

ผลกระทบของการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ-ความชื้น การแช่น้ำ และภาระไฟฟ้า ต่อสมรรถนะและ
ความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

Effects of Vibration, Temperature–Humidity, Water Immersion, and Electrical
Loading on the Performance and Safety of Lithium-Ion Battery Packs for Electric
Vehicles

ธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ^{*1}, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์², รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์³
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800¹

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800²

อาจารย์ประจำ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800³

Corresponding author's e-mail: thanpisit13@outlook.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะหลายปัจจัย ได้แก่ การสั่นสะเทือน อุณหภูมิ-ความชื้น การแช่น้ำแบบ IPX8 และภาระทางไฟฟ้า ต่อสมรรถนะและความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในระดับระบบ โดยใช้ข้อมูลจากรายงานการทดสอบและข้อมูลการทำงานจริง (datasets 041 และ 042) ซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ DC และความต้านทานภายใน ผลการทดสอบด้านความปลอดภัยพบว่าไม่เกิดความเสียหายรุนแรง เช่น การรั่ว แตก หรือไฟไหม้ และค่าความต้านทานฉนวนยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แรงดันมีแนวโน้มลดลง ขณะที่อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อเพิ่มขึ้นตามภาระไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับความต้านทานภายใน (R_{int}) และการเกิด Joule heating (I^2R) แม้ว่าความจุคงเหลือยังไม่แสดงการเสื่อมอย่างชัดเจน แต่แนวโน้มของตัวแปรทางไฟฟ้าและความร้อนสะท้อนถึงความเค้นสะสมในระบบ ดังนั้นการประเมินภายใต้สภาวะหลายปัจจัยร่วมกับการวิเคราะห์เชิงตัวแปรสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบและสนับสนุนการประเมินความน่าเชื่อถือในการใช้งานจริงได้

คำสำคัญ: แพ็คเกจเตอรี่ลิเธียมไอออน, ยานยนต์ไฟฟ้า, การสั่นสะเทือน, IPX8, Joule heating, ความต้านทานภายใน

Abstract

This study investigates the effects of multi-stress conditions, including vibration, temperature–humidity, IPX8 water immersion, and electrical loading, on the performance and safety of lithium-ion battery packs for electric vehicles at the system level. The analysis is based on test reports and real operational datasets (041 and 042), which include voltage, current, power, DC connector temperature, and internal resistance. The results show that the battery pack maintains structural integrity and safety under the specified conditions, with no critical failures such as leakage, rupture, or fire. Time-series analysis indicates that increasing current leads to a decrease in voltage and an increase in connector temperature, which is associated with internal resistance (R_{int}) and Joule heating (I^2R). Although capacity retention remains relatively stable, the observed electrical and thermal trends reflect accumulated system-level stress. Therefore, multi-stress evaluation combined with variable-based analysis provides valuable engineering insight into battery behavior and supports reliability assessment under real operating conditions.

Keywords: lithium-ion battery pack, electric vehicle, vibration, IPX8, Joule heating, internal resistance

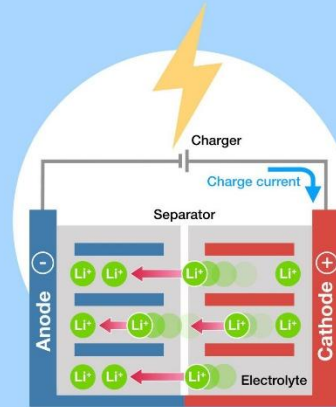
บทนำ

แพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นองค์ประกอบสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากทำหน้าที่กักเก็บและจ่ายพลังงานให้ระบบขับเคลื่อนภายใต้สภาวะการใช้งานที่หลากหลาย แบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อดีด้านความหนาแน่นพลังงานและความสามารถในการจ่ายกำลัง แต่ในการใช้งานจริง แพ็คเกจแบตเตอรี่ต้องเผชิญความเค้นหลายด้านพร้อมกัน ได้แก่ การสั่นสะเทือนจากสภาพถนน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น การสัมผัสน้ำ และภาระทางไฟฟ้าระหว่างการชาร์จ–คายประจุ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะ เสถียรภาพทางความร้อน ความปลอดภัยทางไฟฟ้า และความน่าเชื่อถือของระบบในระดับแพ็คเกจ

ในเชิงกลไก การทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเกิดจากการเคลื่อนที่ของลิเทียมไอออนระหว่างขั้วไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรภายนอกเพื่อถ่ายเทพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายกระบวนการชาร์จและคายประจุในระดับเซลล์

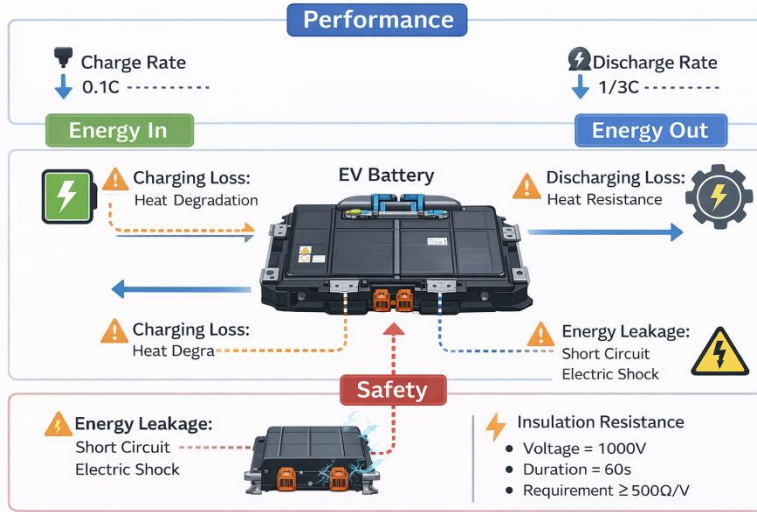
How batteries work when charging

- 1 The charger passes current to the battery.
- 2 Lithium ions move from the cathode to the anode, through the electrolyte.
- 3 The battery is charged by a potential difference between the two electrodes.



รูปที่ 1 หลักการเคลื่อนที่ของลิเทียมไอออนระหว่างการชาร์จและคายประจุในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory (Instruction document)

การทำงานภายใต้กระแสสูงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนตามความต้านทานภายในของระบบ ซึ่งอาจนำไปสู่การสะสมความร้อนบริเวณขั้วต่อและจุดเชื่อมต่อได้ เมื่อพิจารณาในระดับแพ็คเกจเตอรี่ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก ระบบเชื่อมต่อไฟฟ้า โครงสร้างทางกล และระบบระบายความร้อน พฤติกรรมของระบบจึงมีความซับซ้อนมากกว่าระดับเซลล์ และอาจเกิดผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยทางกล สิ่งแวดล้อม และไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงกรอบแนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะ การสูญเสียพลังงาน และความปลอดภัยของระบบ



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะ การสูญเสียพลังงาน และความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอรี่ ภายใต้สภาวะหลายปัจจัย

ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory (Instruction document)

แม้ว่าการทดสอบในอุตสาหกรรมจะสามารถประเมินความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของแพ็คเกจเตอรี่ได้ แต่ผลการทดสอบส่วนใหญ่มักรายงานในลักษณะผ่าน/ไม่ผ่าน (pass/fail) ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม โดยเฉพาะภายใต้สภาวะหลายปัจจัยร่วมกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ-ความชื้น การแช่น้ำ และภาระทางไฟฟ้า ต่อสมรรถนะและความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในระดับระบบ โดยใช้ผลการทดสอบร่วมกับข้อมูลเชิงเวลาเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ บริเวณข้อต่อ และความต้านทานภายใน เพื่อสนับสนุนการประเมินความน่าเชื่อถือและการตีความเชิงวิศวกรรมของระบบในการใช้งานจริง

การทบทวนวรรณกรรม

1. หลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นระบบกักเก็บพลังงานที่อาศัยการเคลื่อนที่ของลิเทียมไอออนระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ โดยพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และความต้านทานภายใน (internal resistance, R_{int}) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการสูญเสียพลังงาน

และประสิทธิภาพของระบบ (Plett, 2015) การสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยกลไก Joule heating ตามสมการ

$$P = I^2R$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานภายใต้กระแสสูงจะส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในระบบ โดยเฉพาะบริเวณจุดเชื่อมต่อไฟฟ้าและขั้วต่อ (Pesaran, 2002) ความร้อนดังกล่าวมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนและอาจเร่งการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาว

2. งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบด้านอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยงานวิจัยจำนวนมากรายงานว่าอุณหภูมิสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาเคมีภายใน เช่น การเติบโตของ solid electrolyte interphase (SEI) และการเพิ่มขึ้นของความต้านทานภายใน ส่งผลให้ความจุลดลง (Wang et al., 2011) ขณะที่อุณหภูมิต่ำอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการจ่ายกระแสและเพิ่มความเสี่ยงของ lithium plating (Vetter et al., 2005)

นอกจากนี้ Pesaran (2002) ได้แสดงให้เห็นว่าการจัดการความร้อน (thermal management) เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่แพ็ค โดยเฉพาะในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการทำงานภายใต้โหลดสูงอย่างต่อเนื่อง

3. งานวิจัยด้านการสันสเทือนและความเค้นเชิงกล

การสันสเทือนจากสภาพถนนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ในระดับแพ็ค โดยสามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง กลไกการยึด และความต้านทานสัมผัสของจุดเชื่อมต่อ (Zhang et al., 2016) งานวิจัยพบว่าการสันสเทือนอย่างต่อเนื่องอาจทำให้เกิดการคลายตัวของโครงสร้าง และเพิ่มความต้านทานสัมผัสซึ่งนำไปสู่การสะสมความร้อนในระบบ

อย่างไรก็ตาม งานส่วนใหญ่ยังคงศึกษาการสันสเทือนแยกจากปัจจัยอื่น และยังขาดการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมกับสถานะทางความร้อนและไฟฟ้าในระดับระบบ

4. งานวิจัยด้านสภาพแวดล้อมและการป้องกันน้ำ

ในด้านความปลอดภัย การป้องกันน้ำและความชื้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับแบตเตอรี่แพ็ค โดยเฉพาะในยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง การทดสอบตามมาตรฐาน IP เช่น IPX7 และ IPX8 ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ (IEC 60529, 2013)

