การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย

นายธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย

นายธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2569

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย

โดย นายธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุนนาค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชัยยศ ดำรงกิจโกศล)

ชื่อ : นายธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย
สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์
ปีการศึกษา : 2569

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของยานยนต์ไฟฟ้า การประเมินความทนทานของแบตเตอรี่จึงจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในบริบทของประเทศไทย โดยวิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐานร่วมกับข้อมูลด้านการขนส่ง สภาพถนน สภาพภูมิอากาศ และเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างมาตรฐานกับสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทย

ผลการศึกษาพบว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีหลักการและแนวทางการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบควรพิจารณาข้อมูลสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานในประเทศไทยร่วมด้วย เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม การศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้ผลิต ห้องปฏิบัติการทดสอบ และนักวิจัยในการประยุกต์ใช้มาตรฐานเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์

(มีจำนวนทั้งสิ้น 157 หน้า)

คำสำคัญ : IEC 60068-2-64 การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การประเมินมาตรฐาน ประเทศไทย

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Thanpisit Prasatsuwan

Thesis Title : Suitability Assessment of IEC 60068-2-64 for Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries under the Thai Operational Context

Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Dusit Ngamrungroj

Co-Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong

Academic Year : 2026

ABSTRACT

The electric vehicle (EV) industry has experienced continuous growth, making lithium-ion batteries a critical component for the performance, reliability, and safety of electric vehicles. Therefore, evaluating battery durability through environmental testing has become increasingly important, particularly random vibration testing based on IEC 60068-2-64, an internationally recognized standard for Broadband Random Vibration testing.

This study aims to evaluate the suitability of applying IEC 60068-2-64 for electric vehicle battery testing in the context of Thailand. The study analyzes the requirements of the standard together with transportation conditions, road characteristics, climatic conditions, and relevant academic literature to assess the consistency between the standard and actual operating conditions in Thailand.

The results indicate that IEC 60068-2-64 provides an appropriate framework for evaluating the durability of electric vehicle batteries. However, the selection of test parameters should also consider Thailand's environmental conditions and operating characteristics to ensure that the test conditions accurately represent real-world applications. The findings of this study can serve as a reference for manufacturers, testing laboratories, and researchers in applying the standard appropriately, thereby improving the reliability of test results and enhancing product safety.

(Total 157 Pages)

Keywords: IEC 60068-2-64 Broadband Random Vibration Electric Vehicle Battery Standard Assessment Thailand

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง "การประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในบริบทของประเทศไทย" สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายภาคส่วนที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านองค์ความรู้ คำแนะนำ และโอกาสในการศึกษาค้นคว้า ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาถ่ายทอดองค์ความรู้ ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นอันทรงคุณค่า ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยในทุกขั้นตอน ส่งผลให้ผู้วิจัยสามารถพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์และเป็นไปตามหลักวิชาการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตร ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยสามารถนำองค์ความรู้มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ STI Environmental Reliability Laboratory Co., Ltd. ที่ให้โอกาสในการศึกษาข้อมูล สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์และประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

เหนือสิ่งอื่นใด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญสนับสนุนทั้งด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนร่วมงานและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ท้ายที่สุด หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการหรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนางานด้านการทดสอบความทนทานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ผู้วิจัยขออุทิศคุณประโยชน์ดังกล่าวแก่คณาจารย์ ผู้มีพระคุณ และผู้มีส่วนสนับสนุนทุกท่าน ส่วนข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

ธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... **ข**

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... **ค**

กิตติกรรมประกาศ ..... **จ**

สารบัญตาราง ..... **ซ**

สารบัญรูปภาพ ..... **ญ**

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 ปัญหาและที่มาของปัญหาวิจัย 7

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 10

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 11

1.5 ขอบเขตตัวแปรในการวิจัย 12

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 14

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ 15

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **17**

2.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 18

2.2 หลักการของการสั่นสะเทือน (Vibration Theory) 25

2.3 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 32

2.4 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 57

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related Research) 74

2.6 การวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) 77

2.7 กรอบแนวคิดของการวิจัย (Conceptual Framework) 80

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย **83**

3.2 กรอบการดำเนินงานวิจัย (Research Framework) 85

3.3 แหล่งข้อมูลและการรวบรวมข้อมูล (Data Sources and Data Collection) 87

3.4 การทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ (Experimental Procedure) 90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (Research Instruments and Equipment) 93
3.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) 96
3.7 การพัฒนาเกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน (Development of Suitability Assessment Criteria) 99
3.8 สรุประเบียบวิธีวิจัย 101

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 103

4.1 ผลการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64 103
4.2 ผลการวิเคราะห์บริบทของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 106
4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 109
4.4 ผลการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย 112
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ 115

บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 117

5.1 สรุปผลการวิจัย 117
5.2 อภิปรายผลการวิจัย 120
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 122
5.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย 124
5.5 สรุปข้อจำกัดของงานวิจัย 125

บรรณานุกรม 126

ภาคผนวก ก รายละเอียดพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 128

ภาคผนวก ข รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 139

ภาคผนวก ค ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 146

ภาคผนวก ง ผลการทดสอบและข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ 153

ประวัติผู้เขียน 157

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า 20

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า 22

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบลักษณะของการสั่นสะเทือน 27

ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อจำกัดของการสั่นสะเทือนแบบไซน์ 29

ตารางที่ 2-5 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนแบบไซน์และการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม 32

ตารางที่ 2-6 วัตถุประสงค์หลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 35

ตารางที่ 2-7 ขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 39

ตารางที่ 2-8 พารามิเตอร์สำคัญของการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 43

ตารางที่ 2-9 ขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 47

ตารางที่ 2-10 ข้อดีของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 49

ตารางที่ 2-11 การวิเคราะห์จุดแข็งและข้อจำกัดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 52

ตารางที่ 2-12 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยที่อาจส่งผลต่อการสั่นสะเทือน ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 59

ตารางที่ 2-13 วิธีการตรวจวัดค่า IRI ที่ใช้ในงานวิศวกรรมทางหลวง 62

ตารางที่ 2-14 เกณฑ์การประเมินความเรียบของผิวทางตามค่า IRI 62

ตารางที่ 2-15 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทย 65

ตารางที่ 2-16 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีปริมาณฝนสูงและต่ำของประเทศไทย 67

ตารางที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมกับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ 70

ตารางที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยกับพารามิเตอร์ การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 73

ตารางที่ 2-19 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 76

ตารางที่ 2-20 การเปรียบเทียบองค์ความรู้เดิมกับขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้ 80

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 3-1 สรุปกรอบการดำเนินงานวิจัย 86

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลปฐมภูมิที่ใช้ในการวิจัย 88

ตารางที่ 3-3 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิที่ใช้ในการวิจัย 89

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์การทดสอบการสั่นสะเทือน 91

ตารางที่ 3-5 ลำดับขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ 92

ตารางที่ 3-6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือน 93

ตารางที่ 3-7 เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบและบันทึกข้อมูล 94

ตารางที่ 3-8 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย 95

ตารางที่ 3-9 มาตรฐานและเอกสารอ้างอิงที่ใช้ในการวิจัย 95

ตารางที่ 3-10 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละขั้นตอน 98

ตารางที่ 3-11 เกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 100

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์สำคัญของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัย 104

ตารางที่ 4-2 การวิเคราะห์ผลกระทบของคุณภาพผิวทางต่อการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบ 106

ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบจริง 109

ตารางที่ 4-4 ผลการตรวจสอบชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ 111

ตารางที่ 4-5 การประเมินความสอดคล้องของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับบริบทของประเทศไทย 113

ตารางที่ 4-6 สรุปผลการประเมินมาตรฐาน IEC 60068-2-64 114

ตารางที่ 5-1 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย 119

ตารางที่ 5-2 การอภิปรายผลการวิจัยเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา 122

ตารางที่ 5-3 สรุปข้อจำกัดของงานวิจัย 125

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 แนวโน้มและทิศทางนโยบายสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย.... 1
ภาพที่ 1-2 โครงสร้างพื้นฐานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าและตำแหน่ง..... 2
ภาพที่ 1-3 ตัวอย่างแนวคิด Power Spectral Density สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน 3
ภาพที่ 1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของถนน การสั่นสะเทือนของยานพาหนะ 4
ภาพที่ 1-5 ปริมาณฝนเฉลี่ยของประเทศไทยซึ่งเป็นปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า 5
ภาพที่ 1-6 กรอบแนวคิดการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64..... 6
ภาพที่ 1-7 ขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และองค์ประกอบหลัก..... 7
ภาพที่ 1-8 ตัวอย่างระดับความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) 8
ภาพที่ 1-9 การกระจายตัวของปริมาณฝนเฉลี่ยในประเทศไทย ซึ่งอาจส่งผลต่อสภาพถนน..... 9
ภาพที่ 2-1 นโยบายการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย..... 19
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างพื้นฐานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า 21
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แพ็กสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าและองค์ประกอบหลัก..... 23
ภาพที่ 2-4 การถ่ายทอดแรงสั่นสะเทือนจากผิวทางสู่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 24
ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของระบบการสั่นสะเทือน 26
ภาพที่ 2-6 การเปรียบเทียบการตอบสนองของระบบในสภาวะปกติและเมื่อเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) 27
ภาพที่ 2-7 ลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration)..... 29
ภาพที่ 2-8 การเปรียบเทียบลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบไซน์และการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม ... 30
ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างกราฟ Power Spectral Density (PSD) สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม 31
ภาพที่ 2-10 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งกำหนดแนวทางการทดสอบการสั่นสะเทือน..... 33
ภาพที่ 2-11 แนวคิดการพัฒนาโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 34
ภาพที่ 2-12 ขอบเขตและองค์ประกอบหลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64..... 36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2-13 ขั้นตอนการพัฒนาโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 37
ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างช่วงความถี่ของแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่พบในระบบยานยนต์ 40
ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างโปรไฟล์ Power Spectral Density (PSD) 41
ภาพที่ 2-16 แกนการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 42
ภาพที่ 2-17 ขั้นตอนการสร้างโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับการทดสอบ 45
ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างการติดตั้ง Battery Pack บนเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน 46
ภาพที่ 2-19 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 50
ภาพที่ 2-20 กรอบแนวคิดการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 54
ภาพที่ 2-21 โครงข่ายทางหลวงของประเทศไทย 58
ภาพที่ 2-22 หลักการของดัชนีความเรียบขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI) 61
ภาพที่ 2-23 สัดส่วนระยะทางโครงข่ายทางหลวงตามระดับค่า IRI 63
ภาพที่ 2-24 ลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยและการแบ่งฤดูกาล 64
ภาพที่ 2-25 การกระจายตัวของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (Rainfall Distribution Map) 66
ภาพที่ 2-26 ตัวอย่างความเสียหายของผิวทางที่เกิดจากน้ำฝนและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง 68
ภาพที่ 2-27 กลไกการถ่ายทอดผลกระทบจากฝนและการเสื่อมสภาพของผิวทางสู่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า 69
ภาพที่ 2-28 กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย 72
ภาพที่ 2-29 ช่องว่างขององค์ความรู้ (Research Gap) ที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษา 79
ภาพที่ 2-30 กรอบแนวคิดของการวิจัยสำหรับการประเมินความเหมาะสม 81
ภาพที่ 3-1 รูปแบบการวิจัยและกระบวนการดำเนินงานวิจัย 84
ภาพที่ 3-2 กรอบการดำเนินงานวิจัยสำหรับการประเมินความเหมาะสม 86

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย 90
ภาพที่ 3-4 การติดตั้งแบตเตอรี่และอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน 92
ภาพที่ 3-5 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการวิจัย 94
ภาพที่ 3-6 กรอบการวิเคราะห์ข้อมูลแบบบูรณาการของงานวิจัย 98
ภาพที่ 3-7 กรอบการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่ใช้ในการวิจัย 100
ภาพที่ 3-8 ภาพรวมกระบวนการดำเนินงานวิจัย 102
ภาพที่ 4-1 กรอบการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่ใช้ในการวิจัย 105
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของประเทศไทยกับการเลือกพารามิเตอร์ 108
ภาพที่ 4-3 การดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่
ตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 110

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บทที่ 1
บทนำ

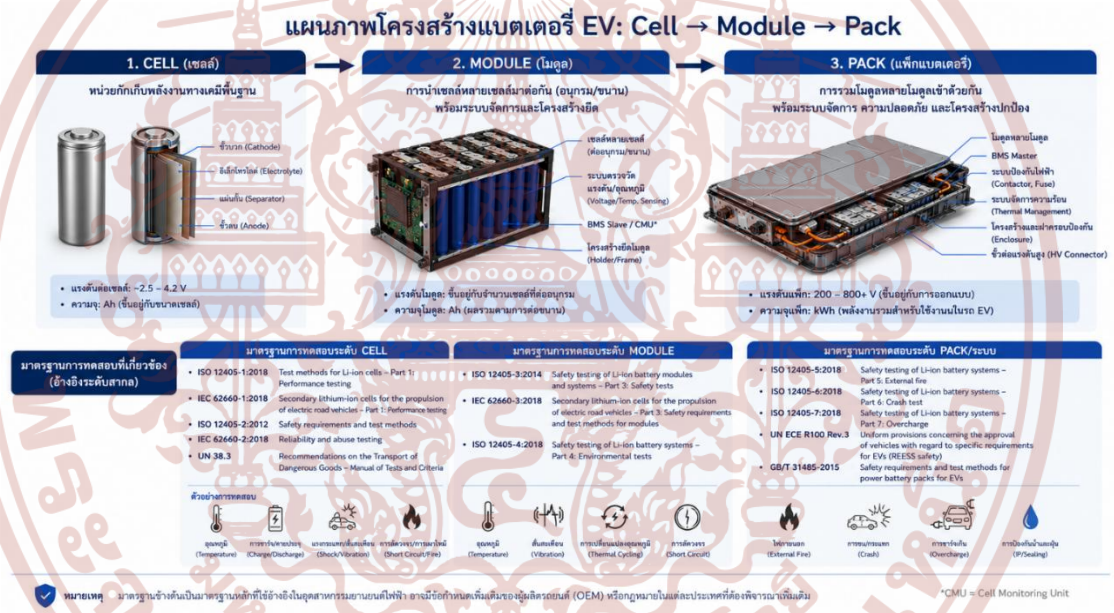
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยทำให้ระบบแบตเตอรี่กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องได้รับการประเมินด้านความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และความทนทานต่อสภาพการใช้งานจริงอย่างรอบด้าน ภาครัฐไทยมีนโยบายสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยมาตรการ EV 3.5 ครอบคลุมช่วง พ.ศ. 2567–2570 เพื่อสนับสนุนการเติบโตของอุตสาหกรรม EV และดึงดูดการลงทุนในระบบนิเวศการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศ นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีเป้าหมายระยะยาวในการผลักดันให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีสัดส่วนร้อยละ 30 ของการผลิตรถยนต์ทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแบตเตอรี่และชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้าจะมีบทบาทสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมไทยมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1-1 แนวโน้มและทิศทางนโยบายสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย

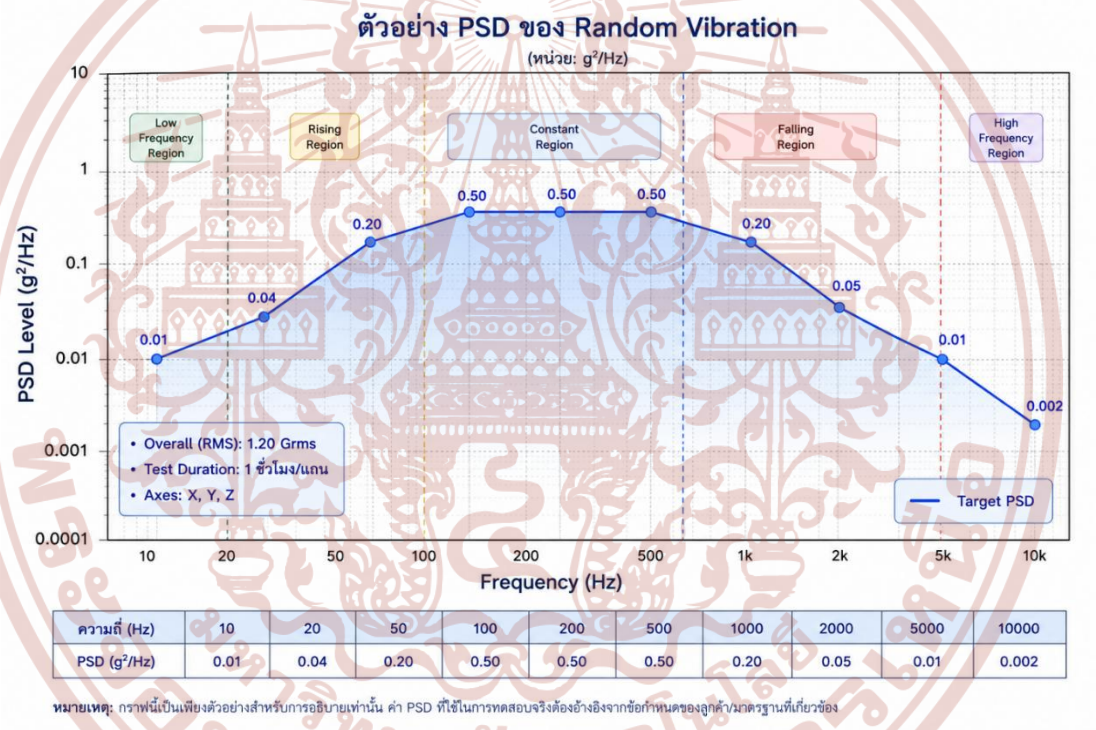
เมื่ออุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าขยายตัว การทดสอบความทนทานของแบตเตอรี่จึงไม่ได้เป็นเพียงขั้นตอนด้านคุณภาพเท่านั้น แต่เป็นกระบวนการสำคัญในการลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องรับแรงทางกลตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การขนส่ง การติดตั้ง การใช้งานบนถนนจริง ไปจนถึงการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสามารถก่อให้เกิดความล้าของวัสดุ การคลายตัวของจุดยึด การแตกร้าวของโครงสร้าง การเสียหายของจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า หรือการเสื่อมสภาพของระบบป้องกันภายในแบตเตอรี่ได้ หากการออกแบบและการทดสอบไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริง ความเสียหายดังกล่าวอาจส่งผลต่อสมรรถนะ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยของระบบแบตเตอรี่ในระยะยาว



ภาพที่ 1-2 โครงสร้างพื้นฐานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าและตำแหน่งที่อาจได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีลักษณะซับซ้อนมากกว่าการสั่นสะเทือนแบบความถี่เดียว เนื่องจากการใช้งานจริงบนท้องถนนประกอบด้วยแรงกระตุ้นหลายแหล่ง เช่น ความขรุขระของผิวทาง รอยต่อถนน หลุมบ่อ ความเร็วรถ น้ำหนักบรรทุก ระบบกันสะเทือน และตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ ลักษณะดังกล่าวทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงมักอยู่ในรูปของการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม หรือ Random Vibration มากกว่าการสั่นแบบไซน์ที่มีความถี่แน่นอน ดังนั้น การใช้มาตรฐานที่สามารถจำลองการสั่นสะเทือนแบบสุ่มได้อย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่

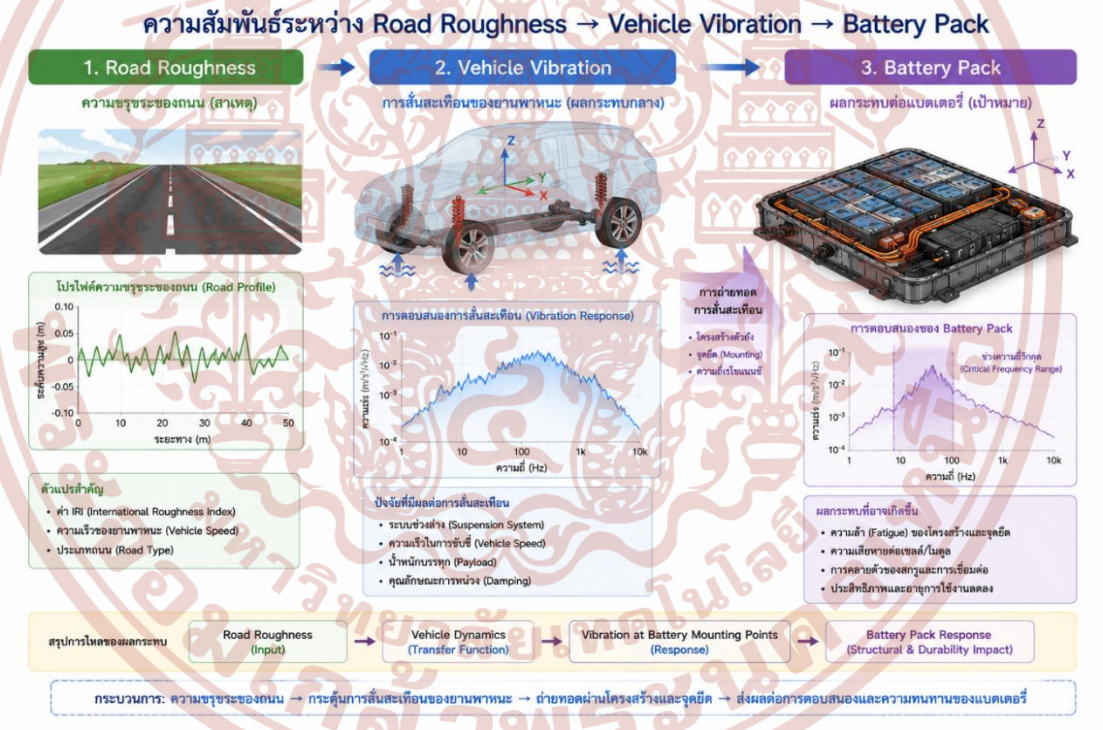
มาตรฐาน IEC 60068-2-64 Environmental Testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, Broadband Random and Guidance เป็นมาตรฐานสากลที่ใช้สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มย่านความถี่กว้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าชิ้นงานสามารถทนต่อแรงสั่นสะเทือนแบบสุ่มได้โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายที่ยอมรับไม่ได้ต่อสมรรถนะและความสมบูรณ์ของโครงสร้าง มาตรฐานนี้ใช้แนวคิดของ Power Spectral Density หรือ PSD เพื่อกำหนดระดับพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ และเหมาะสำหรับการประเมินผลกระทบจากความเค้นสะสม ความอ่อนแอทางกล และการเสื่อมสภาพของชิ้นงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนต่อเนื่อง



ภาพที่ 1-3 ตัวอย่างแนวคิด Power Spectral Density สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

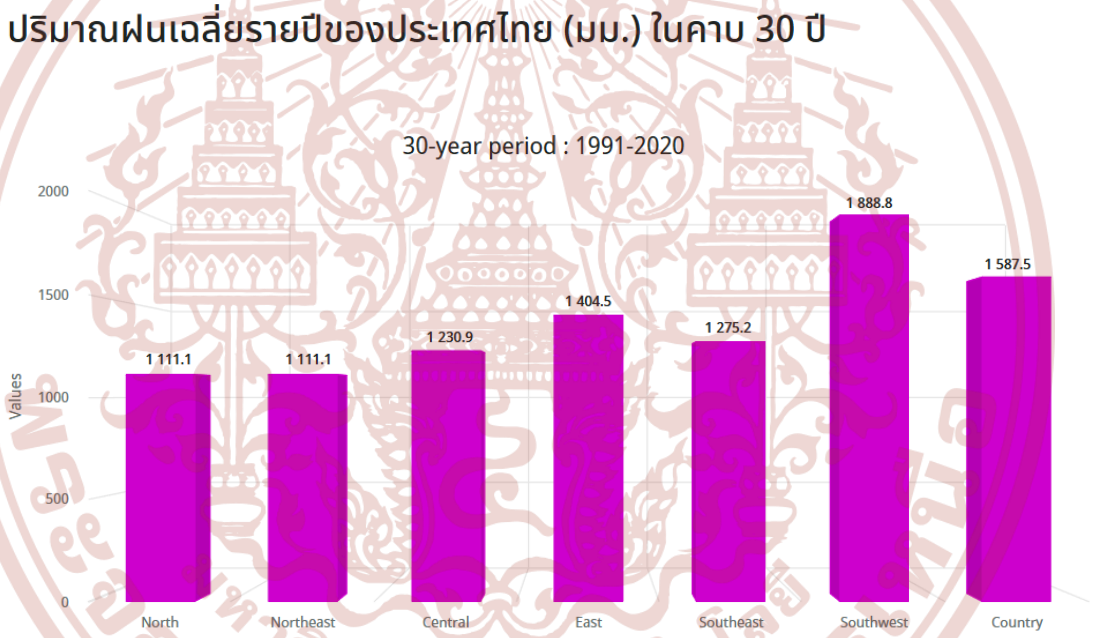
อย่างไรก็ตาม แม้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะเป็นมาตรฐานสากลที่มีความน่าเชื่อถือ แต่การนำมาตรฐานมาใช้โดยตรงโดยไม่พิจารณาสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงของประเทศไทยอาจทำให้ผลการทดสอบไม่สะท้อนความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวเป็นกรอบวิธีการทดสอบ มิใช่โปรไฟล์การสั่นสะเทือนเฉพาะสำหรับทุกประเทศหรือทุกสภาพการใช้งาน ผู้ใช้งานมาตรฐานจึงต้องกำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เส้นทางการใช้งาน สภาพถนน และระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริง

ในบริบทของประเทศไทย ปัจจัยด้านถนนและการขนส่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาร่วมกับการทดสอบการสั่นสะเทือน เนื่องจากประเทศไทยมีลักษณะถนนที่หลากหลาย ทั้งถนนทางหลวง ถนนในเมือง ถนนต่างจังหวัด ถนนอุตสาหกรรม และถนนที่มีสภาพชำรุดหรือมีความขรุขระแตกต่างกัน ดัชนี International Roughness Index หรือ IRI ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความขรุขระของผิวทางและเป็นเครื่องมือสำหรับประเมินสภาพการให้บริการของถนน โดยข้อมูลจากงานวิจัยในประเทศไทยระบุว่า กรมทางหลวงใช้ IRI เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการบำรุงรักษาทางหลวง และโดยทั่วไปมีการวัดด้วยเครื่องมือ เช่น Laser Profiler และ Walking Profiler ความขรุขระของถนนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านจากล้อและโครงสร้างรถเข้าสู่ตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ ดังนั้น หากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่คำนึงถึงข้อมูลสภาพถนนจริง อาจทำให้ระดับการทดสอบต่ำหรือสูงกว่าสภาพการใช้งานจริงได้



ภาพที่ 1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของถนน การสั่นสะเทือนของยานพาหนะและผลกระทบต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

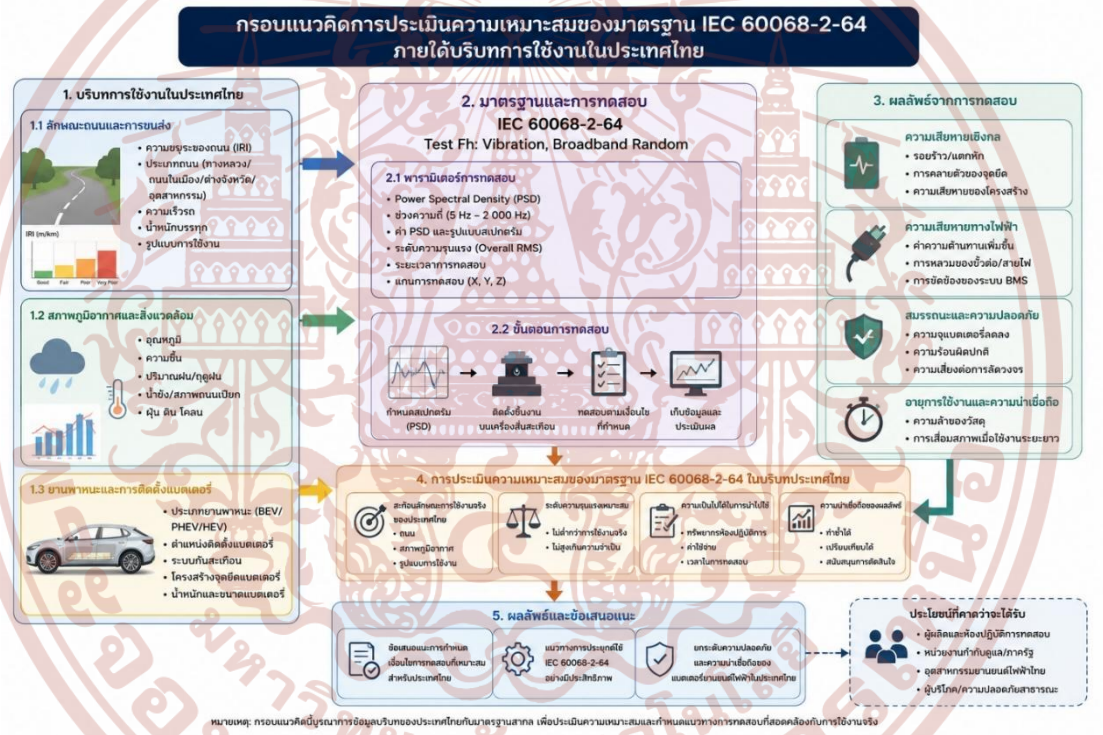
นอกจากปัจจัยด้านถนนแล้ว สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยยังเป็นปัจจัยสนับสนุนที่ทำให้การประเมินมาตรฐานการทดสอบควรพิจารณาอย่างรอบด้าน ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและมีฝนตกตามฤดูกาล โดยกรมอุตุนิยมวิทยามีข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของประเทศไทยสำหรับใช้ในการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ ของปี ฝนตกหนักอาจส่งผลให้ผิวทางเปียกเกิดน้ำขัง หรือทำให้ถนนบางพื้นที่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น ซึ่งอาจเพิ่มแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนระหว่างการใช้งานจริง นอกจากนี้ ข้อมูลสรุปสภาพอากาศรายเดือนของกรมอุตุนิยมวิทยายังแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยยังคงมีเหตุการณ์ฝนตกหนัก น้ำท่วมฉับพลัน และดินถล่มในบางช่วงฤดูฝน ซึ่งเป็นปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานยานพาหนะและอุปกรณ์ไฟฟ้าในภาคสนาม



ภาพที่ 1-5 ปริมาณฝนเฉลี่ยของประเทศไทยซึ่งเป็นปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า

จากปัจจัยดังกล่าว การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับประเทศไทยจึงไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการพิจารณาว่ามาตรฐานสามารถทดสอบการสั่นสะเทือนได้หรือไม่ แต่ควรพิจารณาว่าเงื่อนไขการทดสอบที่เลือกใช้สามารถสะท้อนลักษณะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้มากน้อยเพียงใด โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาร่วมกับความขรุขระของถนน รูปแบบการขนส่งทางบก ความเร็วรถ น้ำหนักบรรทุก ตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ สภาพฝน ความชื้น และความเสี่ยงจากน้ำขังหรือสภาพถนนเสื่อมสภาพ การวิเคราะห์เหล่านี้จะช่วยลดช่องว่างระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการใช้งานจริง และทำให้การเลือกเงื่อนไขการทดสอบมีเหตุผลทางวิศวกรรมมากขึ้น

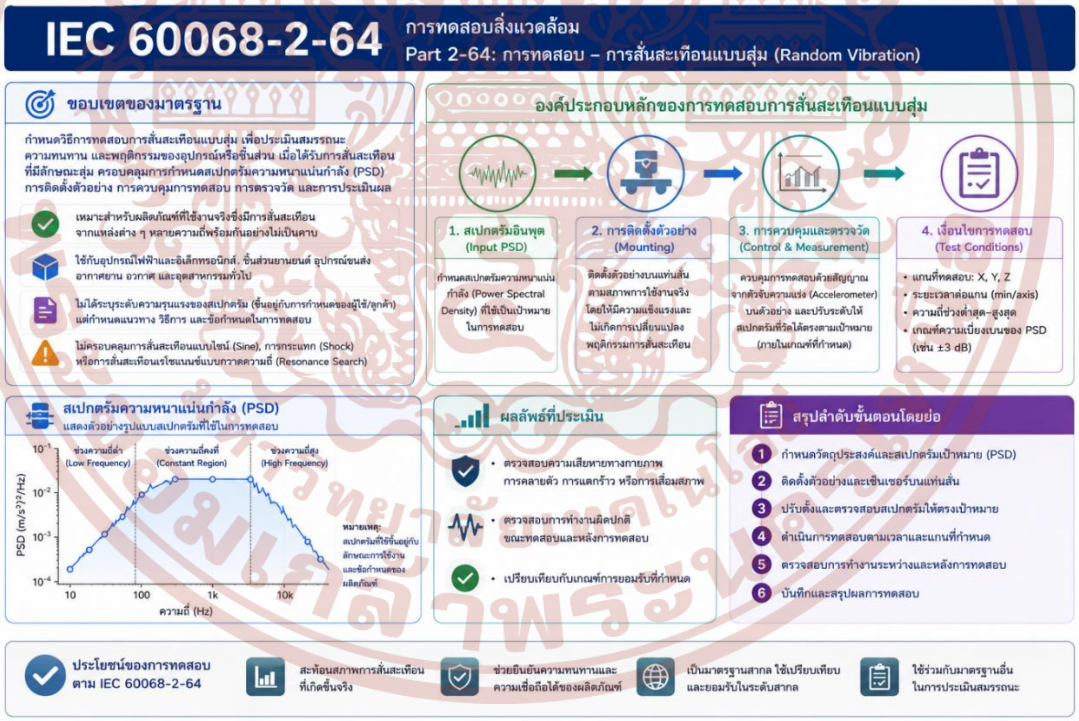
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในฐานะการเชื่อมโยงระหว่างมาตรฐานสากลกับบริบทการใช้งานจริงของประเทศไทย โดยมุ่งศึกษาว่า IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมต่อการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าเพียงใด และควรประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลท้องถิ่นประเภทใดเพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ผลจากการศึกษานี้สามารถสนับสนุนผู้ผลิต ห้องปฏิบัติการทดสอบ นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสม ลดความเสี่ยงจากการประเมินต่ำกว่าสภาพการใช้งานจริง และส่งเสริมความปลอดภัยของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย



ภาพที่ 1-6 กรอบแนวคิดการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย

1.2 ปัญหาและที่มาของปัญหาวิจัย

การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Testing) เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ประเมินความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทนต่อสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง และการใช้งานจริง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และแรงกระแทกอย่างต่อเนื่อง มาตรฐาน IEC 60068-2-64 Environmental Testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, Broadband Random and Guidance ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) และถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบของผู้ผลิตและหน่วยงานรับรองมาตรฐานทั่วโลก อย่างไรก็ตาม มาตรฐานดังกล่าวกำหนดหลักการ วิธีการทดสอบ และแนวทางการเลือกเงื่อนไขการทดสอบ โดยมิได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เหมาะสมสำหรับทุกผลิตภัณฑ์หรือทุกประเทศ ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท



ภาพที่ 1-7 ขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และองค์ประกอบหลักของการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม

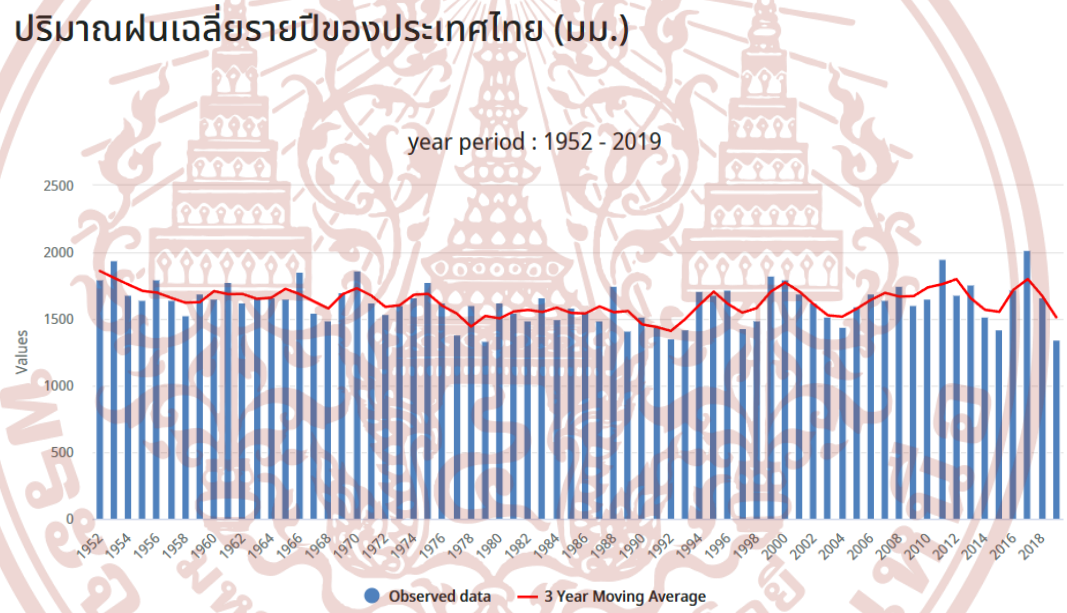
แม้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย แต่การประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าวกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ายังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากลักษณะการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ประเภทยานพาหนะ ระบบกันสะเทือน น้ำหนักบรรทุก ความเร็วในการเดินทาง ตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ และสภาพผิวทางที่ใช้งานจริง ส่งผลให้โปรไฟล์การสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ในแต่ละประเทศอาจมีความแตกต่างกัน แม้ว่าจะใช้มาตรฐานเดียวกันในการทดสอบก็ตาม ดังนั้น การเลือกค่าพารามิเตอร์ เช่น ช่วงความถี่ (Frequency Range) ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน (PSD Level หรือ Overall RMS) และระยะเวลาการทดสอบ จึงควรอาศัยข้อมูลภาคสนามประกอบการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ มากกว่าการอ้างอิงค่าทั่วไปเพียงอย่างเดียว

สำหรับประเทศไทย การขนส่งทางบกยังคงเป็นรูปแบบหลักของการขนส่งสินค้าและชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ส่งผลให้แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากสภาพถนนเป็นระยะเวลานาน ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับคุณภาพผิวทาง ซึ่งสามารถประเมินได้จากค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI) ที่ใช้ในการประเมินสภาพผิวทางของกรมทางหลวง นอกจากนี้ ประเทศไทยยังมีถนนหลายประเภท ทั้งทางหลวง ถนนในเมือง ถนนอุตสาหกรรม และถนนในพื้นที่ชนบท ซึ่งมีระดับความขรุขระแตกต่างกัน ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ระหว่างการใช้งานจริงมีความแตกต่างกันตามลักษณะของเส้นทางและสภาพการเดินรถ



ภาพที่ 1-8 ตัวอย่างระดับความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) และผลต่อการเกิดแรงสั่นสะเทือนของยานพาหนะ

นอกจากสภาพถนนแล้ว ประเทศไทยยังมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและมีฝนตกตามฤดูกาล ซึ่งส่งผลให้สภาพผิวทางเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่อาจเกิดน้ำขัง หลุมบ่อ หรือความเสียหายของผิวทางจากการใช้งานต่อเนื่อง ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการเผยแพร่ข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนและรายปีอย่างต่อเนื่อง ขณะที่หน่วยงานด้านทรัพยากรน้ำของประเทศได้พัฒนาฐานข้อมูลสถานการณ์น้ำเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และบริหารจัดการน้ำในระดับประเทศ แม้ว่าปัจจัยดังกล่าวจะมีผลต่อสภาพการใช้งานของยานพาหนะและการเกิดแรงสั่นสะเทือนในภาคสนาม แต่ยังพบงานวิจัยที่เชื่อมโยงข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศและโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไทยเข้ากับการเลือกเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ค่อนข้างจำกัด



ภาพที่ 1-9 การกระจายตัวของปริมาณฝนเฉลี่ยในประเทศไทย ซึ่งอาจส่งผลต่อสภาพถนนและแรงสั่นสะเทือนระหว่างการใช้งานจริง

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาแบตเตอรี่ การออกแบบโครงสร้าง และการประเมินผลตามมาตรฐานสากล แต่ยังมีการศึกษาจำนวนไม่มากที่วิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยเฉพาะการเชื่อมโยงข้อมูลด้านสภาพถนน ความขรุขระของผิวทาง การขนส่ง สภาพภูมิอากาศ และข้อมูลภาคสนามเข้ากับการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ช่องว่างดังกล่าวอาจทำให้การเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนอาศัยข้อมูลจากต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งอาจไม่สะท้อนลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลด้านโครงสร้างพื้นฐาน การขนส่ง และสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อกำหนดของมาตรฐานสามารถตอบสนองต่อสภาพการใช้งานจริงได้เพียงใด รวมทั้งเสนอแนวทางสำหรับการเลือกเงื่อนไขการทดสอบที่มีความเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย อันจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ และสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศในระยะยาว

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะ ดังต่อไปนี้

1.3.1 เพื่อศึกษาหลักการ แนวคิด และข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) สำหรับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

1.3.2 เพื่อศึกษาปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและสภาพการใช้งานของประเทศไทยที่อาจส่งผลต่อการเกิดการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ สภาพถนน ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่งทางบก สภาพภูมิอากาศ ปริมาณฝน และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง

1.3.3 เพื่อทบทวนและวิเคราะห์งานวิจัย เอกสารวิชาการ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเปรียบเทียบแนวทางการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

1.3.4 เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานจริง

1.3.5 เพื่อเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ให้มีความเหมาะสมกับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย และเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับผู้ผลิต ห้องปฏิบัติการทดสอบ และนักวิจัยในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษา ดังต่อไปนี้

1.4.1 ขอบเขตด้านมาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษามาตรฐาน IEC 60068-2-64 Environmental Testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, Broadband Random and Guidance ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) โดยศึกษาหลักการ แนวคิด ข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และแนวทางการเลือกเงื่อนไขการทดสอบที่ระบุไว้ภายในมาตรฐาน ทั้งนี้ การศึกษาจะมุ่งเน้นเฉพาะเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า และไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมฉบับอื่น เว้นแต่จะนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบหรือสนับสนุนการอภิปรายผล

1.4.2 ขอบเขตด้านผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับ แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Battery) ในระดับ Battery Pack ซึ่งเป็นระดับที่ติดตั้งใช้งานจริงภายในยานยนต์ โดยไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์เชิงลึกในระดับวัสดุของเซลล์แบตเตอรี่ การออกแบบทางเคมีของแบตเตอรี่ หรือการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าภายในระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS)

1.4.3 ขอบเขตด้านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1.4.3.1 ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

1.4.3.2 งานวิจัย บทความวิชาการ และเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

1.4.3.3 ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เช่น สภาพถนน ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ปริมาณฝน สภาพภูมิอากาศ และข้อมูลด้านการขนส่งจากหน่วยงานภาครัฐและแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

1.4.3.4 ข้อมูลที่เผยแพร่ในช่วงประมาณ 5 ปีล่าสุด เป็นหลัก เพื่อให้การวิเคราะห์สะท้อนสภาพการณ์ปัจจุบัน โดยในกรณีของมาตรฐานสากลหรือเอกสารอ้างอิงพื้นฐาน จะอ้างอิงฉบับล่าสุดที่มีผลบังคับใช้

1.4.4 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์ (Analytical Study) โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานของประเทศไทย เพื่อประเมิน

ความเหมาะสมของการนำมาตรฐานมาใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การศึกษาจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ความขรุขระของถนน รูปแบบการขนส่ง สภาพภูมิอากาศ และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจส่งผลต่อการเกิดการสั่นสะเทือนในสภาพการใช้งานจริง โดยไม่ดำเนินการทดลองภาคสนามหรือสร้างโปรไฟล์การสั่นสะเทือนใหม่จากการวัดจริง

1.4.5 ขอบเขตด้านผลลัพธ์ของงานวิจัย

ผลการศึกษามุ่งนำเสนอการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย พร้อมทั้งอภิปรายข้อดี ข้อจำกัด และปัจจัยที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมในการเลือกเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ผลิต ห้องปฏิบัติการทดสอบ นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการประยุกต์ใช้มาตรฐานให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทย ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุง แก้ไข หรือจัดทำมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ฉบับใหม่ แต่เป็นการประเมินความเหมาะสมของการนำมาตรฐานดังกล่าวมาใช้ภายใต้บริบทของประเทศไทย

1.5 ขอบเขตตัวแปรในการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงวิเคราะห์ (Analytical Research) ที่มุ่งประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย โดยกำหนดขอบเขตตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ดังนี้

1.5.1 ตัวแปรต้น (Independent Variables)

ตัวแปรต้น คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ประกอบด้วย

1.5.1.1 ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

1.5.1.1.1 หลักการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration)

1.5.1.1.2 ช่วงความถี่ (Frequency Range)

1.5.1.1.3 ค่า Power Spectral Density (PSD)

1.5.1.1.4 ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน (Overall RMS)

1.5.1.1.5 ระยะเวลาการทดสอบ

1.5.1.1.6 แนวทางการเลือกเงื่อนไขการทดสอบ

1.5.1.2 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

1.5.1.2.1 สภาพถนน

1.5.1.2.2 ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI)

1.5.1.2.3 รูปแบบการขนส่งทางบก

1.5.1.2.4 สภาพภูมิอากาศ

1.5.1.2.5 ปริมาณฝน

1.5.1.2.6 ความชื้นสัมพัทธ์

1.5.1.2.7 สภาพถนนเปียกหรือน้ำขัง

1.5.1.3 ข้อมูลจากเอกสารวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1.3.1 งานวิจัยด้านการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่

1.5.1.3.2 งานวิจัยด้านการสั่นสะเทือนของยานยนต์

1.5.1.3.3 งานวิจัยด้านคุณภาพผิวทาง

1.5.1.3.4 มาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

ตัวแปรตาม คือ ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย

1.5.2.1 การประเมินความเหมาะสมพิจารณาจากประเด็นต่อไปนี้

1.5.2.1.1 ความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับสภาพการใช้งานจริง

1.5.2.1.2 ความสามารถของเงื่อนไขการทดสอบในการจำลองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

1.5.2.1.3 ความครอบคลุมของมาตรฐานต่อปัจจัยด้านการขนส่งและสภาพแวดล้อม

1.5.2.1.4 ความเหมาะสมในการนำมาตรฐานไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

1.5.2.1.5 ข้อจำกัดและประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมก่อนนำมาตรฐานไปใช้งาน

1.5.3 ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables)

เพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน งานวิจัยนี้กำหนดตัวแปรควบคุม ดังนี้

1.5.3.1 ศึกษาเฉพาะมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานหลัก

1.5.3.2 มุ่งเน้นแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในระดับ Battery Pack

1.5.3.3 พิจารณาเฉพาะการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration)

