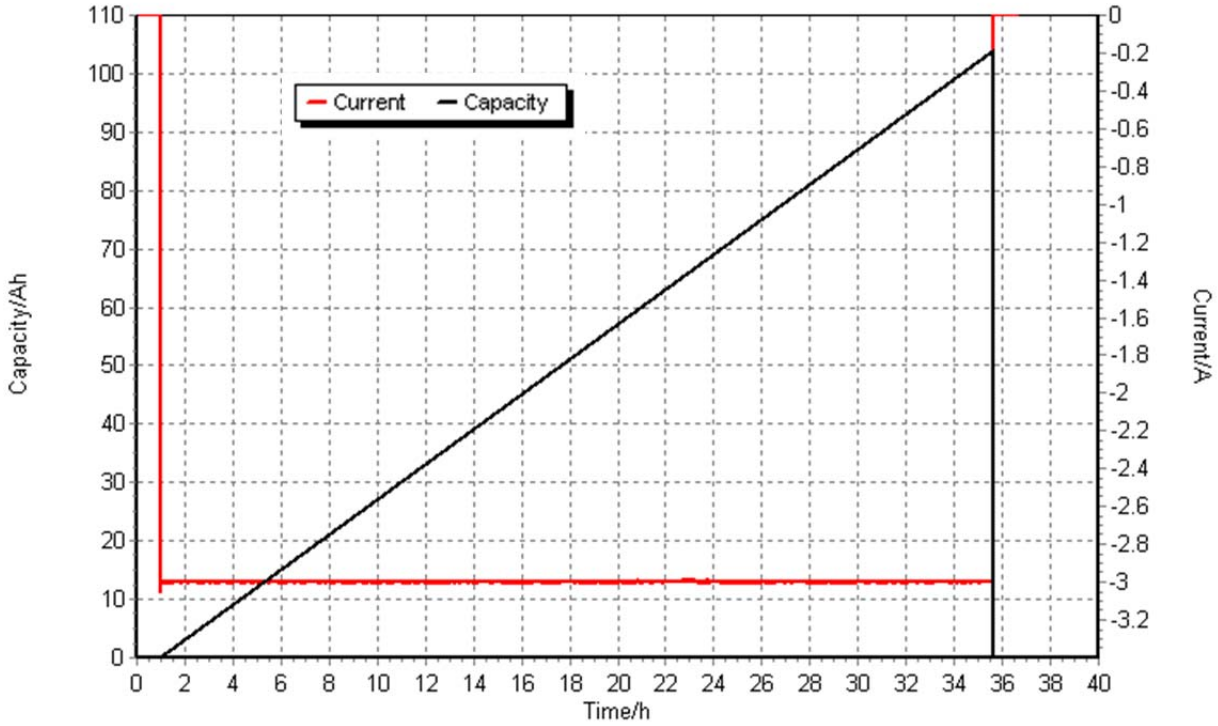
ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 3 แอมแปร์ แรงดันของชุดแบตเตอรี่จะลดลงจาก 29.4 โวลต์ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เท่ากับ แรงดันปล่อยประจุสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage) 21.7 โวลต์ จึงหยุดการทดสอบ

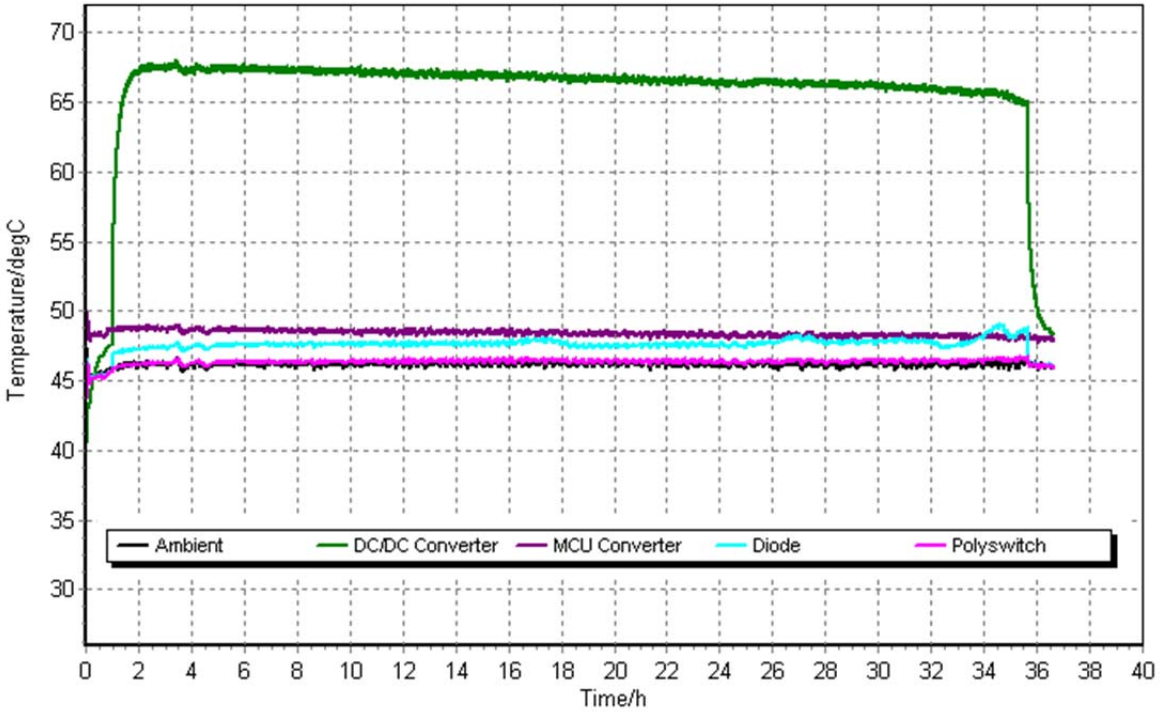
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 1.10 ความจุไฟฟ้าแบบประจุ และอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 1.11 และรูปที่ 1.12 จากผลการทดสอบพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ 103.9 แอมแปร์-ชั่วโมง โดยใช้เวลาในปล่อยประจุทั้งสิ้น 34 ชั่วโมง 38 นาที อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ขณะทำการปล่อยประจุอยู่ที่ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า (DC/DC Converter) เนื่องจากการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนที่ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำให้ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุที่วัดได้น้อยกว่าความจุไฟฟ้าแบบประจุ 21.8 แอมแปร์·ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 17.3 จากผลการทดสอบนี้สรุปได้ว่าระบบควบคุมหลักสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความปลอดภัยในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 1.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.11 ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.12 อุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ ขณะปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

7.2.2 การตรวจสอบการทำงานของแบตเตอรี่โมดูลก่อนทำการประกอบลงกล่อง

ก่อนทำการบรรจุแบตเตอรี่โมดูลลงกล่องแบตเตอรี่ แบตเตอรี่โมดูลจะถูกตรวจสอบคุณภาพของแบตเตอรี่และระบบจัดการลูกข่าย ว่ามีการทำงานที่ถูกต้องหรือไม่ การทดสอบแบตเตอรี่โมดูลด้วยกระบวนการการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ (Nominal capacity test) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยแบตเตอรี่โมดูลอยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ประจุแบตเตอรี่โมดูลแบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current/Constant Voltage, CC/CV) กล่าวคือ ประจุแบตเตอรี่โมดูลด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/2 (4.16 แอมแปร์) แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุสุดท้าย 29.4 โวลต์ จากนั้นประจุแบตเตอรี่โมดูลที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 29.4 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่โมดูลจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่า C/20 (1.04 แอมแปร์) จึงหยุดการประจุ

ขั้นตอนที่ 3 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

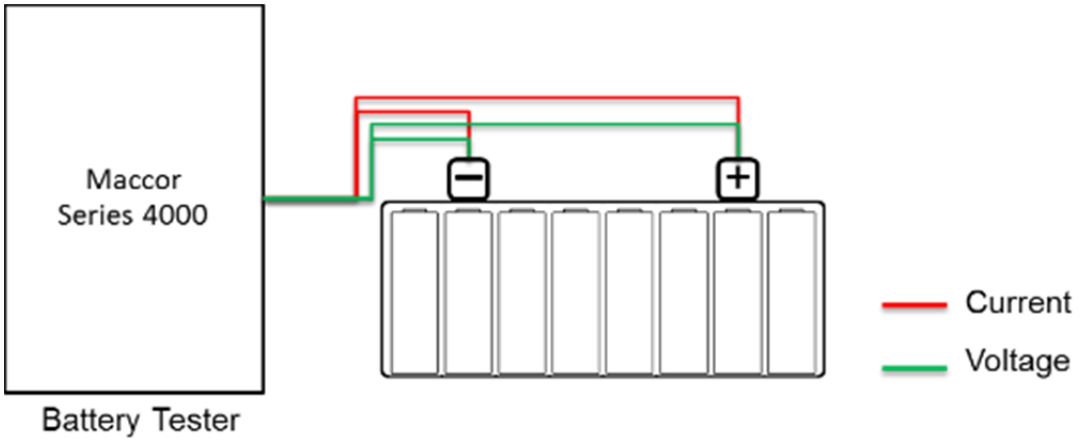
ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบการปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ C/5 (4.16A) แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลจะลดลงจาก 29.4 โวลต์ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลเท่ากับแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายของการปล่อยประจุ (cut-off discharge voltage หรือ 3 โวลต์) จึงหยุดการทดสอบการปล่อยประจุ

ขั้นตอนที่ 4 หยุดการทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

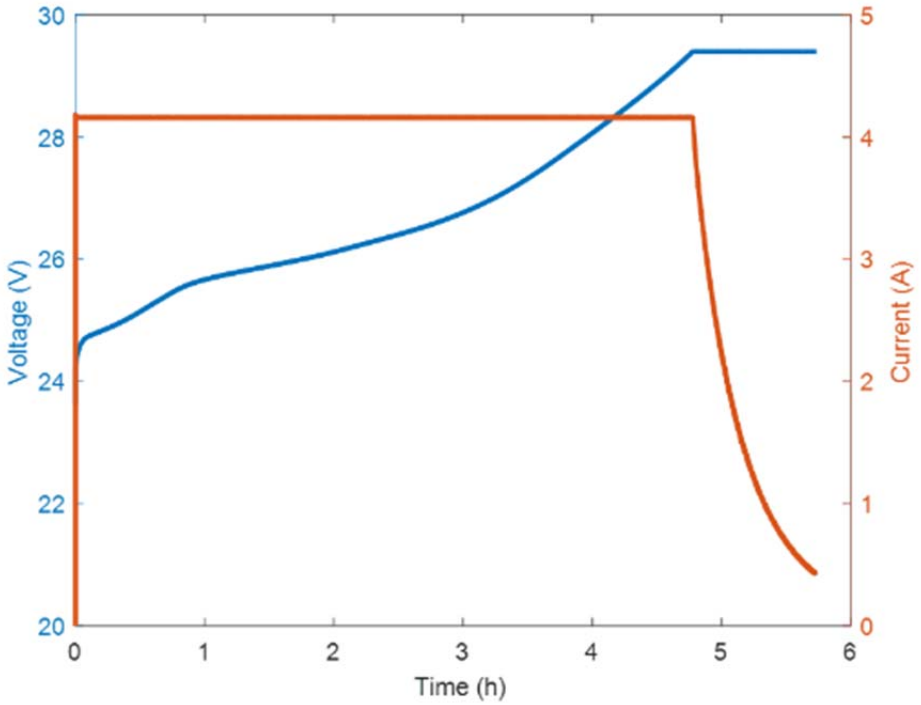
แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบแบตเตอรี่โมดูล ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 1.13 เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ ยี่ห้อ MACCOR รุ่น Series 4000 บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า ทุกๆ 1 วินาที ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุแสดงดังรูปที่ 1.14 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการปล่อย

ประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ แสดงดังรูปที่ 1.13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุแสดงดังรูปที่ 1.16 ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลจำนวน 30 โมดูลสำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุแสดงใน

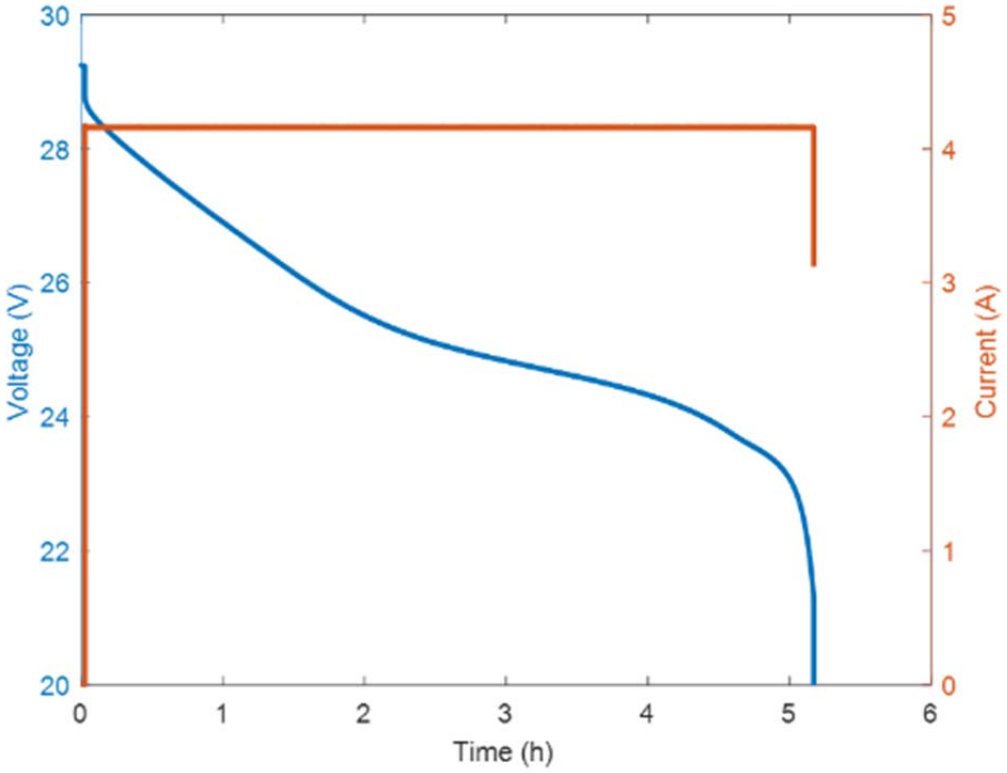
ตารางที่ 1.1 จากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความจุไฟฟ้าแบบประจุมีค่าเท่ากับ 21.0 แอมแปร์·ชั่วโมง และค่าเฉลี่ยของค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุมีค่าเท่ากับ 21.1 แอมแปร์·ชั่วโมง ส่วนค่าความจุไฟฟ้าระบุจากที่ออกแบบไว้ คือ 20.8 แอมแปร์·ชั่วโมง ค่าความจุไฟฟ้าระบุของแบตเตอรี่โมดูล 30 โมดูล ที่วัดได้จากการใกล้เคียงกับความจุไฟฟ้าระบุที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบตเตอรี่โมดูลทั้ง 30 โมดูลสามารถใช้งานได้ปกติ



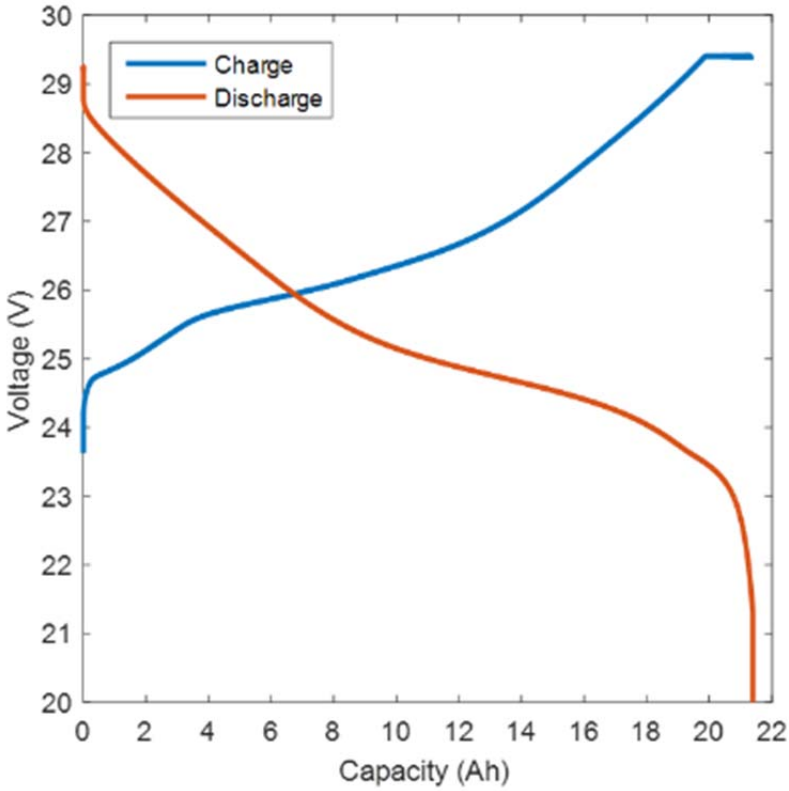
รูปที่ 1.13 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบแบตเตอรี่โมดูล ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 1.14 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ



รูปที่ 1.15 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับช่วงการปล่อยประจุไฟฟ้าของการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ



รูปที่ 1.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล #23 สำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ

ตารางที่ 1.1 ค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูลจำนวน 30 โมดูลสำหรับการทดสอบความจุไฟฟ้าระบุ

โมดูลที่	ค่าความจุไฟฟ้าแบบประจุ (แอมแปร์·ชั่วโมง)	ค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ (แอมแปร์·ชั่วโมง)
1	20.7	20.8
2	20.5	20.8
3	20.3	20.5
4	20.6	20.7
5	19.8	20.1
6	20.8	21.2
7	20.4	20.6
8	20.4	20.6
9	20.5	20.7
10	20.5	20.7
11	20.4	20.6
12	21.3	21.5
13	21.3	21.6
14	21.3	21.4
15	21.5	21.5
16	21.3	21.6
17	21.3	21.4
18	21.1	21.3
19	21.4	21.5
20	21.4	21.5
21	20.9	21.2
22	21.3	21.4
23	21.3	21.4
24	21.2	21.3
25	20.9	21.6
26	21.5	22.0
27	21.2	21.2
28	21.3	21.4
29	21.0	21.1
30	21.1	21.1
เฉลี่ย	21.0	21.1

7.2.3 การทดสอบการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังจากประกอบเสร็จสมบูรณ์

การทดสอบการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ มีขึ้นเพื่อให้มั่นใจว่าชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นมีการทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ในการทดสอบนี้ชุดแบตเตอรี่จะทดสอบการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ และทดสอบการปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง

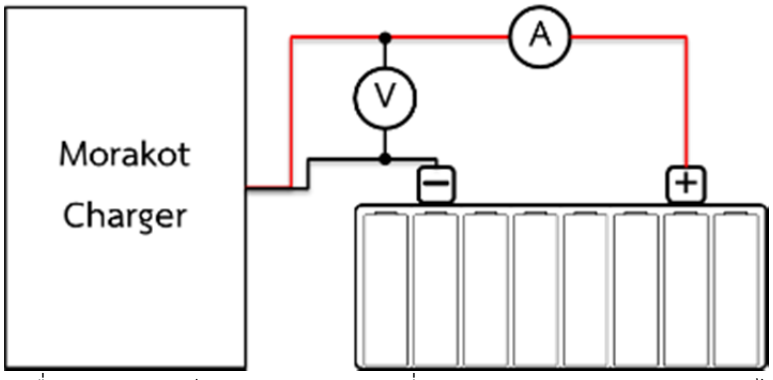
ก. การทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ

แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบประจุกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องชาร์จแสดงดัง รูปที่ 1.17 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Graphtec รุ่น Midi Logger GL840 บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ทุกๆ 1 วินาที เครื่องวัดกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Fluke รุ่น i30s ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟฟ้าขั้วบวก ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

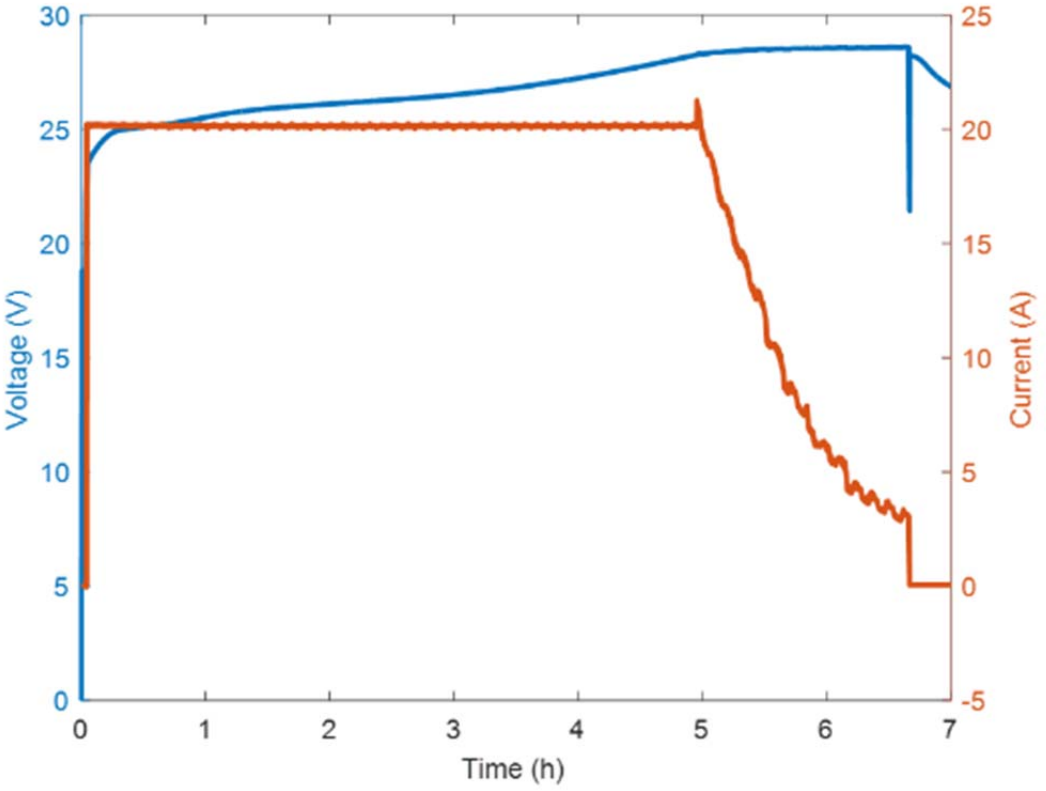
ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 เปิดเครื่องชาร์จ เพื่อประจุชุดแบตเตอรี่ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งเครื่องชาร์จหยุดทำงาน

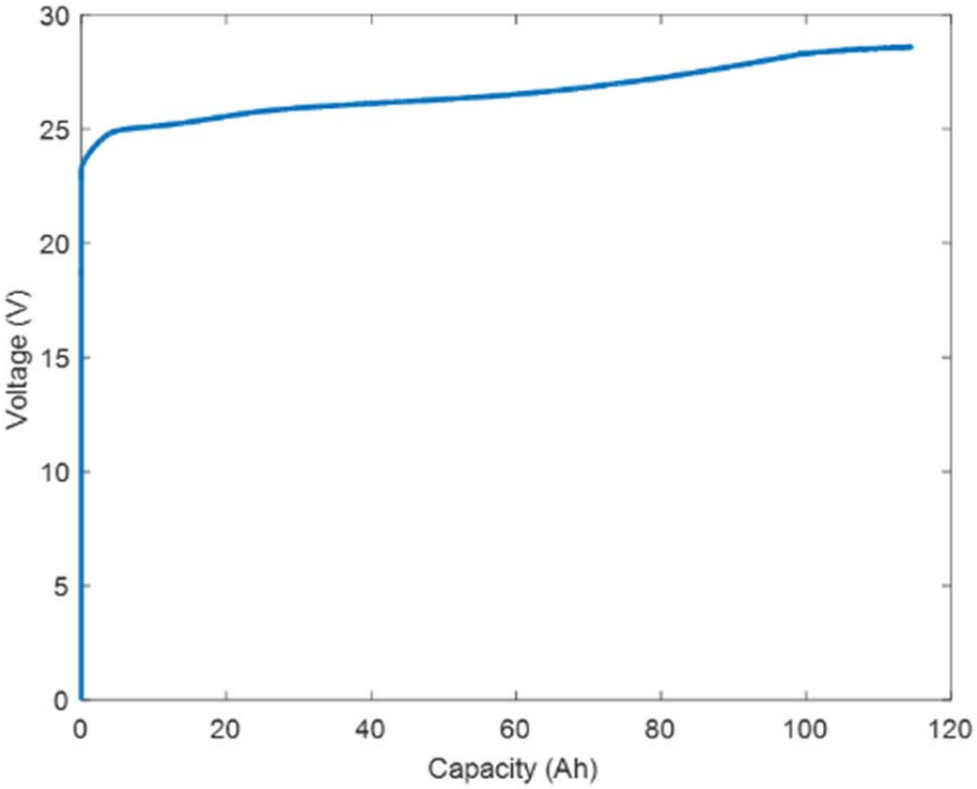
กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จแสดงในรูปที่ 1.18 เครื่องชาร์จประจุชุดแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่/แรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current/Constant Voltage) กล่าวคือ เครื่องชาร์จประจุกระแสไฟฟ้าด้วยค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 20.2 แอมแปร์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในการประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ 28.3 โวลต์ จากนั้นเครื่องชาร์จประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่ลดลง จนกระทั่งค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 2.2 แอมแปร์ จึงหยุดการประจุ ในขั้นการเปลี่ยนโหมดจากการประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ เป็นการประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ จะสังเกตุเห็นกระแสไฟฟ้าที่กระชากขึ้นสูง อย่างรวดเร็ว (Surge) ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 28.6 โวลต์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จแสดงในรูปที่ 1.19 ค่าความจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากระแสไฟฟ้าด้วยวิธีบูรณาการรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Integration) จากการทดสอบพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีค่าความจุไฟฟ้าแบบประจุ 114.4 แอมแปร์.ชั่วโมง ใช้เวลาในการประจุทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง 40 นาที ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าชุดแบตเตอรี่นี้มีการทำงานเป็นปกติสำหรับการประจุด้วยเครื่องชาร์จ



รูปที่ 1.17 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบประจุกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องชาร์จ



รูปที่ 1.18 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ



รูปที่ 1.19 แรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ

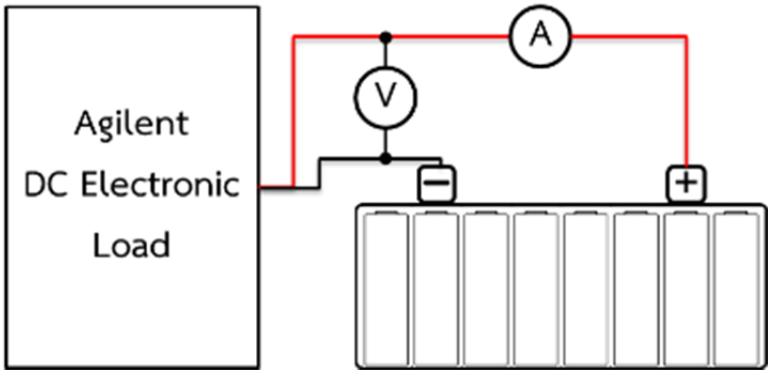
ข. การทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง

แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.20 ชุดแบตเตอรี่ต่อเชื่อมกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง (DC Electronic Load) ยี่ห้อ Agilent รุ่น N3301A เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Graphtec รุ่น Midi Logger GL840 บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ทุกๆ 1 วินาที เครื่องวัดกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Fluke รุ่น i30s ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟฟ้าขั้วบวก ขั้นตอนการทดสอบการมีดังต่อไปนี้

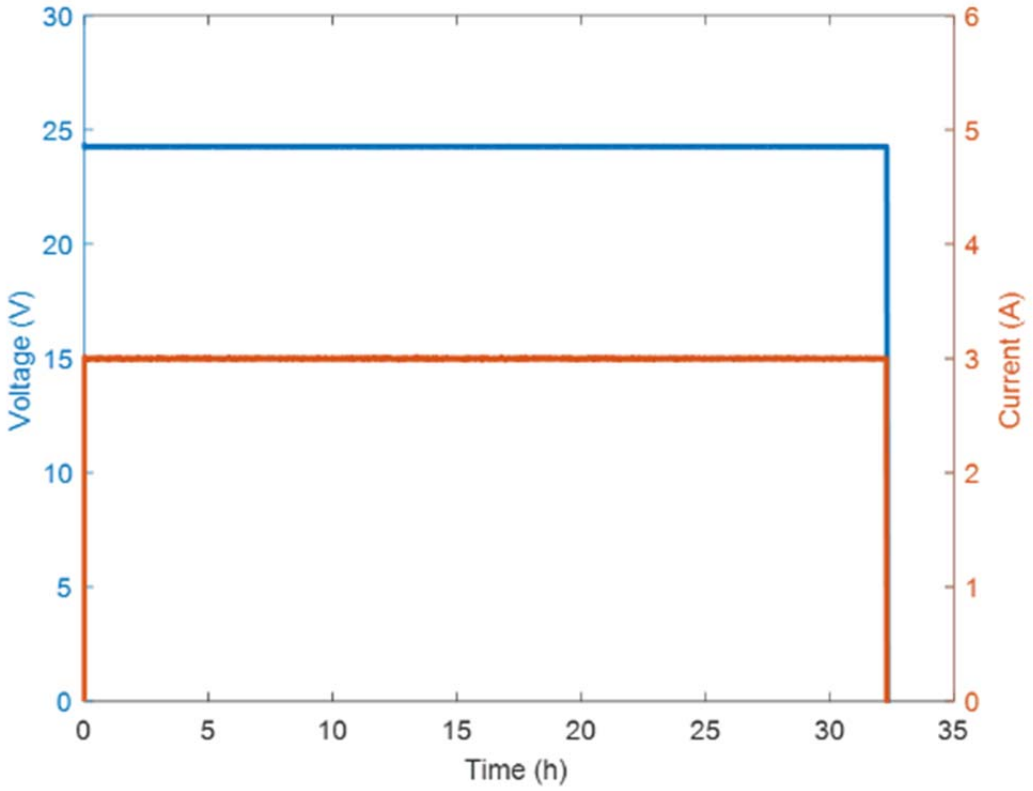
ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 3 แอมแปร์ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งชุดแบตเตอรี่หยุดการปล่อยประจุ

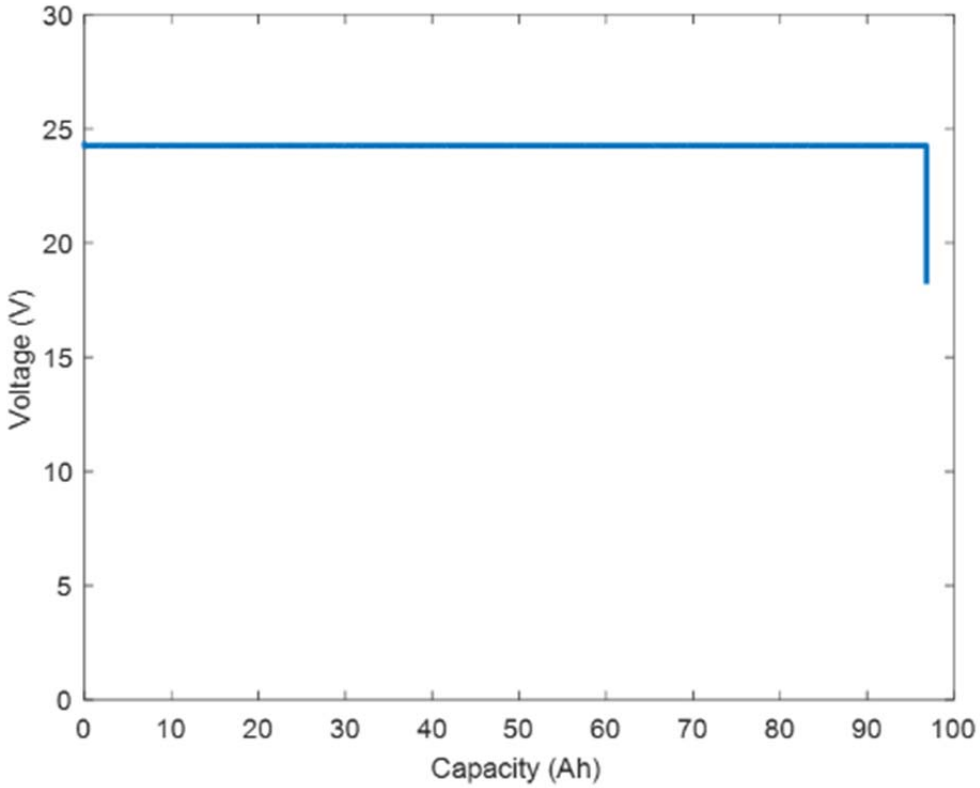
กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรงได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1.21 ค่าความจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากระแสไฟฟ้าด้วยวิธีบูรณาการรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Integration) ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรงแสดงในรูปที่ 1.22 รูปที่ 1.19 จากการทดสอบพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีค่าความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ 96.8 แอมแปร์·ชั่วโมง ใช้เวลาในการปล่อยประจุทั้งสิ้น 32 ชั่วโมง 18 นาที เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนที่ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำให้ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุที่วัดได้น้อยกว่าความจุไฟฟ้าแบบประจุ 17.6 แอมแปร์ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15.4 ดังนั้น จึงสรุปผลการทดสอบได้ว่าชุดแบตเตอรี่สามารถทำงานได้ปกติ



รูปที่ 1.20 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง



รูปที่ 1.21 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง



รูปที่ 1.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าสำหรับการทดสอบปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง

7.2.4 การทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test

การทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test มีขึ้นเพื่อให้มั่นใจว่าชุดแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นมีการทำงานได้ปกติตามที่ออกแบบไว้ ในการทดสอบวัฏจักรการใช้งานนี้ชุดแบตเตอรี่จะทดสอบการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ และทดสอบการปล่อยประจุด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กระแสตรง แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบประจุกระแสไฟฟ้าแสดงดัง รูปที่ 1.17 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบชุดแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.20

ขั้นตอนการทดสอบการมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ประจุชุดแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งเครื่องชาร์จหยุดทำงาน

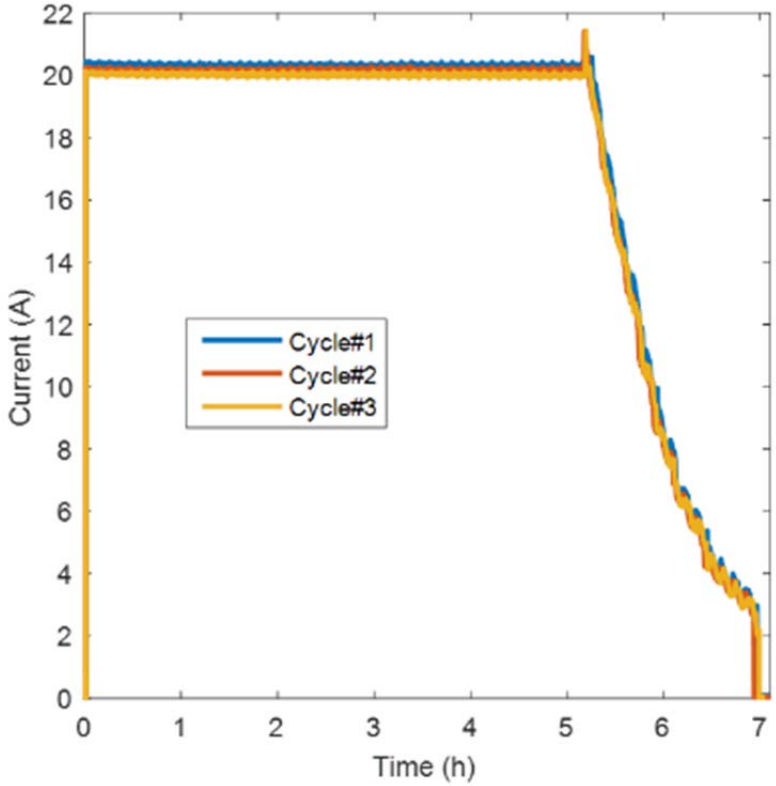
ขั้นตอนที่ 3 ปล่อยชุดแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 4 ปล่อยประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 3 แอมแปร์ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งชุดแบตเตอรี่หยุดการปล่อยประจุ

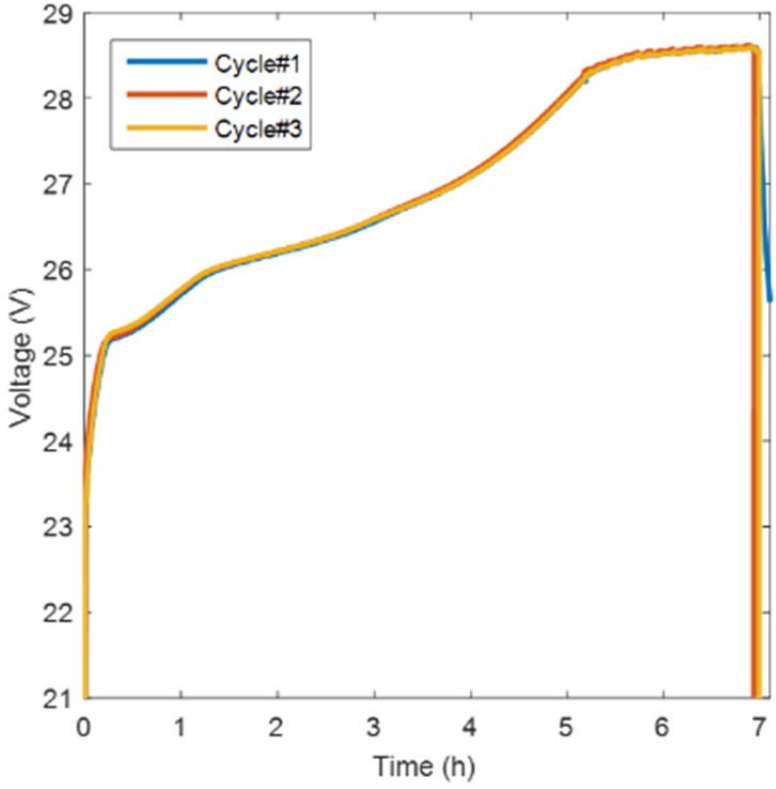
กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 1.23 และรูปที่ 1.24 เครื่องชาร์จประจุกระแสไฟฟ้าด้วยค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 20.2 แอมแปร์ และหยุดการประจุ เมื่อค่ากระแสไฟฟ้า 2.3 แอมแปร์ สำหรับการทดสอบทั้ง 3 รอบ ในขั้นการเปลี่ยนโหมดจากการประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ เป็นการประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ ยังคงสังเกตุเห็นกระแสไฟฟ้าที่กระชากขึ้นสูง อย่างรวดเร็ว (Surge) ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของชุดแบตเตอรี่ขณะประจุ คือ 28.6 โวลต์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test แสดงดังรูปที่ 1.27 ค่าความจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากระแสไฟฟ้าด้วยวิธีบูรณาการรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Integration)

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะปล่อยประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบแสดงดังรูปที่ 1.25 และรูปที่ 1.26 จากผลการทดสอบ พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบมากขึ้น เพราะประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่สูงขึ้น ทั้งนี้การสูญเสียพลังงานน้อยลงอาจเนื่องมาจากความร้อนที่เกิขึ้นและสะสมในชุดแบตเตอรี่ทำให้ความเครียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่หลังการทดสอบ Drop Test แสดงดังรูปที่ 1.28

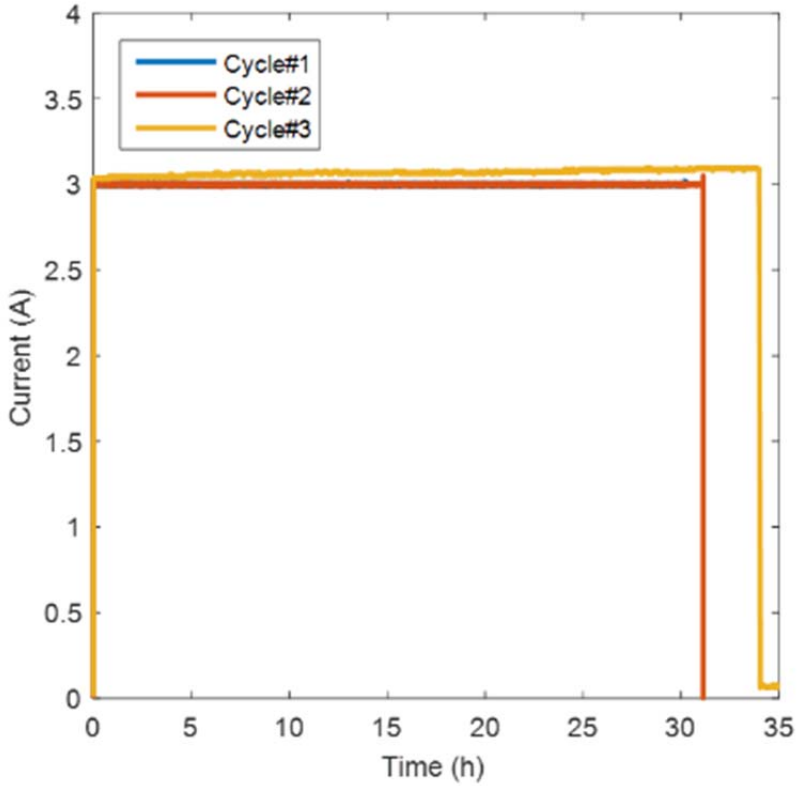
ตารางที่ 1.2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่และเวลา สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบจากการทดสอบพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าแบบประจุ 120.7 แอมแปร์·ชั่วโมง ใช้เวลาในการประจุโดยเฉลี่ย 6 ชั่วโมง 58 นาที และมีค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ 96.2 แอมแปร์·ชั่วโมง ใช้เวลาในการปล่อยประจุโดยเฉลี่ย 31 ชั่วโมง 47 นาที เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนที่ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำให้ความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุที่วัดได้น้อยกว่าความจุไฟฟ้าแบบประจุโดยเฉลี่ย 24.5 แอมแปร์ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 20.3 ของค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าแบบประจุ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าชุดแบตเตอรี่หลังการทดสอบ Drop Test สามารถทำงานได้ปกติ



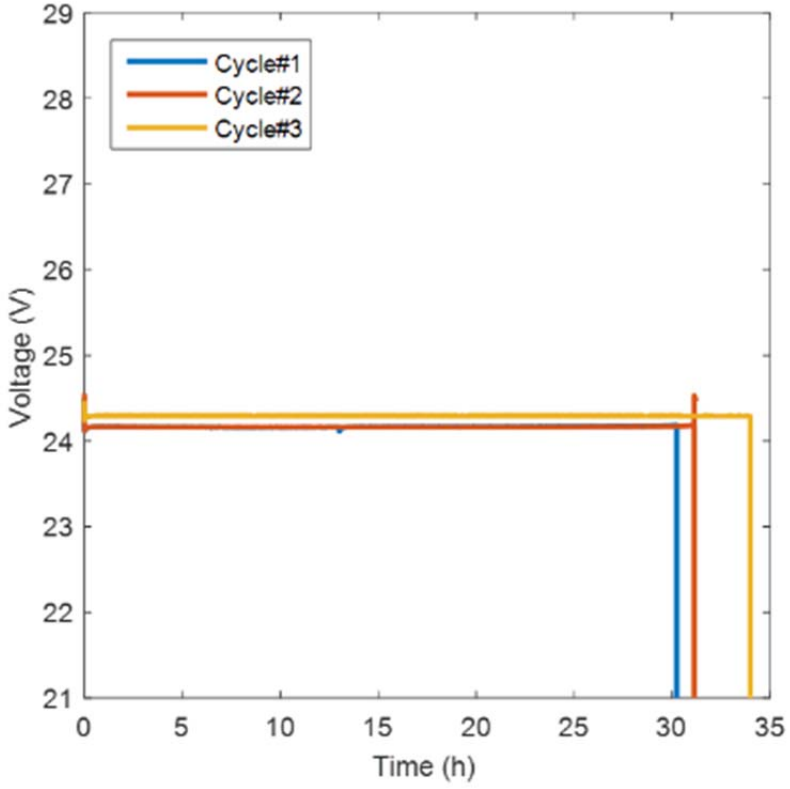
รูปที่ 1.23 กระแสไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ



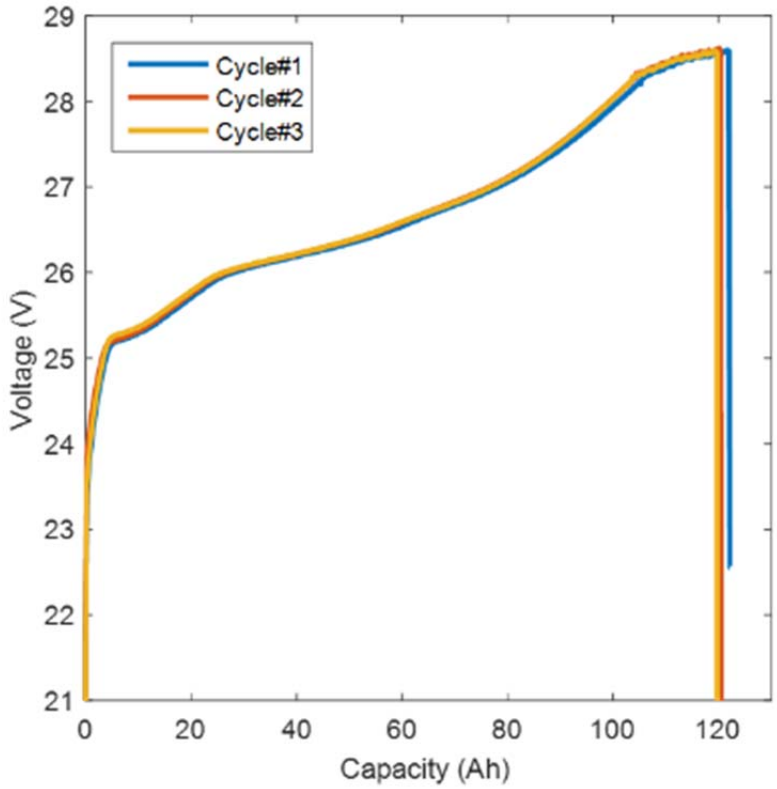
รูปที่ 1.24 แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ



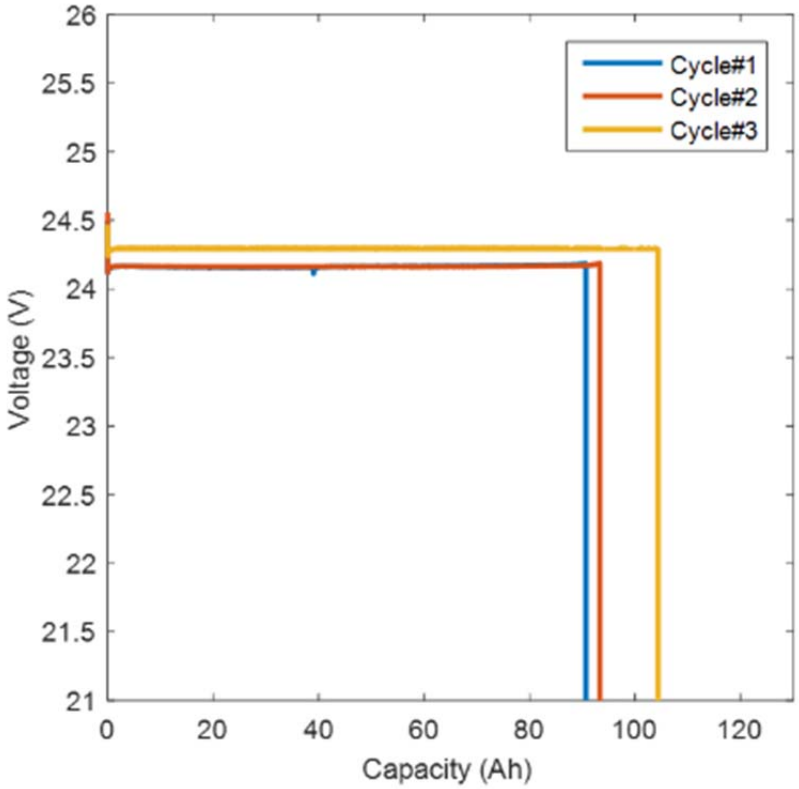
รูปที่ 1.25 กระแสไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะปล่อยประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ



รูปที่ 1.26 แรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ ขณะปล่อยประจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ



รูปที่ 1.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test



รูปที่ 1.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าแบบปล่อยประจุ สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ หลังการทดสอบ Drop Test

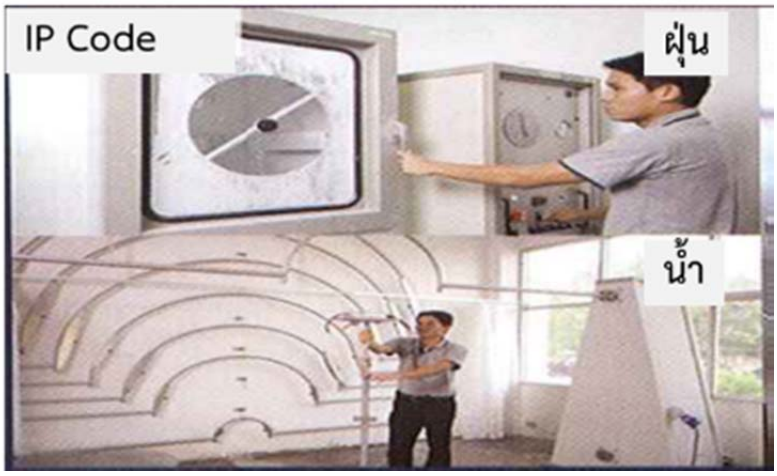
ตารางที่ 1.2 ค่าความจุไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่และเวลา สำหรับการทดสอบวัฏจักรการใช้งาน 3 รอบ

รอบที่	การประจุชุดแบตเตอรี่		การปล่อยประจุชุดแบตเตอรี่	
	ความจุไฟฟ้า (แอมแปร์·ชั่วโมง)	เวลา (ชั่วโมง)	ความจุไฟฟ้า (แอมแปร์·ชั่วโมง)	เวลา (ชั่วโมง)
1	122.0	6 ชั่วโมง 56 นาที	90.7	30 ชั่วโมง 14 นาที
2	120.4	6 ชั่วโมง 59 นาที	93.4	31 ชั่วโมง 8 นาที
3	119.7	6 ชั่วโมง 59 นาที	104.4	34 ชั่วโมง 0 นาที
เฉลี่ย	120.7	6 ชั่วโมง 58 นาที	96.2	31 ชั่วโมง 47 นาที

7.3 ทดสอบความทนทานแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G

7.3.1 Test Methods 506.5 Rain/ Test Methods 506.5 Sand and Dust

การทดสอบกันน้ำและกันฝุ่น ตามมาตรฐาน Mil-Std-810G นั้น เนื่องจากเครื่องมือทดสอบ Test Methods 506.5 Rain และ Test Methods 506.5 Sand and Dust นั้นไม่สามารถหาได้ในประเทศ ทางทีมวิจัยจึงตัดสินใจที่จะใช้การทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 513-2553 โดยจะทำการทดสอบที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แทนตามรูปที่ 1.29



รูปที่ 1.29 การทดสอบ IEC standard 60529 (IP Code) ที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

7.3.1.1 การเลือกระดับความป้องกันฝุ่นและน้ำ

โดยทางทีมวิจัยได้เลือกระดับของการป้องกันน้ำและฝุ่นของกล่องแบตเตอรี่เป็นระดับ IP55 ซึ่งรายละเอียดของรหัส IP ถูกแสดงอยู่ในแผนรูปที่ 1.30 โดยระดับ IP55 นั้นจะเป็นระดับที่สามารถป้องกันฝุ่นได้ โดยหมายความว่าไม่ได้ป้องกันฝุ่นเข้าได้ทั้งหมด แต่ฝุ่นที่เข้ามาต้องอยู่ในปริมาณที่ไม่รบกวนการทำงานของอุปกรณ์หรือทำให้ความปลอดภัยด้อยลง และสามารถป้องกันน้ำที่ฉีดเปลือกหุ้มจากทุกทิศทาง ต้องไม่ทำให้เกิดผลเสียหาย



องค์ประกอบ	ตัวเลขหรือตัวอักษร	ความหมายสำหรับการป้องกันบริภัณฑ์	ความหมายสำหรับการป้องกันบุคคล
รหัสตัวอักษร	IP	-	-
ตัวเลขแสดงลักษณะเฉพาะตัวที่ 1	0	การป้องกันการเข้าของสิ่งแปลกปลอมที่เป็นของแข็ง (ไม่ป้องกัน)	การป้องกันการเข้าถึงส่วนที่เป็นอันตรายด้วย (ไม่ป้องกัน)
	1	เส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 50 มิลลิเมตร	หลังมือ
	2	เส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 12.5 มิลลิเมตร	นิ้วมือ
	3	เส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 2.5 มิลลิเมตร	เครื่องมือ
	4	เส้นผ่านศูนย์กลาง ≥ 1.0 มิลลิเมตร	ลวด
	5	ป้องกันฝุ่น	ลวด
	6	ผนึกกันฝุ่น	ลวด
ตัวเลขแสดงลักษณะเฉพาะตัวที่ 2	0	การป้องกันน้ำเข้าไปทำความเสียหาย (ไม่ป้องกัน)	-
	1	น้ำหยดในแนวดิ่ง	
	2	น้ำหยด (เอียง 15 องศา)	
	3	พ่นละอองน้ำ	
	4	น้ำสาด	
	5	น้ำฉีด	
	6	น้ำฉีดอย่างแรง	
	7	จุ่มน้ำชั่วคราว	
	8	จุ่มน้ำต่อเนื่อง	

รูปที่ 1.30 แผนภูมิภาพแสดงรายละเอียดของรหัส IP

7.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- การทดสอบป้องกันการเข้าถึงส่วนที่เป็นอันตรายด้วยลวด (IP5X)
    - ใช้ลวดเหล็กกล้าแข็งตรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร กดลงที่ช่องเปิดของเปลือกหุ้มทุกท่าที่เป็นไปได้
- การทดสอบป้องกันฝุ่น (IP5X)
    - ทดสอบตัวอย่างในตู้ทดสอบเป็นเวลาต่อเนื่องกัน 8 ชั่วโมง
    - ฝุ่นที่ใช้ต้องสามารถผ่านแร่งที่ทำด้วยลวดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ 50 ไมโครเมตรและความกว้างระบุช่อง 75 ไมโครเมตร โดยฝุ่นที่ใช้มีปริมาณเท่ากับ 4 กิโลกรัม ตามปริมาตรของตู้ทดสอบฝุ่นขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร
- การทดสอบป้องกันน้ำ (IPX5)
    - ทดสอบโดยฉีดน้ำใส่เปลือกหุ้ม จากทุกทิศทางที่ทำได้ด้วยลำน้ำจากหัวฉีดทดสอบมาตรฐาน โดยมีภาวะต่างๆ ดังนี้
        - เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหัวฉีด 6.3 มิลลิเมตร
        - อัตราการฉีด 12.5 ลิตรต่อนาที

- ความดันของหัวฉีดปรับให้ได้ค่าที่ต้องการ ที่อัตราการฉีดที่กำหนด
- ช่วงเวลาทดสอบต้องเป็น 1 นาทีต่อรางเมตรของพื้นที่ผิวของเปลือกหุ้ม
- ระยะเวลาทดสอบ 3 นาที
- ระยะจากหัวฉีดถึงผิวเปลือกหุ้มประมาณ 2.5 เมตร

7.3.1.3 ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบการป้องกันฝุ่นและน้ำครั้งแรกนั้น ได้ผลตามตารางที่ 1.3 โดยพบว่า กล่องแบตเตอรี่นั้นสามารถที่จะป้องกันฝุ่นในระดับ IP5X ได้ แต่ยังไม่สามารถป้องกันน้ำในระดับ IPX5 ได้

ตารางที่ 1.3 ผลการทดสอบป้องกันฝุ่นและน้ำจากทางสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ระดับ		รายการทดสอบ	รายละเอียดโดยย่อ	ผลทดสอบ / หมายเหตุ	การตัดสิน
IP55	IP5X	ป้องกันการเข้าของสิ่งแปลกปลอมที่เป็นของแข็งตั้งแต่ Ø 1.0 มิลลิเมตร ขึ้นไป	โพรบวัดดู Ø 1.0 มิลลิเมตร ต้องเข้าในเปลือกหุ้มไม่ได้	โพรบวัดดู Ø 1.0 มิลลิเมตรไม่สามารถเข้าไปในเปลือกหุ้มได้	P
		ป้องกันฝุ่น	ไม่ป้องกันการเข้าไปของฝุ่นทั้งหมด แต่ป้องกันในปริมาณที่จะเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของบริภัณฑ์	ฝุ่นไม่สามารถเข้าถึงภายในเปลือกหุ้มได้	P
	IPX5	ป้องกันน้ำฉีด	น้ำที่ฉีดเปลือกหุ้มจากทุกทิศทางไม่ทำให้เกิดผลเสียหาย	น้ำสามารถเข้าไปในตัวอย่างได้ในปริมาณมากและทำให้เกิดผลเสียหาย	F

ทางทีมวิจัยจึงได้นำกล่องแบตเตอรี่กลับไปปรับปรุงใหม่เพื่อที่จะสามารถป้องกันน้ำในระดับ IPX5 โดยมีการทดสอบโดยใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงซึ่งแสดงในรูปที่ 1.31 เพื่อที่จะหาจุดบกพร่อง และทำการแก้ไขก่องที่จะส่งไปทดสอบที่ศูนย์ทดสอบกลางอีกครั้งหนึ่ง โดยพบว่าช่องระหว่าง Connector ทั้งสองนั้นยังมีน้ำซึมเข้ามาได้ ทางทีมวิจัยจึงได้เพิ่มซีลระหว่าง connector และ ตัวกล่องแบตเตอรี่อีก เพื่อในสามารถป้องกันน้ำได้



รูปที่ 1.31 การทดสอบโดยใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง

หลังจากที่ทางทีมวิจัยได้ทำการแก้ไขจุดบกพร่องในด้านการป้องกันน้ำแล้ว กล่องแบตเตอรี่ได้ถูกนำไปทดสอบการป้องกันน้ำต่อที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) โดยผลการทดสอบถูกแสดงในตารางที่ 1.4 โดยกล่องแบตเตอรี่นั้นสามารถผ่านการทดสอบป้องกันน้ำที่ระดับ IPX5 ได้

ตารางที่ 1.4 ผลการทดสอบป้องกันน้ำจากทางศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

Test item	Test specification	Test method	Result
IPX5 test	Nozzle 6.3 mm diameter, distance 2.5 m to 3m	IEC 60529 (2001-02)	**PASS**

โดยรายงานการทดสอบการป้องกันน้ำและฝุ่นจากทางสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในภาคผนวก ข.

7.3.3 Test Methods 514.6 Vibration

ทางทีมวิจัยมีความต้องการที่จะทดสอบการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นมา เพื่อเป็นการจำลองผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง และส่งผลต่อแบตเตอรี่ โดยจะส่งชิ้นงานไปทดสอบที่สถาบันไฟฟ้าและเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทางสถาบันไฟฟ้าและเล็กทรอนิกส์มีเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนตามรูปที่ 1.32 โดยทางทีมวิจัยจึงตัดสินใจที่จะใช้การทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 2217-2548 แทน เนื่องจากเครื่องทดสอบของทางสถาบันไฟฟ้าและเล็กทรอนิกส์นั้นไม่สามารถที่จะทดสอบตาม MIL STD 810G/ Test Methods 514.6 Vibration ได้



รูปที่ 1.32 เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน ที่สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

7.3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

- วิธีการทดสอบ

ให้นำเซลล์หรือแบตเตอรี่ที่ประจุเต็มไปทดสอบการสั่น ตามภาวการณ์ทดสอบข้างล่างและลำดับ ให้เซลล์ หรือแบตเตอรี่ รับการสั่นด้วยการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเชิงเดี่ยวที่มี่ แอมพลีจูด 0.76 มิลลิเมตรและการเคลื่อนรวมสูงสุด 1.52 มิลลิเมตร ให้แปรผันความถี่ด้วยอัตรา 1 เฮิรตซ์ต่อนาทีในระหว่างขีดจำกัด 10 เฮิรตซ์กับ 55 เฮิรตซ์พิสัยทั้งหมดของความถี่ (10 เฮิรตซ์ถึง 55 เฮิรตซ์) และกลับ (55 เฮิรตซ์ถึง 10 เฮิรตซ์) เป็นเวลา 90 นาที± 5 นาทีสำหรับแต่ละตำแหน่งติดตั้ง (ทิศทางการสั่ง) ให้สั่นแบตเตอรี่ในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันสามทิศทางตามลำดับ โดยเกณฑ์ตัดสินในการยอมรับ คือ ไม่เกิดไฟ ไม่ระเบิด และไม่รั่วซึม

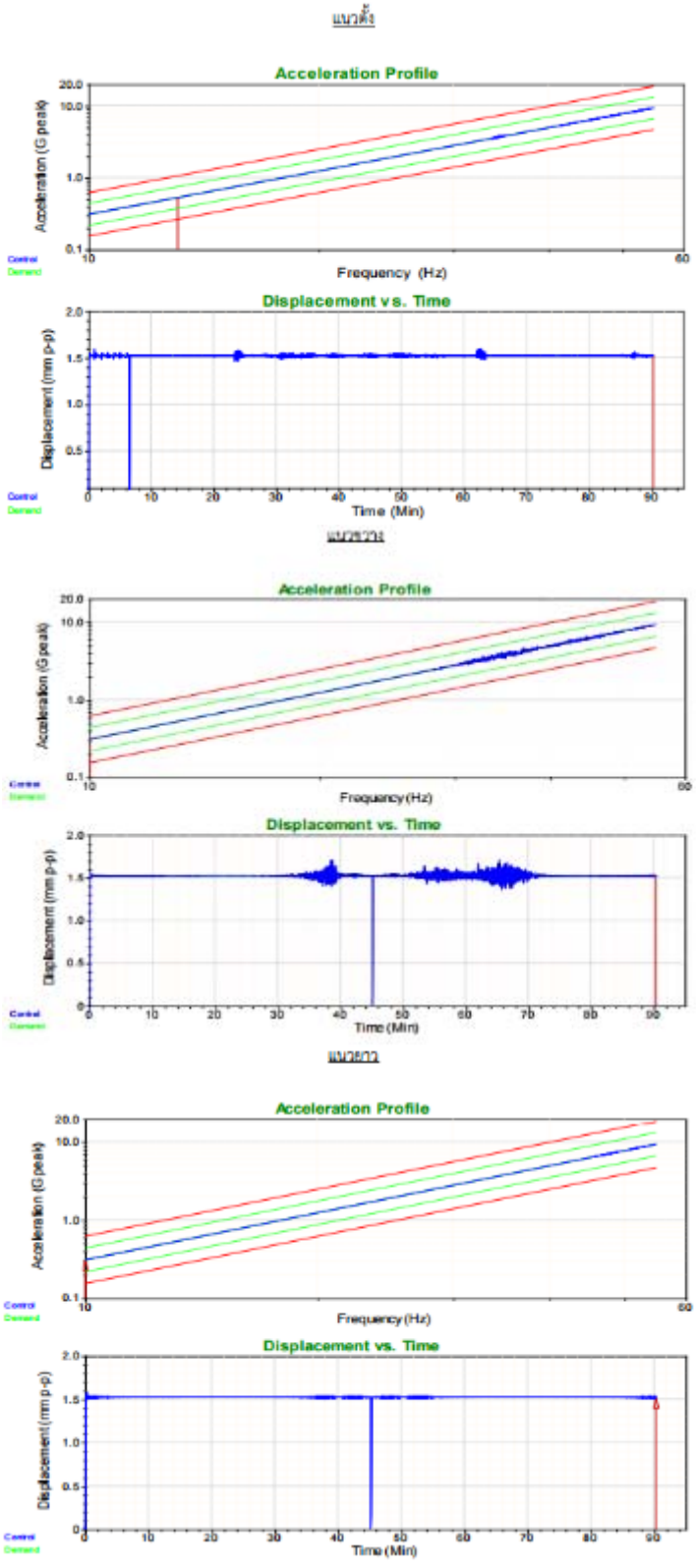
- เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบ ตามตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 เครื่องมือสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน

Equipment	Specifications	Manufacturer	Model	Serial No.
Vibration generator	Max. Acceleration: 110 g Max. Velocity: 1.8 m/s Max. Displacement: 50.8 mm Force: 35000 N	TIRA	TV 59335/AIT-340 TGT MO 48 XL	003/07
Vibration controller	-	VR	8500	12B7D7
Control accelerometer	Reference sensitivity: 10.49 mV/g@100Hz	ENDEVCO	7251B-11/EE0443	10119

7.3.3.2 ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 1.33 แสดงแสดงความเร่งและการเคลื่อนที่ระหว่างการทดสอบการสั่นสะเทือน โดยพบว่าหลังที่ได้ทำการทดสอบการสั่นสะเทือนทั้งสามแกนแล้ว ไม่เกิดไฟ ไม่ระเบิด ไม่รั่วซึม และ แบตเตอรี่ยังสามารถใช้งานได้



รูปที่ 1.33 แสดงความเร่งและการเคลื่อนที่ระหว่างการทดสอบการสั่นสะเทือน

โดยรายงานการทดสอบการสั่นสะเทือนจากทางสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในภาคผนวก ค.

7.3.4 Test Methods 516.6 Shock

โดยการทดสอบแรงช็อกนั้นจะทำโดยการปล่อยชิ้นงานจากที่สูง โดยความสูงที่ถูกปล่อยลงมานั้นจะมีกำหนดได้ตามตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.6 Procedure IV - Transit Drop

Weight of Test Item & Case kg (lbs.)	Largest Dimension, cm (in)	Height of Drop, h cm (in)	Number of Drops
Under 45.4 (100) Man-packed or man-portable	Under 91 (36)	122 (48)	Drop on each face, edge and corner; total of 26 drops*
	91 & over	76 (30)	
45.4 - 90.8 (100 – 200) inclusive	Under 91	76 (30)	Drop on each corner; total of eight drops
	91 & over		
90.8-454 (200 – 1000) inclusive	Under 91	61 (24)	
	91 – 152 (36 – 60)		
	Over 152		
Over 454	No limit	46 (18)	Drop on each bottom edge. Drop on bottom face or skids; total of five drops

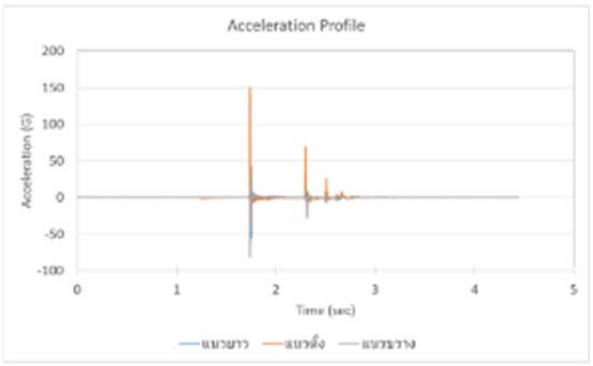
7.3.4.1 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบแรงช็อกนั้นจะทำโดยการปล่อยชิ้นงานจากที่สูงนั้น กล่องแบตเตอรี่จะถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระจากความสูง 122 เซนติเมตร โดยจะทำการปล่อยให้ตกลงมาทั้ง 6 ด้านของตัวกล่องแบตเตอรี่ ซึ่งในระหว่างการทดสอบ ทางทีมวิจัยได้ติดตั้ง Accelerometer (Bruel & Kjaer/Triaxial 4504-A) แบบ 3 แกน ไว้ที่ตัวกล่องแบตเตอรี่ด้วย

7.3.4.2 ผลการทดสอบ

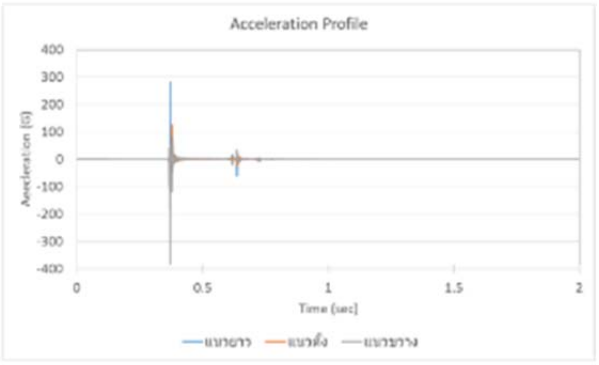
กล่องแบตเตอรี่จะถูกปล่อยให้ตกทั้งหกด้านตามรูปที่ 1.34 จากผลการทดสอบพบว่าความเร่งสูงสุดของชิ้นงานระหว่างตกกระทบนั้นมีค่าอยู่ที่ 480 G (ครั้งที่ 3) โดยพบว่าหลังที่ได้ทำการทดสอบแรงช็อกนั้นจะทำโดยการปล่อยชิ้นงานจากที่สูงแล้ว ไม่เกิดไฟ ไม่ระเบิด ไม่รั่วซึม และ แบตเตอรี่ยังสามารถใช้งานได้ โดยรายงานการทดสอบการปล่อยชิ้นงานจากที่สูงนั้นจากทางสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในภาคผนวก ง.





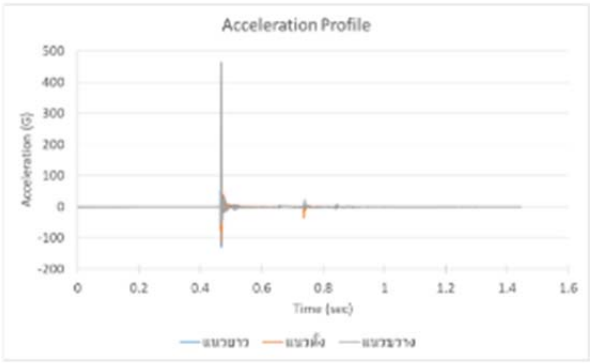
ครั้งที่ 1





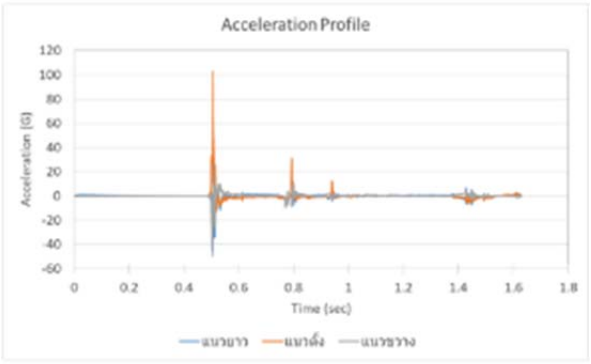
ครั้งที่ 2





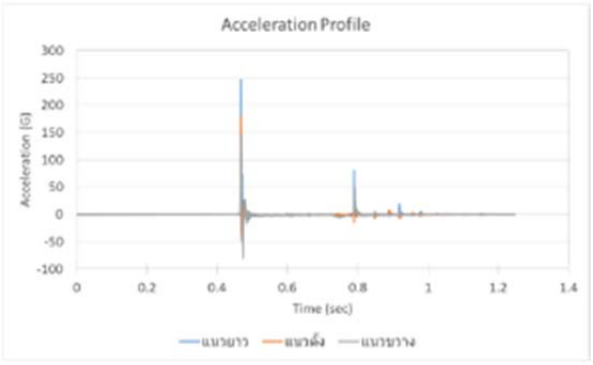
ครั้งที่ 3





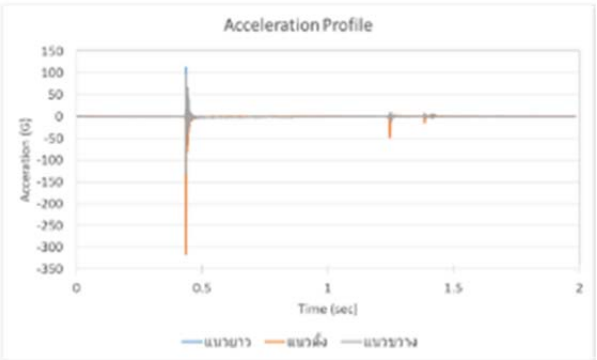
ครั้งที่ 4





ครั้งที่ 5





ครั้งที่ 6

รูปที่ 1.34 รูปถ่ายแสดงการตกทั้ง 6 ด้านของกล่องแบตเตอรี่ และ ความเร่งระหว่างตก

7.4 การทดสอบชุดแบตเตอรี่ด้านการเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนาได้ถูกทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ดังรูปที่ 0.23 ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) โดยในโครงการนี้ต้นแบบเครื่องชาร์จแบบที่ได้ 2 ถูกทดสอบ การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ตามมาตรฐาน EN 61000-6-4 และ ความคงทนต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMS) ตามมาตรฐาน EN 61000-6-2

โดยมีหัวข้อการทดสอบ และผลการทดสอบผ่านทั้ง 4 หัวข้อการทดสอบ ดังตารางที่ 1.7 โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

- Emission Testing (ตามมาตรฐาน EN 61000-6-4): การทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission) ของผลิตภัณฑ์
    - Radiated Emission: การทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศ (Test Method CISPR 16-2-3:2006)

ตารางที่ 1.7 ตารางแสดงผลการทดสอบ EMC เครื่องชาร์จรุ่นที่2

Test Item	Test Specification	Test Method	Result
Radiated Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	PASS
Radiated Immunity	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A	IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1)	PASS
	EN61000-6-2:2005,1400MHz to 2000 MHz, 3V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
	EN61000-6-2:2005,2000MHz to 2700 MHz, 1V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
Power frequency Magnetic	EN61000-6-2:2005, Table 1.1,30A/m 50Hz, Criterion A	EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0)	PASS
Electrostatic Discharge	EN61000-6-2:2005, Table1.5,8kV air, 4kV contact, Criterion B	IEC61000-4-2:2008 (Ed 2.0)	PASS

- Immunity Testing (ตามมาตรฐาน EN 61000-6-2): การทดสอบเพื่อหาระดับภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถทนต่อการรบกวนได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่
    - Radiated Immunity: การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Radiated Immunity) Test Method IEC 61000-4-3:2008
    - Electrostatic Discharge คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge Immunity) Test Method IEC 61000-4-2:2008
    - Power Frequency Magnetic Field คือ การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง (Power Magnetic Field Immunity) Test Method IEC 61000-4-8:2009

7.5 ทดสอบการเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับตัวปืน

7.5.1 การทดสอบการเชื่อมต่อกับตัวปืนครั้งที่ 1

วันที่ 16 สิงหาคม 2559 ทางทีมงานสร้างต้นแบบ ได้นำชุดแบตเตอรี่ต้นแบบไปเชื่อมต่อกับระบบควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ ณ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน จังหวัดลพบุรี ดังแสดงในรูปที่ 1.35 ซึ่งการนำไปติดตั้งครั้งนี้เป็นการทดสอบความสามารถในการทำงานของชุดแบตเตอรี่ต้นแบบร่วมกับระบบควบคุมทิศทางของปืนใหญ่ โดยจากการทดสอบผลที่ออกมาระบบนำร่องของปืนสามารถทำงานได้ รูปที่ 1.36 โดย

ก. ขนาดของต้นแบบที่สามารถติดตั้งทดแทนแบตเตอรี่ที่เคยใช้งานอยู่ได้
ข. น้ำหนักของต้นแบบมีน้ำหนักที่เหมาะสมดี (จากการทดลองของผู้ใช้)
ค. ขั้วไฟฟ้าและขั้วสื่อสารของชุดแบตเตอรี่สามารถเชื่อมต่อกับขั้วที่มีอยู่ของปืนใหญ่
ง. ชุดต้นแบบสามารถจ่ายกระแสให้ระบบปืนใหญ่ได้ โดยเมื่อวัดกระแสและแรงดัน ได้ค่าตามที่คาดการณ์และออกแบบไว้ โดยทางต้นแบบชุดแบตเตอรี่ของคณะวิจัยมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟให้ระบบ โดยปืนใหญ่ดึงกระแสจากชุดแบตเตอรี่ในระดับ 2.69-2.7A และชุดแบตเตอรี่คงระดับความดันไว้ที่ 24 V คงที่
จ. ชุดต้นแบบสามารถสื่อสารกับระบบปืนใหญ่ได้ ในการแสดงสถานะของแบตเตอรี่ โดยสถานะที่แสดงในจอแสดงผลของระบบนำร่องปืน ณ เวลาทดสอบ คือ ‘‘Full‘‘ ซึ่งตรงตามสถานะของชุดต้นแบบที่ทำการชาร์จไปค่อนข้างเต็ม



รูปที่ 1.35 ถอดแบตเตอรี่เดิมที่ติดมากับตัวปืน เพื่อติดตั้งแบตเตอรี่ของทางทีมงาน



รูปที่ 1.36 จอแสดงสถานะหลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ของทางทีมงาน

7.5.2 การส่งมอบต้นแบบชุดแบตเตอรี่ และการติดตามการใช้งาน

เมื่อประกอบชุดต้นแบบ และทดสอบแล้ว จึงส่งมอบต้นแบบชุดแบตเตอรี่ มรกต 12024V01 และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ให้ผู้ใช้ได้ทดลองใช้งานก่อนในเบื้องต้น พร้อมทั้งแนะนำการใช้งานให้กับผู้ใช้ เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2559 ดังรูปที่ 1.37 โดยสิ่งที่ส่งมอบได้แก่

- MORAKOT 12024V01 จำนวน 2 ชุด (G003 และ G004)
- MORAKOT CHARGER 01 จำนวน 1 ชุด (C001) พร้อมสายชาร์จ
- (ร่าง) คู่มือ จำนวน 2 ชุด
- แบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ สำหรับ G003 และ G004 จำนวน 1 ชุด/ต้นแบบ

เมื่อส่งมอบแล้ว ทีมวิจัยได้ติดตามผลการใช้งานต้นแบบ ณ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน ต. เขาพระงาม อ.เมือง จ.ลพบุรี วันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2560 เพื่อติดตามการใช้งาน และการชาร์จ ต้นแบบ MORAKOT 12024-01 G003 และ G004 และสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้ ดังรูปที่ 1.38
จากการศึกษา แบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ G003 และ G004 รูปที่ 1.39 พบว่า

- มีการทดลองต่อต้นแบบกับปืน ต้นแบบละ 1 ครั้ง โดยเปิดทิ้งไว้ จนกว่าแบตเตอรี่จะหมด รวมระยะเวลาในการใช้งานต่อเนื่อง 35 ชั่วโมง และ 42 ชั่วโมง สำหรับต้นแบบ G003 และ G004 ตามลำดับ ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน (มากกว่า 30 ชั่วโมง)
- ต้นแบบทั้งสองชุด ถูกชาร์จ 2 ครั้ง ต้นแบบ G003 ใช้เวลาในการชาร์จ 6-7 ชั่วโมง และต้นแบบ G004 ใช้เวลาชาร์จครั้งแรก 6 ชั่วโมงครึ่ง ซึ่งตรงตามที่ได้ออกแบบไว้

และจากการสอบถามผู้ใช้มีข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นเพิ่มเติมดังนี้

- เนื่องจาก LED แสดงระดับพลังงาน จะติดตลอดเวลาเมื่อต่อกับปืน แต่ทางผู้ใช้งานต้องการให้ดับ ไม่ต้องการให้ติดตลอดเวลา เมื่อต้องการกดดูระดับพลังงานถึงค่อยติด
- ควรสลับช่องเสียบสายชาร์จ และดิสชาร์จ เบื้องต้นผู้ใช้ได้คลายสายไฟเพิ่มเติมเพื่อให้เสียบดิสชาร์จ (ใช้งาน) ได้ก่อน

จากข้อเสนอแนะของผู้ใช้ ทีมวิจัยจะรวบรวมข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาต้นแบบรุ่นต่อไป นอกจากนี้ทีมวิจัยมีแผนจะติดตามการใช้งานจาก แบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ และสอบถามจากผู้ใช้ อย่างต่อเนื่องต่อไป (ประมาณ 1ครั้ง/2เดือน)



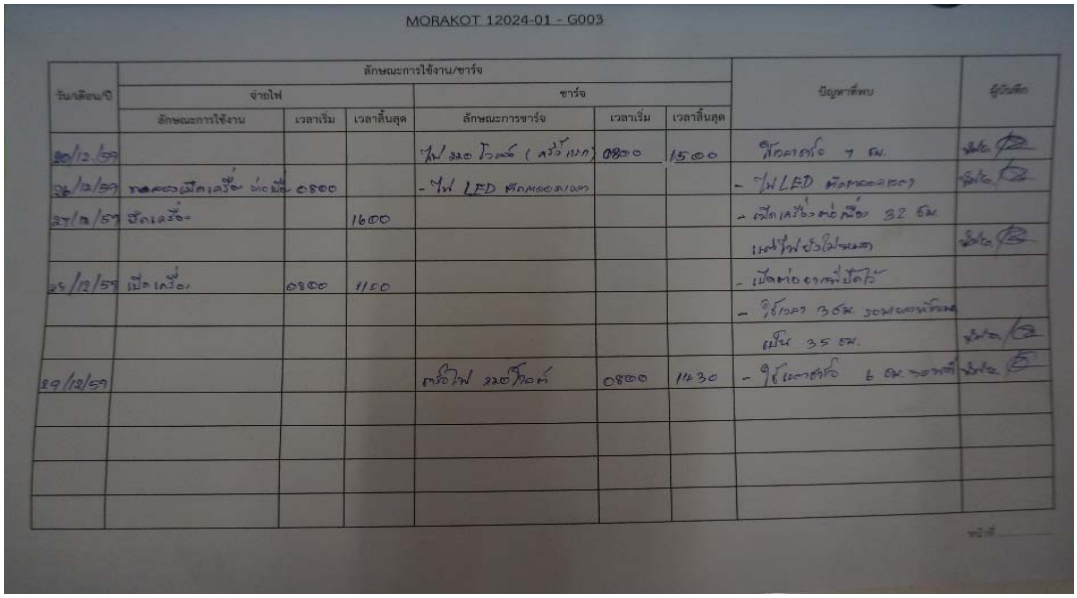


รูปที่ 1.37 การส่งมอบต้นแบบ และอบรมการใช้งาน เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ.2559





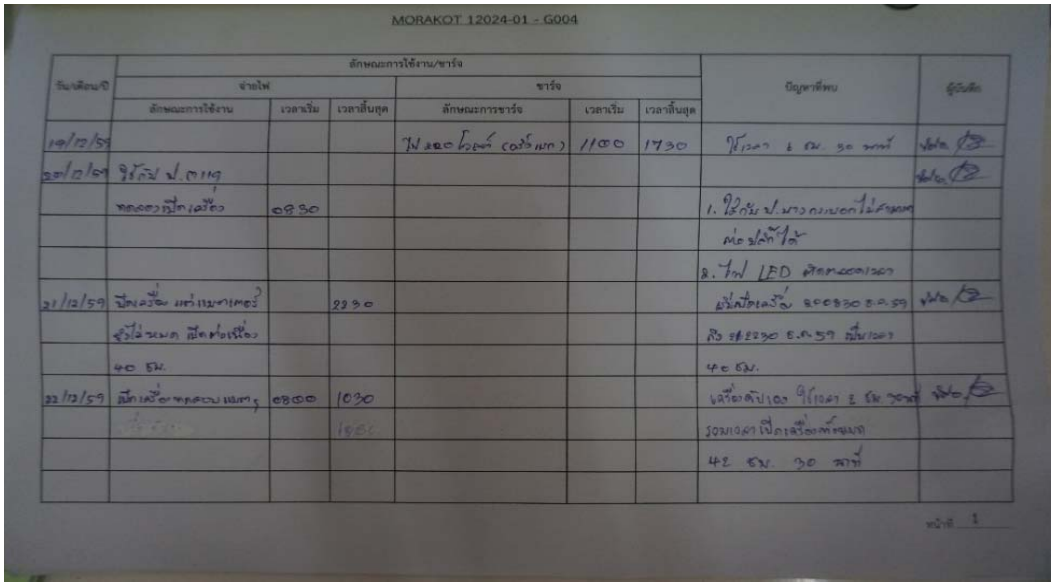
รูปที่ 1.38 การติดตามการใช้งานต้นแบบ เมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ.2560



MORAKOT 12024-01 - G003

วัน/เดือน/ปี	ลักษณะการใช้งาน/ชาร์จ						ปัญหาที่พบ	ผู้บันทึก
	จ่ายไฟ			ชาร์จ				
	ลักษณะการใช้งาน	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด	ลักษณะการชาร์จ	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด		
20/12/59				ไฟ 220 โวลต์ (สว่างมาก)	0830	1500	ปิดการทำงาน 4 ชม.	
24/12/59	ทดลองเปิดเครื่อง ก่อนเที่ยง	0800		- ไฟ LED ติดหลอดเดียว			- ไฟ LED ติดหลอดเดียว	
25/12/59	ปิดเครื่อง		1600				- เปิดเครื่องก่อนเที่ยง 32 ชม.	
							เหลือไฟข้างในหลอด	
26/12/59	เปิดเครื่อง	0800	1150				- เปิดก่อนการทำงาน	
							- ปิดการทำงาน 36 ชม. 30 นาที	
							เป็น 35 ชม.	
29/12/59				เครื่องไฟ 220 โวลต์	0800	1130	- ปิดการทำงาน 6 ชม.	