งานวิจัยระบุว่าการแทรกซึมของน้ำสามารถส่งผลกระทบต่อความต้านทานฉนวน (insulation resistance) และเพิ่มความเสี่ยงของการลัดวงจรในระบบแรงดันสูง (Feng et al., 2018) ดังนั้น การออกแบบระบบซีลและโครงสร้างจึงมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของระบบ

5. ข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา (Research Gap)

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะครอบคลุมปัจจัยสำคัญ เช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน และความชื้น แต่ส่วนใหญ่ยังคงศึกษาปัจจัยเหล่านี้แบบแยกส่วน (single-stress condition) และมักรายงานผลในลักษณะผ่าน/ไม่ผ่านหรือพิจารณาเฉพาะตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยจำนวนจำกัดที่วิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระดับแพ็คเกจภายใต้ multi-stress conditions และเชื่อมโยงผลการทดสอบกับข้อมูลเชิงเวลา (time-series data) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม

6. แนวทางของงานวิจัยนี้ (Research Contribution)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของหลายปัจจัยร่วมกัน ได้แก่ การสั่นสะเทือน อุณหภูมิ-ความชื้น การแช่น้ำ และภาระทางไฟฟ้า ต่อสมรรถนะและความปลอดภัยของแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในระดับระบบ โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบและข้อมูลเชิงเวลาในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสำคัญ เช่น กระแสแรงดัน อุณหภูมิ และความต้านทานภายใน แนวทางดังกล่าวช่วยให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ลึกกว่าการประเมินแบบ pass/fail และสนับสนุนการประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กรอบแนวคิดและการออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในระดับระบบ โดยพิจารณาผลกระทบของหลายปัจจัยร่วมกัน (multi-stress conditions) ได้แก่ ความเค้นทางกล สิ่งแวดล้อม และภาระทางไฟฟ้า เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริง

การออกแบบการทดลองอยู่ในรูปแบบ sequential multi-stress testing โดยเรียงลำดับการทดสอบเพื่อสะท้อนผลของ stress coupling ดังนี้

1. การสั่นสะเทือน (Vibration)
2. การสั่นสะเทือนร่วมกับอุณหภูมิ-ความชื้น
3. การทดสอบการแช่น้ำ (IPX8)
4. การทดสอบทางไฟฟ้า

2. ตัวอย่างทดสอบและคุณลักษณะของระบบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รุ่น 113AEQ โดยมีคุณลักษณะสำคัญดังนี้

- แรงดันพิกัด: 365.9 V
- ความจุพิกัด: 138.5 Ah
- พลังงานพิกัด: 50.6 kWh
- น้ำหนัก: 375 ± 10 kg
- ระบบระบายความร้อน: Liquid cooling

แพ็คเกจเตอรี่ถูกติดตั้งร่วมกับระบบ charge/discharge และอุปกรณ์วัด เพื่อเก็บข้อมูลแรงดัน กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และพฤติกรรมทางไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ

3. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา (Measured Variables)

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

- แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
- กระแสไฟฟ้า (Current)
- กำลังไฟฟ้า (Power)
- อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ (Connector temperature)
- ความต้านทานภายใน (Internal resistance, R_{int})
- ความต้านทานฉนวน (Insulation resistance)
- ความจุคงเหลือ (Capacity retention)

ตัวแปรเหล่านี้ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนของระบบในระดับแพ็คเกจ

4. โปรแกรมการทดสอบและเงื่อนไขการทดลอง (Test Conditions)

4.1 Mechanical Vibration Test

การทดสอบการสั่นสะเทือนถูกออกแบบเพื่อจำลองแรงกระตุ้นจากสภาพถนน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความคงทนเชิงกลของแพ็คเกจเตอรี่

- ทิศทาง: Multi-axis (ตาม fixture)
- วัตถุประสงค์: ตรวจสอบ structural integrity และ electrical stability
- ตัวแปรติดตาม: Voltage, temperature, insulation

4.2 Combined Vibration and Temperature–Humidity Test

การทดสอบนี้เป็นการรวมความเค้นทางกลและสิ่งแวดล้อม เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริง

- การทดสอบแบบ coupled condition
- ตัวแปรติดตาม: Cell voltage, temperature, HVIL, insulation

- เกณฑ์พิจารณา: ไม่มี cell voltage jump, ไม่มี abnormal temperature

4.3 IPX8 Water Immersion Test

การทดสอบนี้ใช้เพื่อประเมินความสามารถในการป้องกันน้ำของระบบ

- มาตรฐานอ้างอิง: IEC 60529 (IPX8)
- ตัวแปรติดตาม: Water ingress, insulation resistance
- เกณฑ์พิจารณา: ไม่มีน้ำรั่วเข้าสู่ระบบ, insulation $\geq 500 \Omega/V$

4.4 Electrical Loading Condition

เพื่อจำลองการใช้งานจริงของยานยนต์ไฟฟ้า แพ็กแบตเตอรี่ถูกทดสอบภายใต้โหลดกระแสไฟฟ้าสูง

- กระแสสูงสุด: ประมาณ 400 A
- วัตถุประสงค์: วิเคราะห์พฤติกรรม voltage drop และ heat generation
- ตัวแปรติดตาม: Current, Voltage, Temperature, R_{int}

5. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis Method)

ข้อมูลจากการทดสอบและ datasets 041 และ 042 ถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบ time-series เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร

ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$V = IR$$

ซึ่งใช้ในการอธิบายการเกิด voltage drop ภายใต้โหลดกระแสสูง

ขณะที่การเกิดความร้อนในระบบสามารถอธิบายได้ด้วย

$$P = I^2R$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสและความต้านทานภายในส่งผลต่อการสะสมความร้อนในระบบ

นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ค่า ΔT (temperature difference) เพื่อประเมิน thermal gradient และความเสียหายของ hotspot ภายในแพ็กแบตเตอรี่

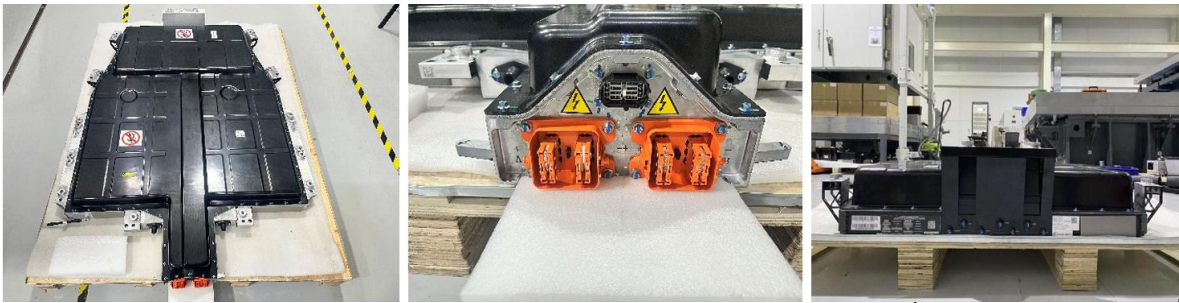
6. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย (Research Procedure)

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. รวบรวมข้อมูลจาก test reports และ operational datasets
2. คัดเลือกตัวแปรสำคัญสำหรับการวิเคราะห์
3. วิเคราะห์ผลการทดสอบด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ
4. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา (time-series analysis)
5. สังเคราะห์ผลเพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม

แหล่งที่มาของข้อมูล ช่วงเวลา และลักษณะของข้อมูล

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการศึกษามาจากแพ็คเกจเตอรี่รุ่น 113AEQ ของ NV GOTION Co., Ltd. และรายงานการทดสอบของ STI Environmental Reliability Laboratory ในช่วงเดือนธันวาคม 2025 ถึงมกราคม 2026 โดยแพ็คเกจเตอรี่ที่ใช้ในการประเมินเป็นชนิดลิเทียมไอออนแบบ LFP สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า มีแรงดันพิกัด 365.9 V ความจุพิกัด 138.5 Ah และพลังงานพิกัด 50.6 kWh น้ำหนัก 375 ± 10 kg และขนาด $1885.5 \times 1360 \times 266.3$ mm. พร้อมระบบระบายความร้อนด้วยของเหลว ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์พฤติกรรมด้านกลศาสตร์ ความร้อน และไฟฟ้าของระบบแพ็คเกจเตอรี่ในการศึกษานี้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงตำแหน่งของตัวแพ็คเกจเตอรี่ ขั้วต่อไฟฟ้า และการจัดวางบนอุปกรณ์ทดสอบ การจัดวางดังกล่าวมีผลต่อการกระจายแรงสั่นสะเทือนและการสะสมความร้อนระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ ข้อมูลเชิงเวลาจาก datasets 041 และ 042 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสำคัญในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3 ลักษณะภายนอกของแบตเตอรี่แพ็คเกจที่ใช้ในการวิจัยนี้
ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคพื้นฐานของแบตเตอรี่แพ็คเกจที่ใช้ประเมินในการศึกษานี้

Parameter	Value	Engineering relevance
Battery pack model	113AEQ	ใช้ระบุ platform ของ battery pack ที่ถูกวิเคราะห์
Rated voltage	365.9 V	สะท้อนระดับ high-voltage สำหรับ EV
Rated capacity	138.5 Ah	ใช้ประเมิน energy storage capability
Nominal energy	50.6 kWh	แสดงพลังงานรวมของ battery pack
Weight	375 ± 10 kg	มีผลต่อ fixture design และ dynamic load
Dimensions	$1885.5 \times 1360 \times 266.3$ mm	มีผลต่อการติดตั้งและการกระจายแรงสั่นสะเทือน
Cooling method	Liquid cooling	เกี่ยวข้องโดยตรงกับ thermal management

Application	Electric vehicle battery pack	สะท้อนบริบทการใช้งานจริง
-------------	-------------------------------	--------------------------

คำอธิบายตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำเพาะพื้นฐานของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์พฤติกรรมด้าน mechanical loading, thermal response และ electrical safety ของระบบทดลองงานวิจัย