1.5.3.4 ใช้ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา

1.5.3.5 ใช้ข้อมูลจากเอกสารวิชาการ มาตรฐานสากล และหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง โดยให้ความสำคัญกับข้อมูลที่เผยแพร่ในช่วงประมาณ 5 ปีล่าสุด ยกเว้นเอกสารมาตรฐานหรือเอกสารอ้างอิงพื้นฐานที่ยังคงมีผลบังคับใช้

จากการกำหนดตัวแปรดังกล่าว จะช่วยให้การศึกษามุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทยอย่างเป็นระบบ และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ประกอบการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีเหตุผลทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านวิชาการ ด้านอุตสาหกรรม และด้านการประยุกต์ใช้ ดังต่อไปนี้

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับหลักการ แนวคิด และข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) รวมถึงแนวทางการนำมาตรฐานไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

1.6.2 ได้ข้อมูลเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เช่น ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่งทางบก สภาพภูมิอากาศ ปริมาณฝน และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อการเกิดการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

1.6.3 ได้ผลการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย พร้อมทั้งระบุข้อดี ข้อจำกัด และประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมในการเลือกเงื่อนไขการทดสอบ

1.6.4 ได้แนวทางสำหรับการเลือกหรือกำหนดเงื่อนไขการทดสอบการสั่นสะเทือนที่มีความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทย ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และช่วยให้ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานภาคสนามมากยิ่งขึ้น

1.6.5 เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้ผลิตแบตเตอรี่ ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการทดสอบ นักวิจัย และสถาบันการศึกษา ในการศึกษา พัฒนา และประยุกต์ใช้มาตรฐานการทดสอบด้านการสั่นสะเทือนให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของประเทศไทย

1.6.6 เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตเกี่ยวกับการพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนามของประเทศไทย การเปรียบเทียบมาตรฐานการทดสอบการสั่นสะเทือนระหว่างมาตรฐานสากล รวมถึงการพัฒนาวิธีการทดสอบที่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.6.7 สนับสนุนการยกระดับความน่าเชื่อถือของการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า และเป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและระบบนิเวศการทดสอบของประเทศไทยให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลและการเติบโตของอุตสาหกรรมในอนาคต

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

เพื่อให้การนำเสนอเนื้อหาในงานวิจัยมีความชัดเจนและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผู้วิจัยได้กำหนดนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

1.7.1 แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Battery: EV Battery) หมายถึง ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้หมายถึงแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนในระดับ Battery Pack ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่ (Cell) โมดูลแบตเตอรี่ (Module) ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) และโครงสร้างป้องกันภายนอกที่ติดตั้งใช้งานจริงภายในยานยนต์ไฟฟ้า

1.7.2 การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) หมายถึง การสั่นสะเทือนที่มีพลังงานกระจายอยู่ในช่วงความถี่กว้างและเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นคาบแน่นอน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการขนส่งและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ใช้การสั่นสะเทือนรูปแบบนี้ในการประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์

1.7.3 Power Spectral Density (PSD) หมายถึง ปริมาณการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนแบบสุ่มในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น g^2/Hz

1.7.4 Overall Root Mean Square (Overall RMS หรือ Grms) หมายถึง ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของระดับการสั่นสะเทือนตลอดช่วงความถี่ที่กำหนด ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของความรุนแรงโดยรวมของการสั่นสะเทือนแบบสุ่มในการทดสอบ

1.7.5 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 หมายถึง มาตรฐานสากลด้านการทดสอบสิ่งแวดล้อมของคณะกรรมาธิการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานอิเล็กทรอเทคนิค (International Electrotechnical Commission: IEC) ซึ่งกำหนดหลักการ วิธีการ และแนวทางการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) สำหรับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

เพื่อประเมินความสามารถในการทนต่อแรงสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง และการใช้งานจริง

1.7.6 ความเหมาะสมของมาตรฐาน (Suitability of the Standard) หมายถึง ระดับความสอดคล้องของข้อกำหนดและเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับลักษณะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย โดยพิจารณาร่วมกับสภาพถนน รูปแบบการขนส่ง สภาพภูมิอากาศ และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง

1.7.7 ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) หมายถึง ดัชนีมาตรฐานสากลที่ใช้ประเมินความเรียบหรือความขรุขระของผิวทาง โดยมีหน่วยเป็นเมตรต่อกิโลเมตร (m/km) ค่ายิ่งสูงแสดงว่าผิวทางมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่ถ่ายทอดจากถนนเข้าสู่ยานพาหนะและแบตเตอรี่

1.7.8 การขนส่งทางบก (Road Transportation) หมายถึง การเคลื่อนย้ายแบตเตอรี่หรือผลิตภัณฑ์ด้วยยานพาหนะบนโครงข่ายถนน ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งหลักของประเทศไทย และเป็นแหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่สำคัญซึ่งอาจส่งผลต่อความทนทานของแบตเตอรี่

1.7.9 สภาพแวดล้อมของประเทศไทย (Thailand Operating Environment) หมายถึง ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย ได้แก่ สภาพถนน ความขรุขระของผิวทาง รูปแบบการขนส่ง สภาพภูมิอากาศ ปริมาณฝน ความชื้น และปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อการเกิดการสั่นสะเทือนและความทนทานของแบตเตอรี่

1.7.10 การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน หมายถึง กระบวนการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อม การขนส่ง และการใช้งานจริงของประเทศไทย เพื่อพิจารณาว่ามาตรฐานดังกล่าวมีความเหมาะสมเพียงใดสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า และเพื่อเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้มาตรฐานให้สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย จำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้จากหลายสาขาที่เกี่ยวข้อง ทั้งด้านเทคโนโลยีแบตเตอรี่ การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมการสั่นสะเทือน มาตรฐานสากล วิศวกรรมการขนส่ง วิศวกรรมทางหลวง และข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวผลิตภัณฑ์เพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากลักษณะการใช้งาน สภาพถนน ระบบกันสะเทือน รูปแบบการขนส่ง และสภาพภูมิอากาศ ซึ่งล้วนส่งผลต่อความรุนแรงและลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ได้รับระหว่างการใช้งานจริง

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานสากลที่ใช้สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของชิ้นงานในการทนต่อแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมการใช้งานหรือการขนส่ง มาตรฐานดังกล่าวไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท แต่กำหนดหลักการ วิธีการทดสอบ และแนวทางในการเลือกเงื่อนไขการทดสอบให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การประยุกต์ใช้มาตรฐานจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลภาคสนามและข้อมูลด้านวิศวกรรมประกอบการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมที่ต้องการจำลอง

นอกจากนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในช่วงหลายปีที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระบบแบตเตอรี่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือน ความร้อน ความชื้น และสภาพแวดล้อมที่หลากหลายตลอดอายุการใช้งาน การประเมินความทนทานของแบตเตอรี่จึงต้องอาศัยมาตรฐานการทดสอบที่เหมาะสมควบคู่กับความเข้าใจเกี่ยวกับสภาพการใช้งานจริง เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง

บทนี้จึงรวบรวมและวิเคราะห์เอกสาร มาตรฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยครอบคลุมตั้งแต่พื้นฐานของระบบแบตเตอรี่ หลักการของการสั่นสะเทือน มาตรฐาน IEC 60068-2-64 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนข้อมูลด้านสภาพถนน การขนส่ง และสภาพแวดล้อมของประเทศไทย รวมถึงการทบทวนงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อสังเคราะห์องค์ความรู้และระบุช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ในบทถัดไป

2.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

อุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลกกำลังอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนผ่านครั้งสำคัญจากการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) ไปสู่การใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) อันเป็นผลมาจากความพยายามของหลายประเทศในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาดเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และโครงสร้างพื้นฐานด้านการชาร์จไฟฟ้า ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีสมรรถนะที่สูงขึ้น ระยะทางการขับขี่เพิ่มขึ้น และต้นทุนการผลิตมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ตลาดยานยนต์ไฟฟ้ามีอัตราการเติบโตสูงในหลายภูมิภาคของโลก รวมถึงประเทศไทย

จากข้อมูลของ International Energy Agency รายงาน Global EV Outlook 2025 ระบุว่ายอดจำหน่ายรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2567 มียอดจำหน่ายรถยนต์ไฟฟ้ามากกว่า 17 ล้านคัน และในปี พ.ศ. 2568 คาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สัดส่วนรถยนต์ไฟฟ้าคิดเป็นมากกว่า หนึ่งในสี่ของยอดจำหน่ายรถยนต์ใหม่ทั่วโลก แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบแบตเตอรี่ได้กลายเป็นหัวใจสำคัญของอุตสาหกรรมยานยนต์ยุคใหม่ ทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย ต้นทุน และความสามารถในการแข่งขันของผู้ผลิต



ภาพที่ 2-1 นโยบายการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย (EV 3.5 และเป้าหมาย 30@30)

ประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในประเทศที่มีศักยภาพสูงในการเป็นฐานการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนสำคัญในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เข้มแข็ง มีห่วงโซ่อุปทานที่ครบวงจร และมีนโยบายภาครัฐที่สนับสนุนการลงทุนอย่างต่อเนื่อง โดย Thailand Board of Investment (BOI) ได้ดำเนินมาตรการส่งเสริมการลงทุนด้านยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งการสนับสนุน

ผู้ผลิตรถยนต์ ผู้ผลิตแบตเตอรี่ ผู้ผลิตเซลล์แบตเตอรี่ และโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จ เพื่อผลักดันให้ประเทศไทยก้าวสู่การเป็นศูนย์กลางการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในภูมิภาค นโยบาย 30@30 กำหนดเป้าหมายให้ยานยนต์ที่ผลิตในประเทศไทยอย่างน้อยร้อยละ 30 เป็นยานยนต์ไฟฟ้า ภายในปี พ.ศ. 2573 ขณะที่มาตรการ EV 3.5 ได้สนับสนุนทั้งด้านการผลิตและการใช้ยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงการลงทุนในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่และชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลล่าสุดของ BOI ระบุว่า ณ สิ้นเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2568 ประเทศไทยมีมูลค่าการลงทุนในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าสูงกว่า 137,700 ล้านบาท มีรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV) ที่ได้รับการสนับสนุนภายใต้มาตรการ EV 3.0 และ EV 3.5 มากกว่า 175,000 คัน และมีรถยนต์ BEV ที่จดทะเบียนใช้งานสะสมมากกว่า 203,000 คัน รวมทั้งยังมีการขยายตัวของสถานีชาร์จไฟฟ้าและเครื่องชาร์จแบบ DC Fast Charger อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเติบโตของระบบนิเวศยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยอย่างชัดเจน

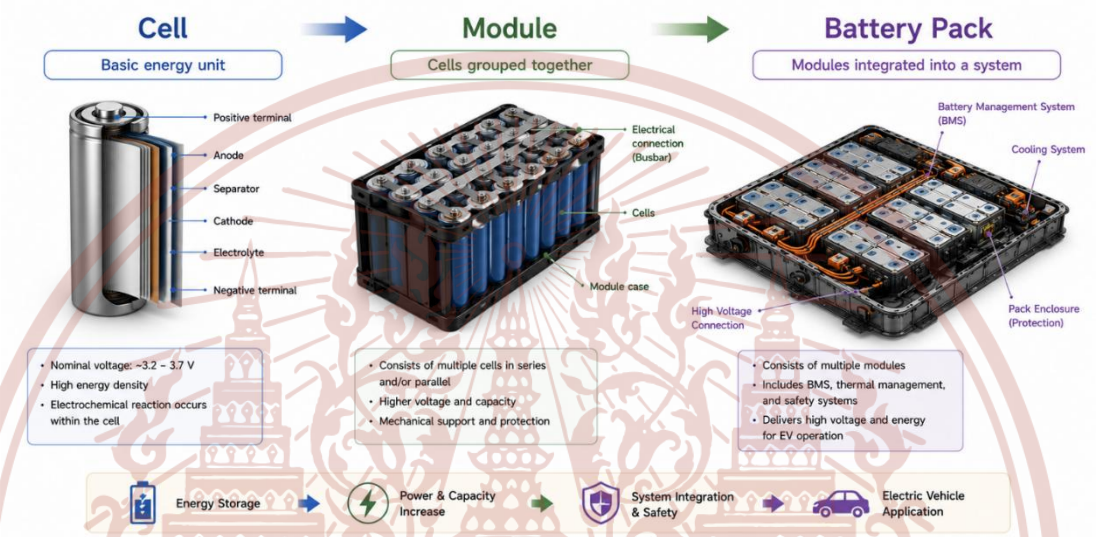
ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

รายการ	ข้อมูลล่าสุด
มูลค่าการลงทุน EV Supply Chain	137.7 พันล้านบาท
รถ BEV ได้รับการสนับสนุน	>175,000 คัน
รถ BEV จดทะเบียนสะสม	>203,000 คัน
สถานีชาร์จ	3,700+ สถานี
DC Fast Charger	6,500+ จุด

การเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าทำให้ความสำคัญของระบบแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นองค์ประกอบที่มีมูลค่าสูงที่สุดของรถยนต์ไฟฟ้า โดยคิดเป็นประมาณ 30–40% ของต้นทุนรถยนต์ทั้งคัน ทั้งยังเป็นตัวกำหนดระยะทางการขับขี่ กำลังของระบบขับเคลื่อน อายุการใช้งาน และความปลอดภัยของยานพาหนะ ดังนั้น ผู้ผลิตจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ทั้งในด้านความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) อายุการใช้งาน (Cycle Life) ความสามารถในการชาร์จเร็ว (Fast Charging Capability) และความปลอดภัย (Safety) ควบคู่กันไป

ปัจจุบัน แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็น แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-ion Battery: LIB) เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง มีประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุที่ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีอัตราการคายประจุเองต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนยังคงมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย เนื่องจากต้องทำงานภายใต้สภาวะทางไฟฟ้า เคมี และเชิงกลที่ซับซ้อน หากได้รับผลกระทบจากแรงกระแทก การสั่นสะเทือน อุณหภูมิสูง หรือความเสียหายทางโครงสร้าง อาจก่อให้เกิดความผิดปกติภายในเซลล์และนำไปสู่ความเสียหายของระบบแบตเตอรี่ได้



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างพื้นฐานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าตั้งแต่ระดับเซลล์จนถึงแบตเตอรี่แพ็ก

จากมุมมองทางวิศวกรรม แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ได้ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว แต่เป็นระบบที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็นโมดูล (Battery Module) และประกอบรวมกันเป็นแบตเตอรี่แพ็ก (Battery Pack) ภายในยังประกอบด้วยระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ระบบระบายความร้อน โครงสร้างรับแรง ชุดสายไฟแรงดันสูง ฟิวส์ และอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ซึ่งทุกองค์ประกอบต้องสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของยานยนต์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะหรือความปลอดภัยของระบบแบตเตอรี่ทั้งหมดได้ ดังนั้น การประเมินความทนทานของแบตเตอรี่จึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะเซลล์แบตเตอรี่เท่านั้น แต่ควรประเมินในระดับ Battery Pack ซึ่งเป็นสภาพการติดตั้งใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-ion Battery: LIB) เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) และความหนาแน่นกำลัง (Power Density) สูง มีประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุที่ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีอัตราการคายประจุเองต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น

คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสามารถตอบสนองความต้องการของยานยนต์ไฟฟ้าได้ทั้งในด้านระยะทางการขับขี่ ประสิทธิภาพการส่งกำลัง และการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ยังส่งผลให้ประเด็นด้านความปลอดภัยและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมกลายเป็นความท้าทายสำคัญของผู้ผลิตและนักวิจัย

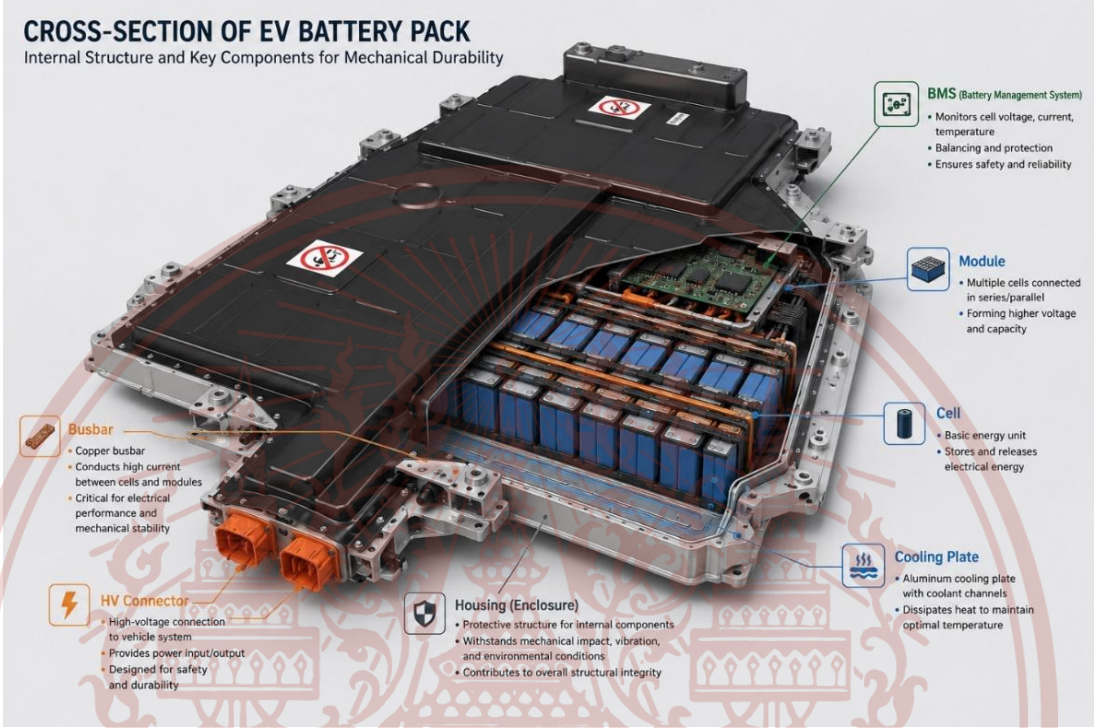
ในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ามีหลายเคมี (Battery Chemistry) ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเหล็กฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate: LFP) ซึ่งมีจุดเด่นด้านความปลอดภัย อายุการใช้งาน และความเสถียรทางความร้อน ขณะที่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide: NMC) และลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide: NCA) มีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่า จึงนิยมใช้ในรถยนต์ที่ต้องการระยะทางการขับขี่มาก อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน ทั้งด้านต้นทุน ความปลอดภัย อายุการใช้งาน และสมรรถนะในการทำงาน จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประเภทของยานยนต์และวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

ชนิดแบตเตอรี่	จุดเด่น	ข้อจำกัด	ตัวอย่างการใช้งาน
LFP	ปลอดภัย อายุการใช้งานยาว ต้นทุนต่ำ	ความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่า	รถยนต์นั่งทั่วไป รถโดยสาร
NMC	ความหนาแน่นพลังงานสูง สมดุลระหว่างกำลังและระยะทาง	ต้นทุนสูงกว่า LFP	รถยนต์นั่งและ SUV
NCA	พลังงานสูง น้ำหนักเบา	ต้องการระบบจัดการความร้อนที่ดี	รถยนต์สมรรถนะสูง

นอกจากคุณสมบัติทางเคมีแล้ว โครงสร้างของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ายังมีผลโดยตรงต่อความทนทานในการใช้งานจริง แบตเตอรี่ในระดับ Battery Pack ประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนมาก ได้แก่ เซลล์แบตเตอรี่ โมดูลแบตเตอรี่ ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ระบบระบายความร้อน โครงสร้างรองรับแรง สายไฟแรงดันสูง ขั้วต่อไฟฟ้า ฟิวส์ และอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ องค์ประกอบเหล่านี้ทำงานร่วมกันเป็นระบบเดียว ดังนั้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ

ชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ ความปลอดภัย หรืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ทั้งระบบได้

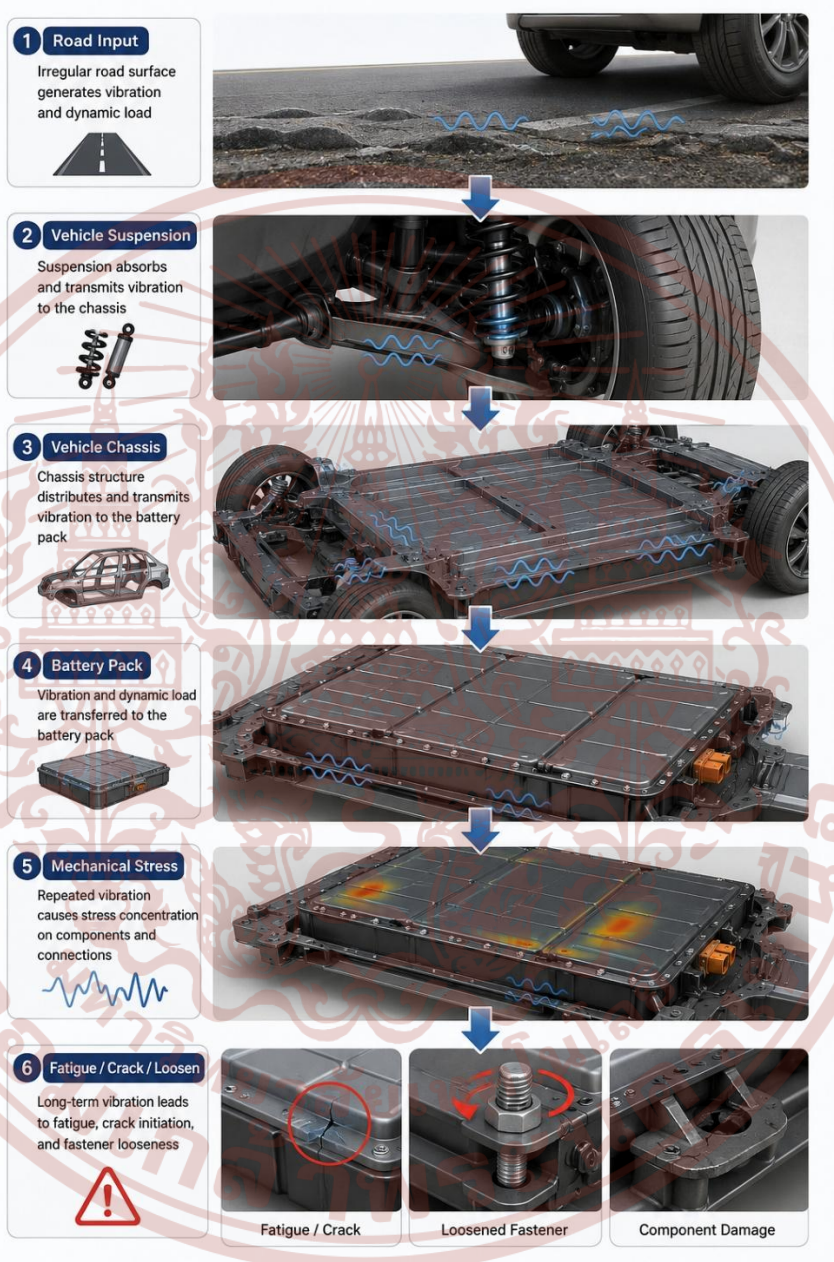


ภาพที่ 2-3 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แพ็กสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าและองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับความทนทานเชิงกล

เมื่อพิจารณาจากสภาพการใช้งานจริง แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ได้เผชิญเฉพาะภาระทางไฟฟ้าและอุณหภูมิเท่านั้น แต่ยังต้องรับแรงทางกล (Mechanical Load) ที่เกิดขึ้นตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การขนส่งจากโรงงาน การติดตั้งในสายการผลิต การขนส่งรถยนต์ไปยังผู้จำหน่าย ตลอดจนการใช้งานบนถนนจริง แรงทางกลดังกล่าวประกอบด้วยแรงสั่นสะเทือน (Vibration) แรงกระแทก (Mechanical Shock) และแรงเร่งจากการขับขี่ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดความเค้นสะสม (Accumulated Mechanical Stress) ภายในโครงสร้างของแบตเตอรี่ หากเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้เกิดการคลายตัวของสกรู จุดยึดหลวม การแตกร้าวของโครงสร้าง การเสียหายของบัสบาร์ (Busbar) หรือความผิดปกติของจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพและความปลอดภัยของแบตเตอรี่ลดลงได้

งานทบทวนมาตรฐานการทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าระบุว่า โปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้ในมาตรฐานหลายฉบับมีพื้นฐานมาจากข้อมูลการสั่นสะเทือนของยานยนต์ทั่วไป และในบางกรณีอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าได้

อย่างครบถ้วน นอกจากนี้ ยังมีข้อเสนอแนะว่าการเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนควรอาศัยข้อมูลภาคสนามและลักษณะการติดตั้งแบตเตอรี่ร่วมด้วย มากกว่าการใช้โปรไฟล์มาตรฐานเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 2-4 การถ่ายทอดแรงสั่นสะเทือนจากผิวทางสู่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

จากประเด็นดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ไม่สามารถพิจารณาเฉพาะสมรรถนะทางไฟฟ้าหรือเคมีได้เพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องพิจารณาความสามารถในการรองรับแรงทางกลที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริงควบคู่กันไป โดยเฉพาะแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการใช้งานบนถนน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ใน

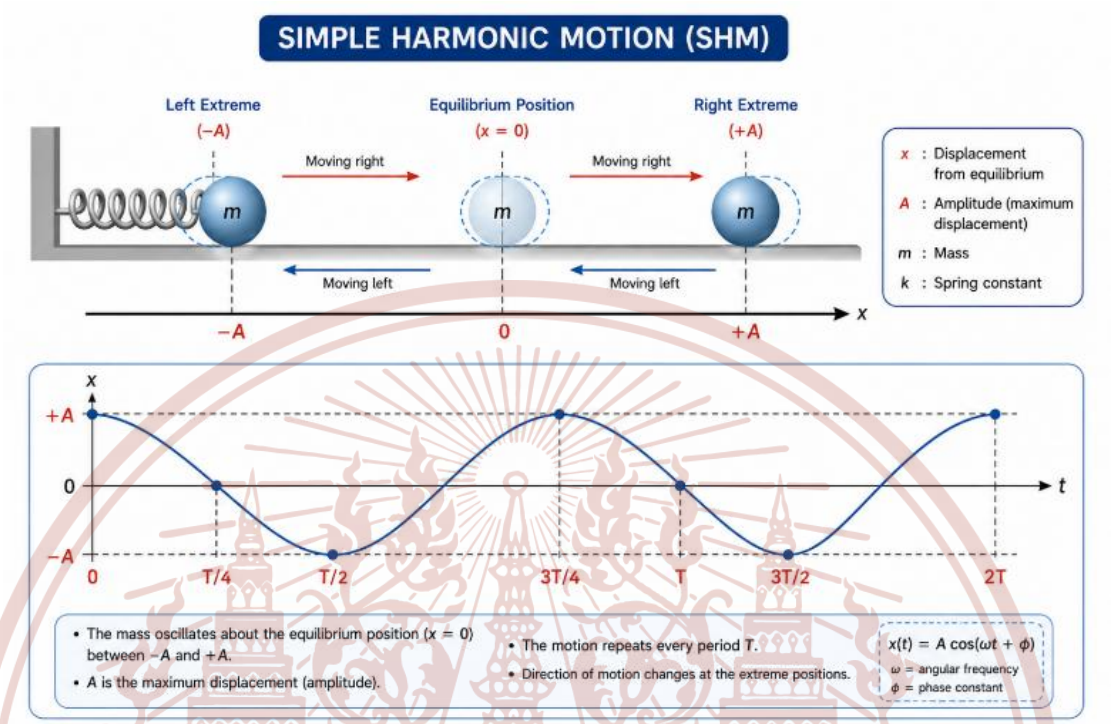
ระยะยาว ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมจึงได้กำหนดวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนขึ้นเพื่อจำลองสภาพการใช้งานดังกล่าว และประเมินว่าระบบแบตเตอรี่สามารถรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างและการทำงานได้หรือไม่ภายใต้แรงสั่นสะเทือนที่กำหนด

ดังนั้น ก่อนที่จะศึกษารายละเอียดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจหลักการพื้นฐานของการสั่นสะเทือน ลักษณะของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในงานวิศวกรรม และรูปแบบของการสั่นสะเทือนที่พบในสภาพการใช้งานจริง ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการทำความเข้าใจแนวคิดของการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มในหัวข้อถัดไป

2.2 หลักการของการสั่นสะเทือน (Vibration Theory)

การสั่นสะเทือน (Vibration) เป็นปรากฏการณ์ทางกลที่เกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุรอบตำแหน่งสมดุล (Equilibrium Position) ภายใต้อิทธิพลของแรงภายนอกหรือแรงภายในระบบ การสั่นสะเทือนสามารถเกิดขึ้นได้กับระบบทางวิศวกรรมทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรยานพาหนะ โครงสร้างอาคาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยระดับความรุนแรงและลักษณะของการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแรง คุณสมบัติของวัสดุ โครงสร้างของระบบ และสภาพแวดล้อมในการใช้งาน

ในงานวิศวกรรม การสั่นสะเทือนไม่ได้เป็นเพียงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เท่านั้น แต่ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) ความคงทน (Durability) และอายุการใช้งาน (Service Life) ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสามารถก่อให้เกิดความล้าของวัสดุ (Fatigue) การคลายตัวของจุดยึด (Fastener Loosening) การแตกร้าวของโครงสร้าง (Structural Crack) และความเสียหายของจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงหรือเกิดความล้มเหลวระหว่างการใช้งานได้



ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของระบบการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อระบบ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น การสั่นสะเทือนอิสระ (Free Vibration) และ การสั่นสะเทือนแบบถูกบังคับ (Forced Vibration) การสั่นสะเทือนอิสระเกิดขึ้นเมื่อระบบได้รับแรงกระตุ้นเพียงครั้งเดียวและปล่อยให้สั่นด้วยคุณสมบัติของระบบเอง ส่วนการสั่นสะเทือนแบบถูกบังคับเกิดจากแรงภายนอกที่กระทำต่อระบบอย่างต่อเนื่อง เช่น การหมุนของเครื่องจักร การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนผิวทาง หรือแรงที่เกิดจากการขนส่ง ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นสะเทือนที่พบได้บ่อยในงานวิศวกรรมยานยนต์และเป็นพื้นฐานของการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม

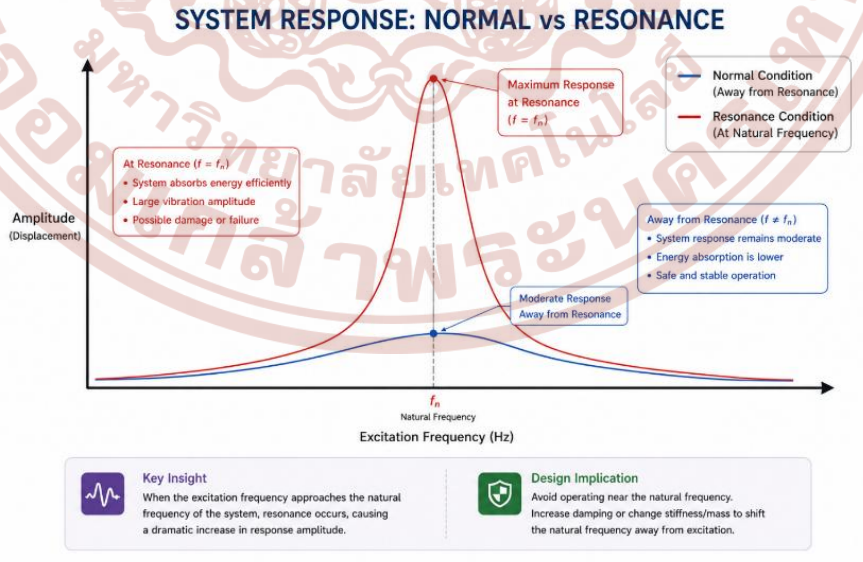
สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริงส่วนใหญ่เป็นการสั่นสะเทือนแบบถูกบังคับ เนื่องจากได้รับแรงจากความขรุขระของถนน ระบบกันสะเทือน การเร่งและการเบรกของรถ รวมถึงแรงที่เกิดจากการขนส่งผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปติดตั้งใช้งาน แรงเหล่านี้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีองค์ประกอบของหลายความถี่พร้อมกัน จึงมีความซับซ้อนกว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเพียงความถี่เดียว

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบลักษณะของการสั่นสะเทือน

ประเภท	ลักษณะ	ตัวอย่าง
Free Vibration	สั่นหลังจากได้รับแรงกระตุ้นเพียงครั้งเดียว	การสั่นของสปริงหลังปล่อยมือ
Forced Vibration	สั่นจากแรงภายนอกที่กระทำอย่างต่อเนื่อง	รถยนต์วิ่งบนถนน เครื่องจักรหมุน

ในทางวิศวกรรม การอธิบายลักษณะของการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หลายตัว ได้แก่ ความถี่ (Frequency) ซึ่งเป็นจำนวนรอบการสั่นต่อวินาที มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) แอมพลิจูด (Amplitude) ซึ่งแสดงขนาดของการเคลื่อนที่หรือระดับของแรงสั่นสะเทือน และ ความเร่ง (Acceleration) ซึ่งนิยมใช้เป็นตัวแทนของความรุนแรงของการสั่นสะเทือนในการทดสอบผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในงานด้านอุปกรณ์ไฟฟ้าและยานยนต์ นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่น เช่น ความเร็ว (Velocity) การกระจัด (Displacement) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) ซึ่งใช้ในการประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนโดยรวม

การตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงสั่นสะเทือนยังขึ้นอยู่กับ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบ หากความถี่ของแรงภายนอกเข้าใกล้หรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะเกิดปรากฏการณ์ การสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้เกิดความเค้นสะสมและเพิ่มโอกาสในการเกิดความเสียหายของโครงสร้าง ดังนั้น การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและการหลีกเลี่ยงสภาวะเรโซแนนซ์จึงเป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์และการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบด้านการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 2-6 การเปรียบเทียบการตอบสนองของระบบในสภาวะปกติและเมื่อเกิดการสั่นพ้อง (Resonance)

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริงสามารถแบ่งได้เป็น การสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration) และ การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) การสั่นสะเทือนแบบไซน์เป็นการสั่นที่มีความถี่และแอมพลิจูดเป็นระเบียบ เหมาะสำหรับการศึกษาการตอบสนองของระบบในแต่ละความถี่หรือการค้นหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ขณะที่การสั่นสะเทือนแบบสุ่มมีพลังงานกระจายอยู่ในหลายช่วงความถี่พร้อมกัน และมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงสามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่งหรือการใช้งานภาคสนามได้ใกล้เคียงกว่า

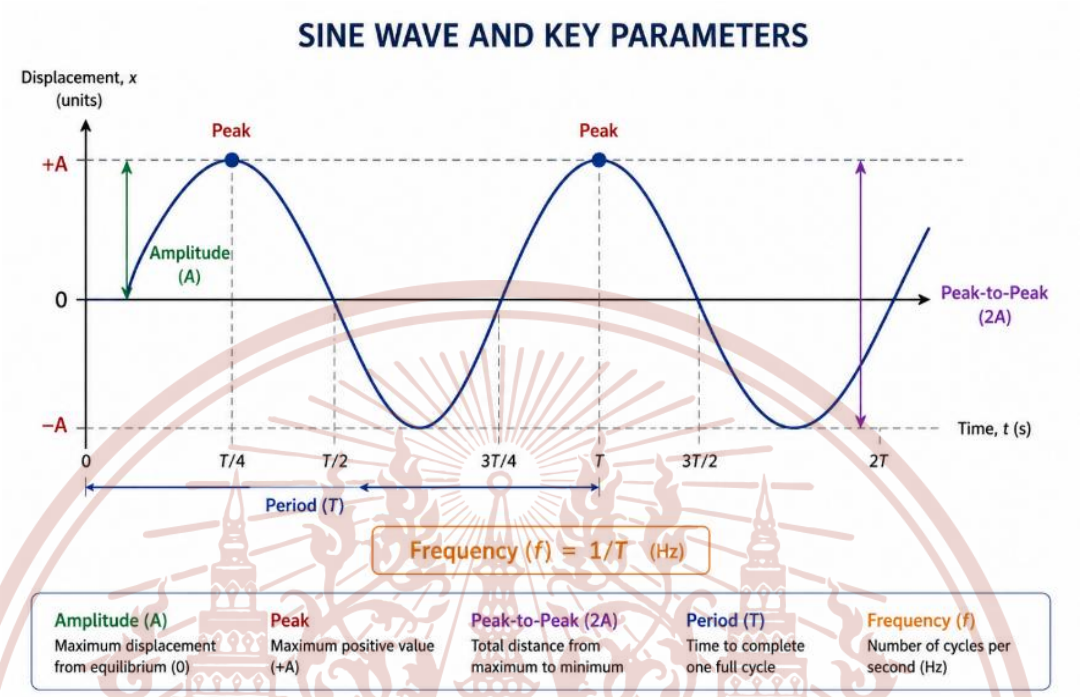
สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งบนถนนเป็นผลรวมของแรงจากหลายแหล่งกำเนิด ได้แก่ ความขรุขระของผิวทาง ระบบกันสะเทือน ความเร็วของรถ น้ำหนักบรรทุก และสภาพการจราจร ทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนมีลักษณะเป็นแบบสุ่มมากกว่าการสั่นแบบไซน์ ด้วยเหตุนี้มาตรฐานการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มเนื่องจากสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้ดีกว่า และสามารถใช้ประเมินผลกระทบจากความเค้นสะสมที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากหลักการดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการเลือกวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นจริงในสภาพการใช้งาน ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบไซน์และแบบสุ่ม รวมถึงเหตุผลที่มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เลือกใช้การสั่นสะเทือนแบบ Broadband Random Vibration เป็นวิธีการหลักในการประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2.2.1 การสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration) เป็นการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal Motion) โดยค่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของระบบเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันไซน์อย่างต่อเนื่อง การสั่นสะเทือนประเภทนี้มีความถี่ที่แน่นอนในแต่ละช่วงเวลา และสามารถควบคุมความถี่ แอมพลิจูด และอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ได้อย่างแม่นยำ จึงนิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างทางวิศวกรรม และใช้ตรวจสอบความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) หรือการเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ของชิ้นงาน

ในงานทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม การสั่นสะเทือนแบบไซน์มักดำเนินการโดยการเปลี่ยนความถี่อย่างต่อเนื่อง (Frequency Sweep) ภายในช่วงความถี่ที่กำหนด เช่น 5–500 Hz หรือ 10–2,000 Hz ขณะที่ระดับความเร่งหรือแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนถูกควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบ เมื่อความถี่ของแรงกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของชิ้นงาน จะเกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้อง ส่งผลให้แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งที่มีความอ่อนแอทางโครงสร้างหรือความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 2-7 ลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบไซน์มีข้อดีคือสามารถควบคุมพารามิเตอร์การทดสอบได้อย่างแม่นยำ ทำให้เหมาะสำหรับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของโครงสร้าง การค้นหาความถี่ธรรมชาติ การประเมินการเกิด Resonance และการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในช่วงความถี่เฉพาะ อย่างไรก็ตาม การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการใช้งานของยานยนต์หรือการขนส่งมักประกอบด้วยหลายความถี่ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน จึงมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าการสั่นสะเทือนแบบไซน์เพียงความถี่เดียว

ด้วยเหตุนี้ การทดสอบแบบไซน์จึงเหมาะสำหรับการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างและการค้นหาจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ มากกว่าการจำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงที่มีแรงสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

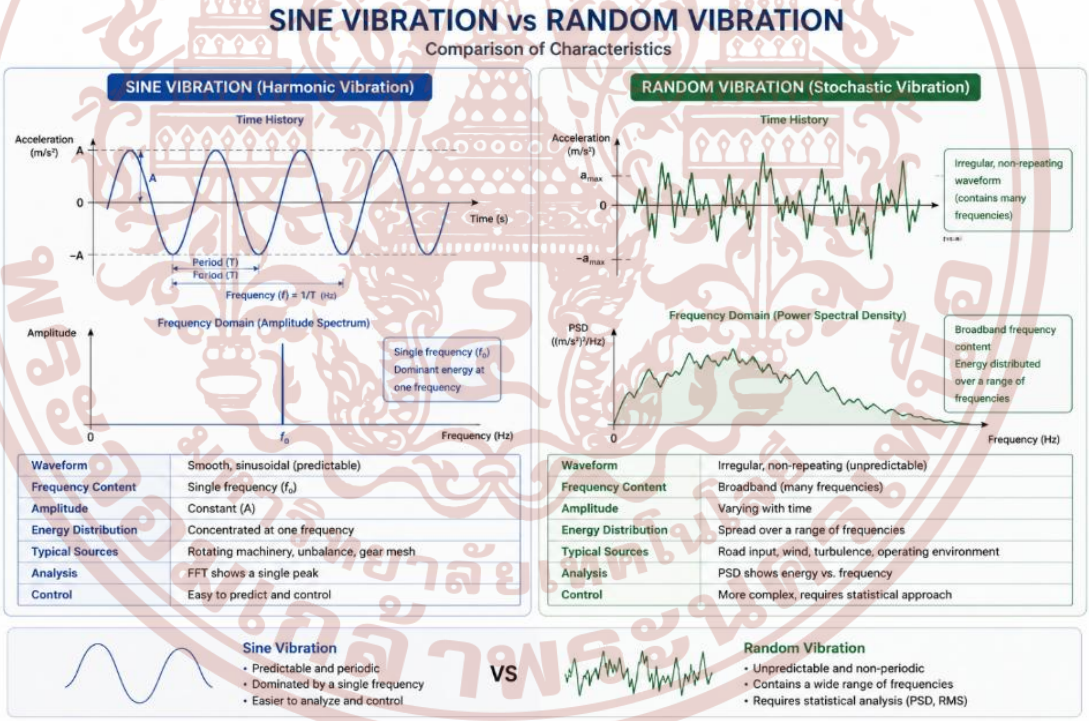
ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อจำกัดของการสั่นสะเทือนแบบไซน์

ข้อดี	ข้อจำกัด
ควบคุมความถี่ได้อย่างแม่นยำ	ไม่สามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนจริงได้ทั้งหมด
ใช้ค้นหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง	มีเพียงหนึ่งความถี่ในแต่ละช่วงเวลา
เหมาะสำหรับการศึกษาการเกิด Resonance	ไม่สะท้อนลักษณะการใช้งานจริงของยานยนต์
วิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างได้ง่าย	ไม่สามารถแทนแรงสั่นสะเทือนหลายแหล่งกำเนิดพร้อมกัน

2.2.2 การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) เป็นการสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของหลายความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยระดับความเร่งและพลังงานของการสั่นสะเทือนมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นคาบ (Non-periodic) ลักษณะดังกล่าวใกล้เคียงกับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เช่น การขนส่งทางบก การเดินรถบนถนนที่มีความขรุขระ การทำงานของเครื่องจักร หรือการสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อมภายนอก

แตกต่างจากการสั่นสะเทือนแบบไซน์ซึ่งมีเพียงหนึ่งความถี่ในแต่ละช่วงเวลา การสั่นสะเทือนแบบสุ่มมีพลังงานกระจายอยู่ตลอดช่วงความถี่ ทำให้สามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงได้ดีกว่า โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากหลายแหล่งกำเนิดพร้อมกัน เช่น แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งได้รับแรงจากผิวทาง ระบบกันสะเทือน ความเร็วของรถ น้ำหนักบรรทุก และการเปลี่ยนแปลงของสภาพถนนตลอดเวลา

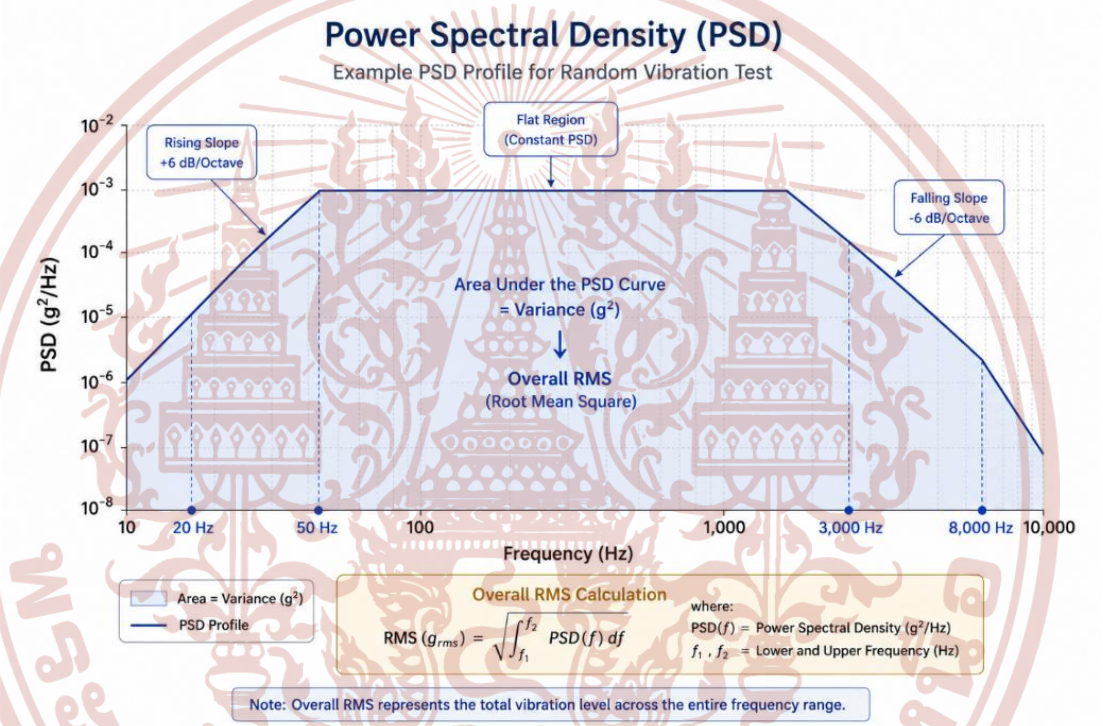


ภาพที่ 2-8 การเปรียบเทียบลักษณะของการสั่นสะเทือนแบบไซน์และการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม

ในการทดสอบแบบสุ่ม ระดับการสั่นสะเทือนไม่ได้กำหนดด้วยแอมพลิจูดเพียงค่าเดียว แต่กำหนดโดยใช้ค่า Power Spectral Density (PSD) ซึ่งแสดงการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ มีหน่วยเป็น g^2/Hz การใช้ PSD ทำให้สามารถควบคุมระดับ

พลังงานของการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และสามารถสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้จากสภาพการใช้งานจริง