(ก)



MORAKOT 12024-01 - G004

วัน/เดือน/ปี	ลักษณะการใช้งาน/ชาร์จ						ปัญหาที่พบ	ผู้บันทึก
	จ่ายไฟ			ชาร์จ				
	ลักษณะการใช้งาน	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด	ลักษณะการชาร์จ	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด		
19/12/59				ไฟ 220 โวลต์ (สว่างมาก)	1100	1730	ปิดการทำงาน 6 ชม. 30 นาที	
20/12/59	ปิดเครื่อง ป.ตรี							
	ทดลองเปิดเครื่อง	0830					1. ปิดเครื่อง ป.ตรี ทางบอกไม่ต้องเปิด	
							ก่อนไม่ได้ใช้	
							2. ไฟ LED ติดหลอดเดียว	
21/12/59	ปิดเครื่อง แต่เบรกเกอร์		2230				เปลี่ยนเครื่อง 20 ธ.ค. 59	
	ตู้ไม่ขนมด เปิดก่อนเที่ยง						ถึง 21 2230 ธ.ค. 59 เต็มเวลา	
	40 ชม.						40 ชม.	
22/12/59	ปิดเครื่องทดลองเสร็จ	0800	1030				เครื่องดับ ปิดการทำงาน 6 ชม. 30 นาที	
			1800				รวมเวลาเปิดเครื่องทั้งหมด	
							42 ชม. 30 นาที	

(ข)

รูปที่ 1.39 แบบบันทึกการใช้งานต้นแบบ (ก) G003 (ข) G004

7.5.3 การส่งมอบเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รุ่นที่2 และการสาธิตการใช้งาน

ต้นแบบกล่องชาร์จรุ่นที่2 จำนวน 2 กล่อง ได้ถูกส่งมอบพร้อมสาธิตการใช้งาน เมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2560 ณ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน ต.เขาพระงาม อ.เมือง จ.ลพบุรี สิ่งที่ส่งมอบได้แก่

- MORAKOT CHARGER 02 จำนวน 2 ชุด (C002 C003) พร้อมสายชาร์จ
- คู่มือ จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 1.40 การส่งมอบต้นแบบกล่องชาร์จรุ่นที่2 และการสาธิตการใช้งาน

7.5.4 การทดสอบการใช้งานต้นแบบชุดแบตเตอรี่ กับตัวปืน

ในวันที่ 20 มกราคม พ.ศ 2560 ผู้ใช้ได้ลองทดสอบต่อชุดแบตเตอรี่ G003 และ G004 เข้ากับตัวปืน ดังรูปที่ 1.41 พบว่า เมื่อต่อชุดแบตเตอรี่ G004 กับตัวปืนแล้ว สามารถเปิดปืนใช้งานได้ปกติ เมื่อต่อชุดแบตเตอรี่ G003 กับตัวปืนแล้ว ไม่สามารถเปิดปืนได้ แต่ระดับพลังงานของชุดแบตเตอรี่ LED ยังติดสว่าง 3 ดวง ทีมวิจัยจึงลองตรวจสอบชุดแบตเตอรี่ G003 และตรวจสอบผ่านเครื่องชาร์จรุ่นที่2 พบว่า แบตเตอรี่โมดูลจำนวน 2 ชุด ถูกตัดออกจากระบบ และเพื่อความปลอดภัยระบบจัดการแบตเตอรี่จึงไม่ยอมให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายพลังงงาน โดยสามารถแก้ไขโดยการชาร์จชุดแบตเตอรี่ G003 ซึ่งทำให้ชุดแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ปกติเช่นเดิม เนื่องจากการชาร์จจะทำให้ระบบการป้องกันของระบบจัดการแบตเตอรี่ลูกข่าย (slave BMS) รีเซตจึงแบตเตอรี่โมดูล ทั้ง 2 ชุด จะต่อกับระบบเช่นเดิม



รูปที่ 1.41 การทดสอบต่อเชื่อมต้นแบบชุดแบตเตอรี่กับตัวปืนเบื้องต้น (วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2560)

นอกจากนี้โครงการนี้ได้ทดสอบการใช้งานชุดแบตเตอรี่ขณะยิงปืนใหญ่ และนำเสนอผลงานต่อคณะผู้เชี่ยวชาญ สกว. ณ ศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน ต.เขาพระงาม อ.เมือง จ.ลพบุรี วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560 ดังรูปที่ 1.42 และ รูปที่ 1.43

ในขณะทดสอบยิง ทีมวิจัยได้เก็บข้อมูลของชุดแบตเตอรี่ มรกต12024V01 G003 เกี่ยวกับ แรงดันของแบตเตอรี่แต่ละโมดูล อุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละโมดูล และกระแสที่จ่ายให้กับระบบควบคุมของปืน ดังตัวอย่างรูปที่ 1.44 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ทั้ง 6 โมดูลต่ออยู่กับระบบ (สถานะของแบตเตอรี่ทั้ง 6 โมดูลคือ ON) กระแสที่ชุดแบตเตอรี่จ่ายให้กับตัวปืนนั้นเท่ากับ 2.9 แอมแปร์ โดยในระหว่างที่ยิงไม่มีการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าแต่อย่างใด เนื่องจากระบบการยิงของตัวปืนไม่ได้อาศัยพลังงานจากชุดแบตเตอรี่เลย และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละโมดูล พบว่า อุณหภูมิภายในโมดูลสูงสุดเท่ากับ 31 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก และต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้ประเมินไว้ในบทที่ 6 (31 องศาเซลเซียส) รวมถึงอยู่ในช่วงอุณหภูมิการทำงานของชุดแบตเตอรี่ด้วย (-20 ถึง 60 องศาเซลเซียส)

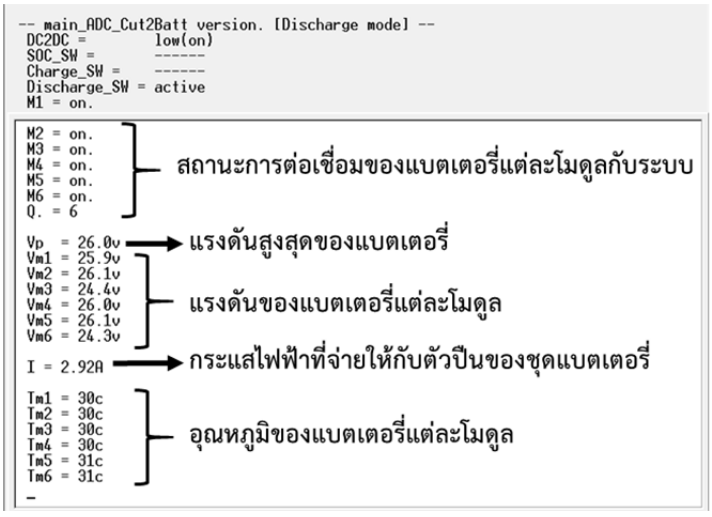
สำหรับแรงดันของแบตเตอรี่แต่ละโมดูล ดังรูปที่ 1.44 จะเห็นได้ว่า แรงดันของแบตเตอรี่โมดูลที่ 3 และ 6 นั้น ต่ำกว่าแรงดันของแบตเตอรี่โมดูลอื่น วิธีการแก้ไขคือ การชาร์จด้วยเครื่องชาร์จ MORAKOT CHARGER 02 ในฟังก์ชันซ่อมบำรุง (Maintenance Charge)



รูปที่ 1.42 การนำเสนอต้นแบบต่อคณะผู้เชี่ยวชาญ สกว. (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560)



รูปที่ 1.43 การทดสอบยิงปืนใหญ่ด้วยชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ มรกต12024V01 (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560)



รูปที่ 1.44 การเก็บข้อมูลของชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ มรกต12024V01 ขณะทดสอบยิงปืนใหญ่ (วันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2560)

7.5 สรุปผลการดำเนินการ

ชุดแบตเตอรี่ต้นแบบ มรกต12024V01 จำนวน 4 ชุด ได้ถูกพัฒนา และผ่านทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ทั้งการทดสอบคุณสมบัติ และความปลอดภัย ระดับเซลล์และแพ็คแบตเตอรี่ ทีมวิจัยจึงได้ส่งมอบ ต้นแบบจำนวน 2 ชุด ให้กับศูนย์การทหารปืนใหญ่ ค่ายพหลโยธิน จังหวัดลพบุรี ได้ทดลองใช้ ซึ่งจากการทดลองต่อชุดแบตเตอรี่ กับตัวปืน พร้อมทดสอบยิง พบว่า ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ มรกต12024V01 นี้สามารถใช้งานได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามการประเมินอายุการใช้งานต่างๆ ต้องอาศัยเวลา ทางทีมวิจัยจึงวางแผนที่จะเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานชุดแบตเตอรี่ต้นแบบนี้อย่างต่อเนื่องต่อไป นอกจากนี้จากการทดสอบต่างๆ และจากการสอบถามความคิดเห็นข้อผู้ใช้ ทางทีมวิจัยได้รวบรวมเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่ต่อไป

บทที่ 8 สรุปผลลัพธ์และประโยชน์ที่ได้รับ

8.1 ผลที่ได้จากงานวิจัย

ก. ได้องค์ความรู้ในการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ขนาดประมาณ 2.16 kWh (24V 90Ah) ที่มีขนาดและความสามารถในการจ่ายและอัดประจุได้ตามความต้องการของผู้ใช้

ข. ได้องค์ความรู้ในการพัฒนาเครื่องชาร์จสำหรับชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา โดยมีโหมดาการชาร์จตามความต้องการของผู้ใช้คือ ชาร์จปกติ ชาร์จเร็ว และมีโหมดการทำงานเพื่อรักษาสภาพของชุดแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานยาวขึ้นอย่างเดิม

ค. ได้ต้นแบบชุดแบตเตอรี่พร้อมใช้งานสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบชี้ทิศอัตโนมัติของปืนใหญ่ชนาดกลางกระสุนวิถีโค้ง ได้ตามความต้องการของผู้ใช้ในเบื้องต้น พร้อมรายการอุปกรณ์และแบบการผลิต โดยได้ต้นแบบวิจัยสำหรับใช้ทดสอบ 2 ชุด และต้นแบบส่งมอบให้ไปใช้ในภาคสนามให้กับกองทัพบกอีก 2 ชุด ที่มีคุณลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 0.1และรูปที่ 0.2

ง. ได้ต้นแบบเครื่องประจุแบตเตอรี่แบตเตอรี่พร้อมใช้งานกับชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา พร้อมรายการอุปกรณ์และแบบการผลิต ที่มีคุณลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 0.3 และ รูปที่ 0.4



ชุดแบตเตอรี่เดิม
(จัดซื้อปี พ.ศ. 2549/2550)

- ขนาด 285x230x260 mm (LxWxH)
- น้ำหนัก 25 กิโลกรัม
- NiCd (Nickel-Cadmium) battery
- 24V/ Capacity 30 Ah
- ระยะเวลาการชาร์จ 6-8 ช.ม.
- ราคาประมาณ 2 ล้านบาท



ชุดแบตเตอรี่ใหม่(กองทัพจัดซื้อใหม่ ปี พ.ศ. 2558/2559)

- ขนาด 230x405x280 mm (LxWxH)
- น้ำหนัก 31.6 กิโลกรัม
- Li-ion (Lithium Cobalt based)
- 20-30V/ Capacity 115 Ah
- ระยะเวลาการชาร์จ < 8 ช.ม.
- ผ่านการทดสอบความปลอดภัย ระดับเซลล์แบตเตอรี่
- ราคาประมาณ 2 ล้านบาท



ชุดแบตเตอรี่ชุดใหม่ แบบที่ 1
MORAKOT 12024V01 (โดยทีมวิจัย)

- ขนาด 340x230x400 mm (LxWxH)
- น้ำหนัก 31 กิโลกรัม
- Li-ion battery
- 24V/ Capacity >90 Ah (107Ah usable/124.8Ah Battery Capacity)
- ระยะเวลาการชาร์จ 6ช.ม. (normal), 3-4 ช.ม. (fast)
- ผ่านการทดสอบคุณสมบัติ และความปลอดภัย ระดับเซลล์ และ ระดับแพ็ค
- ราคาประเมินเบื้องต้น 500,000 บาท

รูปที่ 0.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบของต้นแบบชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนาเทียบกับชุดแบตเตอรี่เดิม





- ความสามารถในการจ่ายกระแสปกติ 3A @ 30ชั่วโมง
- ความสามารถในการจ่ายกระแสสูงสุด 10A (DC/DC rated current)
- ความสามารถในการประจุไฟฟ้ากระแสสูงสุด C/2 (45A) @ 25°C
- ช่วงอุณหภูมิในการใช้งาน Charge: 0-45°C Discharge: -20-60°C
- อุปกรณ์ภายนอกชุดแบตเตอรี่ประกอบด้วย
  - ขั้วต่อสำหรับจ่ายไฟ 1 ชุด พร้อมฝาครอบ ลักษณะเดียวกับแบตเตอรี่ชุดเดิม และ ผ่านมาตรฐาน MIL-DTL-38999
  - ขั้วต่อสำหรับประจุไฟ 1 ชุด พร้อมฝาครอบ ลักษณะเดียวกับแบตเตอรี่ชุดเดิม และ ผ่านมาตรฐาน MIL-DTL-38999
  - ปุ่มกด 1 ชุด สำหรับกดดูระดับพลังงานที่เหลือในชุดแบตเตอรี่
  - หลอดไฟการแสดงระดับพลังงานคงเหลือของชุดแบตเตอรี่ 1 ชุด ประกอบด้วย หลอดไฟ LED 4 ดวง แสดงระดับพลังงาน 4 ระดับ และกระพริบแจ้งเตือนเมื่อระดับพลังงานของแบตเตอรี่เหลือน้อย (สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้า 3A ได้ 30 นาที)
  - ครีบระบายความร้อน 1 ชุด
  - วาล์ว 1 ชุด เพื่อลดความดันในแพ็คหากเกิดแก๊สภายใน

รูปที่ 0.2 รายละเอียดโดยคร่าวของต้นแบบชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา



ชุดชาร์จแบตเตอรี่เดิม (จัดซื้อปี พ.ศ. 2549/2550)

- AC and DC Charging
- I_{max} = 1.5A (ประมาณ 6-8 ชั่วโมง)



ชุดชาร์จแบตเตอรี่ใหม่(กองทัพจัดซื้อใหม่ ปี พ.ศ. 2558/2559)*

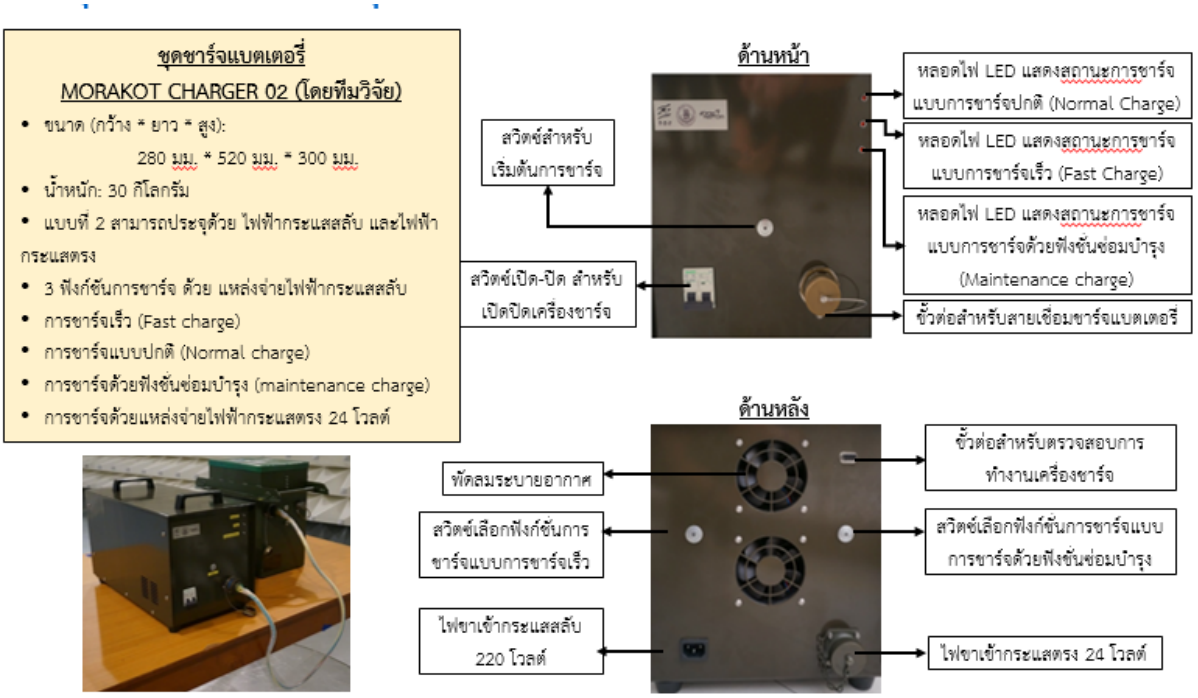
- AC charging อย่างเดียว
- 1 ฟังก์ชันการชาร์จ
- Max I = 30A (ถ้าระดับพลังงานของแบตเตอรี่เท่ากับ 0 จะใช้เวลาในการชาร์จไม่เกิน 8 ชั่วโมง)



ชุดชาร์จแบตเตอรี่ชุดใหม่ MORAKOT CHARGER 02 (โดยทีมวิจัย)

- AC and DC Charging
- 3 ฟังก์ชันการชาร์จ ด้วย AC charging
  1. Fast charge, I_{max} = 30 A (~ 4 ชั่วโมง)
  2. Normal charge, I_{max} = 18 A (~ 6 ชั่วโมง)
  3. Maintenance charge (~ 10 ชั่วโมง)
- DC Charge → 24 V, I_{max} 3 A (~ 30 ชั่วโมง)

รูปที่ 0.3 คุณสมบัติเปรียบเทียบของต้นแบบเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่พัฒนาเทียบกับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่เดิม



รูปที่ 0.4 รายละเอียดโดยคร่าวของต้นแบบเครื่องชาร์จชุดแบตเตอรี่ที่พัฒนา

8.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้เป็นไปตามความคาดหวังที่ตั้งไว้ คือ

ก. บุคลากรในประเทศองค์ความรู้ในการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนขนาดประมาณในขนาด xxV, x kWh

ข. บุคลากรในประเทศองค์ความรู้ในการพัฒนา และองค์ความารู้ในการพัฒนาชุดชาร์จแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน

ค. กองทัพบกได้มีชุดแบตเตอรี่พร้อมใช้งานสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบชี้ทิศอัตโนมัติของปืนใหญ่ขนาดกลางกระสุนวิถีโค้ง ได้ตามความต้องการของผู้ใช้ในเบื้องต้น โดยได้ต้นแบบวิจัยสำหรับใช้ทดสอบ 2 ชุด และต้นแบบส่งมอบให้ไปใช้ในภาคสนามให้กับกองทัพบกอีก 2 ชุดพร้อมเครื่องประจุไฟ 2 เครื่อง

ง. ได้แบบผลิตพร้อมอุปกรณ์สำหรับการผลิตชุดแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับแบตเตอรี่ 2.16 kWh (24V 90Ah) ซึ่งมีความสามารถในการจ่ายไฟต่อเนื่องได้มากที่สุด 10A และมีความสามารถในการประจุไฟปกติได้ 45 A และมีโหมดการชาร์จทั้งแบบ AC และ DC รวมถึงมีความสามารถให้การแสดงผลสถานะต่างๆ สามารถนำไปถ่ายทอดให้กับหน่วยงานหรือภาคอุตสาหกรรมต่อไป

จ. องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปพัฒนาชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทอื่น สำหรับการใช้งานในรูปแบบอื่นๆ

8.3 การนำไปใช้ประโยชน์ของผู้ประกอบการ

ผลลัพธ์ และองค์ความรู้ในการผลิตชุดแบตเตอรี่ จะถูกถ่ายทอดให้ผู้ที่สนใจในภาคอุตสาหกรรมเพื่อทำการผลิตให้กับทางงานภารกิจทางทหารซึ่งมีความต้องการอยู่สูงมากต่อไป

8.4 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนการผลิตชุดแบตเตอรี่พร้อมเครื่องชาร์จพบว่า ชุดแบตเตอรี่มีต้นทุนอยู่ที่ประมาณ 500,000 บาท ซึ่งถูกว่าชุดแบตเตอรี่ที่ทางกองทัพจัดซื้อมาอย่างน้อย 700,000 ถึง 1,500,000 บาท

8.5 ความเป็นไปได้ในการต่อยอดงานวิจัย

องค์ความรู้ที่ได้พร้อมในการถ่ายทอดให้แก่ภาคอุตสาหกรรมและหน่วยงานเพื่อผลิตต่อไป รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาดเล็ก (kWh) ประเภทอื่น สำหรับการใช้งานในรูปแบบอื่นๆ

บทที่ 9 ข้อเสนอแนะ/ข้อมูลเพิ่มเติมจากการนำชุดแบตเตอรี่ต้นแบบไปทดสอบภาคสนาม และแนวทางการปรับปรุงต้นแบบแบตเตอรี่ชุดต่อไป

จากการที่คณะวิจัยได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่และได้นำไปทดสอบและใช้งานจริงนั้น ได้มีข้อมูลเพิ่มเติมและแนวคิดในการดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดต่อไปดังต่อไปนี้

9.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชุดใหม่ที่ทางกองทัพจัดซื้อ

ขณะที่ทีมวิจัยได้พัฒนาต้นแบบชุดแบตเตอรี่ มรกต12024V01 นั้นทางกองทัพได้จัดซื้อชุดแบตเตอรี่ชุดใหม่จากต่างประเทศ ในปี พ.ศ. 2558/2559 ซึ่งแบตเตอรี่ชุดใหม่นี้เป็นแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน แต่ในการออกแบบ และพัฒนาชุดแบตเตอรี่ มรกต12024V01 นี้ ทีมวิจัยอ้างอิงจาก ชุดแบตเตอรี่แบบนิเกิลแคดเมียมเดิม ที่จัดซื้อปี พ.ศ. 2549/2550 เพื่อให้ได้ต้นแบบที่ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้น และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับชุดแบตเตอรี่จากต่างประเทศ ทีมวิจัยจึงได้ ศึกษาคุณสมบัติของชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชุดใหม่ สอบถามความคิดเห็นผู้ใช้งานต่อชุดแบตเตอรี่ชุดใหม่ รวมถึงรวบรวมความคิดเห็นของผู้ใช้งานต่อต้นแบบชุดแบตเตอรี่ มรกต12024V01 ด้วย ซึ่งได้ข้อมูลเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

ก. เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทลิเทียมไอออนฟอสเฟตที่มีความจุตาม nameplate 120 Ah

ข. มีอายุการใช้งานสั้นโดยขณะนี้มีเพียง 1 ชุดจาก 12 ชุดที่ยังสามารถทำงานอยู่ได้ (ณ วันที่ 27 มกราคม 2560)

ค. การติดตั้งแบตเตอรี่ชุดใหม่ทำได้ยากกว่าแบบเก่าเนื่องจากต้องใช้การขันสกรูและแหวนเข้าด้วยกัน จึงต้องใช้ประแจสองตัวพร้อมกันในขณะที่แบบเก่าเป็นการล็อคเข้าเท่านั้นทำให้เปลี่ยนเข้าออกง่าย เครื่องมือ อย่างน้อยต้องใช้เวลา 5 นาที ซึ่งต่างจากของเดิมที่ติดมากับตัวปืน มีความคล่องตัวและสะดวกในการถอดประกอบ ในเวลาไม่เกิน 10 วินาที ดังแสดงใน**Error! Reference source not found.** ซึ่งทางทีมงานจะนำข้อดีของตัวนี้ไปประยุกต์ใช้



รูปที่ 0.1 ระบบการยึดแบบเดิมที่ติดมากับตัวปืน

ง. แบตเตอรี่ชุดใหม่ไม่มีระบบรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลจากการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะไม่เชื่อมต่อกับปืน และเชื่อมต่อกับปืน ตอนไม่เชื่อมต่อกับปืน แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าตอนเชื่อมต่อกับปืน ซึ่งต่างจากชุดแบตเตอรี่ของทางทีมงาน ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ตลอด เพราะมีการติดตั้งอุปกรณ์รักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้า (DC to DC) อย่างไรก็ตามเพื่อความแน่ใจ ทางทีมงาน เสนอให้ทางผู้ใช้งานใช้แบตเตอรี่ตัวเดิมที่ซื้อมาใหม่จากต่างประเทศ โดยไม่มีการประจุไฟฟ้าเพื่อจะทำการตรวจสอบอีกรอบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกหรือไม่ ถ้าตก แสดงว่าแบตเตอรี่ตัวเดิมที่ซื้อมาใหม่ไม่มีระบบรักษาแรงเคลื่อนไฟฟ้า

จ. เครื่องชาร์จของแบตเตอรี่เป็นระบบแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (รูปที่ 0.2) โดยมีค่าประมาณ 28.8 โวลต์ ซึ่งเหมือนระบบเครื่องชาร์จทั่วไป โดยมีหลักการเหมือนกับเครื่องชาร์จโทรศัพท์มือถือ กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อแบตเตอรี่ใกล้เต็ม แต่สิ่งที่น่าสนใจ คือ อุณหภูมิขณะชาร์จ ที่ตัวกล่องของแบตเตอรี่ที่ซื้อมาใหม่จากต่างประเทศ มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง มากกว่า 40 °C โดยทำการชาร์จไฟฟ้าไม่เกิน 30 นาที ซึ่งทางทีมงานได้แนะนำผู้ใช้ว่าควรมีระบบระบายอากาศ (พัดลม) ขณะทำการชาร์จ



รูปที่ 0.2 เครื่องชาร์จที่มาพร้อมกับแบตเตอรี่ที่ซื้อมาใหม่จากต่างประเทศ

9.2 คำแนะนำในการปรับปรุงต้นแบบชุดแบตเตอรี่ของทีมวิจัยจากผู้ใช้ และแนวคิดในการออกแบบชุดต้นแบบชุดต่อไปจากต้นแบบที่ทางคณะวิจัยได้ทำการพัฒนา

ก. ขนาด: ต้องการให้มีขนาดกระทัดรัดมากกว่านี้ โดยต้องการให้ความสูงลดลง โดยเฉพาะจากส่วนที่ติดตั้งสู่พื้นดิน เพื่อให้ทั้งระบบปืนสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ซึ่งในชุดต้นแบบที่หนึ่งทางทีมงานได้นำกล่องบรรจุแบตเตอรี่โมดูลที่มีอยู่แล้วมาประยุกต์ใช้กับต้นแบบแรก ทำให้กล่องใบนี้สามารถใส่แบตเตอรี่ 18650 ได้ไม่เกิน 56 ลูก ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการเพิ่มความจุของโมดุลแบตเตอรี่นี้ เมื่อประกอบโมดุลแบตเตอรี่ทั้ง 6 โมดุลลงไปในกล่องเหล็กดังแสดงในรูปที่ 0.3 ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดที่ 1

ข. ทำให้มีกล่องต้องมีความสูงในการรองรับแบตเตอรี่ทั้งหมด ขณะที่พื้นที่ด้านข้างภายในกล่องไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ นอกจากใส่ฉนวน ซึ่งแนวทางแก้ไขปัญหาของพื้นที่จำกัด ทีมวิจัยได้มีแนวคิดในการออกแบบชุดแบตเตอรี่รุ่นที่ 2 โดยจะไม่ใช้กล่องโมดูลเดิม แต่จะใช้ชุดตัวเสื้อสำหรับแบตเตอรี่ 18650 ที่มีลักษณะดังรูปที่ 9.4 ที่สามารถประกอบตามขนาดได้ตามต้องการ ซึ่งแบตเตอรี่โมดุล สามารถเปลี่ยนจาก 8P7S เป็น 10P7S หรือ 12P7S ทำให้มีจำนวนโมดุลน้อยลง และใช้พื้นที่ด้านข้างกล่องได้เกิดประโยชน์ที่สุด อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนดังกล่าวยังจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากมีราคาถูกกว่า เมื่อเทียบกับต้องผลิตขึ้นมาเอง ทั้งนี้ ถ้าชุดเสื้อดังกล่าวสามารถถูกผลิตภายในประเทศได้ ถ้ามีปริมาณความต้องการสูง เพราะต้องจัดสร้างโมลสำหรับฉีดพลาสติก นอกจากนั้น ข้อดีอีกอย่างของการ

ใช้ชุดตัวเสื้อสำหรับแบตเตอรี่ คือ มีระยะช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ง่าย และลดการสัมผัสโดยตรงของตัวถังแบตเตอรี่ 18650 ระหว่างกัน



รูปที่ 0.3 ต้นแบบชุดแบตเตอรี่ชุดที่ 1



รูปที่ 0.4 การประยุกต์ใช้ชุดตัวเสื้อสำหรับแบตเตอรี่สำเร็จรูป

ค. การพัฒนา Indicator ได้แก่ พัฒนา algorithm/function การ monitor SOC ที่แม่นยำกว่าเดิม, พัฒนาการแสดงสาเหตุความไม่พร้อมใช้งานของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่โมดูลไม่ทำงานบางโมดูล และการแสดงระดับพลังงานของชุดแบตเตอรี่ SOC ให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากยิ่งขึ้น

ง. Logging function (V, I, T)

จ. ตำแหน่งหัวสายชาร์จ/ discharge ให้ใช้งานได้สะดวกขึ้น

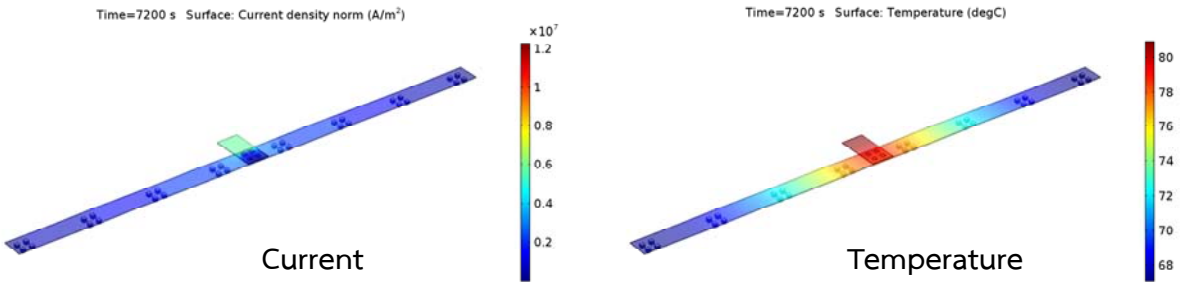
ฉ. การพัฒนาการเชื่อมต่อที่มีความทนทานที่มากขึ้น

ช. การออกแบบแพ็คเพื่อลดปริมาณความร้อน ยืดอายุการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น โดยพิจารณาอุณหภูมิของแผ่นเชื่อมต่อ ในการออกแบบของโมดุลแบตเตอรี่ ในช่วงแรกทางทีมงานไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นของแผ่นเชื่อมต่อ จึงมีจุดเชื่อมต่อทางเดียวแสดงในรูปที่ 0.5 เมื่อทำการวิเคราะโดยใช้ Finite Element Method พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมากที่แผ่นนำไฟฟ้าดังรูปที่ 0.6ก เนื่องจากมีจุดเชื่อมต่อทางเดียวของวงจรอนุกรม นอกจากนั้นทางทีมงานได้ลองปรับเปลี่ยนตำแหน่ง และเพิ่ม

จำนวนช่องทางการไหลทางไฟฟ้า แล้วทำการวิเคราะโดยใช้ Finite Element Method พบว่า การมีช่องทางการไหลเพิ่มขึ้นช่วยลดอุณหภูมิของแผ่นนำไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าได้มีการไหลผ่านแบ่งไปในแต่ละช่องทาง ดังแสดงในรูปที่ 0.7 และ รูปที่ 0.6ข

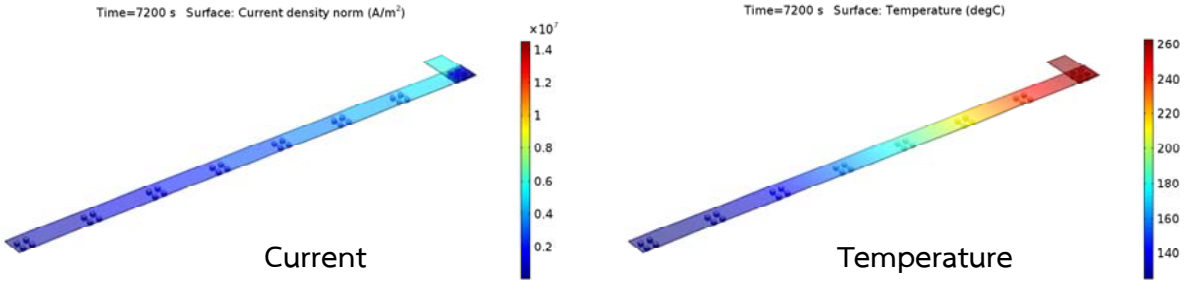


รูปที่ 0.5 ตำแหน่งของแผ่นเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลสูงของโมดุลเวอร์ชั่นหนึ่ง

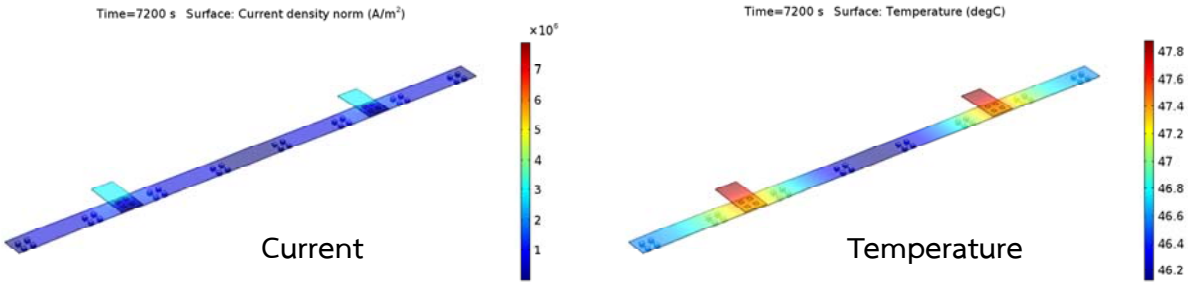


ก. หนึ่งช่องทางตรงกลางเหมือนเวอร์ชั่นหนึ่ง

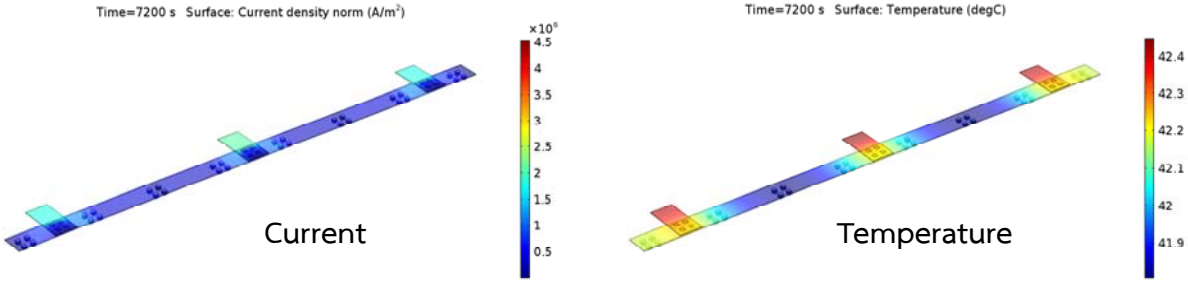
ข.



ข. หนึ่งช่องที่ตรงปลาย

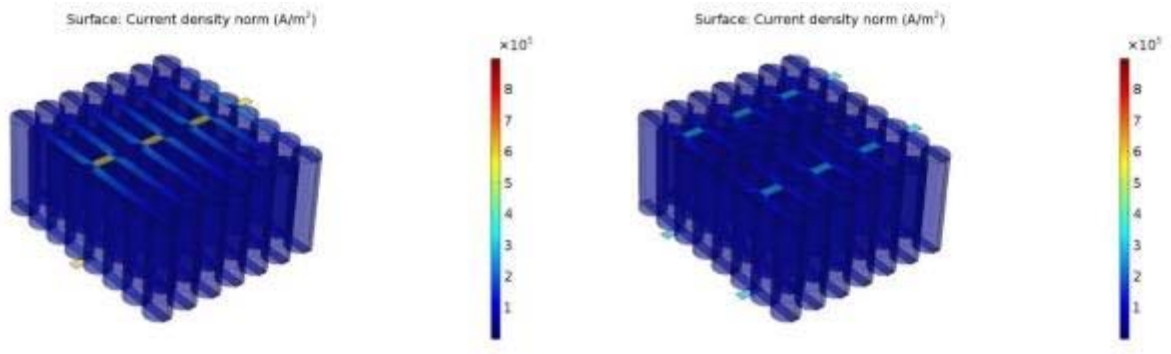


ค. สองช่องทาง



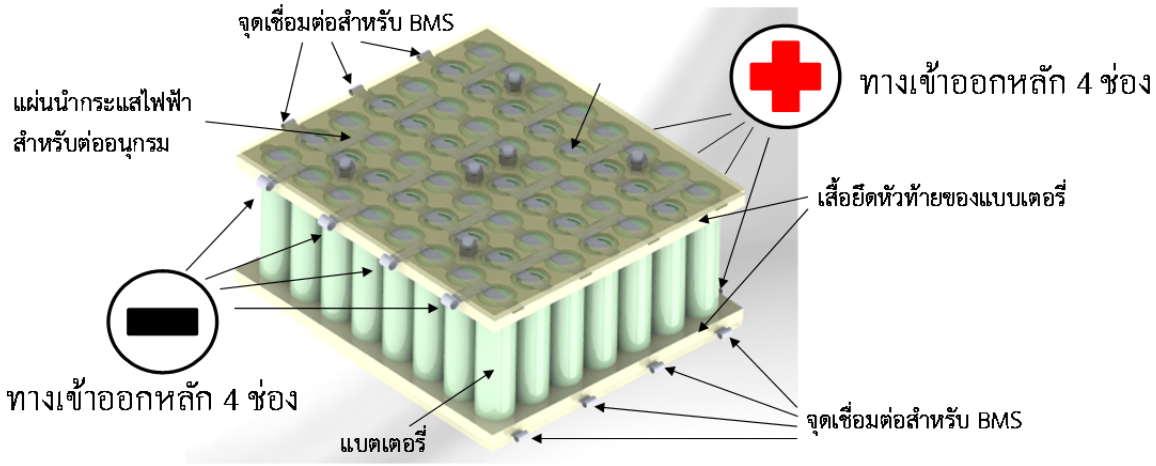
ง. สามช่องทาง

รูปที่ 0.6 การเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนตำแหน่งและการเพิ่มจำนวนช่องทาง



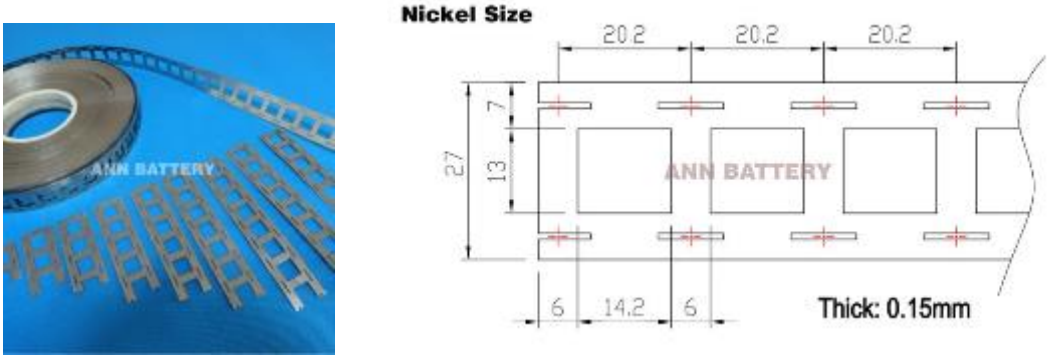
ก. การเชื่อมต่อโดยใช้หนึ่งช่องทาง ข. การเชื่อมต่อโดยใช้มากกว่าหนึ่งช่องทาง

รูปที่ 0.7 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นเชื่อมต่อไฟฟ้า



รูปที่ 0.8 แนวทางการออกแบบโมดุลแบตเตอรี่เวอร์ชั่นสอง

แนวทางแก้ไขปัญหาเรื่องอุณหภูมิ ในเบื้องต้นทางทีมงานได้พยายามออกแบบโมดุลแบตเตอรี่เวอร์ชั่นสองดังแสดงในรูปที่ 0.8.8 โดยมีช่องทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และได้สร้างต้นแบบดังกล่าว พบว่ามีต้นทุนเพิ่มขึ้นในการสร้างในการทำชุดยึดแบตเตอรี่ และมีจุดเชื่อมต่อที่มากขึ้น ซึ่งหมายความว่า อาจเกิดการหลุดจากของจุดเชื่อมต่อในขณะใช้งาน นอกจากนั้นการออกแบบดังกล่าวยังยึดติดกับขนาดของกล่องของเดิมที่ไม่ตอบโจทย์ขนาดทางโครงสร้าง เมื่อนำไปประกอบในกล่องเหล็กตามที่ผู้ใช้งานแนะนำ ดังนั้น ทางทีมงานจึงมองหาวัสดุที่มีอยู่ในท้องตลาดอยู่แล้ว เช่น เสื้อสำหรับแบตเตอรี่สำเร็จรูปที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ และแผ่นนำไฟฟ้าดังรูปที่ 9.8 ซึ่งมีขนาดเข้ากันได้กับเสื้อสำหรับแบตเตอรี่สำเร็จรูป



รูปที่ 0.9 แผ่นนำไฟฟ้าสำเร็จรูปแบบมี Slot เพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมแบบ Spot Welding

สรุปการออกแบบสำหรับต้นแบบชุดต่อไปด้านการออกแบบชุดแบตเตอรี่และกล่องแบตเตอรี่:

1. จะไม่ใช้กล่องโมดูลเดิม ทำให้สามารถใช้พื้นที่ได้เกิดประโยชน์ โดยโมดุลแบตเตอรี่สามารถประกอบเป็น 10P7S หรือ 12P7S ส่งผลให้กล่องเหล็กแพ็คแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลง และไม่สูงมาก ตามความต้องการของผู้ใช้

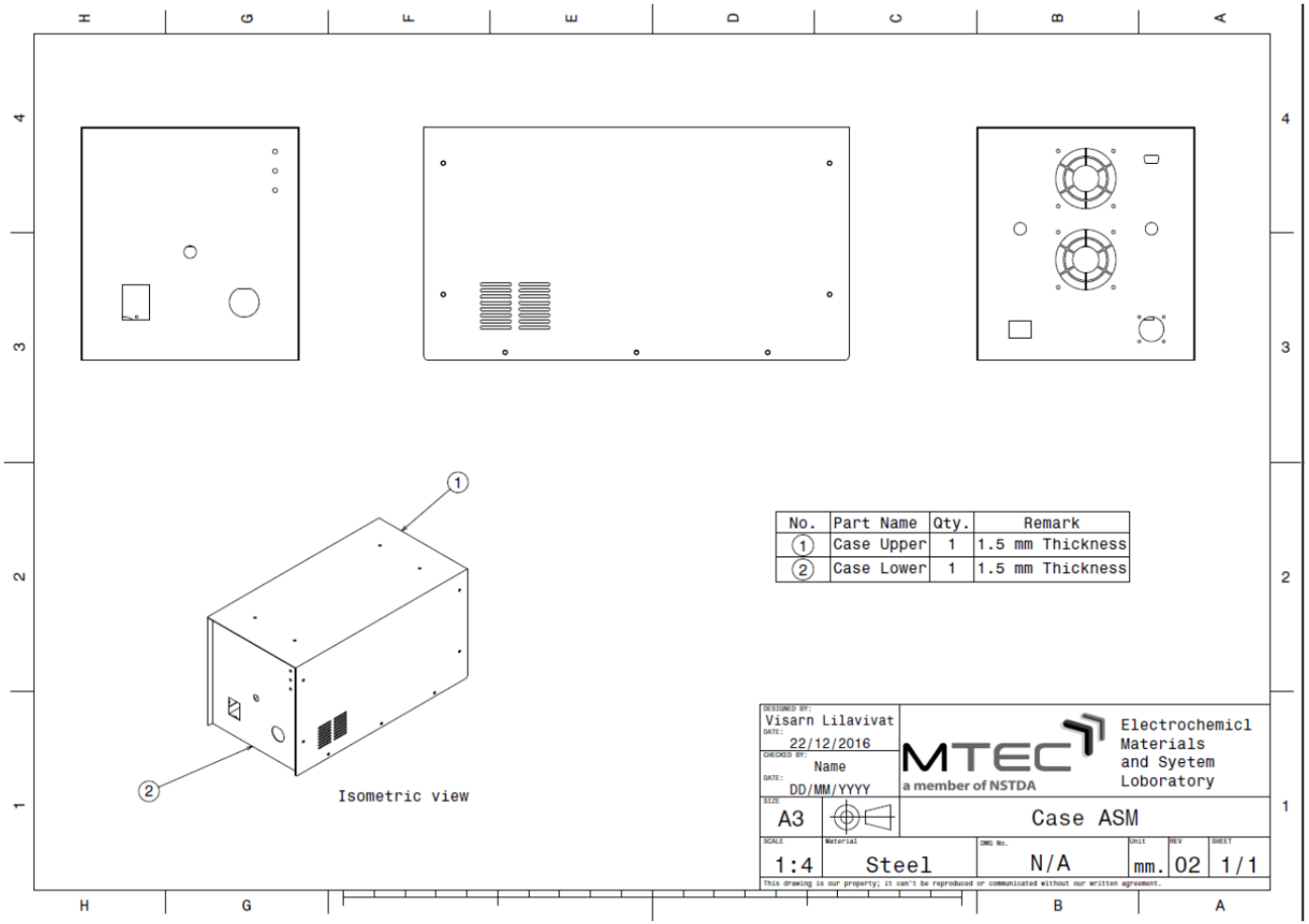
2. มีการคำนึงถึงต้นทุน และลดความยุ่งยากในการประกอบของโมดุลแบตเตอรี่ โดยการใช้แผ่นนำไฟฟ้าสำเร็จรูป และชุดตัวเสื้อสำหรับแบตเตอรี่สำเร็จรูป ที่หาซื้อได้จากท้องตลาด

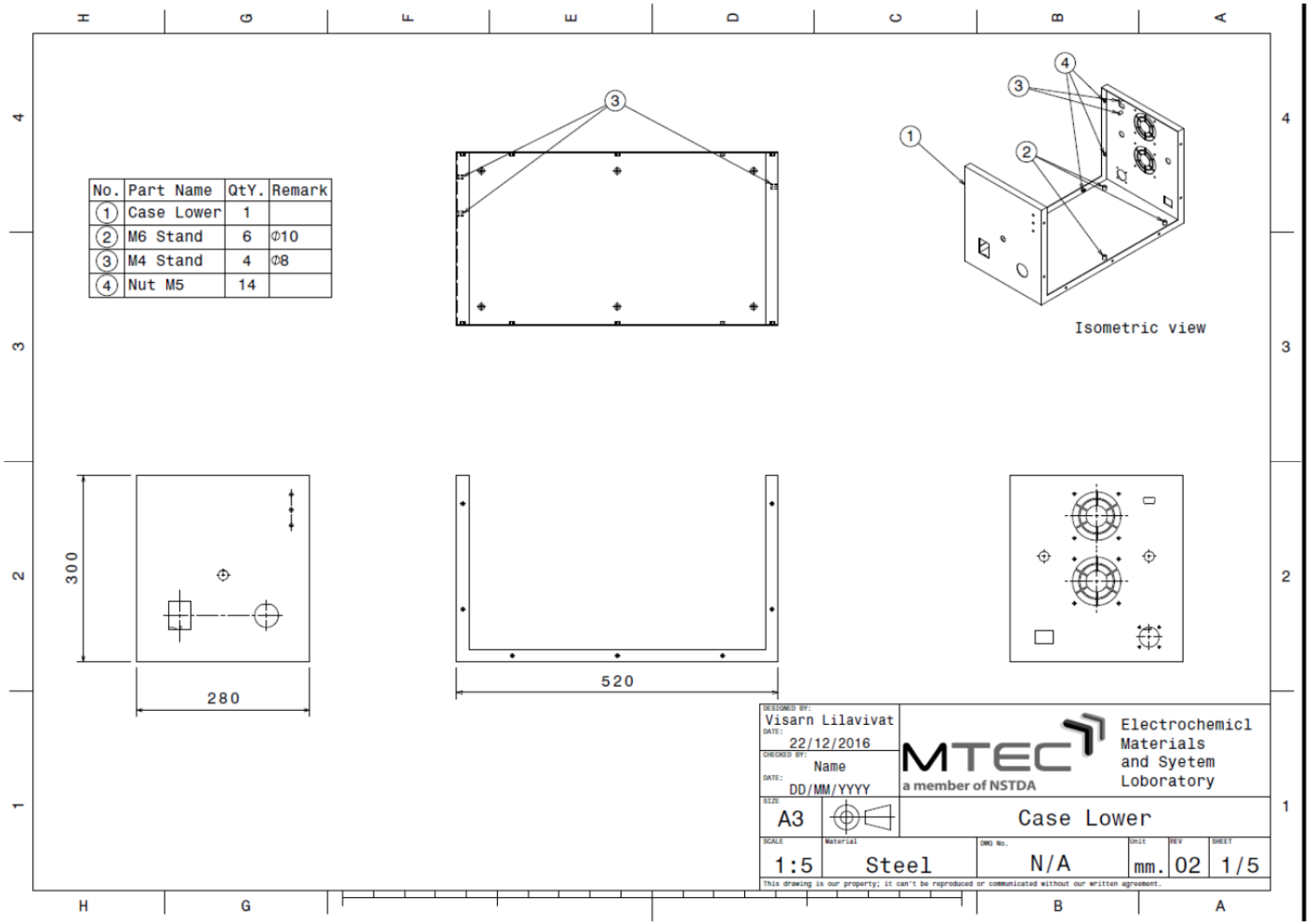
3. สามารถลดอุณหภูมิของแผ่นนำไฟฟ้าได้ โดยแผ่นนำไฟฟ้าสำเร็จรูป โดยช่องทางการไหลมีตามจำนวนแบตเตอรี่ของการต่อขนาน เช่น 10P7S จะมีช่องทางการไหล 10 ช่อง