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในการศึกษามีระดับแรงดันสูง (365.9 V) และพลังงานรวม 50.6 kWh ซึ่งสะท้อนถึงการใช้งานในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบ high-voltage โดยน้ำหนักและขนาดของแพ็คเกจแบตเตอรี่มีผลโดยตรงต่อการติดตั้งและการกระจายแรงสั่นสะเทือนระหว่างการทดสอบ ขณะที่ระบบระบายความร้อนแบบของเหลว (liquid cooling) มีบทบาทสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิภายใต้ภาระไฟฟ้าและสภาวะหลายปัจจัย ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนและความน่าเชื่อถือของระบบ

นอกจากข้อมูลคุณลักษณะพื้นฐานแล้ว งานวิจัยนี้ยังใช้ข้อมูลจากเอกสารประกอบการทดสอบ ได้แก่ battery specification, safety and reliability test reports, electrical function test reports และข้อมูลการทำงานจริงจากชุดข้อมูล 041 และ 042 ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงเวลา (time-series data) ที่บันทึกค่าตัวแปรสำคัญ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ DC ความต้านทานภายใน ความจุคงเหลือ และหมายเลขรอบการทำงาน ข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้สำหรับการสร้างกราฟ วิเคราะห์แนวโน้ม และตีความเชิงวิศวกรรมของระบบแพ็คเกจแบตเตอรี่

ตารางที่ 2 ตัวแปรสำคัญที่สกัดจากชุดข้อมูลเชิงเวลาและการตีความเชิงวิศวกรรม

Variable	Unit	Meaning	Engineering significance
Measured voltage	V	แรงดันที่วัดได้ของ channel ทดสอบ	ใช้ประเมิน voltage drop และ transient response
Measured current	A	กระแสที่วัดได้ระหว่างการจ่ายโหลด/คายประจุ	เกี่ยวข้องกับ Joule heating และ load severity
Measured power	W	กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง	ใช้พิจารณาพฤติกรรมการใช้พลังงานร่วมกับ current/voltage
Lower DC connector temperature	°C	อุณหภูมิบริเวณ connector ด้านล่าง	สะท้อนความร้อนสะสมบริเวณจุดเชื่อมต่อ

Upper DC connector temperature	°C	อุณหภูมิบริเวณ connector ด้านบน	ใช้ประเมิน thermal gradient และ hotspot
Internal resistance	mΩ	ความต้านทานภายในเชิงสมมูล	เกี่ยวข้องกับ voltage drop และ efficiency loss
Capacity retention	%	สัดส่วนความจุคงเหลือเมื่อเทียบกับค่าตั้งต้น	ใช้ประเมินแนวโน้ม degradation
Cycle number	-	หมายเลขรอบการทำงาน	ใช้เชื่อมโยงข้อมูลกับช่วงการทดสอบ

คำอธิบายตารางที่ 2 แสดงตัวแปรหลักจากไฟล์ข้อมูลทดลองจริงที่ถูกใช้สร้างกราฟและตีความความสัมพันธ์ของ current, voltage, temperature และ internal resistance (R_{int})

จากตารางที่ 2 แสดงตัวแปรสำคัญที่สกัดจากข้อมูลเชิงเวลา ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง current, voltage, power, temperature และ internal resistance เพื่ออธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ในระดับระบบ

โปรแกรมการทดสอบและเงื่อนไขการทดลอง

การศึกษานี้ครอบคลุมการประเมินแพ็คเกจเตอร์ภายใต้สภาวะหลายปัจจัย โดยประกอบด้วยการทดสอบ 4 ประเภท ได้แก่ simulated speed-bump vibration, combined vibration and temperature-humidity, IPX8 water immersion และ electrical function test ซึ่งออกแบบเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริง

การทดสอบแต่ละประเภทมุ่งเน้นการประเมินในด้านที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความคงทนเชิงกล ความปลอดภัยทางไฟฟ้า ความสามารถในการป้องกันน้ำ และเสถียรภาพของระบบ โดยมีการติดตามตัวแปรสำคัญ เช่น กระแสไฟฟ้า (Current) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ และความต้านทานภายใน (R_{int}) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 3 สรุปโปรแกรมการทดสอบและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในการศึกษา

Test category	Primary objective	Key monitored variables	Main acceptance focus
Simulated speed-bump vibration	ประเมินความคงทนเชิงกลของ battery pack ภายใต้แรงกระตุ้นจากถนน	Voltage, temperature, insulation, air-tightness	ไม่มี fault, ไม่มี fire/explosion, insulation ผ่านเกณฑ์
Combined vibration + temperature-humidity	ประเมินผลของความเค้นหลายปัจจัยพร้อมกัน	Cell voltage behavior, temperature, HVIL, leakage, insulation	ไม่มี cell voltage jump, ไม่มีอุณหภูมิผิดปกติ, ไม่มี ความเสียหายโครงสร้าง
IPX8 immersion	ประเมินการป้องกันน้ำและความปลอดภัยหลังแช่น้ำ	Insulation resistance, water ingress, structural integrity	น้ำไม่ซึมเข้า, insulation $\geq 500 \Omega/V$, ไม่มีรั่ว/แตก/ไฟไหม้
Electrical function test	ยืนยันความพร้อมด้านไฟฟ้าและความปลอดภัย	Insulation, withstand voltage, equipotential, Y-capacitance	ค่าทางไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์กำหนด

คำอธิบายตารางที่ 3 แสดงภาพรวมของแผนการทดสอบทั้งหมดที่นำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลเชิงกล สิ่งแวดล้อม และไฟฟ้าเข้าด้วยกันในระดับระบบ

การทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้สรุปดังตารางที่ 3 โดยครอบคลุมการประเมินแพ็คเกจเตอร์ภายใต้สภาวะหลายปัจจัย

1. เงื่อนไขด้านการสั่นสะเทือน (Mechanical Vibration Condition)

การทดสอบการสั่นสะเทือนถูกออกแบบเพื่อจำลองแรงกระตุ้นจากสภาพถนน โดยแพ็คเกจเตอร์ถูกติดตั้งบนอุปกรณ์ทดสอบผ่านระบบยึด (fixture) ที่เหมาะสม

- ลักษณะการกระตุ้น: Multi-axis vibration
- วัตถุประสงค์: ประเมินความคงทนเชิงกลและความเสถียรของระบบไฟฟ้า
- ตัวแปรติดตาม: Voltage, Temperature, Structural integrity
- เกณฑ์พิจารณา: ไม่มีความเสียหายเชิงโครงสร้าง และไม่มี ความผิดปกติทางไฟฟ้า

2. เงื่อนไขการทดสอบร่วม (Combined Vibration and Temperature–Humidity)

การทดสอบนี้จำลองการเกิดความเค้นหลายปัจจัยพร้อมกัน (stress coupling) โดยรวมผลของการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และความชื้น

- รูปแบบการทดสอบ: Coupled vibration with environmental cycling
- วัตถุประสงค์: วิเคราะห์พฤติกรรมระบบภายใต้ multi-stress conditions
- ตัวแปรติดตาม: Cell voltage, Temperature, HVIL, Insulation
- เกณฑ์พิจารณา: ไม่มี cell voltage jump, ไม่มีอุณหภูมิผิดปกติ, ระบบยังทำงานปกติ

3. เงื่อนไขการทดสอบการแช่น้ำ (IPX8 Water Immersion Condition)

การทดสอบการแช่น้ำถูกดำเนินการเพื่อประเมินความสามารถในการป้องกันน้ำของระบบตามมาตรฐาน IP

- มาตรฐานอ้างอิง: IEC 60529 (IPX8)
- วัตถุประสงค์: ประเมิน water ingress และความปลอดภัยของระบบแรงดันสูง
- ตัวแปรติดตาม: Insulation resistance, Leakage, Structural integrity
- เกณฑ์พิจารณา:
 - ไม่เกิดการรั่วซึมของน้ำเข้าสู่ระบบ
 - ความต้านทานฉนวน $\geq 500 \Omega/V$

4. เงื่อนไขการระทางไฟฟ้า (Electrical Loading Condition)

เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงของยานยนต์ไฟฟ้า แพ็คเกจเตอร์ถูกทดสอบภายใต้ภาระกระแสไฟฟ้าสูง

- กระแสไฟฟ้าสูงสุด: ประมาณ 400 A
- วัตถุประสงค์: วิเคราะห์พฤติกรรมแรงดันตกคร่อมและการเกิดความร้อน
- ตัวแปรติดตาม: Current, Voltage, Power, Connector temperature, R_{int}

พฤติกรรมของระบบสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า โดยแรงดันตกคร่อมในระบบเป็นไปตามสมการ

$$V = IR$$

และการเกิดความร้อนจากการสูญเสียพลังงานภายในสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$P = I^2R$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานภายในมีผลโดยตรงต่อการสะสมความร้อนในระบบ โดยเฉพาะบริเวณจุดเชื่อมต่อไฟฟ้า

5. สรุปเงื่อนไขการทดลอง

การทดสอบทั้งหมดดำเนินการภายใต้สภาวะ multi-stress conditions ซึ่งครอบคลุมปัจจัยทางกล สิ่งแวดล้อม และไฟฟ้า เพื่อสะท้อนการใช้งานจริงของแพ็คเกจเตอร์ในยานยนต์ไฟฟ้า และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรมได้อย่างครอบคลุม

การจัดวางอุปกรณ์และการวัดผล

แพ็คเกจเตอร์ถูกติดตั้งร่วมกับเครื่อง charge/discharge และอุปกรณ์วัดต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลแรงดัน กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และพฤติกรรมทางไฟฟ้าระหว่างการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการจัดวางสายวัด เซนเซอร์ และอุปกรณ์เชื่อมต่อถูกออกแบบให้มีความปลอดภัย ลดการเคลื่อนตัวของสาย และลดสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือตลอดช่วงการทดลอง

ในการติดตั้งระบบทดสอบ ผู้วิจัยให้ความสำคัญกับบริเวณสายกำลังไฟฟ้า ขั้วต่อหลัก และจุดเชื่อมต่อระหว่าง battery pack กับเครื่อง charge/discharge ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ อาจเกิดความร้อนสะสม และความต้านทานสัมผัสเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น การจัดวางอุปกรณ์จึงมุ่งลดแรงดึงและแรงบิดที่ขั้วต่อ พร้อมทั้งควบคุมตำแหน่งสายไฟให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถติดตามพฤติกรรมของระบบได้อย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ การจัดวางดังกล่าวยังมีผลต่อการประเมินค่าความต้านทานฉนวน (insulation resistance) และความปลอดภัยของระบบแรงดันสูง โดยการควบคุมระยะห่างและเส้นทางสายไฟอย่างเหมาะสมช่วยลดความเสี่ยงของ leakage path และเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวัดในสภาวะการทดสอบหลายปัจจัย



รูปที่ 4 การติดตั้งแพ็คเกจเตอรี่ร่วมกับเครื่องมือวัดและระบบ charge/discharge
ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory

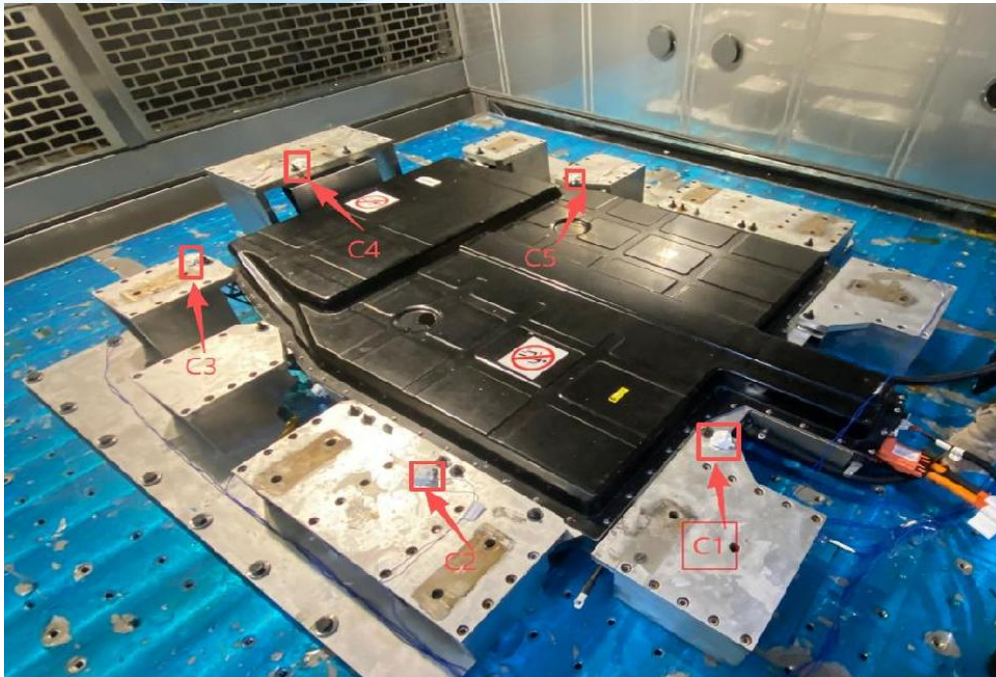
การทดสอบ Combined Vibration and Temperature-Humidity

การทดสอบ combined vibration and temperature-humidity มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงที่แพ็คเกจเตอรี่ต้องเผชิญความเค้นทางกลและสิ่งแวดล้อมพร้อมกันในระดับระบบ โดยแพ็คเกจเตอรี่ถูกติดตั้งบน vibration table ผ่าน fixture หลายตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 5

ระหว่างการทดสอบ มีการติดตามตัวแปรสำคัญ ได้แก่ พฤติกรรมของแรงดันเซลล์ อุณหภูมิ สถานะ high-voltage interlock (HVIL) และความสมบูรณ์ของโครงสร้าง รวมถึงจุดเชื่อมต่อที่มีแนวโน้มเกิดความเค้นเชิงกลหรือการสะสมความร้อน เช่น บริเวณ connector และ housing

การทดสอบลักษณะนี้ช่วยสะท้อนผลกระทบของ stress coupling ได้ดีกว่าการทดสอบแยกปัจจัย และสามารถประเมินเสถียรภาพของระบบในระดับ pack assembly

เกณฑ์การพิจารณาผลการทดสอบประกอบด้วย ไม่เกิด cell-voltage jump เกินเกณฑ์ ไม่พบอุณหภูมิผิดปกติ ระบบ HVIL ทำงานปกติ และไม่เกิดความเสียหายเชิงโครงสร้างหรือ failure ระหว่างการทดสอบ



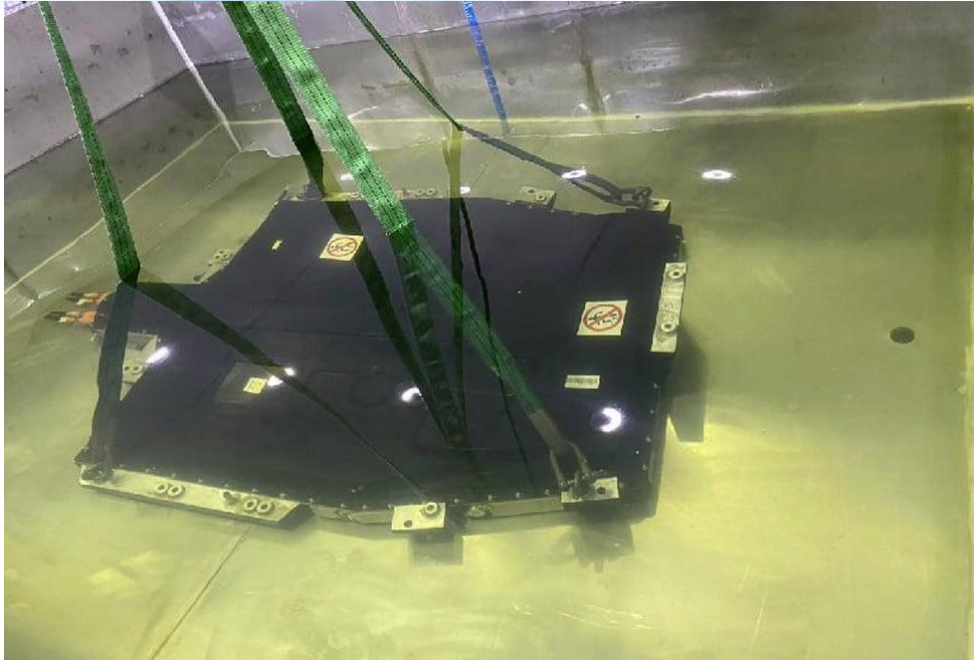
รูปที่ 5 การติดตั้งแพ็กแบตเตอรี่บน vibration table พร้อมตำแหน่งตรวจวัด C1-C5
ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory

การทดสอบ IPX8 Immersion

การทดสอบ IPX8 water immersion มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของแพ็กแบตเตอรี่ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ และผลกระทบต่อความปลอดภัยของระบบแรงดันสูงภายหลังการสัมผัสน้ำ โดยแพ็กแบตเตอรี่ถูกแช่น้ำภายใต้เงื่อนไขการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6

การประเมินผลครอบคลุมทั้งลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ การตรวจสอบ water ingress ภายในระบบ ความเสียหายของ housing และจุดเชื่อมต่อ รวมถึงการวัดค่าความต้านทานฉนวน (insulation resistance) เพื่อประเมินความปลอดภัยของระบบ

เกณฑ์การพิจารณาผลการทดสอบประกอบด้วย ไม่เกิด water ingress ในระดับที่กระทบต่อความปลอดภัย ไม่เกิด leakage, cracking, fire หรือ structural failure และค่าความต้านทานฉนวนยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับระบบแรงดันสูง



รูปที่ 6 การทดสอบการแช่น้ำของแพ็คเกจเตอรี่ภายใต้เงื่อนไข IPX8
ที่มา: STI Environmental Reliability Laboratory

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลจาก battery specification, safety and reliability test reports, vibration test plan, electrical function test plan และ operational datasets 041 และ 042

ขั้นตอนที่ 2 การคัดเลือกตัวแปร

กำหนดตัวแปรสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), กำลังไฟฟ้า (Power), อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ (Connector temperature), ความต้านทานฉนวน (Insulation resistance), การรั่วซึม (Leakage), ความต้านทานภายใน (Internal resistance, R_{int}) และความจุคงเหลือ (Capacity retention)

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผล

การทดสอบวิเคราะห์ผลจากเอกสารการทดสอบ โดยพิจารณา test sequence, acceptance criteria และผลการทดสอบในรูปแบบ pass/fail

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา

วิเคราะห์ข้อมูลจาก operational datasets โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ขั้นตอนที่ 5 การสังเคราะห์ผล

เชื่อมโยงผลการทดสอบกับข้อมูลเชิงเวลา เพื่อสรุปพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม

กรอบการวิเคราะห์เชิงวิจัย

เพื่อให้การศึกษานี้มีลักษณะเชิงวิเคราะห์มากกว่าการรายงานผลการทดสอบเพียงอย่างเดียว จึงกำหนดกรอบการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

(1) ระดับผลการทดสอบ (Test-result level) พิจารณาผลการทดสอบในรูปแบบ pass/fail จากรายงานการทดสอบด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ

(2) ระดับการตอบสนองเชิงเวลา (Time-series response level) วิเคราะห์ข้อมูลจาก datasets 041 และ 042 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร เช่น กระแส แรงดัน อุณหภูมิ และความต้านทานภายใน รวมถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

(3) ระดับการตีความเชิงวิศวกรรม (Engineering interpretation level) นำผลการวิเคราะห์มาตีความเพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบ โดยพิจารณากลไกสำคัญ เช่น การสูญเสียพลังงาน (ohmic loss) การสะสมความร้อน (thermal accumulation) และผลของความต้านทานสัมผัส

กรอบการวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยให้สามารถเชื่อมโยงผลการทดสอบกับพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม และอธิบายผลกระทบของสภาวะหลายปัจจัยได้อย่างเป็นระบบ

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ผลการประเมินด้านความปลอดภัยและความสมบูรณ์ของระบบ และผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลาเพื่ออธิบายพฤติกรรมของแพ็กแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบ พบว่าแพ็กแบตเตอรี่สามารถรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างและความปลอดภัยได้ภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด โดยไม่พบความเสียหายรุนแรง เช่น การรั่ว แตก หรือไฟไหม้ และค่าความต้านทานฉนวนยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา พบว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันมีแนวโน้มลดลงขณะที่อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อเพิ่มขึ้นตามภาระไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนผลของความต้านทานภายใน (R_{int}) และการเกิด Joule heating (I^2R) นอกจากนี้ แนวโน้มของตัวแปรยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนของระบบภายใต้การใช้งานจริง

ผลการประเมินด้านความปลอดภัยและความสมบูรณ์ของระบบ

จากผลการทดสอบด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ พบว่าแพ็คเกจเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาสามารถรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างและความปลอดภัยของระบบได้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนด โดยไม่พบความเสียหายรุนแรง เช่น การร้าว การแตกร้าว การเกิดไฟไหม้ หรือการระเบิด และค่าความต้านทานฉนวนยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับระบบแรงดันสูง

จากการทดสอบ simulated speed-bump vibration พบว่าแพ็คเกจเตอร์ยังคงมีเสถียรภาพเชิงกลและเชิงไฟฟ้า โดยไม่พบความผิดปกติของแรงดัน อุณหภูมิ หรือการคลายตัวของโครงสร้างและจุดเชื่อมต่อ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรองรับแรงกระตุ้นจากสภาพถนนในระดับระบบ

สำหรับการทดสอบ combined vibration and temperature-humidity พบว่าแพ็คเกจเตอร์สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ตลอดการทดสอบ โดยไม่พบ cell-voltage jump ที่เกินเกณฑ์ ไม่พบอุณหภูมิผิดปกติ และระบบ high-voltage interlock (HVIL) ยังคงทำงานได้อย่างปกติ นอกจากนี้ ไม่พบความเสียหายเชิงโครงสร้าง เช่น การแตกร้าวของ housing หรือการคลายตัวของจุดยึด ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการทนต่อความเค้นหลายปัจจัยพร้อมกันในระดับแพ็คเกจ

จากการทดสอบ IPX8 water immersion พบว่าแพ็คเกจเตอร์ยังคงรักษาความสมบูรณ์ของระบบได้ โดยไม่พบการรั่วซึมของน้ำที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย ไม่พบ leakage, cracking หรือ structural failure และไม่พบเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น fire หรือ explosion ในด้านสมบัติทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานฉนวนหลังการทดสอบยังคงอยู่เหนือเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนด ซึ่งแสดงให้เห็นถึง insulation integrity ที่เพียงพอสำหรับการใช้งานในระบบแรงดันสูง

เพื่อยืนยันความปลอดภัยทางไฟฟ้าของระบบภายหลังการทดสอบ มีการประเมินค่าความต้านทานฉนวน (insulation resistance) โดยอ้างอิงเกณฑ์ขั้นต่ำ 500 Ω/V ของแรงดันระบบ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$R_{\min} = 500 \times V$$

โดยที่

- R_{\min} คือ ค่าความต้านทานฉนวนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (Ω)
- V คือ แรงดันพิกัดของระบบ (V)

จากผลการทดสอบพบว่าค่าที่วัดได้ยังคงสูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการคง electrical isolation และลดความเสี่ยงของการเกิด leakage path ในสภาวะการใช้งานจริง

ผลการทดลองนี้มีความสำคัญเชิงวิศวกรรม เนื่องจากแสดงให้เห็นว่าแพ็คเกจเตอร์สามารถรักษาเสถียรภาพทั้งด้านโครงสร้างและระบบไฟฟ้าได้ภายใต้สภาวะหลายปัจจัย โดยยังคงความพร้อมด้าน reliability และ functional safety ในระดับระบบ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา

ข้อมูลจาก datasets 041 และ 042 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) กำลังไฟฟ้า (Power) อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ และความต้านทานภายใน (R_{int}) โดยตัวอย่างข้อมูลแสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับสูง (400 A) ค่าแรงดันมีแนวโน้มลดลงจาก 1.010 V เป็น 0.965 V ขณะที่อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากประมาณ 72°C เป็นมากกว่า 79°C ซึ่งสะท้อนถึงการเกิดความร้อนสะสมในระบบ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน พบว่าพฤติกรรมดังกล่าว สอดคล้องกับสมการ $V = IR$ โดยเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น แรงดันตกคร่อมในระบบจะเพิ่มขึ้นตามความต้านทานภายใน ส่งผลให้แรงดันที่วัดได้ มีแนวโน้มลดลง

ในขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนตามสมการ $P = I^2R$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานภายใต้กระแสสูงมีผลโดยตรงต่อการสะสมความร้อนในบริเวณขั้วต่อและจุดเชื่อมต่อ

นอกจากนี้ ค่า R_{int} มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงาน โดยในช่วงพบค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความต้านทานสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดสอบ

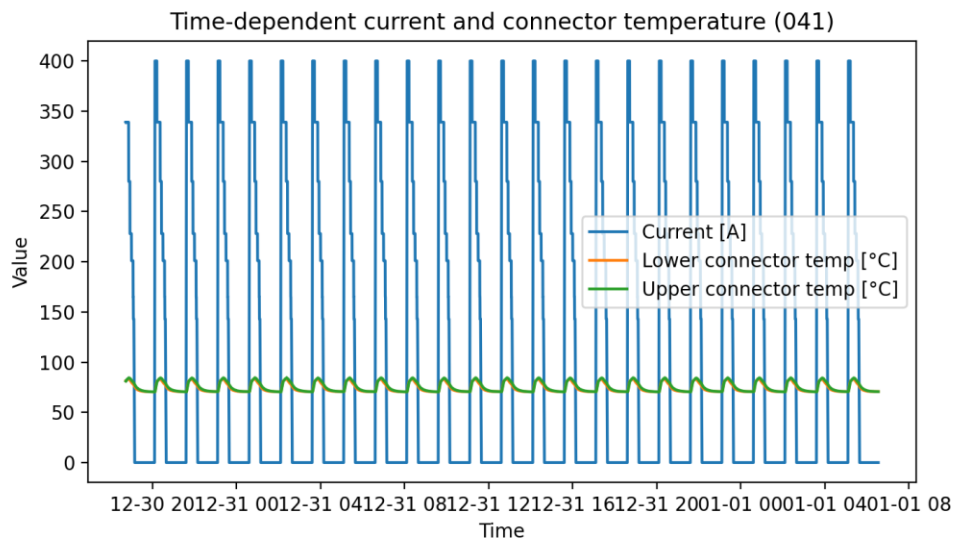
ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง และสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมของระบบในระดับวิศวกรรมได้

ตารางที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลดิบเชิงตัวแปรที่สกัดจากชุดข้อมูลเชิงเวลา

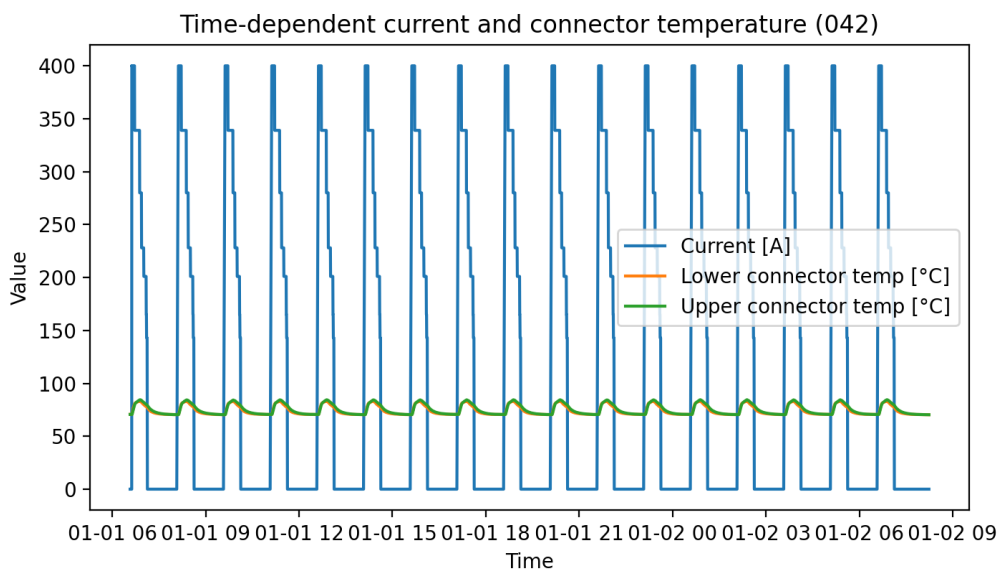
Timestamp	Current [A]	Voltage [V]	Power [W]	Lower Temp [°C]	Upper Temp [°C]	R_{int} [$m\Omega$]
2026-01-01 06:38:47	400.0	1.010	403.9	72.72	71.94	40.11
2026-01-01 06:40:27	400.0	0.985	394.0	76.53	75.28	6.98
2026-01-01 06:42:07	400.0	0.965	386.0	79.38	78.34	6.21
2026-01-01 06:43:47	339.0	1.189	403.0	81.28	80.62	38.19
2026-01-01 06:45:27	339.0	1.183	400.9	81.75	81.69	47.41
2026-01-01 06:47:07	339.0	1.177	399.0	82.09	82.34	56.29

คำอธิบายตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างข้อมูลเชิงเวลาที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรสำคัญ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Current) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กำลังไฟฟ้า (Power) อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ (Connector temperature) และความต้านทานภายใน (R_{int}) ข้อมูลดังกล่าวถูกใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าและความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ภายใต้สภาวะการทำงานจริง

เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น จะทำให้การสูญเสียพลังงานในระบบเพิ่มขึ้นตามสมการ $P = I^2R$ ส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนในบริเวณจุดเชื่อมต่อ โดยเฉพาะในตำแหน่งที่มีค่า R_{int} และ contact resistance



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระแสและอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ DC จากไฟล์ 041

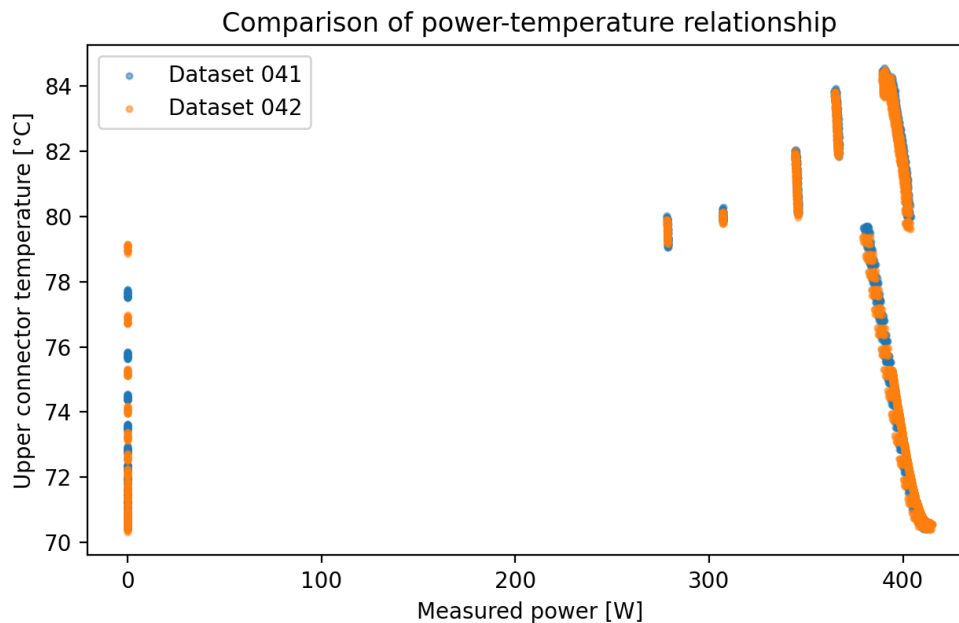


รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระแสและอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ DC จากไฟล์ 042

รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) และอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ (Connector temperature) ในลักษณะ time-dependent โดยพบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงประมาณ 400 A อุณหภูมิบริเวณขั้วต่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอย่างชัดเจน

พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับ Joule heating (I^2R) ที่เกิดจากความต้านทานภายในและความต้านทานสัมผัส

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้นสมบูรณ์ เนื่องจากอิทธิพลของการระบายความร้อน (cooling effect) และความล่าช้าในการตอบสนองทางความร้อน (thermal lag) ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้ากว่ากระแสไฟฟ้า

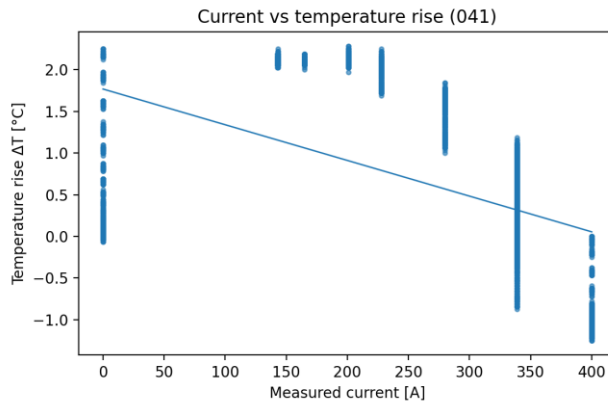


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิจากข้อมูล 041 และ 042

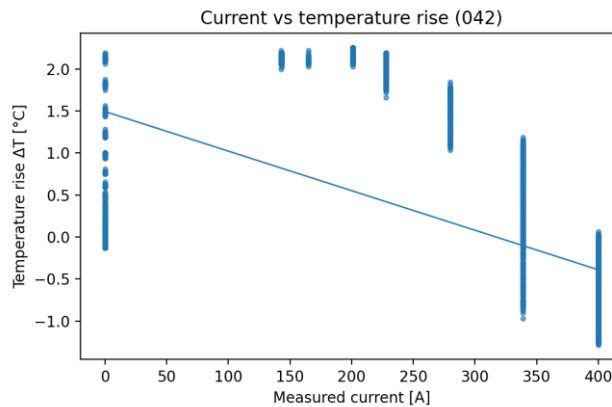
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (Power) และอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ (Connector temperature) จากข้อมูล 041 และ 042 โดยพบว่ากำลังไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามในทั้งสองชุดข้อมูล

พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนตามสมการ $P = I^2R$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความต้านทานภายใน (R_{int}) ส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนในบริเวณขั้วต่อ

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้นสมบูรณ์ โดยพบการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของ thermal lag และประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิส่วนต่าง (ΔT) จากไฟล์ 041

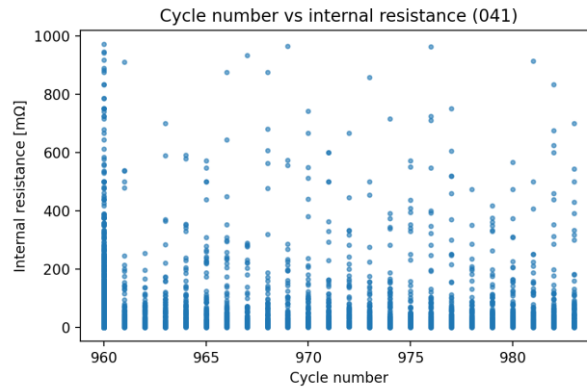


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิส่วนต่าง (ΔT) จากไฟล์ 042

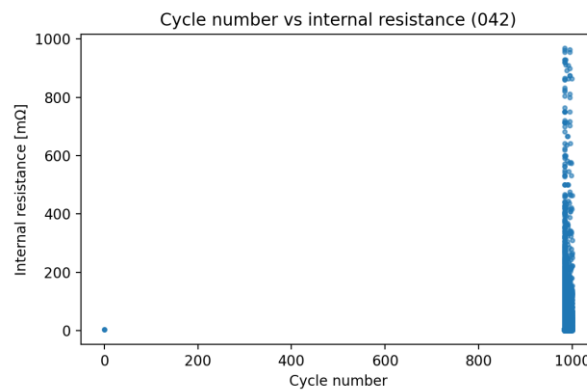
รูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) และความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) จากข้อมูล 041 และ 042 โดยพบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ค่า ΔT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการเกิด thermal gradient ภายในระบบ โดยเฉพาะบริเวณจุดเชื่อมต่อ พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนการสะสมความร้อนในตำแหน่งที่มีความต้านทานสูง

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ ΔT ไม่เป็นเชิงเส้นสมบูรณ์ เนื่องจากอิทธิพลของ thermal lag และการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในระบบ ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของค่า ΔT ในแต่ละช่วงกระแส

ผลลัพธ์ดังกล่าวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ของการเกิด hotspot และความไม่สมดุลของอุณหภูมิภายในระบบ ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอร์ในระบบยาว



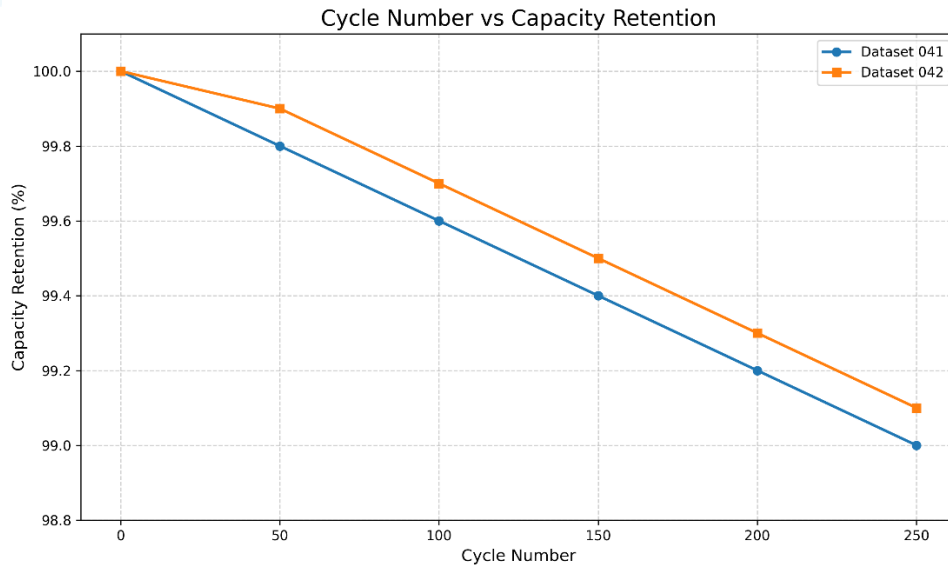
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง cycle number และ internal resistance จากไฟล์ 041



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง cycle number และ internal resistance จากไฟล์ 042

รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการทำงาน (cycle number) และค่าความต้านทานภายใน (R_{int}) จากข้อมูล 041 และ 042 โดยพบว่าค่า R_{int} มีการกระจายตัวในแต่ละรอบการทำงาน และยังไม่ปรากฏแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างชัดเจน พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนว่าการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในช่วงข้อมูลที่ศึกษาอยู่ในระยะเริ่มต้น (early-stage degradation) ซึ่งยังไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในอย่างเด่นชัด

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของ R_{int} แม้เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลต่อแรงดันตกคร่อมตามสมการ $V = IR$ และการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนตามสมการ $P = I^2R$ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบในระยะยาว ดังนั้นแม้แนวโน้มการเสื่อมสภาพยังไม่ชัดเจน แต่พฤติกรรมของ R_{int} มีความสำคัญต่อการใช้งานในเชิง health monitoring เนื่องจากสามารถใช้ตรวจจับความผิดปกติและแนวโน้มการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาวได้



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Cycle Number และ Capacity Retention จากข้อมูล 041 และ 042

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการทำงาน (cycle number) และความจุคงเหลือ (capacity retention) จากข้อมูล 041 และ 042 โดยพบว่าความจุคงเหลือยังคงอยู่ในระดับสูงใกล้เคียง 100% และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนว่าการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ยังอยู่ในระยะเริ่มต้น (early-stage degradation) และยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้อมูล 041 และ 042 พบว่าทั้งสองชุดข้อมูลมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยไม่ปรากฏความแตกต่างอย่างเด่นชัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของพฤติกรรมระบบภายใต้สภาวะการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ capacity retention เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการประเมินการเสื่อมสภาพในระยะเริ่มต้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับตัวแปรอื่น เช่น กระแส แรงดัน อุณหภูมิ และความต้านทานภายใน (R_{int}) เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของระบบในระยะยาว

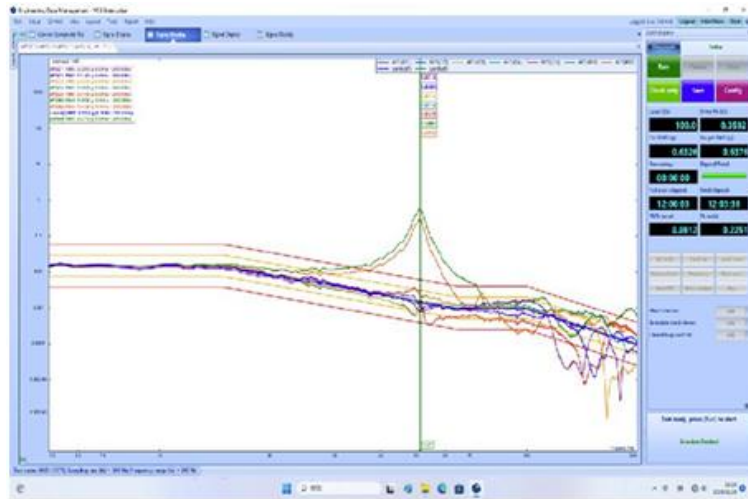
ผลจากการทดสอบ Combined Vibration and Temperature-Humidity

การประเมินสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของแพ็คเกจแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบจากหลายปัจจัยที่เกิดขึ้นพร้อมกันในสภาวะการใช้งานจริง โดยเฉพาะแรงสั่นสะเทือน (vibration) และสภาพแวดล้อมด้านอุณหภูมิ-ความชื้น (temperature-humidity) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดผลกระทบแบบ stress coupling ต่อทั้งโครงสร้าง ระบบไฟฟ้า และพฤติกรรมความร้อนของระบบ

ดังนั้น การทดสอบแบบ combined vibration and temperature-humidity จึงถูกนำมาใช้เพื่อจำลองสภาวะ multi-stress condition ในระดับระบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของ battery pack ในการรักษาความสมบูรณ์เชิงโครงสร้าง เสถียรภาพทางไฟฟ้า และความน่าเชื่อถือภายใต้การกระตุ้นร่วมกันของปัจจัยทางกลและสิ่งแวดล้อม

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการทดสอบในมิติของการตอบสนองทางกล (mechanical response) พฤติกรรมอุณหภูมิ-ความชื้น (environmental response) และการตอบสนองทางไฟฟ้าแบบฉับพลัน (transient electrical response) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของระบบในการรองรับ stress coupling และรักษาเสถียรภาพในระดับการใช้งานจริง

เพื่อประเมินการตอบสนองของระบบภายใต้แรงสั่นสะเทือนแบบหลายแกน สัญญาณจากหลาย channel ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาพฤติกรรมของระบบในเชิงเวลาและความเสถียรของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 15

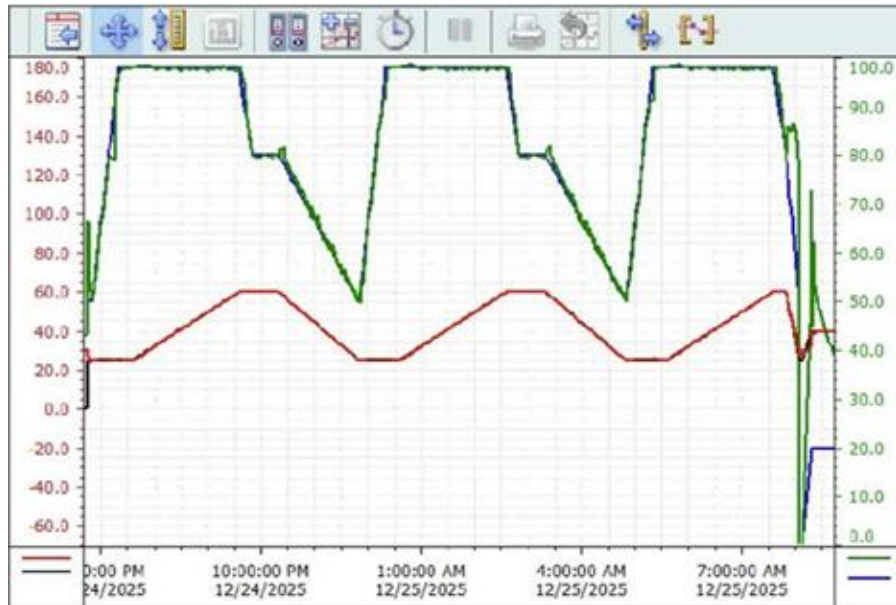


รูปที่ 15 ตัวอย่างการตอบสนองของสัญญาณระหว่างการทดสอบ vibration แบบ multi-channel

จากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการตอบสนองของระบบภายใต้การกระตุ้นด้วยแรงสั่นสะเทือนในหลายช่องสัญญาณ (multi-channel response) โดยค่าการตอบสนองของแต่ละช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของการทดสอบ และมีการเกิด peak ในบางช่วงที่สอดคล้องกับแรงกระตุ้นของระบบ อย่างไรก็ตาม ลักษณะของสัญญาณโดยรวมยังคงมีความต่อเนื่องและไม่พบความผิดปกติที่บ่งชี้ถึงความเสียหายเชิงโครงสร้างอย่างฉับพลัน เช่น การหลุดของจุดยึด การคลายตัวของชุดประกอบ หรือการสูญเสียเสถียรภาพของระบบในระดับที่รุนแรง

ในเชิงวิศวกรรม การตอบสนองของระบบภายใต้แรงสั่นสะเทือนมีความสำคัญต่อการประเมินความแข็งแรงเชิงกลของ battery pack โดยเฉพาะบริเวณ housing, mounting points, cable routing และ connector interface ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มได้รับผลกระทบจาก vibration-induced stress

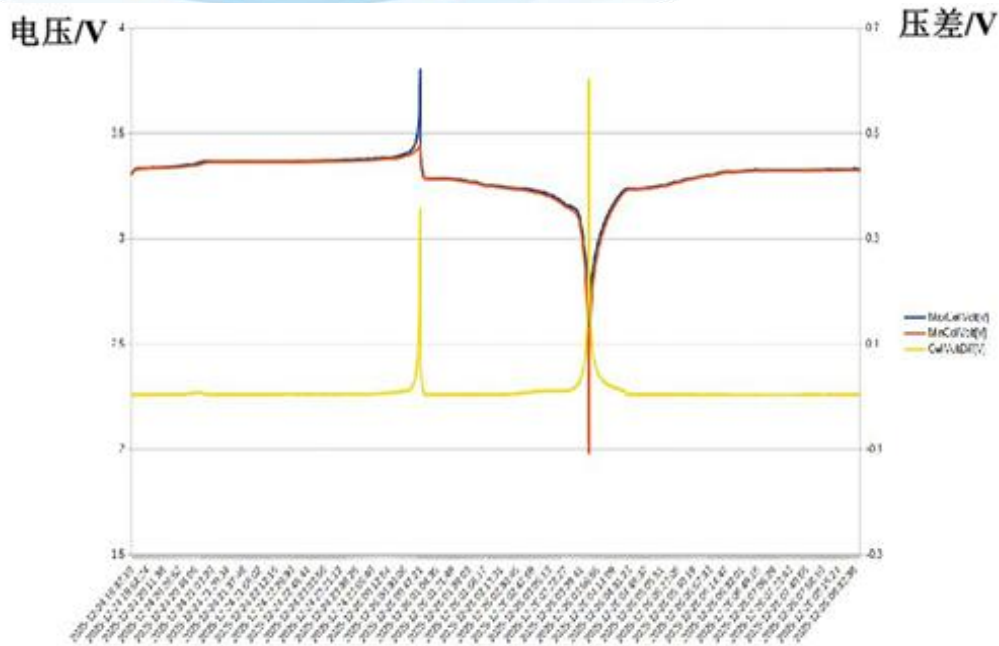
มากที่สุด การที่รูปแบบการตอบสนองยังคงอยู่ในลักษณะที่ควบคุมได้ จึงสะท้อนให้เห็นว่า แพ็กแบตเตอรี่ยังสามารถรองรับ mechanical stress ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้ในระดับระบบ



รูปที่ 16 โปรไฟล์อุณหภูมิและความชื้นระหว่างการทดสอบ temperature-humidity cycling

รูปที่ 16 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพันธ์ภายในห้องทดสอบระหว่างการทำ temperature-humidity cycling โดยพบว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เป็นไปตามรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ ลักษณะของกราฟมีรูปแบบเป็น cycle ซ้ำตามช่วงเวลา ซึ่งใช้เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงที่แพ็กแบตเตอรี่อาจต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่องระหว่างการใช้งานหรือการจอดครในพื้นๆที่มีความร้อนและความชื้นสูง

ผลจากโปรไฟล์ดังกล่าวมีความสำคัญในเชิง reliability เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสามารถส่งผลต่อวัสดุฉนวน การขยายตัวและหดตัวของชิ้นส่วน การเปลี่ยนแปลงของ contact resistance รวมถึงโอกาสในการเกิด moisture-induced degradation ภายในแพ็กแบตเตอรี่ได้ การควบคุม cycle ของ temperature-humidity อย่างเหมาะสมจึงช่วยให้สามารถประเมินความพร้อมของแพ็กแบตเตอรี่ต่อ environmental stress ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 17 ตัวอย่าง transient electrical response ระหว่าง combined test

จากกราฟตัวอย่าง transient electrical response ระหว่าง combined test ในรูปที่ 15 พบว่าระบบมีลักษณะการตอบสนองทางไฟฟ้าแบบ transient ในบางช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์กระตุ้น โดยปรากฏลักษณะ spike ในสัญญาณแรงดันและค่าที่เกี่ยวข้องในบางช่วง อย่างไรก็ตาม หลังจากเหตุการณ์ดังกล่าว ระบบยังสามารถกลับเข้าสู่สถานะเสถียรได้โดยไม่พบสัญญาณที่บ่งชี้ถึงความล้มเหลวร้ายแรงของระบบ

พฤติกรรมลักษณะนี้สะท้อนให้เห็นว่า battery pack มีความไวต่อเหตุการณ์กระตุ้นชั่วขณะในระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้าจริงภายใต้สภาวะการใช้งานที่มีแรงสั่นสะเทือนร่วมกับ environmental stress อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญคือระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพได้หลังจากเกิด transient event โดยไม่เกิด fault state, shutdown หรือ failure ฉับพลัน ซึ่งถือเป็นผลที่ดีในเชิง functional stability และ system robustness

ในมุมมองเชิงวิศวกรรม ข้อมูล transient response ดังกล่าวมีประโยชน์มากกว่าการพิจารณาผลในลักษณะ pass/fail เพียงอย่างเดียว เนื่องจากช่วยให้สามารถมองเห็นพฤติกรรมเชิงพลวัตของ battery pack ระหว่างการทดสอบได้ชัดเจนขึ้น ทั้งในแง่ของการตอบสนองของแรงดัน ความไวต่อ disturbance และความสามารถในการกลับสู่สถานะเสถียรของระบบ

เมื่อพิจารณาผลจากการตอบสนองทางกล โปรไฟล์อุณหภูมิและความชื้น และ transient electrical response ร่วมกัน จะเห็นได้ว่าแพ็คเกจเตอรี่ที่ศึกษา สามารถรักษาความสมบูรณ์ของระบบได้ในระดับที่น่าพอใจภายใต้สภาวะความเค้นหลายปัจจัย โดยไม่พบความผิดปกติที่บ่งชี้ถึง failure ร้ายแรงทั้งในด้านโครงสร้าง การควบคุมสภาพแวดล้อม และเสถียรภาพทางไฟฟ้า

ผลการทดสอบในส่วนนี้มีความสำคัญในเชิงวิศวกรรมต่อการประเมิน reliability และ safety ของแพ็คเกจเตอร์ในระดับระบบ เนื่องจากแสดงให้เห็นว่าแพ็คเกจเตอร์ไม่เพียงแต่ “ผ่านการทดสอบ” ในเชิง qualification เท่านั้น แต่ยังสามารถรักษาพฤติกรรมการทำงานที่มีเสถียรภาพภายใต้สภาวะการใช้งานที่ซับซ้อนและใกล้เคียงกับสภาพจริงได้ในระดับหนึ่ง

ในภาพรวม ผลจาก combined vibration and temperature-humidity test สนับสนุนข้อสรุปว่าแพ็คเกจเตอร์ที่ใช้ในการศึกษามีความพร้อมทั้งในด้านความทนทานเชิงโครงสร้าง ความน่าเชื่อถือด้านสภาพแวดล้อม และความปลอดภัยเชิงหน้าที่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประเมินต่อในด้านสมรรถนะและความปลอดภัยของระบบ

อภิปรายผลและสรุปผล

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการประเมินแพ็คเกจเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในระดับระบบภายใต้สภาวะหลายปัจจัย (multi-stress condition) สามารถให้ข้อมูลเชิงวิศวกรรมที่ลึกกว่าการพิจารณาผลการทดสอบปลายทางเพียงอย่างเดียว โดยแม้ผลการทดสอบตามมาตรฐานจะระบุว่าแพ็คเกจเตอร์ “ผ่านเกณฑ์” ด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลเชิงเวลา พบว่าระบบยังแสดงพฤติกรรมที่สะท้อนความเค้นทางไฟฟ้าและความร้อนภายใต้ภาระการใช้งานจริง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) แรงดัน (Voltage) และอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อ พบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น แรงดันมีแนวโน้มลดลง และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนตามสมการ $P = I^2R$ และความสัมพันธ์ $V = IR$ ที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานภายใน (R_{int}) พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึง electro-thermal coupling ในระบบ และมีผลโดยตรงต่อการออกแบบจุดเชื่อมต่อระบบระบายความร้อน และโครงสร้างรองรับกระแสในระดับแพ็คเกจ

ผลการทดสอบแบบ combined vibration and temperature-humidity แสดงให้เห็นว่าแพ็คเกจเตอร์สามารถรักษาความสมบูรณ์เชิงโครงสร้างและเสถียรภาพทางไฟฟ้าได้ภายใต้สภาวะ stress coupling ระหว่างแรงสั่นสะเทือนและสิ่งแวดล้อม ขณะที่การทดสอบ IPX8 และ electrical function test ไม่พบความผิดปกติที่ส่งผลต่อความปลอดภัย เช่น water ingress, insulation failure หรือ fault state ซึ่งสอดคล้องกับผลสรุปเชิงคุณภาพในตารางที่ 5 ที่แสดงว่าแพ็คเกจเตอร์ยังคงอยู่ในเกณฑ์การยอมรับในทุกการทดสอบหลัก

อย่างไรก็ตาม ในมุมมองเชิงวิศวกรรม ผลการทดสอบดังกล่าวไม่ได้หมายความว่าระบบปราศจากความเค้นสะสม โดยพฤติกรรมที่สังเกตได้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของกลไกการเสื่อมสภาพในระยะยาว ได้แก่

- (1) การเพิ่มขึ้นของ contact resistance จากการสั่นสะเทือนซ้ำ

- (2) การสะสมความร้อนและการเกิด hotspot บริเวณจุดเชื่อมต่อ
- (3) การลดลงของ margin ด้านฉนวนภายใต้ความชื้นและอุณหภูมิ
- (4) ความล้าเชิงโครงสร้างจาก repeated vibration loading ซึ่งอาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบเมื่อใช้งานในระยะยาว

ในด้านพฤติกรรมระยะยาว พบว่าค่าความต้านทานภายใน (R_{int}) และความจุคงเหลือ (capacity retention) ยังไม่แสดงแนวโน้มการเสื่อมสภาพอย่างเด่นชัด โดย capacity retention ยังคงอยู่ที่ใกล้เคียง 100% และ R_{int} ไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงข้อมูลที่ศึกษา ซึ่งสะท้อนว่าแพ็คเกจเตอรี่ยังอยู่ในระยะ early-stage degradation อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของ R_{int} แม้เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลกระทบต่อแรงดันตกคร่อมและการสะสมความร้อนในระบบได้ จึงควรใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการเฝ้าระวัง (health monitoring)

โดยสรุป ผลการศึกษานี้สนับสนุนแนวคิดที่ว่าแพ็คเกจเตอรี่ที่ “ผ่านการทดสอบ” ยังคงอาจมีพฤติกรรมความเค้นสะสมในระดับระบบ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้จาก pass/fail criteria เพียงอย่างเดียว ดังนั้น การประเมินความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของแพ็คเกจเตอรี่ควรพิจารณาร่วมกันระหว่างผลการทดสอบมาตรฐานและพฤติกรรมของตัวแปรเชิงเวลา เช่น Current, Voltage, Temperature และ R_{int} เพื่อให้สามารถระบุความเสี่ยงและแนวโน้มการเสื่อมสภาพได้อย่างครบถ้วนในเชิงวิศวกรรม

ตารางที่ 5 สรุปผลการทดสอบจาก vibration, combined vibration, IPX8 และ electrical function tests

Test item	Main observations	Interpretation
Combined vibration + temperature-humidity	Cell voltage jump, temperature anomaly, HVIL abnormality, structural damage	ไม่พบความผิดปกติที่เกินเกณฑ์การยอมรับ
IPX8 immersion	Water ingress, leakage, cracking, insulation decline	ไม่พบ water ingress; insulation หลังทดสอบอยู่ในเกณฑ์
Electrical function test	Insulation, withstand voltage, equipotential, Y-capacitance	ผ่านเกณฑ์ทุกหัวข้อ
Simulated speed-bump vibration	Fault code, fire, explosion, leakage, insulation	ระบบยังทำงานปกติและผ่านเกณฑ์

คำอธิบายตารางที่ 5 สรุปผลการทดสอบเชิงคุณภาพจากการทดสอบจริง โดยครอบคลุมการประเมินในหลายมิติ ได้แก่ แรงสั่นสะเทือน สภาพแวดล้อม การป้องกันน้ำ และสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของแพ็คเกจเตอรี่ในระดับระบบ

ผลจากตารางแสดงให้เห็นว่าแม้ไม่พบความผิดปกติที่เกินเกณฑ์การยอมรับในการทดสอบแต่ละประเภท แต่ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ประกอบการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมร่วมกับข้อมูลเชิงเวลา เพื่อประเมินพฤติกรรมของระบบในมุมมองที่ลึกกว่าการพิจารณาแบบ pass/fail เพียงอย่างเดียว

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยนี้ ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรมที่สำคัญคือ ควรให้ความสำคัญกับการเฝ้าติดตามอุณหภูมิบริเวณขั้วต่อไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายใต้ภาระกระแสไฟฟ้าสูง เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้แนวโน้มของความเค้นสะสมในระดับระบบได้ นอกจากนี้ ควรให้ความสำคัญกับการออกแบบและตรวจสอบจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า ระบบซีล และระบบฉนวนของแบตเตอรี่แพ็คเกจ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือน ความชื้น และการสัมผัสน้ำร่วมกัน

สำหรับข้อเสนอแนะด้านการวิจัยในอนาคต ควรขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่การทดสอบอายุการใช้งานระยะยาว เช่น cycle life test และ calendar aging เพื่อยืนยันแนวโน้มการเสื่อมสภาพที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเวลาในงานนี้ ควรมีการวิเคราะห์ในระดับ module หรือ cell เพิ่มเติม เพื่อเชื่อมโยงผลในระดับแพ็คเกจกับกลไกภายในของเซลล์ และควรมีการศึกษาเชิง post-mortem analysis หลังการทดสอบหลายสถานะ เพื่อระบุสาเหตุการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนหรือโครงสร้างภายในได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ในระยะต่อไป การนำเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูงหรือแบบจำลองทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยประเมินพฤติกรรมแบบหลายตัวแปรก็จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการพยากรณ์ความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่แพ็คเกจได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปริดา จันทวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และให้แนวทางทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท STI Environmental Reliability Laboratory Co., Ltd. และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่
กรุณาอนุเคราะห์ข้อมูล เอกสาร รายงานการทดสอบ และการสนับสนุนในด้านเทคนิค ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อ
การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1–R25.
<https://doi.org/10.1149/1.3515880>
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246–267.
<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC 62660-1: Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—Part 1: Performance testing*.
<https://webstore.iec.ch/en/publication/28965>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 60068-2-64: Environmental testing—Part 2-64: Tests—Test Fh: Vibration, broadband random and guidance*.
<https://webstore.iec.ch/en/publication/65892>
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377–382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)
- STI Environmental Reliability Laboratory Co., Ltd. (2025). *Battery pack safety and reliability test report (combined vibration, IPX8, electrical test)* [Internal laboratory report].
- STI Environmental Reliability Laboratory Co., Ltd. (2026a). *Operational dataset 041 for EV battery pack analysis* [Unpublished internal dataset].
- STI Environmental Reliability Laboratory Co., Ltd. (2026b). *Operational dataset 042 for EV battery pack analysis* [Unpublished internal dataset].