นอกจากนี้ การทดสอบแบบสุ่มยังนิยมใช้ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS หรือ Grms) เพื่อแสดงระดับความรุนแรงโดยรวมของการสั่นสะเทือน ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ PSD ตลอดช่วงความถี่ที่กำหนด ค่ายิ่งสูงหมายถึงระบบได้รับพลังงานการสั่นสะเทือนมากขึ้น และมีแนวโน้มเกิดความเค้นสะสมภายในโครงสร้างมากขึ้น



ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างกราฟ Power Spectral Density (PSD) สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน แบบสุ่ม

จากการศึกษางานวิจัยและมาตรฐานด้านการทดสอบผลิตภัณฑ์ พบว่าการสั่นสะเทือนแบบสุ่มสามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการสั่นสะเทือนแบบไซน์ เนื่องจากสามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากหลายแหล่งกำเนิดพร้อมกัน อีกทั้งยังสามารถสะท้อนผลของความเค้นสะสม (Cumulative Fatigue Damage) ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้มาตรฐานการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมสมัยใหม่ เช่น IEC 60068-2-64 จึงเลือกใช้การสั่นสะเทือนแบบ Broadband Random Vibration เป็นวิธีการหลักสำหรับการประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2-5 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนแบบไซน์และการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม

รายการเปรียบเทียบ	Sine Vibration	Random Vibration
ลักษณะสัญญาณ	คลื่นไซน์	สุ่ม
จำนวนความถี่	หนึ่งความถี่ต่อช่วงเวลา	หลายความถี่พร้อมกัน
การควบคุม	ความถี่และแอมพลิจูด	PSD และ Overall RMS
ความใกล้เคียงการใช้งานจริง	ต่ำกว่า	สูงกว่า
การค้นหา Resonance	ดีมาก	ไม่ใช่วัตถุประสงค์หลัก
การจำลองการขนส่ง	จำกัด	เหมาะสมมาก
การใช้งานหลัก	วิเคราะห์โครงสร้าง	Environmental Test

จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ทั้งการสั่นสะเทือนแบบไซน์และแบบสุ่มมีบทบาทที่แตกต่างกันในงานวิศวกรรม การสั่นสะเทือนแบบไซน์เหมาะสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างและการค้นหาความถี่ธรรมชาติ ขณะที่การสั่นสะเทือนแบบสุ่มเหมาะสำหรับการจำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากหลายแหล่งกำเนิดพร้อมกัน ดังนั้น มาตรฐานการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จึงเลือกใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่มเป็นพื้นฐานของการประเมินความทนทาน ซึ่งรายละเอียดของมาตรฐานดังกล่าวจะกล่าวถึงในหัวข้อ 2.3 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ต่อไป

2.3 มาตรฐาน IEC 60068-2-64

2.3.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Testing) เป็นกระบวนการสำคัญในการประเมินความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทนต่อสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการผลิต การขนส่ง การจัดเก็บ และการใช้งานจริง ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งในด้านโครงสร้าง วัสดุ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ภายใน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องประเมินความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน

มาตรฐานชุด IEC 60068 ได้รับการพัฒนาโดย International Electrotechnical Commission เพื่อใช้เป็นแนวทางสากลสำหรับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ทางวิศวกรรม โดยมาตรฐานชุดนี้ครอบคลุมการทดสอบหลายประเภท เช่น การทดสอบ

อุณหภูมิสูงและต่ำ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น การสั่นสะเทือน การกระแทก การกัดกร่อน และสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์

ภายในมาตรฐานชุด IEC 60068 นั้น IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานที่กำหนดวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) สำหรับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการของการกระจายพลังงานการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่กว้าง (Broadband) เพื่อจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง และการใช้งาน มาตรฐานฉบับนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ข้อจำกัดของการทดสอบแบบไซน์ ซึ่งไม่สามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่มีหลายความถี่เกิดขึ้นพร้อมกันได้อย่างสมจริง


IEC

IEC 60068-2-64

Edition 2.0 2008-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Environmental testing –
Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, broadband random and guidance

Essais d'environnement –
Partie 2-64: Essais – Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande et guide

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX
W

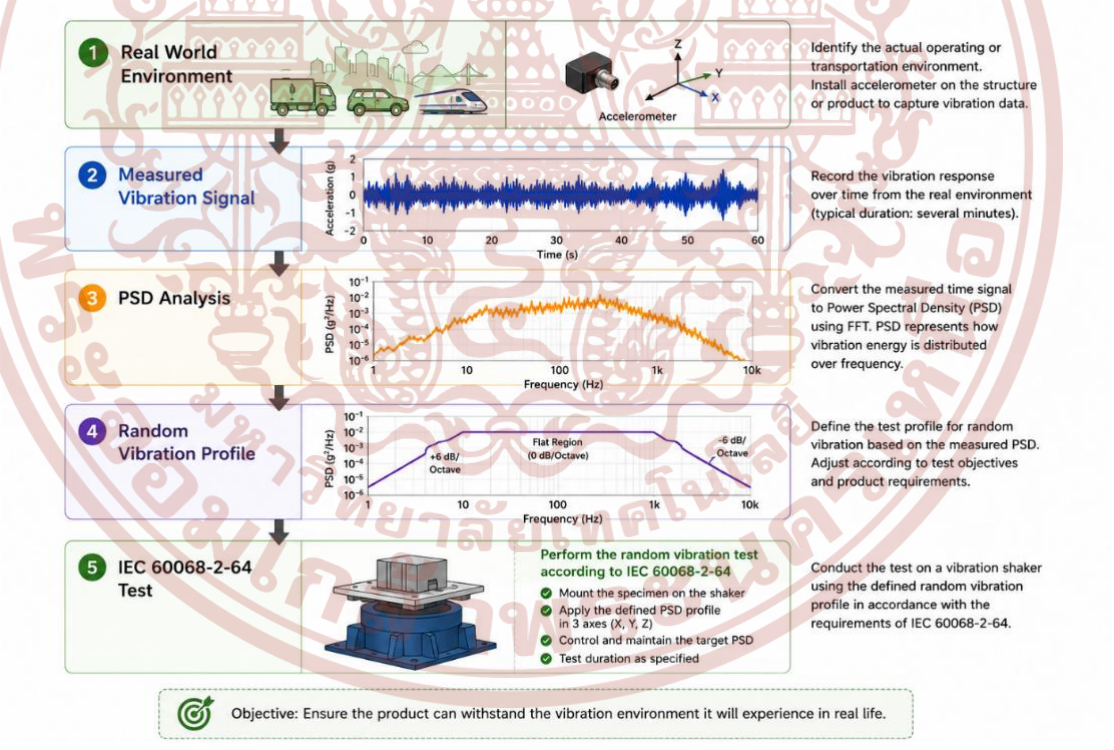
ICS 19.040

ISBN 2-8318-9745-9

ภาพที่ 2-10 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งกำหนดแนวทางการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ Broadband Random Vibration

วัตถุประสงค์หลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 คือการกำหนดวิธีการทดสอบที่สามารถจำลองสภาพการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมการใช้งาน โดยเฉพาะแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการขนส่งด้วยรถบรรทุก รถไฟ เรือ หรือเครื่องบิน ตลอดจนแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ทางวิศวกรรม การทดสอบดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทนต่อความเค้นสะสม (Cumulative Fatigue Stress) ความเสียหายของชิ้นส่วนเชิงกล และผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แตกต่างจากมาตรฐานการสั่นสะเทือนแบบไซน์ ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาการตอบสนองของโครงสร้างในแต่ละความถี่ มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีองค์ประกอบของหลายความถี่พร้อมกัน ทำให้สามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงได้ใกล้เคียงกว่า โดยกำหนดระดับการสั่นสะเทือนผ่านค่า Power Spectral Density (PSD) และใช้ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS หรือ Grms) เป็นตัวแทนของระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนโดยรวม



ภาพที่ 2-11 แนวคิดการพัฒนาโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จากข้อมูลการสั่นสะเทือนจริง

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มิได้กำหนดค่า PSD หรือระดับการสั่นสะเทือนตายตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกชนิด แต่กำหนดกรอบวิธีการ (Test Method) และหลักเกณฑ์ในการเลือกเงื่อนไขการทดสอบ ผู้ใช้งานมาตรฐานจึงต้องกำหนดช่วงความถี่ ระดับ PSD ระยะเวลาการทดสอบ และจำนวนแกนการทดสอบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดภาคสนาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์เฉพาะ หรือข้อกำหนดของผู้ผลิต

แนวคิดดังกล่าวทำให้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายประเภท เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือแพทย์ อุปกรณ์สื่อสาร ระบบอุตสาหกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ และแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ความยืดหยุ่นนี้ก่อให้เกิดประเด็นสำคัญ คือ หากไม่มีข้อมูลภาคสนามที่เหมาะสม ผู้ใช้งานอาจกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่ไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง ส่งผลให้ผลการทดสอบไม่สามารถสะท้อนความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง

ประเด็นดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย เนื่องจากสภาพถนน รูปแบบการขนส่ง สภาพภูมิอากาศ และลักษณะการใช้งานของยานยนต์มีความแตกต่างจากหลายประเทศที่ใช้เป็นแหล่งอ้างอิงในการกำหนดโปรไฟล์การทดสอบ ดังนั้น การนำมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มาใช้จึงควรพิจารณาควบคู่กับข้อมูลด้านวิศวกรรมและสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อให้เงื่อนไขการทดสอบสามารถสะท้อนการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์

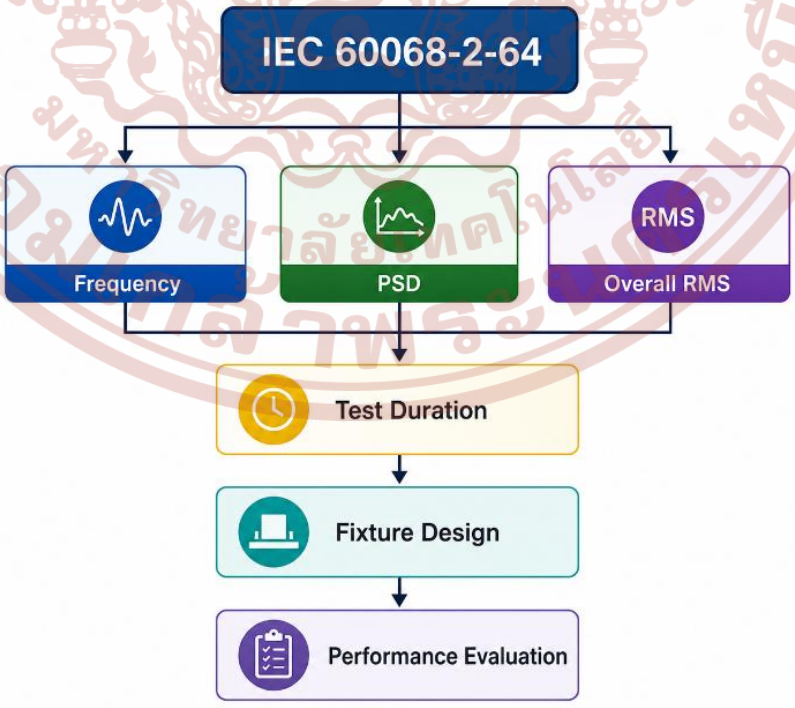
ตารางที่ 2-6 วัตถุประสงค์หลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

วัตถุประสงค์	**รายละเอียด**
จำลองการสั่นสะเทือนจริง	ใช้ Broadband Random Vibration เพื่อจำลองแรงสั่นสะเทือนจากการใช้งานและการขนส่ง
ประเมินความทนทาน	ตรวจสอบผลกระทบของความเค้นสะสมต่อโครงสร้างและการทำงานของผลิตภัณฑ์
ประเมินความน่าเชื่อถือ	วิเคราะห์ความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทำงานหลังได้รับแรงสั่นสะเทือน
สนับสนุนการออกแบบ	ใช้ผลการทดสอบในการปรับปรุงการออกแบบและเลือกวัสดุหรือโครงสร้างที่เหมาะสม
สนับสนุนการรับรองผลิตภัณฑ์	ใช้เป็นหนึ่งในมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการประเมินด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 ขอบเขต (Scope) และหลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 Environmental Testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, Broadband Random and Guidance กำหนดวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) สำหรับผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ทางวิศวกรรม เพื่อประเมินความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทนต่อแรงสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง การติดตั้ง และการใช้งานจริง โดยมุ่งเน้นการจำลองสภาพแวดล้อมการสั่นสะเทือนที่มีความซับซ้อนและมีหลายความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแรงสั่นสะเทือนที่พบในสภาพการใช้งานจริงมากกว่าการทดสอบแบบไซน์

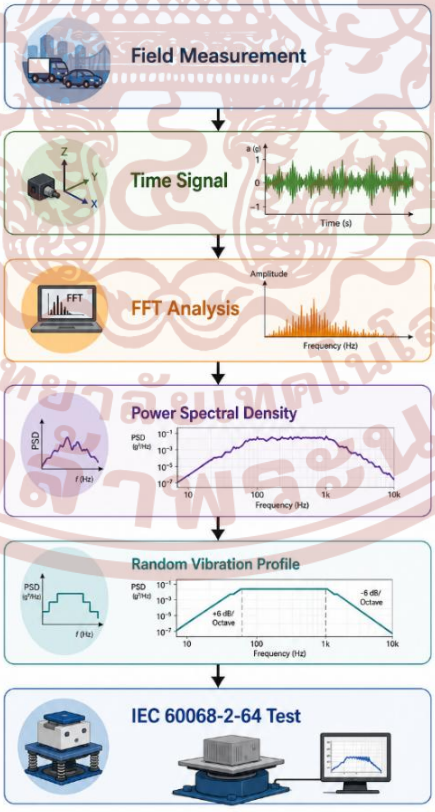
ขอบเขตของมาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมการกำหนดหลักเกณฑ์สำหรับการสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม การเลือกช่วงความถี่ (Frequency Range) การกำหนดระดับพลังงานของการสั่นสะเทือนด้วยค่า Power Spectral Density (PSD) การกำหนดระดับความรุนแรงโดยรวมด้วยค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS หรือ Grms) ระยะเวลาการทดสอบ (Test Duration) วิธีการติดตั้งชิ้นงาน (Mounting and Fixture) การควบคุมการทดสอบ และแนวทางในการประเมินผลหลังการทดสอบ ทั้งนี้ มาตรฐานมิได้กำหนดค่า PSD หรือเงื่อนไขการทดสอบที่ตายตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภท แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดภาคสนาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์เฉพาะ หรือข้อกำหนดของผู้ผลิต



ภาพที่ 2-12 ขอบเขตและองค์ประกอบหลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

หลักการสำคัญของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 คือ การใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่มที่มีการกระจายพลังงานตลอดช่วงความถี่ (Broadband Random Vibration) เพื่อจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมการใช้งาน โดยอาศัยหลักการทางสถิติในการสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบแบบไซน์ที่ใช้สัญญาณเพียงความถี่เดียวในแต่ละช่วงเวลา การสั่นสะเทือนแบบสุ่มสามารถจำลองแรงจากหลายแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นพร้อมกัน เช่น ความขรุขระของผิวทาง ระบบกันสะเทือน การทำงานของเครื่องจักร และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ จึงเหมาะสำหรับการประเมินผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำงานในสภาพแวดล้อมจริง

การกำหนดโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐานเริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลการสั่นสะเทือนจากสภาพการใช้งานจริง (Field Measurement) จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และคำนวณค่า Power Spectral Density (PSD) ซึ่งใช้แสดงการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ โปรไฟล์ PSD ที่ได้จะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนในเครื่องทดสอบ เพื่อให้สามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2-13 ขั้นตอนการพัฒนาโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จากข้อมูลการสั่นสะเทือนจริง

ข้อกำหนดอีกประการหนึ่งที่สำคัญของมาตรฐาน คือ การติดตั้งชิ้นงาน (Mounting) และการออกแบบอุปกรณ์ยึดจับ (Fixture) จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ อุปกรณ์ยึดจับควรมีความแข็งแรงเพียงพอ มีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ และสามารถถ่ายทอดแรงสั่นสะเทือนไปยังชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ หาก Fixture มีความยืดหยุ่นมากเกินไปหรือเกิดการสั่นพ้องระหว่างการทดสอบ ผลการทดสอบอาจไม่สะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์

มาตรฐานยังให้ความสำคัญกับการตรวจสอบสมรรถนะของผลิตภัณฑ์ก่อน ระหว่าง และหลังการทดสอบ เพื่อประเมินว่าผลิตภัณฑ์ยังสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนดหรือไม่ โดยการประเมินผลอาจครอบคลุมการตรวจสอบลักษณะภายนอก ความเสียหายของโครงสร้าง ความสมบูรณ์ของจุดยึด การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า รวมถึงการทดสอบสมรรถนะการทำงาน ทั้งนี้ เกณฑ์การยอมรับ (Acceptance Criteria) จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทหรือมาตรฐานเฉพาะที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะกำหนดหลักการและวิธีการทดสอบไว้อย่างชัดเจน แต่ไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทมีสภาพแวดล้อมการใช้งานที่แตกต่างกัน ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องกำหนดช่วงความถี่ ระดับ PSD ค่า Overall RMS ระยะเวลาการทดสอบ และเงื่อนไขอื่น ๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของมาตรฐานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างยืดหยุ่น แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นประเด็นที่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมและข้อมูลภาคสนามที่ถูกต้องในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ประเด็นดังกล่าวมีความสำคัญเป็นพิเศษ เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงขึ้นอยู่กับสภาพถนน ระบบกันสะเทือน ความเร็วในการเดินทาง น้ำหนักบรรทุก และลักษณะการติดตั้งแบตเตอรี่ภายในรถยนต์ ซึ่งอาจแตกต่างกันในแต่ละประเทศ ดังนั้นการนำมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มาใช้ในประเทศไทยจึงควรพิจารณาควบคู่กับข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่ง และสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย เพื่อให้เงื่อนไขการทดสอบสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งประเด็นดังกล่าวจะได้รับการวิเคราะห์อย่างละเอียดในบทต่อไปของงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2-7 ขอบเขตของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

หัวข้อ	รายละเอียด
วัตถุประสงค์	จำลองการสั่นสะเทือนแบบสุ่มที่เกิดขึ้นจริง
ประเภทการทดสอบ	Broadband Random Vibration
พารามิเตอร์หลัก	Frequency Range, PSD, Overall RMS, Test Duration
การติดตั้งชิ้นงาน	ใช้ Fixture ที่ไม่เปลี่ยนพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน
การประเมินผล	ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างและสมรรถนะของผลิตภัณฑ์
การกำหนดเงื่อนไข	ผู้ใช้งานต้องเลือกโปรไฟล์ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง

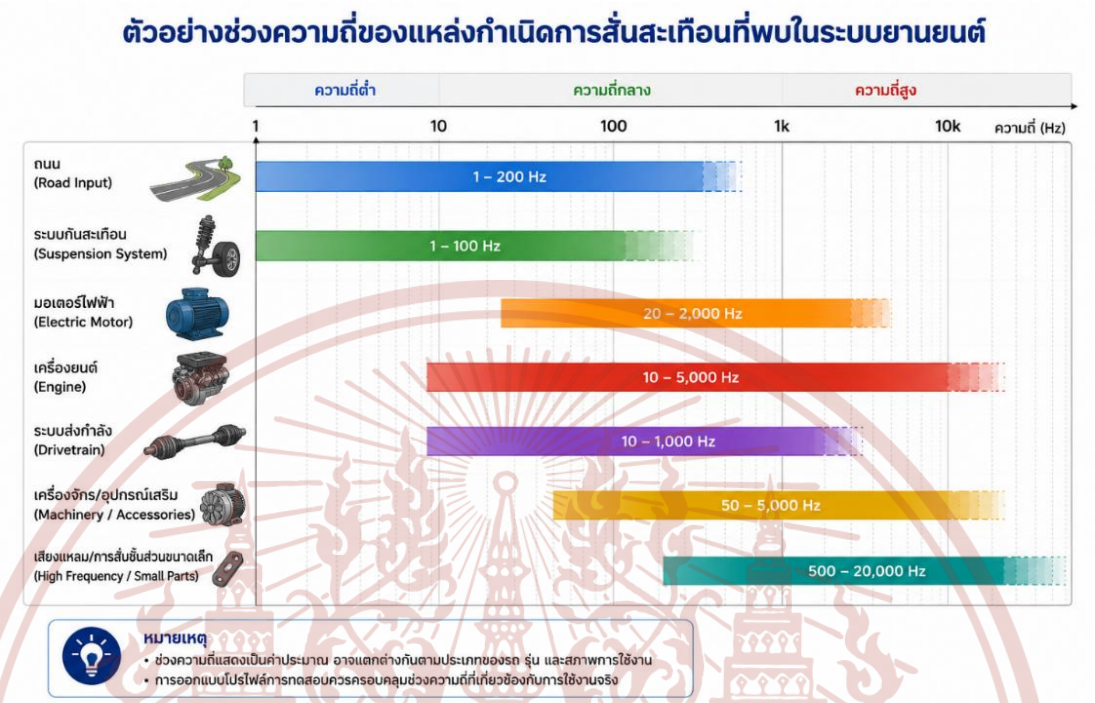
2.3.3 พารามิเตอร์สำคัญของการทดสอบ

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 กำหนดให้การทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) ต้องอาศัยพารามิเตอร์หลายประการในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อให้สามารถจำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม พารามิเตอร์เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อระดับความรุนแรงของการทดสอบ ความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ และความสามารถในการประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การเลือกค่าพารามิเตอร์จึงต้องอาศัยข้อมูลจากสภาพการใช้งานจริง มาตรฐานผลิตภัณฑ์เฉพาะ และหลักการทางวิศวกรรมประกอบกัน

2.3.3.1 ช่วงความถี่ (Frequency Range)

ช่วงความถี่ (Frequency Range) หมายถึง ช่วงของความถี่ที่ใช้สร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนในการทดสอบ โดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) การเลือกช่วงความถี่มีผลต่อความสามารถในการจำลองสภาพการใช้งานจริง เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทตอบสนองต่อความถี่แตกต่างกัน

ในงานด้านยานยนต์และแบตเตอรี่ ช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมักครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ต่ำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถและระบบกันสะเทือน ไปจนถึงความถี่สูงที่เกิดจากเครื่องจักร มอเตอร์ไฟฟ้า หรือการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง การกำหนดช่วงความถี่ที่แคบเกินไปอาจทำให้ไม่สามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างครบถ้วน ขณะที่ช่วงความถี่ที่กว้างเกินความจำเป็นอาจเพิ่มระยะเวลาการทดสอบและต้นทุนโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เพิ่มเติม



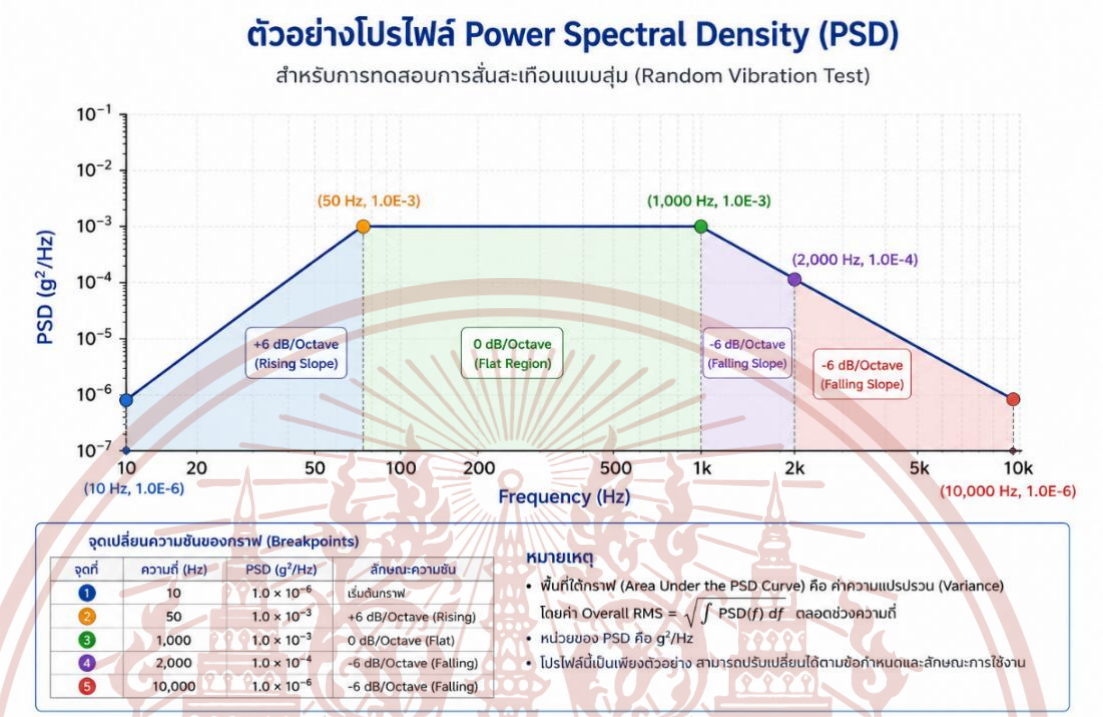
ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างช่วงความถี่ของแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่พบในระบบยานยนต์

2.3.3.2 ค่า Power Spectral Density (PSD)

Power Spectral Density (PSD) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม โดยใช้แสดงการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ มีหน่วยเป็น g^2/Hz

ค่า PSD ไม่ได้แสดงเพียงระดับความเร่งของการสั่นสะเทือน แต่แสดงว่าพลังงานของการสั่นสะเทือนถูกกระจายอยู่ในช่วงความถี่ใดมากน้อยเพียงใด ทำให้สามารถจำลองลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงได้ดีกว่าการใช้ค่าความเร่งเพียงค่าเดียว การสร้างโปรไฟล์ PSD โดยทั่วไปอาศัยข้อมูลจากการวัดภาคสนาม จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่

การกำหนดค่า PSD ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของการทดสอบ หากค่า PSD ต่ำเกินไป ผลการทดสอบอาจไม่สะท้อนความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง ในทางกลับกัน หากกำหนดค่า PSD สูงเกินความจำเป็น อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความเสียหายที่ไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริง



ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างโปรไฟล์ Power Spectral Density (PSD) สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม

2.3.3.3 ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS หรือ Grms)

ค่า Overall RMS หรือ Grms เป็นค่าที่ใช้แทนระดับความรุนแรงโดยรวมของการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ PSD ตลอดช่วงความถี่ที่กำหนด

ค่า Grms เป็นตัวชี้วัดที่ใช้เปรียบเทียบความรุนแรงของโปรไฟล์การสั่นสะเทือนแต่ละแบบได้อย่างสะดวก โดยทั่วไป หากค่า Grms สูงขึ้น หมายถึงผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเค้นสะสมภายในโครงสร้างมากขึ้น และเพิ่มโอกาสการเกิดความเสียหายจากความล้าของวัสดุ

อย่างไรก็ตาม ค่า Grms เพียงค่าเดียวไม่สามารถอธิบายลักษณะของการกระจายพลังงานในแต่ละช่วงความถี่ได้ ดังนั้น การพิจารณาโปรไฟล์ PSD ควบคู่กับค่า Grms จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

2.3.3.4 ระยะเวลาการทดสอบ (Test Duration)

ระยะเวลาการทดสอบเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความเสียหายสะสมของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าจะใช้ค่า PSD และ Grms เท่ากัน แต่การเพิ่มระยะเวลาการทดสอบจะทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับจำนวนรอบของการสั่นสะเทือนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความล้าของวัสดุเพิ่มขึ้น

การกำหนดระยะเวลาการทดสอบจึงควรสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เช่น การจำลองการขนส่ง การใช้งานระยะยาว หรือการทดสอบเพื่อเร่งอายุการใช้งาน (Accelerated Life Test) ทั้งนี้ มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่ได้กำหนดระยะเวลาคงที่ แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดตามข้อมูลภาคสนามหรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์เฉพาะ

2.3.3.5 แกนของการทดสอบ (Axis of Test)

การสั่นสะเทือนของผลิตภัณฑ์ในสภาพการใช้งานจริงสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายทิศทาง ดังนั้นการทดสอบจึงมักดำเนินการในแกนหลัก 3 แกน ได้แก่

2.3.3.5.1 แกน X (Longitudinal Axis)

2.3.3.5.2 แกน Y (Lateral Axis)

2.3.3.5.3 แกน Z (Vertical Axis)

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนในแต่ละแกนอาจแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้าง การติดตั้ง และการกระจายน้ำหนักภายในแบตเตอรี่แพ็กไม่สมมาตร การทดสอบทั้งสามแกนจึงช่วยให้สามารถประเมินความทนทานของระบบได้อย่างครอบคลุม



ภาพที่ 2-16 แกนการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

2.3.3.6 ระดับความรุนแรงของการทดสอบ (Test Severity)

ระดับความรุนแรงของการทดสอบ (Test Severity) เป็นผลรวมของพารามิเตอร์ทั้งหมด ได้แก่ ช่วงความถี่ ค่า PSD ค่า Overall RMS ระยะเวลาการทดสอบ จำนวนแกนการทดสอบ และวิธีการติดตั้งชิ้นงาน การกำหนดระดับความรุนแรงที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากหากกำหนดต่ำเกินไป ผลการทดสอบอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้ ขณะที่การกำหนดสูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายที่ไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริง และส่งผลต่อการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การกำหนด Test Severity ควรพิจารณาร่วมกับข้อมูลภาคสนาม เช่น ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่ง น้ำหนักของแบตเตอรี่ ตำแหน่งการติดตั้ง และสภาพภูมิอากาศ เพื่อให้เงื่อนไขการทดสอบสามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2-8 พารามิเตอร์สำคัญของการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

พารามิเตอร์	ความหมาย	ผลกระทบต่อการทดสอบ
Frequency Range	ช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ	กำหนดลักษณะการตอบสนองของผลิตภัณฑ์
PSD	การกระจายพลังงานในแต่ละช่วงความถี่	กำหนดลักษณะของแรงสั่นสะเทือน
Overall RMS (Grms)	ระดับความรุนแรงโดยรวม	ใช้เปรียบเทียบโปรไฟล์การสั่นสะเทือน
Test Duration	ระยะเวลาการทดสอบ	ส่งผลต่อความเสียหายสะสม
Axis of Test	ทิศทางการทดสอบ	ครอบคลุมการตอบสนองของผลิตภัณฑ์
Test Severity	ระดับความรุนแรงรวมของการทดสอบ	ใช้กำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้เหมาะสม

จากพารามิเตอร์ทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่ได้กำหนดค่าเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท แต่กำหนดกรอบการเลือกพารามิเตอร์ให้ผู้ใช้งานสามารถประยุกต์ใช้ได้ตามลักษณะการใช้งานจริง ดังนั้น ความถูกต้องของผลการทดสอบจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโปรไฟล์การทดสอบที่เลือกใช้ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่งานวิจัยนี้จะนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลด้านสภาพถนน การขนส่ง และสภาพแวดล้อมของประเทศไทยในบทต่อไป

2.3.4 ขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 (Test Procedure)

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 กำหนดแนวทางการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) อย่างเป็นระบบ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ สามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) และสะท้อนสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์มากที่สุด แม้ว่ามาตรฐานจะไม่ได้กำหนดลำดับขั้นตอนสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภทอย่างตายตัว แต่ได้กำหนดหลักการที่ผู้ปฏิบัติการทดสอบควรดำเนินการตั้งแต่การเตรียมชิ้นงาน การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน การติดตั้งชิ้นงาน การดำเนินการทดสอบ ไปจนถึงการประเมินผลหลังการทดสอบ

2.3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน (Specimen Preparation)

ก่อนเริ่มการทดสอบ ชิ้นงานควรอยู่ในสภาพสมบูรณ์และมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริงมากที่สุด โดยควรติดตั้งอุปกรณ์ประกอบ สายไฟ ชุดยึด และชิ้นส่วนต่าง ๆ ให้เหมือนกับสภาพการใช้งานจริง เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ควรติดตั้ง Battery Pack พร้อมชุดยึด (Mounting Bracket) และอุปกรณ์ประกอบที่มีผลต่อการถ่ายแรงสั่นสะเทือน เช่น Cooling Plate, Busbar, High Voltage Connector และ Battery Management System (BMS) หากเป็นไปได้ควรทดสอบในสภาพการประกอบจริง (As-installed Condition)

2.3.4.2 การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน (Vibration Profile Selection)

หลังจากเตรียมชิ้นงานแล้ว จะต้องกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ โดยทั่วไปข้อมูลสำหรับสร้างโปรไฟล์สามารถได้มาจาก

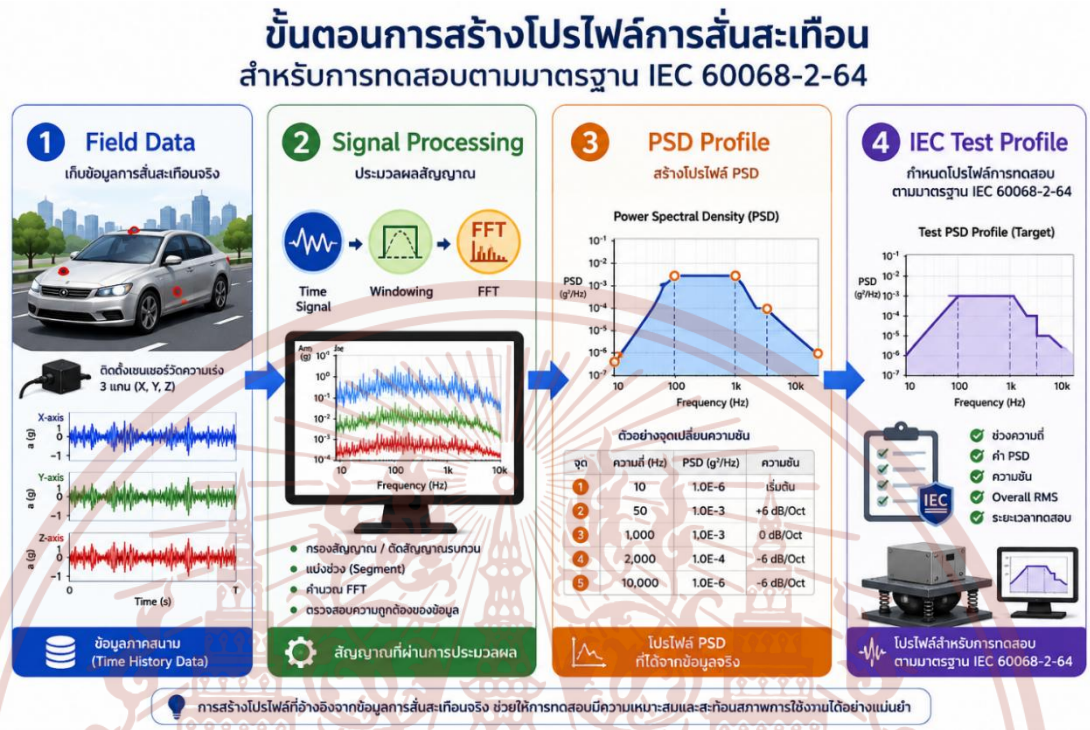
2.3.4.2.1 การวัดการสั่นสะเทือนภาคสนาม (Field Measurement)

2.3.4.2.2 ข้อกำหนดของผู้ผลิต

2.3.4.2.3 ข้อมูลจากการใช้งานจริง

2.3.4.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โปรไฟล์ดังกล่าวจะกำหนดช่วงความถี่ ค่า PSD ค่า Overall RMS ระยะเวลาการทดสอบ และจำนวนแกนที่ใช้ทดสอบ



ภาพที่ 2-17 ขั้นตอนการสร้างโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

2.3.4.3 การติดตั้งชิ้นงาน (Mounting of Specimen)

การติดตั้งชิ้นงานถือเป็นขั้นตอนที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการทดสอบอย่างมาก เนื่องจากหาก Fixture มีความยืดหยุ่นมากเกินไป หรือเกิด Resonance ภายใน Fixture จะทำให้แรงสั่นสะเทือนที่ส่งถึงชิ้นงานแตกต่างจากค่าที่กำหนดมาตรฐานจึงแนะนำว่า Fixture ควรมีลักษณะดังนี้

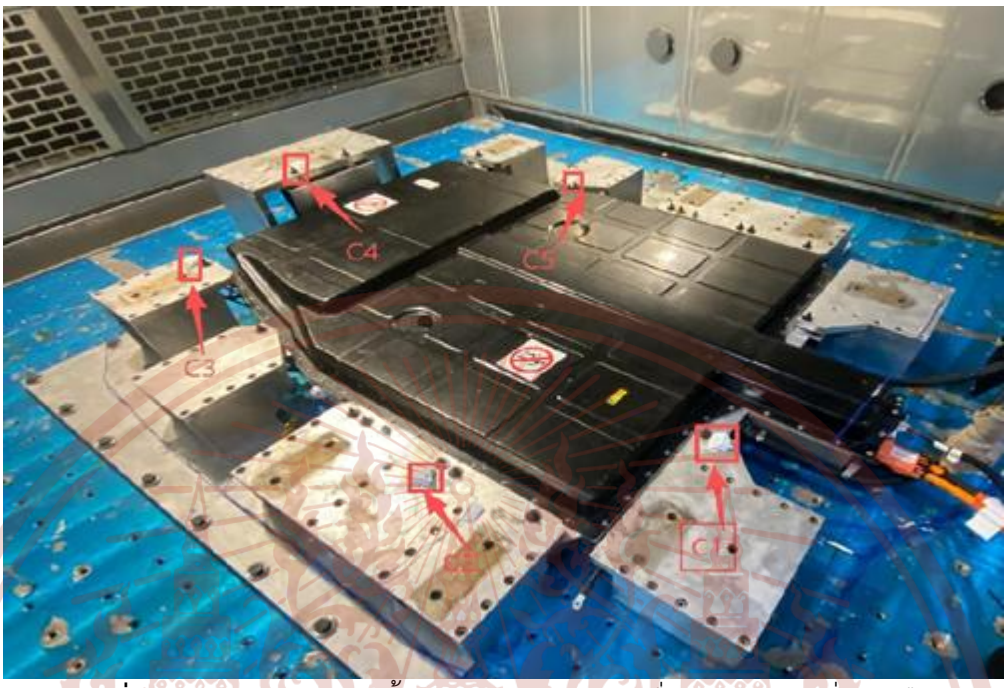
2.3.4.3.1 มีความแข็งแรงเพียงพอ

2.3.4.3.2 มีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าช่วงทดสอบ

2.3.4.3.3 ไม่เพิ่มหรือลดแรงสั่นสะเทือน

2.3.4.3.4 ถ่ายทอดแรงได้สม่ำเสมอ

สำหรับ Battery Pack ควรติดตั้งให้ใกล้เคียงกับตำแหน่งจริงภายในรถยนต์มากที่สุด



ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างการติดตั้ง Battery Pack บนเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือน

2.3.4.4 การดำเนินการทดสอบ (Execution of Test)

เมื่อกำหนดโปรไฟล์และติดตั้งชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดการสั่นสะเทือน (Electrodynamic Vibration System) ซึ่งควบคุมการสั่นสะเทือนด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control)

ระบบควบคุมจะเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้จาก Accelerometer กับโปรไฟล์ PSD ที่กำหนดไว้ และปรับกำลังขับของเครื่องทดสอบแบบ Real-time เพื่อให้ค่าการสั่นสะเทือนเป็นไปตามข้อกำหนดตลอดระยะเวลาการทดสอบ

2.3.4.5 การตรวจสอบระหว่างการทดสอบ (Monitoring) ระหว่างการทดสอบควรตรวจสอบ ดังนี้

2.3.4.5.1 ค่า PSD

2.3.4.5.2 ค่า Overall RMS

2.3.4.5.3 การทำงานของระบบควบคุม

2.3.4.5.4 ความผิดปกติของชิ้นงาน

2.3.4.5.5 ความผิดปกติของ Fixture

2.3.4.5.6 การหลวมของจุดยึด

หากผลิตภัณฑ์เป็น Functional Test อาจต้องจ่ายไฟให้ผลิตภัณฑ์ทำงานตลอดการทดสอบ และบันทึกข้อมูลการทำงานอย่างต่อเนื่อง

2.3.4.6 การตรวจสอบหลังการทดสอบ (Post-test Evaluation)

หลังสิ้นสุดการทดสอบ จะต้องตรวจสอบผลิตภัณฑ์เพื่อประเมินว่าการสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสมรรถนะหรือไม่

2.3.4.6.1 การตรวจสอบโดยทั่วไปประกอบด้วย

2.3.4.6.1.1 การตรวจสอบลักษณะภายนอก

2.3.4.6.1.2 การตรวจสอบการแตกร้าว

2.3.4.6.1.3 การคลายตัวของจุดยึด

2.3.4.6.1.4 การเสียรูป

2.3.4.6.1.5 การตรวจสอบระบบไฟฟ้า

2.3.4.6.1.6 การทดสอบสมรรถนะ

2.3.4.6.1.7 การตรวจสอบค่าทางไฟฟ้า

2.3.4.6.2 สำหรับ Battery Pack ควรตรวจสอบเพิ่มเติม ได้แก่

2.3.4.6.2.1 ความต้านทานฉนวน

2.3.4.6.2.2 แรงดันไฟฟ้า

2.3.4.6.2.3 การทำงานของ BMS

2.3.4.6.2.4 จุดเชื่อมต่อ HV

2.3.4.6.2.5 ระบบระบายความร้อน

ตารางที่ 2-9 ขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	เตรียมชิ้นงาน
2	กำหนดโปรไฟล์ PSD
3	ติดตั้งชิ้นงาน
4	ดำเนินการทดสอบ
5	ตรวจสอบระหว่างการทดสอบ
6	ประเมินผลหลังการทดสอบ

จากขั้นตอนทั้งหมด จะเห็นได้ว่าความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบไม่ได้ขึ้นอยู่กับเครื่องทดสอบเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือน การติดตั้งชิ้นงาน การควบคุมการทดสอบ และการประเมินผลหลังการทดสอบร่วมกัน ดังนั้น การประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย จึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งขั้นตอนการดำเนินการทดสอบและข้อมูลสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงควบคู่กัน เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสมรรถนะของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง

2.3.5 ข้อดี ข้อจำกัด และการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ และระบบกักเก็บพลังงาน เนื่องจากสามารถจำลองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงได้ใกล้เคียงกว่าการทดสอบแบบไซน์ (Sine Vibration) โดยเฉพาะในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากหลายแหล่งกำเนิดพร้อมกัน เช่น การขนส่ง การใช้งานบนถนน และการทำงานของเครื่องจักร อย่างไรก็ตาม แม้มาตรฐานดังกล่าวจะมีความยืดหยุ่นและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายประเภท แต่การเลือกเงื่อนไขการทดสอบยังคงต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมและข้อมูลภาคสนามที่เหมาะสม เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างถูกต้อง

2.3.5.1 ข้อดีของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ข้อดีประการแรกของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 คือการใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) ซึ่งสามารถจำลองสภาพการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงได้ดีกว่าการทดสอบแบบไซน์ เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในยานยนต์ไฟฟ้า เป็นผลรวมของแรงจากหลายแหล่งกำเนิด เช่น ความขรุขระของผิวทาง ระบบกันสะเทือน การเร่งและการเบรก รวมถึงแรงกระตุ้นจากพื้นผิวถนนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การใช้โปรไฟล์แบบสุ่มจึงสามารถสะท้อนลักษณะของแรงดังกล่าวได้ใกล้เคียงกว่าการใช้คลื่นไซน์เพียงความถี่เดียว

ข้อดีประการที่สอง คือ มาตรฐานเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดโปรไฟล์การทดสอบได้ตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดภาคสนาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์เฉพาะ หรือข้อมูลจากผู้ผลิต ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ระบบควบคุมอุตสาหกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ หรือแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ มาตรฐานให้ความสำคัญกับความเสียหายสะสม (Cumulative Fatigue Damage) ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการได้รับแรงสั่นสะเทือนระดับปานกลางอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แตกต่างจากการทดสอบแรงกระแทก (Mechanical Shock) ที่มุ่งเน้นผลกระทบจากแรงสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ การประเมินความเสียหายสะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ต้องรองรับการสั่นสะเทือนตลอดหลายปีของการใช้งาน

นอกจากนี้ มาตรฐานยังสนับสนุนการออกแบบเพื่อความน่าเชื่อถือ (Design for Reliability) เนื่องจากผลการทดสอบสามารถนำไปใช้วิเคราะห์จุดอ่อนของโครงสร้าง ปรับปรุงการออกแบบชุดยึด (Mounting System) เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างรองรับแบตเตอรี่ และปรับปรุงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ภายใน Battery Pack เพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงสั่นสะเทือนในระยะยาว

ตารางที่ 2-10 ข้อดีของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

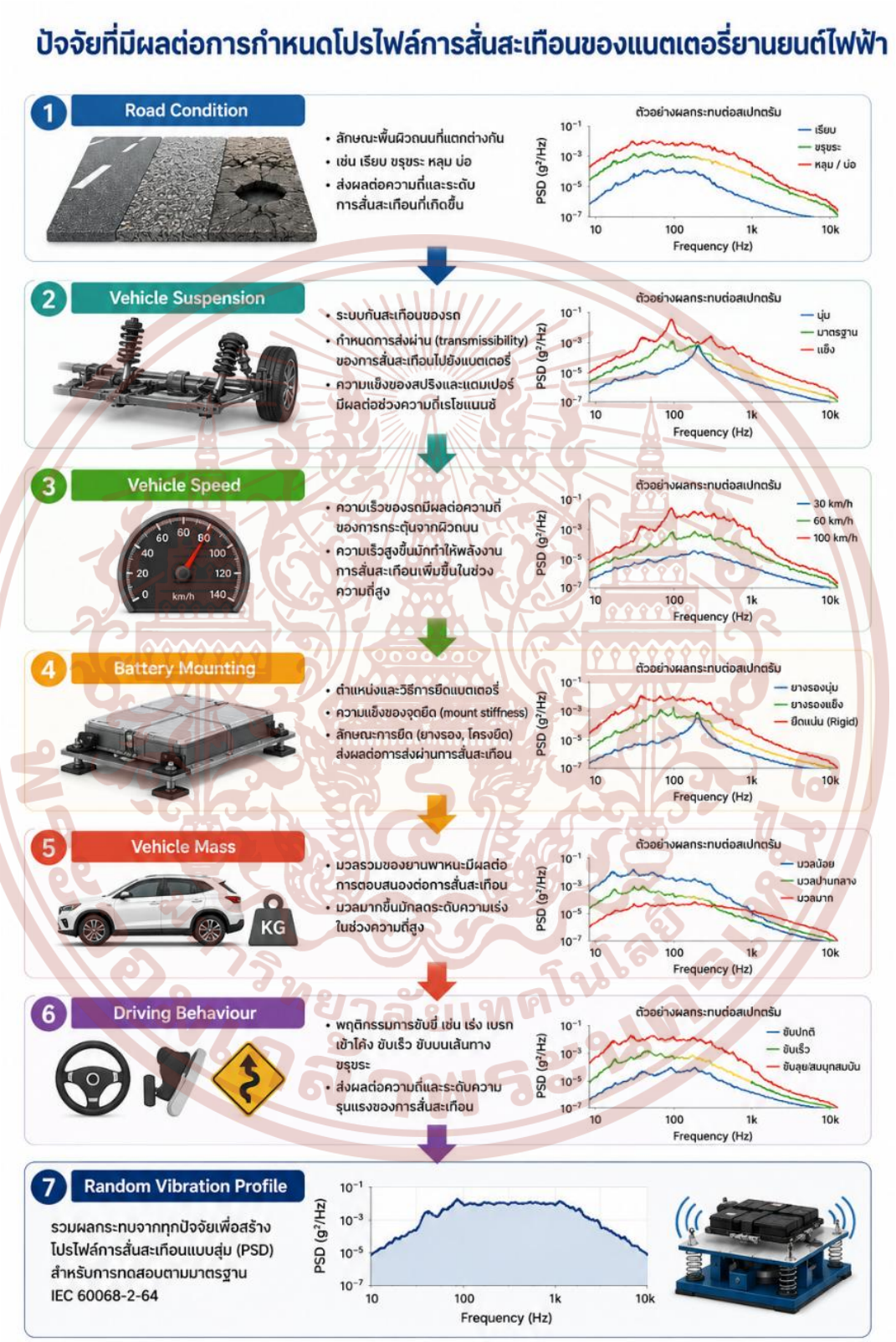
ข้อดี	ประโยชน์ต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า
จำลองการสั่นสะเทือนจริงได้ดี	สะท้อนสภาพการใช้งานบนถนนได้ใกล้เคียง
ใช้โปรไฟล์แบบสุ่ม	ครอบคลุมหลายความถี่พร้อมกัน
รองรับข้อมูลภาคสนาม	สามารถพัฒนาโปรไฟล์เฉพาะของผลิตภัณฑ์ได้
วิเคราะห์ความเสียหายสะสม	เหมาะสำหรับการประเมินอายุการใช้งาน
สนับสนุนการออกแบบ	ช่วยปรับปรุงโครงสร้าง Battery Pack