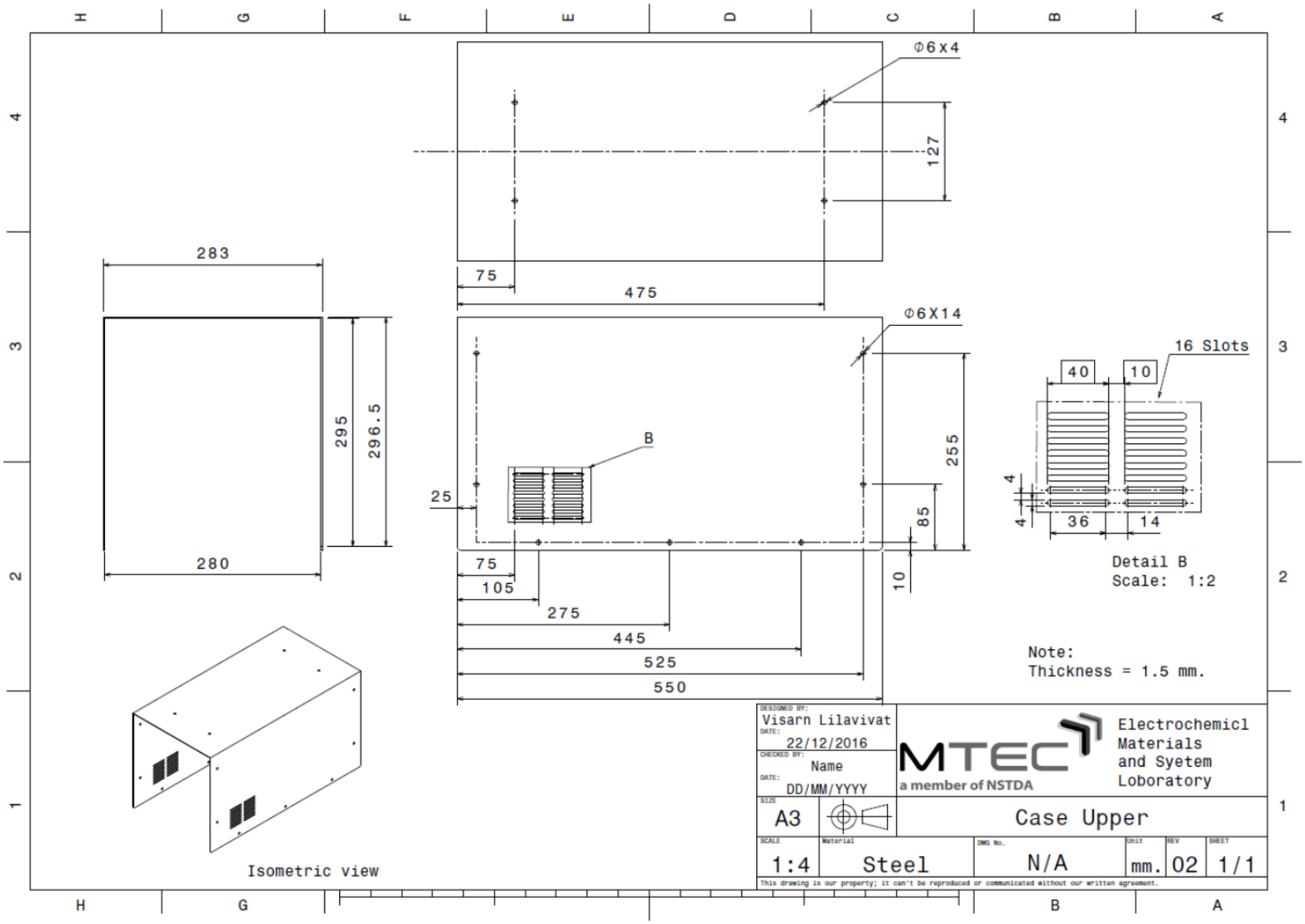
4. คำนึงถึงอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นของแผ่นเชื่อมต่อ จึงมีจุดเชื่อมต่อทางเดียว เมื่อทำการวิเคราะโดยใช้ Finite Element Method พบว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมากที่แผ่นนำไฟฟ้า เนื่องจากมีจุดเชื่อมต่อทางเดียวของวงจรอนุกรม นอกจากนั้นทางทีมงานได้ลองปรับเปลี่ยนตำแหน่ง และเพิ่มจำนวนช่องทางการไหลทางไฟฟ้า แล้วทำการวิเคราะโดยใช้ Finite Element Method พบว่า การมีช่องทางการไหลเพิ่มขึ้นช่วยลดอุณหภูมิของแผ่นนำไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าได้มีการไหลผ่านแบ่งไปในแต่ละช่องทาง

ภาคผนวก

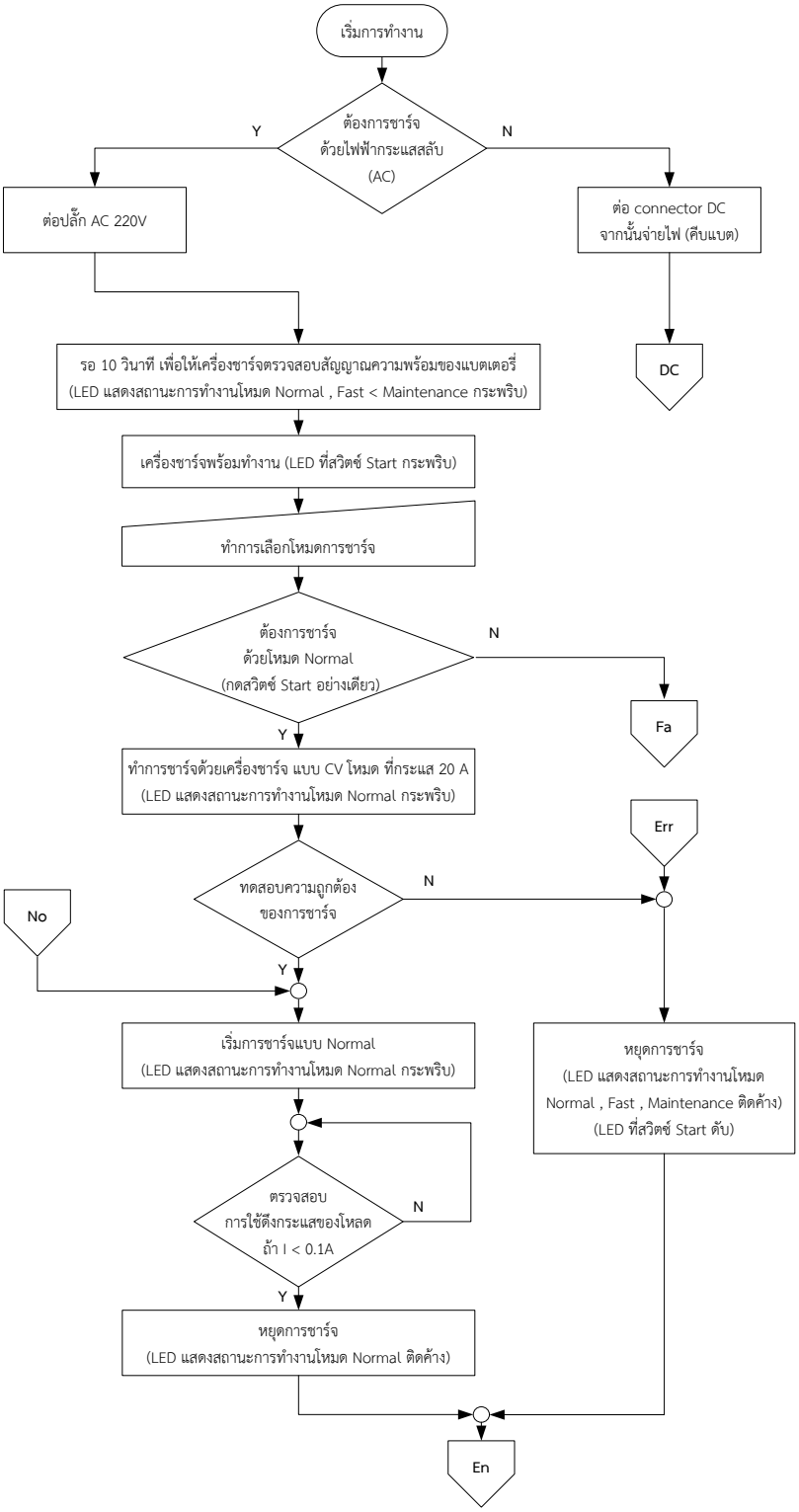
ก. แบบสั่งผลิตกล่องชาร์จ

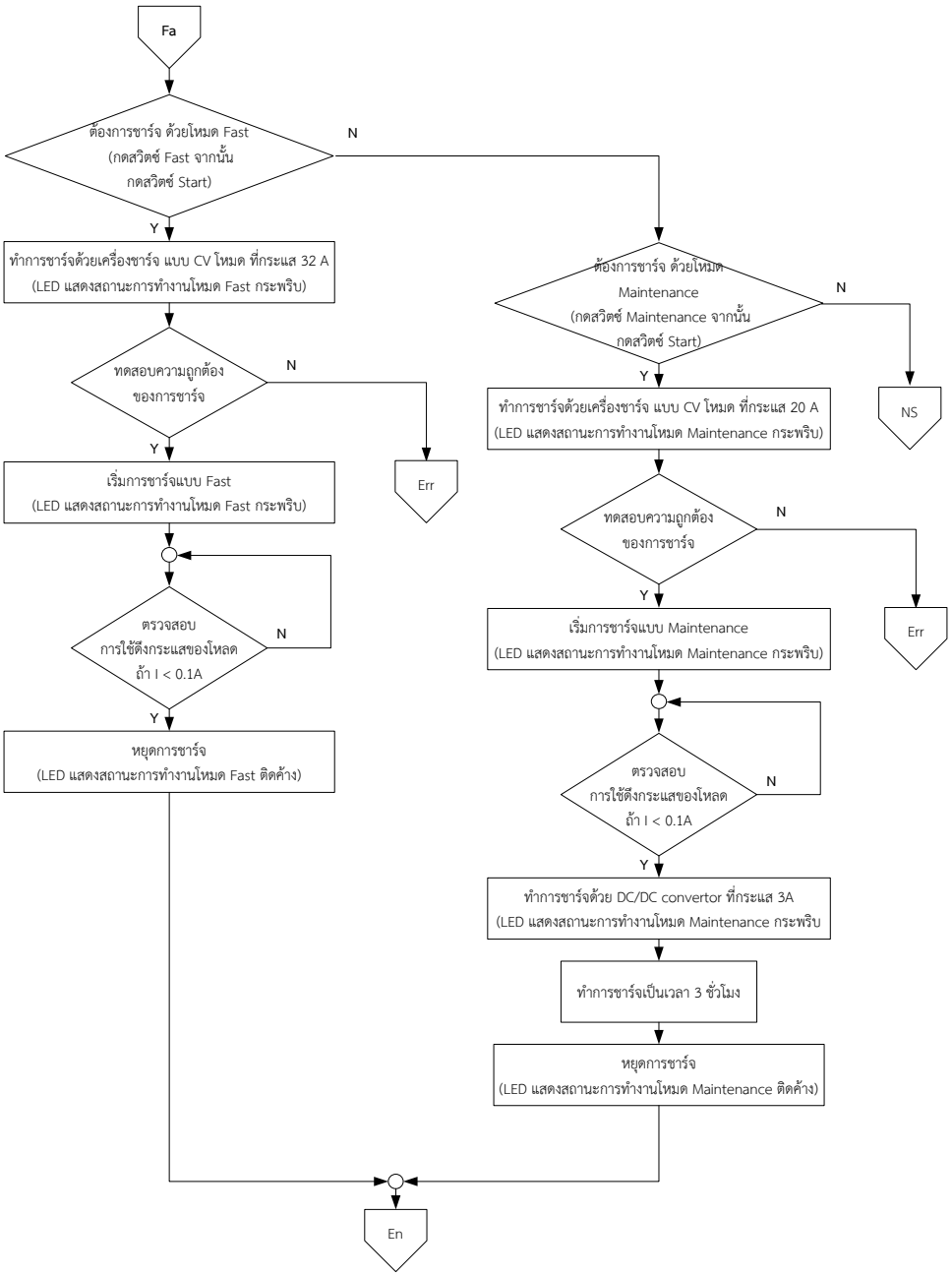


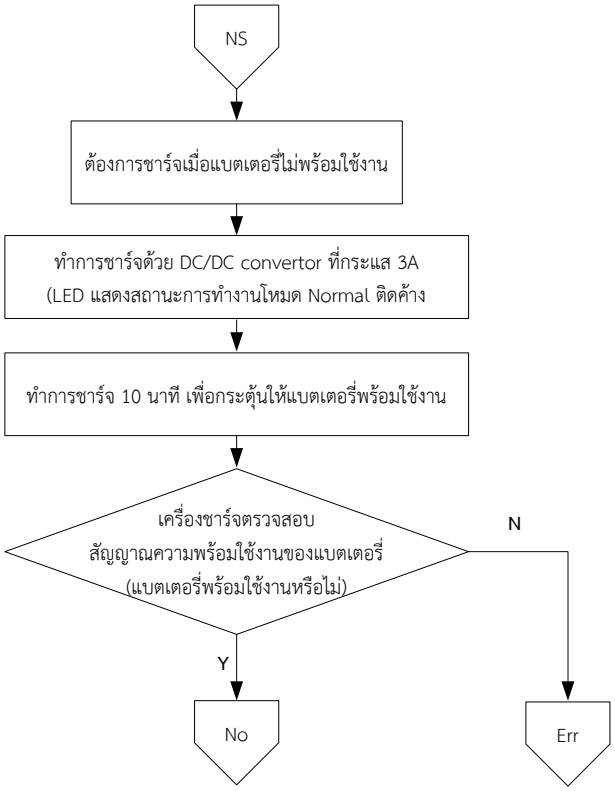

H
G
F
E
D
C
B
A
4
3
2
1
No. Part Name QtY. Remark
① Case Lower 1
② M6 Stand 6 Φ10
③ M4 Stand 4 Φ8
④ Nut M5 14
Isometric view
300
280
520
DESIGNED BY: Visarn Lilavivat
DATE: 22/12/2016
CHECKED BY: Name
DATE: DD/MM/YYYY
MTEC a member of NSTDA
Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
SIZE A3
Case Lower
SCALE 1:5
Material Steel
DWG No. N/A
Unit mm.
REV 02
SHEET 1/5
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

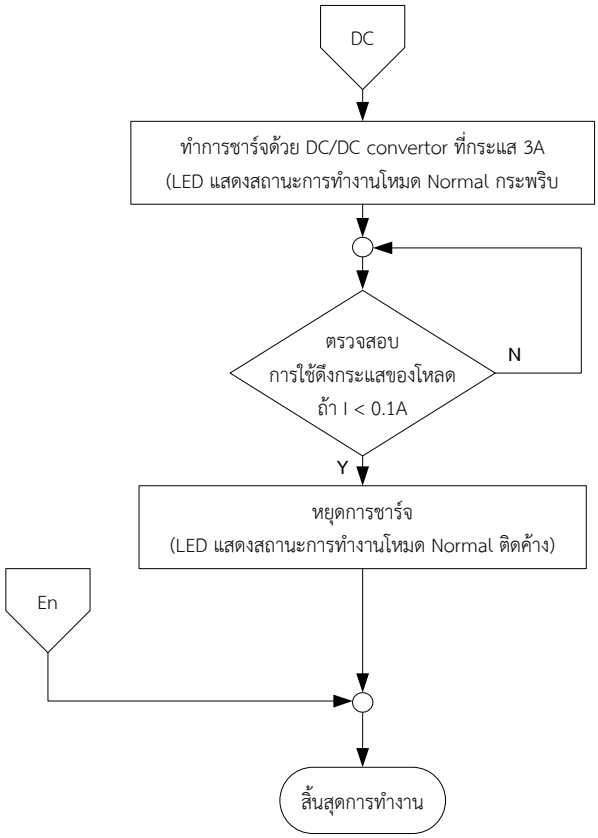

Φ6X4
127
75
475
283
295
296.5
280
Φ6X14
B
25
255
85
10
75
105
275
445
525
550
16 Slots
40
10
4
4
36
14
Detail B
Scale: 1:2
Note:
Thickness = 1.5 mm.
Isometric view
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
22/12/2016
CHECKED BY:
Name
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
SIZE
A3
Case Upper
SCALE
1:4
Material
Steel
DWG No.
N/A
Unit
mm.
REV
02
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

ข. แผนผังการทำงานของเครื่องชาร์จ



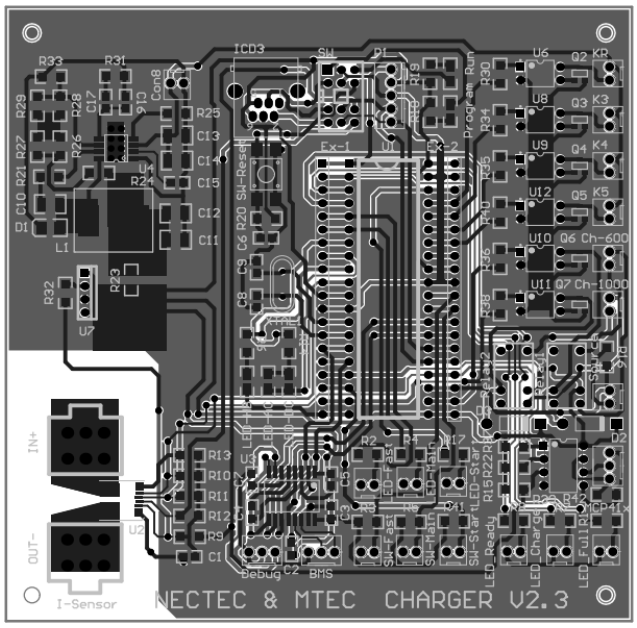

Fa
ต้องการชาร์จ ด้วยโหมด Fast
(กดสวิตช์ Fast จากนั้น
กดสวิตช์ Start)
N
Y
ทำการชาร์จด้วยเครื่องชาร์จ แบบ CV โหมด ที่กระแส 32 A
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Fast กระพริบ)
ทดสอบความถูกต้อง
ของการชาร์จ
N
Y
Err
เริ่มการชาร์จแบบ Fast
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Fast กระพริบ)
ตรวจสอบ
การใช้ดึงกระแสของโหลด
ถ้า I < 0.1A
N
Y
หยุดการชาร์จ
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Fast ติดค้าง)
ต้องการชาร์จ ด้วยโหมด
Maintenance
(กดสวิตช์ Maintenance จากนั้น
กดสวิตช์ Start)
N
NS
Y
ทำการชาร์จด้วยเครื่องชาร์จ แบบ CV โหมด ที่กระแส 20 A
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Maintenance กระพริบ)
ทดสอบความถูกต้อง
ของการชาร์จ
N
Err
Y
เริ่มการชาร์จแบบ Maintenance
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Maintenance กระพริบ)
ตรวจสอบ
การใช้ดึงกระแสของโหลด
ถ้า I < 0.1A
N
Y
ทำการชาร์จด้วย DC/DC convertor ที่กระแส 3A
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Maintenance กระพริบ
ทำการชาร์จเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
หยุดการชาร์จ
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Maintenance ติดค้าง)
En


NS
ต้องการชาร์จเมื่อแบตเตอรี่ไม่พร้อมใช้งาน
ทำการชาร์จด้วย DC/DC convertor ที่กระแส 3A
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Normal ติดค้าง
ทำการชาร์จ 10 นาที เพื่อกระตุ้นให้แบตเตอรี่พร้อมใช้งาน
เครื่องชาร์จตรวจสอบ
สัญญาณความพร้อมใช้งานของแบตเตอรี่
(แบตเตอรี่พร้อมใช้งานหรือไม่)
N
Y
No
Err

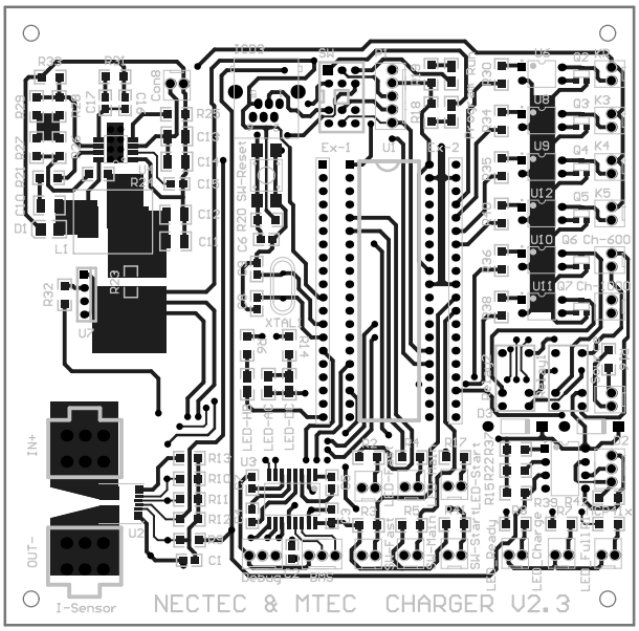

DC
ทำการชาร์จด้วย DC/DC convertor ที่กระแส 3A
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Normal กระพริบ
ตรวจสอบ
การใช้ดึงกระแสของโหลด
ถ้า I < 0.1A
N
Y
หยุดการชาร์จ
(LED แสดงสถานะการทำงานโหมด Normal ติดค้าง)
En
สิ้นสุดการทำงาน

ค. วงจรอิเล็คทรอนิคส์ควบคุมเครื่องชาร์จ

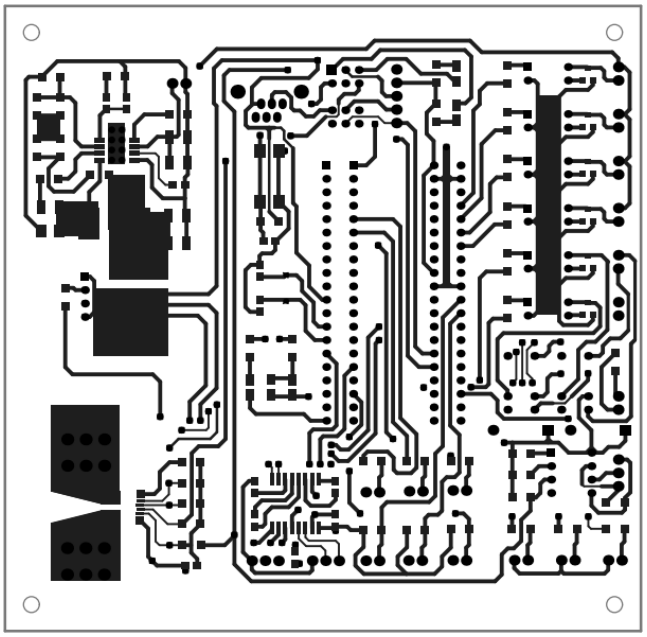
- ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และลายวงจรพิมพ์เครื่องชาร์จ



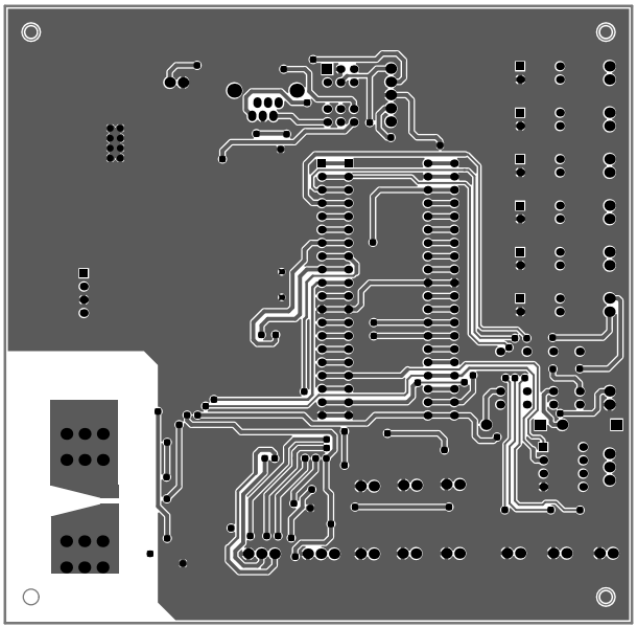
- ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และลายวงจรพิมพ์ด้านบน ของเครื่องชาร์จ



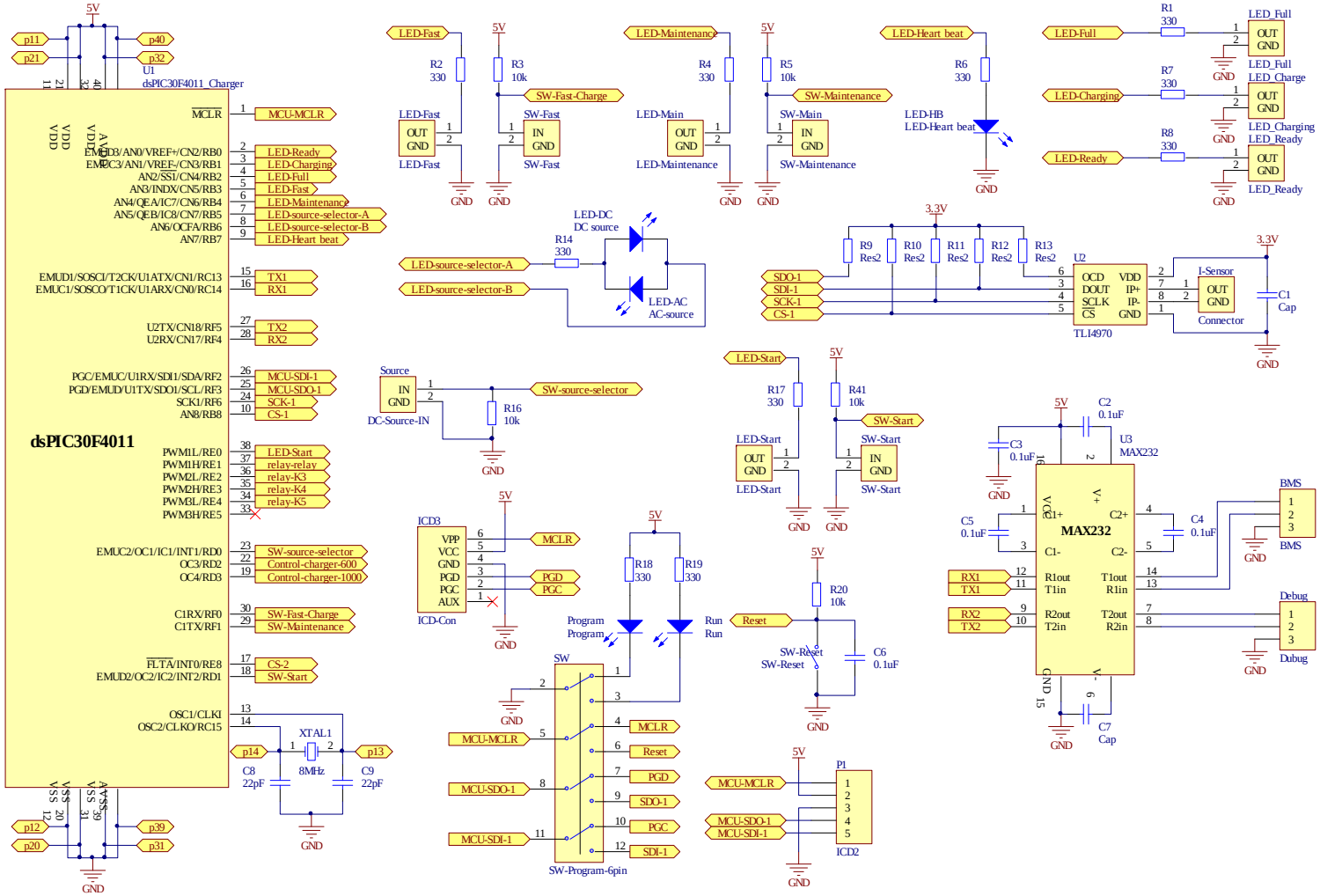
- ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และลายวงจรพิมพ์ด้านบน ของเครื่องชาร์จ

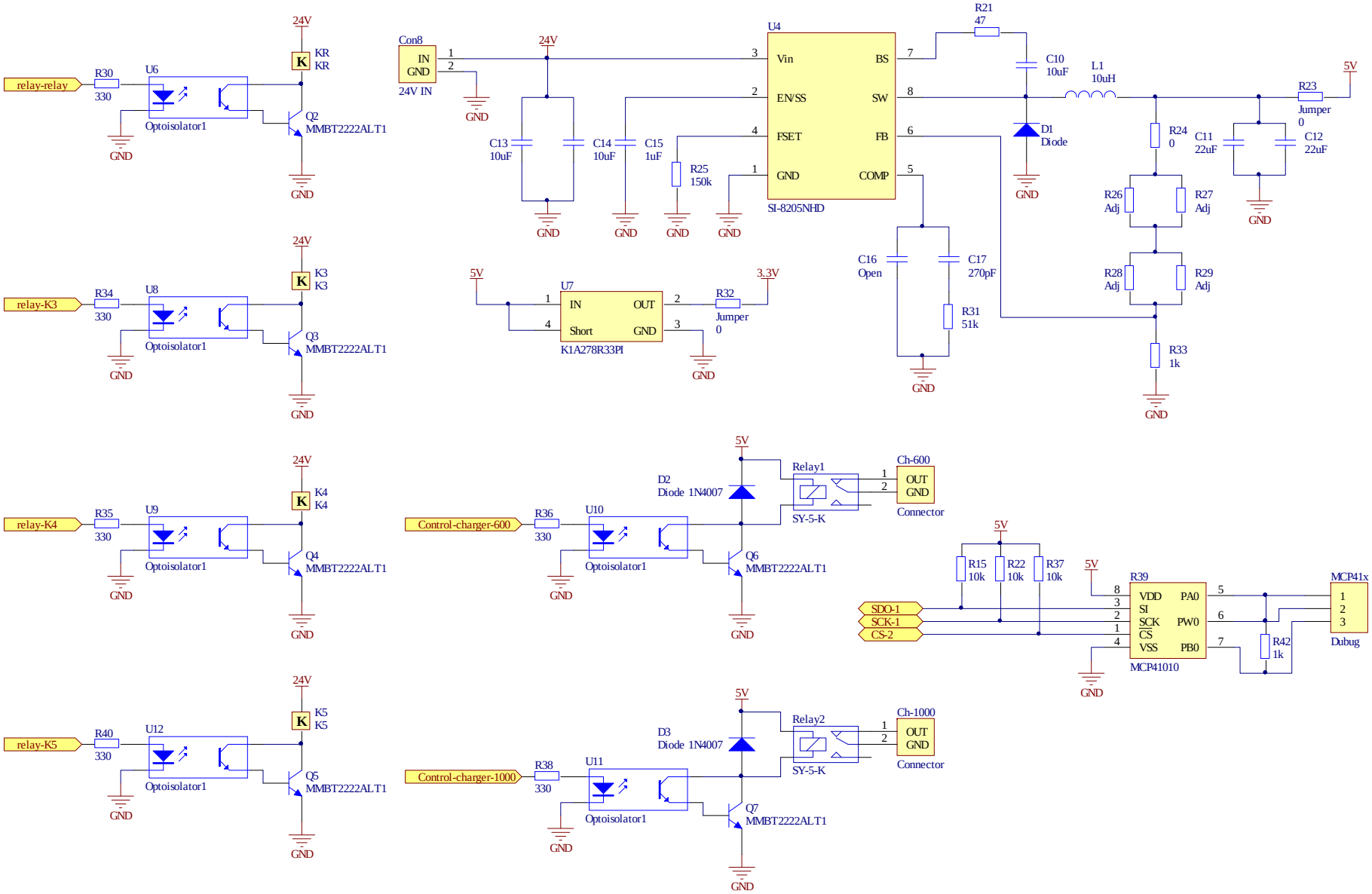


- ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และลายวงจรพิมพ์ด้านบน ของเครื่องชาร์จ



ง. แผนผังวงจรอิเล็คทรอนิคส์ควบคุมเครื่องชาร์จ




relay-relay
R30
330
U6
Optoisolator1
Q2
MMBT2222ALT1
24V
KR
KR
GND
Con8
IN
GND
24V IN
U4
Vin
EN/SS
FSET
GND
BS
SW
FB
COMP
SI-8205NHD
C13
10uF
C14
10uF
C15
1uF
R25
150k
R21
47
C10
10uF
L1
10uH
D1
Diode
R23
Jumper
0
5V
R24
0
C11
22uF
C12
22uF
R26
Adj
R27
Adj
R28
Adj
R29
Adj
C16
Open
C17
270pF
R31
51k
R33
1k
relay-K3
R34
330
U8
Q3
MMBT2222ALT1
K3
K3
U7
IN
Short
OUT
GND
K1A278R33PI
R32
Jumper
0
3.3V
relay-K4
R35
330
U9
Q4
MMBT2222ALT1
K4
K4
D2
Diode 1N4007
Relay1
SY-5-K
Ch-600
OUT
GND
Connector
Control-charger-600
R36
330
U10
Q6
MMBT2222ALT1
R15
10k
R22
10k
R37
10k
SDO-1
SCK-1
CS-2
R39
VDD
SI
SCK
CS
VSS
PA0
PW0
PB0
MCP41010
MCP41x
Dubug
R42
1k
relay-K5
R40
330
U12
Q5
MMBT2222ALT1
K5
K5
D3
Diode 1N4007
Relay2
SY-5-K
Ch-1000
OUT
GND
Connector
Control-charger-1000
R38
330
U11
Q7
MMBT2222ALT1

จ. ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ของเครื่องชาร์จแบบที่ 2 โดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

TEST REPORT

EUT Number:	60-533
Equipment Under Test:	MORAKOT - Pack Charger
Trade Name:	-
Model:	02
Serial Number:	-
Reference Number:	-
Manufactured by:	-
Customer:	National Metal and Materials Technology (MTEC)
Address:	114 Thailand Science Park (TSP), Phahol yothin Rd., Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani 12120
Receipt Date:	17 January 2017
Date of Test:	17 - 18 January 2017
Issued Date of Report:	30 January 2017

Approved by

MR. Anake Meemoosor

Operation Manager

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

CONTENTS

1 SUMMARY OF TESTING 3
2.1 TEST PLAN 4
2.2 DEVIATIONS FROM STANDARD 4
3 TEST CONDITIONS 5
3.1 OPERATION MODE 5
3.2 UNCERTAINTY APPLICATION 5
3.3 EQUIPMENT CLASSIFICATIONS 7
3.4 PROTECTION CLASSIFICATIONS 7
3.5 PERFORMANCE CRITERIA OF TEST SPECIFICATION 7
3.6 EUT FUNCTION MONITORING 7
4 TEST SYSTEM CONFIGURATION 7
4.1 EUT EXERCISE SOFTWARE 7
4.2 EUT MODIFICATIONS 7
5 EUT DESCRIPTION 8
5.1 EUT SPECIFICATION 8
5.2 EUT CONFIGURATION 8
5.3 PERIPHERALS DESCRIPTION 8
5.4 CABLES DESCRIPTION 8
6 TEST SETUP AND RESULT 9
6.1 TEST ITEM: CONDUCTED EMISSION 9
6.2 TEST ITEM: RADIATED EMISSION 13
6.3 TEST ITEM: HARMONIC EMISSION 17
6.4 TEST ITEM: VOLTAGE FLUCTUATION 21
6.5 TEST ITEM: CONDUCTED IMMUNITY 24
6.6 TEST ITEM: RADIATED IMMUNITY 27
6.7 TEST ITEM: POWER FREQUENCY MAGNETIC 31
6.8 TEST ITEM: ELECTROSTATIC DISCHARGE 34
6.9 TEST ITEM: ELECTRICAL FAST TRANSIENT 40
6.10 TEST ITEM: VOLTAGE DIPS 43

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

1 SUMMARY OF TESTING

This product was tested and complied according to following specification standards:

EN 61000-6-4 Generic standard-Emission standard for industrial environments.

EN 61000-6-2 Generic standard-Immunity for industrial environment.

Test Item	Test Specification	Test Method	Result
Conducted Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	PASS
Radiated Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	FAIL
Harmonic Emission	EN 61000-3-2:2014	IEC/EN 61000-3-2:2014	PASS
Voltage Fluctuation	EN 61000-3-3:2013	IEC/EN 61000-3-3:2013	PASS
Conducted Immunity	EN61000-6-2:2005 0.15MHz to 80 MHz, 3V 1KHz 80% AM, Criterion A	IEC 61000-4-6:2008 (Ed 3.0)	PASS
Radiated Immunity	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A	IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1)	PASS
	EN61000-6-2:2005,1400MHz to 2000 MHz, 3V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
	EN61000-6-2:2005,2000MHz to 2700 MHz, 1V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
Power frequency Magnetic	EN61000-6-2:2005, 30A/m 50Hz, Criterion A	EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0)	PASS
Electrostatic Discharge	EN61000-6-2:2005, 8kV air, 4kV contact, Criterion B	IEC61000-4-2:2008 (Ed 2.0)	PASS
Electrical Fast Transient	EN61000-6-2:2005, 1kV 5/50ns 5kHz, Criterion B	IEC 61000-4-4:2004 (Ed 2.0)	PASS
Voltage Dips	EN61000-6-2:2005, Dip 60% 10P, Dip30% 25P, Interrupt 0.5P, Criterion C	IEC61000-4-11:2004 (Ed2.0)	PASS

Note: -

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

2 TEST PLAN AND DEVIATIONS FROM STANDARD

2.1 Test Plan

No.	Test Item	Input Voltage	Mode	Test Port	Test Specification
1	Conducted Emission	230V 50Hz	A	AC Main	EN61000-6-4:2007+A1:2011
2	Radiated Emission	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-4:2007+A1:2011
3	Harmonic Emission	230V 50Hz	A	AC Main	EN 61000-3-2:2014
4	Voltage Fluctuation	230V 50Hz	A	AC Main	EN 61000-3-3:2013
5	Conducted Immunity	230V 50Hz	A	AC Main	EN61000-6-2:2005 0.15MHz to 80 MHz, 3V 1KHz 80% AM, Criterion A
6	Radiated Immunity	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A
					EN61000-6-2:2005,1400MHz to 2000 MHz, 3V/m 1KHz 80% AM Criterion A
					EN61000-6-2:2005,2000MHz to 2700 MHz, 1V/m 1KHz 80% AM Criterion A
7	Power frequency Magnetic	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005, 30A/m 50Hz, Criterion A
8	Electrostatic Discharge	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005, 8kV air, 4kV contact, Criterion B
9	Electrical Fast Transient	230V 50Hz	A	AC Main	EN61000-6-2:2005, 1kV 5/50ns 5kHz, Criterion B
10	Voltage Dips	230V 50Hz	A	AC Main	EN61000-6-2:2005, Dip 60% 10P, Dip30% 25P, Interrupt 0.5P, Criterion C

2.2 Deviations from standard

-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3 TEST CONDITIONS

3.1 Operation Mode

A: Normal Operated.

3.2 Uncertainty Application

3.2.1 Uncertainty application according to CISPR 16-4-2:2003 for Conducted Emission, Radiated Disturbance and Disturbance Power Testing.

Compliance or Non-Compliance with a disturbance limit was determined in the following manner

If U_{lab} is less than or equal to U_{cispr} in table 1, then:

- Compliance is deemed to occur if no measured disturbance exceeds the disturbance limit.
- Non-Compliance is deemed to occur if any measured disturbance exceeds the disturbance limit.

If U_{lab} is greater than U_{cispr} in table 1, then:

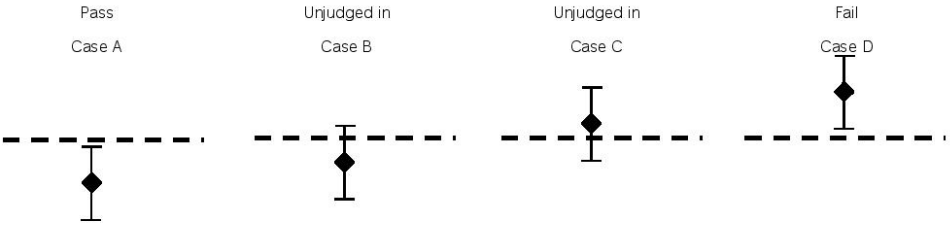
- Compliance is deemed to occur if no measured disturbance, increased by (U_{lab}- U_{cispr}), exceeds the disturbance limit.
- Non-Compliance is deemed to occur if any measured disturbance, increased by (U_{lab}-U_{cispr}), exceeds the disturbance limit.

Table 1 - Values of U_{cispr}

Abbreviation	Testing system	Frequency range	U_{lab}	U_{cispr}	U_{lab}- U_{cispr}
CE	Conducted Emission	9 kHz - 150 kHz	2.88	4.00	-1.12
CE	Conducted Emission	150 kHz - 30 MHz	3.51	3.60	-0.09
RE	Radiated Disturbance	30 MHz - 1000 MHz	4.80	5.20	-0.40
PE	Disturbance Power	30 MHz - 300 MHz	2.42	4.50	-2.08

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3.2.2 Uncertainty Application according to LAB 34 Edition 1 (Figure 1) for other testing system.



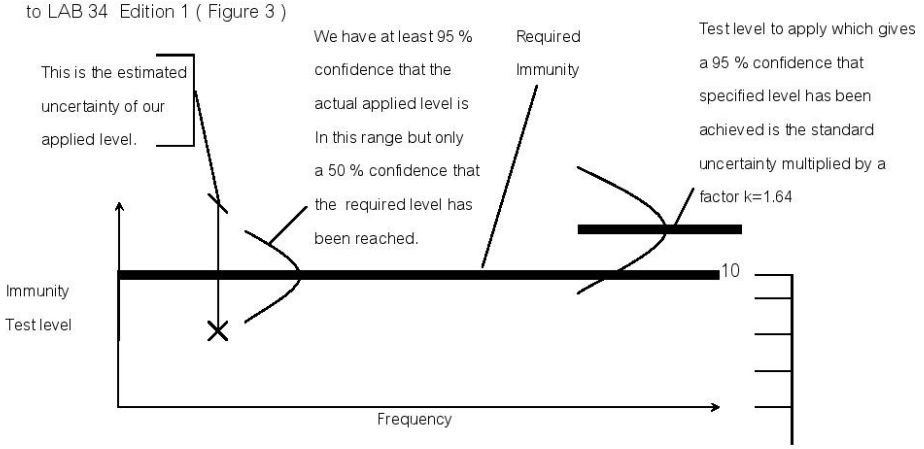
Case A	Case B	Case C	Case D
The measured result is within the limit, even when extended by the uncertainty interval. The product therefore complies with the specification.	The measured result is below the upper limit, but by a margin less than half of the uncertainty interval; it is therefore not possible to state compliance based on the 95% level of confidence. However, the result indicates that compliance is more probable than non-compliance.	The measured result is above the upper limit, but by a margin less than half of the uncertainty interval; it is therefore not possible to state non-compliance based on the 95% level of confidence. However, the result indicates that non-compliance is more probable than compliance.	The measured result is beyond the upper limit, even when extended downwards by half of the uncertainty interval. The product therefore does not comply with the specification.

◆ = measured result

I = uncertainty interval

3.2.3 Uncertainty Application for immunity testing.

Uncertainty of each test systems are applied for compliance with related standard according to LAB 34 Edition 1 (Figure 3)



This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3.3 Equipment Classifications

Class A for EN 61000-3-2

3.4 Protection Classifications

Class I

3.5 Performance Criteria of Test Specification

a) Performance criterion A: The apparatus shall continue to operate as intended during and after the test. No degradation of performance or loss of function is allowed below a performance level specified by the manufacturer, when the apparatus is used as intended. The performance level may be replaced by a permissible loss of performance. If the minimum performance level or the permissible performance loss is not specified by the manufacturer, either of these may be derived from the product description and documentation and what the user may reasonably expect from the apparatus if used as intended.

b) Performance criterion B: apparatus shall continue to operate as intended after the test. No degradation of performance or loss of function is allowed below a performance level specified by the manufacturer, when the apparatus is used as intended. The performance level may be replaced by a permissible loss of performance. During the test, Degradation of performance is however allowed. No change of actual operating state or stored data is allowed. If the minimum performance level or the permissible performance loss is not specified by the manufacturer, either of these may be derived from the product description and documentation and what the user may reasonably expect from the apparatus if used as intended.

C) Performance criterion C: Temporary loss of function is allowed, provided the function is self-recoverable or can be restored by the operation of the controls.

3.6 EUT Function Monitoring

The specific phenomena are monitored by motor speed.

4 TEST SYSTEM CONFIGURATION

4.1 EUT Exercise Software

-

4.2 EUT Modifications

-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

5 EUT DESCRIPTION

5.1 EUT Specification

Input Voltage	230 V / 50Hz
Input Current/Power	≤16 A
Clock/Oscillator	-

5.2 EUT Configuration

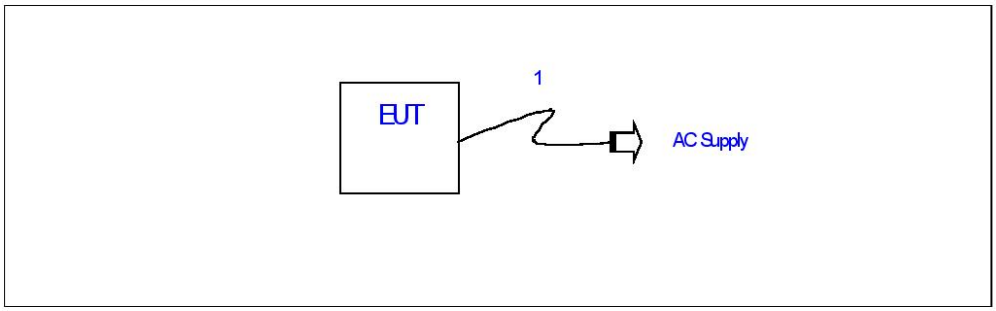


FIGURE 1 - EUT Configuration.

5.3 Peripherals Description

Diagram	Description	Trade Name	Model	Serial Number
-	-	-	-	-

5.4 Cables Description

Ref	Cable Type	Shield	Length (meters)	Ferrite	Connector	Connection Point 1	Connection Point 2
1	AC Power line	No	1.5	No	AC	EUT	AC Supply

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6 TEST SETUP AND RESULT

6.1 Test Item: Conducted Emission

6.1.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESU26	100459	DKD	02-09-17
LISN	TESEQ	NNB52	36109	NIMT	05-02-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±3.51 dB

- **Test Location:** SR 2

- **Test Environment**

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	55

- **Test Setup Description**

The disturbance voltage at the main terminals testing measurements were performed with the EMI receiver to observe the emission characteristics and to identify the frequency of emission that had the highest amplitude related to the EUT configuration for the disturbance voltage at the main terminals testing.

The EUT was placed on an 80 cm from ground plane in the Shield room. The power line of the EUT was connected to the LISN, which was located in the Test area. The EMI receiver measured the noise signals from the EUT. The testing method and the EUT setup were performed according to CISPR 16-2-3:2006. The EUT configuration for the disturbance voltage at the main terminals testing is shown in FIGURE 2 and 3, respectively.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

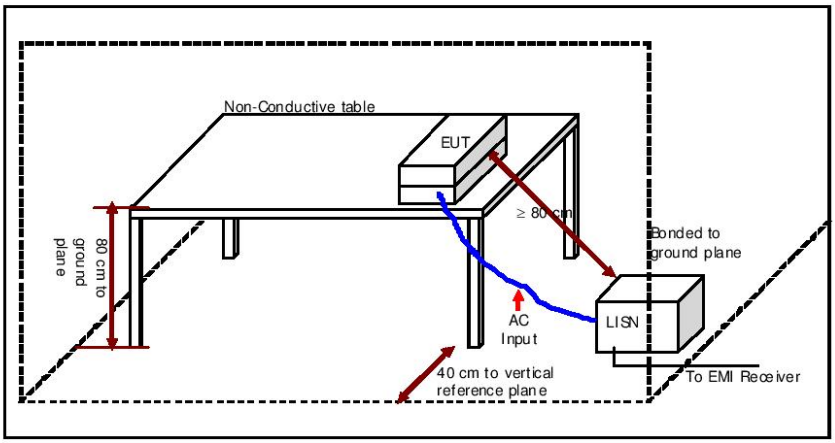


FIGURE 2 - The setup diagram.



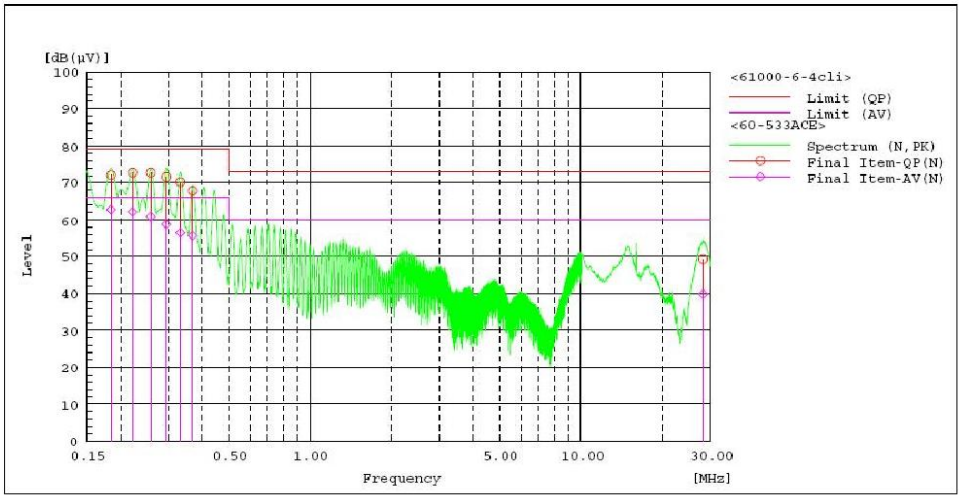
FIGURE 3 - The test setup picture

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Result.

Measurement Port	AC Main	Operation Mode	A (See 3.1)

Test Result for Neutron.



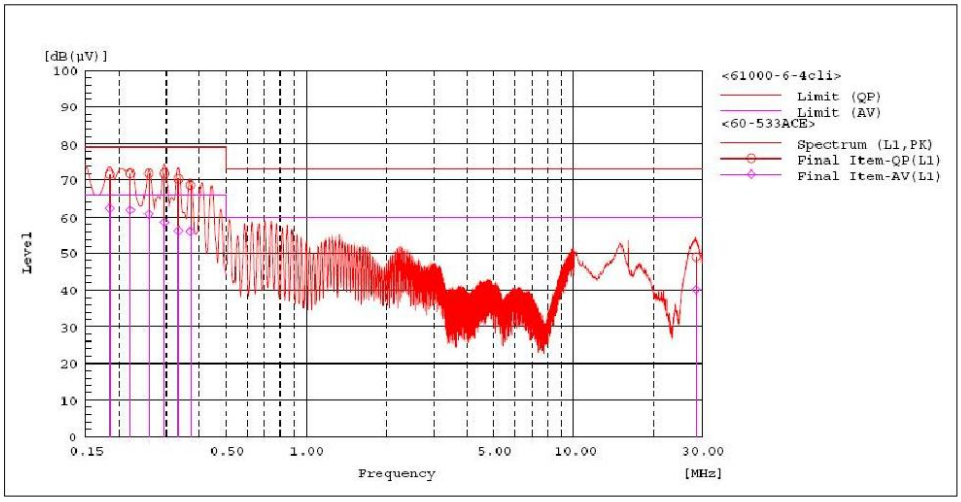
Measurement Result of Quasi-Peak and Average Detector.

--- N Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.1845	72.1	62.8	0.0	72.1	62.8	79.0	66.0	6.9	3.2
2	0.22171	72.8	62.1	0.0	72.8	62.1	79.0	66.0	6.2	3.9
3	0.25838	72.8	60.9	0.0	72.8	60.9	79.0	66.0	6.2	5.1
4	0.29517	71.6	58.8	0.0	71.6	58.8	79.0	66.0	7.4	7.2
5	0.33237	70.2	56.5	0.0	70.2	56.5	79.0	66.0	8.8	9.5
6	0.36894	67.9	55.7	0.0	67.9	55.7	79.0	66.0	11.1	10.3
7	28.26025	49.0	39.5	0.3	49.3	39.8	73.0	60.0	23.7	20.2

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Test Result for Line1



Measurement Result of Quasi-Peak and Average Detector.

--- L1 Phase ---

No.	Frequency [MHz]	Reading QP [dB(µV)]	Reading CAV [dB(µV)]	c.f [dB]	Result QP [dB(µV)]	Result CAV [dB(µV)]	Limit QP [dB(µV)]	Limit AV [dB(µV)]	Margin QP [dB]	Margin CAV [dB]
1	0.18452	71.7	62.4	0.0	71.7	62.4	79.0	66.0	7.3	3.6
2	0.22029	71.9	61.9	0.0	71.9	61.9	79.0	66.0	7.1	4.1
3	0.25842	71.9	60.8	0.0	71.9	60.8	79.0	66.0	7.1	5.2
4	0.29535	71.9	58.5	0.0	71.9	58.5	79.0	66.0	7.1	7.5
5	0.3335	70.5	56.3	0.0	70.5	56.3	79.0	66.0	8.5	9.7
6	0.36976	68.7	56.0	0.0	68.7	56.0	79.0	66.0	10.3	10.0
7	28.63864	48.8	39.8	0.3	49.1	40.1	73.0	60.0	23.9	19.9

Result: ***Pass***

Tested by: Marut Hninae

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.2 Test Item: Radiated Emission

6.2.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESU26	100459	DKD	02-09-17
Amplifier	Sonoma	310 N	186897	NIMT	05-02-17
Bilog Antenna	Schaffner	CBL6141A	4146	UKAS	05-01-17
Trilog - Broadband Antenna	SCHWARZBECK	VULB9162	9162-088	UKAS	20-05-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±4.80 dB

- **Test Location:** SAC 1

- **Test Environment**

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	56

- **Test Setup Description**

The radiated emission measurement was performed with EMI receiver to observe the emission characteristic and identify the frequency of emission that has the highest amplitude relative to limit by operating the EUT with a typical configuration. The EUT configuration, cable configurations of operation are determined for producing the maximum level of emissions.

The EUT was placed on the 80 cm height non-metallic table on a 1 m radius turntable.

The Trilog - Broadband Antenna (30 MHz - 7GHz) was used for received the noise of EUT and put on the antenna mast, which they were in side the semi-anechoic chamber. The testing method and the EUT setup were performed according to CISPR 16-2-3:2006). The EUT configuration setup is shown in figures 4 and 5, respectively.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

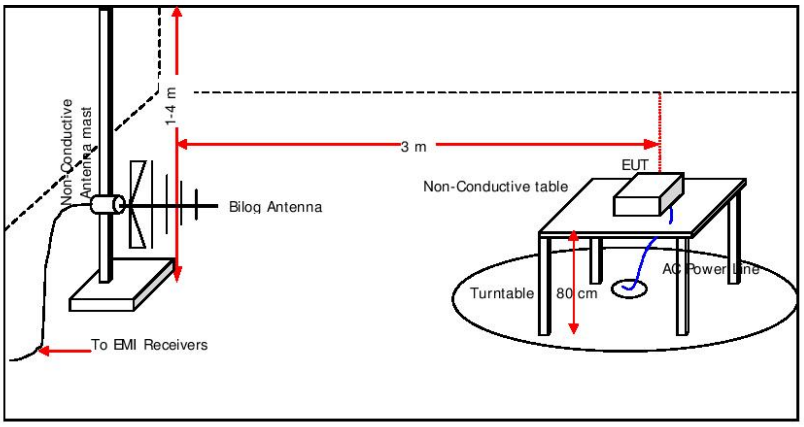


FIGURE 4 - The test setup diagram.

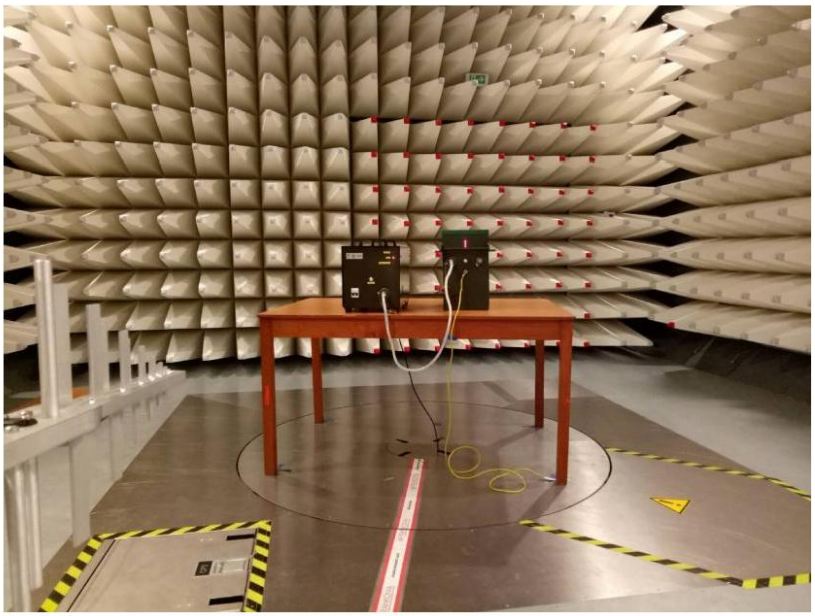


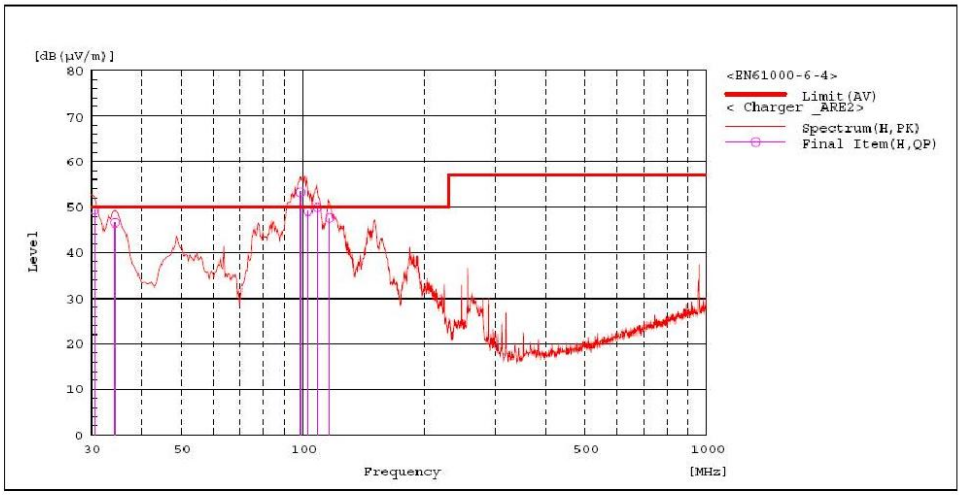
FIGURE 5 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

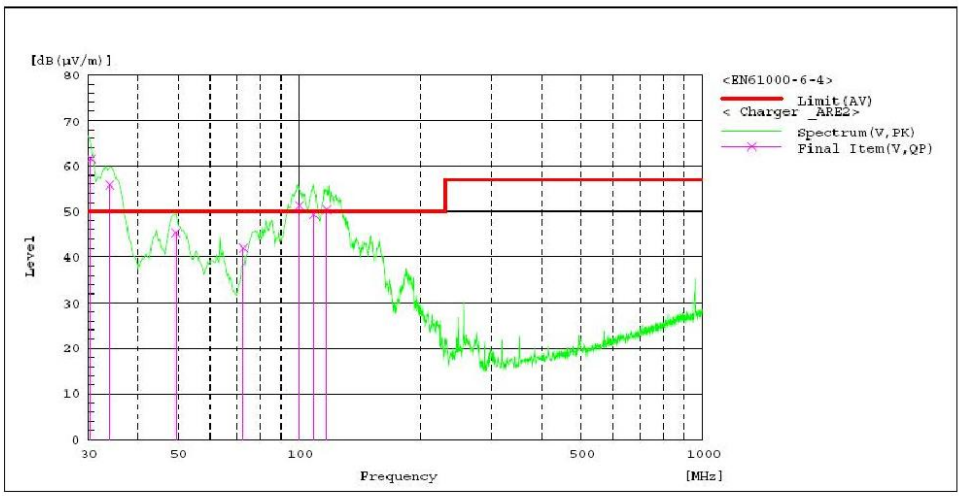
6.2.2 Test Result

Measurement Port	Enclosure	Operation Mode	A (See 3.1)

Test result for horizontal polarization



Test result for vertical polarization



This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Measurement Result of Quasi-Peak Detector

No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB(µV)]	c.f [dB(1/m)]	Result QP [dB(µV/m)]	Limit QP [dB(µV/m)]	Margin QP [dB]	Height [cm]	Angle [°]
1	30.520	H	67.0	-17.7	49.3	50.0	0.7	199.0	21.0
2	34.326	H	64.0	-17.4	46.6	50.0	3.4	300.0	180.0
3	98.798	H	70.0	-16.8	53.2	50.0	-3.2	300.0	112.0
4	103.125	H	65.6	-16.5	49.1	50.0	0.9	202.0	102.0
5	108.754	H	66.7	-16.8	49.9	50.0	0.1	300.0	110.0
6	116.574	H	65.5	-17.9	47.6	50.0	2.4	200.0	98.0
7	30.432	V	79.3	-17.7	61.6	50.0	-11.6	100.0	0.0
8	33.894	V	73.3	-17.4	55.9	50.0	-5.9	100.0	101.0
9	49.471	V	60.0	-14.6	45.4	50.0	4.6	100.0	0.0
10	72.732	V	62.1	-20.1	42.0	50.0	8.0	100.0	0.0
11	100.096	V	68.0	-16.7	51.3	50.0	-1.3	100.0	140.0
12	108.754	V	66.2	-16.8	49.4	50.0	0.6	100.0	0.0
13	116.975	V	68.5	-18.0	50.5	50.0	-0.5	100.0	45.0

Result: ***Fail***

Tested by: MR. Marut Hnihnae

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.3 Test Item: Harmonic Emission

6.3.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
Harmonic and Flicker Analyzer	EM Test	DPA 503	0603-01	NIMT	07-03-17
AC-Power Source	BEHLMAN	ACM3X1500-100-03-13	05029	-	-

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±3.85 %

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

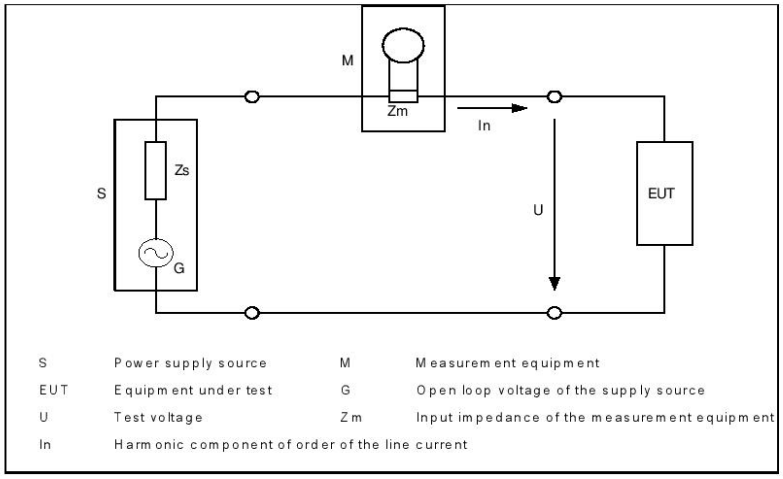
Temperature: (°C)	26	Humidity (%)	55

- **Test Setup Description**

The harmonic load currents were measured according to EN 61000-3-2:2006+A1:2009+A2:2009. The EUT was connected to AC power source, which was decoupled from the public mains connection. The analysis was performed with a measurement in a time domain of transient harmonic load currents. The data was transformed into a frequency range and assessed up to the 40th harmonic by using the Discrete Fourier Transforms. The EUT configuration for the harmonic current emission testing is shown in FIGURE 6 and 7, respectively.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture



S	Power supply source	M	Measurement equipment
EUT	Equipment under test	G	Open loop voltage of the supply source
U	Test voltage	Zm	Input impedance of the measurement equipment
In	Harmonic component of order of the line current		

FIGURE 6 - The setup diagram.



FIGURE 7 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- **Test Result**

Measurement Port	AC Main	Operation Mode	A (See 3.1)

Harm#	Harms(avg)	100%Limit	%of Limit	Harms(max)	150%Limit	%of Limit	Status
2	0.006	1.080	0.5	0.011	1.620	0.7	Pass
3	0.630	2.300	27.4	0.891	3.450	25.8	Pass
4	0.002	0.430	N/A	0.004	0.645	N/A	Pass
5	0.360	1.140	31.6	0.500	1.710	29.2	Pass
6	0.002	0.300	N/A	0.003	0.450	N/A	Pass
7	0.070	0.770	9.1	0.084	1.155	7.3	Pass
8	0.002	0.230	N/A	0.003	0.345	N/A	Pass
9	0.024	0.400	6.0	0.081	0.600	13.5	Pass
10	0.001	0.184	N/A	0.002	0.276	N/A	Pass
11	0.031	0.330	9.5	0.075	0.495	15.1	Pass
12	0.001	0.153	N/A	0.002	0.230	N/A	Pass
13	0.057	0.210	27.0	0.074	0.315	23.6	Pass
14	0.001	0.131	N/A	0.002	0.197	N/A	Pass
15	0.101	0.150	67.5	0.131	0.225	58.2	Pass
16	0.002	0.115	N/A	0.002	0.173	N/A	Pass
17	0.047	0.132	35.5	0.073	0.198	36.8	Pass
18	0.001	0.102	N/A	0.002	0.153	N/A	Pass
19	0.043	0.118	36.0	0.074	0.178	41.7	Pass
20	0.001	0.092	N/A	0.002	0.138	N/A	Pass
21	0.047	0.107	44.0	0.063	0.161	39.5	Pass
22	0.001	0.084	N/A	0.002	0.125	N/A	Pass
23	0.047	0.098	48.3	0.056	0.147	38.5	Pass
24	0.001	0.077	N/A	0.002	0.115	N/A	Pass
25	0.026	0.090	28.6	0.050	0.135	37.2	Pass
26	0.001	0.071	N/A	0.002	0.107	N/A	Pass
27	0.031	0.083	37.0	0.043	0.125	34.0	Pass
28	0.001	0.066	N/A	0.002	0.099	N/A	Pass
29	0.031	0.078	40.6	0.037	0.116	31.5	Pass

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Harm#	Harms(avg)	100%Limit	%of Limit	Harms(max)	150%Limit	%of Limit	Status
30	0.001	0.061	N/A	0.002	0.092	N/A	Pass
31	0.041	0.073	56.6	0.049	0.109	45.3	Pass
32	0.001	0.058	N/A	0.002	0.086	N/A	Pass
33	0.018	0.068	26.5	0.030	0.102	29.5	Pass
34	0.001	0.054	N/A	0.002	0.081	N/A	Pass
35	0.027	0.064	41.6	0.035	0.096	35.8	Pass
36	0.001	0.051	N/A	0.002	0.077	N/A	Pass
37	0.011	0.061	18.9	0.019	0.091	21.4	Pass
38	0.001	0.048	N/A	0.002	0.073	N/A	Pass
39	0.028	0.058	49.1	0.037	0.087	43.1	Pass
40	0.001	0.046	N/A	0.002	0.069	N/A	Pass

Result: ***Pass***

Tested by: Marut Hninae

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.4 Test Item: Voltage Fluctuation

6.4.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
Harmonic and Flicker Analyzer	EM Test	DPA 503	0603-01	NIMT	07-03-17
Reference Impedance	PTEC	REF01	RID-002	NIMT	27-04-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±2.46%

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

Temperature: (°C)	25	Humidity (%)	55

- **Test Setup Description**

The Voltage fluctuation (flicker) was tested according to EN 61000-3-3:2008. The EUT was decoupled from the public main and connected to the reference impedance according to IEC 725. The voltage fluctuation testing was performed automatically with the Harmonic& Flicker Analyzer and the software. The EUT was operated continuously. The measurement was made after a steady state has been reached. The EUT configuration for the voltage fluctuation testing is shown in FIGURE 8 and 9, respectively.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

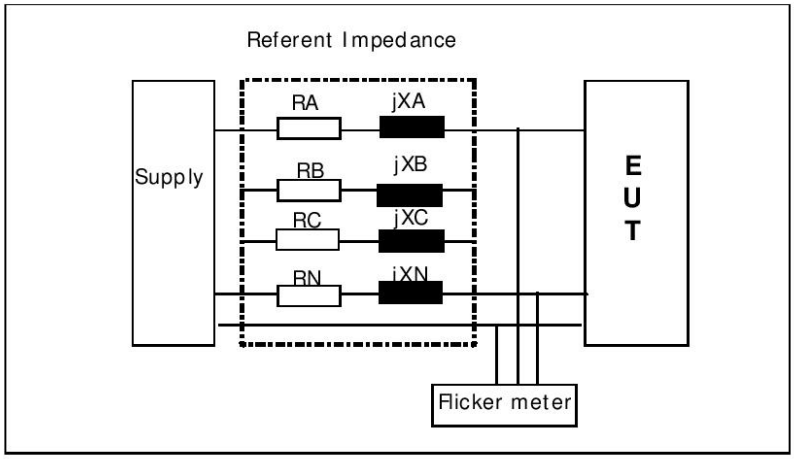


FIGURE 8 - The setup diagram.



FIGURE 9 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.4.1 Test Result

Measurement Port	AC Main	Operation Mode	A (See 3.1)

Maximum Flicker Results

T-max (mS):	0.0	Test limit (mS):	500.0	Pass
Highest dc (%):	0.51	Test limit (%):	3.30	Pass
Highest dmax (%):	0.54	Test limit (%):	4.00	Pass
Highest Pst (10 min. period):	0.164	Test limit:	1.000	Pass
Highest Plt (2 hr. period):	0.084	Test limit:	0.650	Pass

Tested by: Marut Hninae

Result: ***Pass***

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.5 Test Item: Conducted Immunity

6.5.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
EM clamp	TESEQ	KEMZ 801AS50	38662	TESEQ	14-05-17
Compact immunity test system	TESEQ	NSG 4070B-30	39604	DKD	04-05-17
Dual directional coupler	TESEQ	DCP 0100A	40093	TESEQ	04-05-17
Power Amplifier	TESEQ	CBA400M-110	T44431	TESEQ	20-05-17
Current injection probe	TESEQ	CIP 9136A	35442	TESEQ	15-05-17
Coupling/Decoupling network	TESEQ	CDN M332S	37751	TESEQ	14-05-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ± 2.09 dB

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

Temperature : (°C)	25	Humidity (%)	52

- **Test Setup Description**

The EUT was set up according to IEC61000-4-6:2013 (Ed 3.0). The conducted interference signal was connected to the 6 dB attenuator before connected to the CDN and the EM-Clamp for injecting the RF signal to the EUT at the power cord and the signal line respectively. The test setup diagram and the test setup picture are shown in the FIGURE 10 and 11.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

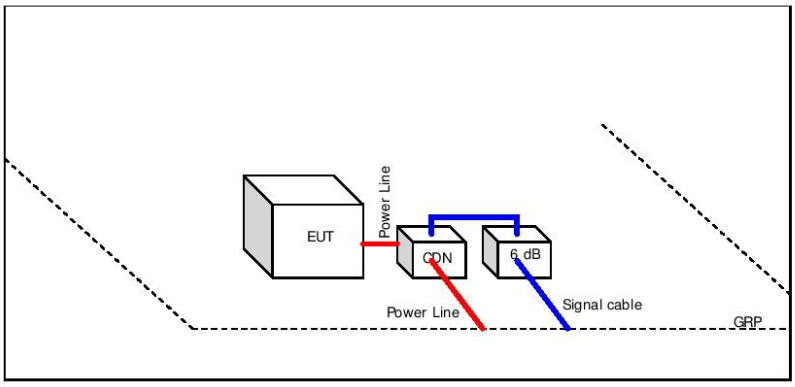


FIGURE 10 - The setup diagram.

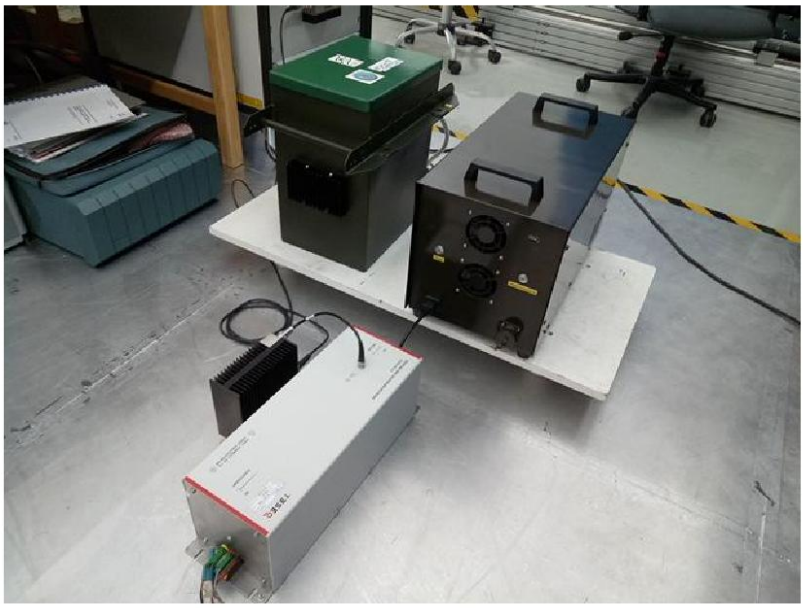


FIGURE 11 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.5.2 Test Result

Test port	Test level	Frequency	Step frequency	Modulation	Dwell time	Result
AC Power Line	3 V	150 KHz-230 MHz	1% Log	AM 80% with 1kHz	3 Sec	NORM

Note: "-": Not Test "NORM": Normal "AB": Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

6.6 Test Item: Radiated Immunity

6.6.2 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
RF Generator	TESEQ	ITS6006	37556	NIST	15-05-17
Power Meter	TESEQ	PM6006	74528	NIST	15-05-17
Power Meter	TESEQ	PM6006	74529	NIST	15-05-17
Power Meter	TESEQ	PM6006	74530	NIST	15-05-17
Power Amplifier	TESEQ	CBA1G-275	T44430	NIST	15-05-17
Power Amplifier	TESEQ	CBA3G-100	T44429	NIST	15-05-17
RF immunity testing	TESEQ	AS1860-50	1067826	NIST	15-05-17
Bilog Antenna	AR	ATL80M1G	0343177	NIST	15-05-17
Horn Antenna	AMETEK	AM0.2-2HA	14635	NIST	19-05-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ± 1.78 dB

- **Test Location:** CHC

- **Test Environment**

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	55

- **Test Setup Description**

The RF power used in this testing was pre-calibrated according to the IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1). standard. The EUT was placed on the 0.8 m high non-metallic table which located in the Medium Compact Diagnostic Chamber (CHC). The EUT was placed only four sides directly to the antenna. The transmitter antenna was operated in both the vertical and horizontal polarizations.

The EUT was located on the table in the uniform field area. The distance between the transmitter antenna and the outer edge of the EUT was 3 meters. The EUT configurations for radiated immunity testing are shown in FIGURE 12 and 13.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

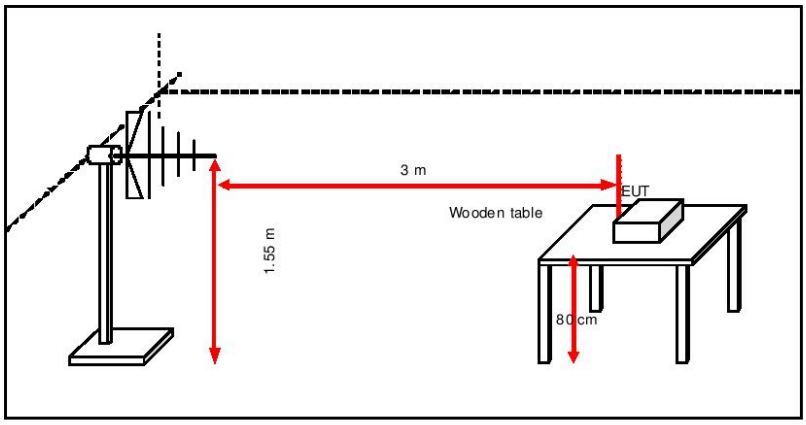


FIGURE 12 - The setup diagram.



FIGURE 13 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.2.3 Test Result

Test Condition 1					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	10 V/m	Start Frequency:	80 MHz	Stop Frequency:	1000 MHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Test Condition 2					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	3 V/m	Start Frequency:	1.4 GHz	Stop Frequency:	2.0 GHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Test Condition 3					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	1 V/m	Start Frequency:	2.0 GHz	Stop Frequency:	2.7 GHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.7 Test Item: Power Frequency Magnetic

6.7.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
Induction Coil Interface	TESEQ	INA2141	1423	UKAS	05-02-17
Induction Coil	TESEQ	INA703	1987	UKAS	05-02-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±1.15 %

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	54

- **Test Setup Description**

The power frequency magnetic field was tested according to the immersion method of EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0).

The induction coil was rotated by 90° in order to expose the EUT to the test field with different orientations.

The EUT was placed on the reference ground plane is shown in the FIGURE 14 and 15.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Picture

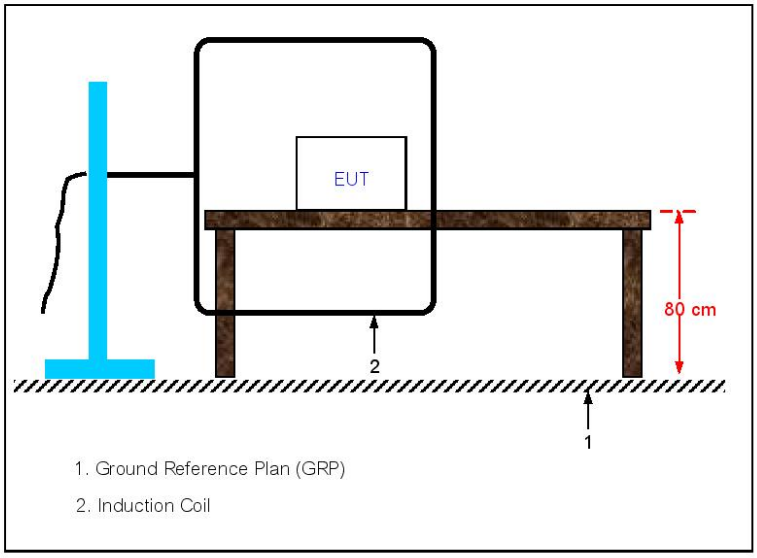


FIGURE 14 - The setup diagram.

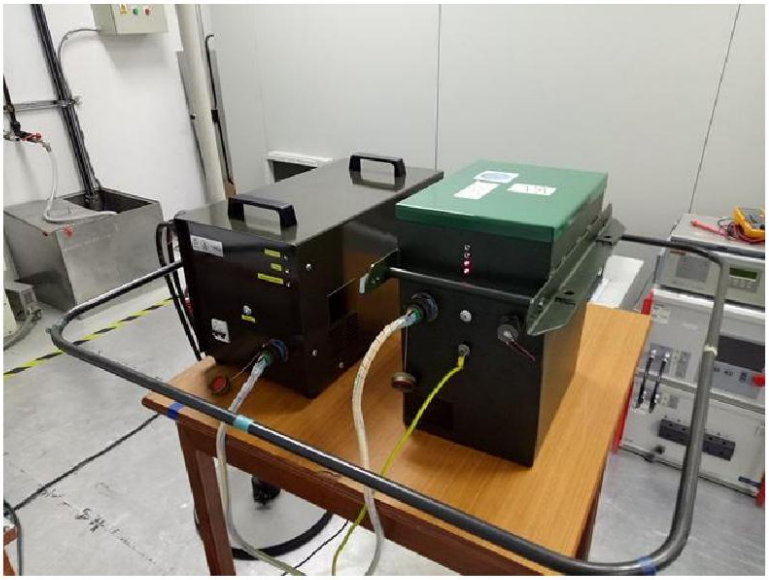


FIGURE 15 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Result

Magnetic Field (A/m)	Axis	Result
30 A/m	X,Y,Z	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.8 Test Item: Electrostatic Discharge

6.8.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
ESD Generator	TESEQ	NSG438	1226	NIST	20-11-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ± 7.09 %

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

Temperature (°C)	24	Humidity (%)	53

- **Test Setup Description**

The ESD was executed at a few weak points which can be normally touched by an operator or customer. The repetition rate between the impulses was at least 1 sec. The EUT was placed on the ground plane. The test points are shown in Figure 16.

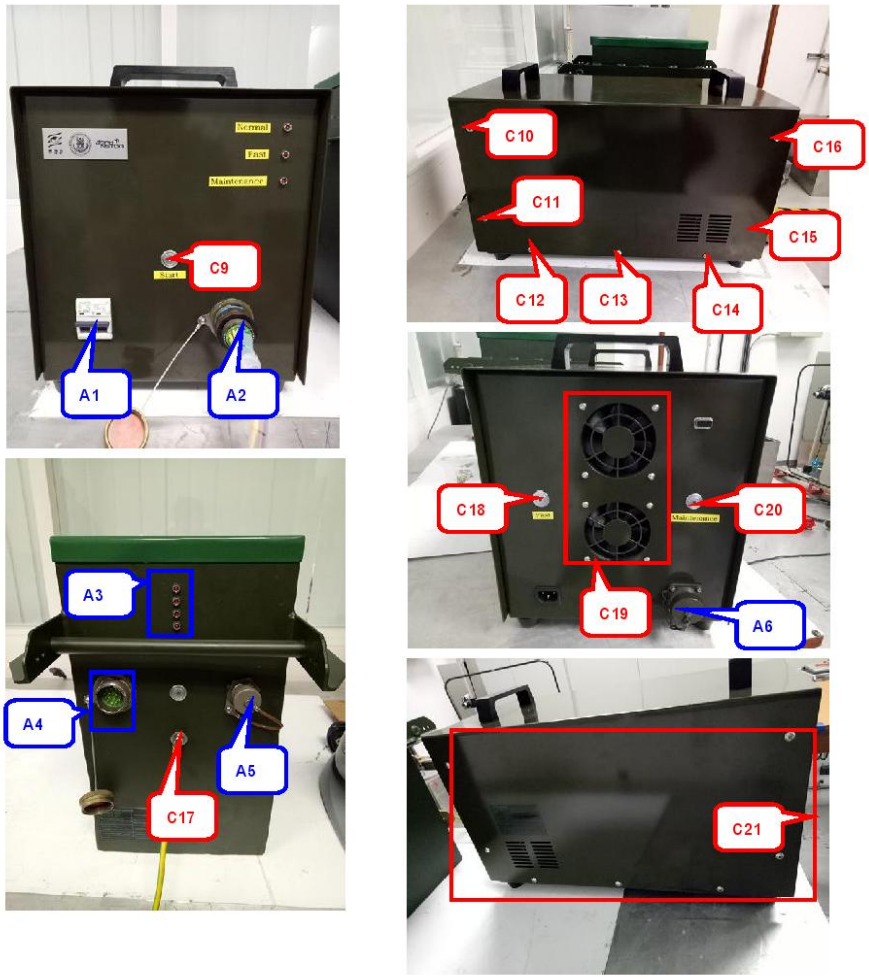
The EUT configuration and diagram for the electrostatic discharge testing are shown in FIGURE 17 and 18 respectively.

Electrostatic Discharge Testing Description

No.	Test Points	Type of Testing	Test Voltage (KV)	Number of Discharge per pol.	Operation Mode (see3.1)	Performance Criterion
1	A1-A8	Air	± 8	10	A	B
2	C9-C21	Contact	± 4	10	A	B
3	VCP	Contact	± 4	10	A	B

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Picture



This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

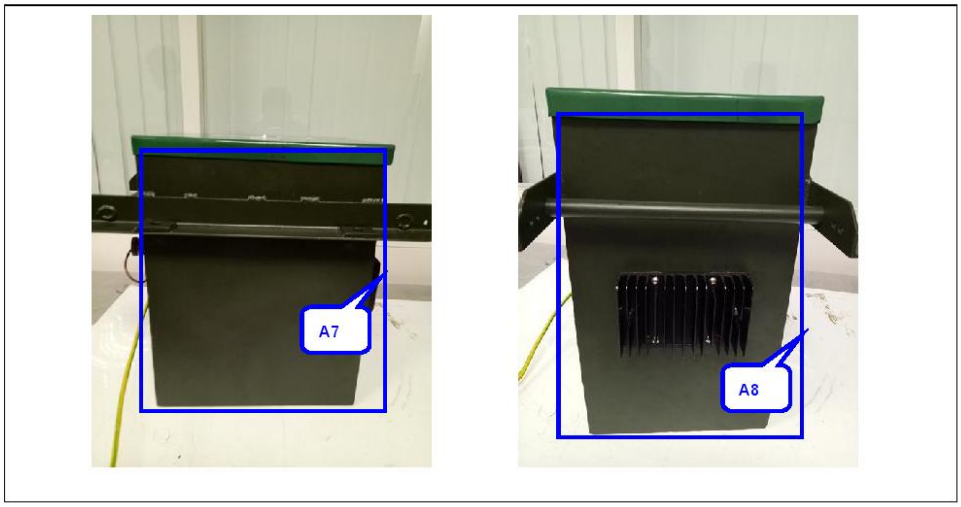


FIGURE 17 - Test points.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

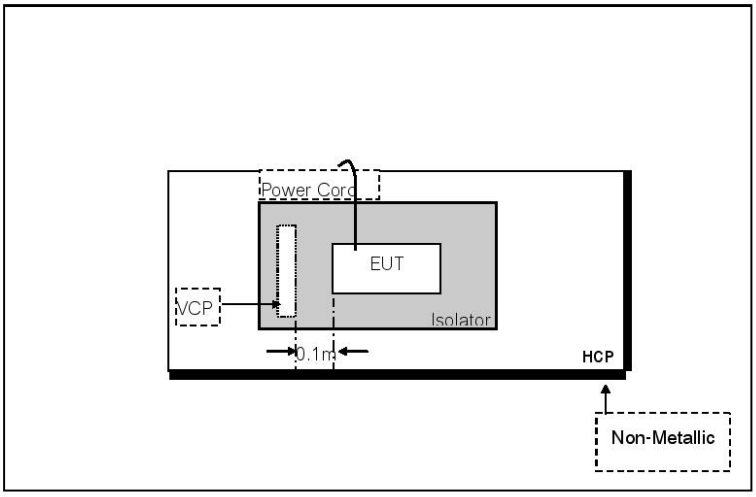


FIGURE 18 - The setup diagram.

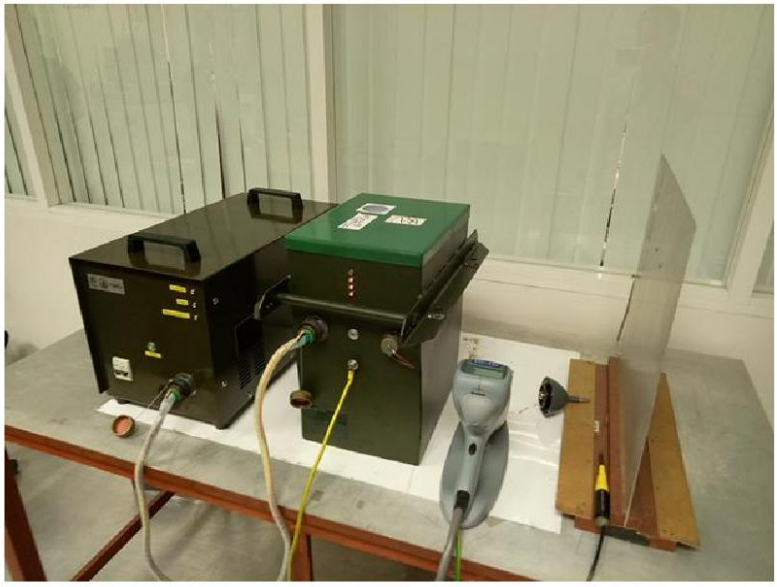


FIGURE 19 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.2.4 Test Result

Contact Discharge

Test Point	Operation Mode	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharge (Times)							
		+ 4/10	- 4/10	+ 6/10	- 6/10	+ 8/10	- 8/10	+ 10/10	- 10/10
C9	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C10	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C11	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C12	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C13	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C14	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C15	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C16	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C17	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C18	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C19	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C20	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C21	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
VCP	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-

Note: "-" : Not Test "ND" : Not Discharge "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Air Discharge

Test Point	Operation Mode	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharge (Times)							
		+ 4/10	- 4/10	+ 6/10	- 6/10	+ 8/10	- 8/10	+ 10/10	- 10/10
A1	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A2	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A3	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A4	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A5	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A6	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A7	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A8	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-

Note: "-" : Not Test "ND" : Not Discharge "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.9 Test Item: Electrical Fast Transient

6.9.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See 1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacturer	Model	S/N	Traceability	Due Date
EFT Simulator	TESEQ	NSG 3040/ CDN 3043/ FTM 3425-40	1943/2026/419	NIST	19-11-17
Capacitive Coupling Clamp	TESEQ	CDN 3425	1752	-	-

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ± 5.03 %

- **Test Location:** Test area

- **Test Environment**

Temperature : (°C)	25	Humidity (%)	52

- **Test Setup Description**

The EUT was arranged and connected to the auxiliary equipment for operating. For the power line testing, the coupling decoupling network (CDN) was used for coupling the EFT signal to the EUT's power line. For the control line testing, the capacitive coupling clamp (CCL) was used for coupling the EFT signal to the EUT's control line. The EUT configuration for the electrical fast transient testing is shown in FIGURE 20 and 21 respectively.

The Electrical Fast Transient Testing Descriptions

Test Line	Voltage	Port	Repetition Rate (kHz)	During Time (Sec/Polarity)	Performance criteria
L-G	± 1 kV	AC	5	120	B
N-G	± 1 kV	AC	5	120	B
PE-G	± 1 kV	AC	5	120	B
L,N,PE-G	± 1 kV	AC	5	120	B

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● **Test Picture**

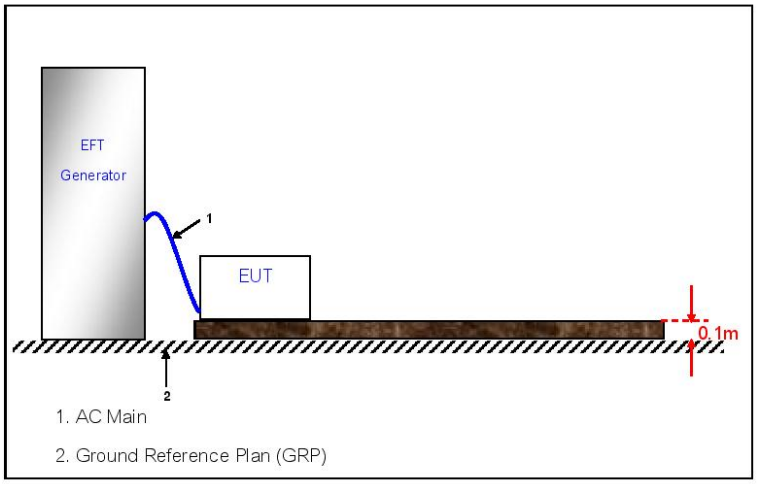


FIGURE 20 - The setup diagram.