2.3.5.2 ข้อจำกัดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

แม้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะมีข้อดีหลายประการ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ผู้ใช้งานควรพิจารณา ข้อจำกัดที่สำคัญที่สุด คือ มาตรฐานไม่ได้กำหนดค่า PSD หรือค่า Overall RMS สำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทไว้โดยตรง แต่กำหนดเพียงหลักการและแนวทางในการสร้างโปรไฟล์การทดสอบ ดังนั้น หากผู้ใช้งานไม่มีข้อมูลการสั่นสะเทือนจากสภาพการใช้งานจริง การกำหนดโปรไฟล์อาจอาศัยการประมาณหรืออ้างอิงจากข้อมูลของประเทศอื่น ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพแวดล้อมที่แท้จริงของพื้นที่ที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน

ข้อจำกัดอีกประการหนึ่ง คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการยังไม่สามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงได้ทั้งหมด เนื่องจากสภาพแวดล้อมจริงประกอบด้วยปัจจัยหลายด้านที่เกิดขึ้นพร้อมกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฝุ่น น้ำ การกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุก และพฤติกรรมการขับขี่ ดังนั้น แม้ว่าการทดสอบการสั่นสะเทือนจะสามารถจำลองแรงทางกลได้ดี แต่ยังควรพิจารณาร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมประเภทอื่นเพื่อประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์อย่างครบถ้วน

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ยังมีข้อจำกัดเพิ่มเติม เนื่องจากลักษณะการติดตั้งแบตเตอรี่แตกต่างกันในแต่ละผู้ผลิต ทั้งตำแหน่งการติดตั้ง ระบบกันสะเทือนของรถ โครงสร้างตัวถัง และมวลของ Battery Pack ทำให้โปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เหมาะสมอาจแตกต่างกัน แม้จะใช้มาตรฐานเดียวกันก็ตาม



ภาพที่ 2-19 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

2.3.5.3 การประยุกต์ใช้มาตรฐานกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ถูกนำมาใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การประเมินความน่าเชื่อถือ และการรับรองคุณภาพของ Battery Pack

การประยุกต์ใช้มาตรฐานกับแบตเตอรี่ไม่ได้มุ่งเน้นเฉพาะการตรวจสอบความเสียหายของเซลล์แบตเตอรี่ แต่ยังครอบคลุมองค์ประกอบทั้งหมดของ Battery Pack เช่น โครงสร้างรับแรง ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ชุดสายไฟแรงดันสูง (High Voltage Harness) บัสบาร์ (Busbar) ระบบระบายความร้อน จุดยึด และอุปกรณ์เชื่อมต่อไฟฟ้า ซึ่งล้วนเป็นส่วนประกอบที่อาจได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนสะสมตลอดอายุการใช้งาน

นอกจากนี้ การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ยังถูกใช้ร่วมกับมาตรฐานอื่น เช่น การทดสอบอุณหภูมิ การกระแทก และความชื้น เพื่อประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด แนวทางดังกล่าวช่วยให้ผู้ผลิตสามารถระบุจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ลดความเสี่ยงของความเสียหายภายหลังการจำหน่าย และเพิ่มความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยของยานยนต์ไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนเอกสารวิชาการพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ยังอ้างอิงโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนามของยุโรป อเมริกาเหนือ หรือประเทศจีน ขณะที่ข้อมูลการสั่นสะเทือนจากสภาพถนนของประเทศไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้การเลือกโปรไฟล์การทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้งานในประเทศไทยอาจยังไม่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงอย่างเพียงพอ ประเด็นดังกล่าวจึงเป็นช่องว่างขององค์ความรู้ (Research Gap) ที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ตารางที่ 2-11 การวิเคราะห์จุดแข็งและข้อจำกัดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ประเด็น	จุดแข็ง	ข้อจำกัด
การจำลองการสั่นสะเทือน	ใกล้เคียงการใช้งานจริง	ต้องมีข้อมูลภาคสนามที่เหมาะสม
ความยืดหยุ่นของมาตรฐาน	ปรับใช้ได้กับหลายผลิตภัณฑ์	ไม่มีโปรไฟล์มาตรฐานเฉพาะสำหรับ EV Battery
การประเมินความเสียหาย	วิเคราะห์ความล้าและความเสียหายสะสมได้ดี	ไม่ครอบคลุมปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และการกัดกร่อน
การประยุกต์ใช้ในประเทศไทย	สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้	ต้องพัฒนาโปรไฟล์ให้สอดคล้องกับสภาพถนนและการขนส่งของประเทศไทย

จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินความทนทานต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า แต่ประสิทธิผลของการทดสอบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เลือกใช้เป็นสำคัญ ดังนั้น การประยุกต์ใช้มาตรฐานในประเทศไทยควรอาศัยข้อมูลด้านสภาพถนน รูปแบบการขนส่ง และสภาพแวดล้อมของประเทศ เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของการประเมินผลิตภัณฑ์

2.3.6 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในระดับสากลสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากสามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม มาตรฐานดังกล่าวมีลักษณะเป็น มาตรฐานเชิงวิธีการ (Method-based Standard) กล่าวคือ มาตรฐานกำหนดหลักการ วิธีการ และแนวทางการทดสอบ แต่ไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่ตายตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภทหรือทุกภูมิภาค ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องกำหนดช่วงความถี่ ค่า Power Spectral Density (PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และเงื่อนไขอื่น ๆ ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์

แนวทางดังกล่าวถือเป็นทั้งจุดแข็งและความท้าทายของมาตรฐาน ในด้านหนึ่ง มาตรฐานสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภทและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แต่อีกด้านหนึ่ง ความถูกต้องของผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของข้อมูลที่ใช้สร้างโปรไฟล์การสั่นสะเทือน

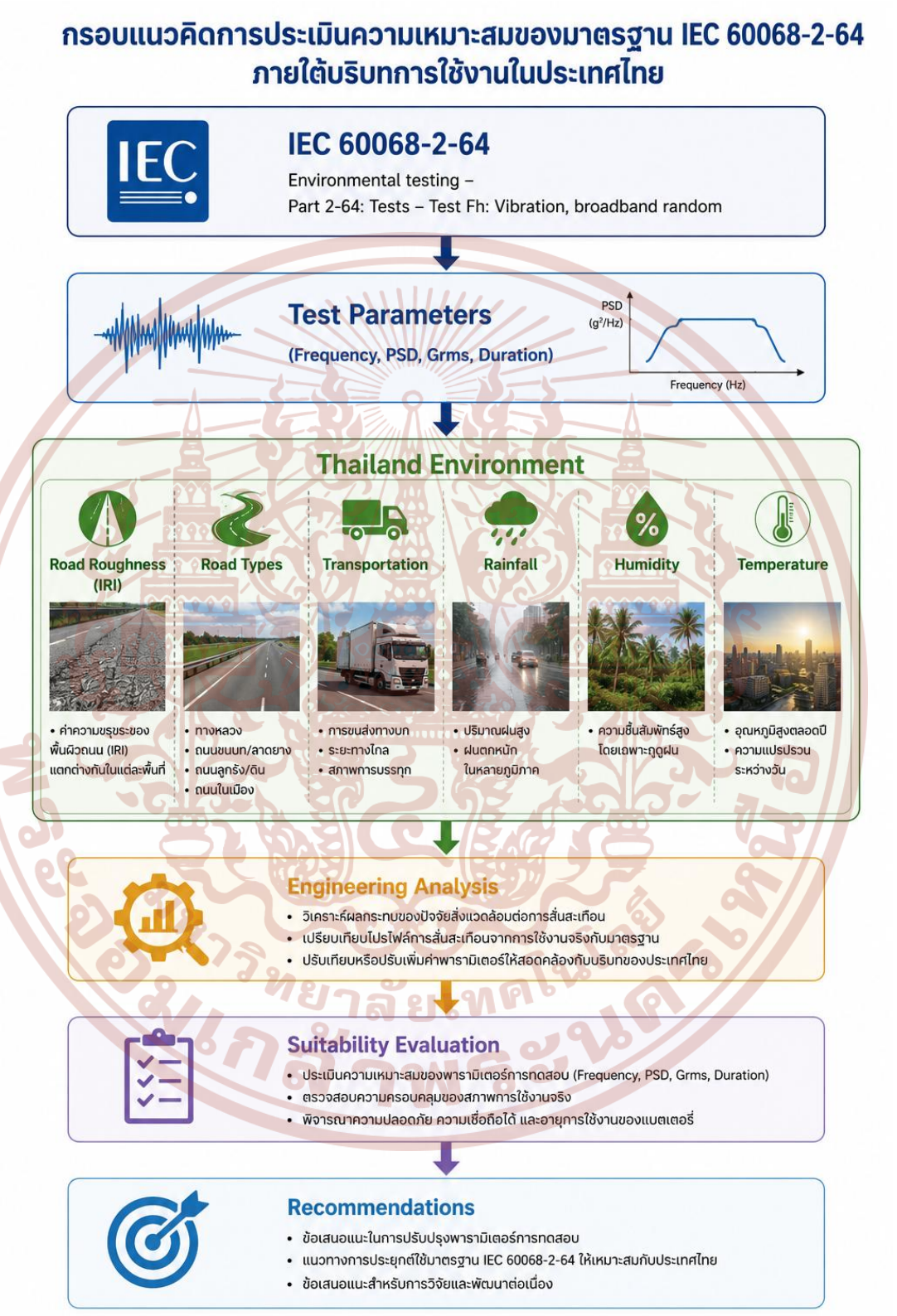
หากข้อมูลภาคสนามไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง ผลการทดสอบอาจไม่สามารถสะท้อนระดับความเค้นที่ผลิตภัณฑ์จะได้รับตลอดอายุการใช้งานได้อย่างถูกต้อง

เมื่อพิจารณาในบริบทของประเทศไทย จะพบว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมหลายประการมีความแตกต่างจากประเทศที่เป็นแหล่งอ้างอิงของงานวิจัยและมาตรฐานจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นลักษณะของโครงข่ายถนน คุณภาพผิวทาง ความขรุขระของถนน (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่ง สภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ และลักษณะการใช้งานยานยนต์ในชีวิตประจำวัน ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อระดับและลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับระหว่างการขนส่งและการใช้งานจริง

ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (Tropical Climate) และมีฤดูฝนที่ชัดเจน ส่งผลให้สภาพผิวทางในบางพื้นที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เกิดแอ่งน้ำ รอยทรุดตัว และความเสียหายของผิวทางจากฝนตกหนักหรืออุทกภัย ขณะเดียวกัน ถนนในประเทศไทยยังมีทั้งทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดิน ถนนในเขตเมือง และถนนท้องถิ่น ซึ่งมีระดับความเรียบของผิวทางแตกต่างกัน ความหลากหลายดังกล่าวทำให้ลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานอาจแตกต่างจากประเทศที่มีโครงสร้างพื้นฐานด้านถนนในมาตรฐานที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ รูปแบบการขนส่งสินค้าในประเทศไทยยังพึ่งพาการขนส่งทางถนนเป็นสัดส่วนสูง ทำให้แบตเตอรี่หรือยานยนต์ไฟฟ้าต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากการขนส่งเป็นเวลานานก่อนถึงผู้ใช้งานปลายทาง หากโปรไฟล์การทดสอบไม่สามารถสะท้อนสภาพการขนส่งดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม อาจส่งผลให้การประเมินความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์คลาดเคลื่อนจากการใช้งานจริง

ในด้านวิศวกรรม ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพถนนและการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับผิวทางเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกี่ยวข้องกับระบบกันสะเทือนของรถยนต์ ความเร็วในการเดินทาง มวลของตัวรถ ตำแหน่งการติดตั้งแบตเตอรี่ และโครงสร้างของ Battery Pack ปัจจัยเหล่านี้ทำให้การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับประเทศไทยไม่ควรอ้างอิงเพียงข้อมูลจากต่างประเทศ แต่ควรใช้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากสภาพการใช้งานจริงภายในประเทศร่วมกับข้อมูลด้านวิศวกรรมยานยนต์ เพื่อให้โปรไฟล์ที่กำหนดสามารถสะท้อนสภาพแวดล้อมการใช้งานของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 2-20 กรอบแนวคิดการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทการใช้งานในประเทศไทย

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบและสามารถพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนามได้ อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่ใช้กำหนดโปรไฟล์การทดสอบเป็นสำคัญ หากไม่มีข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เป็นตัวแทนของสภาพถนนและการขนส่งของประเทศไทย การใช้โปรไฟล์ที่พัฒนาจากประเทศอื่นอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ได้อย่างเพียงพอ

ดังนั้น การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับประเทศไทยจึงควรอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลจากหลายมิติ ได้แก่ ข้อมูลด้านมาตรฐานสากล ข้อมูลการสั่นสะเทือนภาคสนาม ข้อมูลด้านคุณภาพผิวทาง รูปแบบการขนส่ง และข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย เพื่อพิจารณาว่าเงื่อนไขการทดสอบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด และมีประเด็นใดที่ควรปรับปรุงหรือพัฒนาเพิ่มเติม

ประเด็นดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะนำข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง ปริมาณน้ำฝน สภาพภูมิอากาศ และลักษณะการขนส่งของประเทศไทยมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานในบริบทของประเทศไทยอย่างเป็นระบบ

2.3.7 ความสัมพันธ์ของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่นสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานที่ใช้ประเมินความสามารถของผลิตภัณฑ์ในการทนต่อการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) ซึ่งเป็นลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการใช้งานหรือการขนส่ง โดยเฉพาะในระบบแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Battery System) ที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากสภาพถนน ความเร็วของรถ และลักษณะการขับขี่ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การสั่นสะเทือนเป็นเพียงหนึ่งในหลายปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ (Reliability) และความปลอดภัย (Safety) ของแบตเตอรี่ ดังนั้น การประเมินสมรรถนะของแบตเตอรี่ในอุตสาหกรรมยานยนต์จึงมักใช้มาตรฐานการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมหลายรูปแบบร่วมกัน เพื่อให้ครอบคลุมสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด

การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ การทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration Test) การทดสอบแรงกระแทก (Mechanical Shock Test) การทดสอบอุณหภูมิสูงและต่ำ (High and Low Temperature Test) การทดสอบวัฏจักรอุณหภูมิ (Temperature Cycling Test) การทดสอบความชื้น (Humidity Test) การทดสอบ

ระดับการป้องกันน้ำและฝุ่น (Ingress Protection Test) รวมถึงการทดสอบสภาพแวดล้อมแบบผสม (Combined Environmental Test) ซึ่งแต่ละการทดสอบมีวัตถุประสงค์และกลไกการจำลองสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีบทบาทสำคัญในการประเมินผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างทางกลของแบตเตอรี่ เช่น โครงสร้างตัวเรือน (Battery Enclosure) จุดยึด (Mounting Structure) ระบบเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connection) โมดูลแบตเตอรี่ (Battery Module) และชุดแบตเตอรี่ (Battery Pack) โดยการทดสอบจะใช้ค่า Power Spectral Density (PSD) เป็นตัวแทนของพลังงานการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบแบบ Sine Vibration ที่ใช้ความถี่เพียงค่าเดียวในแต่ละช่วงเวลา การใช้สัญญาณแบบ Random Vibration จึงสามารถจำลองสภาพการใช้งานจริงของยานยนต์ได้ใกล้เคียงกว่า

อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง แบตเตอรี่ไม่ได้เผชิญเฉพาะแรงสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และการสัมผัสน้ำพร้อมกัน ดังนั้นผู้ผลิตยานยนต์และผู้ผลิตแบตเตอรี่จำนวนมากจึงเลือกใช้การทดสอบแบบ Combined Vibration Test ซึ่งเป็นการทดสอบการสั่นสะเทือนร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดสอบ (Climatic Chamber) เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงได้สมจริงมากยิ่งขึ้น การทดสอบลักษณะนี้สามารถประเมินผลกระทบจากการขยายตัวและหดตัวของวัสดุ การคลายตัวของจุดยึด ความเมื่อยล้าของโครงสร้าง (Structural Fatigue) และผลกระทบต่อระบบเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพร้อมกับแรงสั่นสะเทือนได้ในเวลาเดียวกัน

นอกจากการทดสอบ Combined Vibration แล้ว การทดสอบระดับการป้องกันน้ำและฝุ่น (Ingress Protection Test) ก็มีความสำคัญต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าเช่นกัน เนื่องจากชุดแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่ใต้พื้นรถและอาจสัมผัสกับน้ำ ฝุ่น โคลน หรือสภาพอากาศที่รุนแรงระหว่างการใช้งาน มาตรฐานระดับการป้องกัน เช่น IPX8 ซึ่งเป็นการทดสอบการแช่น้ำต่อเนื่อง และ IPX9K ซึ่งเป็นการทดสอบการฉีดน้ำแรงดันสูงและอุณหภูมิสูง ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความสามารถของตัวเรือนแบตเตอรี่ในการป้องกันน้ำเข้าสู่ระบบภายใน หากระบบซีลหรือโครงสร้างเกิดความเสียหายจากแรงสั่นสะเทือน การป้องกันน้ำอาจลดประสิทธิภาพลง ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการลัดวงจร การกัดกร่อนของชิ้นส่วน และความเสียหายของเซลล์แบตเตอรี่ในระยะยาว

ด้วยเหตุนี้ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าจึงมักดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนและการทดสอบระดับการป้องกันน้ำร่วมกัน โดยบางกรณีจะดำเนินการทดสอบ IP หลังจากการทดสอบการสั่นสะเทือน เพื่อประเมินว่าแรงสั่นสะเทือนได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบซีลหรือไม่ วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินความคงทนของแบตเตอรี่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่าการทดสอบแต่ละรายการแยกจากกัน

จากการทบทวนมาตรฐานและแนวทางการทดสอบในอุตสาหกรรม พบว่า IEC 60068-2-64 ไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างโดดเดี่ยว แต่เป็นส่วนหนึ่งของชุดการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมที่ใช้ประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยผลการทดสอบการสั่นสะเทือนจะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบด้านอุณหภูมิ ความชื้น การกระแทก และการป้องกันน้ำ เพื่อประเมินความสามารถของแบตเตอรี่ในการรองรับสภาพการใช้งานจริงได้อย่างครบถ้วน

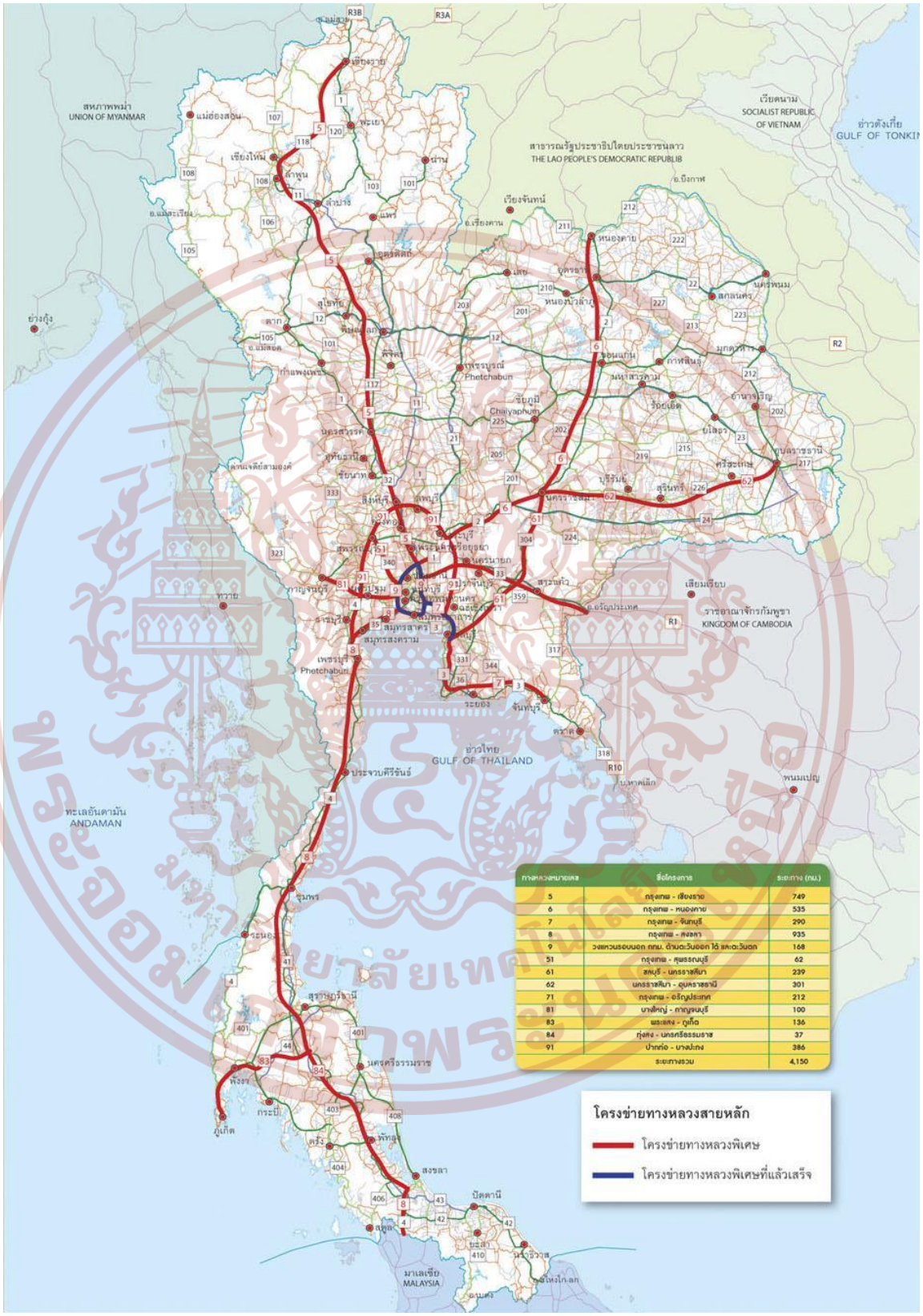
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษามาตรฐาน IEC 60068-2-64 ในฐานะมาตรฐานหลักสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม พร้อมทั้งพิจารณาความสัมพันธ์กับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น โดยเฉพาะการทดสอบ Combined Vibration และการทดสอบระดับการป้องกันน้ำ เช่น IPX8 และ IPX9K เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าวกับบริบทของประเทศไทยในบทถัดไป

2.4 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมาตรฐานไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับแต่ละประเทศหรือผลิตภัณฑ์ไว้โดยเฉพาะ แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานพัฒนาโปรไฟล์การทดสอบจากข้อมูลภาคสนามและลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น หากต้องการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าวกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยร่วมด้วย

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ระบบโครงข่ายคมนาคม และรูปแบบการขนส่งที่แตกต่างจากหลายประเทศซึ่งเป็นแหล่งอ้างอิงของมาตรฐานและงานวิจัยด้านการสั่นสะเทือน ความแตกต่างเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งความขรุขระของผิวทาง (Road Roughness) รูปแบบการเดินทาง ระยะทางการขนส่ง ความเร็วของยานพาหนะ และสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณฝน

ประเทศไทยมีโครงข่ายทางหลวงและถนนในความรับผิดชอบของหลายหน่วยงาน ได้แก่ Department of Highways (กรมทางหลวง) Department of Rural Roads (กรมทางหลวงชนบท) องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานอื่น ๆ ซึ่งแต่ละประเภทของถนนมีมาตรฐานการออกแบบ การก่อสร้าง และการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คุณภาพของผิวทางและระดับความขรุขระแตกต่างกันด้วย ถนนสายหลักและทางหลวงพิเศษมักมีคุณภาพผิวทางที่ดีกว่า ขณะที่ถนนรองหรือถนนท้องถิ่นอาจมีความขรุขระมากกว่าเนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ การบำรุงรักษา และปริมาณการจราจร



ทางหลวงหมายเลข	ชื่อโครงการ	ระยะทาง (กม.)
5	กรุงเทพ - เชียงราย	749
6	กรุงเทพ - หนองคาย	535
7	กรุงเทพ - จันทบุรี	290
8	กรุงเทพ - สงขลา	935
9	วงแหวนรอบนอก กทม. ด้านตะวันออก ใต้ และตะวันตก	168
51	กรุงเทพ - ศุพรรณบุรี	62
61	สมุทร - นครราชสีมา	239
62	นครราชสีมา - อุบลราชธานี	301
71	กรุงเทพ - อรัญประเทศ	212
81	บางใหญ่ - กาญจนบุรี	100
83	พระแสง - ภูเก็ต	136
84	ท่าชัง - นครศรีธรรมราช	37
91	ปากท่อ - บางปะกง	386
	ระยะทางรวม	4,150

ภาพที่ 2-21 โครงข่ายทางหลวงของประเทศไทย

จากข้อมูลของกรมทางหลวง ประเทศไทยมีโครงข่ายทางหลวงที่เชื่อมโยงภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศ และเป็นเส้นทางหลักสำหรับการขนส่งสินค้าและชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ขณะที่การขนส่งภายในประเทศส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาการขนส่งทางถนนเป็นหลัก ทำให้ผลิตภัณฑ์ เช่น แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนเป็นเวลานานระหว่างการขนส่งจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า ผู้ประกอบรถยนต์ และผู้ใช้งานปลายทาง

ข้อมูลจาก Office of Transport and Traffic Policy and Planning (สนข.) และหน่วยงานด้านคมนาคมของประเทศไทยระบุว่า การขนส่งสินค้าภายในประเทศส่วนใหญ่ดำเนินการผ่านระบบขนส่งทางถนน เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเข้าถึงพื้นที่ปลายทางได้โดยตรง และมีโครงข่ายครอบคลุมทั่วประเทศ แม้ว่าประเทศไทยจะมีระบบขนส่งทางรางและทางน้ำ แต่สัดส่วนการขนส่งสินค้าทางถนนยังคงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบการขนส่งอื่น ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนจากการเดินทางบนถนนเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการกำหนดโปรไฟล์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ตารางที่ 2-12 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยที่อาจส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ปัจจัย	ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อแบตเตอรี่
ความขรุขระของผิวทาง (IRI)	เพิ่มระดับแรงสั่นสะเทือนและความล้าของโครงสร้าง
ประเภทของถนน	ส่งผลต่อรูปแบบและช่วงความถี่ของแรงสั่นสะเทือน
ระยะทางการขนส่ง	เพิ่มความเสียหายสะสมจากการสั่นสะเทือน
ความเร็วของยานพาหนะ	เปลี่ยนลักษณะการตอบสนองของระบบกันสะเทือน
ปริมาณฝน	ส่งผลต่อสภาพผิวทางและการเสื่อมสภาพของถนน
ความชื้นและอุณหภูมิ	อาจส่งผลต่อวัสดุ ระบบซีล และการทำงานร่วมกับแรงสั่นสะเทือน

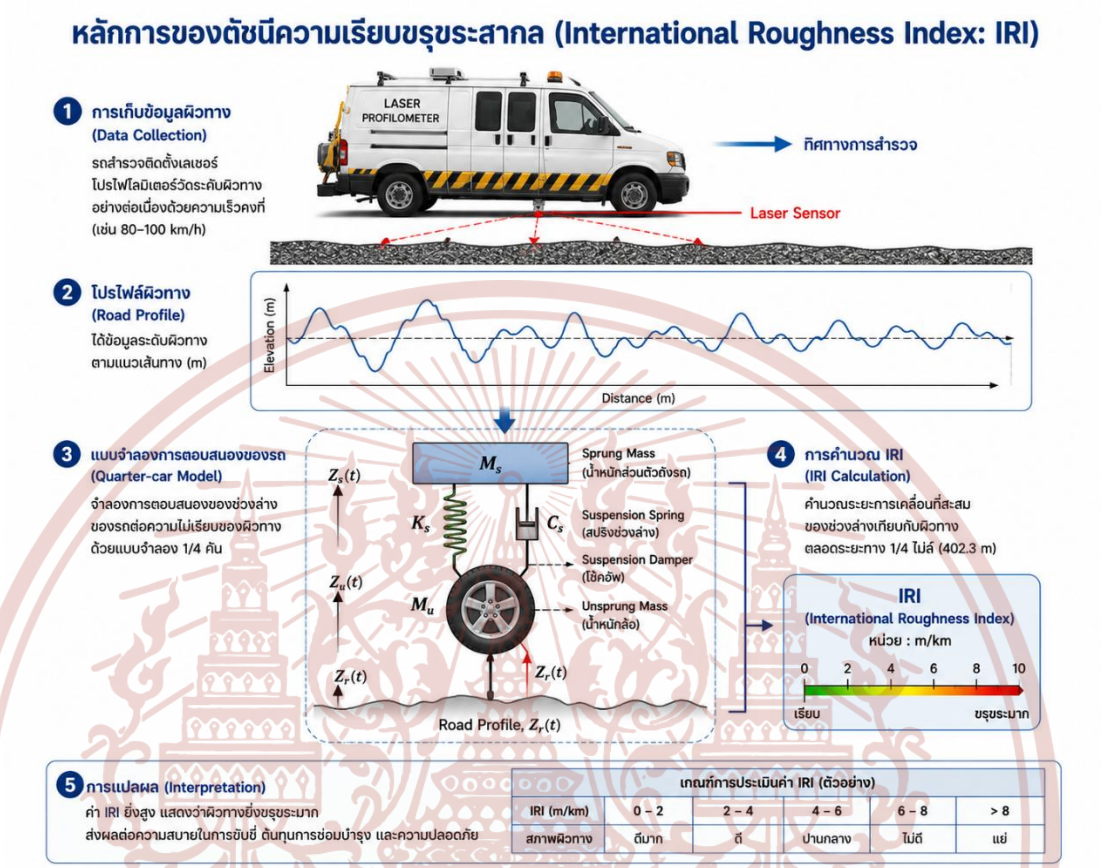
แม้ว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยจะมีความหลากหลาย แต่ไม่ได้หมายความว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ตรงกันข้าม ความยืดหยุ่นของมาตรฐานเปิดโอกาสให้สามารถพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศได้ หากมีข้อมูลภาคสนามและข้อมูลทางวิศวกรรมที่เพียงพอ ดังนั้น ประเด็นสำคัญจึงไม่ได้อยู่ที่การเปลี่ยนมาตรฐาน แต่เป็นการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง

จากเหตุผลดังกล่าว หัวข้อถัดไปจะวิเคราะห์ข้อมูลด้าน ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินคุณภาพผิวทาง และเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อระดับการสั่นสะเทือนของยานยนต์และแบตเตอรี่ระหว่างการใช้งานจริง

2.4.1 ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI)

ความขรุขระของผิวทาง (Road Roughness) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดแรงสั่นสะเทือนของยานพาหนะและผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในรถ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีมวลสูงและประกอบด้วยโครงสร้างเชิงกล ระบบไฟฟ้า และระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ที่ต้องทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง หากรถยนต์วิ่งบนผิวทางที่มีความขรุขระสูง จะทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและแรงเร่งที่ถ่ายทอดผ่านระบบกันสะเทือน ตัวถังรถ และโครงสร้างรองรับแบตเตอรี่ ส่งผลให้เกิดความเค้นสะสม (Cumulative Fatigue Stress) ภายใน Battery Pack ตลอดอายุการใช้งาน

ในการประเมินคุณภาพของผิวทาง หน่วยงานด้านวิศวกรรมทางหลวงทั่วโลกนิยมใช้ ดัชนีความเรียบขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI) ซึ่งได้รับการยอมรับจากธนาคารโลก (World Bank) และใช้เป็นตัวชี้วัดมาตรฐานในการประเมินสภาพผิวทาง โดยค่า IRI คำนวณจากความสูง–ต่ำของผิวทางตามแนววิ่ง แล้วแปลงเป็นค่าที่แสดงระดับความขรุขระของถนน มีหน่วยเป็น เมตรต่อกิโลเมตร (m/km) ค่ายิ่งต่ำหมายถึงผิวทางมีความเรียบ ส่วนค่ายิ่งสูงแสดงว่าผิวทางมีความขรุขระมากขึ้นและมีแนวโน้มก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนต่อยานพาหนะมากขึ้น



ภาพที่ 2-22 หลักการของดัชนีความเรียบขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI)

กรมทางหลวงระบุว่า ค่า IRI เป็นตัวชี้วัดสภาพการให้บริการของผิวทาง (Road Serviceability) ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และใช้เป็นดัชนีหลักในการบริหารจัดการงานบำรุงรักษาทางหลวงของประเทศไทย การตรวจวัดค่า IRI สามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การใช้ Laser Profilometer, Bump Integrator, Walking Profiler และ Dipstick โดยเครื่องมือแต่ละชนิดมีระดับความละเอียดและวัตถุประสงค์ในการใช้งานแตกต่างกัน แต่มีเป้าหมายเดียวกัน คือ การประเมินระดับความเรียบหรือความขรุขระของผิวทางอย่างเป็นมาตรฐาน

ตารางที่ 2-13 วิธีการตรวจวัดค่า IRI ที่ใช้ในงานวิศวกรรมทางหลวง

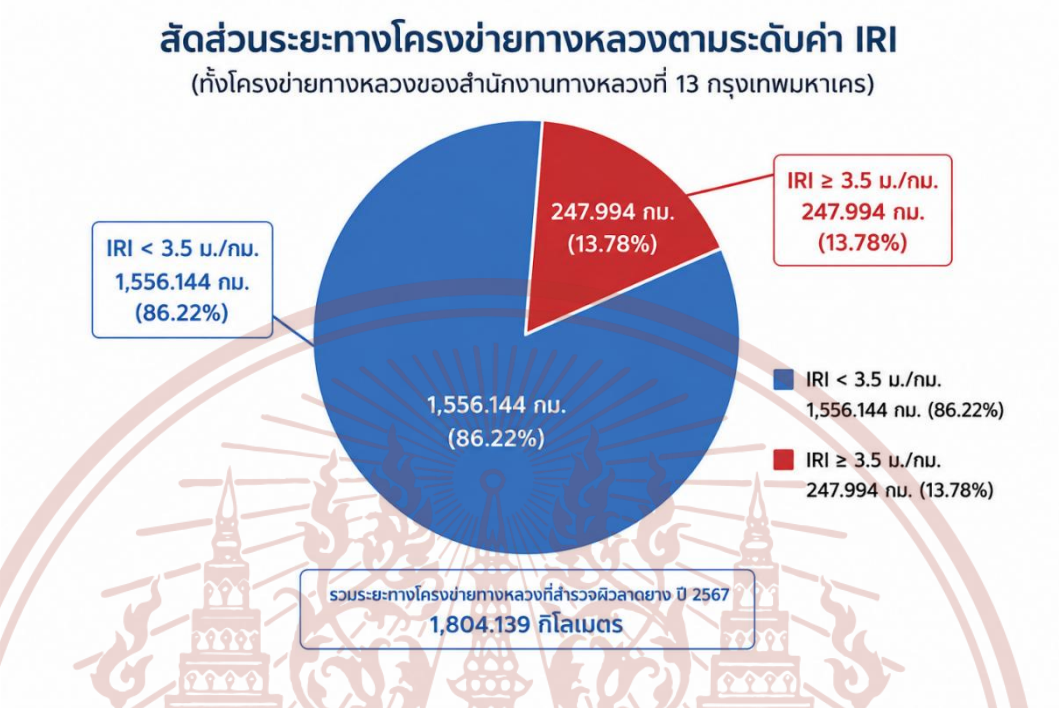
วิธีการตรวจวัด	หลักการทำงาน	ลักษณะการใช้งาน
Laser Profilometer	ใช้เลเซอร์วัดความสูง–ต่ำของผิวทางอย่างต่อเนื่อง	สำรวจโครงข่ายทางหลวงด้วยความเร็วปกติ
Bump Integrator	วัดการเคลื่อนที่ของเพลาหลังรถสำรวจ	งานสำรวจสภาพถนนทั่วไป
Walking Profiler	วัดค่าระดับผิวทางแบบเดิน	งานที่ต้องการความละเอียดสูงในพื้นที่จำกัด
Dipstick	วัดความต่างระดับของผิวทางทีละช่วง	งานตรวจสอบเฉพาะจุดที่ต้องการความแม่นยำสูง

ในประเทศไทย กรมทางหลวงใช้ค่า IRI เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินคุณภาพผิวทางและวางแผนงานบำรุงรักษา โดยมีเกณฑ์อ้างอิงสำหรับการประเมินความเรียบของถนน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้

ตารางที่ 2-14 เกณฑ์การประเมินความเรียบของผิวทางตามค่า IRI

ค่า IRI (m/km)	ระดับคุณภาพผิวทาง
1.0–2.5	ดีมาก
2.5–3.5	ดี
3.5–4.5	พอใช้
มากกว่า 4.5	ควรปรับปรุง

ข้อมูลจากโครงการสำรวจสภาพผิวทางของกรมทางหลวงยังแสดงให้เห็นว่า ถนนส่วนใหญ่ของโครงข่ายที่สำรวจมีค่า IRI ต่ำกว่า 3.5 m/km แต่ยังมีบางส่วนที่มีค่า IRI มากกว่า 3.5 m/km ซึ่งสะท้อนว่าผิวทางมีความขรุขระในระดับที่ควรได้รับการบำรุงรักษา โดยผลการสำรวจล่าสุดระบุว่าจากโครงข่ายที่ทำการสำรวจ มีระยะทางประมาณ 82.61% ที่มีค่า IRI ต่ำกว่า 3.5 m/km และประมาณ 17.45% ที่มีค่า IRI มากกว่า 3.5 m/km



ภาพที่ 2-23 สัดส่วนระยะทางโครงข่ายทางหลวงตามระดับค่า IRI

จากมุมมองของวิศวกรรมยานยนต์ ค่า IRI ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้หมายถึงเพียงความไม่เรียบของถนนเท่านั้น แต่ยังสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของแรงสั่นสะเทือนที่ถ่ายทอดเข้าสู่ระบบกันสะเทือน ตัวถังรถ และแบตเตอรี่ ยิ่งผิวทางมีความขรุขระมาก ระบบกันสะเทือนยิ่งต้องทำงานหนักขึ้น ส่งผลให้แรงเร่ง (Acceleration) และพลังงานการสั่นสะเทือนที่ส่งถึง Battery Pack มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเร่งการเกิดความล้าของโครงสร้าง จุดยึด บัสบาร์ ขั้วต่อไฟฟ้า และองค์ประกอบอื่นภายในแบตเตอรี่

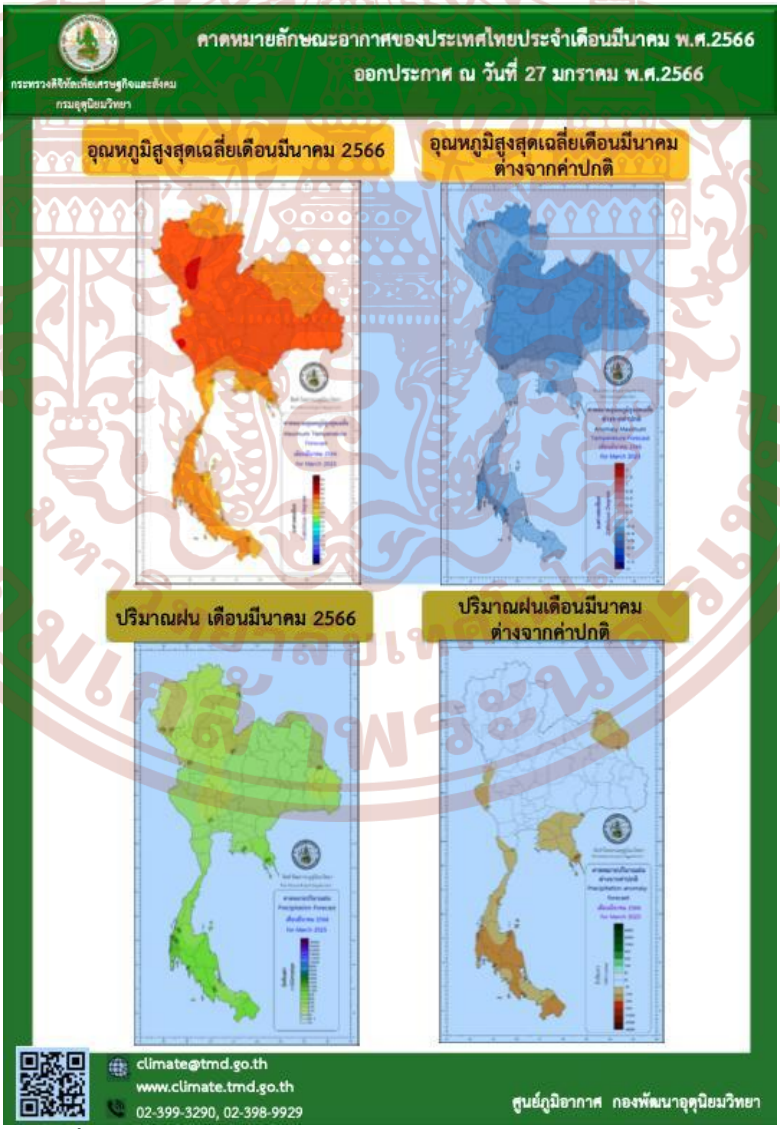
นอกจากนี้ งานวิจัยด้านวิศวกรรมทางหลวงของประเทศไทยยังแสดงให้เห็นว่า ค่า IRI มีความสัมพันธ์กับข้อมูลความเร่งที่วัดได้จากเซนเซอร์หรือสมาร์ตโฟน โดยสามารถใช้การวิเคราะห์สัญญาณด้วย Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อประเมินความขรุขระของผิวทางได้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความขรุขระของถนนและการสั่นสะเทือนของยานพาหนะมีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน

ดังนั้น ค่า IRI จึงไม่ได้เป็นเพียงตัวชี้วัดคุณภาพผิวทางเท่านั้น แต่ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยเฉพาะสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องรองรับแรงสั่นสะเทือนจากการใช้งานจริงตลอดอายุการใช้งาน การนำข้อมูล IRI ของประเทศไทยมาประกอบการกำหนดค่า Power Spectral Density (PSD) และระดับความรุนแรงของการทดสอบ จะช่วยให้เงื่อนไขการทดสอบมีความสอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยมากยิ่งขึ้น และเพิ่มความน่าเชื่อถือของการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ในเชิงวิศวกรรม

2.4.2 สภาพภูมิอากาศของประเทศไทย (อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝน)

นอกจากความขรุขระของผิวทางแล้ว สภาพภูมิอากาศยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแรงสั่นสะเทือนของยานยนต์และแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า แม้ว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝนจะไม่ได้ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนโดยตรง แต่ส่งผลต่อสภาพของโครงสร้างถนน การเสื่อมสภาพของผิวทาง และสภาพการใช้งานของยานพาหนะ ซึ่งล้วนมีผลต่อระดับและลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ได้รับตลอดอายุการใช้งาน

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น (Tropical Climate) และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้มี 3 ฤดูกาลหลัก ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว โดยอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณฝนมีความแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคและแต่ละช่วงเวลา ส่งผลให้สภาพผิวทางและลักษณะการใช้งานของยานพาหนะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างชัดเจน



ภาพที่ 2-24 ลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยและการแบ่งฤดูกาล

2.4.2.1 อุณหภูมิ

ข้อมูลระยะยาวของกรมอุตุนิยมวิทยาระบุว่า ประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีอยู่ในช่วงประมาณ 26–28 °C โดยภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาวมากกว่าภาคใต้ ขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในฤดูร้อนของหลายพื้นที่สามารถสูงกว่า 40 °C ได้ในบางช่วงเวลา

แม้อุณหภูมิจะไม่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนโดยตรง แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุผิวทาง เช่น การขยายตัวและหดตัวของแอสฟัลต์ การเกิดรอยแตกร้าว และการเสื่อมสภาพของชั้นผิวถนน ซึ่งอาจทำให้ค่าความขรุขระของผิวทาง (IRI) เพิ่มขึ้นเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านเข้าสู่ระบบกันสะเทือนและแบตเตอรี่ของรถยนต์

ตารางที่ 2-15 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทย

รายการ	**ค่าโดยประมาณ**
อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี	26–28 °C
อุณหภูมิสูงสุดในฤดูร้อน	มากกว่า 40 °C (บางพื้นที่)
อุณหภูมิต่ำสุดในฤดูหนาว	แตกต่างตามภูมิภาค

2.4.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ประเทศไทยมีความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนและพื้นที่ชายฝั่งทะเล ความชื้นสูงมีผลต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุ การกัดกร่อนของชิ้นส่วนโลหะ และประสิทธิภาพของระบบซีลและอุปกรณ์ไฟฟ้า แม้ว่าความชื้นจะไม่ได้เพิ่มแรงสั่นสะเทือนโดยตรง แต่เมื่อเกิดร่วมกับแรงสั่นสะเทือนต่อเนื่อง อาจเร่งการเสื่อมสภาพของขั้วต่อไฟฟ้า จุดยึด และโครงสร้างภายใน Battery Pack ได้

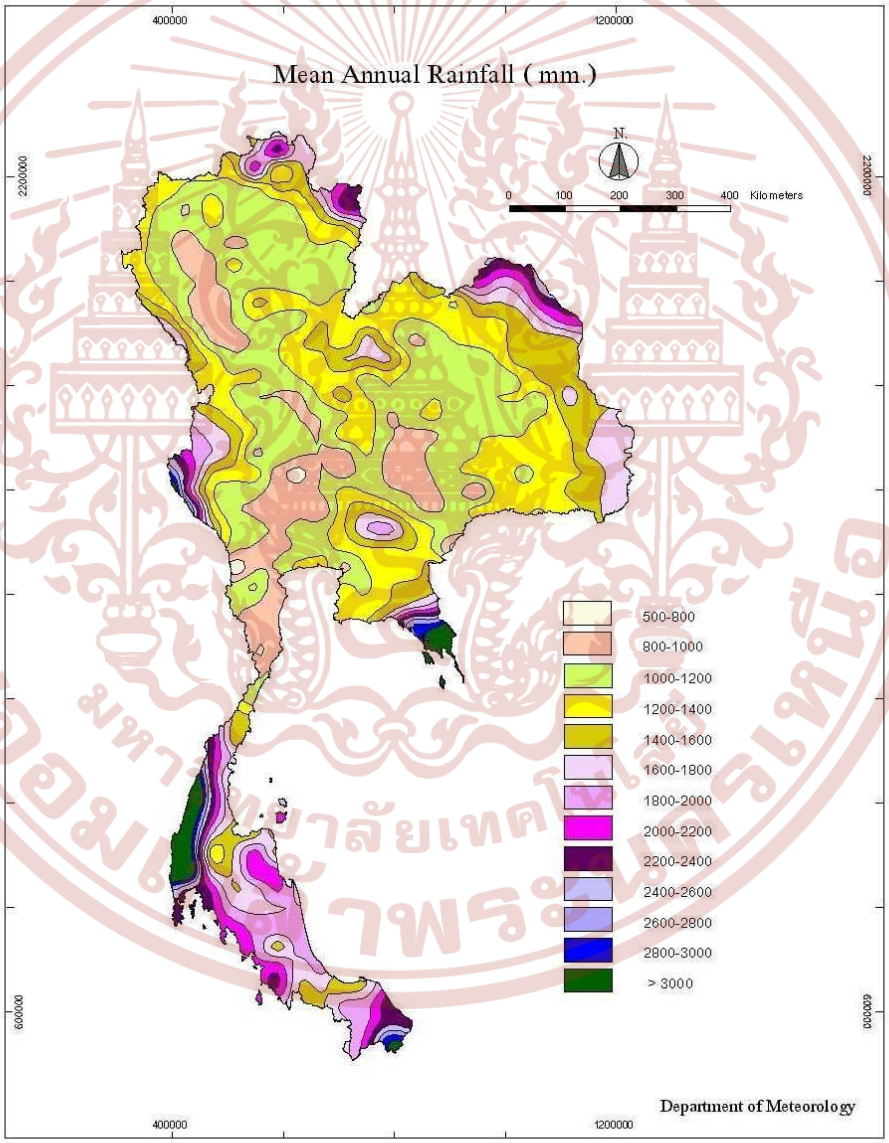
สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ผู้ผลิตส่วนใหญ่จึงกำหนดให้มีการทดสอบการสั่นสะเทือนร่วมกับการทดสอบอุณหภูมิและความชื้น เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

2.4.2.3 ปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวทางมากที่สุด กรมอุตุนิยมวิทยาระบุว่า ประเทศไทยมีปริมาณฝนเฉลี่ยรวมทั้งประเทศประมาณ 1,570–1,590 มิลลิเมตรต่อปี โดยมีความแตกต่างกันอย่างมากในแต่ละภูมิภาค พื้นที่ด้านรับลมมรสุม เช่น จังหวัดตราด

ระนอง และบางพื้นที่ของภาคตะวันออกและภาคใต้ มีปริมาณฝนรวมมากกว่า 4,000 มิลลิเมตรต่อปี ขณะที่บางพื้นที่ด้านอับฝนมีปริมาณฝนน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศอย่างชัดเจน

ฝนที่ตกต่อเนื่องเป็นเวลานานส่งผลให้ผิวทางเกิดการแตกร้าว หลุมบ่อ การทรุดตัว และความเสียหายของโครงสร้างทาง ซึ่งล้วนเป็นสาเหตุให้ค่า IRI เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนที่ถ่ายทอดจากถนนสู่ยานยนต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 2-25 การกระจายตัวของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (Rainfall Distribution Map)

ตารางที่ 2-16 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีปริมาณฝนสูงและต่ำของประเทศไทย

พื้นที่	ลักษณะปริมาณฝน
จังหวัดตราด	มากกว่า 4,000 มม./ปี
จังหวัดระนอง	มากกว่า 4,000 มม./ปี
ภาคกลางตอนใน	ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยประเทศ
บางพื้นที่ภาคเหนือด้านอับฝน	ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยประเทศ

การเชื่อมโยงกับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาร่วมกัน จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝนไม่ได้ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่โดยตรง แต่ส่งผลต่อสภาพของโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนที่สำคัญ การเปลี่ยนแปลงของสภาพผิวทางจากผลกระทบของภูมิอากาศทำให้ระดับความขรุขระของถนนเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนที่ถ่ายทอดเข้าสู่ตัวรถและ Battery Pack เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ดังนั้น ในการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับประเทศไทย จึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือน เช่น PSD หรือ Overall RMS เท่านั้น แต่ควรพิจารณาข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศร่วมด้วย เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อสภาพผิวทาง การเสื่อมสภาพของถนน และลักษณะการใช้งานของยานยนต์ในระยะยาว ซึ่งท้ายที่สุดจะสะท้อนออกมาในรูปของโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ได้รับจริงระหว่างการใช้งาน

2.4.3 ผลกระทบของฝน น้ำท่วม และสภาพผิวทางต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

สภาพผิวทางเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับแรงสั่นสะเทือนที่ยานพาหนะได้รับระหว่างการใช้งาน โดยคุณภาพของผิวทางไม่ได้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน แต่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากผลกระทบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ปริมาณการจราจร และการเสื่อมสภาพของวัสดุ หนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดในประเทศไทยคือ ปริมาณน้ำฝนและน้ำท่วม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างของผิวทางและคุณภาพการให้บริการของถนน

ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและได้รับอิทธิพลจากลมมรสุม ส่งผลให้มีฝนตกเป็นประจำทุกปี โดยปริมาณฝนเฉลี่ยของประเทศอยู่ที่ประมาณ 1,570–1,590 มิลลิเมตรต่อปี และในบางพื้นที่ เช่น จังหวัดตราดและจังหวัดระนอง มีปริมาณฝนมากกว่า 4,000 มิลลิเมตรต่อปี ทำให้หลายพื้นที่ต้องเผชิญกับปัญหาน้ำท่วมขังและการเสื่อมสภาพของผิวทางอย่างต่อเนื่อง

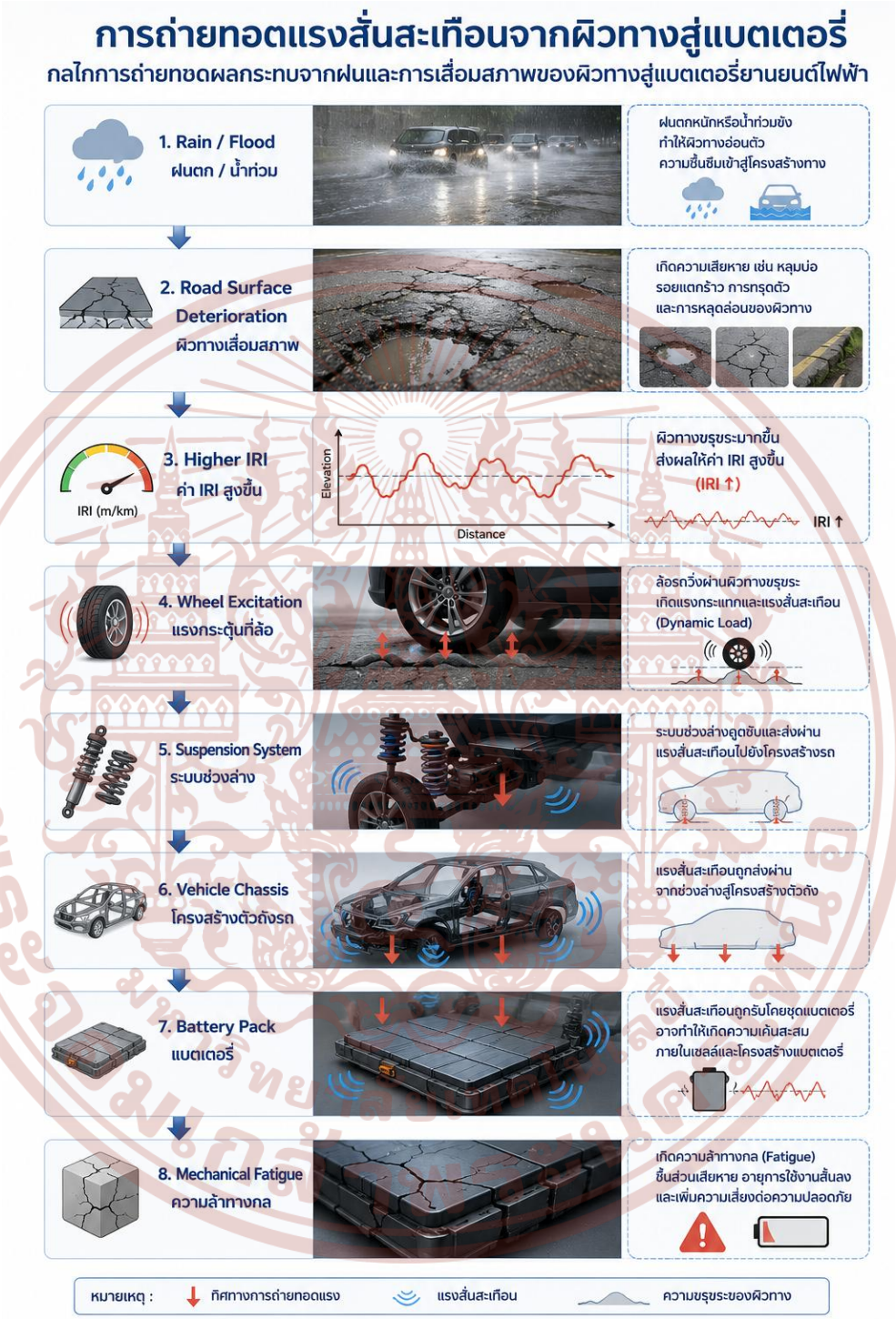
เมื่อฝนตก น้ำจะซึมผ่านรอยแตกร้าวของผิวทางลงสู่ชั้นโครงสร้างถนน หากระบบระบายน้ำไม่มีประสิทธิภาพ หรือมีการรับน้ำหนักจากการจราจรอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดการอ่อนตัวของชั้นรองพื้น (Base Course) และชั้นดินรองรับ (Subgrade) ส่งผลให้เกิดความเสียหายของผิวทางในรูปแบบต่าง ๆ เช่น

รอยแตกร้าว หลุมบ่อ การทรุดตัว และการโก่งตัวของผิวทาง ความเสียหายเหล่านี้ส่งผลให้ค่าดัชนีความเรียบขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI)



ภาพที่ 2-26 ตัวอย่างความเสียหายของผิวทางที่เกิดจากน้ำฝนและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง

จากมุมมองของวิศวกรรมยานยนต์ ความเสียหายของผิวทางส่งผลให้แรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนที่ล้อรถได้รับเพิ่มขึ้น แรงดังกล่าวจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบกันสะเทือน (Suspension System) โครงสร้างตัวถัง (Vehicle Chassis) และจุดยึดของแบตเตอรี่ (Battery Mounting Structure) ก่อนส่งต่อเข้าสู่ Battery Pack แม้ว่าระบบกันสะเทือนจะสามารถลดแรงสั่นสะเทือนได้บางส่วน แต่เมื่อยานพาหนะวิ่งบนถนนที่มีหลุมบ่อหรือความขรุขระสูงอย่างต่อเนื่อง แบตเตอรี่จะยังคงได้รับแรงเร่งและความเค้นสะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนภายใน เช่น จุดยึด บัสบาร์ ขั้วต่อไฟฟ้า ระบบระบายความร้อน และระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS)



ภาพที่ 2-27 กลไกการถ่ายทอดผลกระทบจากฝนและการเสื่อมสภาพของผิวทางสู่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

นอกจากผลกระทบต่อผิวทางแล้ว น้ำท่วมยังส่งผลต่อสภาพการขับขี่โดยตรง เนื่องจากผู้ขับขี่มักต้องลดความเร็ว เปลี่ยนช่องทางเดินรถ หรือขับผ่านพื้นที่ที่มีระดับน้ำไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดแรงกระแทกจากพื้นผิวถนนที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ (Irregular Excitation) แรงดังกล่าวมีลักษณะเป็นการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) ซึ่งมีองค์ประกอบของหลายความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน และมีลักษณะใกล้เคียงกับแนวคิดของการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มากกว่าการสั่นสะเทือนแบบไซน์

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบเหตุการณ์ฝนตกหนักและน้ำท่วมในหลายพื้นที่ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงข่ายคมนาคมและคุณภาพผิวทางอย่างต่อเนื่อง หน่วยงานด้านทางหลวงจึงต้องดำเนินการสำรวจสภาพผิวทางและวางแผนบำรุงรักษาเป็นประจำ โดยใช้ค่า IRI เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญของคุณภาพผิวทาง การเปลี่ยนแปลงของค่า IRI ภายหลังเหตุการณ์ฝนตกหนักสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านภูมิอากาศกับคุณภาพของผิวทาง ซึ่งท้ายที่สุดส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่ยานพาหนะได้รับ

ตารางที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมกับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่

ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม	ผลต่อผิวทาง	ผลต่อการสั่นสะเทือน
ฝนตกต่อเนื่อง	ผิวทางเสื่อมสภาพ	เพิ่มแรงสั่นสะเทือน
น้ำท่วม	หลุมบ่อและการทรุดตัว	เพิ่มแรงกระแทก
ความชื้นสูง	เร่งการเสื่อมของวัสดุผิวทาง	เพิ่มค่า IRI ในระยะยาว
การระบายน้ำไม่ดี	โครงสร้างทางอ่อนตัว	เพิ่มความไม่สม่ำเสมอของผิวทาง
ปริมาณจราจรสูงร่วมกับฤดูฝน	เร่งการเสียหายของถนน	เพิ่มความเค้นสะสมต่อแบตเตอรี่

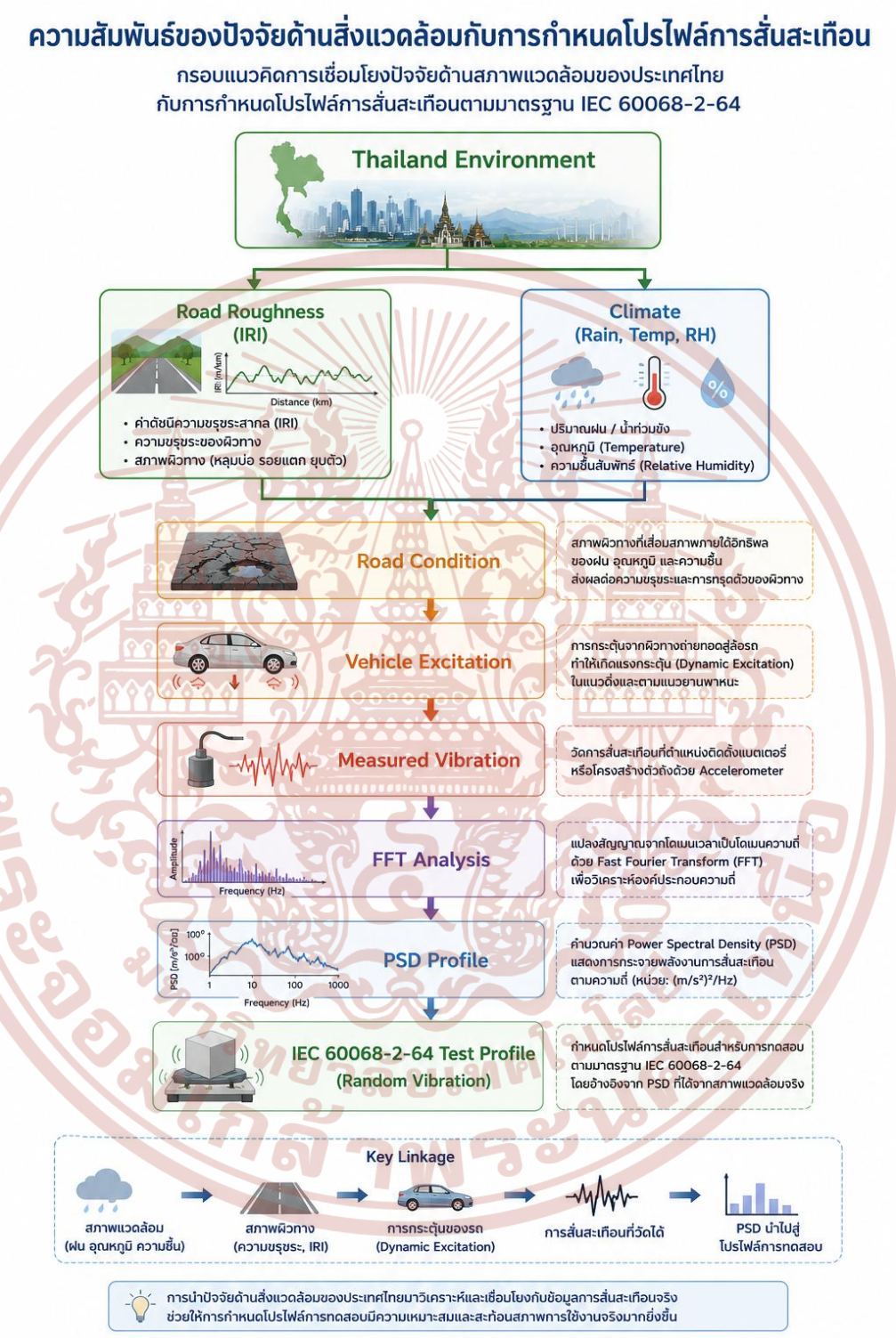
จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยด้านภูมิอากาศไม่ได้ส่งผลต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง แต่ส่งผลผ่านกระบวนการเสื่อมสภาพของผิวทาง ซึ่งทำให้ระดับความขรุขระของถนนเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นระหว่างการใช้งานจริง ดังนั้น หากต้องการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ให้สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทย ควรพิจารณาข้อมูลด้านปริมาณน้ำฝน คุณภาพผิวทาง และลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงข่ายถนนร่วมกับข้อมูลการสั่นสะเทือนภาคสนาม เพื่อให้เงื่อนไขการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

2.4.4 การเชื่อมโยงข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทยกับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

จากการทบทวนเอกสารในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยมีความสัมพันธ์โดยตรงและโดยอ้อมต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับระหว่างการขนส่งและการใช้งานจริง แม้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะกำหนดหลักการและวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่มไว้อย่างชัดเจน แต่ไม่ได้กำหนดค่า Power Spectral Density (PSD) หรือโปรไฟล์การสั่นสะเทือนเฉพาะสำหรับแต่ละประเทศ ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบจึงควรอาศัยข้อมูลด้านวิศวกรรมและข้อมูลภาคสนามของพื้นที่ที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

สำหรับประเทศไทย ปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการกำหนดโปรไฟล์การทดสอบ ได้แก่ ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่งทางถนน สภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดแรงกระตุ้น (Excitation) ที่ถ่ายทอดจากผิวทางผ่านระบบกันสะเทือน โครงสร้างตัวถัง และจุดยึดของแบตเตอรี่เข้าสู่ Battery Pack ซึ่งเป็นที่มาของความเค้นสะสม (Cumulative Fatigue Stress) ภายในโครงสร้างแบตเตอรี่

ในเชิงวิศวกรรม ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อผิวทางมีความขรุขระเพิ่มขึ้นจากการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายที่เกิดจากฝนและน้ำท่วม ค่า IRI จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แรงเร่งที่เกิดขึ้นบริเวณล้อรถเพิ่มขึ้น ระบบกันสะเทือนจึงต้องรับภาระมากขึ้น แม้ว่าระบบกันสะเทือนจะช่วยลดแรงบางส่วนได้ แต่แรงสั่นสะเทือนที่เหลือยังคงถ่ายทอดผ่านโครงสร้างรถเข้าสู่แบตเตอรี่ ซึ่งอาจทำให้เกิดความล้าของวัสดุ การคลายตัวของจุดยึด และความเสียหายของชิ้นส่วนภายใน หากเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดอายุการใช้งาน



ภาพที่ 2-28 กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย กับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์หลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะพบว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยสามารถนำมาใช้ประกอบการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบได้ในหลายด้าน ดังแสดงในตารางที่ 2-18

ตารางที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยกับพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม	**พารามิเตอร์ของ IEC 60068-2-64 ที่เกี่ยวข้อง**	**ผลกระทบที่ควรพิจารณา**
ความขรุขระของผิวทาง (IRI)	Frequency Range, PSD, Overall RMS	มีผลโดยตรงต่อระดับและลักษณะของแรงสั่นสะเทือน
ประเภทของถนน	PSD, Test Severity	ส่งผลต่อการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือน
ระยะทางการขนส่ง	Test Duration	ส่งผลต่อความเสียหายสะสมของโครงสร้าง
ความเร็วในการเดินทาง	PSD, Overall RMS	เปลี่ยนแปลงการตอบสนองของระบบกันสะเทือน
ปริมาณฝน	Test Severity	มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวทางในระยะยาว
อุณหภูมิและความชื้น	การเลือกการทดสอบร่วม (Combined Environmental Tests)	ส่งผลต่อวัสดุ ระบบซีล และการทำงานของชิ้นส่วน

จากการสังเคราะห์ข้อมูลพบว่า การเลือกค่า Frequency Range ควรอ้างอิงจากข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้จริงจากยานยนต์ที่วิ่งบนถนนของประเทศไทย เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นจริง ขณะที่การกำหนด Power Spectral Density (PSD) ควรสะท้อนระดับพลังงานของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากสภาพผิวทางและรูปแบบการขนส่งภายในประเทศ ส่วนค่า Overall RMS (Grms) ควรพิจารณาร่วมกับระดับความรุนแรงของแรงสั่นสะเทือนที่พบในสภาพแวดล้อมจริง และ Test Duration ควรสอดคล้องกับระยะเวลาการขนส่งหรือการใช้งานที่ต้องการจำลอง

ในกรณีของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การใช้โปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่อ้างอิงจากข้อมูลของประเทศอื่นโดยไม่มีการตรวจสอบความสอดคล้องกับบริบทของประเทศไทย อาจทำให้การประเมินความทนทานคลาดเคลื่อนจากสภาพการใช้งานจริง ตัวอย่างเช่น หากโปรไฟล์ที่ใช้มีระดับความรุนแรง

ต่ำกว่าสภาพถนนของประเทศไทย ผลการทดสอบอาจประเมินอายุการใช้งานสูงเกินความเป็นจริง ในทางกลับกัน หากโปรไฟล์มีความรุนแรงสูงเกินไป ก็อาจทำให้เกิดความเสียหายที่ไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริง ส่งผลต่อการออกแบบและต้นทุนของผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ ควรพิจารณาว่าการสั่นสะเทือนในประเทศไทยมีความแปรผันตามภูมิภาคและฤดูกาล ถนนในพื้นที่อุตสาหกรรม เช่น ภาคตะวันออก ซึ่งเป็นฐานการผลิตยานยนต์และแบตเตอรี่ มีลักษณะการใช้งานและปริมาณรถบรรทุกแตกต่างจากถนนในเขตเมืองหรือพื้นที่ชนบท ขณะเดียวกัน ฤดูฝนส่งผลให้สภาพผิวทางเปลี่ยนแปลงและเกิดหลุมบ่อหรือการทรุดตัวในหลายพื้นที่ จึงควรคำนึงถึงความแปรผันดังกล่าวเมื่อเลือกโปรไฟล์การทดสอบ เพื่อให้การประเมินสะท้อนสภาพการใช้งานได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

จากการวิเคราะห์ทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินความทนทานต่อการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากมาตรฐานมีความยืดหยุ่นในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับการใช้งานจริง ควรพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนโดยอาศัยข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยควบคู่กับข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง รูปแบบการขนส่ง และสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำของการประเมินความทนทานและสนับสนุนการออกแบบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานภายในประเทศ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related Research)

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน วิธีการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ และแนวโน้มของงานวิจัยในปัจจุบัน เพื่อนำมาวิเคราะห์จุดแข็ง ข้อจำกัด และช่องว่างขององค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา งานวิจัยด้านแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้ให้ความสำคัญกับผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อสมรรถนะ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากผิวทาง ระบบกันสะเทือน และระบบส่งกำลังตลอดระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งอาจทำให้เกิดความล้าของโครงสร้าง การเพิ่มขึ้นของความต้านทานภายใน การคลายตัวของจุดยึด และการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบภายในแบตเตอรี่

Xia Hua และ Alan Thomas ได้ทบทวนงานวิจัยด้านผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน และสรุปว่าแรงสั่นสะเทือนแบบสุ่มที่เกิดจากสภาพถนนมีผลต่อทั้งโครงสร้าง

ของ Battery Pack และสมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ โดยเฉพาะเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุภายในเซลล์และลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ในปี 2025 Umar Awan และคณะ ได้เผยแพร่งานทบทวนวรรณกรรมที่ครอบคลุมแหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือนในยานยนต์ไฟฟ้า กลไกการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง โดยเปรียบเทียบมาตรฐานสำคัญ ได้แก่ UN 38.3, IEC 62660-2 และ SAE J2380 พร้อมชี้ให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนแบบสุ่มจากการใช้งานจริงสามารถก่อให้เกิดความเสียหายสะสมต่อโครงสร้างของแบตเตอรี่ และการเลือกมาตรฐานหรือโปรไฟล์การทดสอบควรสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานของยานยนต์แต่ละประเภท

นอกจากนี้ งานทบทวนในวารสาร Batteries ปี 2025 ยังชี้ให้เห็นว่าแรงสั่นสะเทือนส่งผลทั้งด้านเชิงกล ความร้อน และสมรรถนะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะเมื่อเกิดร่วมกับการชาร์จ–คายประจุ หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความต้านทานภายใน การเสื่อมของชั้น SEI และการลดลงของความจุแบตเตอรี่ จึงเสนอว่าการประเมินแบตเตอรี่ในอนาคตควรพิจารณาการทดสอบหลายปัจจัยร่วมกัน (Multi-factor Testing) มากกว่าการทดสอบการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว

2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือน

งานวิจัยในช่วงหลังให้ความสำคัญกับการพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนาม (Field Measurement) มากกว่าการใช้โปรไฟล์มาตรฐานเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะการสั่นสะเทือนของยานยนต์ขึ้นอยู่กับประเภทของรถ ระบบกันสะเทือน ลักษณะถนน ความเร็ว และสภาพการใช้งาน

งานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน Journal of Power Sources ได้พัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับแบตเตอรี่ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลการวัดจากถนนจริง และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน SAE J2380 ผลการศึกษาพบว่าโปรไฟล์ที่พัฒนาจากข้อมูลภาคสนามสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้ดีกว่า และในบางแกนมีระดับพลังงานของการสั่นสะเทือนแตกต่างจากมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ

2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับมาตรฐานการทดสอบการสั่นสะเทือน

มาตรฐานที่ใช้ในการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีหลายฉบับ เช่น IEC 60068-2-64, SAE J2380, IEC 62660-2 และ UN 38.3 โดยแต่ละมาตรฐานมีวัตถุประสงค์และขอบเขตการใช้งานแตกต่างกัน

มาตรฐาน SAE J2380 แนะนำให้พัฒนาโปรไฟล์การทดสอบจากข้อมูลการวัดจริงของยานยนต์แต่ละประเภท มากกว่าการใช้โปรไฟล์เดียวกับทุกผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ IEC 60068-2-64 ที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามข้อมูลภาคสนามและสภาพแวดล้อมการใช้งาน

2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเทศไทย

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยของประเทศไทยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการประเมินสภาพผิวทาง การวิเคราะห์ค่า International Roughness Index (IRI) การตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนของยานพาหนะ และการประเมินคุณภาพถนน โดยใช้ข้อมูลจากกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และสถาบันการศึกษาต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เชื่อมโยงข้อมูลดังกล่าวกับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ยังมีจำนวนจำกัด และยังไม่พบการศึกษาที่วิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทยอย่างเป็นระบบ

ตารางที่ 2-19 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ปี	ประเด็นศึกษา	ผลการศึกษาที่สำคัญ	ความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้
Hua & Thomas	2021	ผลของแรงสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	แรงสั่นสะเทือนแบบสุ่มส่งผลต่อโครงสร้างและสมรรถนะของแบตเตอรี่	สนับสนุนการศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือน
Hooper และคณะ	2023	การพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลถนนจริง	โปรไฟล์ภาคสนามสะท้อนการใช้งานจริงได้ดีกว่ามาตรฐานทั่วไป	สนับสนุนการใช้ข้อมูลประเทศไทยในการกำหนดโปรไฟล์
Awan และคณะ	2025	ทบทวนผลกระทบของการสั่นสะเทือนและมาตรฐานการทดสอบ	เปรียบเทียบมาตรฐานและกลไกการเสื่อมของแบตเตอรี่	สนับสนุนการเลือก IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานอ้างอิง
งานวิจัยด้านสภาพผิวทางของประเทศไทย	2021–2025	IRI และคุณภาพผิวทาง	ใช้ IRI ประเมินสภาพถนนและการบำรุงรักษา	สนับสนุนการเชื่อมโยงข้อมูลสภาพถนนกับการกำหนดโปรไฟล์

2.5.5 สรุปและวิเคราะห์องค์ความรู้จากงานวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า มีองค์ความรู้จำนวนมากเกี่ยวกับผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน การพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนาม และการประยุกต์ใช้มาตรฐานสากลในการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้ข้อมูลการสั่นสะเทือนจากยุโรป อเมริกาเหนือ หรือประเทศจีน และมุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของแบตเตอรี่หรือการเปรียบเทียบมาตรฐานเป็นหลัก

ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยที่เชื่อมโยงข้อมูลสภาพถนน สภาพภูมิอากาศ และลักษณะการขนส่งของประเทศไทยเข้ากับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ยังมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงช่องว่างขององค์ความรู้ที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม และเป็นเหตุผลสำคัญที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

2.6 การวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap)

จากการทบทวนเอกสาร มาตรฐานสากล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าองค์ความรู้เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านการศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่ การพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจากข้อมูลภาคสนาม และการกำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบความทนทานของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในบริบทของประเทศไทย ยังพบประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมหลายประการ ซึ่งสามารถสรุปเป็นช่องว่างขององค์ความรู้ได้ดังนี้

2.6.1 การขาดการศึกษาที่เชื่อมโยงมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มุ่งเน้นการอธิบายหลักการของมาตรฐาน การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน และการประเมินความทนทานของผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน แต่ยังมีการศึกษาจำนวนน้อยที่วิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์ของมาตรฐานดังกล่าวมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งานของประเทศไทยเพียงใด โดยเฉพาะในด้านคุณภาพผิวทาง รูปแบบการขนส่ง และสภาพภูมิอากาศ

2.6.2 งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้ข้อมูลภาคสนามจากต่างประเทศ

การศึกษาหลายฉบับใช้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบในยุโรป สหรัฐอเมริกา จีน หรือสนามทดสอบมาตรฐาน ซึ่งมีลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน ระบบถนน และรูปแบบการใช้งานยานยนต์แตกต่างจากประเทศไทย แม้ว่าข้อมูลดังกล่าวจะมีคุณค่าทางวิชาการ แต่การนำมาใช้โดยตรงอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้อย่างครบถ้วน

2.6.3 การศึกษาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับตัวแบตเตอรี่มากกว่าปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม

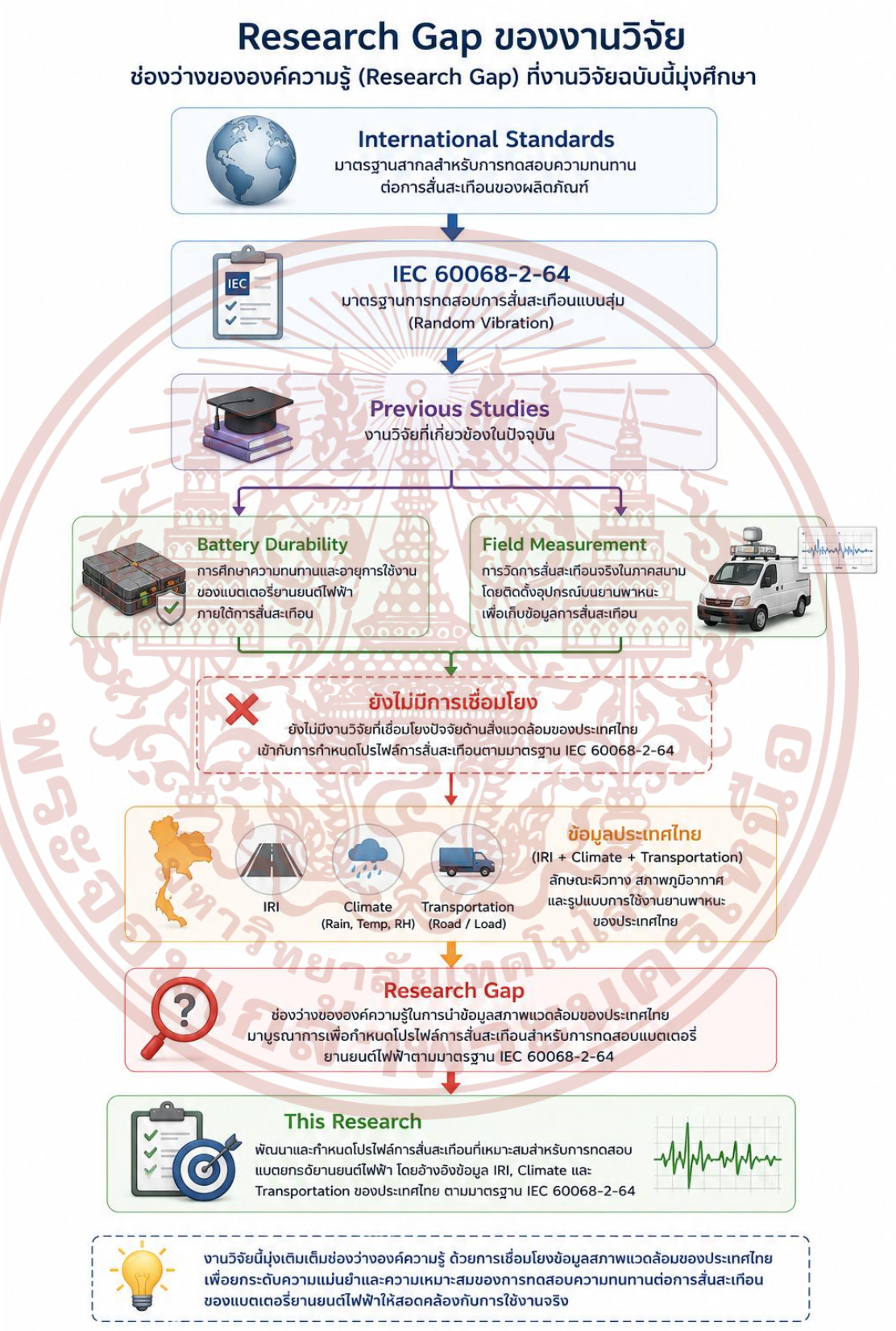
งานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์โครงสร้างของ Battery Pack การกระจายความเค้น ความล้าของวัสดุ และผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อสมรรถนะของแบตเตอรี่เป็นหลัก ขณะที่การศึกษาปัจจัยภายนอก เช่น ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ปริมาณน้ำฝน ความชื้น และการเสื่อมสภาพของถนน ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแรงสั่นสะเทือน กลับมีค่อนข้างจำกัด

2.6.4 การศึกษาของประเทศไทยยังมุ่งเน้นด้านวิศวกรรมทางหลวง

ในประเทศไทย มีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพผิวทาง การวิเคราะห์ค่า IRI และการบริหารจัดการโครงข่ายถนน โดยข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประเมินสภาพถนนของประเทศ อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบการศึกษาที่นำข้อมูลด้านวิศวกรรมทางหลวงมาเชื่อมโยงกับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 อย่างเป็นระบบ

2.6.5 ขาดกรอบการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานสำหรับประเทศไทย

จากการทบทวนวรรณกรรม ยังไม่พบกรอบแนวคิดหรือแนวทางที่บูรณาการข้อมูลด้านมาตรฐานสากล ข้อมูลการสั่นสะเทือนภาคสนาม สภาพถนน และสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย เพื่อใช้ประเมินความเหมาะสมของการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การขาดกรอบดังกล่าวทำให้การเลือกพารามิเตอร์ของการทดสอบอาจอาศัยข้อมูลจากต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทย



ภาพที่ 2-29 ช่องว่างขององค์ความรู้ (Research Gap) ที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษา

ตารางที่ 2-20 การเปรียบเทียบองค์ความรู้เดิมกับขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้

ประเด็น	งานวิจัยที่ผ่านมา	งานวิจัยฉบับนี้
ผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่	✓	✓
การใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64	✓	✓
การพัฒนาโปรไฟล์จากข้อมูลภาคสนาม	✓ (ต่างประเทศเป็นหลัก)	✓
การใช้ข้อมูล IRI ของประเทศไทย	✗	✓
การใช้ข้อมูลภูมิอากาศของประเทศไทย	✗	✓
การเชื่อมโยงข้อมูลถนนกับการกำหนด PSD	✗	✓
การประเมินความเหมาะสมของ IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทประเทศไทย	✗	✓

จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า แม้งานวิจัยที่ผ่านมาได้สร้างองค์ความรู้ที่สำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้มาตรฐานสากล แต่ยังขาดการศึกษาที่เชื่อมโยงข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยกับการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 อย่างเป็นระบบ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยสังเคราะห์ข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (IRI) สภาพภูมิอากาศ รูปแบบการขนส่ง และมาตรฐานการทดสอบ เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในบริบทของประเทศไทย อันจะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดแนวทางการทดสอบที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริง และสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศในอนาคต

2.7 กรอบแนวคิดของการวิจัย (Conceptual Framework)

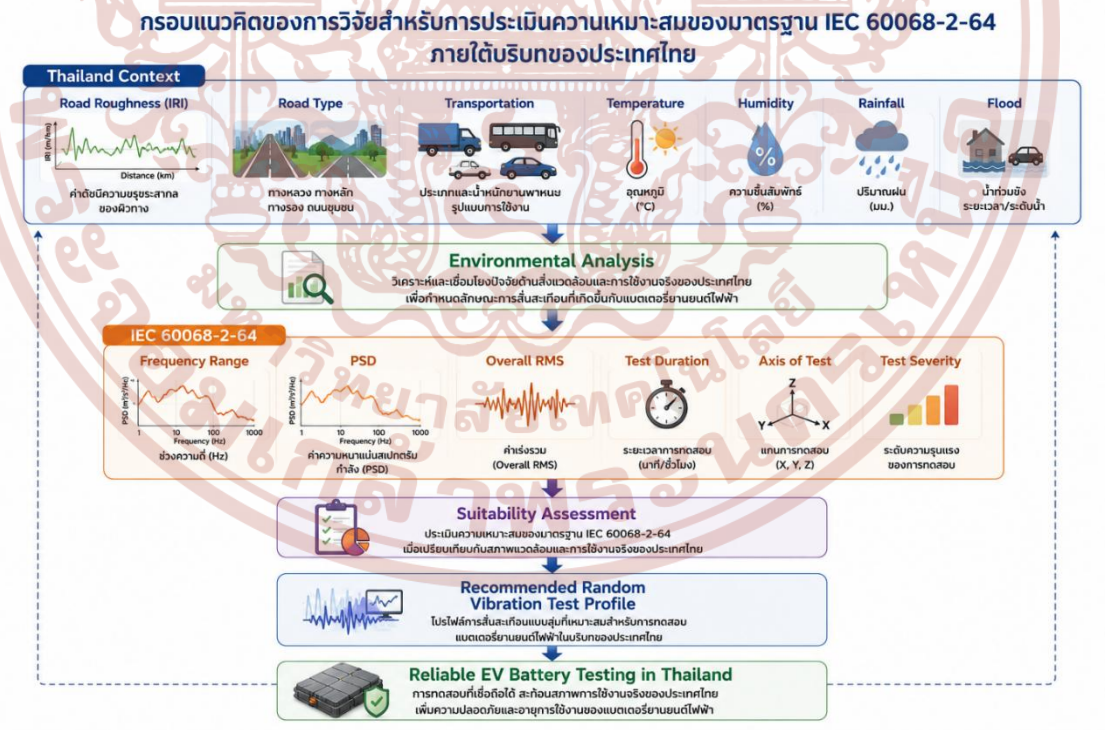
จากการทบทวนวรรณกรรม มาตรฐานสากล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่า การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ไม่สามารถพิจารณาจากข้อกำหนดของมาตรฐานเพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานจริงของพื้นที่ที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานร่วมด้วย

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีลักษณะเป็นมาตรฐานเชิงวิธีการ (Method-based Standard) ซึ่งกำหนดหลักการและแนวทางในการทดสอบ แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของการทดสอบ เช่น ช่วงความถี่ (Frequency Range) ค่า Power Spectral Density (PSD)

ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ (Test Duration) จำนวนแกนของการทดสอบ และระดับความรุนแรงของการทดสอบ (Test Severity) ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์

สำหรับประเทศไทย ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่คาดว่าจะส่งผลต่อการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน ได้แก่ ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ประเภทของถนน รูปแบบการขนส่ง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และผลกระทบของน้ำท่วม ซึ่งล้วนมีอิทธิพลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับยานยนต์และแบตเตอรี่ระหว่างการใช้งานจริง

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงกำหนดกรอบแนวคิดโดยเชื่อมโยงข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยเข้ากับพารามิเตอร์หลักของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ผ่านการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม เพื่อประเมินความเหมาะสมของการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยมีเป้าหมายเพื่อเสนอแนวทางการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น และสามารถสนับสนุนการออกแบบ การประเมินความน่าเชื่อถือ และการรับรองคุณภาพของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต



ภาพที่ 2-30 กรอบแนวคิดของการวิจัยสำหรับการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

จากกรอบแนวคิดดังกล่าว จะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนใหม่หรือปรับปรุงข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าวภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยอาศัยข้อมูลด้านสภาพแวดล้อม การขนส่ง และวิศวกรรมทางหลวงเป็นองค์ประกอบสำคัญของการวิเคราะห์ ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางสำหรับการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า และสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการวิจัยและการพัฒนามาตรฐานการทดสอบในอนาคต

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย (Research Design)

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ (Analytical Research) ที่บูรณาการการวิจัยเอกสาร (Documentary Research) ร่วมกับการใช้ข้อมูลจากการทดสอบจริง (Experimental Data) เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อกำหนดและหลักการของมาตรฐานสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทยได้มากน้อยเพียงใด รวมทั้งเสนอแนวทางในการประเมินความเหมาะสมของการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบให้สอดคล้องกับบริบทของประเทศ

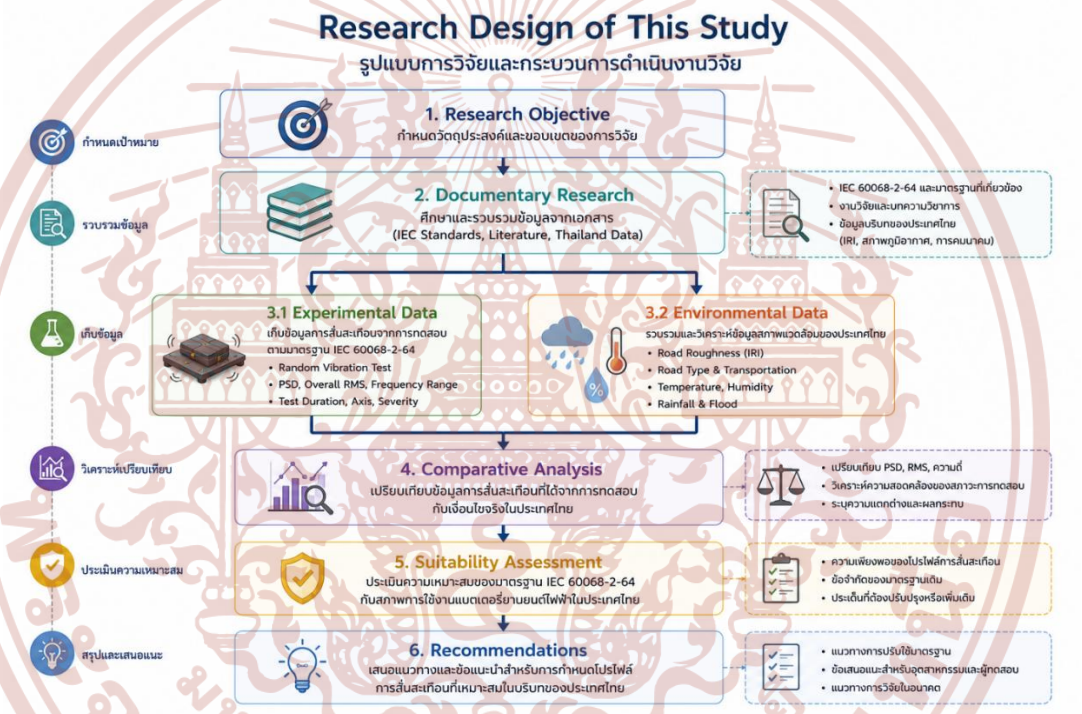
ลักษณะสำคัญของงานวิจัยนี้แตกต่างจากการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ซึ่งมุ่งศึกษาผลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตามภายใต้การควบคุมเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ไม่ได้มุ่งเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน หรือพัฒนามาตรฐานการทดสอบใหม่ แต่ใช้ผลการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากเอกสารวิชาการ มาตรฐานสากล และข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าว

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และทุติยภูมิ (Secondary Data) โดยข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่ดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ ส่วนข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เอกสารวิชาการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลด้านคุณภาพผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลด้านการขนส่ง และข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐของประเทศไทย ซึ่งนำมาสังเคราะห์และวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้แนวทางการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) และการสังเคราะห์เชิงวิชาการ (Literature Synthesis) โดยเปรียบเทียบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ได้แก่ ความขรุขระของผิวทาง (IRI) ลักษณะโครงข่ายถนน รูปแบบการขนส่ง อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝน รวมทั้งพิจารณาผลการทดสอบจริงเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ ทั้งนี้ การประเมินไม่ได้มุ่งตัดสินว่ามาตรฐาน

มีความถูกต้องหรือไม่ แต่ประเมินระดับความเหมาะสมของการนำมาตรฐานไปประยุกต์ใช้ภายใต้บริบทของประเทศไทย

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาสังเคราะห์เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งครอบคลุมทั้งด้านวิศวกรรม ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 3-1 รูปแบบการวิจัยและกระบวนการดำเนินงานวิจัย

จากภาพที่ 3-1 แสดงให้เห็นว่า งานวิจัยฉบับนี้ใช้แนวทางการวิเคราะห์แบบบูรณาการ โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลจากมาตรฐานสากล งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ควบคู่กับการใช้ผลการทดสอบจริงเป็นข้อมูลสนับสนุน จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย และสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะสำหรับการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

3.2 กรอบการดำเนินงานวิจัย (Research Framework)

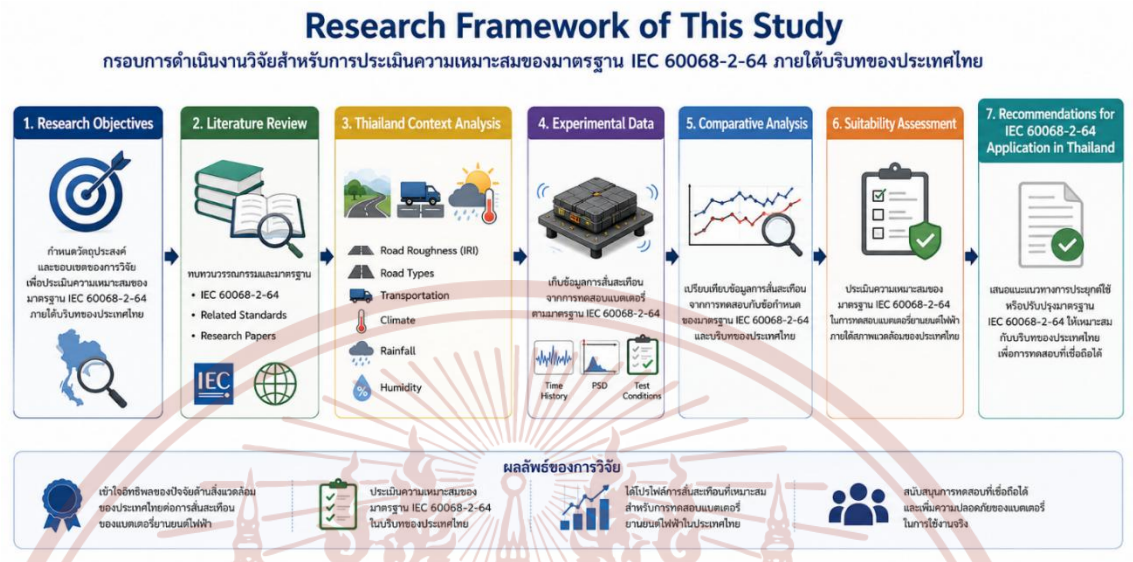
กรอบการดำเนินงานวิจัยของงานวิจัยฉบับนี้ได้รับการพัฒนาจากกรอบแนวคิดที่นำเสนอในบทที่ 2 โดยกำหนดลำดับขั้นตอนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การศึกษามาตรฐาน การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน ไปจนถึงการจัดทำข้อเสนอแนะ เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้อย่างครบถ้วน

แนวทางการดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาข้อกำหนดและหลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 รวมถึงมาตรฐานและเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้นจึงรวบรวมข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เช่น ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ประเภทของถนน รูปแบบการขนส่ง อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝน ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่แบตเตอรี่ได้รับระหว่างการใช้งานจริง

นอกจากข้อมูลด้านเอกสารและข้อมูลสภาพแวดล้อมแล้ว งานวิจัยยังใช้ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ โดยผลการทดสอบดังกล่าวใช้เพื่อยืนยันความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ ไม่ได้ใช้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน

เมื่อรวบรวมข้อมูลจากทุกแหล่งแล้ว จะดำเนินการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) และการสังเคราะห์ข้อมูล (Data Synthesis) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อประเมินว่าพารามิเตอร์การทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้มากน้อยเพียงใด

ผลการวิเคราะห์จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการประเมินความเหมาะสม (Suitability Assessment) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญของงานวิจัย โดยพิจารณาความสอดคล้องของมาตรฐานในมิติด้านวิศวกรรม ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ สภาพแวดล้อมของประเทศไทย และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ก่อนสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวทางการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย



ภาพที่ 3-2 กรอบการดำเนินงานวิจัยสำหรับการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

เพื่อให้เห็นภาพรวมของการดำเนินงานวิจัยอย่างชัดเจน สามารถสรุปลำดับขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปกรอบการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ศึกษามาตรฐาน IEC 60068-2-64 และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2	รวบรวมข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย
3	รวบรวมผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่
4	วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูล
5	ประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน
6	จัดทำข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้มาตรฐานในประเทศไทย

จากกรอบการดำเนินงานวิจัยดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่ได้อาศัยข้อมูลจากแหล่งใดแหล่งหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการบูรณาการข้อมูลจากมาตรฐานสากล งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และผลการทดสอบจริง เพื่อให้การประเมินมีความครอบคลุมและสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยมากที่สุด

3.3 แหล่งข้อมูลและการรวบรวมข้อมูล (Data Sources and Data Collection)

การดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ใช้ข้อมูลจากทั้งแหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เพื่อให้การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความครอบคลุมทั้งในด้านมาตรฐานสากล สภาพแวดล้อมของประเทศไทย และข้อมูลจากการทดสอบจริง โดยข้อมูลจากแต่ละแหล่งมีบทบาทแตกต่างกันและถูกนำมาสังเคราะห์ร่วมกันภายใต้กรอบการวิเคราะห์เดียวกัน

3.3.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data)

ข้อมูลปฐมภูมิเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน โดยผลการทดสอบดังกล่าวใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ (Empirical Evidence) เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย

การทดสอบดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งครอบคลุมการกำหนดช่วงความถี่ (Frequency Range) โปรไฟล์การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Power Spectral Density: PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และแกนของการทดสอบ ทั้งนี้ ผลการทดสอบไม่ได้ใช้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่หลายรุ่นหรือหลายเงื่อนไข แต่ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลด้านมาตรฐานและข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

ข้อมูลปฐมภูมิที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

3.3.1.1 ข้อมูลพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.3.1.2 ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

3.3.1.3 ข้อมูลจากรายงานผลการทดสอบ (Test Report)

3.3.1.4 ข้อมูลเกี่ยวกับเงื่อนไขการติดตั้งชิ้นงาน (Fixture และ Mounting Condition)

3.3.1.5 ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลปฐมภูมิที่ใช้ในการวิจัย

ประเภทข้อมูล	รายละเอียด	วัตถุประสงค์
Test Parameters	Frequency Range, PSD, Overall RMS, Duration	วิเคราะห์ความสอดคล้องกับมาตรฐาน
Test Report	ผลการทดสอบการสั่นสะเทือน	ใช้ประกอบการวิเคราะห์
Test Setup	Fixture และการติดตั้งชิ้นงาน	วิเคราะห์ความเหมาะสมของการทดสอบ
Laboratory Equipment	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	อธิบายกระบวนการทดสอบ

3.3.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data)

ข้อมูลทุติยภูมิเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากเอกสารวิชาการ มาตรฐานสากล รายงานของหน่วยงานภาครัฐ และฐานข้อมูลทางวิชาการ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

การคัดเลือกเอกสารอ้างอิงมุ่งเน้นข้อมูลที่เผยแพร่ในช่วงประมาณ 5 ปีที่ผ่านมา (ยกเว้นมาตรฐานหรือเอกสารอ้างอิงที่เป็นต้นฉบับ) เพื่อให้ข้อมูลมีความทันสมัยและสอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่

3.3.2.1 มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการสั่นสะเทือนและแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

3.3.2.2 งานวิจัยและบทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

3.2.2.3 ข้อมูลด้านวิศวกรรมทางหลวงและการขนส่งของประเทศไทย

3.2.2.4 ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย

ตารางที่ 3-3 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิที่ใช้ในการวิจัย

ประเภทข้อมูล	แหล่งข้อมูล
มาตรฐานการทดสอบ	IEC 60068-2-64, IEC 62660, SAE J2380, UN 38.3
บทความวิชาการ	วารสารนานาชาติ ฐานข้อมูล Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink
ข้อมูลคุณภาพผิวทาง	Department of Highways, Department of Rural Roads
ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ	กรมอุตุนิยมวิทยา
ข้อมูลการขนส่ง	Office of Transport and Traffic Policy and Planning และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

3.3.3 วิธีการรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลดำเนินการตามลำดับขั้นตอนดังนี้

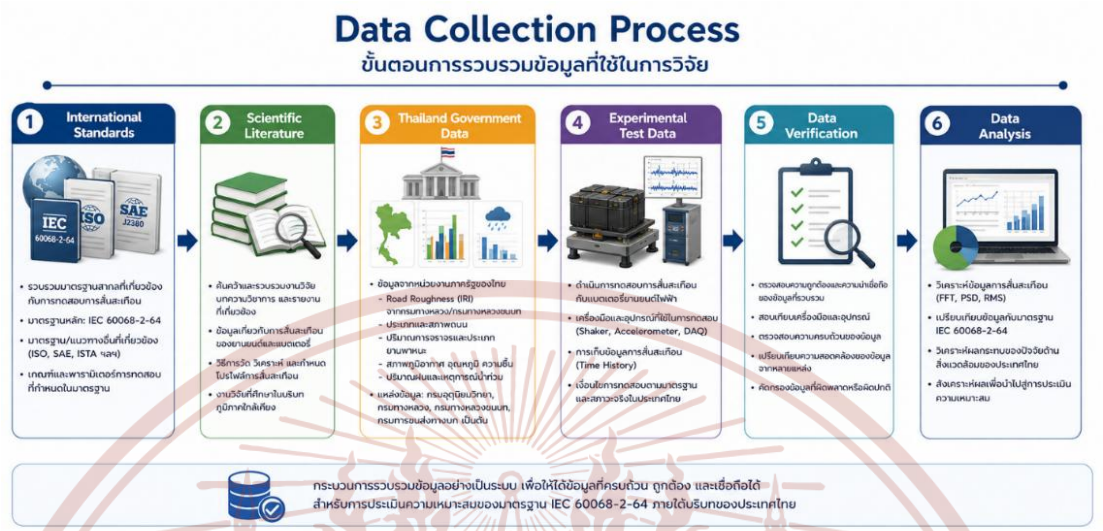
3.3.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 รวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

3.3.3.2 ทบทวนเอกสารวิชาการและงานวิจัยเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

3.3.3.3 รวบรวมข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (IRI) ระบบถนน การขนส่ง และสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยจากหน่วยงานภาครัฐ

3.3.3.4 รวบรวมผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ที่ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.3.3.5 ตรวจสอบความครบถ้วนและความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์



ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

จากการรวบรวมข้อมูลทั้งจากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิ ทำให้งานวิจัยมีฐานข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งด้านมาตรฐานสากล ผลการทดสอบจริง และข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ซึ่งช่วยให้การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นไปอย่างเป็นระบบ มีหลักฐานรองรับ และสามารถสะท้อนบริบทของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม ก่อนนำข้อมูลทั้งหมดเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

3.4 การทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ (Experimental Procedure)

การทดสอบการสั่นสะเทือนในงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเก็บข้อมูลจากการทดสอบจริงตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ (Empirical Evidence) สำหรับสนับสนุนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย ทั้งนี้ การทดสอบไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ระหว่างเงื่อนไขการทดสอบหลายรูปแบบ หรือเพื่อพัฒนามาตรฐานใหม่ แต่เป็นการดำเนินการตามข้อกำหนดของมาตรฐานเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ในงานวิจัย

การทดสอบดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการที่มีระบบทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ Electrodynamic Vibration System ซึ่งสามารถสร้างการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้ โดยระบบควบคุมการทดสอบใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control) เพื่อควบคุมให้ค่า Power Spectral Density (PSD) และค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) เป็นไปตามโปรไฟล์ที่กำหนดตลอดระยะเวลาการทดสอบ

ก่อนเริ่มการทดสอบ ได้ดำเนินการตรวจสอบสภาพของชิ้นงานและอุปกรณ์ประกอบ เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นงานอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีความเสียหายที่อาจส่งผลต่อผลการทดสอบ จากนั้นจึงติดตั้งแบตเตอรี่บน Fixture ที่ออกแบบให้สามารถถ่ายทอดแรงสั่นสะเทือนได้อย่างเหมาะสม และยึดชิ้นงานตามตำแหน่งการติดตั้งที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด เพื่อลดผลกระทบจากการสั่นพ้องของ Fixture และเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

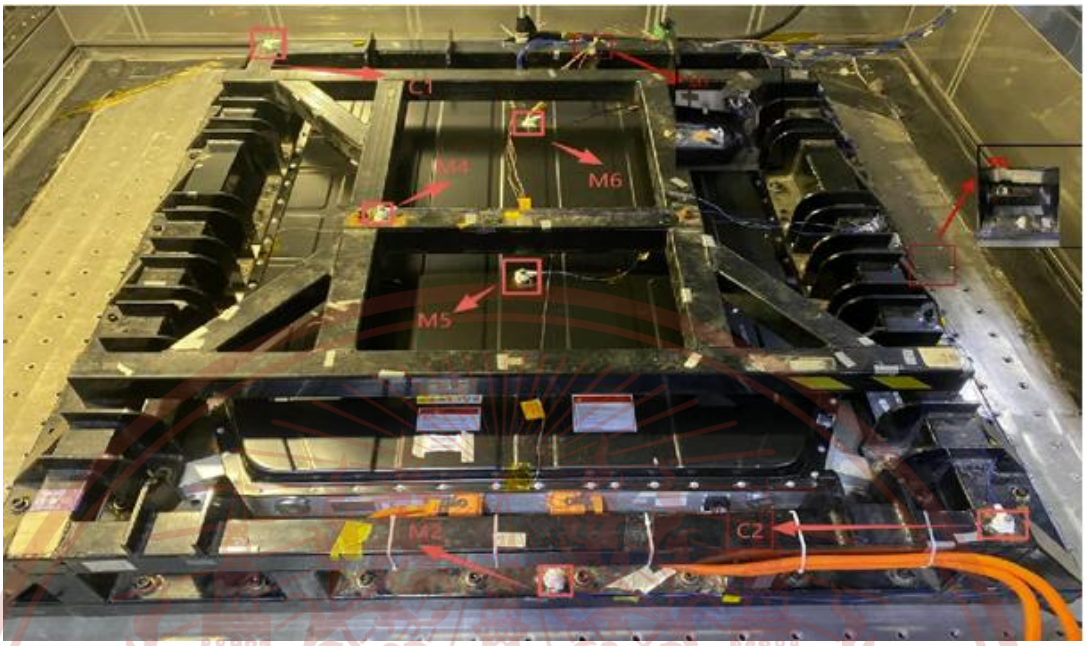
เมื่อการติดตั้งแล้วเสร็จ ได้กำหนดพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้แก่ ช่วงความถี่ (Frequency Range) โปรไฟล์ PSD ค่า Overall RMS ระยะเวลาการทดสอบ และแกนการทดสอบ ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานและข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยรายละเอียดเชิงตัวเลขจะแสดงไว้ในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์การทดสอบการสั่นสะเทือน

รายการ	**ค่า**
มาตรฐานการทดสอบ	IEC 60068-2-64
ประเภทการสั่นสะเทือน	Broadband Random Vibration
ช่วงความถี่ (Frequency Range)	ระบุค่าจริง
PSD Profile	ระบุค่าจริง
Overall RMS (Grms)	ระบุค่าจริง
ระยะเวลาทดสอบ	ระบุค่าจริง
แกนการทดสอบ	X, Y และ Z (หรือระบุค่าจริง)
สถานะของแบตเตอรี่ระหว่างทดสอบ	ระบุค่าจริง

ระหว่างการทดสอบ ระบบควบคุมจะตรวจสอบค่า PSD และค่า Overall RMS อย่างต่อเนื่องผ่าน Accelerometer ที่ติดตั้งบนระบบทดสอบ เพื่อให้แน่ใจว่าค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับโปรไฟล์ที่กำหนด หากพบว่าค่าการสั่นสะเทือนเบี่ยงเบนจากเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระบบจะปรับกำลังขับของเครื่องทดสอบโดยอัตโนมัติเพื่อรักษาความถูกต้องของการทดสอบ

ภายหลังการทดสอบ ได้ดำเนินการตรวจสอบสภาพของแบตเตอรี่ทั้งในด้านโครงสร้างภายนอก จุดยึด และองค์ประกอบที่สามารถตรวจสอบได้ เพื่อบันทึกสภาพของชิ้นงานหลังสิ้นสุดการทดสอบ โดยข้อมูลดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากมาตรฐานและเอกสารวิชาการในบทที่ 4



ภาพที่ 3-4 การติดตั้งแบตเตอรี่และอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือน ตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ตารางที่ 3-5 ลำดับขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ตรวจสอบสภาพแบตเตอรี่ก่อนการทดสอบ
2	ติดตั้งแบตเตอรี่บน Fixture
3	ตรวจสอบการยึดและตำแหน่งการติดตั้ง
4	กำหนดพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน
5	ดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือน
6	เฝ้าติดตามค่า PSD และ Overall RMS ระหว่างการทดสอบ
7	ตรวจสอบสภาพชิ้นงานหลังการทดสอบ
8	จัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

เพื่อให้ข้อมูลจากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ การดำเนินการทุกขั้นตอนเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และแนวปฏิบัติของห้องปฏิบัติการ โดยผลการทดสอบที่ได้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อตัดสินประสิทธิภาพของแบตเตอรี่โดยตรง แต่จะใช้ร่วมกับข้อมูลจากมาตรฐาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทยในบทถัดไป

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (Research Instruments and Equipment)

งานวิจัยฉบับนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลายประเภท เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การศึกษามาตรฐาน การรวบรวมข้อมูล การดำเนินการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูล และการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ เครื่องมือสำหรับการทดสอบ เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบและบันทึกข้อมูล ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ

3.5.1 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ (Test Equipment)

การทดสอบการสั่นสะเทือนดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนแบบ Electrodynamic Vibration System ซึ่งสามารถสร้างการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Broadband Random Vibration) ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ระบบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Shaker) เครื่องขยายกำลัง (Power Amplifier) ระบบควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration Controller) และอุปกรณ์ประกอบสำหรับการติดตั้งชิ้นงาน

นอกจากนี้ ยังใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) สำหรับตรวจวัดระดับการสั่นสะเทือนระหว่างการทดสอบ และ Fixture สำหรับยึดแบตเตอรี่ให้มีตำแหน่งและสภาพการติดตั้งใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด เพื่อลดผลกระทบจากการสั่นพ้องของระบบยึดจับ

ตารางที่ 3-6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือน

เครื่องมือ	รุ่น/รายละเอียด	วัตถุประสงค์
Electrodynamic Vibration System	ระบุรุ่นจริง (เช่น DIL-5400)	สร้างการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64
Power Amplifier	ระบุรุ่นจริง	จ่ายกำลังให้เครื่องทดสอบ
Vibration Controller	ระบุรุ่นจริง	ควบคุมโปรไฟล์ PSD และ Overall RMS
Accelerometer	ระบุรุ่นจริง	ตรวจวัดค่าความเร่งระหว่างการทดสอบ
Fixture	ออกแบบสำหรับ Battery Pack	ยึดชิ้นงานระหว่างการทดสอบ



ภาพที่ 3-5 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการวิจัย

3.5.2 เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบและบันทึกข้อมูล

ภายหลังการติดตั้งชิ้นงานและระหว่างการดำเนินการทดสอบ มีการใช้เครื่องมือสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของการติดตั้งและบันทึกข้อมูลการทดสอบ เพื่อให้มั่นใจว่าการทดสอบดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

เครื่องมือในกลุ่มนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบสภาพชิ้นงาน เครื่องมือวัดพื้นฐาน และระบบบันทึกข้อมูลจากเครื่องทดสอบ ซึ่งใช้สำหรับตรวจสอบความสมบูรณ์ของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ รวมทั้งจัดเก็บข้อมูลค่าการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-7 เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบและบันทึกข้อมูล

เครื่องมือ	วัตถุประสงค์
Data Acquisition System	บันทึกข้อมูลการทดสอบ
Digital Camera	บันทึกสภาพชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ
Measuring Equipment	ตรวจสอบขนาดและสภาพของชิ้นงาน
Inspection Checklist	ตรวจสอบความครบถ้วนของการติดตั้งและผลการทดสอบ

3.5.3 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยใช้ซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมการทดสอบ การจัดเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ รวมถึงการจัดทำกราฟ ตาราง และการประมวลผลข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ

ตารางที่ 3-8 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย

ซอฟต์แวร์	วัตถุประสงค์
Vibration Control Software	ควบคุมการทดสอบและกำหนดโปรไฟล์ PSD
Data Acquisition Software	บันทึกข้อมูลการทดสอบ
Microsoft Excel	จัดการและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น
โปรแกรมสร้างกราฟและแผนภาพ	จัดทำกราฟและรูปประกอบผลการวิจัย

3.5.4 เอกสารอ้างอิงและมาตรฐานที่ใช้ในการวิจัย

นอกจากเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแล้ว งานวิจัยยังใช้มาตรฐานสากล เอกสารวิชาการ และข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยเอกสารเหล่านี้ใช้เป็นกรอบอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและสนับสนุนการอภิปรายผลการวิจัย

ตารางที่ 3-9 มาตรฐานและเอกสารอ้างอิงที่ใช้ในการวิจัย

ประเภท	รายละเอียด
มาตรฐานการทดสอบ	IEC 60068-2-64
มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	IEC 62660, SAE J2380, UN 38.3
งานวิจัย	บทความวิชาการจากฐานข้อมูล Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore และ SpringerLink
ข้อมูลภาครัฐ	กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท กรมอุตุนิยมวิทยา และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

จากการจัดกลุ่มเครื่องมือและอุปกรณ์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่างานวิจัยฉบับนี้ไม่ได้อาศัยเฉพาะเครื่องมือสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนเท่านั้น แต่ยังใช้ข้อมูลจากมาตรฐานสากล เอกสารวิชาการ ซอฟต์แวร์ และฐานข้อมูลของหน่วยงานภาครัฐร่วมกัน เพื่อให้การวิเคราะห์และการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความครบถ้วน ถูกต้อง และสามารถสะท้อนบริบทของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม

3.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้ใช้แนวทางการวิเคราะห์แบบบูรณาการ (Integrated Analytical Approach) โดยสังเคราะห์ข้อมูลจากหลายแหล่งร่วมกัน เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย

เนื่องจากมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานที่กำหนดหลักการและวิธีการทดสอบ แต่ไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เหมาะสมสำหรับแต่ละประเทศโดยเฉพาะ ดังนั้น การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานจึงไม่สามารถอาศัยข้อมูลจากแหล่งใดแหล่งหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลจากหลายมิติร่วมกัน ทั้งด้านมาตรฐานสากล สภาพแวดล้อมของประเทศไทย และผลการทดสอบจริง เพื่อให้การวิเคราะห์มีความครบถ้วนและสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

การวิเคราะห์ข้อมูลของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

3.6.1 การวิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการสั่นสะเทือน

3.6.4 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน

3.6.1 การวิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อกำหนดและหลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่

3.6.1.1 ช่วงความถี่ (Frequency Range)

3.6.1.2 ค่า Power Spectral Density (PSD)

3.6.1.3 ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS)

3.6.1.4 ระยะเวลาการทดสอบ (Test Duration)

3.6.1.5 จำนวนแกนของการทดสอบ

3.6.1.6 ระดับความรุนแรงของการทดสอบ (Test Severity)

ผลการวิเคราะห์ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยและผลการทดสอบจริง

3.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินปัจจัยที่อาจส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ประกอบด้วย

3.6.2.1 ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI)

3.6.2.2 ประเภทของถนน

3.6.2.3 รูปแบบการขนส่ง

3.6.2.4 อุณหภูมิ

3.6.2.5 ความชื้นสัมพัทธ์

3.6.2.6 ปริมาณน้ำฝน

3.6.2.7 ผลกระทบของน้ำท่วมและการเสื่อมสภาพของผิวทาง

ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาว่าลักษณะการใช้งานของประเทศไทยมีผลต่อการเลือกพารามิเตอร์ของการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 หรือไม่ และในระดับใด

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการสั่นสะเทือน

ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ได้จากการดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากมาตรฐานและข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการอภิปรายผล และตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับการดำเนินการทดสอบจริง

ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ได้มุ่งเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างโปรไฟล์การสั่นสะเทือนหลายรูปแบบ แต่ใช้ผลการทดสอบเพื่ออธิบายความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้มาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย

3.6.4 การวิเคราะห์แบบบูรณาการ (Integrated Analysis)

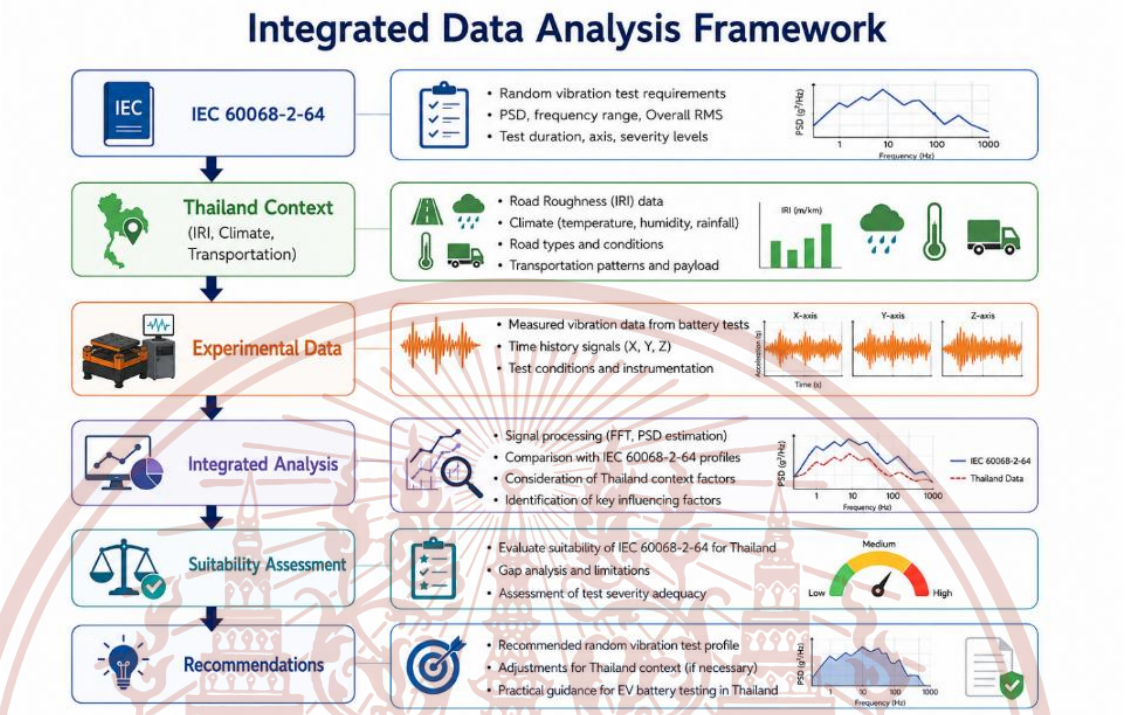
หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละส่วนแล้ว ผู้วิจัยดำเนินการสังเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดร่วมกัน โดยใช้แนวคิดการวิเคราะห์แบบบูรณาการ (Integrated Analysis) ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก 3 แหล่งหลัก ได้แก่

3.6.4.1 ข้อมูลจากมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.6.4.2 ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

3.6.4.3 ข้อมูลจากการทดสอบการสั่นสะเทือน

การบูรณาการข้อมูลดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานในบริบทของประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ ลดข้อจำกัดที่อาจเกิดจากการใช้ข้อมูลจากแหล่งเดียว และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์



ภาพที่ 3-6 กรอบการวิเคราะห์ข้อมูลแบบบูรณาการของงานวิจัย

ตารางที่ 3-10 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	ข้อมูลที่ใช้	วิธีการวิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
1	IEC 60068-2-64	วิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐาน	พารามิเตอร์การทดสอบ
2	IRI, ภูมิอากาศ, การขนส่ง	วิเคราะห์บริบทของประเทศไทย	ปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือน
3	ผลการทดสอบจริง	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	ข้อมูลสนับสนุนการประเมิน
4	ข้อมูลทั้งหมด	วิเคราะห์แบบบูรณาการ	การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 ขั้นตอน ผู้วิจัยนำผลที่ได้เข้าสู่กระบวนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยพิจารณาความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และข้อมูลจากการทดสอบจริง เพื่อสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย

3.7 การพัฒนาเกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน (Development of Suitability Assessment Criteria)

ภายหลังการวิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และผลการทดสอบการสั่นสะเทือน ผู้วิจัยได้พัฒนาเกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน (Suitability Assessment Criteria) เพื่อใช้เป็นกรอบในการประเมินว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 สามารถประยุกต์ใช้กับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทยได้ในระดับใด

เกณฑ์ดังกล่าวไม่ได้สร้างขึ้นจากความคิดเห็นของผู้วิจัยเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการสังเคราะห์จากข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 หลักการด้านวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (Reliability Engineering) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อให้การประเมินมีความเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถอธิบายเหตุผลของผลการประเมินได้อย่างชัดเจน

การประเมินแบ่งออกเป็น 5 ด้านหลัก ดังนี้

3.7.1 ความสอดคล้องด้านวิศวกรรม (Engineering Compatibility) พิจารณาว่าพารามิเตอร์ของมาตรฐาน เช่น Frequency Range, Power Spectral Density (PSD), Overall RMS, Test Duration และ Test Severity มีความเหมาะสมต่อการจำลองสภาพการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าหรือไม่

3.7.2 ความสอดคล้องกับสภาพถนนของประเทศไทย (Road Environment Compatibility) พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับข้อมูลความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ประเภทของถนน และรูปแบบการใช้งานจริงของยานยนต์ในประเทศไทย

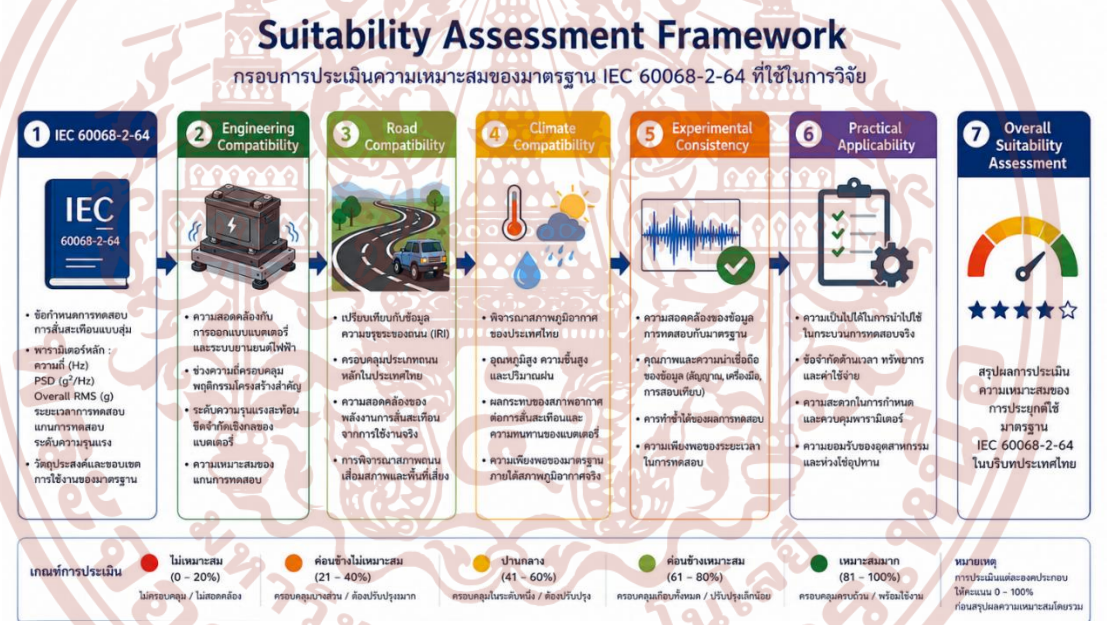
3.7.3 ความสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย (Climate Compatibility) พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน และเหตุการณ์น้ำท่วมที่อาจส่งผลต่อระดับการสั่นสะเทือนหรือสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่

3.7.4 ความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง (Experimental Consistency) พิจารณาว่าข้อกำหนดของมาตรฐานสามารถนำไปใช้ดำเนินการทดสอบจริงได้อย่างเหมาะสมหรือไม่ โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.7.5 ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (Practical Applicability) พิจารณาความเหมาะสมของการนำมาตรฐานไปใช้ในห้องปฏิบัติการและภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย ทั้งในด้านความพร้อมของเครื่องมือ ความสามารถของห้องปฏิบัติการ และการนำผลการทดสอบไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3-11 เกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

ด้านการประเมิน	รายละเอียด
Engineering Compatibility	ความสอดคล้องของพารามิเตอร์การทดสอบกับหลักวิศวกรรม
Road Environment Compatibility	ความสอดคล้องกับสภาพถนนและค่า IRI ของประเทศไทย
Climate Compatibility	ความสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย
Experimental Consistency	ความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง
Practical Applicability	ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 3-7 กรอบการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่ใช้ในการวิจัย

ผลการประเมินจากทั้ง 5 ด้านจะถูกนำมาสังเคราะห์ร่วมกันในบทที่ 4 เพื่ออภิปรายว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทยในระดับใด พร้อมทั้งเสนอข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเลือกใช้พารามิเตอร์การทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทย

3.8 สรุประเบียบวิธีวิจัย

บทที่ 3 ได้นำเสนอระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยกำหนดรูปแบบการวิจัยเป็นงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ (Analytical Research) ที่บูรณาการการวิจัยเอกสาร (Documentary Research) ร่วมกับข้อมูลจากการทดสอบจริง (Experimental Data) เพื่อให้การประเมินมีความครอบคลุมทั้งในด้านมาตรฐานสากล สภาพแวดล้อมของประเทศไทย และการดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการทบทวนงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการ เพื่อสร้างองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้นจึงรวบรวมข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เช่น ความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ลักษณะโครงข่ายถนน รูปแบบการขนส่ง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และผลกระทบของน้ำท่วม ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อระดับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง

นอกจากข้อมูลจากเอกสารและข้อมูลสภาพแวดล้อมแล้ว งานวิจัยยังใช้ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ที่ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ เพื่อใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ ทั้งนี้ การทดสอบไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่หลายรูปแบบ แต่ใช้เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้มาตรฐานและใช้ประกอบการอภิปรายผลการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการโดยใช้แนวทางการวิเคราะห์แบบบูรณาการ (Integrated Analytical Approach) ซึ่งสังเคราะห์ข้อมูลจาก 3 แหล่งหลัก ได้แก่ ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และผลการทดสอบการสั่นสะเทือน จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดเข้าสู่กระบวนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน โดยใช้เกณฑ์การประเมินที่พัฒนาขึ้นจากการสังเคราะห์องค์ความรู้ด้านมาตรฐาน วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และบริบทของประเทศไทย

กรอบการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

3.8.1 ศึกษามาตรฐาน IEC 60068-2-64 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

3.8.2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.8.3 รวบรวมข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

3.8.4 ดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

3.8.5 วิเคราะห์ข้อมูลจากมาตรฐาน ข้อมูลสภาพแวดล้อม และผลการทดสอบ

3.8.6 ประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย

3.8.7 สังเคราะห์ผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะ



ภาพที่ 3-8 ภาพรวมกระบวนการดำเนินงานวิจัย

จากระเบียบวิธีวิจัยดังกล่าว ทำให้การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่ได้อาศัยเพียงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการศึกษามาตรฐานเพียงด้านเดียว แต่เป็นการบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่งเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถอธิบายความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ มีเหตุผลทางวิศวกรรมรองรับ และสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้

บทถัดไปจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 โดยอาศัยกรอบการวิเคราะห์และเกณฑ์การประเมินที่กำหนดไว้ในบทนี้ เพื่ออภิปรายว่ามาตรฐานดังกล่าวสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานของประเทศไทยได้มากน้อยเพียงใด รวมถึงเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้มาตรฐานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์และการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64

4.1 ผลการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64

มาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration Test) สำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่งหรือการใช้งานจริง โดยมาตรฐานมุ่งเน้นการจำลองสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือนแบบหลายความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่าการสั่นสะเทือนแบบไซน์ (Sine Vibration)

จากการศึกษาข้อกำหนดของมาตรฐาน พบว่า IEC 60068-2-64 มีลักษณะเป็น มาตรฐานเชิงวิธีการ (Method-based Standard) กล่าวคือ มาตรฐานกำหนดหลักการ ขั้นตอน และข้อกำหนดในการดำเนินการทดสอบไว้อย่างชัดเจน แต่ไม่ได้กำหนดค่าโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่ตายตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภท ผู้ใช้งานจำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบ เช่น ช่วงความถี่ (Frequency Range) ค่า Power Spectral Density (PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และระดับความรุนแรงของการทดสอบ (Test Severity) ให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์

ลักษณะดังกล่าวถือเป็นข้อได้เปรียบของมาตรฐาน เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายประเภท รวมถึงแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันตามประเภทของยานยนต์ สภาพถนน และรูปแบบการขนส่ง อย่างไรก็ตาม ความยืดหยุ่นของมาตรฐานก็ทำให้ผู้ใช้งานต้องอาศัยข้อมูลสนับสนุนที่เพียงพอในการกำหนดโปรไฟล์การทดสอบ มิฉะนั้นโปรไฟล์ที่เลือกอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้

จากการวิเคราะห์ข้อกำหนดของมาตรฐาน สามารถสรุปพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการทดสอบได้ 6 ประการ ได้แก่ ช่วงความถี่ (Frequency Range) โปรไฟล์การกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือน (Power Spectral Density: PSD) ค่า Overall RMS ระยะเวลาการทดสอบ จำนวนแกนของการทดสอบ และระดับความรุนแรงของการทดสอบ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถของการทดสอบในการจำลองสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

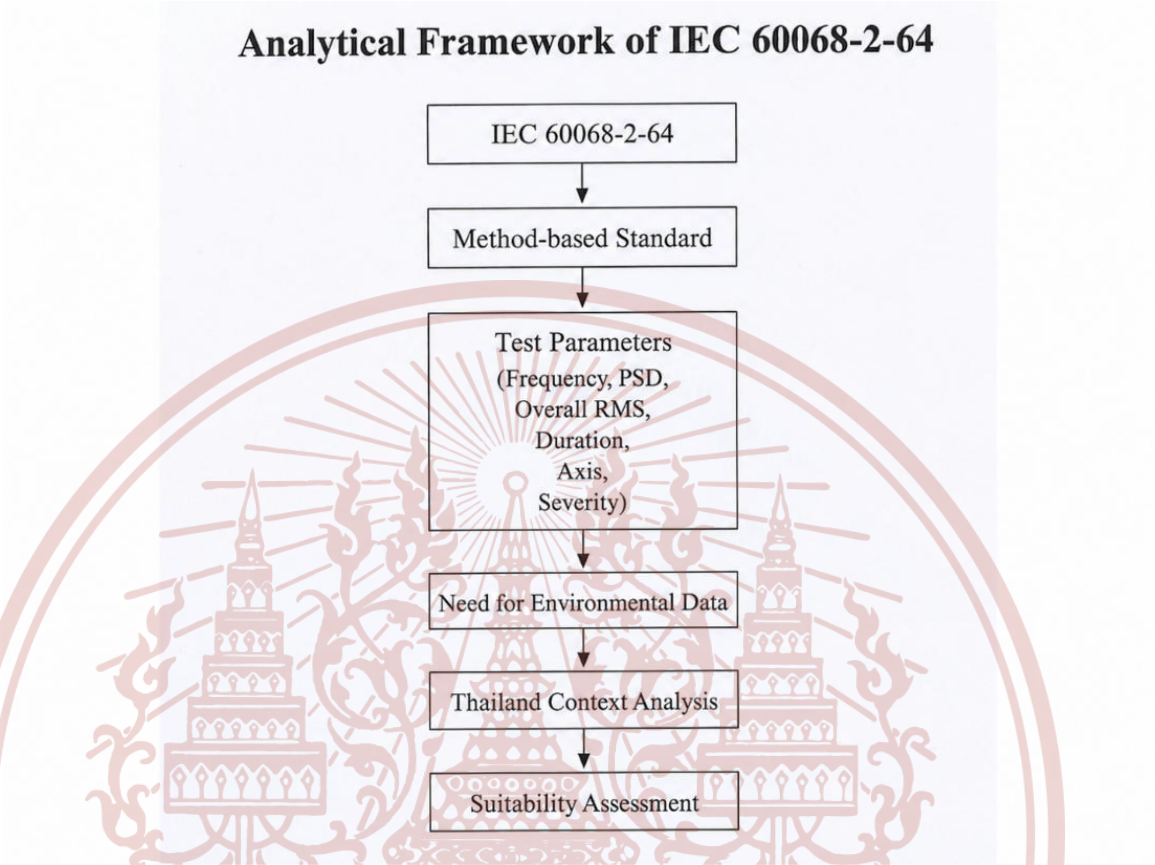
ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์สำคัญของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	**ความสำคัญต่อการประเมิน**
Frequency Range	กำหนดช่วงความถี่ที่ใช้จำลองการสั่นสะเทือน
Power Spectral Density (PSD)	กำหนดการกระจายพลังงานของแรงสั่นสะเทือน
Overall RMS (Grms)	แสดงระดับความรุนแรงโดยรวมของการสั่นสะเทือน
Test Duration	แสดงระยะเวลาการได้รับแรงสั่นสะเทือน
Axis of Test	กำหนดทิศทางของการสั่นสะเทือน
Test Severity	กำหนดระดับความรุนแรงของการทดสอบ

เมื่อพิจารณาในมุมมองของการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า พบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถสะท้อนปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความทนทานของแบตเตอรี่ได้ โดยเฉพาะการใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม ซึ่งสามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากสภาพถนน ความเร็วในการขับขี่ และการตอบสนองของระบบกันสะเทือนได้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่าการใช้การสั่นสะเทือนแบบไซน์เพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ยังพบว่ามาตรฐานไม่ได้กำหนดวิธีการเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละประเทศโดยเฉพาะ เช่น ประเทศที่มีคุณภาพผิวทางแตกต่างกัน สภาพภูมิอากาศแตกต่างกัน หรือรูปแบบการขนส่งที่แตกต่างกัน ทำให้ผู้ใช้งานจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลภาคสนามและข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ใช้งานเป็นข้อมูลประกอบการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

ในกรณีของประเทศไทย ซึ่งมีความหลากหลายของสภาพถนน ภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ปริมาณน้ำฝนค่อนข้างสูง และมีการขนส่งทางถนนเป็นหลัก การเลือกพารามิเตอร์ของการทดสอบจึงควรอาศัยข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) รูปแบบการขนส่ง และข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้การทดสอบสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้มากที่สุด



ภาพที่ 4-1 กรอบการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ที่ใช้ในการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า IEC 60068-2-64 เป็นมาตรฐานที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีหลักการที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของมาตรฐานไม่ได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของมาตรฐานเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานจริงของพื้นที่ที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจึงเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อประเมินว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 อย่างไร

4.2 ผลการวิเคราะห์บริบทของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64

การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ไม่สามารถพิจารณาได้จากข้อกำหนดของมาตรฐานเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมาตรฐานดังกล่าวเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การวิเคราะห์บริบทของประเทศไทยจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการพิจารณาว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม การขนส่ง และคุณภาพโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ มีผลต่อการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 อย่างไร

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมจากเอกสารวิชาการ หน่วยงานภาครัฐ และข้อมูลด้านวิศวกรรม พบว่าปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้มาตรฐานสามารถแบ่งออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ คุณภาพผิวทาง สภาพภูมิอากาศ รูปแบบการขนส่ง และลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

4.2.1 การวิเคราะห์ด้านคุณภาพผิวทาง

ประเทศไทยมีโครงข่ายถนนที่ครอบคลุมทั้งทางหลวง ทางหลวงชนบท ถนนในเขตเมือง และถนนในพื้นที่อุตสาหกรรม ซึ่งมีคุณภาพผิวทางแตกต่างกันตามอายุการใช้งาน ปริมาณการจราจร และการบำรุงรักษา

จากข้อมูลด้านความเรียบขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) พบว่าถนนแต่ละประเภทมีค่า IRI แตกต่างกัน ส่งผลให้ระดับแรงกระตุ้น (Road Excitation) ที่ถ่ายทอดเข้าสู่ระบบกันสะเทือนและแบตเตอรี่มีความแตกต่างกันด้วย

การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แม้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะสามารถใช้จำลองการสั่นสะเทือนแบบสุ่มได้ แต่การกำหนดค่า PSD และระดับความรุนแรงของการทดสอบควรอ้างอิงข้อมูลผิวทางที่สอดคล้องกับสภาพถนนของประเทศไทย เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงมากขึ้น

ตารางที่ 4-2 การวิเคราะห์ผลกระทบของคุณภาพผิวทางต่อการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบ

ปัจจัย	ผลต่อการทดสอบ
ค่า IRI ต่ำ	ระดับแรงสั่นสะเทือนโดยรวมต่ำกว่า
ค่า IRI สูง	เพิ่มพลังงานของการสั่นสะเทือน
หลุมบ่อและรอยต่อถนน	เพิ่มแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม
ถนนในพื้นที่อุตสาหกรรม	มีโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนสะสมจากรถบรรทุกมากขึ้น

4.2.2 การวิเคราะห์ด้านสภาพภูมิอากาศ

ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในระดับสูงตลอดทั้งปี รวมทั้งมีฝนตกตามฤดูกาล ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวทางในระยะยาว

จากการวิเคราะห์พบว่า แม้อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำฝนไม่ได้เพิ่มแรงสั่นสะเทือนต่อแบตเตอรี่โดยตรง แต่มีผลทางอ้อมผ่านการเปลี่ยนแปลงของสภาพผิวทาง เช่น การเกิดหลุมบ่อ การทรุดตัว และการแตกร้าวของผิวทาง ส่งผลให้แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานมีแนวโน้มสูงขึ้น

ผลการวิเคราะห์จึงสนับสนุนว่า การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนควรคำนึงถึงข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศร่วมกับข้อมูลด้านผิวทาง มากกว่าการพิจารณาปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว

4.2.3 การวิเคราะห์ด้านรูปแบบการขนส่ง

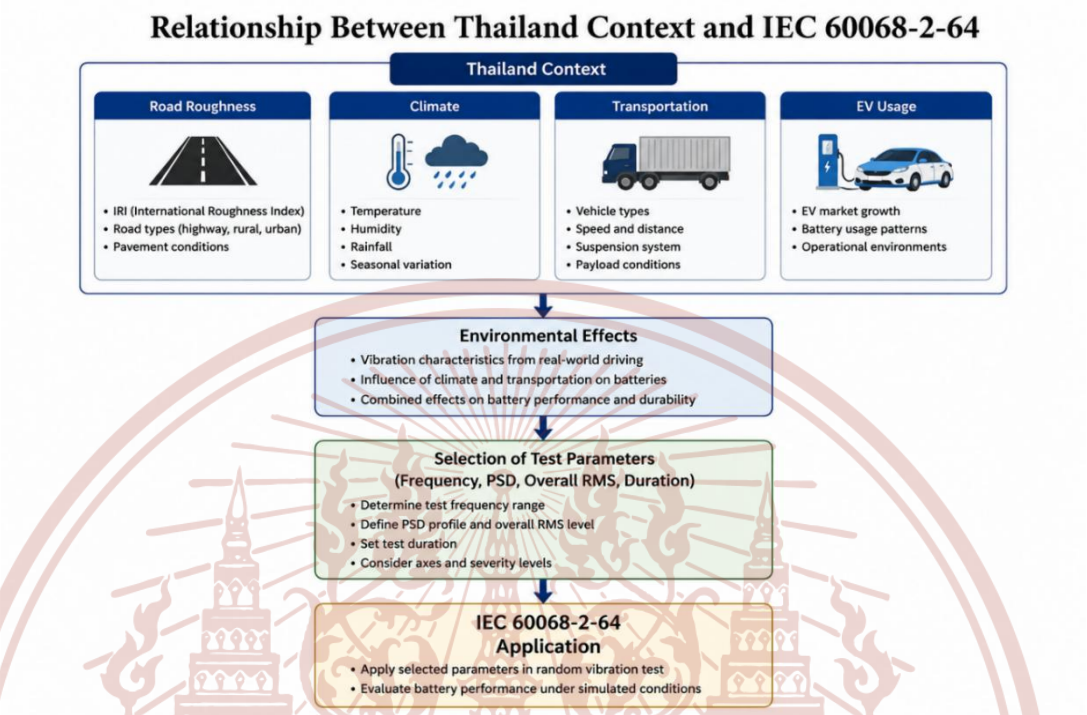
การขนส่งสินค้าภายในประเทศไทยอาศัยการขนส่งทางถนนเป็นสัดส่วนหลัก ส่งผลให้แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากการขนส่งตั้งแต่กระบวนการผลิต การกระจายสินค้า จนถึงการติดตั้งในยานยนต์

เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 พบว่าการใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่มมีความเหมาะสมในการจำลองสภาพการขนส่งทางถนน เนื่องจากสามารถครอบคลุมแรงสั่นสะเทือนหลายความถี่ที่เกิดขึ้นพร้อมกันได้ อย่างไรก็ตาม การเลือกโปรไฟล์การทดสอบควรอาศัยข้อมูลจากลักษณะเส้นทางและรูปแบบการขนส่งภายในประเทศร่วมด้วย

4.2.4 การวิเคราะห์ด้านการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในกลุ่มรถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถโดยสาร และรถเพื่อการพาณิชย์ ซึ่งแต่ละประเภทมีลักษณะการใช้งานและสภาพถนนที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แม้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับยานยนต์หลายประเภท แต่การเลือกพารามิเตอร์ของการทดสอบควรคำนึงถึงลักษณะการใช้งานของยานยนต์เป้าหมาย เช่น ประเภทของถนน ความเร็วในการเดินทาง ลักษณะการบรรทุก และสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริง เพื่อให้ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ในประเทศไทย



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของประเทศไทยกับการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

4.2.5 ข้อค้นพบจากการวิเคราะห์ (Key Findings)

จากการวิเคราะห์บริบทของประเทศไทย สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.2.5.1 คุณภาพผิวทางของประเทศไทยมีความหลากหลาย และเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือน

4.2.5.2 สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยมีผลทางอ้อมต่อระดับการสั่นสะเทือนผ่านการเสื่อมสภาพของผิวทาง

4.2.5.3 การขนส่งทางถนนซึ่งเป็นรูปแบบหลักของประเทศ สนับสนุนการใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่มตามแนวคิดของ IEC 60068-2-64

4.2.5.4 การเลือกพารามิเตอร์การทดสอบควรอาศัยข้อมูลภาคสนามและบริบทของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้การทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดสอบจริงในหัวข้อถัดไป เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับการดำเนินการทดสอบ และใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ภายใต้บริบทของประเทศไทย

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

การทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย โดยผลการทดสอบที่นำเสนอในหัวข้อนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพหรือเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่ แต่ใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนการวิเคราะห์ร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐานและข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

การวิเคราะห์ครอบคลุมการพิจารณาพารามิเตอร์การทดสอบที่ใช้จริง ความสอดคล้องของการดำเนินการทดสอบกับข้อกำหนดของมาตรฐาน และผลการตรวจสอบสภาพของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ เพื่อประเมินว่ากระบวนการทดสอบสามารถดำเนินการได้ตามหลักการของมาตรฐานและสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินความเหมาะสมได้หรือไม่

4.3.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การทดสอบ

จากการดำเนินการทดสอบ พบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยช่วงความถี่ (Frequency Range) โปรไฟล์การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Power Spectral Density: PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และแกนของการทดสอบ ซึ่งทั้งหมดกำหนดตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐาน พบว่าการดำเนินการทดสอบสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนดได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อได้

ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบจริง

รายการ	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ	ข้อกำหนดของมาตรฐาน	ความสอดคล้อง
Frequency Range	ระบุค่าจริง	IEC 60068-2-64	สอดคล้อง
PSD Profile	ระบุค่าจริง	IEC 60068-2-64	สอดคล้อง
Overall RMS	ระบุค่าจริง	IEC 60068-2-64	สอดคล้อง
Test Duration	ระบุค่าจริง	IEC 60068-2-64	สอดคล้อง
Axis of Test	ระบุค่าจริง	IEC 60068-2-64	สอดคล้อง

4.3.2 การวิเคราะห์การดำเนินการทดสอบ

จากการตรวจสอบขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ พบว่าการติดตั้งแบตเตอรี่บน Fixture การยึดชิ้นงาน การควบคุมการสั่นสะเทือน และการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบเป็นไปตามแนวทางที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60068-2-64 และแนวปฏิบัติของห้องปฏิบัติการ

การควบคุมการทดสอบแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control) ช่วยให้ค่า PSD และ Overall RMS มีความคงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ส่งผลให้สามารถจำลองสภาพการสั่นสะเทือนตามโปรไฟล์ที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4-3 การดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบชิ้นงาน

ภายหลังการทดสอบ ได้ดำเนินการตรวจสอบสภาพของแบตเตอรี่และอุปกรณ์ประกอบตามข้อกำหนดของการทดสอบ โดยพิจารณาความสมบูรณ์ของโครงสร้างภายนอก จุดยึด และลักษณะความเสียหายที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการตรวจสอบทางสายตาและวิธีการที่กำหนด

ผลการตรวจสอบดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลประกอบการอภิปรายว่าการดำเนินการทดสอบสามารถดำเนินการได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน และผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นหลักฐานประกอบการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้

ตารางที่ 4-4 ผลการตรวจสอบชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ

รายการตรวจสอบ	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	หมายเหตุ
สภาพภายนอก	ระบุผลจริง	ระบุผลจริง	×
จุดยึด	ระบุผลจริง	ระบุผลจริง	×
ความเสียหายที่สังเกตได้	ระบุผลจริง	ระบุผลจริง	×
ผลการตรวจสอบโดยรวม	ระบุผลจริง	ระบุผลจริง	×

4.3.4 การอภิปรายผลการทดสอบในบริบทของงานวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ พบว่าการดำเนินการทดสอบสามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้อย่างครบถ้วน ทั้งในด้านการกำหนดพารามิเตอร์ การควบคุมการทดสอบ และการตรวจสอบชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้สรุปความเหมาะสมของมาตรฐานสำหรับประเทศไทยได้ เนื่องจากมาตรฐานเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนตามลักษณะการใช้งานจริง

ดังนั้น ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้จึงทำหน้าที่เป็นข้อมูลสนับสนุน (Supporting Evidence) ที่ใช้ยืนยันว่ามาตรฐานสามารถนำไปใช้ดำเนินการทดสอบได้จริง ขณะที่การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยและข้อกำหนดของมาตรฐาน ซึ่งจะนำไปสู่การประเมินในหัวข้อถัดไป

4.3.5 ข้อค้นพบจากการวิเคราะห์ (Key Findings)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.3.5.1 การดำเนินการทดสอบสามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้ครบถ้วน

4.3.5.2 ระบบทดสอบสามารถควบคุมพารามิเตอร์สำคัญ เช่น Frequency Range, PSD และ Overall RMS ได้ตามที่กำหนด

4.3.5.3 ผลการทดสอบสามารถใช้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของมาตรฐาน

4.3.5.4 การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานยังจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับบริบทของประเทศไทย ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อ 4.4

4.4 ผลการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

จากผลการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64 ผลการวิเคราะห์บริบทของประเทศไทย และผลการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือน สามารถนำข้อมูลทั้งหมดมาประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้ การประเมินในหัวข้อนี้มุ่งเน้นการพิจารณาว่ามาตรฐานสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทยได้มากน้อยเพียงใด รวมถึงข้อจำกัดและแนวทางในการประยุกต์ใช้มาตรฐานให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศ

การประเมินครอบคลุมการพิจารณาความเหมาะสมของข้อกำหนดในมาตรฐาน ความสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ผลการทดสอบเพื่อสนับสนุนการประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

4.4.1 การประเมินความสอดคล้องของมาตรฐานกับบริบทของประเทศไทย

จากการวิเคราะห์พบว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีลักษณะเป็นมาตรฐานเชิงวิธีการ (Method-based Standard) ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงได้ ความยืดหยุ่นดังกล่าวถือเป็นข้อได้เปรียบสำหรับการประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

เมื่อเปรียบเทียบกับบริบทของประเทศไทย พบว่าปัจจัยด้านคุณภาพผิวทาง สภาพภูมิอากาศ รูปแบบการขนส่ง และลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า ล้วนมีผลต่อการเลือกช่วงความถี่ ค่า PSD ค่า Overall RMS และระยะเวลาการทดสอบ ดังนั้น การกำหนดโปรไฟล์การทดสอบควรอาศัยข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4-5 การประเมินความสอดคล้องของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 กับบริบทของประเทศไทย

ประเด็นการประเมิน	ผลการประเมิน
ความยืดหยุ่นของมาตรฐาน	สามารถกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ได้
การจำลองการสั่นสะเทือน	สามารถจำลองการสั่นสะเทือนแบบสุ่มได้ใกล้เคียงการใช้งานจริง
การประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ EV	มีความเหมาะสม
การรองรับสภาพถนนประเทศไทย	ควรอ้างอิงข้อมูลผิวทางและข้อมูลภาคสนามร่วมด้วย
ความเหมาะสมโดยรวม	เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

4.4.2 การประเมินจากผลการทดสอบจริง

ผลการดำเนินการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการทดสอบตามข้อกำหนดของมาตรฐานได้อย่างครบถ้วน ทั้งในด้านการติดตั้งชิ้นงาน การควบคุมค่า PSD การควบคุมค่า Overall RMS และการควบคุมระบบแบบ Closed-loop Control ส่งผลให้สามารถจำลองการสั่นสะเทือนตามโปรไฟล์ที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการดำเนินการทดสอบเป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนด และสามารถใช้ผลการทดสอบเป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้

4.4.3 การอภิปรายผลการประเมิน

จากผลการประเมินทั้งหมด พบว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นมาตรฐานหลักในการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากสามารถกำหนดพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงได้

อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับการเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนให้เหมาะสมกับสภาพถนนและรูปแบบการใช้งานของประเทศไทย หากเลือกพารามิเตอร์ที่ไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง ผลการทดสอบอาจไม่สามารถสะท้อนความทนทานของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การประยุกต์ใช้มาตรฐานจึงควรอาศัยข้อมูลภาคสนามร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐานทุกครั้ง

4.4.4 ข้อค้นพบจากการวิเคราะห์ (Key Findings)

4.4.4.1 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

4.4.4.2 การกำหนดโปรไฟล์การทดสอบควรอาศัยข้อมูลสภาพถนนและการใช้งานจริงของประเทศไทย

4.4.4.3 ผลการทดสอบจริงยืนยันว่าห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการตามมาตรฐานได้อย่างครบถ้วน

4.4.4.4 การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ควรใช้ร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น Combined Test และ IPX8 เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานจริง

ตารางที่ 4-6 สรุปผลการประเมินมาตรฐาน IEC 60068-2-64

หัวข้อ	**ผลการประเมิน**
ความเหมาะสมของมาตรฐาน	เหมาะสม
ความสามารถในการจำลองการใช้งานจริง	อยู่ในระดับดี
ความยืดหยุ่นในการกำหนดพารามิเตอร์	สูง
ความจำเป็นในการใช้ข้อมูลประเทศไทย	จำเป็น
แนวทางการประยุกต์ใช้	ใช้ข้อมูล IRI และข้อมูลการใช้งานจริงร่วมกำหนดโปรไฟล์
ผลการประเมินโดยรวม	สามารถประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้

4.4.5 ข้อค้นพบจากการวิเคราะห์ (Key Findings)

จากการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.4.5.1 มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

4.4.5.2 การเลือกพารามิเตอร์การทดสอบควรอาศัยข้อมูลสภาพถนน สภาพภูมิอากาศ และรูปแบบการใช้งานจริงของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน

4.4.5.3 ผลการทดสอบจริงยืนยันว่าห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานได้อย่างครบถ้วนและมีความน่าเชื่อถือ

4.4.5.4 การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ควรใช้ร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น Combined Vibration และ IPX8 เพื่อให้ครอบคลุมสภาพการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

4.4.5.5 การประยุกต์ใช้มาตรฐานร่วมกับข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยจะช่วยให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงและเพิ่มความน่าเชื่อถือของการประเมินแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

4.5 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์มาตรฐาน IEC 60068-2-64 บริบทของประเทศไทย และผลการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่า มาตรฐานดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่กำหนดหลักการและวิธีการทดสอบที่สามารถปรับพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ได้ โดยยังคงรักษาหลักเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานสากล

ผลการวิเคราะห์มาตรฐานแสดงให้เห็นว่า IEC 60068-2-64 มีลักษณะเป็นมาตรฐานเชิงวิธีการ (Method-based Standard) ซึ่งกำหนดแนวทางในการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration Test) โดยเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานกำหนดช่วงความถี่ ค่า Power Spectral Density (PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และระดับความรุนแรงของการทดสอบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายประเภท รวมถึงแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ในด้านบริบทของประเทศไทย พบว่าคุณภาพผิวทาง สภาพภูมิอากาศ รูปแบบการขนส่ง และลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำหนดพารามิเตอร์ของการทดสอบ เนื่องจากประเทศไทยมีความหลากหลายของสภาพถนนและมีการขนส่งทางถนนเป็นรูปแบบหลัก ดังนั้น การเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนจึงควรอาศัยข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) และข้อมูลการใช้งานจริงร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม

ผลการดำเนินการทดสอบแสดงให้เห็นว่าห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการทดสอบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ได้อย่างครบถ้วน ทั้งในด้านการติดตั้งชิ้นงาน การควบคุมการสั่นสะเทือน และการตรวจสอบพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบ โดยระบบควบคุมแบบ Closed-loop Control สามารถรักษาค่าพารามิเตอร์สำคัญให้อยู่ในช่วงที่กำหนดตลอดระยะเวลาการทดสอบ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้

จากการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน พบว่า IEC 60068-2-64 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานจริง หากเลือกโปรไฟล์การสั่นสะเทือนไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ผลการทดสอบอาจไม่สามารถสะท้อนความทนทานของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ควรพิจารณาเฉพาะการทดสอบการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว แต่ควรใช้ร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น

การทดสอบ Combined Vibration การทดสอบการป้องกันน้ำระดับ IPX8 และการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การประเมินครอบคลุมสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น

กล่าวโดยสรุป ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสนับสนุนว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นมาตรฐานหลักในการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย โดยควรประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทยและข้อมูลภาคสนาม เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ รวมทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทที่ 5
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในบริบทของประเทศไทย โดยมุ่งศึกษาหลักการและข้อกำหนดของมาตรฐาน วิเคราะห์ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและการใช้งานของประเทศไทย รวมถึงวิเคราะห์ผลการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้มาตรฐานดังกล่าวกับสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การศึกษาข้อกำหนดและหลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแรงสั่นสะเทือน และการวิเคราะห์ผลการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการ มาตรฐานสากล และผลการทดสอบจริงเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ ก่อนนำมาสังเคราะห์เพื่อประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานภายใต้บริบทของประเทศไทย

ผลการศึกษาข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 พบว่า มาตรฐานดังกล่าวเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration Test) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการขนส่งและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยมาตรฐานกำหนดหลักการ วิธีการดำเนินการทดสอบ และแนวทางในการควบคุมพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ช่วงความถี่ (Frequency Range) ค่า Power Spectral Density (PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และแกนของการทดสอบ ทั้งนี้ มาตรฐานไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่ตายตัวสำหรับผลิตภัณฑ์ทุกประเภท แต่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ได้ ส่งผลให้สามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแตกต่างกันได้อย่างหลากหลาย

ผลการวิเคราะห์บริบทของประเทศไทยแสดงให้เห็นว่า ประเทศไทยมีปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมหลายประการที่ส่งผลต่อการเกิดแรงสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพผิวทางที่มีความหลากหลาย สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น รูปแบบการขนส่งที่อาศัยการขนส่งทางถนนเป็นหลัก และลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อระดับและลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ของการทดสอบ

ตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 จึงควรอาศัยข้อมูลด้านความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index: IRI) ข้อมูลการใช้งานของยานยนต์ และข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าพบว่า ห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการทดสอบได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ทั้งในด้านการติดตั้งชิ้นงาน การควบคุมระบบการสั่นสะเทือน การควบคุมค่า PSD และค่า Overall RMS รวมถึงการตรวจสอบพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบ โดยระบบควบคุมแบบ Closed-loop Control สามารถรักษาค่าพารามิเตอร์ให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนดตลอดระยะเวลาการทดสอบ ส่งผลให้การจำลองสภาพการสั่นสะเทือนมีความต่อเนื่องและมีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้ ผลการตรวจสอบชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบสามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์เพื่อสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้

เมื่อสังเคราะห์ผลการศึกษาทั้งหมดร่วมกัน พบว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่มีความยืดหยุ่นในการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบ สามารถปรับให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ได้ อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือน หากเลือกพารามิเตอร์ที่ไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและรูปแบบการใช้งานของประเทศไทย ผลการทดสอบอาจไม่สามารถสะท้อนความทนทานของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่า การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ควรพิจารณาเฉพาะการทดสอบการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว แต่ควรดำเนินการร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การทดสอบการสั่นสะเทือนร่วมกับอุณหภูมิและความชื้น (Combined Vibration Test) การทดสอบการป้องกันน้ำ (IPX8) และการทดสอบด้านความทนทานอื่น ๆ เพื่อให้การประเมินมีความครอบคลุมและสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ได้มากยิ่งขึ้น

โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สามารถใช้เป็นมาตรฐานหลักสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม หากมีการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบโดยอาศัยข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานจริงของประเทศร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับห้องปฏิบัติการ ผู้ผลิตแบตเตอรี่ ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้า และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในการกำหนดแนวทางการทดสอบที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาการทดสอบด้านความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ตารางที่ 5-1 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์การวิจัย	วิธีการดำเนินการ	ผลการวิจัย	ข้อสรุป
1 ศึกษาหลักการและข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า	ศึกษามาตรฐาน IEC 60068-2-64 และเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้อง	พบว่ามาตรฐานเป็นการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration) และกำหนดแนวทางในการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบ ได้แก่ Frequency Range, PSD, Overall RMS, Test Duration และ Axis of Test	มาตรฐานมีความยืดหยุ่นและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ประเภท
2 วิเคราะห์บริบทของประเทศไทยที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้มาตรฐาน	วิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพถนน สภาพภูมิอากาศ การขนส่ง และการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า	พบว่าคุณภาพผิวทางรูปแบบการขนส่ง และสภาพแวดล้อมของประเทศไทยมีผลต่อการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบ	การกำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนควรอ้างอิงข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน
3 วิเคราะห์ผลการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า	วิเคราะห์พารามิเตอร์การทดสอบ ขั้นตอนการดำเนินงาน และผลการตรวจสอบชิ้นงาน	การทดสอบสามารถดำเนินการตามข้อกำหนดของมาตรฐานได้อย่างครบถ้วน และระบบสามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์สำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ผลการทดสอบสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้
4 ประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับประเทศไทย	สังเคราะห์ผลการศึกษาจากมาตรฐาน บริบทประเทศไทย และผลการทดสอบจริง	พบว่ามาตรฐานสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้ หากเลือกพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง	มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย และควรใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศร่วมกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า มาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย ทั้งในด้านหลักการของมาตรฐาน ความสามารถในการดำเนินการทดสอบ และความสอดคล้องกับลักษณะสภาพแวดล้อมและการใช้งานของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานไม่ได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของมาตรฐานเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ด้วย

ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งกำหนดให้การทดสอบการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random Vibration Test) เป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการขนส่งและการใช้งาน โดยอาศัยการกำหนดค่า Power Spectral Density (PSD) เพื่ออธิบายการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ แตกต่างจากการทดสอบแบบไซน์ (Sine Vibration Test) ที่ใช้ความถี่เพียงค่าเดียวในแต่ละช่วงเวลา การใช้การสั่นสะเทือนแบบสุ่มจึงสามารถจำลองแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงได้ใกล้เคียงกว่า โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ต้องเผชิญกับแรงสั่นสะเทือนจากหลายแหล่งพร้อมกัน เช่น แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาร่วมกับบริบทของประเทศไทย พบว่าคุณภาพผิวทางเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระดับการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ เนื่องจากประเทศไทยมีโครงข่ายถนนที่ประกอบด้วยทางหลวง ถนนในเขตเมือง ถนนในพื้นที่อุตสาหกรรม และถนนชนบท ซึ่งมีค่าความขรุขระของผิวทางแตกต่างกัน ส่งผลให้ระดับแรงสั่นสะเทือนที่ถ่ายทอดเข้าสู่ตัวรถและแบตเตอรี่แตกต่างกันด้วย ผลการวิจัยจึงสนับสนุนแนวคิดที่ว่า การกำหนดโปรไฟล์การทดสอบไม่ควรใช้ค่ามาตรฐานเดียวกันสำหรับทุกประเทศ แต่ควรอ้างอิงข้อมูลสภาพถนนและรูปแบบการใช้งานของพื้นที่ที่ผลิตภัณฑ์จะถูกนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณา แม้ว่าความร้อนและความชื้นจะไม่ได้เพิ่มแรงสั่นสะเทือนโดยตรง แต่สามารถเร่งการเสื่อมสภาพของพื้นผิวถนน ทำให้เกิดหลุมบ่อ รอยแตกร้าว และความไม่เรียบของผิวทาง ซึ่งส่งผลให้ระดับการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นในระยะยาว ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบที่คำนึงถึงข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศร่วมกับข้อมูลด้านคุณภาพผิวทาง จะช่วยให้ผลการทดสอบสะท้อนสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทยได้ดียิ่งขึ้น

ผลการดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ระบบทดสอบสามารถควบคุมพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ช่วงความถี่ ค่า PSD ค่า Overall RMS และระยะเวลาการทดสอบ ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยระบบควบคุมแบบ Closed-loop Control สามารถรักษาความเสถียรของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานได้

ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือและระบบควบคุมที่ได้มาตรฐานสามารถดำเนินการทดสอบตาม IEC 60068-2-64 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยยังพบว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 มีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจากมาตรฐานไม่ได้กำหนดโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เหมาะสมสำหรับแต่ละประเทศหรือแต่ละประเภทของยานยนต์ ผู้ใช้งานจึงจำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบด้วยตนเอง หากไม่มีข้อมูลภาคสนามที่เพียงพอ อาจทำให้โปรไฟล์ที่เลือกไม่สามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างถูกต้อง ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการประเมินความทนทานของแบตเตอรี่

นอกจากนี้ การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ควรอาศัยการทดสอบการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในสภาพการใช้งานจริง แบตเตอรี่ต้องเผชิญกับหลายปัจจัยพร้อมกัน ทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น การกระแทก และการสัมผัสน้ำ ดังนั้น การใช้ผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น การทดสอบ Combined Vibration และการทดสอบระดับการป้องกันน้ำ IPX8 จะช่วยให้การประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น และสามารถสะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้ดีกว่าการใช้ผลการทดสอบเพียงวิธีเดียว

จากผลการวิจัยทั้งหมด สามารถอภิปรายได้ว่า ความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับประเทศไทยไม่ได้เกิดจากตัวมาตรฐานเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการประยุกต์ใช้มาตรฐานร่วมกับข้อมูลด้านวิศวกรรม สภาพแวดล้อม และรูปแบบการใช้งานของประเทศไทย การบูรณาการข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้มากขึ้น ส่งผลให้การประเมินความทนทานของแบตเตอรี่มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำผลไปใช้สนับสนุนการออกแบบ การผลิต และการรับรองคุณภาพของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 5-2 การอภิปรายผลการวิจัยเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ประเด็น	ผลการวิจัย	การอภิปราย
หลักการของมาตรฐาน IEC 60068-2-64	เป็นมาตรฐานเชิงวิธีการที่กำหนดแนวทางการทดสอบ	มีความยืดหยุ่นและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์หลายประเภท
ความเหมาะสมกับประเทศไทย	สามารถประยุกต์ใช้ได้	ต้องกำหนดพารามิเตอร์จากข้อมูลสภาพถนนและสภาพแวดล้อมของประเทศไทย
ผลการดำเนินการทดสอบ	ดำเนินการได้ตามข้อกำหนด ของมาตรฐาน	แสดงให้เห็นถึงความพร้อมของห้องปฏิบัติการและความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ
การประเมินแบตเตอรี่ EV	สามารถใช้ประเมินความทนทานต่อการสั่นสะเทือนได้	ควรใช้ร่วมกับการทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น Combined Vibration และ IPX8
การประยุกต์ใช้ในอนาคต	สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดการทดสอบ	ควรพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่อ้างอิงข้อมูลภาคสนามของประเทศไทย

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยเรื่อง "การประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย" ก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านวิชาการ ด้านอุตสาหกรรม และด้านการพัฒนามาตรฐานการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.3.1 ประโยชน์ด้านวิชาการ

งานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย ซึ่งยังมีงานวิจัยในประเด็นดังกล่าวค่อนข้างจำกัด ผลการศึกษาช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของมาตรฐานกับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น คุณภาพผิวทาง สภาพภูมิอากาศ และรูปแบบการขนส่ง ที่ส่งผลต่อการกำหนดพารามิเตอร์ของการทดสอบ

นอกจากนี้ งานวิจัยยังแสดงให้เห็นแนวทางในการวิเคราะห์และประเมินความเหมาะสมของมาตรฐานสากลก่อนนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศ ซึ่งสามารถใช้เป็นกรอบแนวคิดสำหรับการศึกษามาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมและการทดสอบผลิตภัณฑ์อื่นในอนาคต

5.3.2 ประโยชน์ต่อห้องปฏิบัติการทดสอบ

ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับห้องปฏิบัติการที่ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ในการกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมของประเทศไทย โดยเฉพาะการเลือกช่วงความถี่ ค่า Power Spectral Density (PSD) ค่า Overall Root Mean Square (Overall RMS) ระยะเวลาการทดสอบ และระดับความรุนแรงของการทดสอบ

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสนับสนุนการวางแผนการทดสอบ การเตรียมอุปกรณ์ การออกแบบ Fixture และการควบคุมคุณภาพของการดำเนินการทดสอบ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

5.3.3 ประโยชน์ต่อผู้ผลิตแบตเตอรี่และอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

ผู้ผลิตแบตเตอรี่ ผู้ประกอบรถยนต์ไฟฟ้า และผู้พัฒนาชิ้นส่วนสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประกอบการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของประเทศไทย ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินความทนทานของแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม ลดความเสี่ยงของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการใช้งาน รวมทั้งสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ การปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างของแบตเตอรี่ และการวางแผนการทดสอบด้านความน่าเชื่อถือก่อนการผลิตเชิงพาณิชย์

5.3.4 ประโยชน์ต่อการพัฒนามาตรฐานการทดสอบในประเทศไทย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทยร่วมกับข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการจัดทำแนวปฏิบัติ (Guideline) สำหรับการเลือกพารามิเตอร์การทดสอบที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของประเทศไทย

ในระยะยาว ข้อมูลจากงานวิจัยสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่อ้างอิงข้อมูลภาคสนามของประเทศไทย เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการทดสอบและยกระดับมาตรฐานการทดสอบด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในประเทศให้สอดคล้องกับแนวปฏิบัติในระดับสากล

5.3.5 ประโยชน์ต่อการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยด้านความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากสภาพการใช้งานจริง (Road Load Measurement) การพัฒนาโปรไฟล์การสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับประเทศไทย และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัล เช่น

แบบจำลองเชิงตัวเลข (Simulation) และ Digital Twin เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์

5.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้ว่างานวิจัยนี้จะสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ และแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่อาจส่งผลต่อขอบเขตของผลการวิจัย และควรได้รับการพิจารณาในการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

5.4.1 ข้อจำกัดด้านข้อมูลสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลด้านคุณภาพผิวทาง สภาพภูมิอากาศ และรูปแบบการขนส่งจากเอกสารวิชาการ รายงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลอ้างอิงที่เผยแพร่แล้วเป็นหลัก โดยไม่ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากสภาพการใช้งานจริงบนถนนของประเทศไทย (Road Load Measurement) ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงเป็นการอ้างอิงจากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมลักษณะการใช้งานในทุกพื้นที่ของประเทศ

5.4.2 ข้อจำกัดด้านการทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์การทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64 เป็นหลัก โดยไม่ได้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานการสั่นสะเทือนอื่น เช่น ISO 16750-3, SAE J2380 หรือมาตรฐานเฉพาะของผู้ผลิตรถยนต์ ซึ่งอาจมีรายละเอียดของโปรไฟล์การสั่นสะเทือนและเงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ งานวิจัยไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแบตเตอรี่แต่ละประเภท หรือศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การทดสอบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จึงไม่สามารถใช้ผลการวิจัยเพื่อสรุปประสิทธิภาพของแบตเตอรี่แต่ละรุ่นได้โดยตรง

5.4.3 ข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้ผลการวิจัย

แม้ว่ามาตรฐาน IEC 60068-2-64 จะสามารถประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้ แต่การกำหนดพารามิเตอร์การทดสอบยังคงต้องอาศัยข้อมูลเฉพาะของผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำหนักของแบตเตอรี่ โครงสร้างของชุดแบตเตอรี่ ระบบยึดติด และตำแหน่งการติดตั้งในยานยนต์ ดังนั้น ผลการวิจัยนี้จึงควรใช้เป็นแนวทางในการกำหนดหลักการทดสอบ มากกว่าการนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้กับผลิตภัณฑ์ทุกประเภทโดยตรง

5.4.4 ข้อจำกัดด้านขอบเขตของการประเมิน

การประเมินในงานวิจัยนี้ครอบคลุมเฉพาะความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 ในการจำลองการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยยังไม่ได้ประเมินผลกระทบของปัจจัย

ด้านสิ่งแวดล้อมอื่นอย่างละเอียด เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น การกระแทก การกัดกร่อน หรือการแช่น้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจเกิดขึ้นร่วมกันในสภาพการใช้งานจริง

แม้ว่าจะมีการกล่าวถึงการทดสอบ Combined Vibration และการทดสอบ IPX8 ในฐานะการทดสอบที่ควรใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มความครอบคลุมของการประเมิน แต่การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ผลของการทดสอบดังกล่าวในเชิงเปรียบเทียบ จึงยังไม่สามารถสรุปผลกระทบของการทดสอบหลายสภาวะร่วมกันได้

ตารางที่ 5-3 สรุปข้อจำกัดของงานวิจัย

ประเด็น	ข้อจำกัด	ผลกระทบต่อการวิจัย
ข้อมูลสภาพแวดล้อม	ใช้ข้อมูลจากเอกสารและรายงานที่มีอยู่	อาจยังไม่ครอบคลุมสภาพการใช้งานจริงทุกพื้นที่
การทดสอบ	ศึกษาเฉพาะ IEC 60068-2-64	ไม่สามารถเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่นได้
ผลิตภัณฑ์	มุ่งเน้นแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า	ไม่สามารถอ้างอิงกับผลิตภัณฑ์ทุกประเภทได้โดยตรง
การประเมิน	เน้นการสั่นสะเทือนเป็นหลัก	ยังไม่ครอบคลุมปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นทั้งหมด
การประยุกต์ใช้	ต้องกำหนดพารามิเตอร์ตามข้อมูลของแต่ละผลิตภัณฑ์	ไม่สามารถใช้ค่าทดสอบเดียวกับทุกผลิตภัณฑ์ได้

5.5 สรุปข้อจำกัดของงานวิจัย

โดยสรุป แม้ว่างานวิจัยนี้จะสามารถประเมินความเหมาะสมของมาตรฐาน IEC 60068-2-64 สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ แต่การนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ควรคำนึงถึงข้อจำกัดด้านข้อมูลภาคสนาม ขอบเขตของการทดสอบ และความแตกต่างของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท ทั้งนี้ ข้อจำกัดดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดประเด็นการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต เพื่อยกระดับความแม่นยำและความครอบคลุมของการประเมินความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมทางหลวง. (2566). *รายงานสภาพทางหลวงและดัชนีความเรียบของผิวทาง (International Roughness Index: IRI).* กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.

กรมทางหลวงชนบท. (2566). *รายงานผลการสำรวจคุณภาพผิวทางของประเทศไทย.* กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวงชนบท.

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน. (2567). *อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2566). *รายงานสถานการณ์การขนส่งของประเทศไทย*. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงคมนาคม.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2567). *รายงานอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย.* กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

Barreras, J. V., Schaltz, E., & Andreasen, S. J. (2014). Lifetime assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Applied Energy,* 122, 157–166.

Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J., & Van den Bossche, P. (2016). Critical review of state of health estimation methods of lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 56, 572–587.

Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

International Electrotechnical Commission. (2007). *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)* (IEC 60068-2-6:2007).

International Electrotechnical Commission. (2007). *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)* (IEC 60068-2-6:2007).

International Electrotechnical Commission. (2019). *Environmental testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, broadband random and guidance* (IEC 60068-2-64:2008+AMD1:2019 CSV).

International Electrotechnical Commission. (2020). *Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock* (IEC 60068-2-27:2008).

International Organization for Standardization. (2012). *Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 3: Mechanical loads* (ISO 16750-3:2012).

Lalanne, C. (2009). *Mechanical vibration and shock analysis: Random vibration* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, *110*(2), 377–382.

SAE International. (2015). *Vibration testing of electric vehicle batteries* (SAE J2380:2015).

Spotnitz, R., & Franklin, J. (2003). Abuse behavior of high-power lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, *113*(1), 81–100.

Steinberg, D. S. (2000). *Vibration analysis for electronic equipment* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Wang, T., Tseng, K., Zhao, J., & Wei, Z. (2014). Structural integrity of lithium-ion battery packs under vibration environments. *Journal of Power Sources*, *245*, 241–250.

Zhang, X., Lu, L., Xiong, R., & Chen, Z. (2018). Mechanical reliability of lithium-ion batteries under vibration loading. *Energy*, *148*, 1138–1148.



ภาคผนวก ก

รายละเอียดพารามิเตอร์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64



IEC 60068-2-64

Edition 2.0 2008-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Environmental testing –
Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, broadband random and guidance

Essais d'environnement –
Partie 2-64: Essais – Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande et guide

IEC 60068-2-64:2008

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

ENVIRONMENTAL TESTING –

Part 2-64: Tests-Test Fh: Vibration, broadband random and guidance

1 Scope

This part of IEC 60068 demonstrates the adequacy of specimens to resist dynamic loads without unacceptable degradation of its functional and/or structural integrity when subjected to the specified random vibration test requirements.

Broadband random vibration may be used to identify accumulated stress effects and the resulting mechanical weakness and degradation in the specified performance. This information, in conjunction with the relevant specification, may be used to assess the acceptability of specimens.

This standard is applicable to specimens which may be subjected to vibration of a stochastic nature resulting from transportation or operational environments, for example in aircraft, space vehicles and land vehicles. It is primarily intended for unpackaged specimens, and for items in their transportation container when the latter may be considered as part of the specimen itself. However, if the item is packaged, then the item itself is referred to as a product and the item and its packaging together are referred to as a test specimen. This standard may be used in conjunction with IEC 60068-2-47:2005, for testing packaged products.

If the specimens are subjected to vibration of a combination of random and deterministic nature resulting from transportation or real life environments, for example in aircraft, space vehicles and for items in their transportation container, testing with pure random may not be sufficient. See IEC 60068-3-8:2003 for estimating the dynamic vibration environment of the specimen and based on that, selecting the appropriate test method.

Although primarily intended for electrotechnical specimens, this standard is not restricted to them and may be used in other fields where desired (see Annex A).

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-300: *International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements – Part 312: General terms relating to electrical measurements – Part 313: Types of electrical measuring instruments – Part 314: Specific terms according to the type of instrument*

IEC 60068-1: *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 60068-2-6: *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)*

IEC 60068-2-47:2005, *Environmental testing – Part 2-47: Tests – Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests*

requirements for sinusoidal excitation are given in test Fc (IEC 60068-2-6) and those for random excitation are given in this standard.

In the case of sinusoidal excitation, it should be remembered that, in the case of non-linear resonances, the resonance frequencies will change depending on the direction of the frequency variation during the sweep. For random excitation non linearities can influence the resonance behaviour. For sinusoidal and random excitation, the amplification at resonances may be dependent on the magnitude of the input vibration.

For the vibration response investigations of an 'undefined type' specimen or package, it may be necessary to measure different signals such as driving force or velocity. If specified by the relevant specification, for example, the spectra of the mechanical impedance of the specimen should be calculated before and after the test.

NOTE Mechanical impedance and other similar terms are defined in ISO 2041.

5 Severities

The test severity is determined by the combination of all the following parameters:

- test frequency range;
- r.m.s. value of acceleration;
- shape of acceleration spectral density;
- duration of testing.

Each parameter shall be prescribed by the relevant specification. They may be:

a) chosen from the values given in 5.1 to 5.4;

b) chosen from the examples in Annex A for different environmental conditions;

c) derived from the known environment if this gives significantly different values; or

d) derived from other known sources of relevant data (for example IEC 60721-3).

5.1 Test frequency range

If option a) is chosen, then f_1 and f_2 may be chosen from the following values in Hz:

a) f_1 : 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100;

b) f_2: 20; 50; 100; 200; 500; 1 000; 2 000; 5 000.

Frequencies f_1 and f_2 and their relation to the acceleration spectral density are shown in the spectra examples in Annex A.

5.2 RMS value of acceleration

If option a) is chosen, then the r.m.s. value of acceleration (nominal value in Figure 1) between f_1 and f_2 may be chosen from the following values in m/s^2:

1; 1,4 ; 2; 2,8; 3,5; 5; 7; 10; 14; 20; 28; 35; 50; 70; 100; 140; 200; 280

NOTE The value of 10 m/s^2 is ascribed to g_n for the purposes of this standard.

5.3 Shape of acceleration spectral density curve

This test specifies an acceleration spectral density curve with increasing, decreasing and flat horizontal portions (see spectra A.1 – A.4). For a standard test one of the spectra shall be selected according to the dynamic environment of the test item. The relevant acceleration spectral density values shall be calculated by the control system taking the r.m.s. value, frequencies and shape of the spectrum into account. In special cases, it may be appropriate

to specify an individually shaped acceleration spectral density curve. In these cases the relevant specification shall prescribe the shape as a function of frequency. The different levels and their corresponding frequency ranges, (break points) shall be selected whenever possible from the values given in 5.1 and 5.2 and the spectra A.1 – A.4.

5.4 Test duration

The duration of testing shall be given in the relevant specification or may be selected from the following series: 1; 2; 5; 10; 20; 30; 45; 60 min; 2; 5; 8; 12; 24 h, with a tolerance of +5 %.

6 Preconditioning

If the relevant specification calls for preconditioning it shall then prescribe the conditions.

7 Initial measurements and functional performance test

The specimen shall be submitted to visual, dimensional and functional and any other checks as prescribed by the relevant specification.

8 Testing

8.1 General

Testing follows the sequence prescribed by the relevant specification. The different steps are as follows:

– initial vibration response investigation, if prescribed;
– low-level excitation for equalization before proceeding to the full level test in one continuous mode;
– random vibration testing;
– final vibration response investigation, if prescribed.

The specimen shall be excited in each of the preferred testing axes in turn, unless otherwise prescribed by the relevant specification. The order of the testing along these axes is not important, unless prescribed by the relevant specification. If the specimen is sensitive to gravity, for example a mercury tilt switch, then vibration may only be applied in its normal service position and shall be prescribed by the relevant specification.

The control ASD of each frequency at the reference point shall be derived from one checkpoint if single-point control is used or from a number of checkpoints where multipoint control is utilized.

In the latter case, the relevant specification shall state which checkpoints shall be used to control to the specified level for the following control strategies, (see also 4.7):

– the average value of the ASD of each checkpoint (average control);
– the weighted average value of the ASDs at the checkpoints (weighted average control); or
– the maximum or minimum extreme values of each frequency of all checkpoints (extremal control).

In either of the above cases of multipoint control, the control spectrum becomes a fictitious one without a reference to an existing checkpoint.

Special action is necessary when a specimen normally intended for use with vibration isolators needs to be tested without them. See also IEC 60068-2-47.

8.2 Initial vibration response investigation

If not especially prescribed by the relevant specification, a vibration response investigation is not required. However, the relevant specification may prescribe a vibration response investigation in each axis either before, or both before and after, the random vibration testing.

When prescribed by the relevant specification, the dynamic response for at least one point on the specimen in the defined frequency range shall be investigated. The number and position of the response points should be clearly defined in the relevant specification. The vibration response investigation may be performed with sinusoidal or random vibration in a test frequency range and with a test level as prescribed by the relevant specification. Reference is made to IEC 60068-2-6 for sinusoidal vibration and to this standard for random vibration excitation. Also see IEC 60068-3-8 for more information and the advantages and disadvantages of each method.

The response investigation shall be carried out with a test level selected so that the response of the specimen remains less than during random testing but at a sufficiently high level to detect critical frequencies.

When sinusoidal excitation is used, at least one sweep cycle over the test frequency range prescribed by the relevant specification shall be performed with an acceleration amplitude ≤10 m/s^2 or a displacement amplitude of ±1 mm, whichever is less. The vibration amplitude shall be adapted to the r.m.s. acceleration value of the random test, in order to prevent a higher stress on the specimen than during random vibration testing. A sweep rate of 1 octave per minute shall be applied to determine the frequencies and amplitudes of the resonances. If there is concern about exciting the structure to a full resonance then a faster sweep rate may be applied as an indication of frequency and relative amplitude of the resonance within the frequency band of interest. Investigations at slower sweep rates or sweeping back and forth around a known resonance may be required but should be limited to the minimum time to obtain the results required. Undue dwell time is to be avoided. The vibration amplitude may be varied as required.

The response investigation with random vibration shall be carried out taking into account that the time of the test shall be long enough to minimize stochastical variations in the response. A random vibration response test shall be carried out using a spectrum between f_1 and f_2. At the lowest resonance frequency there shall be a minimum of five spectral lines within the frequency band at –3 dB of the resonance peak.

When random excitation is used, the r.m.s. value of acceleration should be not more than 25 % of the value specified to be used during the random vibration testing. The duration shall be as short as possible, but at least long enough to make an analysis with DOF = 120 possible degrees of freedom (see Figure 3). If the resonance response is observed and documented periodically during the full level test, special resonance investigations are not necessary.

The specimen shall be in functioning mode during this investigation if required by the relevant specification. Where the mechanical vibration characteristics cannot be assessed because the specimen is functioning, an additional vibration response investigation with the specimen not functioning shall be carried out. During this stage, the specimen shall be examined in order to determine the critical frequencies which shall then be stated in the test report.

8.3 Low-level excitation for equalization prior to testing

Prior to random vibration testing at the specified level, a preliminary random excitation at lower levels with the real specimen may be necessary to equalize the signal and for preliminary analysis. It is important that at this stage the level of the acceleration spectral density applied is kept to a minimum.

The permitted durations for preliminary random excitation are the following:

- below –12 dB of the specified r.m.s. value level: no time limit;
- from –12 dB to –6 dB of the specified r.m.s. value level: not more than 1,5 times the specified test duration;
- between –6 dB and 0 dB of the specified r.m.s. value level: not more than 10 % of the specified test duration.

The duration of the preliminary random excitation shall not be subtracted from the specified test duration for random vibration testing.

8.4 Random testing

8.4.1 General

The relevant specification shall select the appropriate test frequency range (f_1 to f_2), the overall r.m.s. value of acceleration, the shape of the acceleration spectral density curve and test duration. When prescribed by the relevant specification, multiple measurements of the acceleration spectral density and of the r.m.s. value of acceleration, at the checkpoints, shall be made at appropriate intervals in order to verify that the random input spectrum is stationary, and this shall be stated in the test report.

8.4.2 Intermediate measurements and functional performance

When prescribed by the relevant specification, the specimen shall be functioning during a prescribed time interval during the testing, and its performance shall be checked (see Clause B.6).

8.5 Final vibration response investigation

If the relevant specification has prescribed an initial response investigation, it may also require an additional vibration response investigation on completion of the random testing, in order to determine whether changes or failures have occurred since the initial vibration response investigation. The final response investigation shall then be performed in the same manner at the same response points and with the same parameters as used for the initial vibration response investigation. Guidelines for the use of changes in vibration response, for example change of critical frequencies, is given in IEC 60068-3-8. The relevant specification shall state what action is to be taken if different results are obtained in the two investigations.

9 Recovery

It is sometimes necessary to provide a period of time after testing and before final measurements in order to allow the specimen to attain the same conditions, for example of temperature, as existed for the initial measurements. The relevant specification shall then prescribe the conditions for recovery.

10 Final measurements and functional performance

The specimen shall be submitted to visual, dimensional and functional checks and any others as prescribed by the relevant specification.

The relevant specification shall provide the criteria upon which the acceptance or rejection of the specimen shall be based.

For the evaluation of vibration response results see IEC 60068-3-8.

Spectrum A.3 Equipment in wheeled vehicles

For details see specifications referenced in the Tables A.5 and A.6 below.

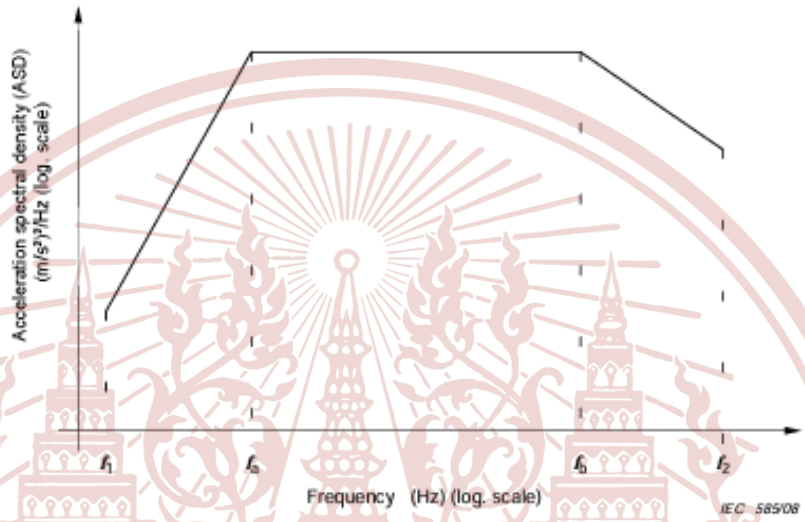


Figure A.3 – Equipment in wheeled vehicles – Frequency/amplitude break points

Table A.5 – Categories for spectrum: equipment in wheeled vehicles

Category No.	Description	Suggested time per axis h	axes No.	Specification/ reference
1	Automobile; chassis mounted.	8	3	
	Automobile; Installation area: Engine compartment (bay); attached to body or on the radiator.			
2 a	Vertical	8	1	
2 b	Horizontal longitudinal	8	1	
2 c	Horizontal transversal	8	1	
	Railcars; body mounted; mass of test specimen < 500 kg.			IEC 61373, Cat. 1 B
3 a	Vertical	5	1	
3 b	Horizontal longitudinal	5	1	
3 c	Horizontal transversal	5	1	
	Railcars; bogie mounted; mass of test specimen < 100 kg.			IEC 61373, Cat. 2
4 a	Vertical	5	1	
4 b	Horizontal longitudinal	5	1	
4 c	Horizontal transversal	5	1	
	Railcars; axle mounted; mass of test specimen < 50 kg.			IEC 61373, Cat. 3
5 a	Vertical	5	1	
5 b	Horizontal longitudinal	5	1	
5 c	Horizontal transversal	5	1	

Table A.6 – Break points for spectrum: equipment in wheeled vehicles

Category	f_1	ASDf_1	f_a	f_b	ASDf_a,f_b	f_2	ASDf_2	$a_{r.m.s.}$ value.
No.	Hz	$(m/s^2)^2/Hz$	Hz	Hz	$(m/s^2)^2/Hz$	Hz	$(m/s^2)^2/Hz$	m/s^2
1	10	10	10	50	10	1 000	0,1	33,8
2 a	5	0,4	11	15	4,0	200	0,1	11,0
2 b	5	0,15	12	18	0,9	200	0,07	6,7
2 c	5	0,15	10	15	1,9	200	0,15	10,0
3 a	5	1,86	5	20	1,86	150	0,034	7,8
3 b	5	0,9	5	20	0,9	150	0,016	5,4
3 c	5	0,37	5	20	0,37	150	0,0067	3,5
4 a	5	1,49	10	100	11,8	250	1,9	42,4
4 b	5	0,33	10	100	2,62	250	0,42	20,0
4 c	5	1,13	10	100	8,96	250	1,44	37,0
5 a	10	68,6	20	100	545	500	22	300
5 b	10	13,9	20	100	110	500	4,45	135
5 c	10	55,5	20	100	441	500	17,84	270

Spectrum A.4 Equipment installed in airplanes and helicopters

For details see specifications referenced in the Tables A.7 and A.8 below.

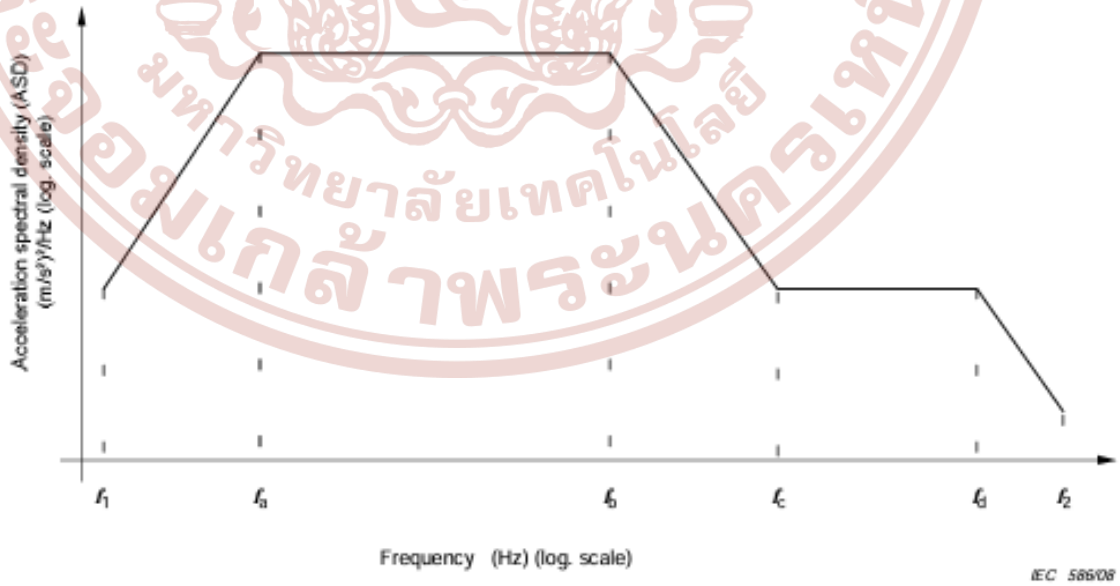


Figure A.4 – Equipment installed in airplanes and helicopters

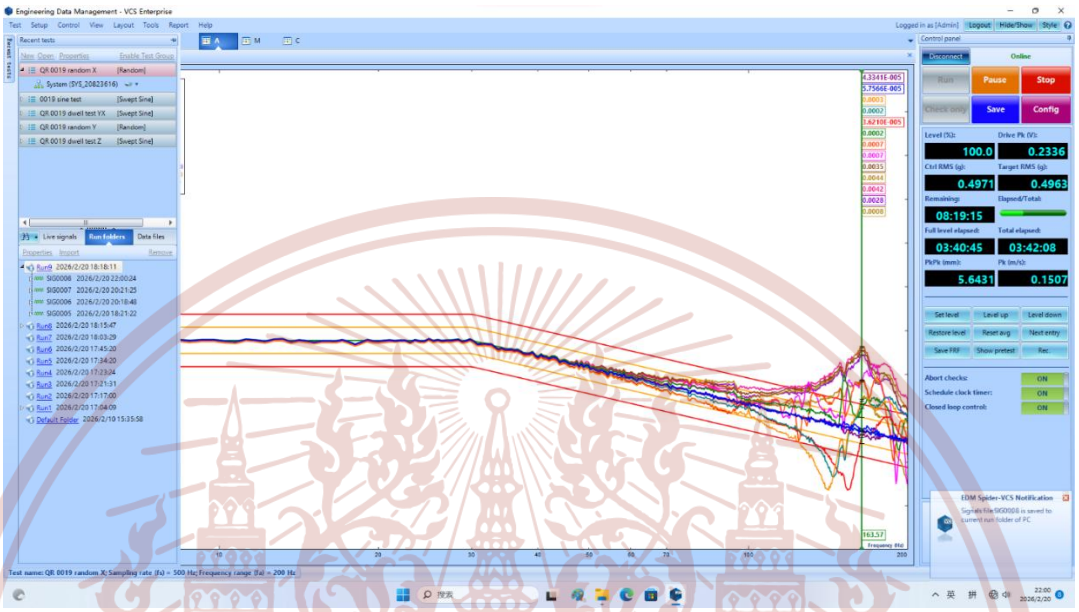
ตาราง ก-1 พารามิเตอร์หลักของการทดสอบการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน IEC 60068-2-64

พารามิเตอร์	**รายละเอียด**
Test Method	Broadband Random Vibration
มาตรฐานอ้างอิง	IEC 60068-2-64
ลักษณะการสั่นสะเทือน	Random Vibration
Frequency Range	กำหนดตามข้อกำหนดของการทดสอบ
PSD Profile	กำหนดตามโปรไฟล์การทดสอบ
Overall RMS	กำหนดตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์
Test Duration	กำหนดตามแผนการทดสอบ
Test Axis	X, Y และ Z
Sweep Rate	ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน (กรณีที่เกี่ยวข้อง)
Control Method	Closed-loop Control
Measurement System	Accelerometer พร้อมระบบควบคุมการสั่นสะเทือน

ตาราง ก-2 วัตถุประสงค์ของพารามิเตอร์แต่ละรายการ

พารามิเตอร์	**วัตถุประสงค์**
Frequency Range	กำหนดช่วงความถี่ของแรงสั่นสะเทือน
PSD	กำหนดการกระจายพลังงานของการสั่นสะเทือน
Overall RMS	แสดงระดับความรุนแรงโดยรวมของการสั่นสะเทือน
Test Duration	กำหนดระยะเวลาที่ชิ้นงานได้รับแรงสั่นสะเทือน
Axis of Test	จำลองแรงสั่นสะเทือนในแต่ละทิศทาง
Control Method	ควบคุมให้การสั่นสะเทือนเป็นไปตามโปรไฟล์ที่กำหนด
Accelerometer	ตรวจวัดและส่งข้อมูลกลับเข้าสู่ระบบควบคุม

ภาพ ก-3 กราฟ Power Spectral Density (PSD) ที่ใช้ในการทดสอบ



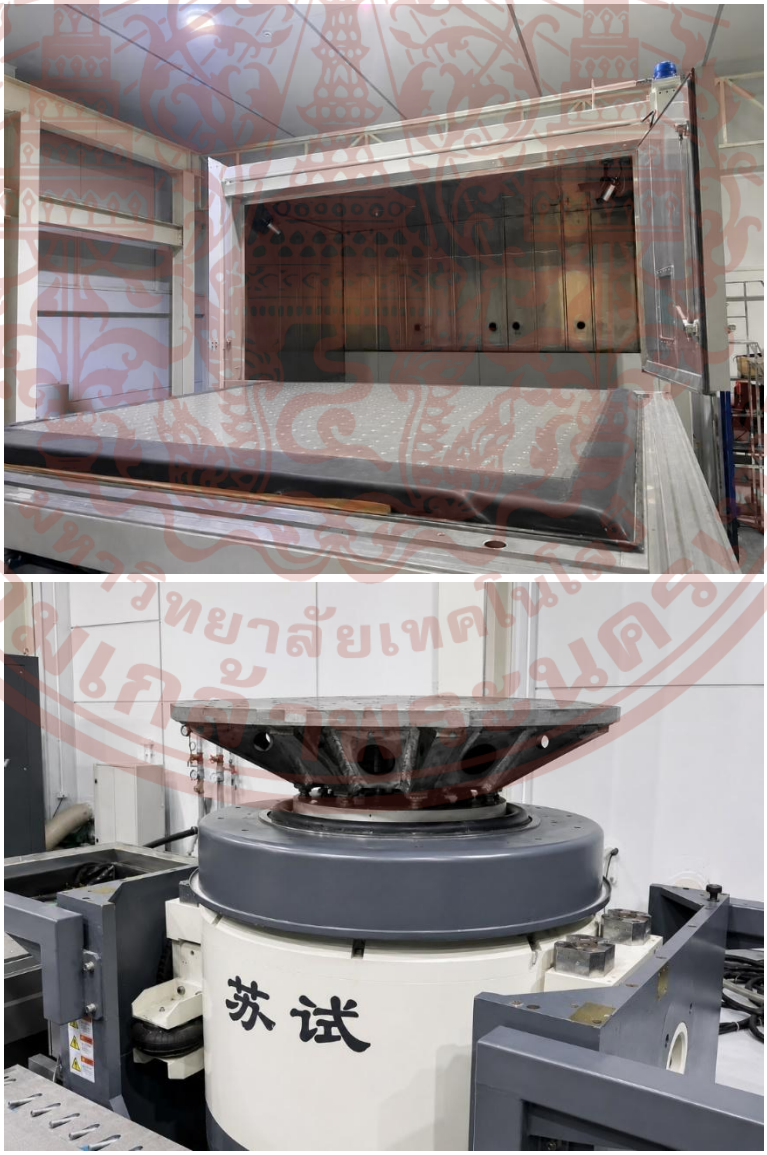
ภาคผนวก ข

รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ตาราง ข-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับ	เครื่องมือ/อุปกรณ์	หน้าที่
1	Electrodynamic Shaker	สร้างแรงสั่นสะเทือนตามโปรไฟล์การทดสอบ
2	Power Amplifier	ขยายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน
3	Vibration Controller	ควบคุมค่า Frequency, PSD และ Overall RMS
4	Accelerometer	ตรวจวัดค่าความเร่งของการสั่นสะเทือน
5	Fixture	ยึดแบตเตอรี่ให้มั่นคงระหว่างการทดสอบ
6	Battery Pack	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

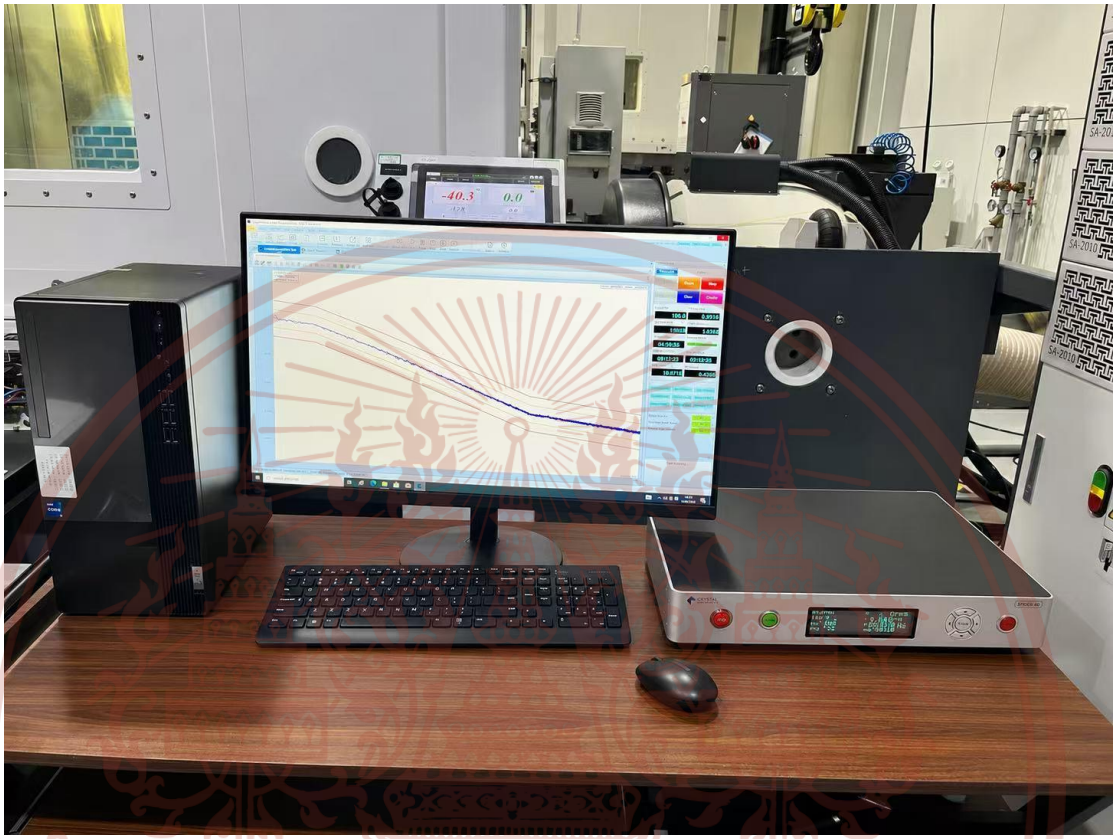
ภาพ ข-1 เครื่องกำเนิดแรงสั่นสะเทือน (Electrodynamic Shaker)



ภาพ ข-2 เครื่องขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier)



ภาพ ข-3 ระบบควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration Controller)

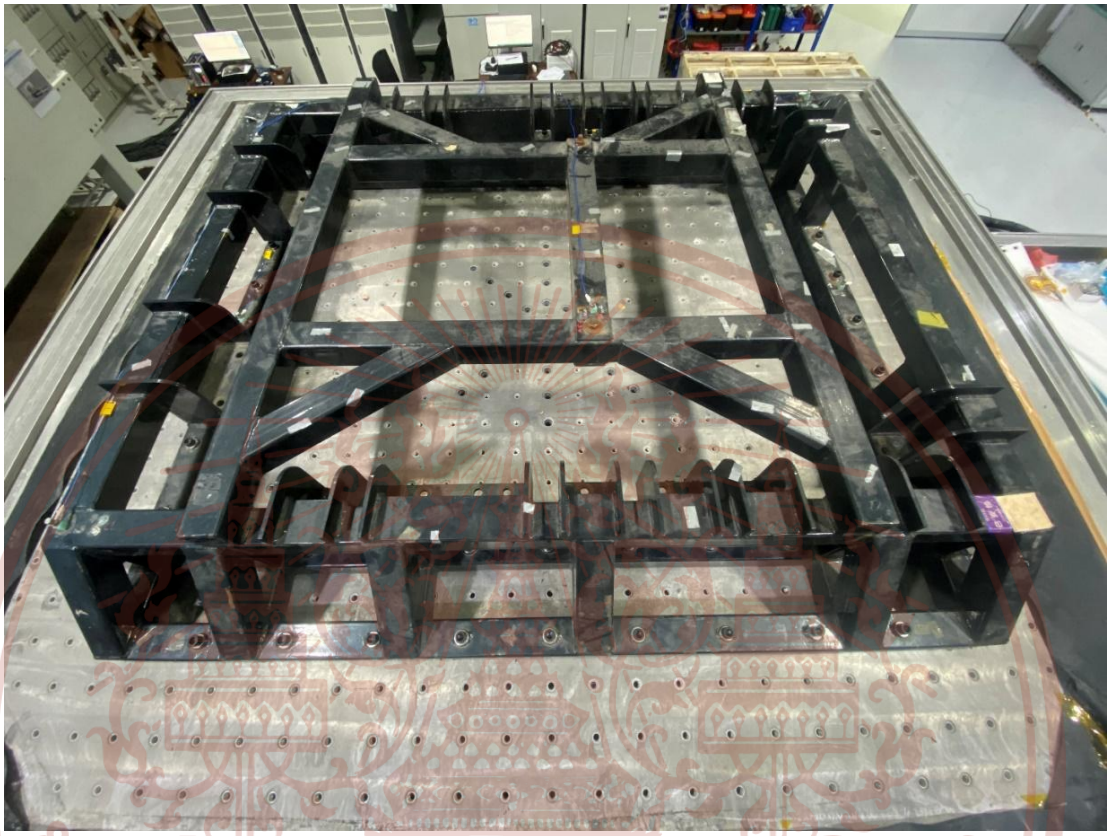


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

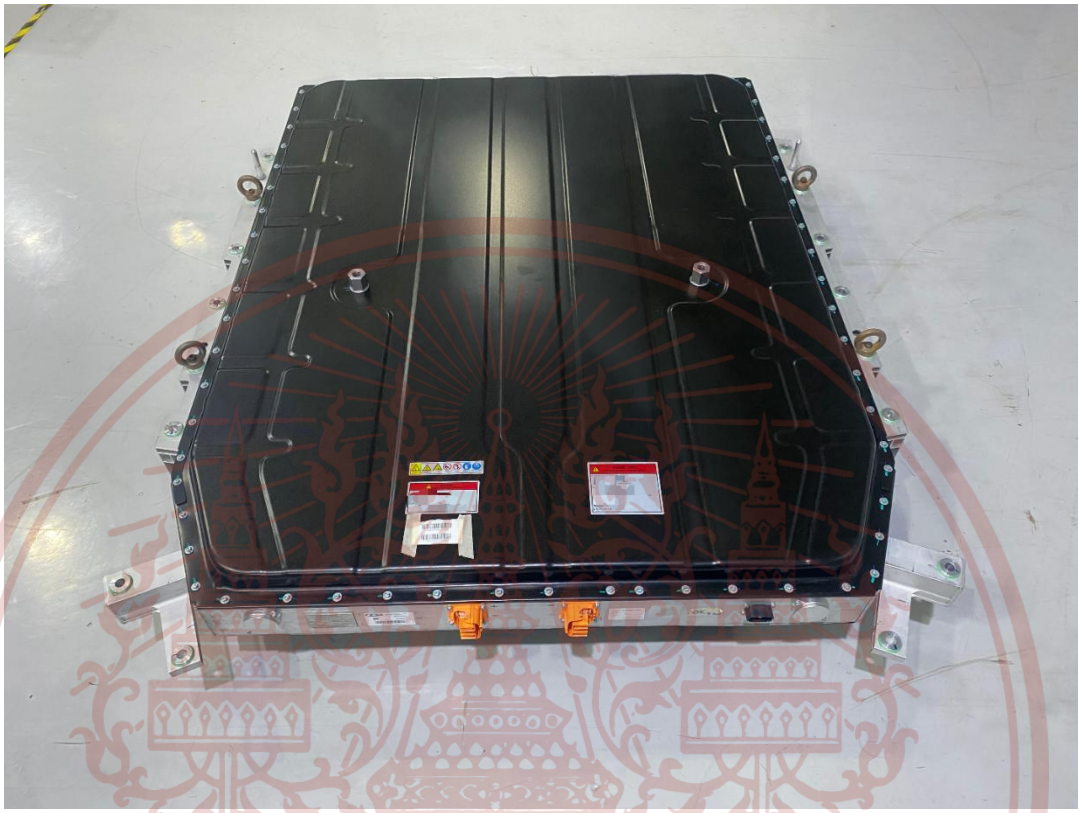
ภาพ ข-4 Accelerometer (วัดค่าความสั่นสะเทือน)



ภาพ ข-5 ชุด Fixture สำหรับยึดแบตเตอรี่



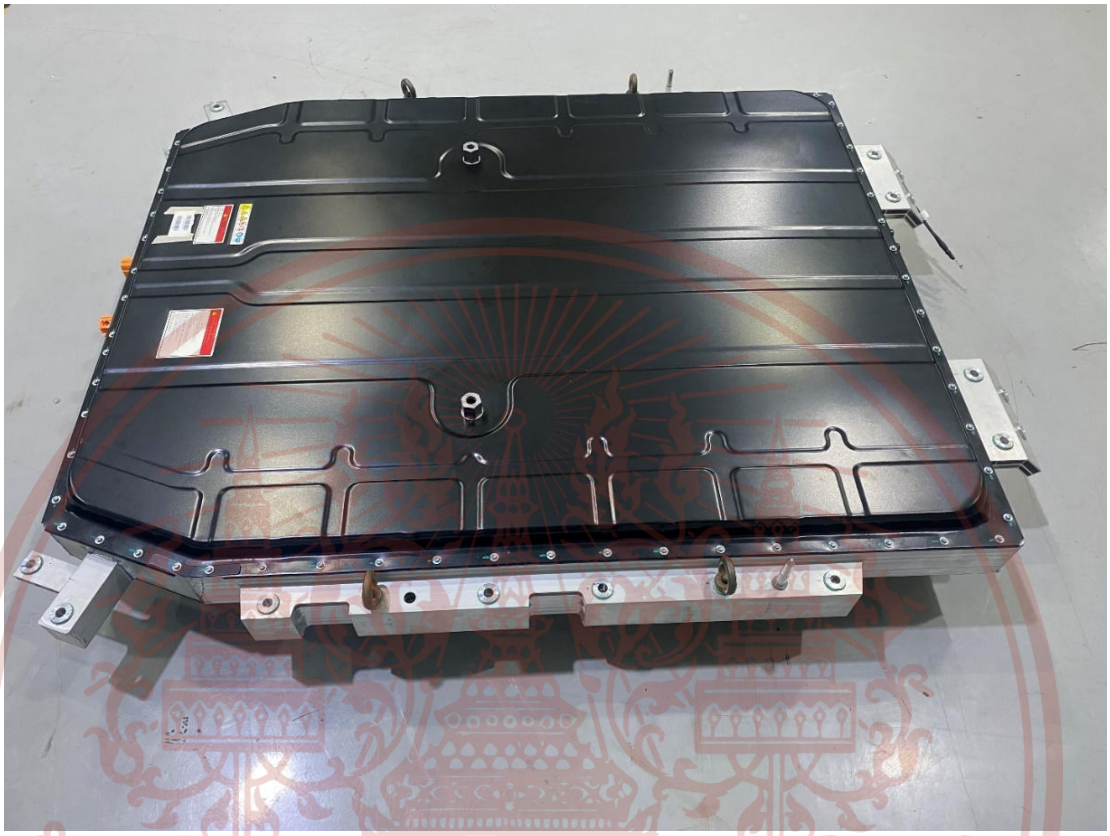
ภาพ ข-6 แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ



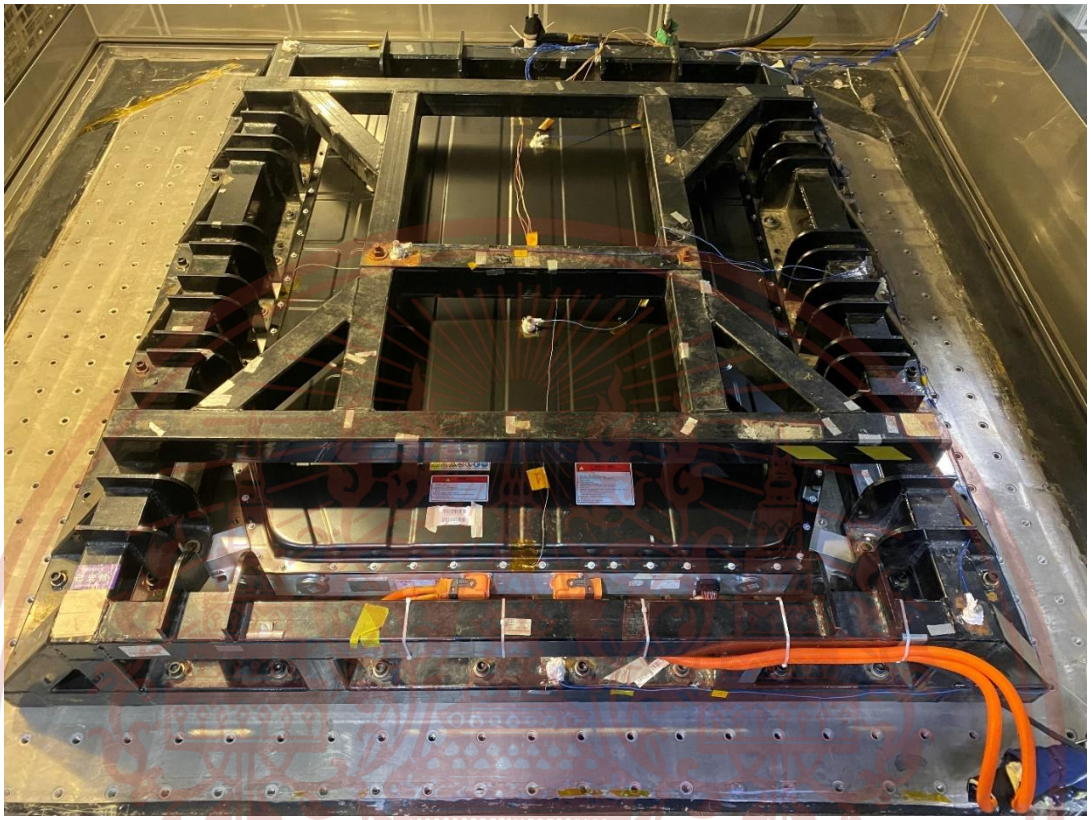
ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

ภาพ ค-1 การตรวจสอบสภาพชิ้นงานก่อนการทดสอบ

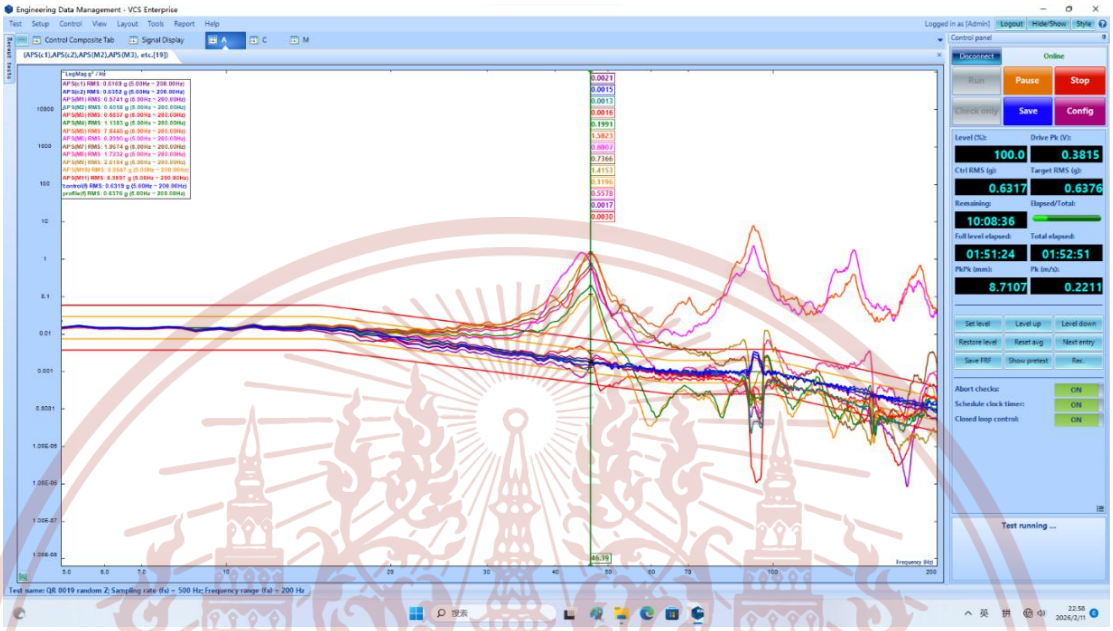


ภาพ ค-2 การติดตั้งแบตเตอรี่บน Fixture



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภาพ ค-3 หน้าจอระบบควบคุมการทดสอบ

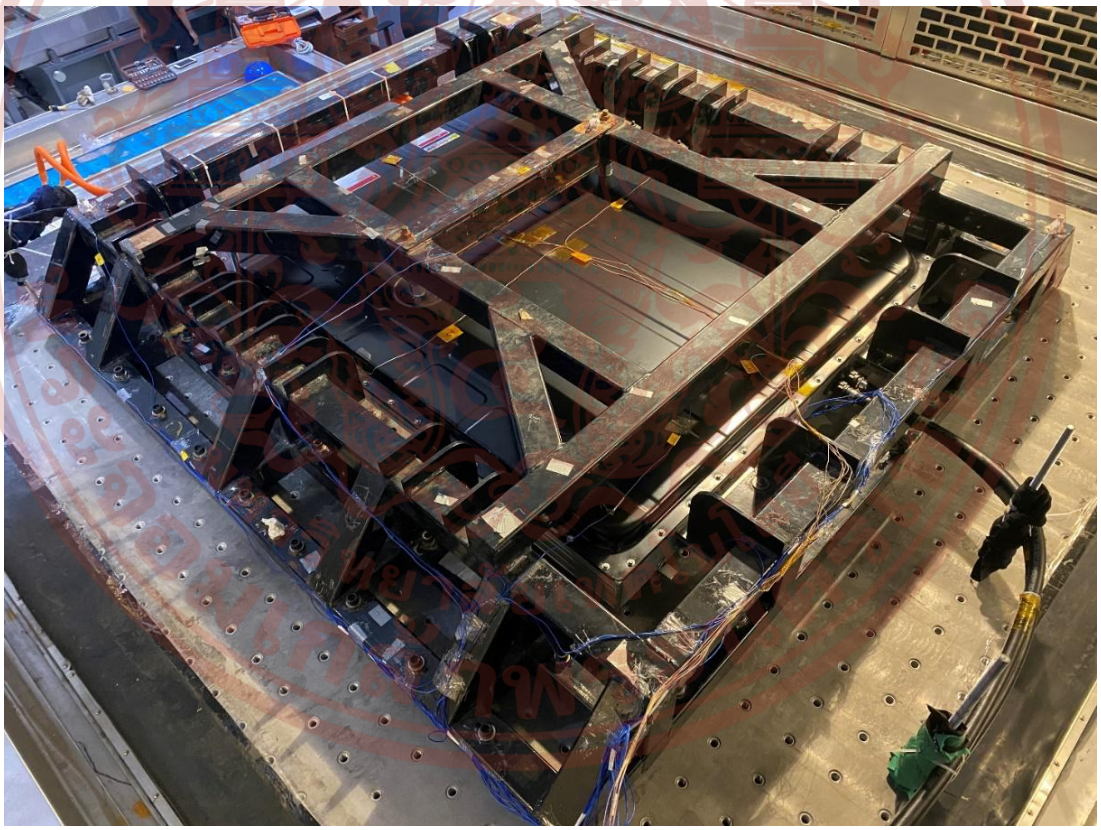


พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

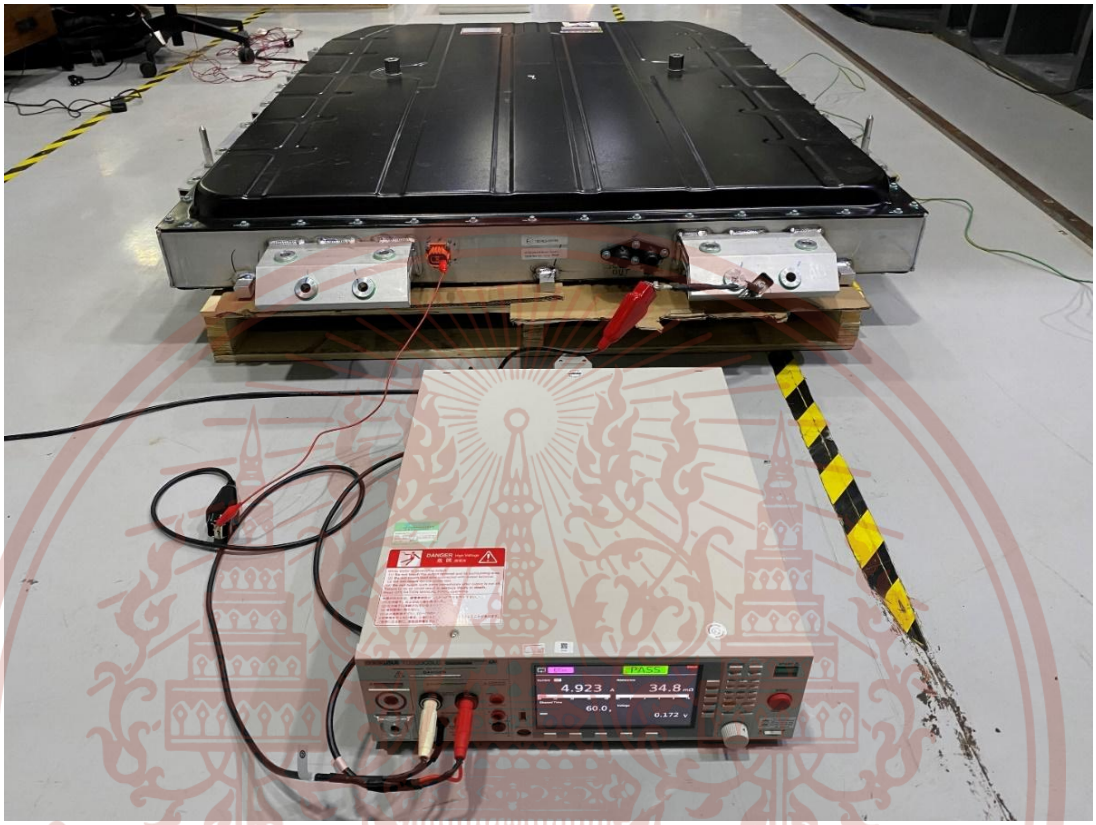
ตาราง ค-1 ตัวอย่างพารามิเตอร์การทดสอบ

รายการ	**รายละเอียด**
มาตรฐาน	IEC 60068-2-64
วิธีการทดสอบ	Random Vibration
แกนการทดสอบ	X, Y และ Z
ระบบควบคุม	Closed-loop Control
การตรวจวัด	Accelerometer

ภาพ ค-4 การดำเนินการทดสอบการสั่นสะเทือน



ภาพ ค-5 การตรวจสอบชิ้นงานหลังการทดสอบ



ตาราง ค-2 รายการตรวจสอบหลังการทดสอบ

รายการตรวจสอบ	**ผลการตรวจสอบ**
สภาพภายนอก	ปกติ
จุดยึด	ปกติ
การยึดติดของอุปกรณ์	ปกติ
ความเสียหายที่สังเกตได้	ไม่พบ
ผลการตรวจสอบโดยรวม	ผ่านการตรวจสอบ

หมายเหตุ: ผลการตรวจสอบเป็นไปตามชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบและข้อมูลประกอบการวิเคราะห์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

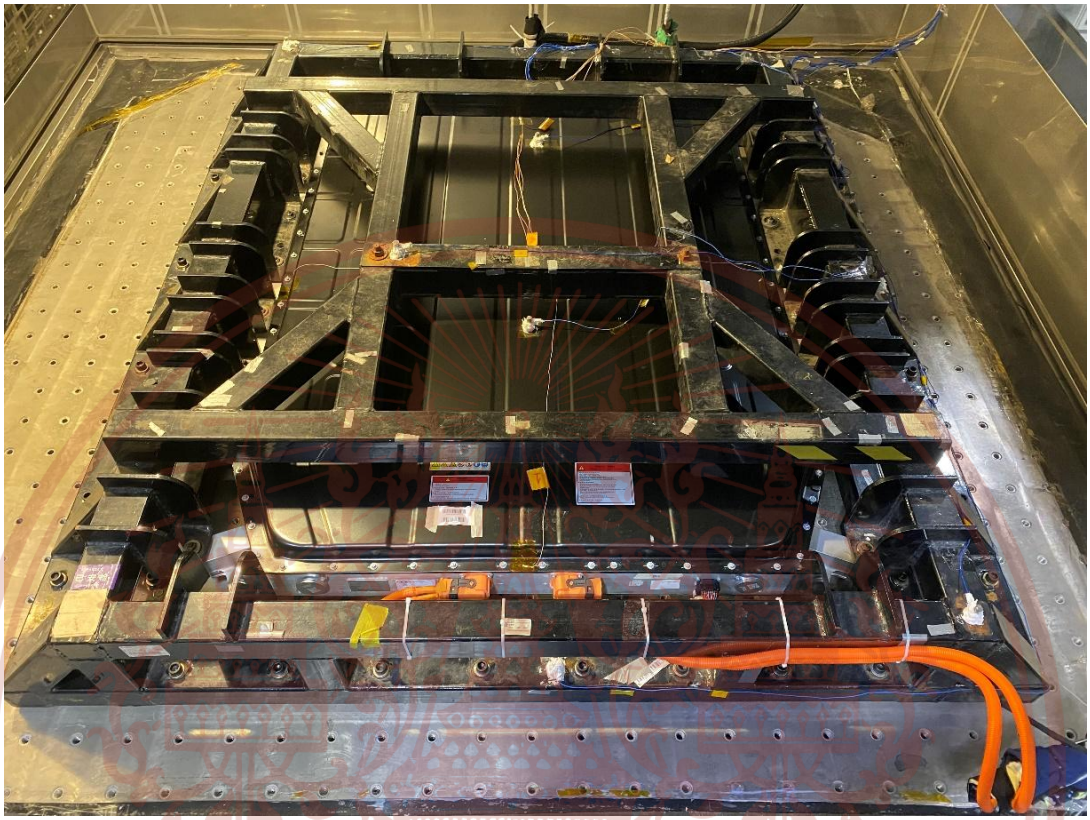
ตาราง ง-1 ผลการตรวจสอบชิ้นงาน

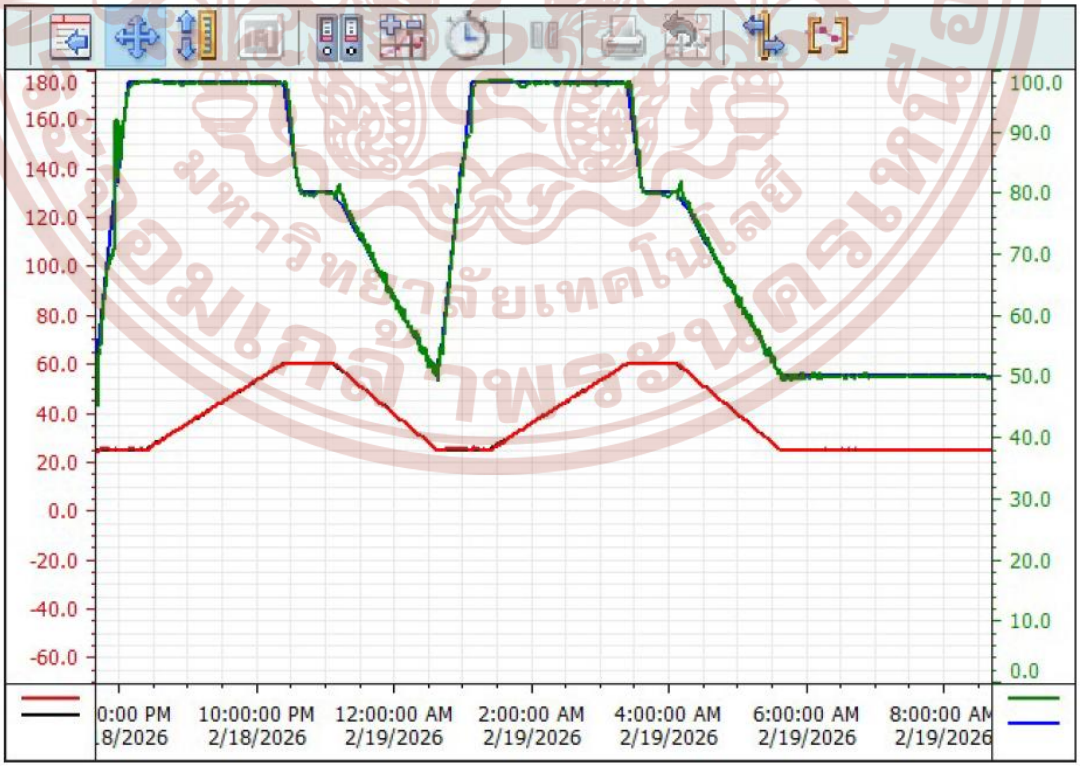
รายการตรวจสอบ	**ก่อนการทดสอบ**	**หลังการทดสอบ**
สภาพภายนอก	ปกติ	ปกติ
จุดยึด	ปกติ	ปกติ
การยึดติดของอุปกรณ์	ปกติ	ปกติ
ความเสียหายที่สังเกตได้	ไม่พบ	ไม่พบ
ผลการตรวจสอบโดยรวม	พร้อมทดสอบ	ผ่านการทดสอบ

ภาพ ง-2 ผลการตรวจสอบชิ้นงาน

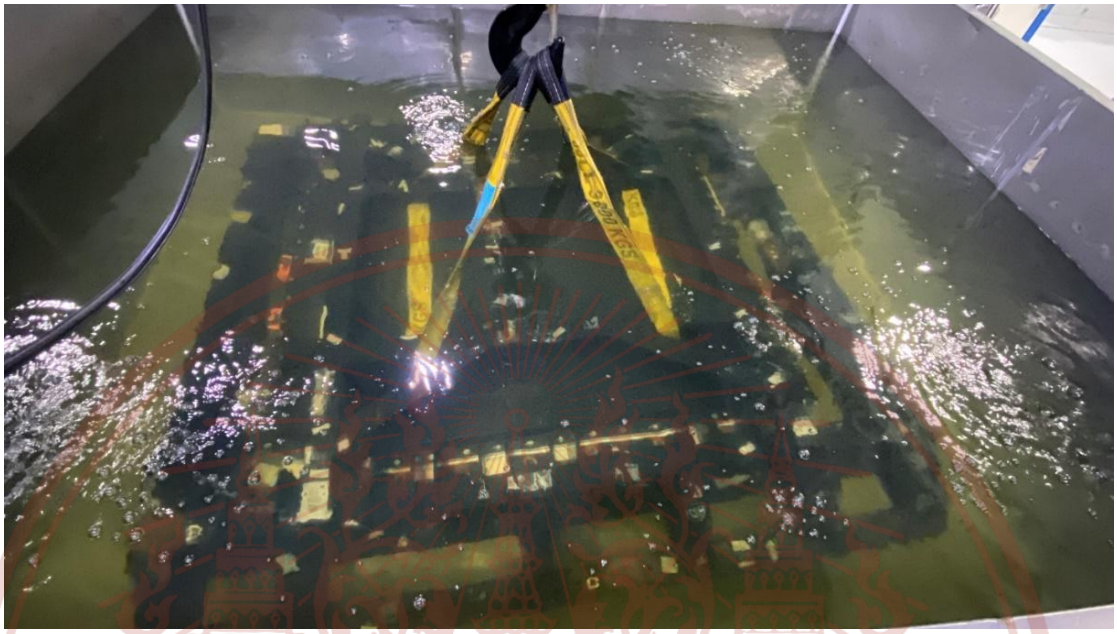


ภาพ ง-3 การทดสอบ Combined Vibration





ภาพ ง-4 การทดสอบ IPX8



ตาราง ง-2 สรุปข้อมูลการทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

รายการ	**รายละเอียด**
มาตรฐานหลัก	IEC 60068-2-64
ประเภทการทดสอบ	Random Vibration
การทดสอบเพิ่มเติม	Combined Vibration
การทดสอบเพิ่มเติม	IPX8
ระบบควบคุม	Closed-loop Control
ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์	PSD, Overall RMS, Frequency Range, ผลการตรวจสอบชิ้นงาน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธัญพิสิษฐ์ ประสาธน์สุวรรณ	
ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน	
ประวัติ	การศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การเดินเรือ คณะพาณิชยนาวีนานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
	การทำงาน	ตำแหน่ง Assistant Sales Manage ณ บริษัท เอสทีไอ เอ็นไวรอนเมนทอล รีไลอะบิลิตี แลบบอราทอรี (ประเทศไทย) จำกัด โดยรับผิดชอบงานด้านการประสานงานการทดสอบด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์และการให้บริการลูกค้าในอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