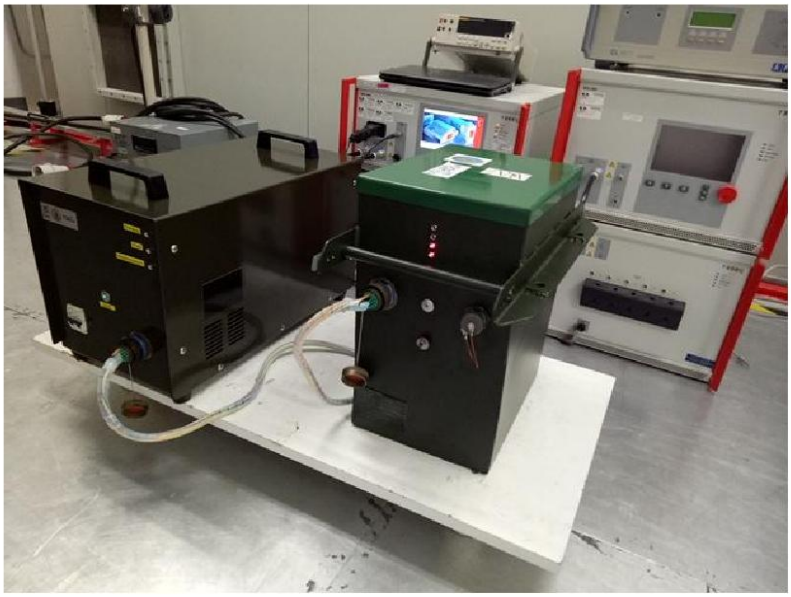


FIGURE 21 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.9.2 Test Result

Test Parameters			
Rise time :	5 ns	Period Time :	300 ms
Impulse Duration :	50 ns	Duration of Burst :	15 ms
Positive Burst :	2 min	Negative Burst :	2 min

Test Line	Voltage (kV)	Port	Repetition Rate (kHz)	During Time (Sec/Polarity)	Result
L-G	± 1 kV	AC	5	120	NORM
N-G	± 1 kV	AC	5	120	NORM
PE-G	± 1 kV	AC	5	120	NORM
L,N,PE-G	± 1 kV	AC	5	120	NORM

Note: "-": Not Test "NORM": Normal "AB": Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.10 Test Item: Voltage Dips

6.10.1 Test Setup

- Test Specification

See 1 and 2.1

- Test Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
PQF Simulator	TESEQ	NSG 3041/ PQM 3403/ INA 6501	1943/1035/223	NIST	17-11-17

- Customer's Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- Test Uncertainty: ± 3.17%

- Test Location: Test area

- Test Environment

Temperature : (°C)	24	Humidity (%)	54

- Test Setup Description

The power cord of the EUT was connected to the voltage dip and the interruption generator. The EUT was arranged and connected to the auxiliary equipment for operating.

The EUT configuration for the voltage dip and the short interruption testing are shown in FIGURE 22 and 23 respectively.

The voltage dip and the interruption testing descriptions

Phenomena	Test Level in% (ut)	Cycle	Phase angle	Performance criteria
V. Dip	40	0.5	0°	C
V. Dip	70	10	0°	C
Interruption	100	25	0°	C

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- **Test Picture**

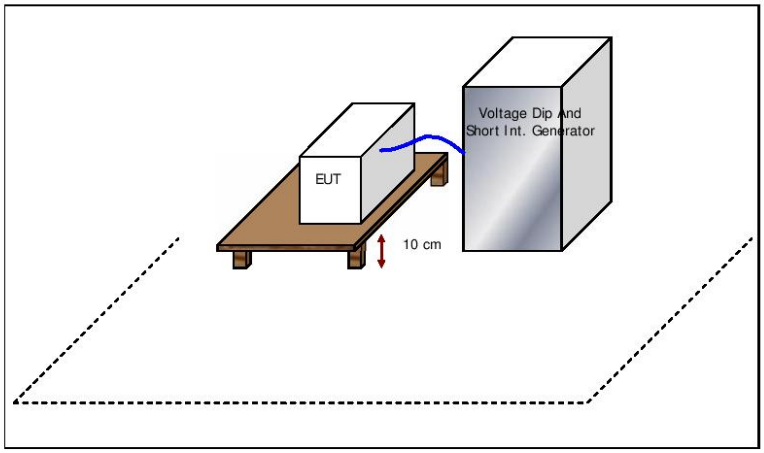


FIGURE 22 - The setup diagram.



FIGURE 23 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.10.2 Test Result

Test Phenomena	Number of Test	I/P Voltage / Frequency	Test Level in% (ut)	Phase angle (°)	Cycle	Result
V. Dip	3	230 V /50Hz	40	0°	0.5	NORM
V. Dip	3	230 V / 50Hz	70	0°	10	NORM
Interruption	3	230 V/ 50Hz	100	0°	25	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

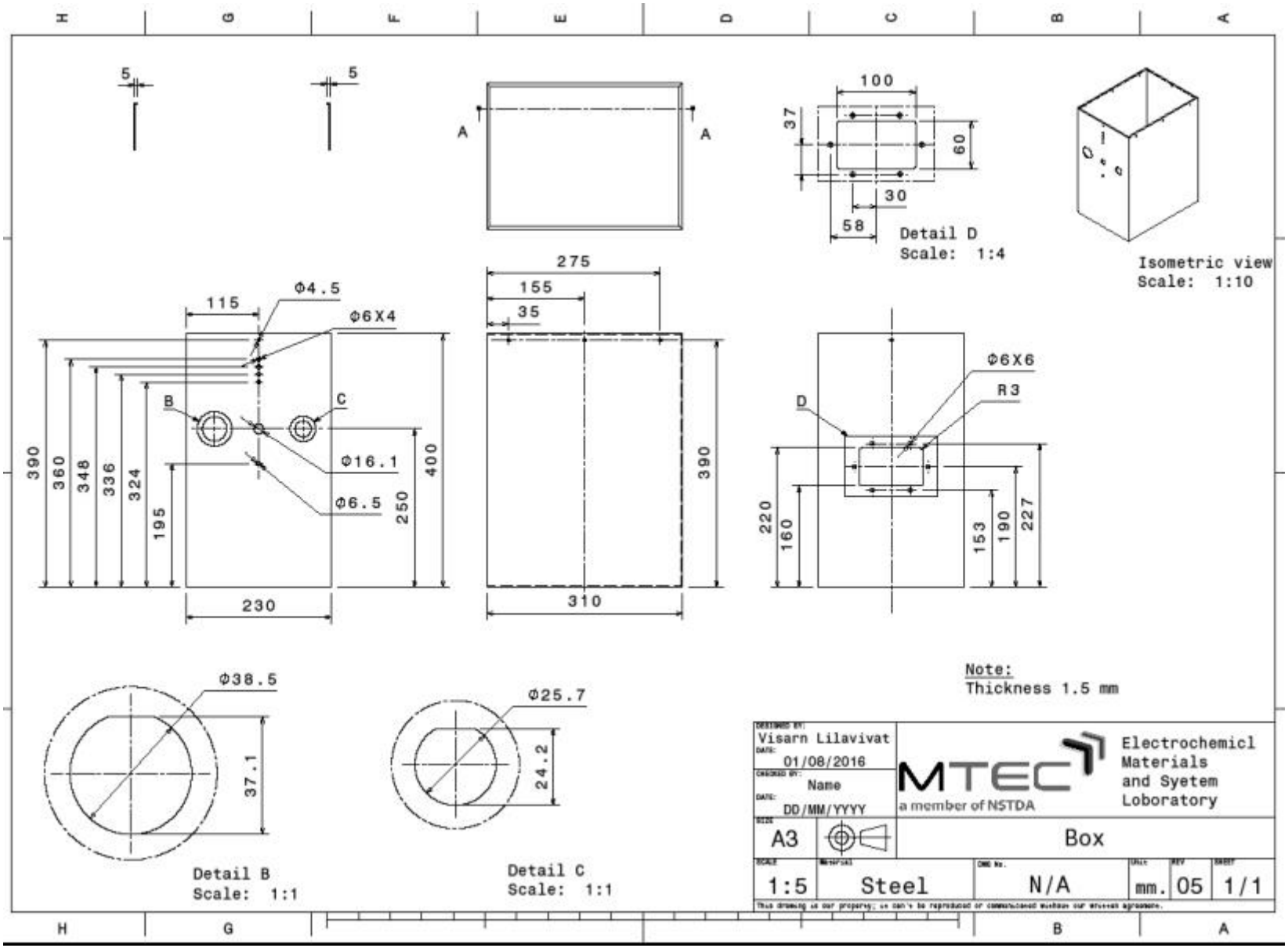
Result: ***Pass***

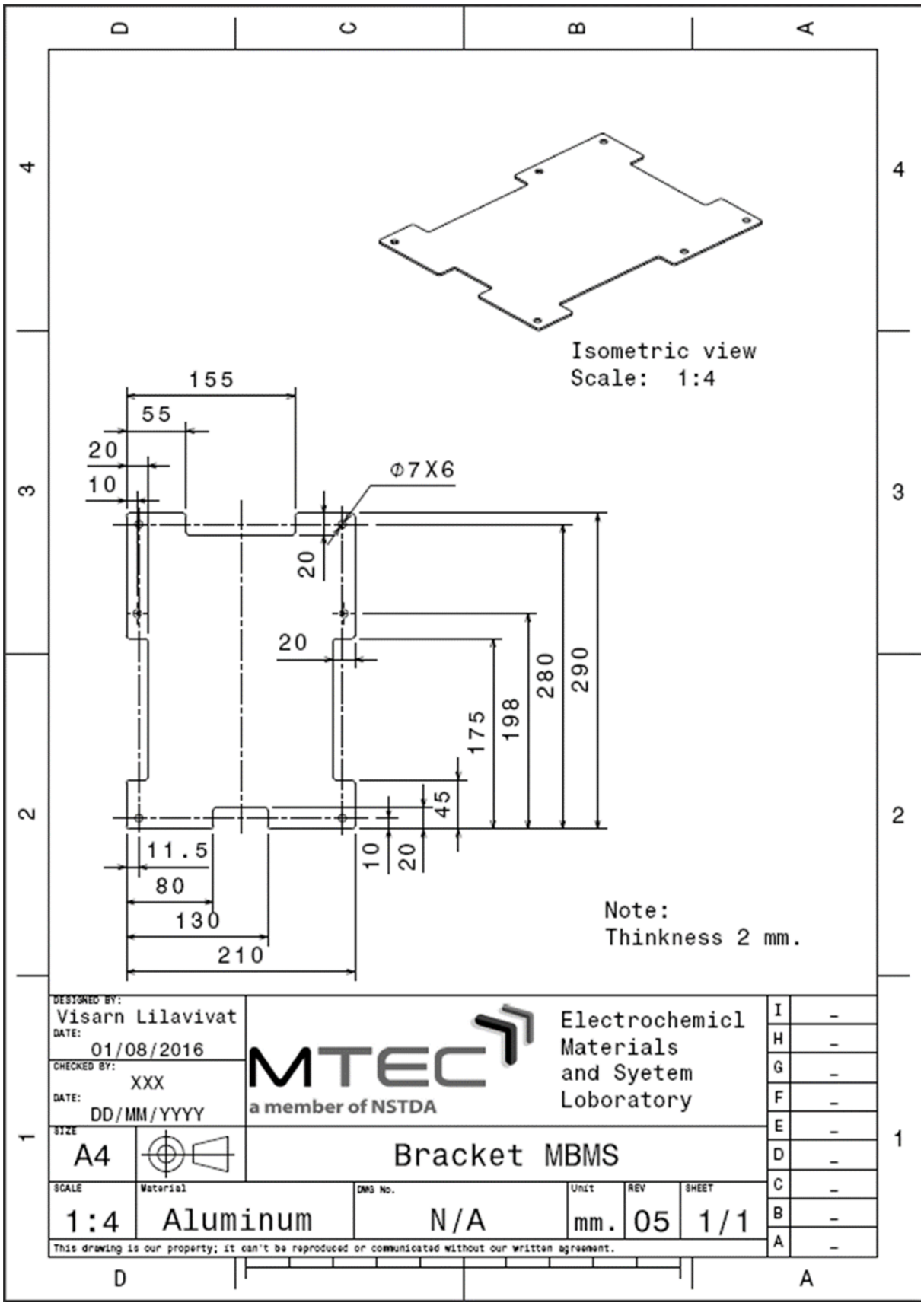
Tested by: Poomares Pomsri

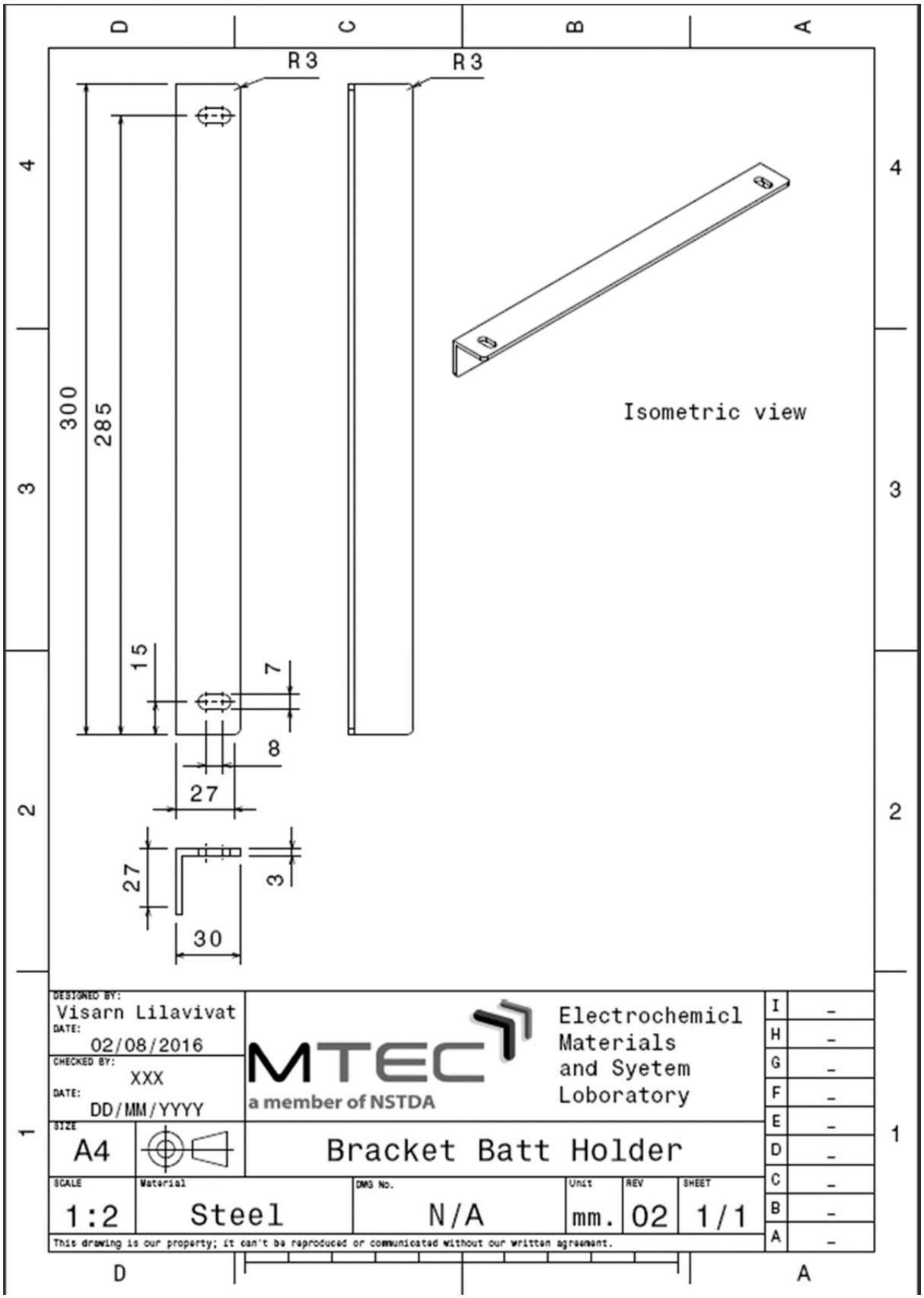
---------- End of Report ----------

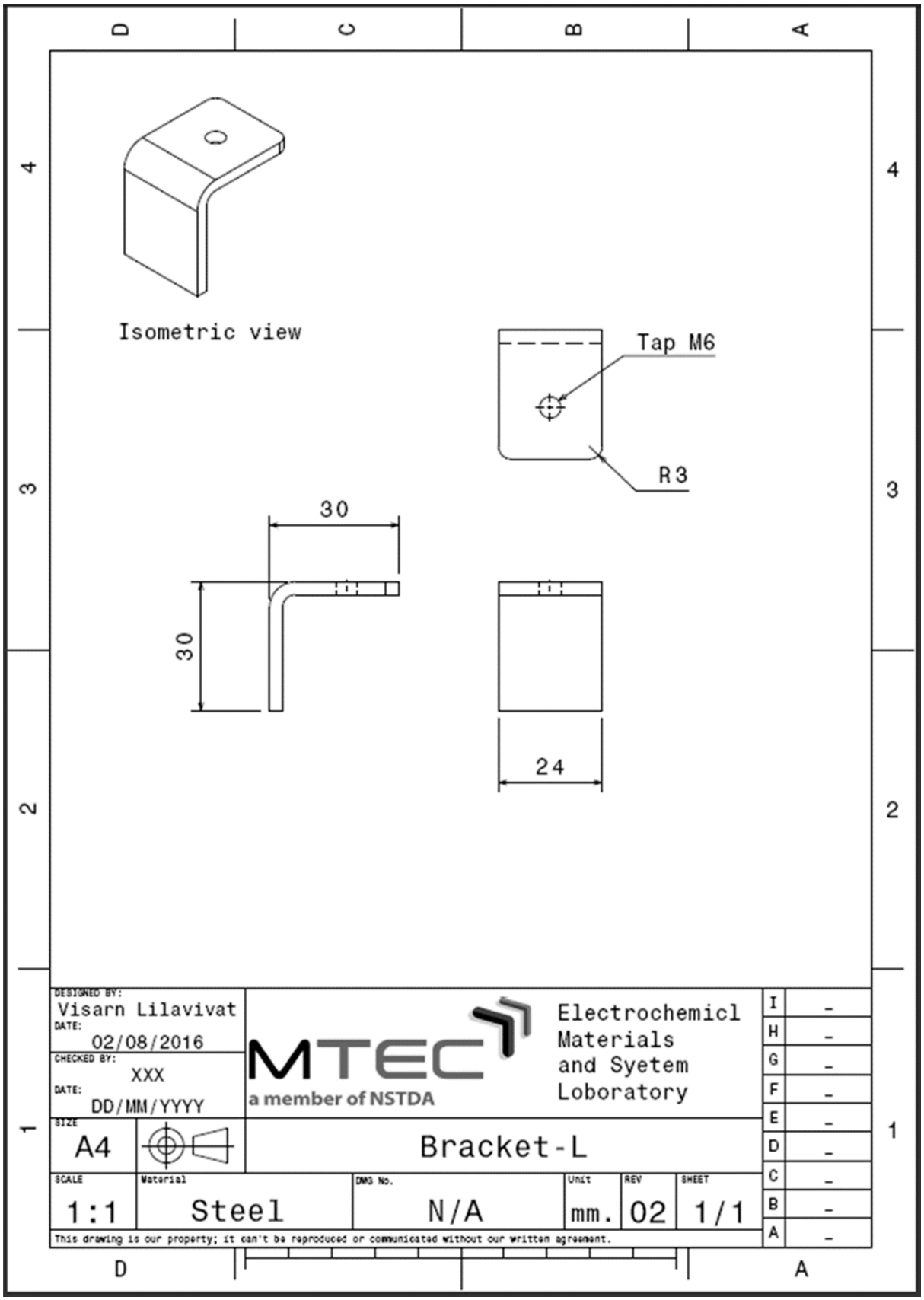
This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

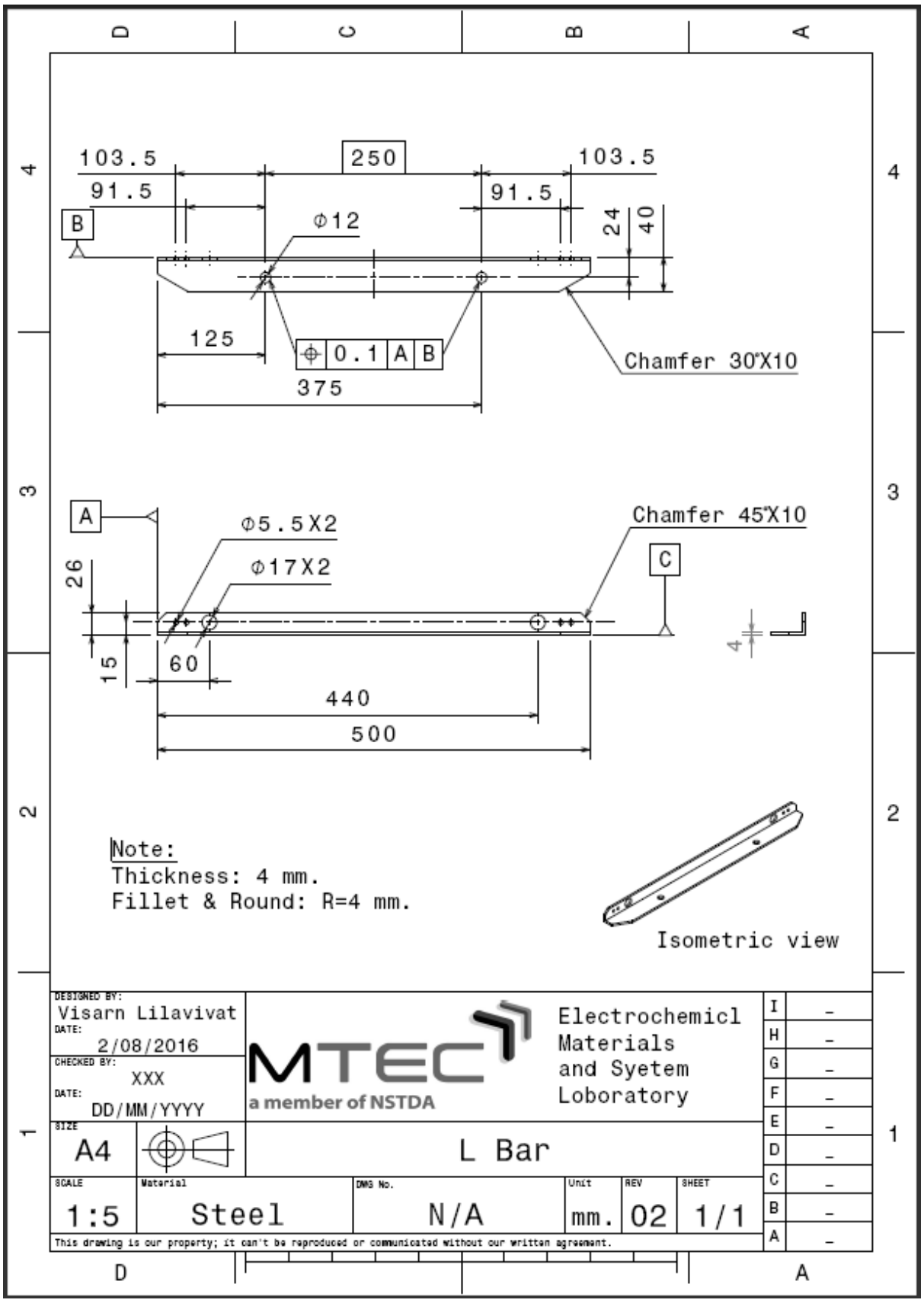
ฉ . แ บ บ สั่ ง ผ ลิ ต ก ล่ อ ง แ บ ต เ ต อ รี่

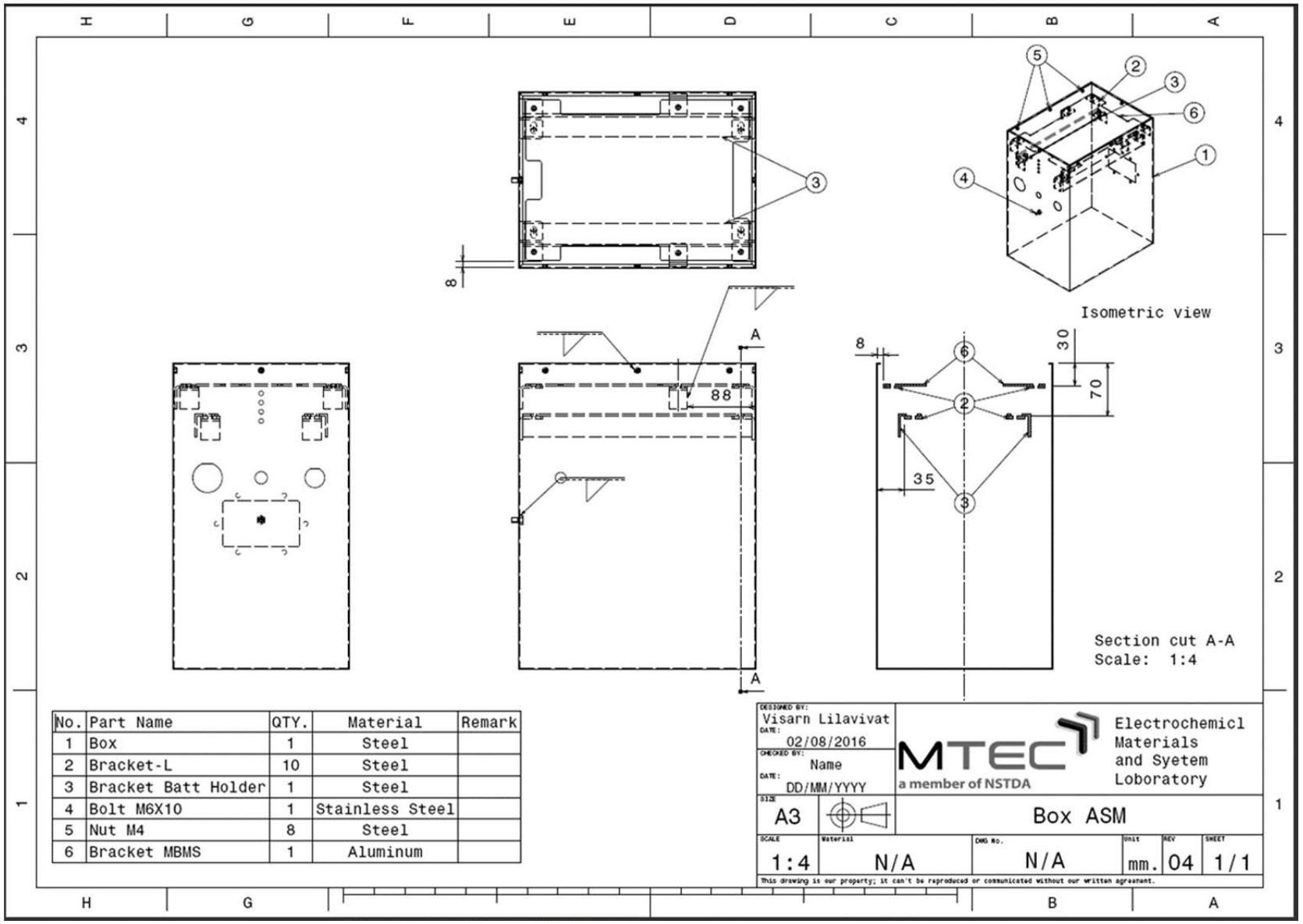

5
5
A
A
100
37
60
30
58
Detail D
Scale: 1:4
Isometric view
Scale: 1:10
275
155
35
115
Φ4.5
Φ6X4
B
C
Φ16.1
Φ6.5
390
360
348
336
324
195
250
400
390
230
310
Φ6X6
R3
D
220
160
153
190
227
Note:
Thickness 1.5 mm
Φ38.5
37.1
Φ25.7
24.2
Detail B
Scale: 1:1
Detail C
Scale: 1:1
Visarn Lilavivat
01/08/2016
Name
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl
Materials
and Syetem
Loboratory
A3
Box
1:5
Steel
N/A
mm.
05
1/1


Isometric view
Scale: 1:4
155
55
20
10
Φ7X6
20
20
175
198
280
290
45
11.5
80
130
210
10
20
Note:
Thinkness 2 mm.
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
01/08/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl
Materials
and Syetem
Loboratory
SIZE
A4
Bracket MBMS
SCALE
1:4
Material
Aluminum
DWG No.
N/A
Unit
mm.
REV
05
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I -
H -
G -
F -
E -
D -
C -
B -
A -


R3
R3
300
285
15
7
8
27
27
3
30
Isometric view
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
02/08/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
SIZE
A4
Bracket Batt Holder
SCALE
1:2
Material
Steel
DMS No.
N/A
Unit
mm.
REV
02
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I -
H -
G -
F -
E -
D -
C -
B -
A -

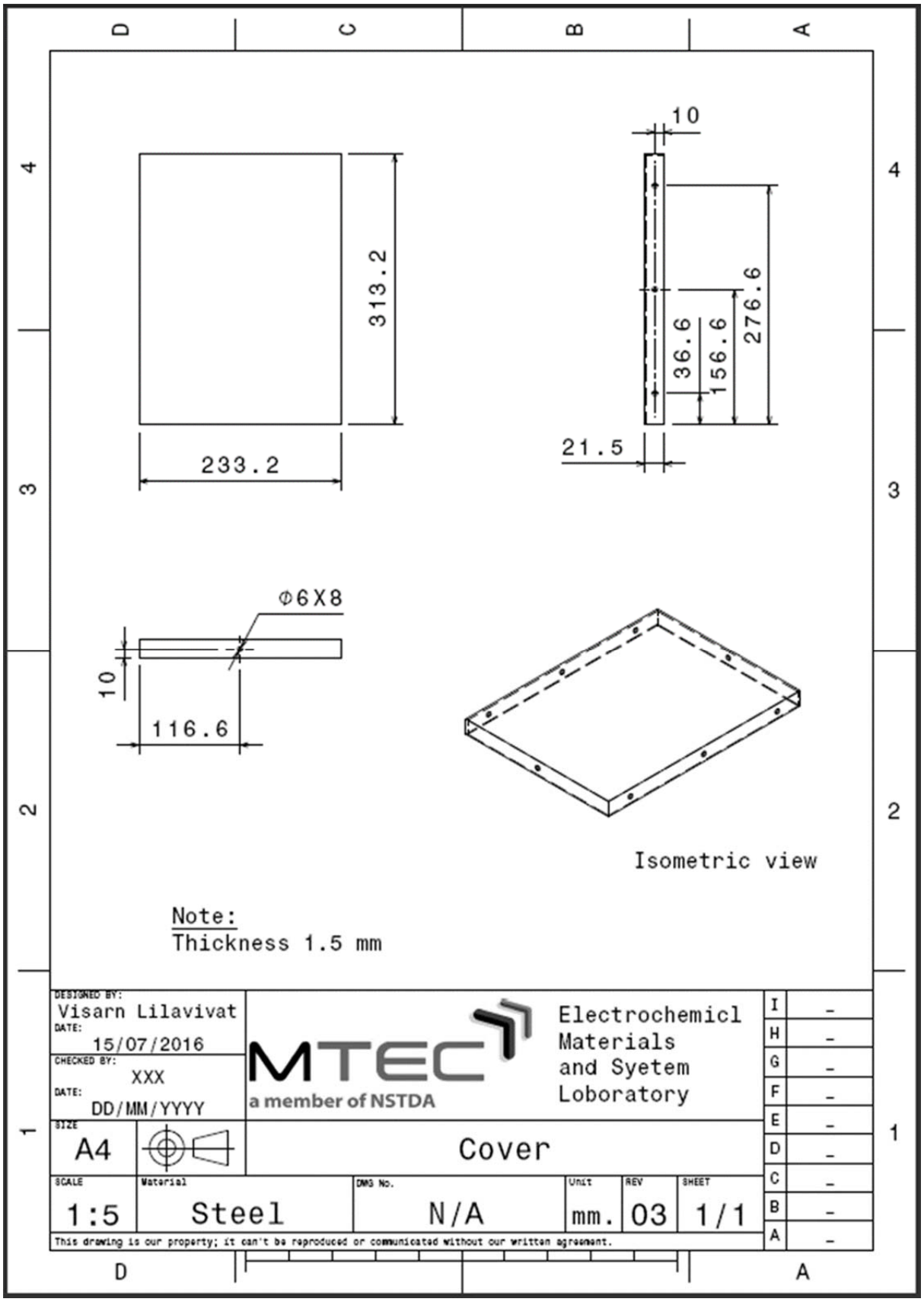

Isometric view
Tap M6
R3
30
30
24
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
02/08/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl
Materials
and Syetem
Loboratory
SIZE
A4
Bracket-L
SCALE
1:1
Material
Steel
DMG No.
N/A
Unit
mm.
REV
02
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I -
H -
G -
F -
E -
D -
C -
B -
A -

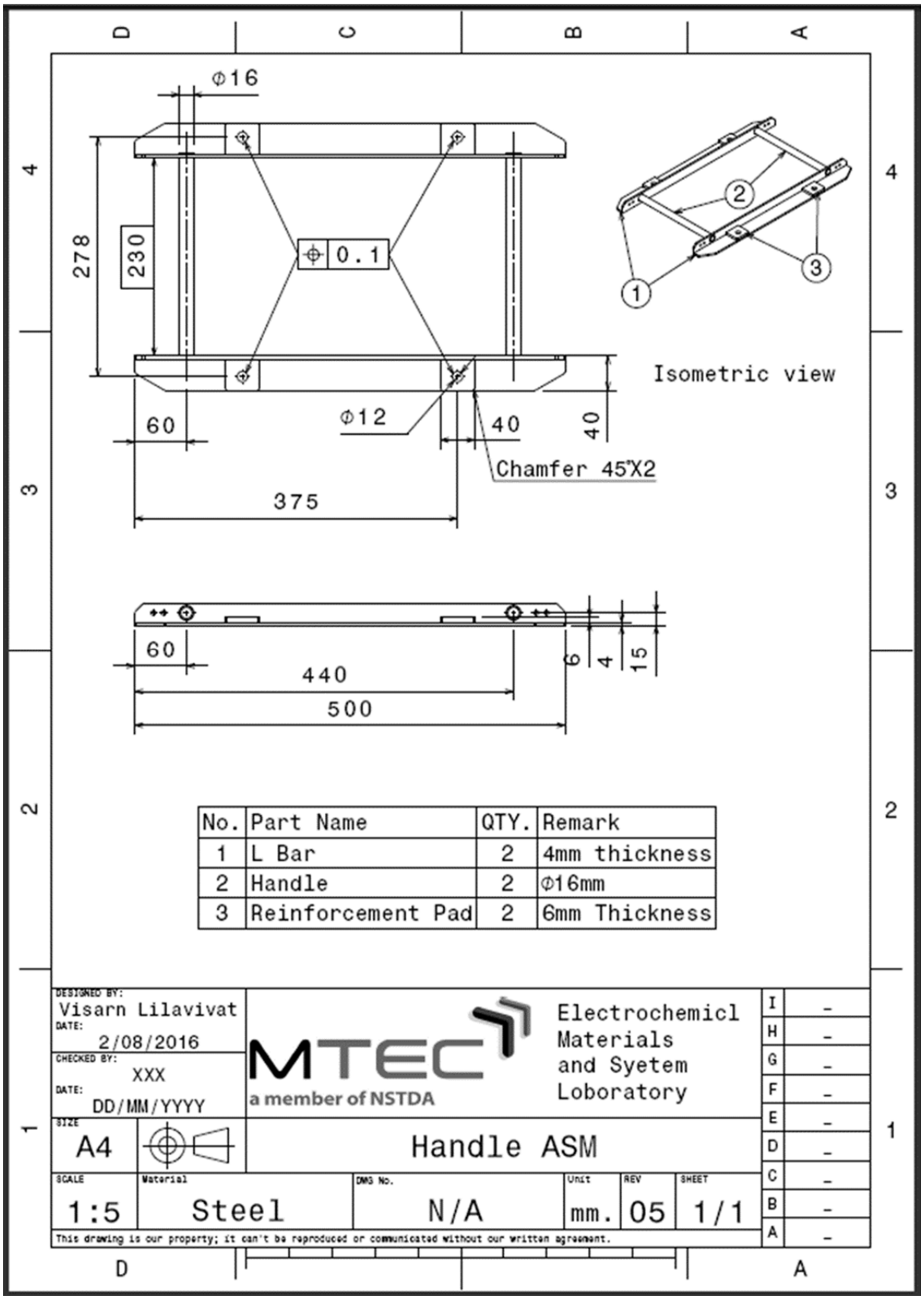

103.5
250
103.5
91.5
91.5
B
Φ12
24
40
125
0.1 A B
375
Chamfer 30°X10
A
Φ5.5X2
Φ17X2
Chamfer 45°X10
C
26
15
60
440
500
4
Note:
Thickness: 4 mm.
Fillet & Round: R=4 mm.
Isometric view
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
2/08/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
SIZE
A4
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl
Materials
and Syetem
Loboratory
L Bar
SCALE
1:5
Material
Steel
DMS No.
N/A
Unit
mm.
REV
02
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I –
H –
G –
F –
E –
D –
C –
B –
A –



No.	Part Name	QTY.	Material	Remark
1	Box	1	Steel	
2	Bracket-L	10	Steel	
3	Bracket Batt Holder	1	Steel	
4	Bolt M6X10	1	Stainless Steel	
5	Nut M4	8	Steel	
6	Bracket MBMS	1	Aluminum	

DESIGNED BY: Visarn Lilavivat
DATE: 02/08/2016
CHECKED BY: Name
DATE: DD/MM/YYYY
MTEC a member of NSTDA
Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
SIZE A3
Box ASM
SCALE 1:4 | Material N/A | DWG NO. N/A | Unit mm. | REV 04 | SHEET 1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


10
313.2
276.6
36.6
156.6
233.2
21.5
Φ6X8
10
116.6
Isometric view
Note:
Thickness 1.5 mm
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
15/07/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
SIZE
A4
Cover
SCALE
1:5
Material
Steel
DMS No.
N/A
Unit
mm.
REV
03
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I -
H -
G -
F -
E -
D -
C -
B -
A -

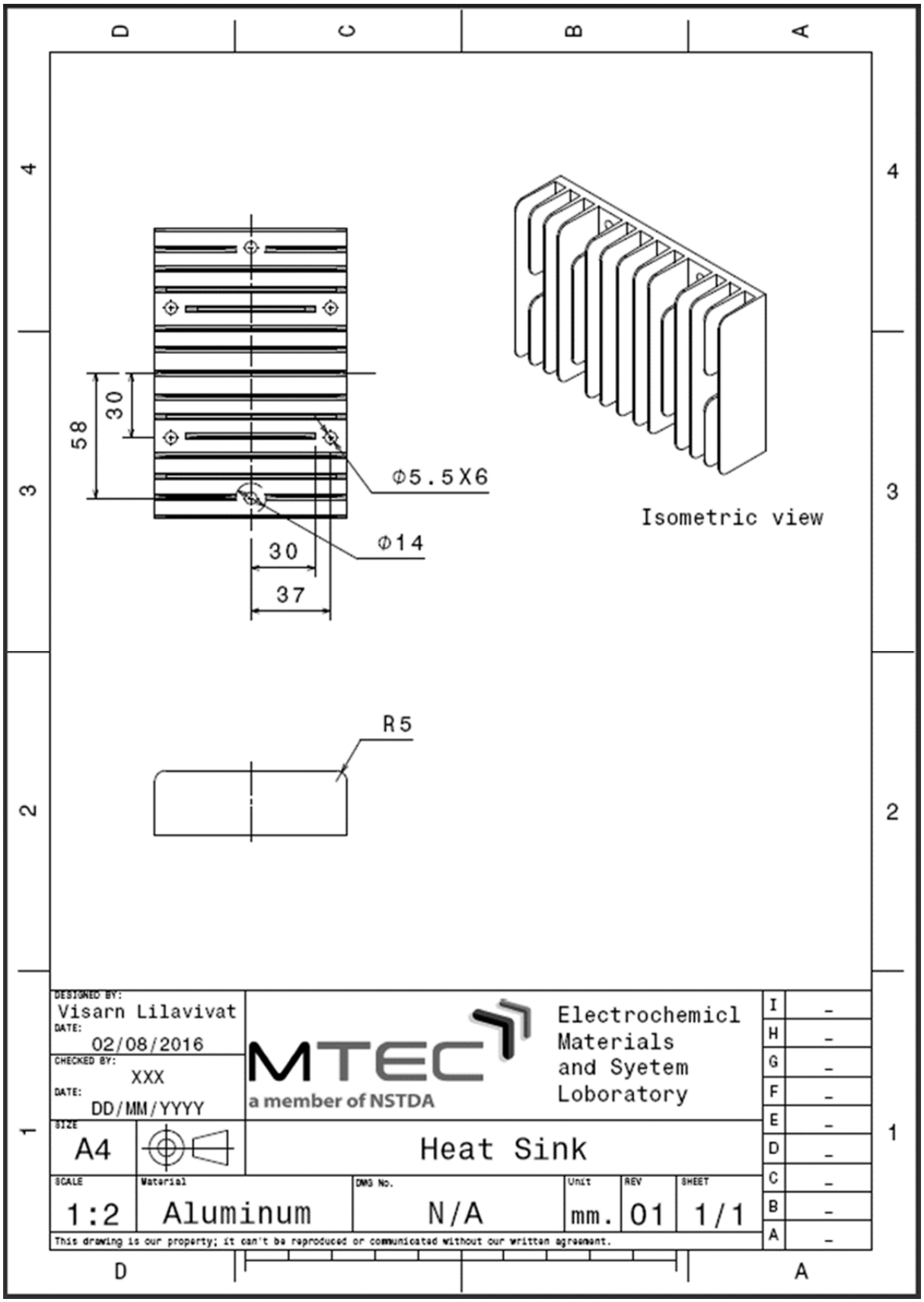


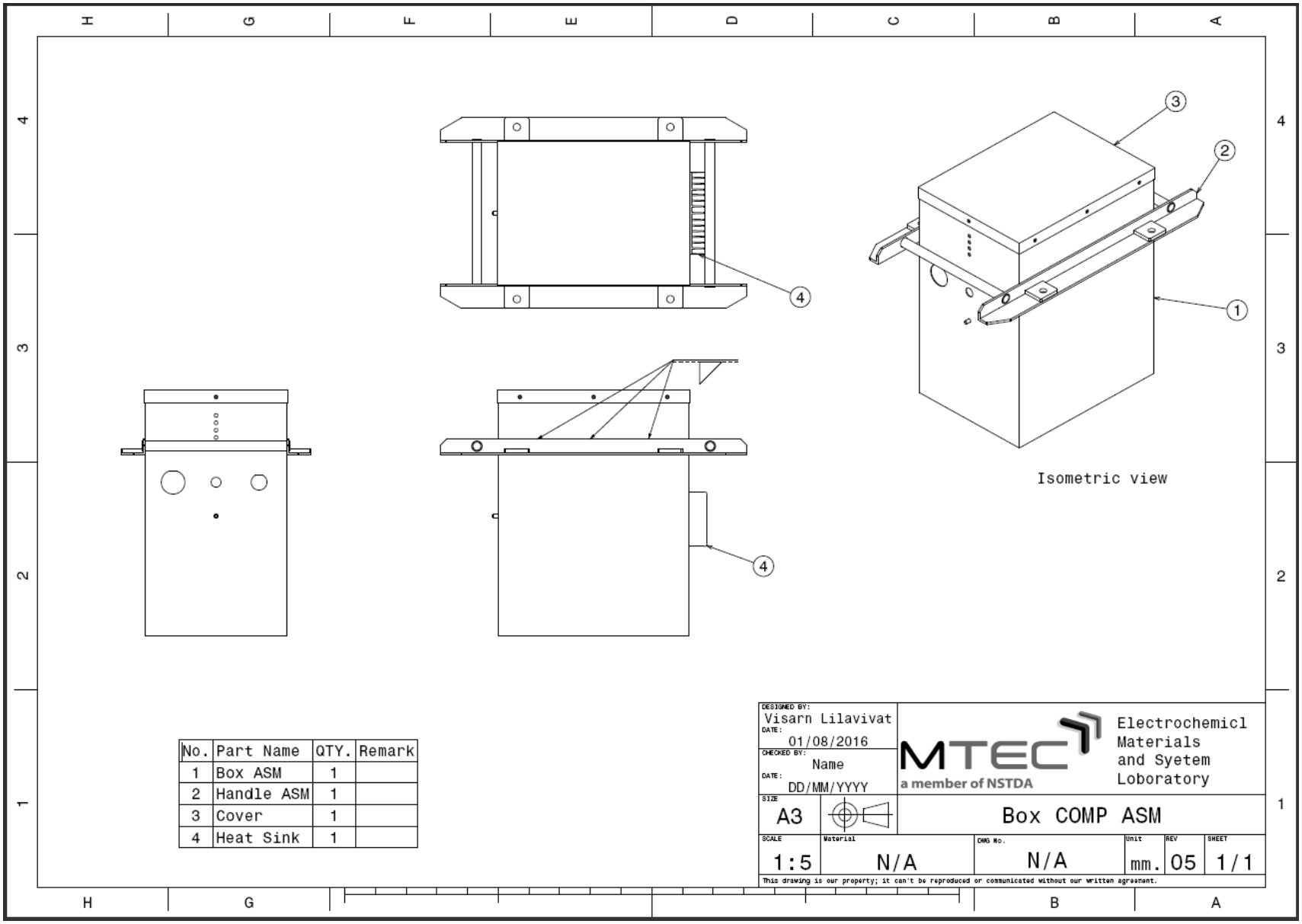
No.	Part Name	QTY.	Remark
1	L Bar	2	4mm thickness
2	Handle	2	Φ16mm
3	Reinforcement Pad	2	6mm Thickness

DESIGNED BY: Visarn Lilavivat	MTEC a member of NSTDA — Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory
DATE: 2/08/2016	
CHECKED BY: XXX	
DATE: DD/MM/YYYY	
SIZE: A4	Handle ASM
SCALE: 1:5	Material: Steel
DMS No.: N/A	Unit: mm.
REV: 05	SHEET: 1/1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


D
C
B
A
4
3
2
1
30
58
Φ5.5X6
Φ14
30
37
Isometric view
R5
DESIGNED BY:
Visarn Lilavivat
DATE:
02/08/2016
CHECKED BY:
XXX
DATE:
DD/MM/YYYY
MTEC
a member of NSTDA
Electrochemicl
Materials
and Syetem
Loboratory
SIZE
A4
Heat Sink
SCALE
1:2
Material
Aluminum
DMS No.
N/A
Unit
mm.
REV
01
SHEET
1/1
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
I -
H -
G -
F -
E -
D -
C -
B -
A -



No.	Part Name	QTY.	Remark
1	Box ASM	1	
2	Handle ASM	1	
3	Cover	1	
4	Heat Sink	1	

DESIGNED BY: Visarn Lilavivat DATE: 01/08/2016	MTEC a member of NSTDA	Electrochemicl Materials and Syetem Loboratory			
CHECKED BY: Name DATE: DD/MM/YYYY					
SIZE A3		Box COMP ASM			
SCALE 1:5	Material N/A	DWG No. N/A	Unit mm.	REV 05	SHEET 1/1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

ช. รายงานการทดสอบการป้องกันฝุ่นและน้ำจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

TEST REPORT



OPERATION AND STANDARDS DEPARTMENT

รายงานผลการทดสอบ

หมายเลขรายงาน	E0089/60
หมายเลขปฏิบัติการ	5910BE0076
ชื่อและที่อยู่ของผู้รับบริการ	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สาขาที่ 00003 เลขที่ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
รายละเอียดตัวอย่าง	ตัวอย่างถูกส่งและชี้บ่งโดย/ในนามของผู้รับบริการ ตามรายละเอียดดังนี้ Green Box รุ่น 120-01 จำนวน 1 ชุดตัวอย่าง (1 หน่วย)
หมายเลขตัวอย่าง	BE0076
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ปกติ
วัน/เดือน/ปีที่รับตัวอย่าง	21 ตุลาคม 2559
วัน/เดือน/ปีที่ทดสอบ	25 ตุลาคม 2559 - 26 ตุลาคม 2559
วันที่ออกรายงาน	27 ตุลาคม 2559
มาตรฐานที่ทดสอบ	IEC60529:2001 (IP55)
รายงานผลการทดสอบ	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในหน้าถัดไป

สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังแสดงในหมายเหตุหน้า 4/7

ผู้ทดสอบ	ผู้ตรวจสอบ	ผู้รับรอง
(นายศรายุทธ บุญประดิษฐ์)	(นายสันติภพ จันทร์บุญนะ)	(นายอาทิตย์ วัสนมงคล) ปฏิบัติหน้าที่แทน ผู้จัดการแผนกปฏิบัติการ 4

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รายงานผลการทดสอบ

รูปแสดงตัวอย่าง



รูปแบบการตัดสินผลการทดสอบ :

เครื่องหมาย "P" : เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง

เครื่องหมาย "F" : ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง

เครื่องหมาย "N" : ไม่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการทดสอบ

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

วิธีการทดสอบ

ระดับการป้องกันน้ำและฝุ่น (IP55) การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบป้องกันการเข้าถึงส่วนที่เป็นอันตราย การทดสอบป้องกันฝุ่นและการทดสอบป้องกันน้ำฉีด

การทดสอบป้องกันการเข้าถึงส่วนที่เป็นอันตราย (IP5X)

ใช้ลวดเหล็กกล้าแข็งตรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร กดลงที่ช่องเปิดของเปลือกหุ้มทุกท่าที่เป็นไปได้

การทดสอบป้องกันฝุ่น (IP5X)

เปลือกหุ้มประเภทที่ 2

ทดสอบตัวอย่างในตู้ทดสอบการป้องกันฝุ่นเป็นเวลาต่อเนื่องกัน 8 ชั่วโมง

ไม่ป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับตัวอย่างขณะทดสอบ

ตัวอย่างติดตั้งตามการใช้งานตามปกติภายในตู้ทดสอบการป้องกันฝุ่น

ฝุ่นที่ใช้ต้องสามารถผ่านแร่งที่ทำด้วยลวดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ 50 ไมโครเมตรและความกว้างระบุของช่อง 75 ไมโครเมตร โดยฝุ่นที่ใช้มีปริมาณเท่ากับ 4 กิโลกรัม ตามปริมาตรของตู้ทดสอบฝุ่นขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

การทดสอบป้องกันน้ำฉีด (IPX5)

ทดสอบโดยฉีดน้ำใส่เปลือกหุ้ม จากทุกทิศทางที่ทำได้ด้วยลำน้ำจากหัวฉีดทดสอบมาตรฐานตามรูปที่ 6 ของ IEC60529:2001 โดยมีภาวะต่างๆ ดังนี้

ก) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหัวฉีด 6.3 มิลลิเมตร

ข) อัตราการฉีด 12.5 ลิตรต่อนาที

ค) ความดันของหัวฉีดปรับให้ได้ค่าที่ต้องการ ที่อัตราการฉีดที่กำหนด

ง) ช่วงเวลาทดสอบต้องเป็น 1 นาทีต่อตารางเมตรของพื้นที่ที่ผิวของเปลือกหุ้ม

จ) ระยะเวลาทดสอบ 3 นาที

ฉ) ระยะจากหัวฉีดถึงผิวเปลือกหุ้มประมาณ 2.5 เมตร

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ผลการทดสอบ

ระดับการป้องกัน				ผลทดสอบ / หมายเหตุ	การตัดสิน
ระดับ		รายการทดสอบ	รายละเอียดโดยย่อ		
IP55	IP5X	ป้องกันการเข้าของสิ่งแปลกปลอมที่เป็นของแข็งตั้งแต่ Ø 1.0 มิลลิเมตร ขึ้นไป	โพรบวัตถุ Ø 1.0 มิลลิเมตร ต้องเข้าในเปลือกหุ้มไม่ได้	โพรบวัตถุ Ø 1.0 มิลลิเมตรไม่สามารถเข้าไปในเปลือกหุ้มได้	P
		ป้องกันฝุ่น	ไม่ป้องกันการเข้าไปของฝุ่นทั้งหมด แต่ป้องกันในปริมาณที่จะเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของบริภัณฑ์	ฝุ่นไม่สามารถเข้าถึงภายในเปลือกหุ้มได้	P
	IPX5	ป้องกันน้ำฉีด	น้ำที่ฉีดเปลือกหุ้มจากทุกทิศทางไม่ทำให้เกิดผลเสียหาย	น้ำสามารถเข้าไปในตัวอย่างได้ในปริมาณมากและทำให้เกิดผลเสียหาย	F

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปภาพประกอบ

รูปที่ 1 ด้านหน้า



รูปที่ 2 ด้านหลัง



รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปภาพประกอบ

รูปที่ 3 ด้านข้าง



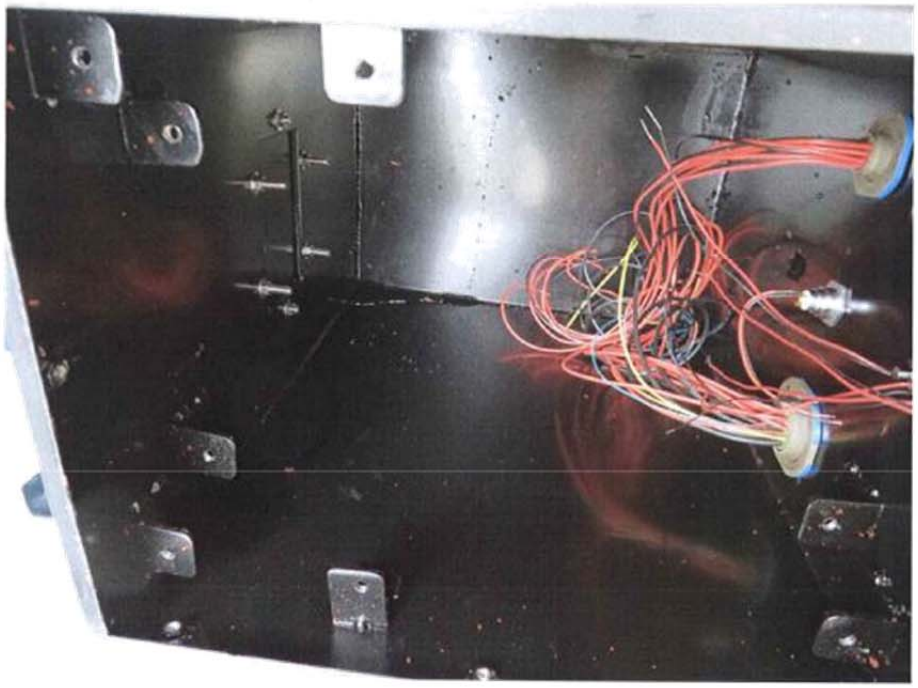
รูปที่ 4 ตัวอย่างหลังการทดสอบ



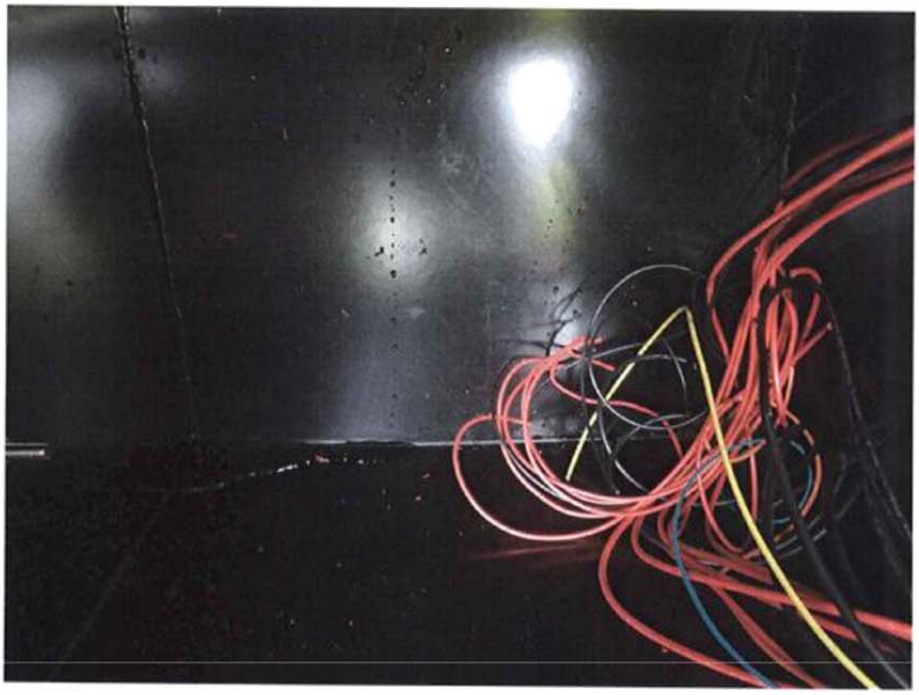
รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปภาพประกอบ

รูปที่ 5 ตัวอย่างหลังการทดสอบ



รูปที่ 6 ตัวอย่างหลังการทดสอบ



- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

TEST REPORT

Report No..... :	**STR/60-010**
Equipment Under Test (EUT) No.. :	**ST-60-054**
Testing Laboratory Name ..... :	**Electrical and Electronic Products Testing Center (PTEC)**
Address ..... :	141 Thailand Science Park, Innovation Cluster 2 Tower D, Phahonyothin Rd., Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand.
Applicant's Name ..... :	**National Metal and Materials Technology**
Address ..... :	141 Thailand Science Park (TSP), Phahonyothin Rd., Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand.
Test specification	
Standard ..... :	IEC 60529 (2001-02)
Non-standard test method ..... :	N/A
Test item description ..... :	MORAKOT – Pack Charger
Trademark ..... :	--
Model and/or type reference ..... :	02
Serial number ..... :	--
Rating..... :	--
Date of receipt of test item ..... :	06 December 2016
Date(s) of performance of test ..... :	16 December 2016
Date of report issue ..... :	19 December 2016

Tested by	Review by	Approved by
(Mr.Sarunyoo Palakvangsa)	(Mr.Ruengrit Ninae)	(Mr.Anake Meemoosor)
Engineer	Head of product safety testing	Operation manager

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

1. SUMMARY OF TESTING

This product was tested according to following specification standard:

Test item	Test specification	Test method	Result
IPX5 test	Nozzle 6.3 mm diameter, distance 2.5 m to 3m	IEC 60529 (2001-02)	**PASS**

2. Test plan and deviation from standard

Test item	Test specification	Test method
IPX5 test	Nozzle 6.3 mm diameter, distance 2.5 m to 3m	IEC 60529 (2001-02)

Standard reference

IEC 60529 (2001-02) Degree of protection provided by enclosures (IP)

3. Test conditions

The test conditions to be observed as following:

- Internal diameter of the nozzle 6 is 3mm.
- Water pressure can be adjusted to achieve the specified delivery rate.
- Core of the substantial stream: circle of approximately 40mm diameter at 2.5m distance from nozzle.
- Test duration per square metre of enclosure surface area likely to be sprayed: 1min.
- Minimum test duration: 3min.
- Distance from nozzle to enclosure surface: between 2.5m and 3m

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

4. IPX5 test

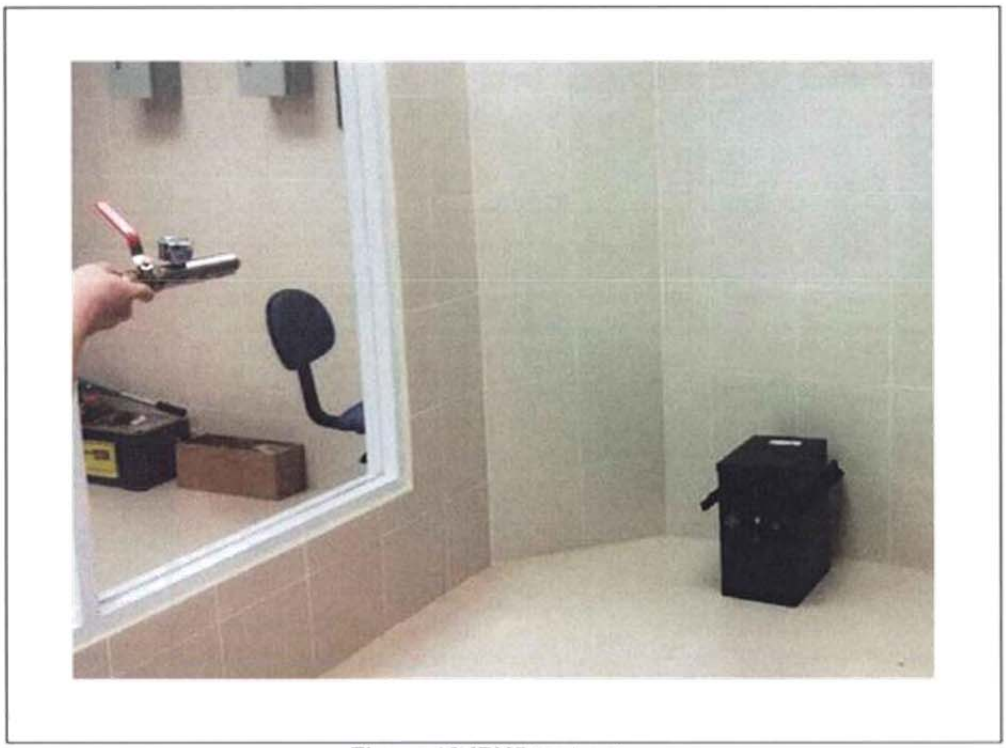
4.1. Standard test specification and test method

Test item	Test specification	Test method	Result
IPX5 test	Nozzle 6.3 mm diameter, distance 2.5 m to 3m	IEC 60529 (2001-02)	**PASS**

4.2. Test equipment

Equipment name	Trade Name:	Model	S/N	Traceability
IPX5 Nozzle	Bonad	IPX5	N/A	CEPREI

4.3. Test picture



Finger 10 IPX5 test set up

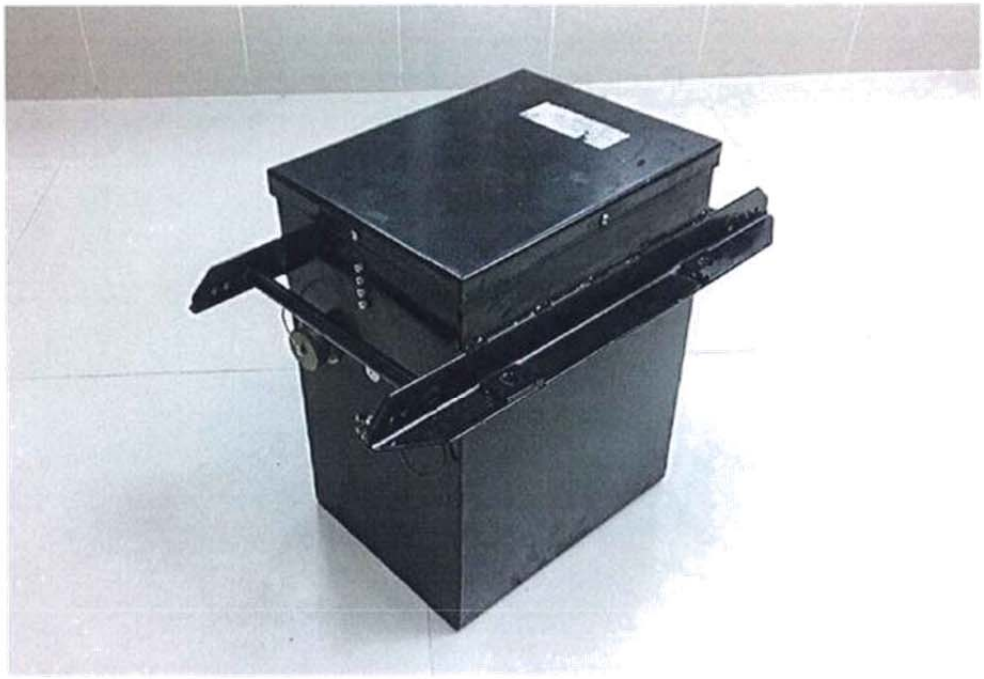
4.4. Test Result

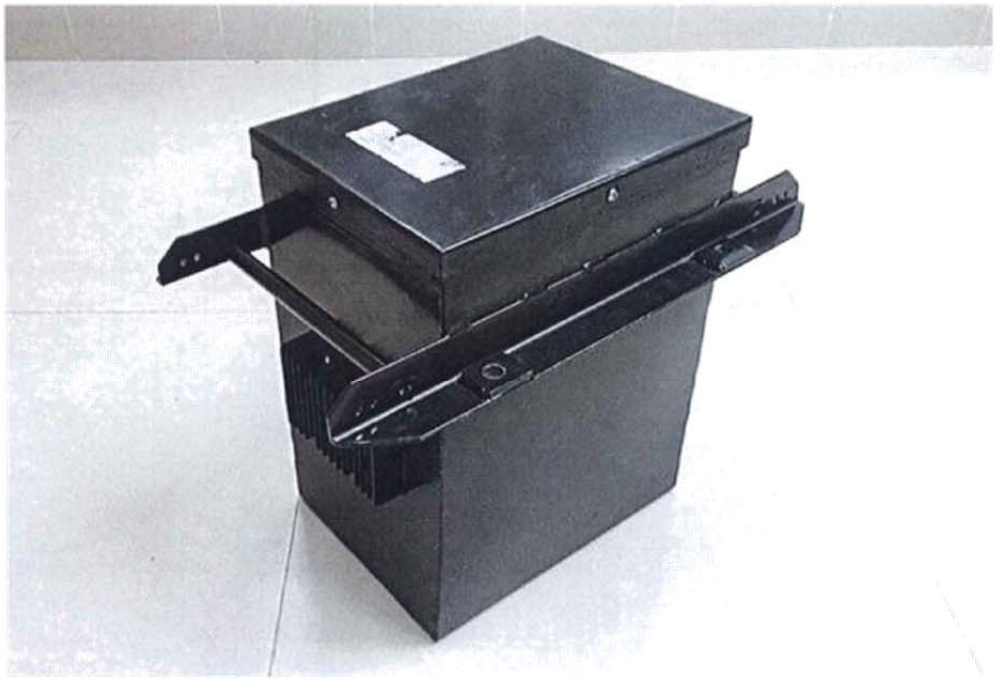
Result: Pass

The EUT was tested by test condition in sub clause 3. Water couldn't ingress to internal enclosure.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Annex A
EUT Picture





This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

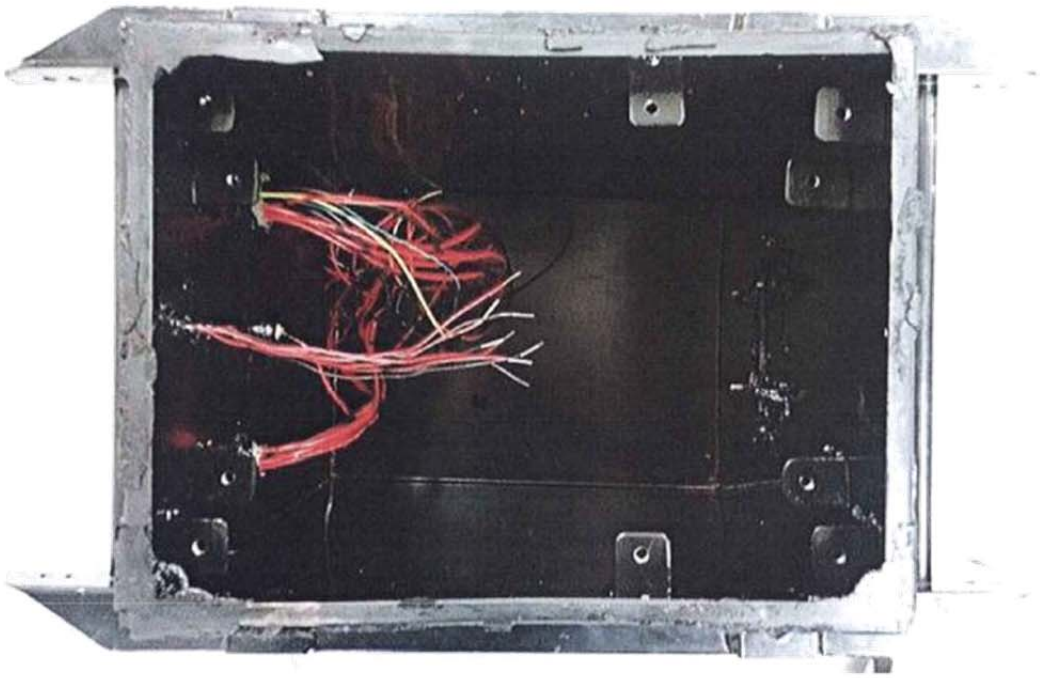
Annex A (Continue)
EUT Picture





This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Annex A (Continue)
Internal enclosure



----------END OF REPORT----------

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

ซ. รายงานการทดสอบการสั่นสะเทือนจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

TEST REPORT



OPERATION AND STANDARDS DEPARTMENT

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ
975 หมู่ 4 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ซอย 8 ถนนสุขุมวิท กม.37 ตำบลแพรกษา อำเภอเมืองสมุทรปราการ
จังหวัดสมุทรปราการ 10280 โทรศัพท์ +66 2709 4860-8 โทรสาร +66 2324 0917-8

รายงานผลการทดสอบ

หมายเลขรายงาน	L0349/59
หมายเลขปฏิบัติการ	5909BL0436
ชื่อและที่อยู่ของผู้รับบริการ	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เลขที่ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
รายละเอียดตัวอย่าง	ตัวอย่างถูกส่งและชี้บ่งโดย/ในนามของผู้รับบริการ ตามรายละเอียดดังนี้ Green Box : 120-01 จำนวน 1 ชุดตัวอย่าง
หมายเลขตัวอย่าง	BL0436
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ปกติ
วัน/เดือน/ปีที่รับตัวอย่าง	13 กันยายน 2559
วัน/เดือน/ปีที่ทดสอบ	13 กันยายน 2559 - 14 กันยายน 2559
วันที่ออกรายงาน	16 กันยายน 2559
มาตรฐานที่ทดสอบ	ทดสอบตามข้อกำหนดผู้ขอรับบริการ (อ้างอิง มอก. 2217-2548 หัวข้อ 4.2.2 การสั่นสะเทือน)
รายงานผลการทดสอบ	ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังปรากฏในหน้าถัดไป

ผู้ทดสอบ	ผู้ตรวจสอบ	ผู้รับรอง
(นายนพรัตน์ เจริญ)	(นายราเชนทร์ ม่วงอ่อน)	(นายอาทิตย์ วัสนมงคล) ผู้จัดการแผนกปฏิบัติการ 1 สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปแสดงตัวอย่าง



รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

1. วิธีทดสอบ

ตามข้อกำหนดผู้ขอรับบริการ (อ้างอิง มอก. 2217-2548 หัวข้อ 4.2.2)

Vibration test condition :

Frequency : 10 - 55 Hz

Displacement: 1.52 mm

Sweep time : 1 Hz/min.

Test time : 90min./direction (x,y,z)

2. เครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบมีดังต่อไปนี้

Equipment	Specifications	Manufacturer	Model	Serial No.
Vibration generator	Max. Acceleration: 110 g Max. Velocity: 1.8 m/s Max. Displacement: 50.8 mm Force: 35000 N	TIRA	TV 59335/AIT-340 TGT MO 48 XL	003/07
Vibration controller	-	VR	8500	12B7D7
Control accelerometer	Reference sensitivity: 10.49 mV/g@100Hz	ENDEVCO	7251B-11/EE0443	10119

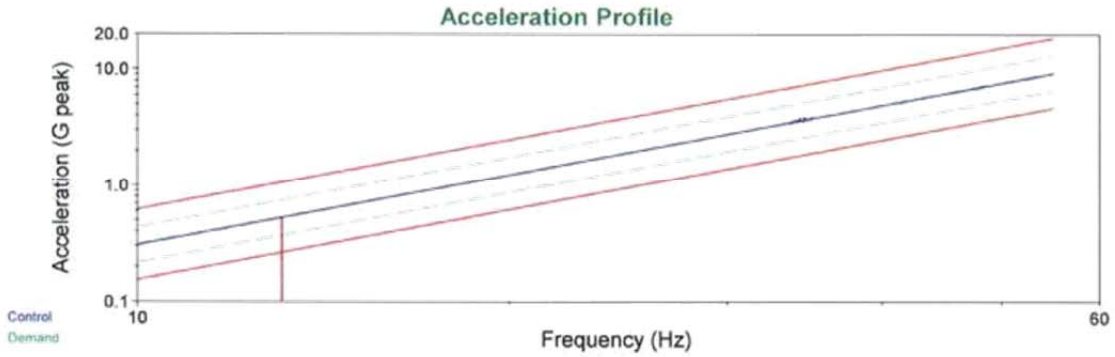
3. ผลการทดสอบ

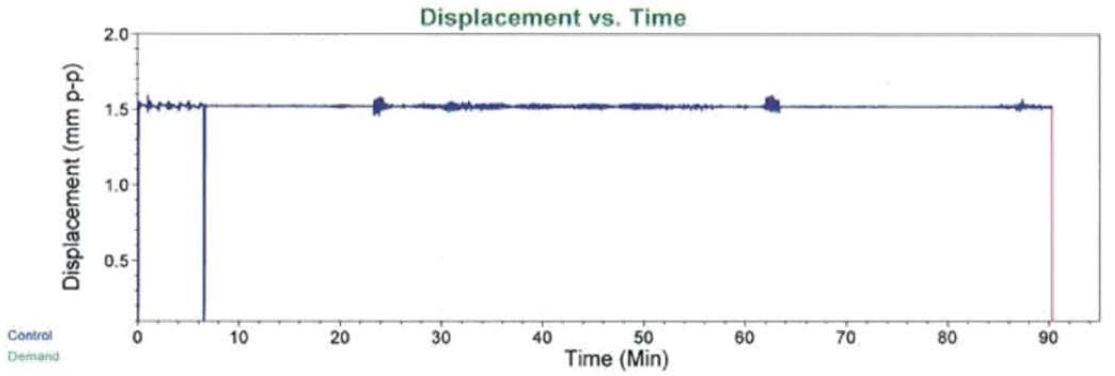
ลูกค้าเป็นผู้ตรวจสอบ

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

4. กราฟการทดสอบ

แนวตั้ง





Breakpoint table:

Start Freq.	Amplitude	End Freq.	Amplitude
10 Hz	1.52 mm	55 Hz	1.52 mm

Test level schedule:

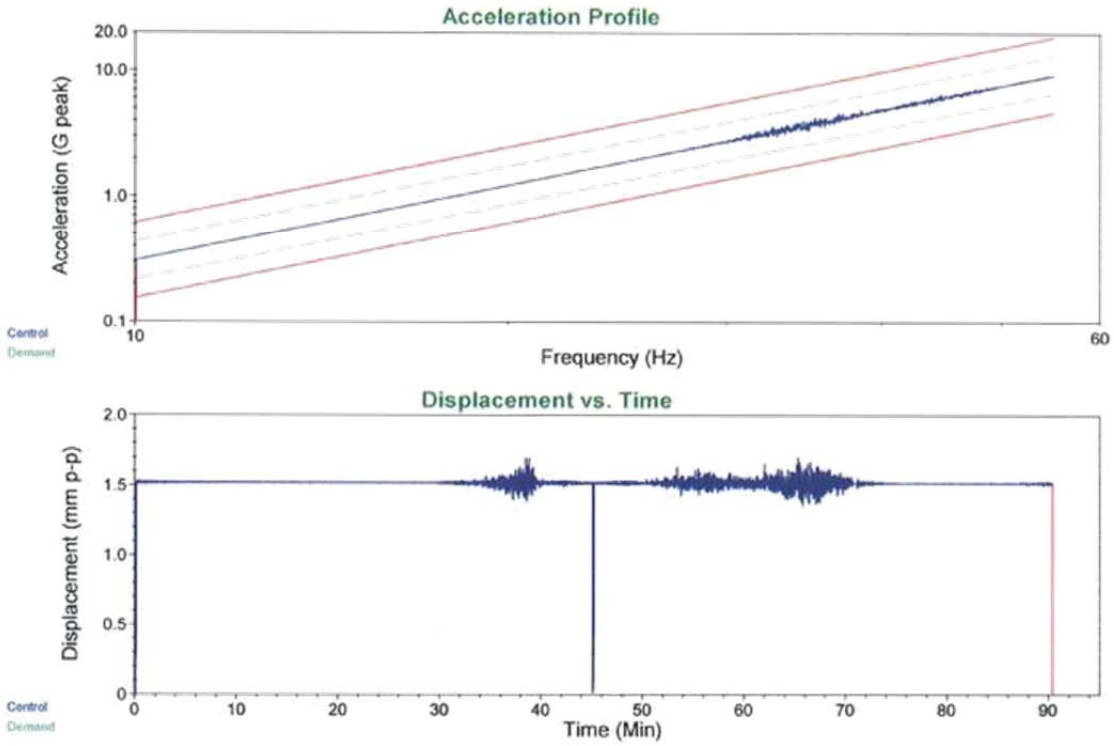
	Duration	Level
1)	1:30:00	100 %

** Test started Sep 13, 2016 15:27:19, running for 1:30:18

** Current level: 1, running at 100 %, 1:30:00 of 1:30:00 complete

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

แนวขวาง



Breakpoint table:

Start Freq.	Amplitude	End Freq.	Amplitude
10 Hz	1.52 mm	55 Hz	1.52 mm

Test level schedule:

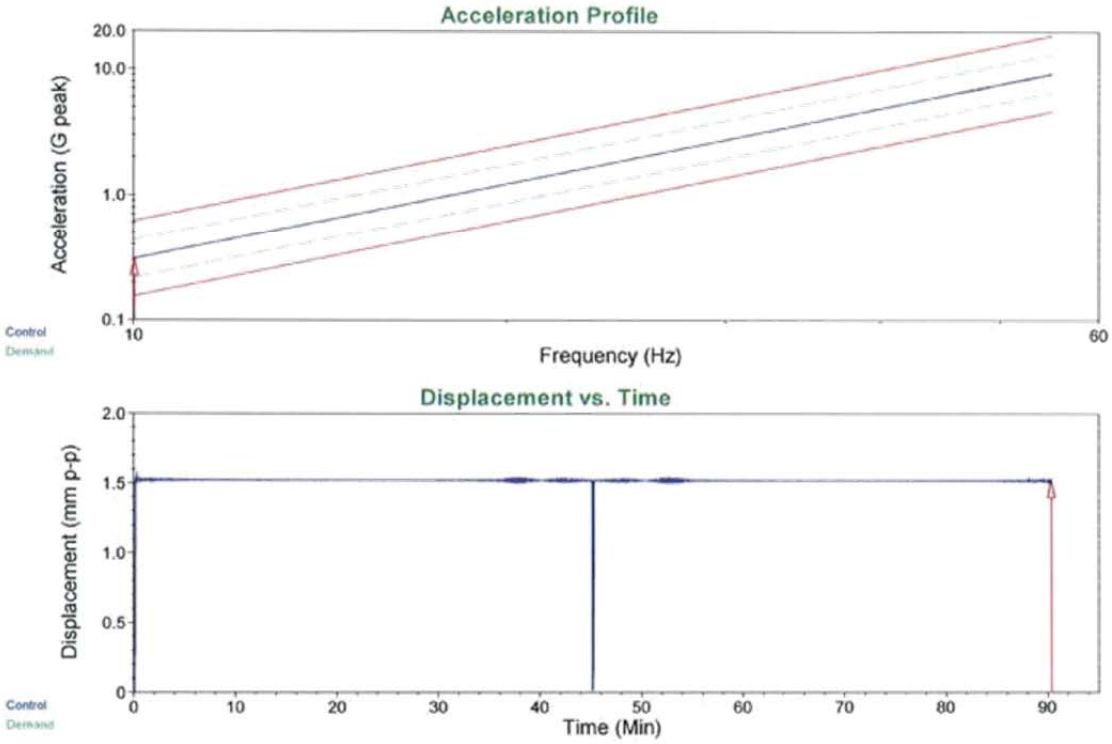
	Duration	Level
1)	1:30:00	100 %

** Test started Sep 14, 2016 14:14:55, running for 1:30:21

** Current level: 1, running at 100 %, 1:30:00 of 1:30:00 complete

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

แนวยาว



Breakpoint table:

Start Freq.	Amplitude	End Freq.	Amplitude
10 Hz	1.52 mm	55 Hz	1.52 mm

Test level schedule:

	Duration	Level
1)	1:30:00	100 %

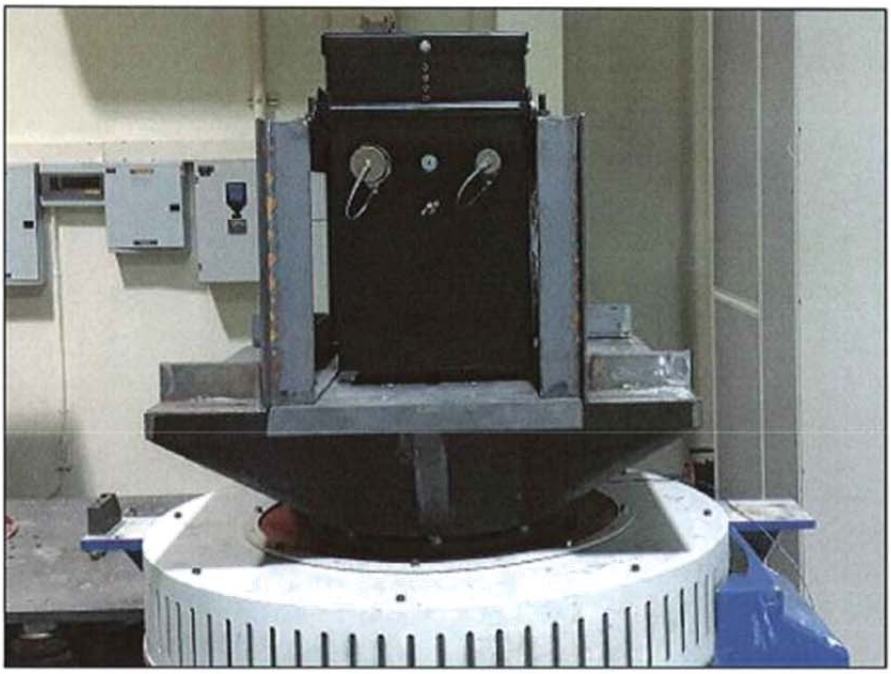
** Test started Sep 14, 2016 11:14:13, running for 1:30:21

** Current level: 1, running at 100 %, 1:30:00 of 1:30:00 complete

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปภาพประกอบ

รูปที่ 1: แนวตั้ง



รูปที่ 2: แนวขวาง



รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

รูปภาพประกอบ

รูปที่ 3: แนวยาว



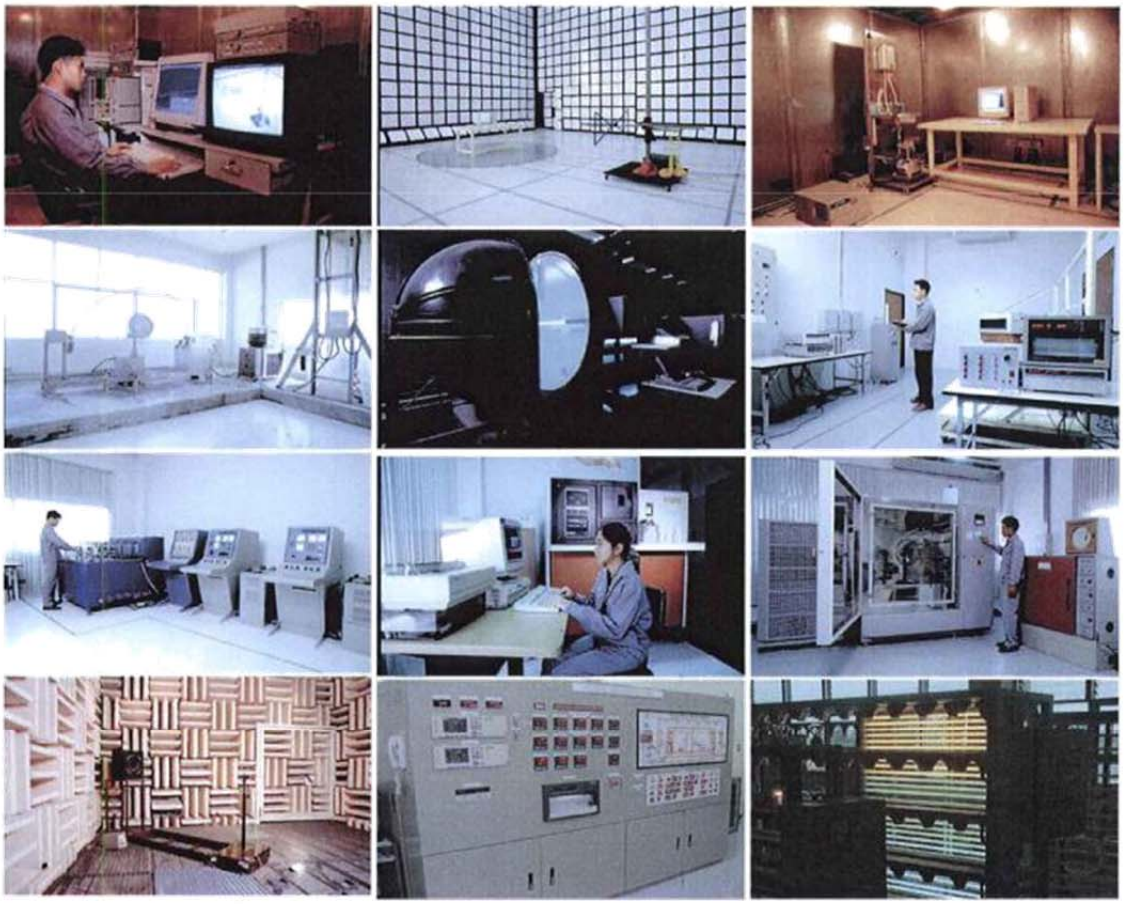
- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น ห้ามคัดถ่ายผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ฌ. รายงานการทดสอบการตกจากสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

TEST REPORT



OPERATION AND STANDARDS DEPARTMENT

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

FOUNDATION FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT

975 Moo 4, Bangpoo Industrial Estate Soi 8, Sukhumvit Road km.37, Phraek Sa,
Mueang Samut Prakan, Samut Prakan 10280 Tel. +66 2709 4860-8 Fax. +66 2324 0917-8

TEST REPORT

Report No.	L0034(E)/60
Operation No.	5910BL0029
Name and address of customer	National Metal and Materials Technology Center (MTEC) 114 Thailand Science Park (TSP), Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand
Sample description	Sample was submitted and identified by/on behalf of the customer as following: Part Name : Green Box Model : 120-01 1 set
Sample No.	BL0029
Sample characteristic and condition	Normal
Sample received date	October 26, 2016
Test date	October 26, 2016
Issue date	October 28, 2016
Test standard	Drop test according to customer requirements.
Test report	Details of the test report as shown on the following pages.

Tested by	Approved by	Certified by
(Mr.Nopparat Charoen)	(Mr.Rachen Muongon)	(Mr. Arthit Wussanamongkol) Division manager, Operation division

สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRICAL AND ELECTRONICS INSTITUTE

This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

Sample photo



This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

1. TEST METHOD

The tested unit was tested according to the specifications required by applicant. The test specifications are described.

Drop test condition : Drop Height: 122 cm.

2. TEST EQUIPMENT

The following test equipment was used for the test:

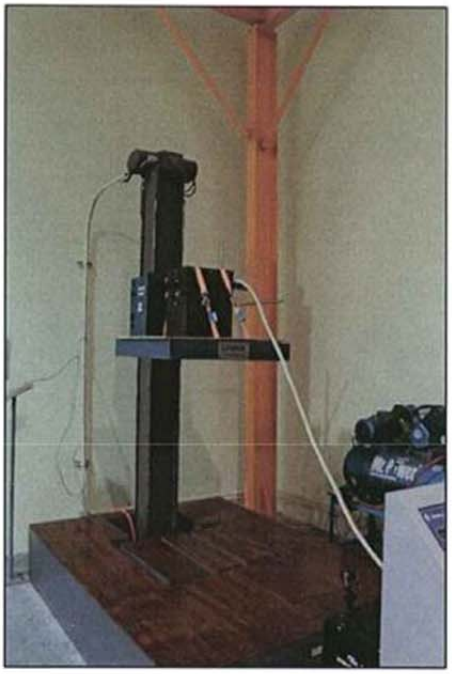
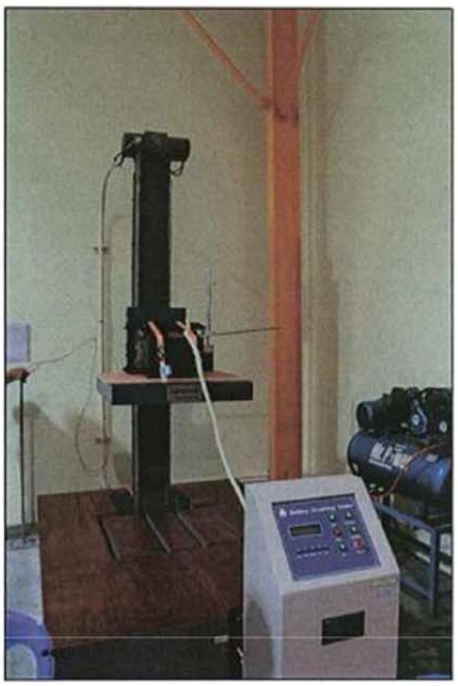
Equipment	Specifications	Manufacturer	Model	Serial No.
Drop test	Max. Drop Height: 183 cm. Max. Specimen Weight: 227 kg.	LANSMONT	PDT-227ED	M-14428

3. TEST RESULTS

The results are judged by applicant.

This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

4. DIRECTION TEST

Attached photo
Photo No.1 
Photo No.2 

This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

Attached photo

Photo No.3

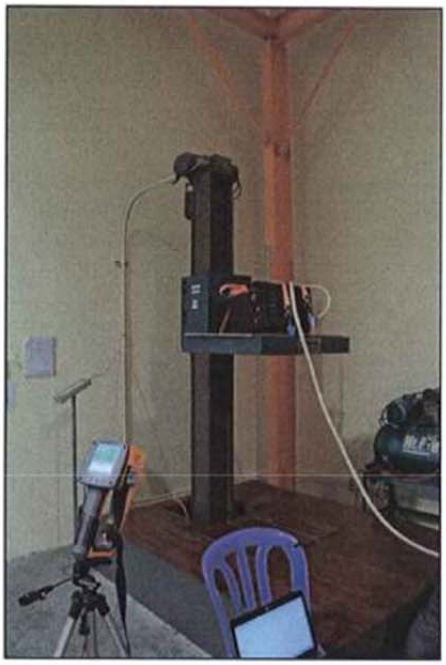


Photo No.4



This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

Attached photo

Photo No.5

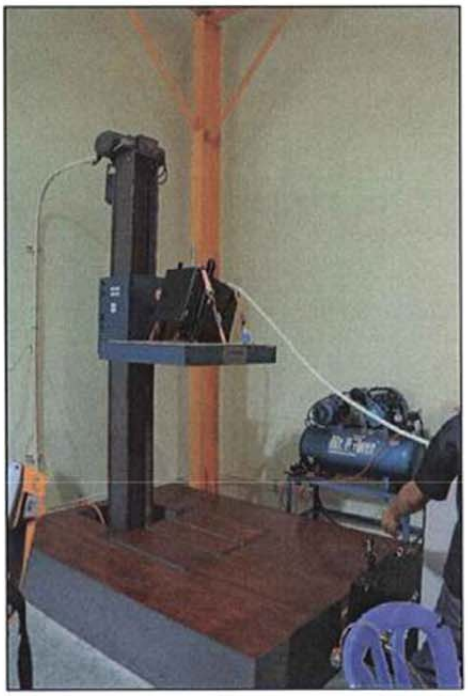
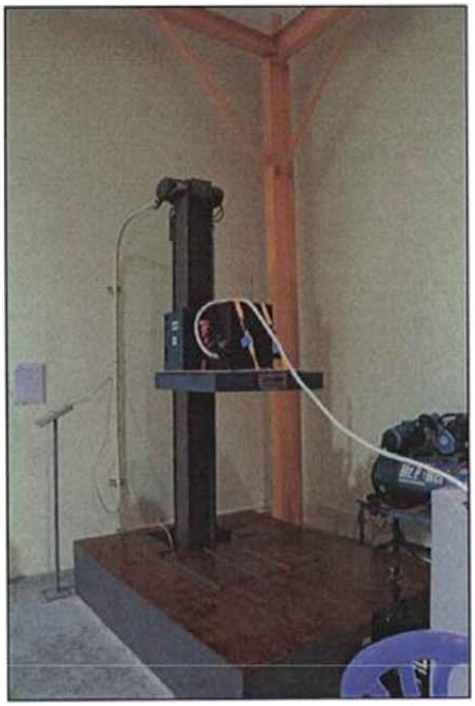


Photo No.6



- End of report -

This report is certified only on the tested sample. Prohibit to reproduce some part of them without permission from the Electrical and Electronics Institute.

ญ. ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility; EMC) ของชุดแบตเตอรี่ โดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

TEST REPORT

EUT Number:	59-2067
Equipment Under Test:	Green Box
Trade Name:	-
Model:	120-01
Serial Number:	-
Reference Number:	-
Manufactured by:	-
Customer:	National Metal and Materials Technology (MTEC)
Address:	114 Thailand Science Park, Phahon Yothin Rd., Klong 1, Klong Lung, Pathumthani 12120
Receipt Date:	2 August 2016
Date of Test:	1, 3, 13 September 2016
Issued Date of Report:	15 September 2016

Approved by

MR. Anake Meemoosor

Operation Manager

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

CONTENTS

1 SUMMARY OF TESTING 3
2.1 TEST PLAN 4
2.2 DEVIATIONS FROM STANDARD 4
3 TEST CONDITIONS 5
3.1 OPERATION MODE 5
3.2 UNCERTAINTY APPLICATION 5
3.3 EQUIPMENT CLASSIFICATIONS 7
3.4 PROTECTION CLASSIFICATIONS 7
3.5 PERFORMANCE CRITERIA OF TEST SPECIFICATION 7
3.6 EUT FUNCTION MONITORING 7
4 TEST SYSTEM CONFIGURATION 7
4.1 EUT EXERCISE SOFTWARE 7
4.2 EUT MODIFICATIONS 7
5 EUT DESCRIPTION 8
5.1 EUT SPECIFICATION 8
5.2 EUT CONFIGURATION 8
5.3 PERIPHERALS DESCRIPTION 8
5.4 CABLES DESCRIPTION 8
6 TEST SETUP AND RESULT 9
6.1 TEST ITEM: RADIATED EMISSION 9
6.2 TEST ITEM: RADIATED IMMUNITY 12
6.3 TEST ITEM: POWER FREQUENCY MAGNETIC 16
6.4 TEST ITEM: ELECTROSTATIC DISCHARGE 19

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

1 SUMMARY OF TESTING

This product was tested and complied according to following specification standards:

EN 61000-6-4 Generic standard-Emission standard for industrial environments.

EN 61000-6-2 Generic standard-Immunity for industrial environment.

Test Item	Test Specification	Test Method	Result
Radiated Emission	EN61000-6-4:2007+A1:2011	CISPR 16-2-3:2006	PASS
Radiated Immunity	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A	IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1)	PASS
	EN61000-6-2:2005,1400MHz to 2000 MHz, 3V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
	EN61000-6-2:2005,2000MHz to 2700 MHz, 1V/m 1KHz 80% AM Criterion A		
Power frequency Magnetic	EN61000-6-2:2005, Table 1.1,30A/m 50Hz, Criterion A	EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0)	PASS
Electrostatic Discharge	EN61000-6-2:2005, Table1.5,8kV air, 4kV contact, Criterion B	IEC61000-4-2:2008 (Ed 2.0)	PASS

Note: -

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

2 TEST PLAN AND DEVIATIONS FROM STANDARD

2.1 Test Plan

No.	Test Item	Input Voltage	Mode	Test Port	Test Specification
1	Radiated Emission	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-4:2007+A1:2011
2	Radiated Immunity	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005,80MHz to 1000 MHz, 10V/m 1KHz 80% AM Criterion A
3	Power frequency Magnetic	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005, Table 1.1,30A/m 50Hz, Criterion A
4	Electrostatic Discharge	230V 50Hz	A	Enclosure	EN61000-6-2:2005, Table1.5,8kV air, 4kV contact, Criterion B

2.2 Deviations from standard

-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3 TEST CONDITIONS

3.1 Operation Mode

A: Normal Operated.

3.2 Uncertainty Application

3.2.1 Uncertainty application according to CISPR 16-4-2:2003 for Conducted Emission, Radiated Disturbance and Disturbance Power Testing.

Compliance or Non-Compliance with a disturbance limit was determined in the following manner

If U_{lab} is less than or equal to U_{cispr} in table 1, then:

- Compliance is deemed to occur if no measured disturbance exceeds the disturbance limit.
- Non-Compliance is deemed to occur if any measured disturbance exceeds the disturbance limit.

If U_{lab} is greater than U_{cispr} in table 1, then:

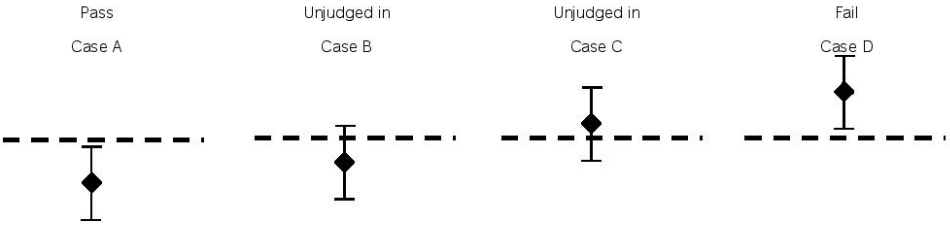
- Compliance is deemed to occur if no measured disturbance, increased by (U_{lab}- U_{cispr}), exceeds the disturbance limit.
- Non-Compliance is deemed to occur if any measured disturbance, increased by (U_{lab}-U_{cispr}), exceeds the disturbance limit.

Table 1 - Values of U_{cispr}

Abbreviation	Testing system	Frequency range	U_{lab}	U_{cispr}	U_{lab}- U_{cispr}
CE	Conducted Emission	9 kHz - 150 kHz	2.88	4.00	-1.12
CE	Conducted Emission	150 kHz - 30 MHz	3.51	3.60	-0.09
RE	Radiated Disturbance	30 MHz - 1000 MHz	4.80	5.20	-0.40
PE	Disturbance Power	30 MHz - 300 MHz	2.42	4.50	-2.08

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3.2.2 Uncertainty Application according to LAB 34 Edition 1 (Figure 1) for other testing system.



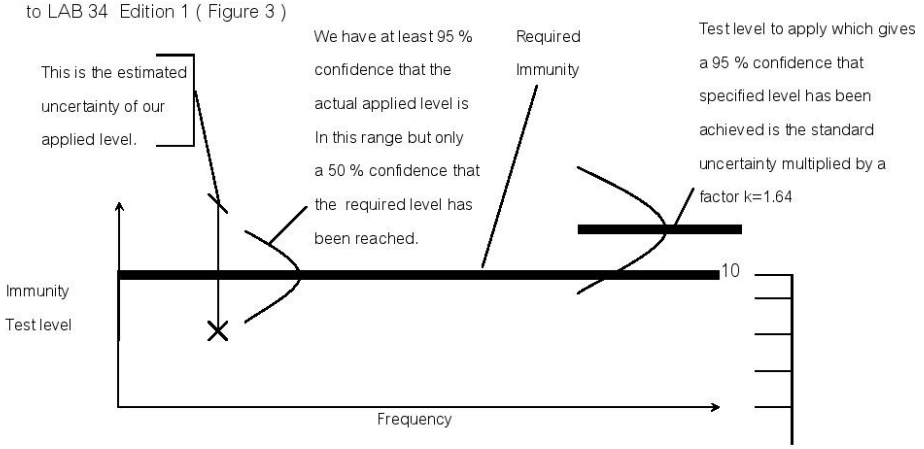
Case A	Case B	Case C	Case D
The measured result is within the limit, even when extended by the uncertainty interval. The product therefore complies with the specification.	The measured result is below the upper limit, but by a margin less than half of the uncertainty interval; it is therefore not possible to state compliance based on the 95% level of confidence. However, the result indicates that compliance is more probable than non-compliance.	The measured result is above the upper limit, but by a margin less than half of the uncertainty interval; it is therefore not possible to state non-compliance based on the 95% level of confidence. However, the result indicates that non-compliance is more probable than compliance.	The measured result is beyond the upper limit, even when extended downwards by half of the uncertainty interval. The product therefore does not comply with the specification.

◆ = measured result

I = uncertainty interval

3.2.3 Uncertainty Application for immunity testing.

Uncertainty of each test systems are applied for compliance with related standard according to LAB 34 Edition 1 (Figure 3)



This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

3.3 Equipment Classifications

Class A for EN 61000-3-2

3.4 Protection Classifications

Class I

3.5 Performance Criteria of Test Specification

a) Performance criterion A: The apparatus shall continue to operate as intended during and after the test. No degradation of performance or loss of function is allowed below a performance level specified by the manufacturer, when the apparatus is used as intended. The performance level may be replaced by a permissible loss of performance. If the minimum performance level or the permissible performance loss is not specified by the manufacturer, either of these may be derived from the product description and documentation and what the user may reasonably expect from the apparatus if used as intended.

b) Performance criterion B: apparatus shall continue to operate as intended after the test. No degradation of performance or loss of function is allowed below a performance level specified by the manufacturer, when the apparatus is used as intended. The performance level may be replaced by a permissible loss of performance. During the test, Degradation of performance is however allowed. No change of actual operating state or stored data is allowed. If the minimum performance level or the permissible performance loss is not specified by the manufacturer, either of these may be derived from the product description and documentation and what the user may reasonably expect from the apparatus if used as intended.

C) Performance criterion C: Temporary loss of function is allowed, provided the function is self-recoverable or can be restored by the operation of the controls.

3.6 EUT Function Monitoring

The specific phenomena are monitored by motor speed.

4 TEST SYSTEM CONFIGURATION

4.1 EUT Exercise Software

-

4.2 EUT Modifications

-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

5 EUT DESCRIPTION

5.1 EUT Specification

Input Voltage	230 V / 50Hz
Input Current/Power	≤16 A
Clock/Oscillator	-

5.2 EUT Configuration

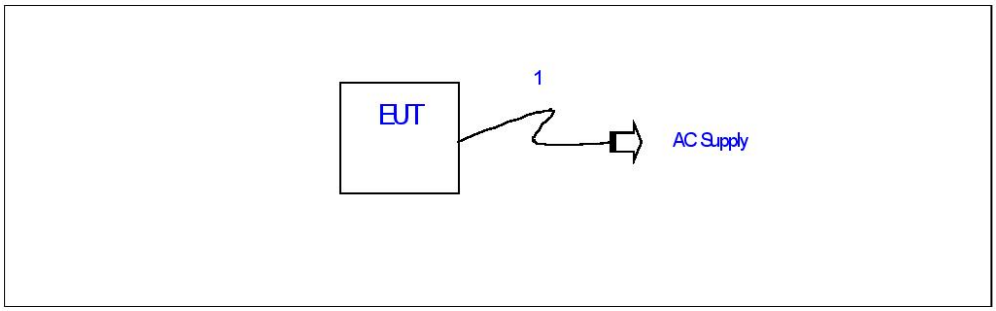


FIGURE 1 - EUT Configuration.

5.3 Peripherals Description

Diagram	Description	Trade Name	Model	Serial Number
-	-	-	-	-

5.4 Cables Description

Ref	Cable Type	Shield	Length (meters)	Ferrite	Connector	Connection Point 1	Connection Point 2
1	AC Power line	No	1.5	No	AC	EUT	AC Supply

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6 TEST SETUP AND RESULT

6.1 Test Item: Radiated Emission

6.1.1 Test Setup

- **Test Specification**

  See1 and 2.1

- **Test Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
EMI Test Receiver	Rohde & Schwarz	ESU26	100459	DKD	15-12-16
Amplifier	Sonoma	310 N	186897	NIMT	05-06-16
Trilog - Broadband Antenna	SCHWARZBECK	VULB9162	9162-088	UKAS	20-05-17

- **Customer's Equipment**

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- **Test Uncertainty:** ±4.80 dB

- **Test Location:** SAC 1

- **Test Environment**

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	56

- **Test Setup Description**

The radiated emission measurement was performed with EMI receiver to observe the emission characteristic and identify the frequency of emission that has the highest amplitude relative to limit by operating the EUT with a typical configuration. The EUT configuration, cable configurations of operation are determined for producing the maximum level of emissions.

The EUT was placed on the 80 cm height non-metallic table on a 1 m radius turntable.

The Trilog - Broadband Antenna (30 MHz - 7GHz) was used for received the noise of EUT and put on the antenna mast, which they were in side the semi-anechoic chamber. The testing method and the EUT setup were performed according to CISPR 16-2-3:2006). The EUT configuration setup is shown in figures 2 and 3, respectively.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

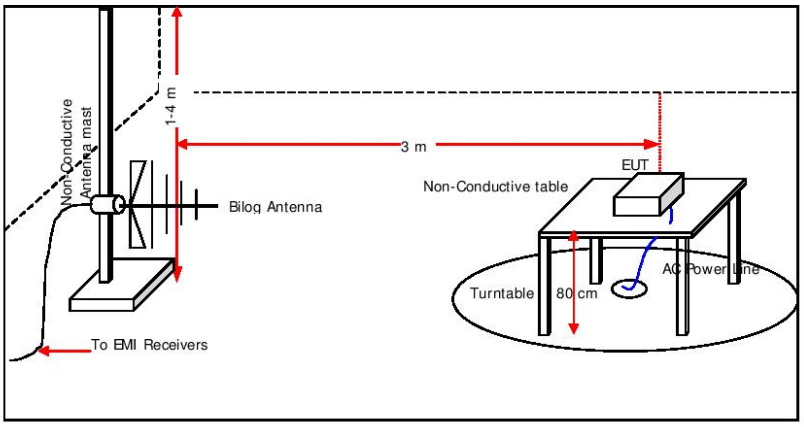


FIGURE 2 - The test setup diagram.

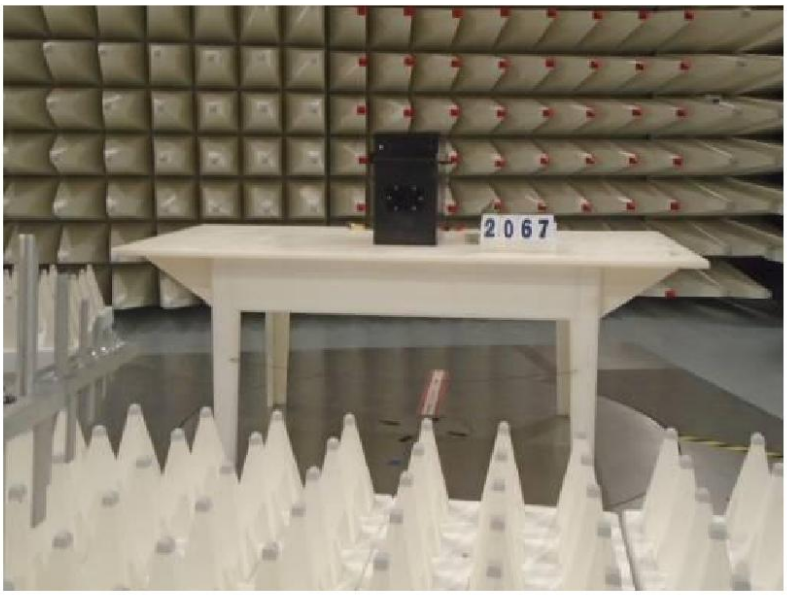


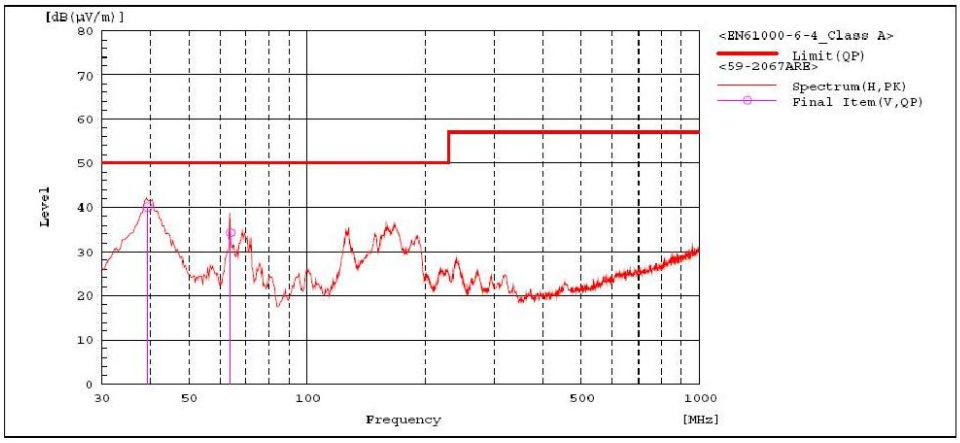
FIGURE 3 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

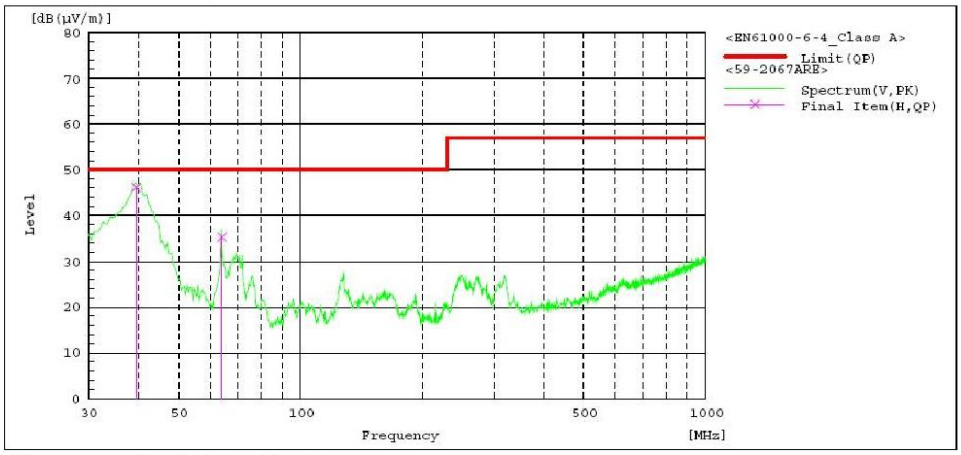
6.1.2 Test Result

Measurement Port	Enclosure	Operation Mode	A (See 3.1)

Test result for horizontal polarization



Test result for vertical polarization



Measurement Result of Quasi-Peak Detector

No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB(µV)]	c.f [dB(1/m)]	Result QP [dB(µV/m)]	Limit QP [dB(µV/m)]	Margin QP [dB]	Height [cm]	Angle [°]
1	39.272	H	56.0	-16.0	40.0	50.0	10.0	290.0	205.0
2	64.001	H	51.0	-16.7	34.3	50.0	15.7	135.0	220.0
3	39.281	V	62.2	-16.0	46.2	50.0	3.8	100.0	0.0
4	64.000	V	52.0	-16.7	35.3	50.0	14.7	100.0	298.0

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Marut Hnihnae

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.2 Test Item: Radiated Immunity

6.2.1 Test Setup

- Test Specification

See 1 and 2.1

- Test Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
Power Meter	Rohde & Schwarz	NRVD	832839/021	NIMT	21-11-16
Signal Generator	Rohde & Schwarz	SMY02	830269/058	NIMT	20-11-16
Bilog Antenna 26MHz - 2GHz	EMCO	3142B	9911-1454	NIST	23-11-16
Power Amplifier	Amplifier Research	250W1000	27380	NIST	23-11-16
System Controller/Interface Unit	Rohde & Schwarz	SCIU	338802/010	-	23-11-16

- Customer's Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- Test Uncertainty: ± 1.78 dB

- Test Location: CHC

- Test Environment

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	55

- Test Setup Description

The RF power used in this testing was pre-calibrated according to the IEC61000-4-3:2008 (Ed 3.1). standard. The EUT was placed on the 0.8 m high non-metallic table which located in the Medium Compact Diagnostic Chamber (CHC). The EUT was placed only four sides directly to the antenna. The transmitter antenna was operated in both the vertical and horizontal polarizations.

The EUT was located on the table in the uniform field area. The distance between the transmitter antenna and the outer edge of the EUT was 3 meters. The EUT configurations for radiated immunity testing are shown in FIGURE 4 and 5.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

● Test Picture

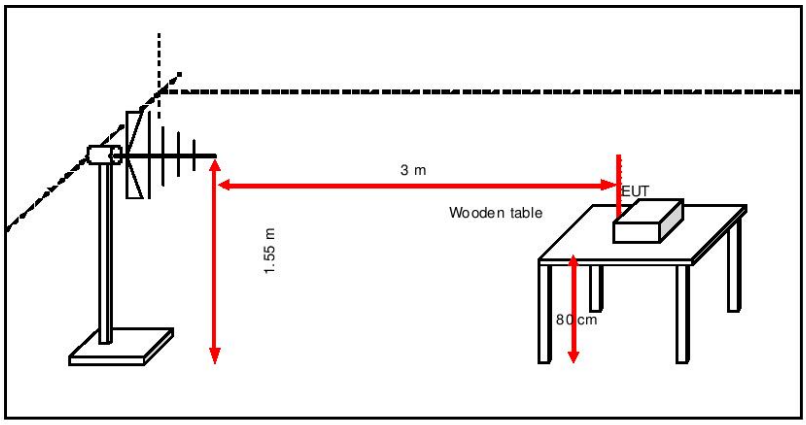


FIGURE 4 - The setup diagram.



FIGURE 5 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.2.2 Test Result

Test Condition 1					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	10 V/m	Start Frequency:	80 MHz	Stop Frequency:	1000 MHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Test Condition 2					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	3 V/m	Start Frequency:	1.4 GHz	Stop Frequency:	2.0 GHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

Test Condition 3					
Operation Mode	A (See 3.1)				
Test Level:	1 V/m	Start Frequency:	2.0 GHz	Stop Frequency:	2.7 GHz
Step Size:	1%	Modulation Frequency:	1 KHz	Modulation Type:	AM, 80%
Step mode:	Log	Dwell time	3 Sec	Port:	Enclosure

Side	Polarity	Result
Front	Vertical	NORM
Front	Horizontal	NORM
Right	Vertical	NORM
Right	Horizontal	NORM
Back	Vertical	NORM
Back	Horizontal	NORM
Left	Vertical	NORM
Left	Horizontal	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.3 Test Item: Power Frequency Magnetic

6.3.1 Test Setup

- Test Specification

See 1 and 2.1

- Test Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
Induction Coil Interface	TESEQ	INA2141	1423	UKAS	05-02-17
Induction Coil	TESEQ	INA703	1987	UKAS	05-02-17

- Customer's Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- Test Uncertainty: ±1.15 %

- Test Location: Test area

- Test Environment

Temperature (°C)	25	Humidity (%)	54

- Test Setup Description

The power frequency magnetic field was tested according to the immersion method of EN61000-4-8:2009 (Ed 2.0).

The induction coil was rotated by 90° in order to expose the EUT to the test field with different orientations.

The EUT was placed on the reference ground plane is shown in the FIGURE 6 and 7.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Picture

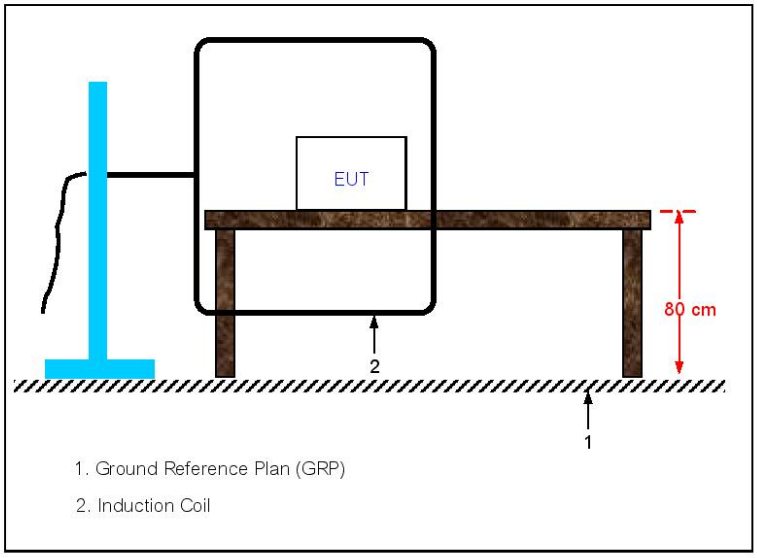


FIGURE 6 - The setup diagram.



FIGURE 7 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.3.2 Test Result

Magnetic Field (A/m)	Axis	Result
30 A/m	X,Y,Z	NORM

Note: "-" : Not Test "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.4 Test Item: Electrostatic Discharge

6.4.1 Test Setup

- Test Specification

  See 1 and 2.1

- Test Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
ESD Generator	TESEQ	NSG438	1226	NIST	20-11-16

- Customer's Equipment

Equipment Name	Manufacture	Model	S/N	Traceability	Due date
-	-	-	-	-	-

- Test Uncertainty: ± 7.09 %

- Test Location: Test area

- Test Environment

Temperature (°C)	24	Humidity (%)	53

- Test Setup Description

The ESD was executed at a few weak points which can be normally touched by an operator or customer. The repetition rate between the impulses was at least 1 sec. The EUT was placed on the ground plane. The test points are shown in Figure 8.

The EUT configuration and diagram for the electrostatic discharge testing are shown in FIGURE 9 and 10 respectively.

Electrostatic Discharge Testing Description

No.	Test Points	Type of Testing	Test Voltage (KV)	Number of Discharge per pol.	Operation Mode (see3.1)	Performance Criterion
1	A1-A2	Air	± 8	10	A	B
2	C3-C5	Contact	± 4	10	A	B
3	VCP	Contact	± 4	10	A	B

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

- Test Picture

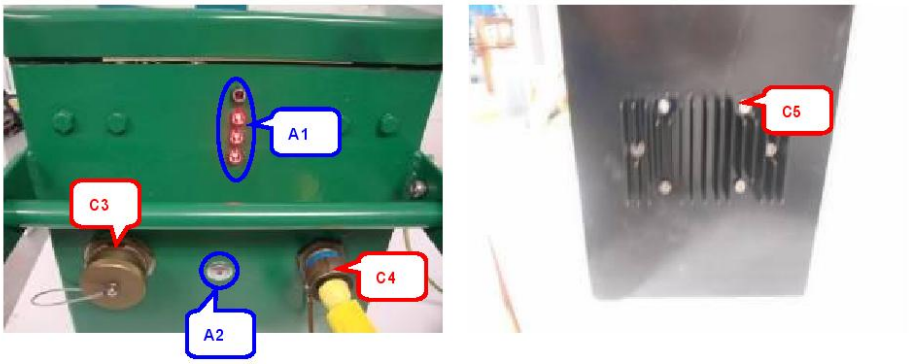


FIGURE 8 - Test points.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

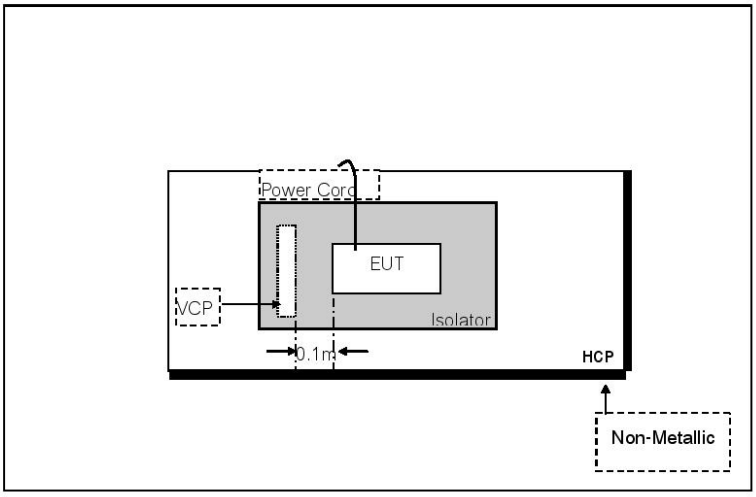


FIGURE 9 - The setup diagram.



FIGURE 10 - The test setup picture.

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

6.4.2 Test Result

Contact Discharge

Test Point	Operation Mode	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharge (Times)							
		+ 4/10	- 4/10	+ 6/10	- 6/10	+ 8/10	- 8/10	+ 10/10	- 10/10
C3	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C4	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
C5	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-
VCP	A	NORM	NORM	-	-	-	-	-	-

Note: "-" : Not Test "ND" : Not Discharge "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Air Discharge

Test Point	Operation Mode	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharge (Times)							
		+ 4/10	- 4/10	+ 6/10	- 6/10	+ 8/10	- 8/10	+ 10/10	- 10/10
A1	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-
A2	A	-	-	-	-	ND	ND	-	-

Note: "-" : Not Test "ND" : Not Discharge "NORM" : Normal "AB" : Abnormal

Phenomena Observed/Comments
-

Result: ***Pass***

Tested by: MR. Poomares Pomsri

---------- End of Report ----------

This test report is test results from the EUT only, not the product's quality certificate. It shall not be reproduced except in full without the written approval of testing laboratory.

ฎ. รายการวัสดุ (BOM) ของกล่องแบตเตอรี่

รายการที่	รายละเอียด	Part No.	ยี่ห้อ	จำนวน	Supplier	หมายเหตุ
1	Battery Module	-		6	Oskabatt	(Toriyama Battery Cell)
2	BMS 24V 25.2V 7S 60A 7x 3.6V Lithium ion LiPo Battery BMS PCM PCB	-	-	6	Supower Battery	
3	Electronic board	-	-	1	บริษัท วราไมโครเซอร์คิท จำกัด	
4	Thin Film Resistors - SMD 100k 0.1% 250mW	CRT1206-BY-1003EAS	Bourns	8	Mouser	BMS Master
5	Thick Film Resistors - SMD 47K 1%	CR1206-FX-4702ELF	Bourns	2	Mouser	BMS Master
6	Thick Film Resistors - SMD 1206 20Kohm 1% High VoltageAEC-Q200	KTR18EZPF2002	ROHM Semiconductor	7	Mouser	BMS Master
7	Thick Film Resistors - SMD 1/4watt 150ohms 1%	CRCW1206150RFKEA	Vishay	11	Mouser	BMS Master
8	Thick Film Resistors - SMD 1/2watt 330ohms 1% High Power AEC-Q200	CRCW1206330RFKEAHP	Vishay	20	Mouser	BMS Master
9	Thick Film Resistors - SMD 1/2watt 2.2Kohms 1% High Power AEC-Q200	CRCW12062K20FKEAHP	Vishay	12	Mouser	BMS Master
10	Thick Film Resistors - SMD 1/4watt 0ohms	CRCW12060000Z0EA	Vishay	2	Mouser	BMS Master
11	Thick Film Resistors - SMD 1/4watt 10Kohms 1%	CRCW120610K0FKEA	Vishay	11	Mouser	BMS Master
12	Thick Film Resistors - SMD 1206 150Kohms 1% AEC-Q200	ERJ-8ENF1503V	Panasonic	1	Mouser	BMS Master
13	Thick Film Resistors - SMD 1206 47ohms 1% Tol AEC-Q200	ERJ-8ENF47R0V	Panasonic	1	Mouser	BMS Master
14	Thick Film Resistors - SMD 1/4watts 5.6Kohms 1%	RK73H2BTTD5601F	KOA Speer	1	Mouser	BMS Master
15	Thick Film Resistors - SMD 1/4watts 1Kohms 1%	RK73H2BTTD1001F	KOA Speer	1	Mouser	BMS Master
16	Thick Film Resistors - SMD 1206 330Kohms 1% AEC-Q200	ERJ-8ENF3303V	Panasonic	1	Mouser	BMS Master
17	Thick Film Resistors - SMD 1/4watt 51Kohms 1%	CRCW120651K0FKEA	Vishay	1	Mouser	BMS Master
18	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 50V .1uF X8R 0805 10% Tol	08055F104K4Z2A	AVX	9	Mouser	BMS Master
19	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 250volts 18pF 5% C0G	CBR08C180JAGAC	Kemet	2	Mouser	BMS Master
20	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 0805 10uF	GRM21BC8YA106KE11L	Murata	3	Mouser	BMS Master

รายการที่	รายละเอียด	Part No.	ยี่ห้อ	จำนวน	Supplier	หมายเหตุ
	35volts *Derate Voltage/Temp					
21	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 1.0UF 50V 10% 0805	GRM21BR71H105KA12L	Murata	1	Mouser	BMS Master
22	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 50V 270pF C0G 0805 5% Tol	08055A271JAT2A	AVX	1	Mouser	BMS Master
23	Crystals 8MHz 18pF EX/TEMP HC-49US	ECS-80-18-4XDN	ECS	1	Mouser	BMS Master
24	Headers & Wire Housings 50P SINGLE ROW	5-826629-0	TE Connectivity	1	Mouser	BMS Master
25	Schottky Diodes & Rectifiers 5.0 Amp 50 Volt 150A IFSM @ 8.3ms	SB550A-E3/54	Vishay	1	Mouser	BMS Master
26	Power to the Board Contact SKT 1 POS Cr ST Cable Mount T	DF22A-1012SCF	Hirose Electric	12	Mouser	BMS Master
27	Power to the Board FML SCKT CNTACT REEL WIRE AWG#16-18	MDF6-1618SCF	Hirose Electric	42	Mouser	BMS Master
28	Fixed Inductors 6.8uH 13.3A 0.0116ohms	DR127-6R8-R	Eaton	1	Mouser	BMS Master
29	Power to the Board 6P DBL ROW SOCKET CRIMPING SOCKET	MDF6-6DS-3.5C	Hirose Electric	7	Mouser	BMS Master
30	Digital Signal Processors & Controllers - DSP, DSC 20MIPS 66 KB	DSPIC30F5015-20E/PT	Microchip	1	Mouser	BMS Master
31	Headers & Wire Housings WR-WTB 2.54mm Male 2Pin Lckg	61900211121	Wurth Electronics	29	Mouser	BMS Master
32	Headers & Wire Housings WR-WTB 2.54mm Male 3Pin Lckg	61900311121	Wurth Electronics	1	Mouser	BMS Master
33	Board Mount Current Sensors CURRENT SENSOR IC'S	TLI4970-D050T4	Infineon	2	Mouser	BMS Master
34	Schottky Diodes & Rectifiers 20A 60V Very Low VF Schottky Rectifier	FSV2060L	Fairchild Semiconductor	36	Mouser	BMS Master
35	Transistor Output Optocouplers 300-600% CTR rank	PC817X4NSZ0F	Sharp Microelectronics	15	Mouser	BMS Master
36	Zener Diodes 3.3 Volt 0.5 Watt	1N5226B-TR	Vishay	7	Mouser	BMS Master
37	Power to the Board 7.92MM R/A HEADER 2P TIN-COPPER PLATED	DF22-2P-7.92DS(35)	Hirose Electric	6	Mouser	BMS Master
38	Power to the Board Housing SKT 2 POS 7.92mm ST Bag	DF22-2S-7.92C(28)	Hirose Electric	6	Mouser	BMS Master
39	Resettable Fuses - PPTC 9A 20V 0.006ohm Axial	MF-LR900/20-0	Bourns	6	Mouser	BMS Master
40	TVS Diode Arrays 2.5pF 30A BI for Surge Protection	SP4020-01FTG-C	Littelfuse	12	Mouser	BMS Master
41	TVS Diodes - Transient Voltage Suppressors 36V 450W AUTO	SD36-01FTG	Littelfuse	4	Mouser	BMS Master

รายการที่	รายละเอียด	Part No.	ยี่ห้อ	จำนวน	Supplier	หมายเหตุ
	UNI-DIR SOD323					
42	RS-232 Interface IC 5V MultiCh RS-232 Driver/Receiver	MAX232CWE+T	Maxim Integrated	1	Mouser	BMS Master
43	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 22UF 35V 20% 0805	C2012X5R1V226M125AC	TDK	2	Mouser	BMS Master
44	Buck Switching Regulator IC Positive Adjustable 0.5V 1 Output 3A 8-SOIC (0.173", 4.40mm Width) Exposed Pad	SI-8205NHD-TL	Sanken	1	Digikey	BMS Master
45	Ferrite Cable Cores 43 Round Cable Core Z=250 OHM @ 100MHz	623-2643540002	Fair-Rite	10	Mouser	
46	Switch Push Botton	57M111G	ITW Switches	1	Mouser	
47	J1 Connector male	D38999/24WC98PN	TE Connectivity	1	Mouser	
48	Cover J1	D3899933W21N	Souriau	1	Mouser	
49	J2 Connector male	D38999/24WG16PN	Souriau	1	Mouser	
50	Cover J2	D38999/33W13N	Sunbank	1	Mouser	
51	LED Panel Mount Indicators PANEL MNT INDICATOR RED 5V	L60DR5W	VCC	4	Mouser	
52	Automotive Relays 24VDC 1FORM X IP54 HCR150 SCRW TERM	V23132B2002A200	TE Connectivity	4	Mouser	
53	Circular MIL Spec Connector 16P Sz 21 Straight Plug Socket Cont	D38999/26WG16SN	Souriau	1	Mouser	
54	Battery Box			1	จ้างประกอบ	Hardware
55	Battery Box Cover			1	จ้างประกอบ	Hardware
56	Battery Module Holder			2	จ้างประกอบ	Hardware
57	Bracket AL (2 mm.)			1	จ้างประกอบ	Hardware
58	Al Sink (024A) ยาว 3"1/2			1	หจก. คิงชาวด์ อิเล็คทรอนิค	Hardware
59	สเปร์ยโฟม SIKA Boom AP 500 mL			2	Megahome	Hardware
60	แผ่น EVA โฟมสีดำ 10 มม.			1	บ. สยามรับเบอร์แอนด์ยูรีเทน จำกัด	Hardware
61	แผ่น EVA โฟมสีดำ 3 มม.			1	บ. สยามรับเบอร์แอนด์ยูรีเทน จำกัด	Hardware
62	ประเก็นแผ่น 1.5 มม.			1	บ. สยามรับเบอร์แอนด์ยูรีเทน จำกัด	Hardware
63	สกรูจมกลม SUS M5X15			8	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
64	สกรูจมกลม SUS M5X20			4	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
65	สกรูจมกลม SUS M5X30			2	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware

รายการที่	รายละเอียด	Part No.	ยี่ห้อ	จำนวน	Supplier	หมายเหตุ
66	น๊อต SUS M5			10	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
67	แหวน M5			6	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
68	แหวนจักร 6 มม.			4	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
69	กาวทาประเก็น			1	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
70	หางปลาตัวเมีย SUS M6			1	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
71	แหวน SUS M6			1	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
72	แหวนสปริง SUS M6			1	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware

ฎ. รายการวัสดุ (BOM) ของกล่องชาร์จ

รายการที่	รายละเอียด	Part No.	ยี่ห้อ	จำนวน	Supplier	หมายเหตุ
1	LED Panel Mount Indicators PANEL MNT INDICATOR RED 5V	L60DR5W	VCC	3	Mouser	
2	J2 Connector male	D38999/24WG16PN	Souriau	1	Mouser	
3	Cover J2	D38999/33W21N	Souriau	1	Mouser	
4	Switch Push Botton	57M111G	ITW Switches	3	Mouser	
5	Relay 130 A	V23132B2002A200	TE Connectivity	3	Mouser	
6	พัดลม	-	-	2	-	
7	Breaker 32A	H7-32/2C	HACO	1	บริษัท เมกา โฮม เซ็นเตอร์ จำกัด	
8	Charger Normal	PB-600	Meanwell	1	บริษัท อยู่เปรมปรีดิ์	
9	Charger Fast	PB-1000	Meanwell	1	บริษัท อยู่เปรมปรีดิ์	
10	Power Supply	SE-600	Meanwell	1	บริษัท อยู่เปรมปรีดิ์	
11	DC/DC Buck-Boost Converter 5-32V to 1-27V 10A 130W CC/CV	-	-	1	บริษัท Thai converter	
12	Relay 30A			4		
13	หัวสำหรับชาร์จ DC			4		
14	connector female D-sub สำหรับ Debug	571-1658610-4	TE Connectivity / AMP	4	Mouser	
15	connector Hirose Power to Board 6 Pin	798-MDF66DP35DSA05	Hirose Electric	2	Mouser	
16	ปลั๊ก AC EMI Filter			1	-	
17	บอร์ด Regulate แรงดัน	-	-	2	-	
18	บอร์ดควบคุมการชาร์จ AC or DC	-	-	1	-	
19	Female J2	26WG16SN	Souriau	2	Mouser	สายชาร์จ AC
20	Socket J2 Female	R85049/88-21W03	Souriau	2	Mouser	สายชาร์จ AC
21	Hood ป้องกันสายหลุด	202K142-100/180-0	TE Connectivity / Raychem	2	Mouser	สายชาร์จ AC
22	ท่อหุ้มสายไฟทนความร้อน/ผ่า	-	-	-	-	สายชาร์จ AC
23	หัวคีบ	-	-	2	-	สายชาร์จ DC
24	Charger Box Lower	-	-	1	จ้างประกอบ	Hardware
25	Charger Box Cover	-	-	1	จ้างประกอบ	Hardware
26	แผ่น AL (2 mm") ขนาด 26*48 cm.	-	-	3	หจก. คิงชาวด์ อิเล็คทรอนิค	Hardware

27	หูเหลี่ยม 5"	-	-	1 คู่	หจก. คิงชาวด์ อิเล็คทรอนิค	Hardware
28	ขายาง	-	-	4	บ. สยามรับเบอร์แอนด์ยูรีเทน จำกัด	Hardware
29	รีเวทนัท M4	-	-	14	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
30	สกรูจมกลม SUS M4X15	-	-	14	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
31	สกรูจมกลม SUS M5X12	-	-	12	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
32	น๊อต SUS M6	-	-	36	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
33	แหวน SUS M6	-	-	36	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
34	สตัด SUS M6	-	-	2 ม.	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
35	น๊อต SUS M4	-	-	4	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
36	สกรู SUS M4X20	-	-	4	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
37	แหวน SUS M4	-	-	8	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
38	สกรูจม SUS M4X55	-	-	2	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
39	สกรูมิลแฉก SUS M3X10	-	-	24	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
40	แหวน SUS M3	-	-	24	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
41	น๊อต SUS M3	-	-	24	หจก. ชัยดำรงเทรดดิ้ง	Hardware
42	Header 3-Pin			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
43	Capacitor 0.1uF			7	Mouser	บอร์ดควบคุม
44	Capacitor 1uF			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
45	Capacitor 22pF			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
46	Capacitor 10uF			3	Mouser	บอร์ดควบคุม
47	Capacitor 22uF			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
48	Capacitor 270pF			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
49	Diode			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
50	Diode 1N4007 1 Amp General Purpose Rectifier			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
51	Header, 3-Pin			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
52	Header, 20-Pin			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
53	Inductor 10uH			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
54	Typical INFRARED GaAs LED			5	Mouser	บอร์ดควบคุม
55	Header, 5-Pin			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
56	NPN General Purpose Amplifier MMBT2222ALT1			6	Mouser	บอร์ดควบคุม

57	Resistor 330			17	Mouser	บอร์ดควบคุม
58	Resistor 10k			8	Mouser	บอร์ดควบคุม
59	Resistor 150k			5	Mouser	บอร์ดควบคุม
60	Resistor 100k			4	Mouser	บอร์ดควบคุม
61	Resistor 47k			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
62	Resistor 47			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
63	Resistor Jumper			2	Mouser	บอร์ดควบคุม
64	Resistor 0			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
65	Resistor 18k			4	Mouser	บอร์ดควบคุม
66	Resistor Open			4	Mouser	บอร์ดควบคุม
67	Resistor 51k			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
68	Resistor 1k			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
69	Single-Pole, Single-Throw Switch			1	Mouser	บอร์ดควบคุม
70	4-Pin Phototransistor Optocoupler			6	Mouser	บอร์ดควบคุม
71	Crystal Oscillator 8MHz			1	Mouser	บอร์ดควบคุม

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK