

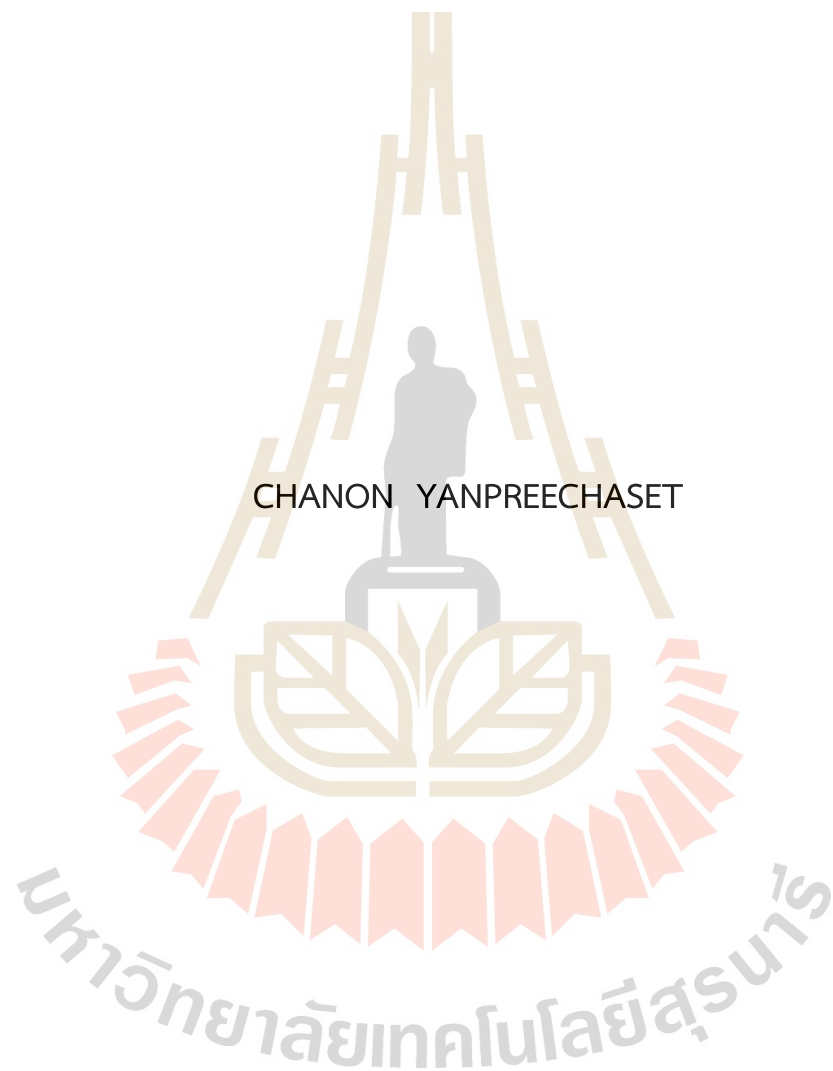
การพัฒนากระบวนการแสดงผลการจัดการแบตเตอรี่
ผ่านการสื่อสารด้วย แคนโอเพน

นายชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

DEVELOPMENT OF A BATTERY MANAGEMENT DISPLAY SYSTEM
VIA CANOPEN COMMUNICATION



CHANON YANPREECHASET

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การพัฒนากระบวนการแสดงผลการจัดการแบตเตอรี่ ผ่านการสื่อสารด้วย แคนโอเพน

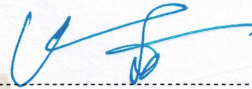
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กานต์ เกิดชื่น)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อุเทน ลีตัน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร.รณัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)

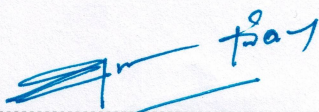
กรรมการ



(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ : การพัฒนาระบบการแสดงผลการจัดการแบตเตอรี่ ผ่านการสื่อสารด้วย แคนโอเพน (DEVELOPMENT OF A BATTERY MANAGEMENT DISPLAY SYSTEM VIA CANOPEN COMMUNICATION)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน, 117 หน้า.


คำสำคัญ : ระบบจัดการแบตเตอรี่/แคนโอเพน/หน้าจอแสดงผล/ยานยนต์ไฟฟ้า/ฮิวแมนแมชชีนอินเตอร์เฟซ/แบตเตอรี่/เครือข่ายควบคุม

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดอินเตอร์เฟซ สำหรับการเชื่อมต่อระบบจัดการแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับหน้าจอแสดงผลรุ่น ATD3.5-S3 ผ่านโพรโทคอลแคนโอเพน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของระบบจัดการแบตเตอรี่ที่รองรับการสื่อสารผ่านเครือข่ายควบคุมซึ่งโดยทั่วไปมีต้นทุนที่สูง ข้อจำกัดด้านความสะดวกในการใช้งาน และข้อจำกัดด้านความเข้ากันได้กับหน้าจอแสดงผลแบบอินเทอร์เฟซระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักรในงานที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ โดยในการดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาและวิเคราะห์ระบบจัดการแบตเตอรี่ในการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมสากลและการแปลงสัญญาณเป็นเฟรมข้อมูลในรูปแบบแคนโอเพนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับหน้าจอแสดงผลรุ่น ATD3.5-S3 จากนั้นได้ทำการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลางร่วมกับวงจรรับ-ส่งสัญญาณรุ่น TJA1051 เพื่อควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลผ่านโพรโทคอลแคนโอเพนให้สามารถแสดงผลค่าพารามิเตอร์สำคัญของแบตเตอรี่ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์บนหน้าจอแสดงผล การตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบได้ดำเนินการโดยการทดสอบภายใต้สภาวะโหลดที่หลากหลาย รวมถึงการชาร์จเร็ว การคายประจุด้วยกระแสสูง และสภาวะปกติ พร้อมเปรียบเทียบค่าข้อมูลที่ได้จากระบบต้นแบบกับค่ามาตรฐาน ผลการทดสอบยืนยันว่า กระบวนการส่งข้อมูลมีความถูกต้องและเสถียร อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าที่ปรากฏบนหน้าจอต้นแบบ ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า ไม่ใช่ความผิดพลาดแต่เป็นผลโดยตรงมาจาก ความละเอียดในการแสดงผล ที่ผู้วิจัยออกแบบให้แสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็ม เพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า ตามที่ได้อธิบายไว้ในกรอบโครงสร้างข้อมูล นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงปริมาณ ยังพบว่าระบบต้นแบบสามารถ ลดต้นทุนได้ 35.11% เมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ และผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว ยังยืนยันความคุ้มค่าแม้ต้นทุนชิ้นส่วนจะผันผวน ผลการทดสอบทั้งหมดจึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการและองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความน่าเชื่อถือด้านการส่งข้อมูล มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบ อีกทั้งยังพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มฟังก์ชันการทำงาน หรือรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา ชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

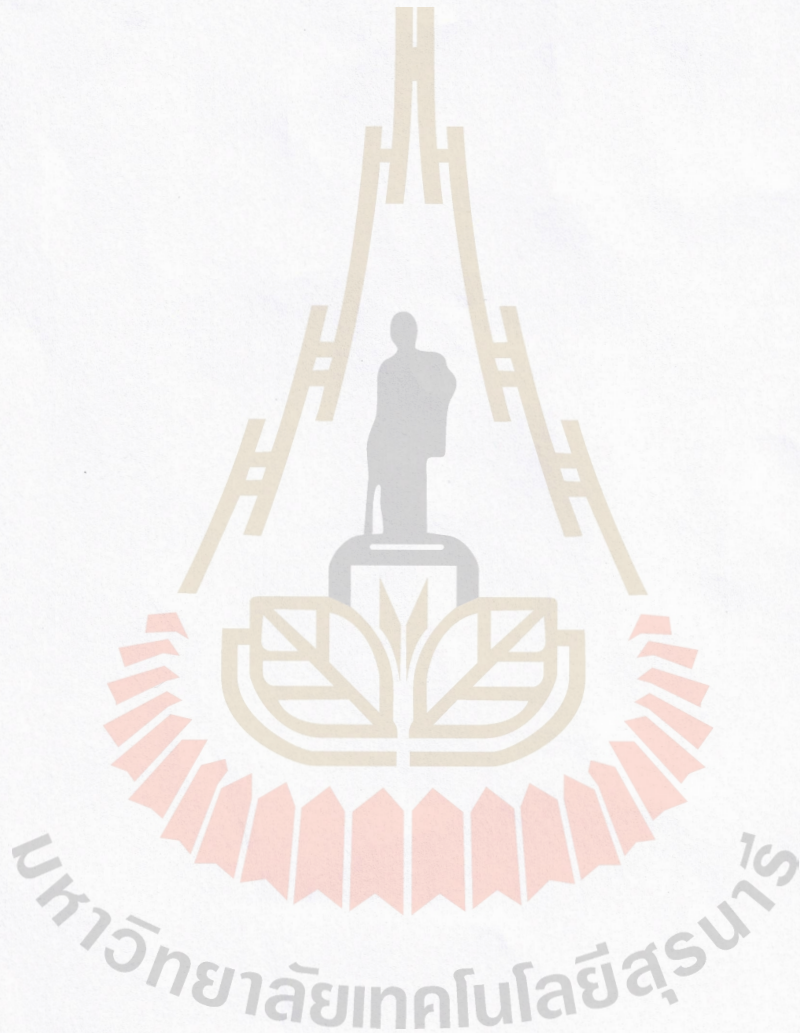
CHANON YANPREECHASET : DEVELOPMENT OF A BATTERY MANAGEMENT
DISPLAY SYSTEM VIA CANOPEN COMMUNICATION

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. UTHEN LEETON, Ph.D., 117 PP.

Keyword : Battery Management System/Display Screen/Electric Vehicle/CANopen
/Human-Machine Interface/Battery/Controller Area Network

This thesis research presents the design and development of an interface system for connecting an electric vehicle's Battery Management System (BMS) to the ATD3.5-S3 display via the CANopen protocol. This work aims to address the limitations of commercial BMS units with native Controller Area Network (CAN) support, which typically involve high costs, as well as usability and compatibility constraints with Human-Machine Interface (HMI) displays in budget-limited applications. This research began with studying and analyzing the BMS's performance in transmitting data via its Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) port and converting this data into CANopen frames for use with the ATD3.5-S3 display. Subsequently, an electronic circuit was designed using an ESP32 microcontroller as the central processing unit, paired with a TJA1051 transceiver, to manage data transmission over the CANopen protocol. This enables the real-time display of key battery parameters, namely voltage, current, temperature, and State of Charge (SOC). Performance verification was conducted by testing the system under various load conditions, including fast charging, high-current discharging, and idle states, comparing the prototype's data with standard values from PCAN-View and the JK BMS application. The test results confirmed that the data transmission process is accurate and stable. Crucially, the observed difference in values on the prototype display was proven not to be an error but a direct result of the intended "Display Resolution," whereby the researcher designed the system to display integers for clarity, as explained in the data structure design. Furthermore, a quantitative cost analysis found that the prototype system achieves a 35.11% cost reduction compared to commercial systems. A sensitivity analysis also confirmed its cost-effectiveness, even with component price fluctuations. The overall results confirm that the methods and knowledge developed in this thesis are reliable in data

transmission, are cost-effective, and are suitable for practical application in low-cost electric vehicle systems, with the potential for future development to add functions or support other devices. The results confirm that the developed system provides a reliable data transmission process, is demonstrably cost-effective, and is highly suitable for practical application in low-cost electric vehicle systems.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature..... ชานนท์ อภิวัฒน์ธนทรัพย์
Advisor's Signature..... [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีต่น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และมอบข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย วิทยานิพนธ์ การปรับปรุงเนื้อหา และการนำเสนอผลงาน จนทำให้ผู้วิจัยสามารถรวบรวมข้อมูลที่ ครบถ้วน ถูกต้อง และนำมาวิเคราะห์ วางแผน ตลอดจนสรุปผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็น ประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คณาจารย์ เลขาธิการ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และผู้ช่วยสอน ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาด้าน วิชาการ ให้ความช่วยเหลือด้านการติดต่อประสานงาน และมอบข้อคิดอันเป็นประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แด่ นายบัณฑิต ญาณปรีชาเศรษฐ นางนิษฐวดี พรเลิศเทียนชูป บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึง ครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในด้าน การศึกษามาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

ชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 CAN.....	5
2.2.1 ประวัติและการพัฒนา.....	5
2.2.2 สถาปัตยกรรม.....	6
2.2.3 การเชื่อมต่อทางกายภาพของ CAN (Physical Connection of CAN).....	7
2.2.4 ประเภทของ CAN (Types of CAN).....	8
2.2.5 การใช้งานของ CAN (Applications of CAN).....	9
2.2.6 โพรโตคอลที่ใช้ร่วมกับ CAN (Protocols with CAN).....	9
2.2.7 ข้อดีของ CAN (Advantages).....	9
2.2.8 ข้อจำกัดของ CAN (Disadvantages).....	9
2.2.9 สรุป.....	9
2.3 CANopen.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.3.1	คุณสมบัติของ CANopen.....	10
2.3.2	ส่วนประกอบหลักของ CANopen.....	10
2.3.3	การใช้งานของ CANopen.....	11
2.3.4	ข้อดีของ CANopen.....	11
2.3.5	ข้อจำกัดของ CANopen.....	11
2.3.6	สรุป.....	11
2.4	PCAN-USB.....	12
2.4.1	การกำหนดขาของ D-Sub.....	12
2.4.2	คุณสมบัติหลักของ PCAN-USB.....	13
2.4.3	ประโยชน์ของ PCAN-USB.....	13
2.4.4	การนำไปใช้.....	13
2.4.5	สรุป.....	14
2.5	โปรแกรม PCAN-View.....	14
2.5.1	คุณสมบัติหลักของ PCAN-View.....	14
2.5.2	วิธีการใช้งาน PCAN-View.....	15
2.5.3	การประยุกต์ใช้งาน PCAN-View.....	15
2.5.4	ข้อดีของ PCAN-View.....	15
2.5.5	ข้อจำกัดของ PCAN-View.....	15
2.5.6	สรุป.....	15
2.6	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery).....	16
2.6.1	ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	16
2.6.2	ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	16
2.6.3	สรุป.....	17
2.7	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบเอ็นเอ็มซี (Lithium-ion NMC Battery).....	18
2.7.1	คุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่ NMC.....	18
2.7.2	การใช้งานของแบตเตอรี่ NMC.....	18
2.7.3	ประโยชน์ของแบตเตอรี่ NMC.....	18
2.7.4	ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ NMC.....	18
2.7.5	สรุป.....	19
2.8	การแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium-ion Battery Pack).....	19
2.8.1	กระบวนการและหลักการสำคัญมีดังนี้.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2	สรุป.....21
2.9	ระบบจัดการแบตเตอรี่.....21
2.9.1	หน้าที่หลักของระบบจัดการแบตเตอรี่.....21
2.9.2	ส่วนประกอบหลักของระบบจัดการแบตเตอรี่.....21
2.9.3	ประโยชน์ของระบบจัดการแบตเตอรี่.....22
2.9.4	การประยุกต์ใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่.....22
2.9.5	สรุป.....22
2.10	JK BMS (JiKong BMS).....22
2.10.1	คุณสมบัติหลักของ JK BMS.....23
2.10.2	การประยุกต์ใช้.....23
2.10.3	สรุป.....23
2.11	UART.....24
2.11.1	การทำงานของ UART.....24
2.11.2	โครงสร้างข้อมูลในการส่งผ่าน UART.....24
2.11.3	คุณสมบัติของ UART.....24
2.11.4	การประยุกต์ใช้ของ UART.....24
2.11.5	ข้อดีของ UART.....25
2.11.6	ข้อจำกัดของ UART.....25
2.11.7	สรุป.....25
2.12	โมดูลแปลงสัญญาณ TJA1051.....25
2.12.1	คุณสมบัติหลักของ TJA1051.....26
2.12.2	การใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า.....26
2.12.3	การแปลงสัญญาณจาก UART เป็น CAN ด้วย TJA1051.....26
2.12.4	สรุป.....26
2.13	หน้าจอแสดงผล ATD3.5-S3.....27
2.13.1	คุณสมบัติหลักของ ATD3.5-S3.....27
2.13.2	การใช้งาน ATD3.5-S3 ร่วมกับ ESP32-S3.....27
2.13.3	ข้อดีของการใช้ ATD3.5-S3.....28
2.13.4	สรุป.....28
2.14	โมดูล ESP32.....28
2.14.1	คุณสมบัติหลักของ ESP32.....29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14.2 การประยุกต์ใช้ ESP32.....	29
2.14.3 สรุป.....	29
2.15 Buck Converter หรือ Step-Down Converter.....	30
2.15.1 หลักการทำงานของ Buck Converter.....	30
2.15.2 การทำงานในแต่ละช่วงเวลา.....	30
2.15.3 สมการแรงดันขาออกของ Buck Converter.....	30
2.15.4 ข้อดีของ Buck Converter.....	31
2.15.5 ข้อเสียของ Buck Converter.....	31
2.15.6 การประยุกต์ใช้งานของ Buck Converter.....	31
2.15.7 สรุป.....	31
2.16 SquareLine Studio.....	31
2.16.1 ฟังก์ชันสำคัญของ SquareLine Studio.....	32
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน.....	33
2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่.....	35
2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen.....	37
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN.....	39
2.21 สรุป.....	42
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 บทนำ.....	43
3.2 ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณ UART เป็นสัญญาณ CAN.....	45
3.2.1 การเลือกใช้รูปแบบ CAN ID.....	45
3.2.2 การพิจารณาเลือกอัตราการส่งข้อมูล (Baud Rate).....	45
3.2.3 การออกแบบโครงสร้างข้อมูล และความละเอียด.....	45
3.2.4 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อระหว่าง CAN Transceiver กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	46
3.3 การสร้างต้นแบบแผ่นวงจรจริง.....	47
3.4 การพัฒนาระบบ.....	48
3.5 การทดสอบและประเมินผล.....	48
3.6 การแปลงตัวเลขฐาน 16 จากโปรแกรม PCAN-View เป็นฐาน 10 CAN ID: 0x355.....	50
3.7 การแปลงตัวเลขฐาน 16 จากโปรแกรม PCAN-View เป็นฐาน 10 CAN ID: 0x356.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8	วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection).....54
3.8.1	เงื่อนไขการเก็บข้อมูล.....54
3.9	สรุป.....54
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล.....55
4.1	บทนำ.....55
4.2	ผลการสร้างระบบต้นแบบ.....55
4.3	ผลการทดสอบการสื่อสารข้อมูลผ่าน CANopen.....56
4.4	ผลการทดสอบการทำงาน (3 รอบ).....60
4.5	การวิเคราะห์ผลและประสิทธิภาพของระบบ.....61
4.6	ข้อจำกัดของระบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....62
4.7	การประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์จริง.....63
4.8	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....63
4.9	การวิเคราะห์ต้นทุน.....64
4.10	การวิเคราะห์ความอ่อนไหว.....65
4.11	สรุป.....66
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....67
5.1	บทนำ.....67
5.2	สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....68
5.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....68
รายการอ้างอิง69
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	การออกแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EasyEDA.....77
ภาคผนวก ข.	ขั้นตอนการออกแบบหน้าจодด้วยโปรแกรม SquareLine Studio.....89
ภาคผนวก ค.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่าง การศึกษา.....92
ประวัติผู้เขียน117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การกำหนดขาของ D-Sub.....	13
2.2	การเปรียบเทียบแบริเตอร์ลิเทียมไอออนแต่ละชนิด.....	17
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบริเตอร์ลิเทียมไอออน.....	33
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบริเตอร์.....	35
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen.....	37
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN.....	40
3.1	รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.2	CAN ID: 0x355.....	51
3.3	CAN ID: 0x356.....	53
4.1	ตัวอย่างการแปลงค่าข้อมูล CAN Bus ของระบบจัดการแบริเตอร์ จาก PCAN-View สู่อุปกรณ์แสดงผลจริง.....	57
4.2	ตารางเปรียบเทียบต้นทุน.....	64
4.3	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุน.....	65

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แรงดันไฟฟ้าในสาย CAN High และ CAN Low.....	7
2.2	การติดตั้ง Termination Resistor ขนาด 120 โอห์ม.....	8
2.3	PCAN-USB.....	12
2.4	ขาของ D-Sub.....	12
2.5	โปรแกรม PCAN-View.....	14
2.6	การแพ็คแบตเตอรี่ลิเธียม.....	19
2.7	JK BMS.....	22
2.8	โมดูลแปลงสัญญาณ TJA1051.....	25
2.9	หน้าจอแสดงผล ATD3.5-S3.....	27
2.10	โมดูล ESP32.....	28
2.11	SquareLine Studio.....	32
3.1	ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
3.2	แผนวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง.....	47
3.3	การเชื่อมต่อวงจรทดสอบระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ กับโปรแกรม PCAN-View.....	49
3.4	โปรแกรม PCAN-View.....	49
3.5	แอปพลิเคชัน JK BMS.....	50
3.6	การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “005D” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ใน โหมด Programmer.....	51
3.7	การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “0050” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ใน โหมด Programmer.....	52
3.8	การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “0005” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ใน โหมด Programmer.....	52
3.9	การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “001A” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ใน โหมด Programmer.....	53
4.1	แผนวงจรพิมพ์ที่ผลิต.....	56
4.2	ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม PCAN-View ที่แสดงค่าจาก CAN ID 0x355 และ 0x356.....	57
4.3	หน้าจอแอปพลิเคชัน JK BMS ที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	หน้าจอรระบบต้นแบบที่แสดงพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์.....59
4.5	การตั้งค่าระบบระหว่างการทดสอบการชาร์จเร็ว.....59
4.6	การตั้งค่าระบบระหว่างการทดสอบการคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูง.....60
4.7	กราฟผลการทดสอบการทำงาน 3 รอบ ระหว่างระบบต้นแบบ และ JK BMS โดยแสดงสถานะการชาร์จ, แรงดันแบตเตอรี่, กระแสไฟฟ้า, และ อุณหภูมิ.....61
ก.1	หน้าต่างการสร้างโปรเจกต์ใหม่ในโปรแกรม EasyEDA.....78
ก.2	การค้นหาและเลือกอุปกรณ์ จากไลบรารีอุปกรณ์.....79
ก.3	การลากสายไฟเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์.....80
ก.4	แผนภาพวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม EasyEDA.....80
ก.5	เมนูการแปลงแผนผังวงจรเป็นแผ่น PCB.....81
ก.6	การตั้งค่าขนาดแผ่น PCB.....82
ก.7	การวางอุปกรณ์และเดินสายทองแดงบนแผ่น PCB.....82
ก.8	การดูตัวอย่าง 3 มิติของแผ่น PCB.....83
ก.9	ตัวอย่าง 3 มิติ มุมมองด้านบน.....83
ก.10	ตัวอย่าง 3 มิติ มุมมองด้านล่าง.....84
ก.11	หน้าต่าง Generate Gerber File.....84
ก.12	เมนูส่งออก PDF.....85
ก.13	ขั้นตอนการส่งออก PDF.....86
ก.14	ไฟล์ลายวงจรขาวดำสำหรับกัดแผ่น PCB.....86
ก.15	แผ่นลามิเนตเคลือบทองแดง.....87
ก.16	แผ่นทองแดงที่ผ่านกระบวนการล้างและทำความสะอาดแล้ว.....88
ข.1	การเพิ่มวีดีเจ็ต ลงบนหน้าจอ.....90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ยานยนต์ไฟฟ้า ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลก อันเนื่องมาจากความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมีแบตเตอรี่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่กักเก็บและจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้น ระบบจัดการแบตเตอรี่ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดในการตรวจสอบ ควบคุม และบริหารจัดการเซลล์แบตเตอรี่ให้ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ มีเสถียรภาพ และมีความปลอดภัยสูงสุดตลอดการใช้งาน

ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ เครือข่ายการสื่อสารภายในรถยนต์ มักใช้โปรโตคอล CAN เป็นมาตรฐานหลัก เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือสูง สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี และออกแบบมาเพื่อการสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างอุปกรณ์หลายชิ้น ปัญหาที่พบคือ ระบบ BMS ที่มีประสิทธิภาพสูงและรองรับการสื่อสารผ่าน CAN โดยตรง มักมีราคาสูงมาก ในทางกลับกัน ระบบ BMS ราคาประหยัดที่นิยมใช้กันทั่วไป มักจำกัดช่องทางการสื่อสารไว้ที่โปรโตคอลพื้นฐาน เช่น UART หรือผ่าน Bluetooth เท่านั้น ซึ่งโปรโตคอลเหล่านี้ไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่าย CAN หลักของตัวรถได้โดยตรง และยังขาดความเสถียรที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในยานยนต์

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาความเข้ากันไม่ได้และอุปสรรคด้านต้นทุนดังกล่าว โดยการพัฒนาาระบบอินเทอร์เฟซต้นทุนต่ำ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการอ่านข้อมูลจาก BMS ราคาประหยัดผ่านทาง UART จากนั้นจึงแปลงข้อมูลสำคัญ เช่น สถานะการชาร์จ, แรงดันไฟฟ้า, กระแส และอุณหภูมิ ให้อยู่ในรูปแบบของโปรโตคอล CAN เพื่อส่งเข้าไปยังเครือข่ายหลักของยานยนต์ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังรวมถึงการพัฒนาะบบแสดงผล ที่สามารถรับและแสดงผลข้อมูลจากเครือข่าย CAN นี้ได้โดยตรง ซึ่งแนวทางการพัฒนานี้จะช่วยลดต้นทุนรวมของระบบ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ BMS ในยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและเข้าถึงได้ง่ายขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวทางการเชื่อมต่อระบบจัดการแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าของ JK BMS กับหน้าจอแสดงผล โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล TJA1051 สำหรับการแปลงสัญญาณ UART เป็นโปรโตคอล CAN

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถของ JK BMS ในการส่งข้อมูลสำคัญ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ผ่านพอร์ต UART และกระบวนการแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นโปรโตคอล CAN เพื่อใช้ในการแสดงผลบนหน้าจอแสดงผล

1.2.3 เพื่อลดต้นทุนการพัฒนาาระบบจัดการแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยเลือกใช้ ส่วนประกอบที่มีราคาย่อมเยาแต่ยังคงรักษาประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือในการ สื่อสารและการแสดงผลข้อมูล

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นระบบจัดการแบตเตอรี่ รุ่น JK BMS สื่อสารผ่านพอร์ต UART เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และแปลงสัญญาณเป็น CAN BUS ผ่านวงจร TJA1051 เพื่อส่งข้อมูลในรูปแบบโปรโตคอล CANopen ไปยังจอแสดงผล ATD3.5-S3 สำหรับแสดง ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่ แบบเรียลไทม์

1.3.2 การประมวลผลข้อมูลดำเนินการภายใน ESP32 โดยแปลงข้อมูลจากเฟรม UART เป็นเฟรม CANopen

1.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลใช้การเปรียบเทียบค่าที่แสดงบนจอ ATD3.5-S3 กับค่าจากแอปพลิเคชัน JK BMS และโปรแกรม PCAN-View ผ่านอุปกรณ์ PCAN-USB

1.3.4 การทดสอบระบบทำทั้งในสภาวะแวดล้อมจำลองและสภาวะจริง โดยใช้ชุด แบตเตอรี่ลิเธียม NMC แรงดัน 3.7 โวลต์ แบบ 20 เซลล์ (20S) ความจุ 25 แอมแปร์-ชั่วโมง

1.3.5 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนางจรเชื่อมต่อและโปรแกรมประมวลผล โดยไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรภายในของ JK BMS และจอแสดงผล ATD3.5-S3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารระหว่าง ระบบจัดการแบตเตอรี่ (JK BMS) และจอแสดงผล ATD3.5-S3 โดยใช้โปรโตคอล CANopen ผ่าน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล TJA1051

1.4.2 งานวิจัยนี้ใช้ชุดแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิดเอ็นเอ็มซี ขนาดแรงดัน 3.7 โวลต์ ความ จุ 25 แอมแปร์-ชั่วโมง จำนวน 20 เซลล์ (20S) ในการทดสอบระบบเท่านั้น

1.4.3 การแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ พิจารณาเฉพาะค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่ ที่แสดงบนจอ ATD3.5-S3 แบบเรียลไทม์

1.4.4 การทดสอบระบบดำเนินการทั้งในสภาวะแวดล้อมจำลองและสภาวะการใช้งานจริง โดยไม่ครอบคลุมถึงการทดสอบภายใต้เงื่อนไขภาคสนามหรือการใช้งานเชิงพาณิชย์

1.4.5 งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรภายในของระบบจัดการแบตเตอรี่และ จอแสดงผล แต่เน้นเฉพาะการเชื่อมต่อ การประมวลผลข้อมูล และการตรวจสอบความถูกต้องของการ สื่อสารเท่านั้น

1.5 สมมติฐานของการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ (JK BMS) และจอแสดงผล ATD3.5-S3 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับโมดูล TJA1051 และโปรโตคอล CANopen สามารถรับ-ส่งและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ภายใต้การทำงานของชุดแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิด NMC ขนาดแรงดัน 3.7 โวลต์ ความจุ 25 แอมแปร์-ชั่วโมง จำนวน 20 เซลล์ ซึ่งสามารถยืนยันความถูกต้องและความเสถียรของการทำงานได้จากการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจำลองและการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ (JK BMS) และจอแสดงผล ATD3.5-S3 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับโมดูล TJA1051 และโปรโตคอล CANopen เพื่อให้สามารถรับ-ส่งและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ภายใต้การทำงานของชุดแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิด NMC จำนวน 20 เซลล์ วิธีการที่นำเสนอมีต้นทุนต่ำ ใช้ชิ้นส่วนที่มีจำหน่ายทั่วไป และยังไม่พบการประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกันกับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ อีกทั้งได้ทำการยืนยันผลการการทำงานของระบบด้วยการทดสอบทั้งในสภาวะแวดล้อมจำลองและสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ (JK BMS) และจอแสดงผลผ่านโปรโตคอล CANopen โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล TJA1051

1.7.2 ได้แนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบที่สามารถรับ-ส่งและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

1.7.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการแมปพารามิเตอร์จากระบบจัดการแบตเตอรี่ลงใน Object Dictionary ตามมาตรฐานโปรโตคอล CANopen เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นในระบบบัส CAN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.7.4 ได้ต้นแบบวงจรและโปรแกรมประมวลผลสำหรับการสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่และจอแสดงผล ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจัดการพลังงานในยานพาหนะไฟฟ้าหรือระบบจัดเก็บพลังงานอื่น

1.7.5 ได้ข้อมูลผลการทดสอบทั้งในสภาวะแวดล้อมจำลองและสภาวะการใช้งานจริง เพื่อยืนยันความถูกต้อง ความเสถียร และความเป็นไปได้ของระบบที่พัฒนา ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาต่อยอด

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 5 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย สมมติฐานการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และการจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่ การสื่อสารผ่านบัส CAN และโปรโตคอล CANopen การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล TJA1051 รวมถึงงานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและแสดงค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ พร้อมสรุปองค์ความรู้เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบ ตั้งแต่การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณ UART เป็น CAN การเลือกพารามิเตอร์และการออกแบบโครงสร้างข้อมูล การสร้างต้นแบบ PCB การพัฒนาระบบซอฟต์แวร์ การทดสอบการสื่อสาร และวิธีการแปลงข้อมูลจากโปรแกรม PCAN-View รวมถึงวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

บทที่ 4 ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล นำเสนอผลการทดสอบการทำงานของระบบ ทั้งในสภาวะแวดล้อมจำลองและสภาวะการใช้งานจริง โดยประเมินความถูกต้อง ความเสถียร และความสามารถในการแสดงผลแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากระบบกับค่าที่ได้จากแอปพลิเคชัน JK BMS และโปรแกรม PCAN-View

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ สรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบจากการทดลองจริง พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรม EasyEDA ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบหน้าจอดีด้วยโปรแกรม SquareLine Studio และภาคผนวก ค แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ และอุปกรณ์แสดงผล โดยอาศัยการสื่อสารผ่านโปรโตคอล CANopen และโมดูล TJA1051 เพื่อประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิด NMC ขนาด 3.7 โวลต์ 25 แอมแปร์-ชั่วโมง จำนวน 20 เซลล์ ซึ่งสามารถตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ได้แบบเรียลไทม์ ทั้งนี้เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยมีพื้นฐานทางวิชาการที่รอบด้าน จึงได้ศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นสำคัญ ได้แก่ เทคโนโลยีการสื่อสารด้วย CAN และ CANopen อุปกรณ์เชื่อมต่อและซอฟต์แวร์สนับสนุนการสื่อสาร (PCAN-USB และ PCAN-View) เทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิด NMC แนวทางการแพ็คแบตเตอรี่ ระบบจัดการแบตเตอรี่ และเทคโนโลยี JK BMS ตลอดจนการสื่อสารผ่าน UART และการแปลงสัญญาณด้วย TJA1051 รวมถึงอุปกรณ์ฝังตัวเช่น ESP32 และโมดูล ATD3.5-S3 ตลอดจนวงจรแปลงแรงดัน Buck Converter โดยการทบทวนนี้จะนำเสนอตามลำดับหัวข้อ พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 CAN (Controller Area Network)

เป็นระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลที่ใช้ในการเชื่อมต่อและควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบยานยนต์และอุตสาหกรรม โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวควบคุมกลาง ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสามารถสื่อสารกันได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ CAN ยังมีการจัดการข้อมูลที่มีความเสถียรและปลอดภัย ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีในระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ยานยนต์ ระบบอัตโนมัติในโรงงาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์

2.2.1 ประวัติและการพัฒนา

CAN ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1983 และเปิดตัวครั้งแรกในตลาดในปี 1986 โดยบริษัท Bosch ซึ่งในขณะนั้นเริ่มมีความต้องการการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ในระบบยานยนต์ ข้อมูลที่ส่งผ่านโปรโตคอล CAN มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมระบบต่างๆ เช่น ระบบเบรก ABS (Anti-lock Braking System) และระบบควบคุมเครื่องยนต์ CAN ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นหลักก่อนที่จะขยายไปสู่อุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ระบบควบคุมการผลิตและระบบทางการแพทย์

2.2.2 สถาปัตยกรรม

สถาปัตยกรรมของระบบ CAN ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการสื่อสารแบบหลายจุด (multi-master) โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวควบคุมหลัก (master controller) องค์ประกอบหลักของสถาปัตยกรรม CAN ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายประการที่ทำงานร่วมกันเพื่อสร้างระบบการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ ดังนี้

1) สถาปัตยกรรมแบบบัส (Bus Architecture)

การสื่อสารของ CAN ใช้โครงสร้างแบบบัส (bus) โดยมีอุปกรณ์ (nodes) หลายตัวเชื่อมต่อเข้ากับสายสัญญาณคู่เดียวที่เรียกว่า CAN bus ซึ่งทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทุกตัว แต่ละ node สามารถส่งและรับข้อมูลได้ตามต้องการ โดยมีกลไกการจัดลำดับความสำคัญเพื่อควบคุมการสื่อสาร

2) โพรโทคอลเชิงข้อความ (Message-based Protocol)

CAN ใช้การสื่อสารแบบเชิงข้อความ (message-based) แตกต่างจากระบบอื่น เช่น Ethernet ที่ใช้การกำหนดที่อยู่ (address-based) โดยทุก node ในเครือข่ายสามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลลงในเฟรมข้อความได้

3) ระบบหลายจุด (Multi-master System)

CAN เป็นระบบแบบ multi-master ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ทุกตัวที่เชื่อมต่อกับ CAN bus มีสิทธิ์ในการส่งข้อมูลได้โดยไม่ต้องมีตัวควบคุมหลัก ดังนั้น node ใดๆ ก็สามารถริเริ่มการส่งข้อมูลได้ และหากมี node หลายตัวส่งข้อมูลพร้อมกัน ระบบจะใช้กลไกการจัดลำดับความสำคัญเพื่อเลือก node ที่จะส่งข้อมูลก่อน

4) Identifier-based Arbitration

ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลพร้อมกัน CAN ใช้กลไก arbitration โดยพิจารณาจากค่า identifier ในเฟรมข้อมูล ค่า identifier ที่มีค่าต่ำที่สุดจะได้รับลำดับความสำคัญสูงสุด node ที่แพ้การเปรียบเทียบจะหยุดการส่งและรอรอบถัดไป กลไกนี้ดำเนินการด้วยการเปรียบเทียบบิตในแต่ละรอบ เพื่อให้ node ที่มีข้อมูลสำคัญกว่าสามารถส่งได้ก่อน

5) โครงสร้างเฟรมข้อมูล (Data Frame)

เฟรมข้อมูลของ CAN ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่

- Start of Frame (SOF) คือจุดเริ่มต้นของการส่งข้อมูล
- Identifier คือค่าที่ระบุความสำคัญของข้อมูล
- Control Field คือข้อมูลควบคุมประเภทและขนาดของข้อมูล
- Data Field คือข้อมูลจริงที่ส่ง มีขนาดสูงสุด 8 ไบต์ต่อเฟรม
- CRC (Cyclic Redundancy Check) ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล
- ACK (Acknowledgement) ใช้ยืนยันว่ามี node อื่นรับข้อมูลสำเร็จ
- End of Frame (EOF) คือจุดสิ้นสุดของเฟรมข้อมูล

6) การตรวจจับและจัดการข้อผิดพลาด (Error Detection and Handling)

CAN มีความสามารถในการตรวจจับและจัดการข้อผิดพลาดผ่านกลไก เช่น Bit Monitoring ใช้ตรวจสอบว่าบิตที่ส่งออกตรงกับบิตที่ได้รับหรือไม่ CRC ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยการคำนวณค่าเช็ค Acknowledgement Error หากไม่มีการตอบรับจาก node อื่น ถือว่าการส่งล้มเหลว Form Error เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างเฟรมข้อมูลไม่เป็นไปตามมาตรฐาน เมื่อมีข้อผิดพลาด node ที่ตรวจพบจะส่ง Error Frame เพื่อแจ้งเตือน และระบบจะส่งข้อมูลซ้ำโดยอัตโนมัติ

7) ชั้นทางกายภาพ (Physical Layer)

ในการปฏิบัติ CAN ใช้สายสัญญาณคู่บิดเกลียว (twisted pair) ได้แก่ CAN High และ CAN Low เพื่อช่วยลดการรบกวนและเพิ่มความเร็วในการสื่อสาร โดยมีข้อจำกัดความยาวสายสัมพันธ์กับความเร็วในการส่ง เช่น ที่ความเร็ว 1 Mbps รองรับระยะทางสูงสุดประมาณ 40 เมตร สถาปัตยกรรมของ CAN จึงสามารถรองรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์หลายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความเร็วและความมั่นคงสูง เช่น ยานยนต์ ระบบควบคุมอัตโนมัติ และงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ

2.2.3 การเชื่อมต่อทางกายภาพของ CAN (Physical Connection of CAN)

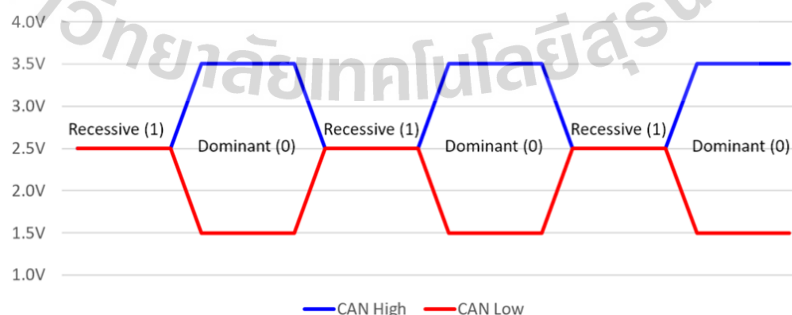
1) สัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Signaling)

การส่งข้อมูลในระบบ CAN ใช้สัญญาณแบบ differential ผ่านสาย CAN High และ CAN Low โดยมีสองสถานะหลัก ได้แก่

Dominant ส่งลอจิก 0 คือสาย CAN High จะมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสาย CAN Low โดรน สายCAN High จะมีแรงดันประมาณ 3.5V และ CAN Low จะมีแรงดันประมาณ 1.5V

Recessive ส่งลอจิก 1 คือทั้ง CAN High และ CAN Low มีแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ประมาณ 2.5V

การใช้สัญญาณแบบ differential มีข้อดีคือสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Noise) ได้ดี จึงช่วยให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพแม้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) สูง แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าในสาย CAN High และ CAN Low ที่มา csselectronics

2) ความเร็วในการส่งข้อมูล (Data Rate)

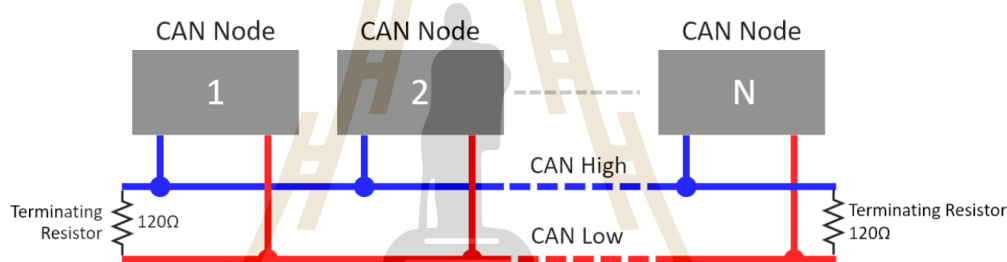
CAN รองรับความเร็วตั้งแต่ 10 kbps ถึง 1 Mbps โดยมีข้อจำกัดคือ ความเร็วสูงสุดขึ้นอยู่กับระยะทางและคุณภาพของสายที่ใช้เชื่อมต่อ เช่น ความเร็ว 1 Mbps สามารถรองรับระยะทางสูงสุดประมาณ 40 เมตร หากระยะทางยาวกว่านี้จำเป็นต้องลดความเร็วเพื่อรักษาคุณภาพสัญญาณ

3) สายส่งข้อมูล (Transmission Cable)

การเชื่อมต่อ CAN ใช้สายคู่บิดเกลียว (Twisted Pair) เพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก และทำให้การส่งสัญญาณ CANHigh และ CANLow มีทิศทางสอดคล้องกันแต่มีเฟสตรงข้าม ส่งผลให้ระบบมีความเสถียรในการทำงาน

4) ตัวต้านทานปลายสาย (Termination Resistor)

ที่ปลายทั้งสองด้านของบัส CAN จะมีการติดตั้งตัวต้านทาน (Termination Resistor) ขนาด 120 โอห์ม เพื่อป้องกันการสะท้อนสัญญาณ (Signal Reflection) และช่วยให้การสื่อสารมีเสถียรภาพ แสดงการติดตั้ง Termination Resistor ขนาด 120 โอห์ม ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การติดตั้ง Termination Resistor ขนาด 120 โอห์ม ที่มา csselectronics

5) การตรวจจับและจัดการสัญญาณรบกวน

ชั้นทางกายภาพ (Physical Layer) ของ CAN มีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณรบกวนและจัดการข้อผิดพลาด โดยหากพบการรบกวน ระบบจะส่งข้อมูลซ้ำโดยอัตโนมัติ

2.2.4 ประเภทของ CAN (Types of CAN)

Classical CAN ใช้สำหรับการส่งข้อมูลทั่วไป รองรับเฟรมข้อมูลขนาดสูงสุด 8 ไบต์

CAN FD (Flexible Data Rate) เป็นการพัฒนาจาก Classical CAN โดยรองรับเฟรมข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (สูงสุด 64 ไบต์) และสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงขึ้น

2.2.5 การใช้งานของ CAN (Applications of CAN)

1) ยานยนต์ (Automotive) ใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในรถยนต์ เช่น เครื่องยนต์ ระบบเบรก เซ็นเซอร์ และระบบปรับอากาศ ตัวอย่างเช่น การสื่อสารระหว่างเครื่องยนต์และระบบเบรกเพื่อการควบคุมที่แม่นยำและปลอดภัย

2) ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม (Industrial Automation) ใช้ในระบบควบคุมหุ่นยนต์ สายการผลิต และเครื่องจักรอัตโนมัติ

3) การแพทย์ (Medical Applications) ใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องตรวจวัดการทำงานของหัวใจ และอุปกรณ์ช่วยชีวิตอัตโนมัติ

4) อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ (Aerospace) ใช้ในการสื่อสารภายในเครื่องบินและยานอวกาศ เพื่อเพิ่มความเสถียรและความน่าเชื่อถือในการควบคุมระบบ

2.2.6 โพรโตคอลที่ใช้ร่วมกับ CAN (Protocols with CAN)

CANopen คือโพรโตคอลมาตรฐานที่ใช้สำหรับการควบคุมเครื่องจักรและอุปกรณ์ในอุตสาหกรรม เพื่อให้การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ทำได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ

J1939 คือโพรโตคอลที่ใช้ในยานยนต์เชิงพาณิชย์ เช่น รถบรรทุกและรถโดยสาร มุ่งเน้นการสื่อสารระหว่างเซ็นเซอร์และตัวควบคุมในระบบต่าง ๆ ของยานยนต์

2.2.7 ข้อดีของ CAN (Advantages)

- 1) ประสิทธิภาพสูงในการสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์
- 2) ความเสถียรและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสูง
- 3) ต้นทุนในการติดตั้งและใช้งานต่ำ
- 4) รองรับการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดโดยอัตโนมัติ

2.2.8 ข้อจำกัดของ CAN (Disadvantages)

- 1) ความยาวสายสัญญาณจำกัด (ประมาณ 40 เมตรที่ความเร็วสูงสุด 1 Mbps)
- 2) ไม่เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ต่อเฟรม

2.2.9 สรุป

การส่งข้อมูลในระบบ CAN เป็นกระบวนการที่มีเสถียรภาพและเชื่อถือได้ โดยใช้กลไก identifier ในการจัดลำดับความสำคัญ พร้อมด้วยระบบตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดที่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้ CAN ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในหลากหลายสาขา เช่น ยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิต การแพทย์ และอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ

2.3 CANopen

CANopen เป็นโพรโตคอลการสื่อสารชั้นสูงที่ถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของโพรโตคอล CAN โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในระบบอัตโนมัติ เช่น ระบบเครื่องจักรในโรงงาน ยานยนต์ ระบบการแพทย์ และอุตสาหกรรมพลังงาน โพรโตคอลนี้ถูกพัฒนาโดย CiA (CAN in Automation) เพื่อให้การพัฒนาและการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ CAN สามารถดำเนินการได้ง่าย มีมาตรฐาน และมีความสอดคล้องกันมากขึ้น

2.3.1 คุณสมบัติของ CANopen

มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น (Flexible Structure) รองรับการสื่อสารทั้งแบบเรียลไทม์ และการกำหนดค่าการทำงานของอุปกรณ์

โพรโตคอลเลเยอร์สูง (Higher Layer Protocol) จัดการเลเยอร์การสื่อสารที่สูงกว่าระดับเฟรมของ CAN โดยกำหนดมาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์

อิงมาตรฐานเปิด (Open Standard) ถูกออกแบบให้เป็นมาตรฐานเปิด ผู้ผลิตอุปกรณ์และนักพัฒนาสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านลิขสิทธิ์

2.3.2 ส่วนประกอบหลักของ CANopen

1) Object Dictionary (OD) โครงสร้างข้อมูลที่จัดเก็บการตั้งค่าและพารามิเตอร์การทำงานของอุปกรณ์ แต่ละอุปกรณ์จะมี Object Dictionary ของตนเอง เช่น พารามิเตอร์การสื่อสารและการควบคุมการทำงาน

2) Communication Protocol (โพรโตคอลการสื่อสาร) ประกอบด้วยกลไกการสื่อสารที่สำคัญ ได้แก่

PDO (Process Data Object) สำหรับส่งข้อมูลกระบวนการแบบเรียลไทม์ เช่น ค่าสถานะเซ็นเซอร์

SDO (Service Data Object) สำหรับการสื่อสารที่ไม่ใช่เรียลไทม์ เช่น การอ่าน-เขียนข้อมูลไปยัง Object Dictionary

NMT (Network Management) สำหรับการจัดการสถานะของอุปกรณ์ในเครือข่าย เช่น การเปิด/ปิดอุปกรณ์

SYNC ใช้ซิงโครไนซ์ข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการการประสานการทำงาน

EMCY (Emergency Object) ใช้ในการส่งข้อมูลฉุกเฉินเมื่อเกิดข้อผิดพลาด

3) Node ID ทุกอุปกรณ์ในเครือข่าย CANopen จะต้องมีหมายเลขประจำตัว (Node ID) ที่ไม่ซ้ำกัน เพื่อใช้ระบุและสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นในระบบ

2.3.3 การใช้งานของ CANopen

- 1) ยานยนต์ (Automotive) ใช้ในการควบคุมระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ เช่น เครื่องยนต์ ระบบเบรก และระบบควบคุมความเร็วอัตโนมัติ
- 2) ระบบเครื่องจักรกลในโรงงาน (Industrial Automation) ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ อุตสาหกรรม สายการผลิต และเครื่องจักรอัตโนมัติ
- 3) ระบบพลังงาน (Energy Systems) ใช้ควบคุมการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ ระบบเก็บพลังงาน และโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) การแพทย์ (Medical Devices) ใช้ในการควบคุมและสื่อสารกับอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องตรวจวัดหัวใจและอุปกรณ์ช่วยชีวิตอัตโนมัติ

2.3.4 ข้อดีของ CANopen

- 1) การจัดการเครือข่ายที่ง่าย รองรับการเพิ่มหรือลดอุปกรณ์โดยไม่ต้องปรับโครงสร้างเครือข่ายทั้งหมด
- 2) รองรับการสื่อสารแบบเรียลไทม์ ทำให้การควบคุมอุปกรณ์มีความแม่นยำและตอบสนองได้รวดเร็ว
- 3) การตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาด เช่น การใช้ EMCY เพื่อแจ้งเตือนและแก้ไขปัญหาทันที
- 4) ความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถปรับแต่งและขยายระบบได้ตามความต้องการของแต่ละอุตสาหกรรม

2.3.5 ข้อจำกัดของ CANopen

- 1) ความซับซ้อนในการตั้งค่า การปรับแต่งระบบจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในโปรโตคอล

2.3.6 สรุป

CANopen เป็นโปรโตคอลที่มีความยืดหยุ่นสูง เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการการสื่อสารที่รวดเร็ว ปลอดภัย และมีความเสถียรสูง สามารถสนับสนุนทั้งการสื่อสารแบบเรียลไทม์ การจัดการเครือข่ายที่มีหลายอุปกรณ์ และการตรวจจับข้อผิดพลาด ทำให้ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในยานยนต์ ระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม ระบบพลังงาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์

2.4 PCAN-USB

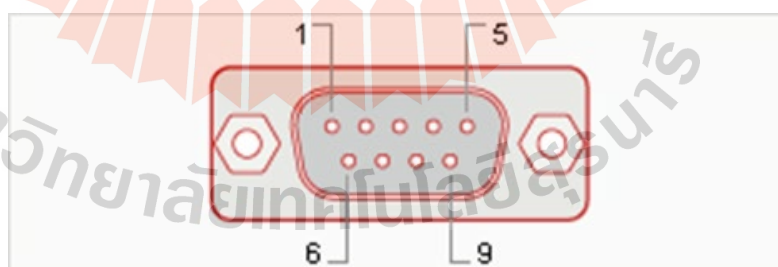
PCAN-USB เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อโปรโตคอล CAN เข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB โดยทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณ (Signal Converter) เพื่อให้สามารถตรวจสอบ วิเคราะห์ และจัดการข้อมูลที่ส่งผ่านระบบ CAN ได้อย่างสะดวก อุปกรณ์นี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการพัฒนา และทดสอบระบบที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ รวมถึงอุปกรณ์ที่ต้องใช้การสื่อสารผ่าน CAN แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 PCAN-USB ที่มา peak-system

2.4.1 การกำหนดขาของ D-Sub

PCAN-USB ใช้หัวต่อแบบ D-Sub 9 ขา (D-Sub 9-pin connector) โดยมีข้อกำหนดขา ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขาของ D-Sub ที่มา peak-system

ตารางที่ 2.1 การกำหนดขาของ D-Sub

Pin	การเชื่อมต่อ
1	Not connected / optional +5 V
2	CAN-L
3	GND
6	GND
7	CAN-H
9	Not connected / optional +5 V

2.4.2 คุณสมบัติหลักของ PCAN-USB

การเชื่อมต่อผ่าน USB สามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์หรือแล็ปท็อปได้ง่าย รองรับการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์

รองรับการสื่อสารผ่าน CAN สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ในระบบ CAN ได้โดยตรง ทั้งการอ่านข้อมูลและการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ

การใช้งานที่หลากหลาย เหมาะสำหรับงานตรวจสอบและทดสอบระบบ CAN ในยานยนต์ เครื่องจักรอุตสาหกรรม และการพัฒนาระบบ BMS

2.4.3 ประโยชน์ของ PCAN-USB

1) การตรวจสอบและดีบั๊กข้อมูล ทำให้การตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลในระบบ CAN ทำได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้นผ่านคอมพิวเตอร์

2) รองรับซอฟต์แวร์ PCAN-View สามารถใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ PCAN-View ซึ่งช่วยแสดงข้อมูลจาก CAN bus ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถปรับแต่งได้

3) รองรับการใช้งานในหลายระบบ ตั้งแต่ยานยนต์ไฟฟ้า การควบคุมเครื่องจักรอุตสาหกรรม ไปจนถึงการพัฒนาระบบควบคุมที่ใช้การสื่อสารผ่าน CAN

2.4.4 การนำไปใช้

การทดสอบและวิเคราะห์ระบบ CAN สายเชื่อมต่อจาก PEAK สามารถใช้เชื่อมต่อเครือข่าย CAN bus กับคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ผ่านซอฟต์แวร์ เช่น PCAN-View

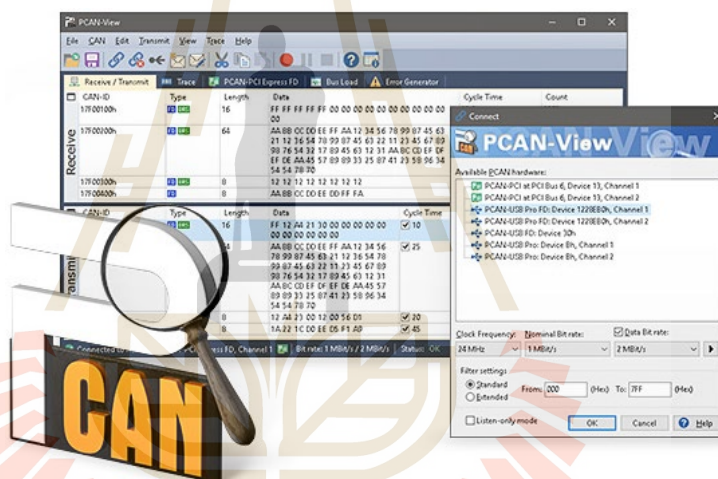
การตรวจสอบและบันทึกข้อมูลในระบบยานยนต์ไฟฟ้า มักใช้ในการตรวจสอบข้อมูลจาก BMS หรือระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อบันทึกและติดตามสถานการณ์ทำงานของระบบ

2.4.5 สรุป

โดยทั่วไป PEAK-System Technik GmbH ซึ่งเป็นผู้พัฒนา PCAN-USB ได้รับการยอมรับว่าเป็นหนึ่งในผู้ผลิตอุปกรณ์และสายสื่อสาร CAN ที่มีคุณภาพสูงและรองรับการใช้งานได้อย่างหลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ

2.5 โปรแกรม PCAN-View

โปรแกรม PCAN-View เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดยบริษัท PEAK-System เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลในระบบ CAN bus โดยเฉพาะ ซอฟต์แวร์นี้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์เชื่อมต่อ CAN ของ PEAK เช่น PCAN-USB ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลที่ส่งผ่าน CAN bus และวิเคราะห์การทำงานของระบบได้อย่างละเอียดและมีประสิทธิภาพแสดงโปรแกรม PCAN-View ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โปรแกรม PCAN-View ที่มา peak-system

2.5.1 คุณสมบัติหลักของ PCAN-View

การรับและส่งข้อความ CAN ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อความ CAN (CAN message) ที่รับและส่งผ่าน CAN bus ได้แบบเรียลไทม์

การกรองข้อมูล (Filtering) สามารถกรองข้อความ CAN ที่ต้องการดูได้ เพื่อให้การวิเคราะห์เฉพาะเจาะจงและง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ รองรับการแสดงผลและบันทึกข้อมูล CAN message ได้ทันที ทำให้สามารถติดตามสถานะการทำงานและแก้ไขปัญหาได้รวดเร็ว

การตรวจสอบการสื่อสารทั้ง CAN 2.0A/B และ CAN FD รองรับทั้ง CAN แบบดั้งเดิมและ CAN FD (Flexible Data-rate) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็วและมีขนาดใหญ่กว่า

การบันทึกและส่งออกข้อมูล สามารถบันทึกข้อมูลจาก CAN bus และส่งออกเป็นไฟล์ เช่น CSV เพื่อนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติม

2.5.2 วิธีการใช้งาน PCAN-View

เชื่อมต่ออุปกรณ์ CAN (เช่น PCAN-USB) กับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB และเชื่อมต่อกับเครือข่าย CAN bus ที่ต้องการตรวจสอบ ติดตั้งไดรเวอร์ที่ถูกต้องสำหรับอุปกรณ์ PEAK ซึ่งสามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ของ PEAK-System เปิดโปรแกรม PCAN-View และเลือกพอร์ตหรืออินเทอร์เฟซที่เชื่อมต่อกับ CAN bus ตรวจสอบและวิเคราะห์ CAN message โดยผู้ใช้สามารถเลือกที่จะส่งข้อความ CAN ด้วยตนเองเพื่อทดสอบระบบได้ บันทึกข้อมูลการทำงานของ CAN bus และส่งออกเป็นไฟล์เพื่อการวิเคราะห์เพิ่มเติม

2.5.3 การประยุกต์ใช้งาน PCAN-View

การทดสอบและพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ CAN bus เหมาะสำหรับทดสอบอุปกรณ์ เช่น เซ็นเซอร์, ECU และระบบ BMS ในยานยนต์ไฟฟ้า

การวิเคราะห์ปัญหา สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อผิดพลาดในระบบ CAN bus ได้แบบเรียลไทม์ ทำให้การแก้ไขปัญหาทำได้รวดเร็ว

การจำลองการทำงานของระบบ ผู้ใช้สามารถส่งข้อความ CAN ที่จำลองขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานของระบบในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้

2.5.4 ข้อดีของ PCAN-View

- 1) ใช้งานง่าย ผู้ใช้สามารถเริ่มต้นใช้งานได้โดยไม่ต้องมีประสบการณ์เชิงลึกเกี่ยวกับ CAN bus
- 2) รองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์การทำงานของ CAN bus ได้ทันที
- 3) รองรับการบันทึกและส่งออกข้อมูล ช่วยเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติมหรือบันทึกข้อมูลระบบเพื่ออ้างอิงภายหลัง

2.5.5 ข้อจำกัดของ PCAN-View

- 1) จำกัดเฉพาะอุปกรณ์ของ PEAK-System ซอฟต์แวร์นี้สามารถใช้งานได้เฉพาะกับอุปกรณ์ที่ผลิตโดย PEAK-System เท่านั้น ไม่รองรับอุปกรณ์จากผู้ผลิตรายอื่น
- 2) การตั้งค่าขั้นสูงซับซ้อน ผู้ใช้ใหม่ที่ไม่คุ้นเคยกับระบบ CAN bus อาจพบว่าการตั้งค่าในเชิงลึกมีความซับซ้อนพอสมควร

2.5.6 สรุป

PCAN-View เป็นซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบ วิเคราะห์ และทดสอบระบบ CAN bus เหมาะสมสำหรับการพัฒนา การดีบัก และการวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ใช้ CAN โดยเฉพาะในยานยนต์ไฟฟ้าและระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติ ซึ่งต้องการการตรวจสอบที่แม่นยำและตอบสนองได้รวดเร็ว

2.6 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมสูงในการใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ไฟฟ้า และระบบจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ พลังงานจำเพาะสูง (High Energy Density) น้ำหนักเบา รอบการชาร์จยาวนาน และมีประสิทธิภาพในการเก็บและปลดปล่อยพลังงาน หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนลิเทียมระหว่างขั้วบวก (Cathode) และขั้วลบ (Anode) โดยมีวัสดุเคมีหลายประเภทที่ใช้ในขั้วบวก เช่น ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO), ลิเทียมเหล็กฟอสเฟต (LFP) และลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (NMC) การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่น ความหนาแน่นพลังงาน ความปลอดภัย อายุการใช้งาน และต้นทุน

2.6.1 ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

- 1) พลังงานสูง ทำให้อุปกรณ์ทำงานได้นาน
- 2) น้ำหนักเบา เหมาะกับอุปกรณ์พกพาและยานยนต์ไฟฟ้า
- 3) อัตราการชาร์จรวดเร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น
- 4) อายุการใช้งานยาวนาน

2.6.2 ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

- 1) ไวต่ออุณหภูมิสูง หากชาร์จเกินหรือเกิดความร้อนสูง อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพหรือเสียหาย
- 2) ต้นทุนสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น เช่น นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd)
- 3) ต้องใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันการชาร์จเกินและควบคุมความปลอดภัย

นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมีบทบาทสำคัญใน เทคโนโลยีพลังงานทดแทน โดยเฉพาะในการจัดเก็บพลังงานจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยตารางที่ 2.2 ได้แสดงการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแต่ละชนิด

ชนิดแบตเตอรี่	แรงดันไฟฟ้าปกติ	ช่วงแรงดันใช้งาน	การใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ลิเธียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO)	3.6 - 3.7V	3.0V - 4.2V	โทรศัพท์มือถือ, แล็ปท็อป, กล้อง	พลังงานสูง เหมาะกับอุปกรณ์พกพา	อายุการใช้งานสั้น เกิดความร้อนสูงได้
ลิเธียมแมงกานีสออกไซด์ (LMO)	3.7V	3.0V - 4.2V	เครื่องมือไฟฟ้า, ยานพาหนะไฟฟ้าแบบไฮบริด(HEVs)	ปลอดภัยสูง, ชาร์จเร็ว, ใช้งานได้หลากหลาย	อายุการใช้งานสั้นกว่าเมื่อเทียบกับ NMC
ลิเธียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ (NMC)	3.6 - 3.7V	3.0V - 4.2V	ยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบจัดเก็บพลังงาน, อุปกรณ์พกพา	พลังงานสูง, อายุการใช้งานนาน	ไวต่ออุณหภูมิ, ต้องการ BMS ที่ดี, ต้นทุนปานกลาง
ลิเธียมเหล็กฟอสเฟต (LFP)	3.2 - 3.3V	2.5V - 3.6V	รถยนต์ไฟฟ้า, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์	ความปลอดภัยสูง, อายุการใช้งานนาน	พลังงานต่ำ
ลิเธียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียม (NCA)	3.6 - 3.7V	3.0V - 4.2V	รถยนต์ Tesla, อุปกรณ์ที่ต้องการพลังงานสูง	พลังงานสูง, อายุการใช้งานนาน	ต้นทุนสูง, ไวต่ออุณหภูมิ
ลิเธียมไททาเนต (LTO)	2.4V	1.8V - 2.85V	รถบัสไฟฟ้า, ระบบจัดเก็บพลังงาน	ความปลอดภัยสูงมาก, ชาร์จเร็ว, อายุการใช้งานนาน	พลังงานต่ำ

2.6.3 สรุป

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยียุคใหม่ ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และระบบจัดเก็บพลังงานทดแทน เนื่องจากมีสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงานสูง ปลอดภัย และความทนทาน แต่การเลือกชนิดแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับความต้องการเฉพาะของการใช้งาน เช่น LCO เหมาะกับอุปกรณ์พกพา, LFP เหมาะกับงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง, และ NMC/NCA เหมาะกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการพลังงานสูงและอายุการใช้งานยาวนาน

2.7 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบเอ็นเอ็มซี (Lithium-ion NMC Battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบเอ็นเอ็มซี (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, LiNiMnCoO_2 : NMC) เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนาจากการผสมผสานสารเคมีหลัก ได้แก่ ลิเทียม นิกเกิล แมงกานีส และโคบอลต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมดุลระหว่าง ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density), ความปลอดภัย (Safety) และ อายุการใช้งาน (Cycle Life) จึงได้รับความนิยมอย่างสูงใน ยานยนต์ไฟฟ้า และ ระบบจัดเก็บพลังงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและความน่าเชื่อถือ

2.7.1 คุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่ NMC

ความหนาแน่นพลังงานสูง สามารถเก็บพลังงานได้มากในพื้นที่ขนาดเล็ก เหมาะกับ งานที่ต้องการพลังงานสูง เช่น ยานยนต์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา

ความเสถียรและความปลอดภัย การผสมผสานองค์ประกอบทางเคมีทำให้แบตเตอรี่ มีความเสถียรเพิ่มขึ้น โดยนิกเกิลช่วยเพิ่มความจุ แมงกานีสช่วยเพิ่มความปลอดภัย และโคบอลต์ช่วย เพิ่มความเสถียรของโครงสร้างคริสตัล

อายุการใช้งานยาวนาน มีรอบการชาร์จและการใช้งานที่ยาวนานกว่าประเภท ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO) จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความทนทานระยะยาว เช่น รถยนต์ไฟฟ้า และระบบจัดเก็บพลังงาน

2.7.2 การใช้งานของแบตเตอรี่ NMC

- 1) ยานยนต์ไฟฟ้า ใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากให้สมดุลที่ ดีระหว่างพลังงาน ปลอดภัย และอายุการใช้งาน
- 2) ระบบจัดเก็บพลังงาน ใช้สำหรับเก็บพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เพื่อสำรองพลังงานและเพิ่มเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้า

2.7.3 ประโยชน์ของแบตเตอรี่ NMC

- 1) ประสิทธิภาพสูง เก็บพลังงานได้มากในพื้นที่ขนาดเล็ก
- 2) ปลอดภัยสูงกว่าบางประเภท เมื่อเทียบกับ LCO มีความเสี่ยงต่อความร้อน สะสมน้อยกว่า
- 3) อายุการใช้งานยาวนาน รองรับการใช้งานซ้ำได้หลายรอบโดยยังคงประสิทธิภาพ

2.7.4 ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ NMC

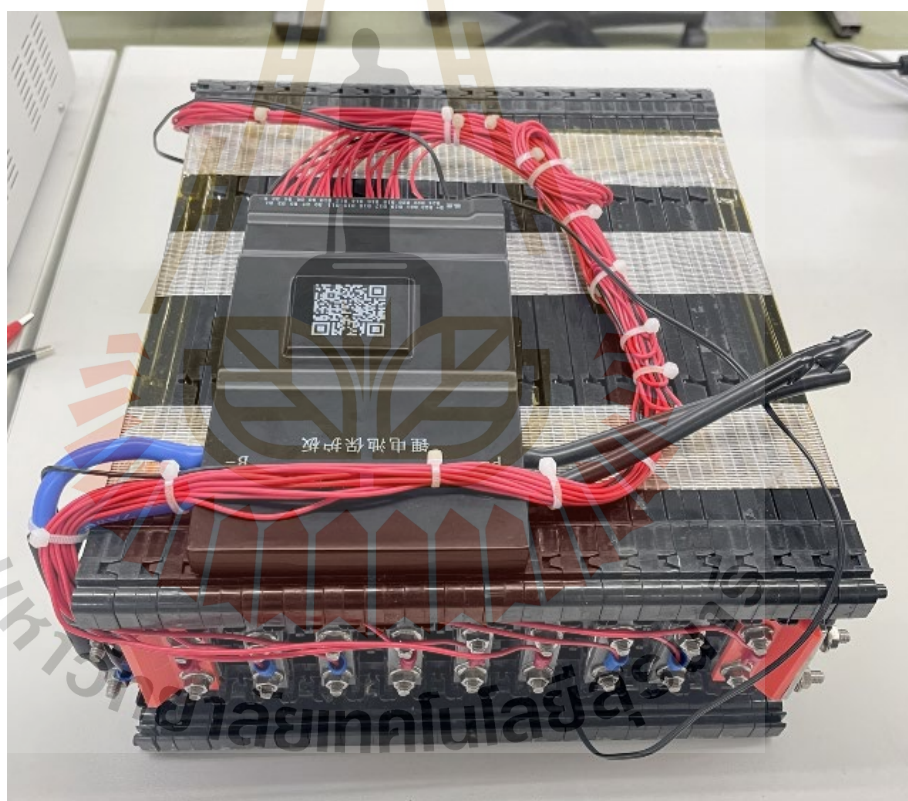
- 1) ต้นทุนสูง เนื่องจากมีโคบอลต์ซึ่งมีราคาสูงและมีข้อจำกัดด้านการจัดหา
- 2) อ่อนไหวต่ออุณหภูมิสูง หากใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงเกินไป อาจเกิดการ เสื่อมสภาพเร็วหรือประสิทธิภาพลดลง

2.7.5 สรุป

แบตเตอรี่ NMC ถือเป็นหนึ่งในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรม ยานยนต์ไฟฟ้า และ ระบบจัดเก็บพลังงาน ด้วยสมดุลที่ีระหว่างพลังงาน ความปลอดภัย และอายุการใช้งาน แม้จะมีข้อจำกัดด้านราคาและความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ แต่ก็ยังถือเป็นเทคโนโลยีหลักที่ตอบโจทย์ความต้องการด้านพลังงานในยุคปัจจุบันและอนาคต

2.8 การแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium-ion Battery Pack)

การแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในการรับรองความปลอดภัยและประสิทธิภาพของระบบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ การจัดแพ็คที่เหมาะสมไม่เพียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน แต่ยังช่วยป้องกันความเสียหายและยืดอายุการทำงานของแบตเตอรี่อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.6 การแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียม



รูปที่ 2.6 การแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียม

2.8.1 กระบวนการและหลักการสำคัญมีดังนี้

1) การเชื่อมต่อเซลล์แบตเตอรี่ (Cell Connection)

เซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมหลายเซลล์จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นชุด (Battery Pack) เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าหรือความจุที่สูงขึ้นตามความต้องการของอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแบบอนุกรม (Series Connection) แรงดันไฟฟ้ารวมเพิ่มขึ้น แต่ความจุ (Ah) เท่าเดิม ส่วนการเชื่อมต่อแบบขนาน (Parallel Connection) ความจุ (Ah) เพิ่มขึ้น แต่แรงดันไฟฟ้าคงเดิม รูปแบบการเชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ว่าให้ความสำคัญกับแรงดันไฟฟ้าหรือความจุเป็นหลัก

2) ระบบจัดการแบตเตอรี่

BMS จะถูกติดตั้งภายในแบตเตอรี่แพ็คเพื่อควบคุมและจัดการการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ โดยมีหน้าที่หลัก ได้แก่ การควบคุมการชาร์จและการคายประจุ, การควบคุมอุณหภูมิ, การสมดุลแรงดันระหว่างเซลล์ (Cell Balancing), การป้องกันการชาร์จเกิน การคายประจุเกิน และการลัดวงจร BMS จึงเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แพ็ค

3) วัสดุป้องกัน (Protective Materials)

วัสดุหุ้มและฉนวนมีบทบาทในการป้องกันการกระแทก การสั่นสะเทือน และการลัดวงจร วัสดุที่ใช้มักเป็น PVC หรือวัสดุโพลีเมอร์ที่ทนต่อการแตกหักและการลามไฟ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

4) การระบายความร้อน (Thermal Management)

การออกแบบแบตเตอรี่แพ็คต้องมีระบบระบายความร้อนเพื่อป้องกันการสะสมของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการชาร์จหรือการใช้งาน หากไม่สามารถระบายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ ประสิทธิภาพลดลง หรือเสี่ยงต่อการเกิด Thermal Runaway

5) โครงสร้างและการหุ้ม (Structure and Enclosure)

แบตเตอรี่แพ็คต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของเซลล์และความเสียหายจากการกระแทกหรือการขนส่ง การหุ้มมักทำจาก พลาสติกหรือโลหะ เพื่อเพิ่มความทนทานและระดับความปลอดภัย

6) การทดสอบความปลอดภัย (Safety Testing)

ก่อนนำแบตเตอรี่แพ็คไปใช้งานจริง จำเป็นต้องผ่านการทดสอบความปลอดภัยที่สำคัญ เช่น การทดสอบการระบายความร้อน, การทดสอบแรงดันไฟฟ้า, การทดสอบความต้านทานการลัดวงจร

การทดสอบเหล่านี้ช่วยให้มั่นใจว่าแบตเตอรี่แพ็คมีความปลอดภัยในการใช้งานภายใต้สภาวะต่าง ๆ

2.8.2 สรุป

การแพ็คแบตเตอรี่ลิเธียมที่ถูกต้องและได้มาตรฐานเป็นกระบวนการที่สำคัญในการรับรองความปลอดภัย ป้องกันการเกิดความร้อนสูงเกินไป การลัดวงจร หรือการระเบิด อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และประสิทธิภาพในการทำงานของระบบโดยรวม

2.9 ระบบจัดการแบตเตอรี่

ระบบจัดการแบตเตอรี่ เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมและจัดการการทำงานของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ซึ่งมีความซับซ้อนในการทำงานและมีความไวต่อสภาวะการใช้งานที่ไม่เหมาะสม ระบบ BMS มีบทบาทสำคัญในการทำให้แบตเตอรี่สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และยืดอายุการใช้งาน

2.9.1 หน้าที่หลักของระบบจัดการแบตเตอรี่

การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า (Voltage Monitoring) ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์เพื่อป้องกันแรงเกินหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งอาจทำให้เซลล์เสื่อมสภาพหรือเสียหายได้

การตรวจสอบอุณหภูมิ (Temperature Monitoring) ควบคุมและตรวจสอบอุณหภูมิของแบตเตอรี่เพื่อป้องกันความร้อนสูงเกินไปซึ่งอาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพหรือการลุกไหม้

การจัดการกระแสไฟฟ้า (Current Management) ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าและออกจากแบตเตอรี่เพื่อป้องกันการชาร์จเกิน (Overcharging) และการคายประจุเกิน (Over-discharging)

การสมดุลเซลล์แบตเตอรี่ (Cell Balancing) ทำให้แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ในชุดแบตเตอรี่มีความสมดุลกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

การแจ้งเตือนและความปลอดภัย (Protection and Alerts) แจ้งเตือนผู้ใช้งานเมื่อเกิดความผิดปกติ เช่น แรงดันไฟฟ้าสูงเกินหรือต่ำเกิน อุณหภูมิสูงเกิน หรือการทำงานผิดปกติ พร้อมมาตรการป้องกันเพื่อไม่ให้ระบบล้มเหลว

2.9.2 ส่วนประกอบหลักของระบบจัดการแบตเตอรี่

- 1) เซ็นเซอร์ (Sensors) ใช้ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิของแบตเตอรี่
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit: MCU) ประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์และควบคุมการทำงานของระบบแบตเตอรี่
- 3) ชุดควบคุมสมดุล (Balancing Circuit) ทำหน้าที่ปรับสมดุลแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ให้ใกล้เคียงกัน

2.9.3 ประโยชน์ของระบบจัดการแบตเตอรี่

- 1) เพิ่มความปลอดภัย ลดความเสี่ยงจากการเกิดความร้อนสูงเกินไป การลุกไหม้ หรือการระเบิดของแบตเตอรี่
- 2) ยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ ลดปัญหาการเสื่อมสภาพที่เกิดจากการชาร์จเกิน และการคายประจุเกิน
- 3) เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ทำให้แบตเตอรี่สามารถทำงานได้เต็มสมรรถนะ โดยการควบคุมและจัดการพลังงานอย่างเหมาะสม

2.9.4 การประยุกต์ใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่

- 1) ยานยนต์ไฟฟ้า จัดการและควบคุมแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย
- 2) ระบบจัดเก็บพลังงาน ควบคุมการใช้งานแบตเตอรี่ในระบบพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

2.9.5 สรุป

ระบบจัดการแบตเตอรี่ ถือเป็นหัวใจสำคัญของการใช้งานแบตเตอรี่ลิเธียมในยุคปัจจุบัน เนื่องจากช่วยเพิ่มความปลอดภัย ยืดอายุการใช้งาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ จึงถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและระบบพลังงานทดแทน

2.10 JK BMS (JiKong BMS)

JK BMS เป็นระบบจัดการแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมและถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะใน ยานยนต์ไฟฟ้า และ ระบบจัดเก็บพลังงาน เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือสูงและมีคุณสมบัติครบถ้วนในการควบคุมและจัดการแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน JK BMS ได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับระบบอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง แสดงรูป JK BMS ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 JK BMS ที่มา jikongbms

2.10.1 คุณสมบัติหลักของ JK BMS

- 1) การตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่ ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิของแต่ละเซลล์ได้อย่างแม่นยำ
- 2) การสมดุลเซลล์ รองรับการปรับสมดุลแบบ Active โดยการถ่ายโอนพลังงานจากเซลล์ที่มีพลังงานมากไปยังเซลล์ที่มีพลังงานน้อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
- 3) การป้องกันความปลอดภัย ป้องกันการทำงานผิดปกติ เช่น แรงดันไฟฟ้าเกิน อุณหภูมิสูงเกิน หรือการลัดวงจร
- 4) การคำนวณสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ประเมินและรายงานระดับการชาร์จและสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ได้อย่างแม่นยำ
- 5) การสื่อสารข้อมูล รองรับโปรโตคอลหลายรูปแบบ เช่น UART, CAN และ RS485 เพื่อใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอื่น ๆ ได้อย่างสะดวก
- 6) การควบคุมระยะไกล รองรับการเชื่อมต่อและควบคุมผ่านแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพาหรือแพลตฟอร์มออนไลน์ ทำให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและตั้งค่าการทำงานได้ทุกที่ทุกเวลา

2.10.2 การประยุกต์ใช้

- 1) ยานยนต์ไฟฟ้า ใช้ในการจัดการแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนให้ทำงานอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง
- 2) ระบบจัดเก็บพลังงาน ควบคุมการจัดการพลังงานในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและยืดอายุแบตเตอรี่
- 3) ระบบพลังงานทดแทน ใช้ในระบบโซลาร์เซลล์และโครงข่ายไฟฟ้าที่ต้องการการจัดการพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน

2.10.3 สรุป

แม้ว่า JK BMS จะไม่รองรับโปรโตคอล CAN โดยตรง แต่สามารถใช้งานร่วมกับโมดูลแปลงสัญญาณ เพื่อให้ส่งข้อมูลผ่าน CAN bus ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ การใช้งาน JK BMS ร่วมกับ ESP32 และ TJA1051 สามารถทำให้การสื่อสารข้อมูลในเครือข่าย CAN มีความรวดเร็วและเสถียร

ข้อได้เปรียบสำคัญของ JK BMS คือ ต้นทุนต่ำกว่าระบบ BMS ที่รองรับ CAN โดยตรง แต่ยังคงไว้ซึ่งความสามารถในการจัดการและสื่อสารข้อมูลของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาและวิจัยระบบจัดการแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าและระบบพลังงานทดแทน

2.11 UART

UART เป็นโปรโตคอลการสื่อสารแบบอนุกรมที่ใช้สำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณนาฬิกา (Clock Signal) ในการควบคุมการส่งข้อมูล จึงถูกจัดเป็นการสื่อสารแบบ Asynchronous หรือ ไม่ประสานเวลา จุดเด่นของ UART คือ ความเรียบง่ายในการออกแบบและการใช้งาน เหมาะสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์สื่อสารอื่น ๆ

2.11.1 การทำงานของ UART

การส่งข้อมูล (Transmit) UART ทำการแปลงข้อมูลในรูปแบบขนาน (Parallel Data) จากไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ต้นทางให้เป็นข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Data) แล้วส่งผ่านสายสัญญาณ

การรับข้อมูล (Receive) UART รับข้อมูลในรูปแบบอนุกรมจากสายสัญญาณ และแปลงกลับเป็นข้อมูลแบบขนานเพื่อส่งต่อให้กับอุปกรณ์ปลายทาง

2.11.2 โครงสร้างข้อมูลในการส่งผ่าน UART

Start Bit ใช้บอกอุปกรณ์ปลายทางว่าการส่งข้อมูลได้เริ่มต้นขึ้น

Data Bits บิตข้อมูลที่ถูกส่ง (ตั้งแต่ 5 ถึง 9 บิต ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า)

Parity Bit (ถ้ามี) ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

Stop Bit บอกจุดสิ้นสุดของการส่งข้อมูล โดยทั่วไปกำหนดเป็น 1 หรือ 2 บิต

2.11.3 คุณสมบัติของ UART

Asynchronous Communication ไม่มีสัญญาณนาฬิกาในการประสานการทำงาน ทำให้ทั้งสองอุปกรณ์ต้องตั้งค่าอัตราการส่งข้อมูล (Baud Rate) ให้ตรงกัน

Simplex, Half-duplex, และ Full-duplex สามารถทำงานได้ทั้งแบบส่งอย่างเดียว (Simplex), ส่งและรับสลับกัน (Half-duplex), และส่งพร้อมรับ (Full-duplex)

ความเร็ว (Baud Rate) อัตราการส่งข้อมูลที่นิยมใช้ เช่น 9,600 bps และ 115,200 bps

การส่งข้อมูลแบบ 8N1 รูปแบบที่พบบ่อยที่สุด คือ ข้อมูล 8 บิต, ไม่มี Parity, และ Stop Bit 1 บิต

2.11.4 การประยุกต์ใช้ของ UART

- 1) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้ในการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น เซ็นเซอร์ หน้าจอแสดงผล และอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล
- 2) การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่อพ่วง ใช้เชื่อมต่อกับโมเด็ม หรืออุปกรณ์ IoT
- 3) การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ ใช้ในระบบอัตโนมัติ ระบบจัดการพลังงาน (เช่น BMS) และยานยนต์ไฟฟ้า

2.11.5 ข้อดีของ UART

- 1) ออกแบบง่าย ไม่ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาในการควบคุม
- 2) ต้นทุนต่ำ ใช้ทรัพยากรฮาร์ดแวร์น้อยในการติดตั้ง
- 3) รองรับ Full-duplex สามารถส่งและรับข้อมูลพร้อมกันได้

2.11.6 ข้อจำกัดของ UART

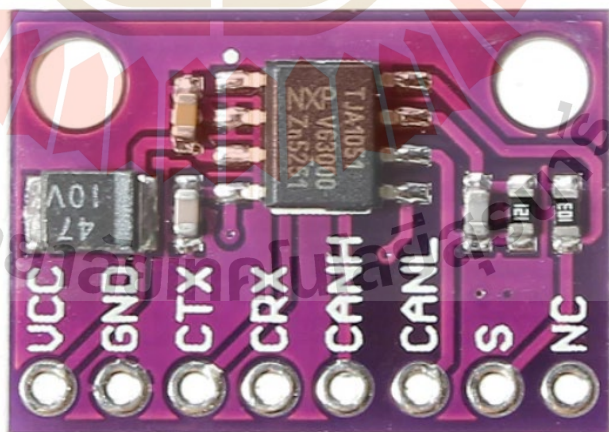
- 1) ความเร็วต่ำกว่า SPI และ I2C เนื่องจากไม่มีสัญญาณนาฬิกากำกับ
- 2) ข้อจำกัดในการเชื่อมต่อหลายอุปกรณ์ UART เหมาะกับการเชื่อมต่อแบบ Point-to-Point ระหว่างอุปกรณ์ ไม่เหมาะสำหรับเครือข่ายที่มีหลายโหนด

2.11.7 สรุป

UART เป็นวิธีการสื่อสารที่มีความเรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และเหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไปในระบบที่ไม่ต้องการการรับ-ส่งข้อมูลความเร็วสูง แม้จะมีข้อจำกัดด้านความเร็วและการเชื่อมต่อหลายอุปกรณ์ แต่ก็ยังคงเป็นมาตรฐานการสื่อสารที่สำคัญในงานด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบ IoT และการจัดการพลังงานในปัจจุบัน

2.12 โมดูลแปลงสัญญาณ TJA1051

TJA1051 เป็นโมดูลแปลงสัญญาณ (CAN Transceiver) จากบริษัท NXP Semiconductors ที่ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณ CAN โดยเฉพาะสำหรับการใช้งานในระบบยานยนต์และงานอุตสาหกรรม โมดูลนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแปลงสัญญาณข้อมูลจาก CAN bus ไปยังหน่วยประมวลผลที่รองรับการเชื่อมต่อแบบ UART หรือ SPI เพื่อให้สามารถสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ESP32 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โมดูลแปลงสัญญาณ TJA1051 ที่มา NXP Semiconductors

2.12.1 คุณสมบัติหลักของ TJA1051

CAN Transceiver ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณในเครือข่าย CAN
 รองรับ CAN bus ความเร็วสูง สามารถสื่อสารข้อมูลได้สูงสุดถึง 1 Mbit/s
 ความปลอดภัยสูง ป้องกันการรบกวนจากสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) และมีการ
 ป้องกันการกระชากไฟฟ้า (ESD Protection)

Low Electromagnetic Emission (EME) ออกแบบมาเพื่อลดการปล่อยคลื่น
 แม่เหล็กไฟฟ้า เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง เช่น ภายในยานยนต์

Standby Mode รองรับโหมดประหยัดพลังงานเมื่อไม่ได้ใช้งาน เพื่อลดการ
 สิ้นเปลืองพลังงานในระบบ

Fail-Safe Mechanisms มีระบบป้องกันความผิดพลาด เช่น การป้องกันการ
 ลัดวงจร และการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage Protection)

2.12.2 การใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านเครือข่าย
 CAN เช่น BMS และ หน้าจอแสดงผล สำหรับการจัดการพลังงาน การชาร์จ และการตรวจสอบ
 สถานะยานยนต์เพิ่มความเร็ว ความแม่นยำ และความปลอดภัยในการส่งข้อมูล เนื่องจากมี
 ความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนและรองรับการทำงานในระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง

2.12.3 การแปลงสัญญาณจาก UART เป็น CAN ด้วย TJA1051

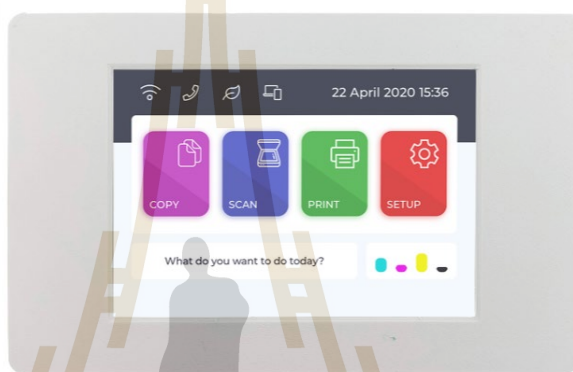
โมดูล TJA1051 รองรับการแปลงสัญญาณจาก UART ไปเป็นโปรโตคอล CAN โดย
 สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและมีความน่าเชื่อถือสูง ในงานวิจัยนี้ โมดูล TJA1051 มีบทบาทสำคัญ
 ในการแปลงข้อมูลที่ได้จาก UART ให้เป็นข้อมูลในรูปแบบ CAN ซึ่งสามารถส่งต่อไปยังอุปกรณ์อื่นใน
 ระบบได้โดยตรง ทำให้ลดความซับซ้อนในการพัฒนาระบบการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งยัง
 ช่วยให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลมีความแม่นยำและทันท่วงที

2.12.4 สรุป

TJA1051 เป็นโมดูลแปลงสัญญาณ CAN ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีระบบป้องกันที่
 ครอบคลุม จึงเหมาะสมกับการใช้งานใน ยานยนต์ไฟฟ้า และ ระบบอุตสาหกรรม ที่ต้องการการ
 สื่อสารที่รวดเร็ว ปลอดภัย และเชื่อถือได้

2.13 หน้าจอแสดงผล ATD3.5-S3

ATD3.5-S3 เป็นหน้าจอแสดงผลแบบ TFT LCD ขนาด 3.5 นิ้ว ที่รองรับการสัมผัสแบบ Capacitive Touch และได้รับการออกแบบมาให้ทำงานร่วมกับบอร์ด ESP32-S3 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงทั้งในด้านการประมวลผลและการเชื่อมต่อแบบไร้สาย (Wi-Fi และ Bluetooth) หน้าจอรุ่นนี้ถือเป็นส่วนสำคัญของโซลูชันระบบฝังตัว (Embedded System) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้าน Internet of Things (IoT), ระบบควบคุมอัตโนมัติ และอุปกรณ์สมาร์ทโฮม โดยเฉพาะงานที่ต้องการแสดงผลกราฟิกและการโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านระบบสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หน้าจอแสดงผล ATD3.5-S3 ที่มา ATD3.5-S3 research

2.13.1 คุณสมบัติหลักของ ATD3.5-S3

ขนาดและความละเอียดหน้าจอ TFT LCD ขนาด 3.5 นิ้ว ความละเอียดสูงถึง 320 × 480 พิกเซล รองรับการแสดงผลแบบสีเต็มรูปแบบ (Full Color)

ระบบสัมผัสแบบ Capacitive รองรับการสัมผัสที่แม่นยำและตอบสนองไว โดยไม่ต้องใช้แรงกดมากเหมือนหน้าจอแบบ Resistive เหมาะกับการโต้ตอบ เช่น การแตะ การปิด และการซูม

โปรโตคอลการเชื่อมต่อ ใช้การเชื่อมต่อผ่าน SPI สำหรับการแสดงผล และ I2C สำหรับการสื่อสารกับระบบสัมผัส Capacitive Touch ทำให้การสื่อสารข้อมูลมีความเร็วและเสถียร

รองรับไลบรารีการแสดงผล สามารถทำงานร่วมกับไลบรารียอดนิยมอย่าง TFT_eSPI ทำให้ผู้พัฒนาสามารถเขียนโค้ดควบคุมหน้าจอได้ง่ายและยืดหยุ่น

2.13.2 การใช้งาน ATD3.5-S3 ร่วมกับ ESP32-S3

บอร์ด ESP32-S3 รองรับการทำงานกับหน้าจอ ATD3.5-S3 ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการเชื่อมต่อใช้ SPI สำหรับการแสดงผลกราฟิก และ I2C สำหรับการควบคุมระบบสัมผัส Capacitive Touch ซึ่งให้ความละเอียดและความไวสูง

การติดตั้งและใช้งานสามารถทำได้สะดวกโดยการกำหนดค่าไลบรารี TFT_eSPI สำหรับการแสดงผล และใช้ไลบรารีเฉพาะ เช่น FT6236 Driver สำหรับการจัดการระบบสัมผัสแบบ Capacitive ซึ่งช่วยให้การพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2.13.3 ข้อดีของการใช้ ATD3.5-S3

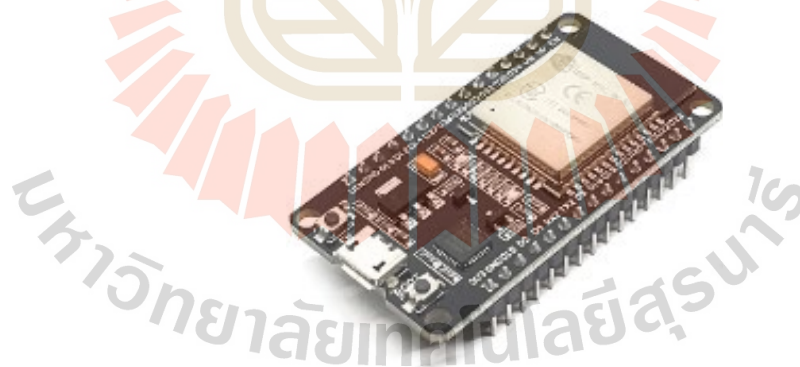
- 1) การแสดงผลที่มีความละเอียดสูงและสีสดใส เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความคมชัดและความสวยงามของกราฟิก
- 2) รองรับระบบสัมผัสที่แม่นยำ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการโต้ตอบของผู้ใช้ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความละเอียดในการสัมผัส
- 3) การเชื่อมต่อที่สะดวกและรวดเร็ว ใช้โปรโตคอลมาตรฐาน (SPI และ I2C) ซึ่งช่วยลดความหน่วงในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล

2.13.4 สรุป

หน้าจอ ATD3.5-S3 เป็นโซลูชันที่ครบถ้วนและเหมาะสมสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ IoT และระบบฝังตัวที่ต้องการทั้งความสามารถในการแสดงผลกราฟิกคุณภาพสูงและการโต้ตอบผ่านระบบสัมผัสแบบ Capacitive Touch ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกสบายและประสิทธิภาพในการใช้งาน

2.14 โมดูล ESP32

ESP32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาโดยบริษัท Espressif Systems ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผลสูง และรองรับการเชื่อมต่อไร้สายทั้ง Wi-Fi และ Bluetooth โดยถูกออกแบบมาให้สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานหลากหลายด้าน เช่น ระบบอัตโนมัติ, IoT, และระบบควบคุมอัจฉริยะ ด้วยความสามารถในการเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างยืดหยุ่น ESP32 จึงเป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมสูงในงานวิจัยและอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โมดูล ESP32 ที่มา espressif

2.14.1 คุณสมบัติหลักของ ESP32

Dual Core Processor หน่วยประมวลผลแบบ Dual Core ความเร็ว 160–240 MHz สามารถประมวลผลข้อมูลได้รวดเร็วและรองรับงานที่มีความซับซ้อน

Wi-Fi และ Bluetooth รองรับมาตรฐาน Wi-Fi 802.11 b/g/n และ Bluetooth 4.2 (ทั้ง Classic และ Low Energy) เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อไร้สาย

GPIO Pins มีพอร์ต I/O จำนวนมาก รองรับโหมตการทำงานหลากหลาย เช่น PWM, ADC (Analog-to-Digital Conversion), และ I2C

รองรับหลายอินเทอร์เฟซ สามารถสื่อสารผ่าน UART, SPI และ I2C เพื่อเชื่อมต่อกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ภายนอก

การใช้พลังงานต่ำ รองรับโหมตประหยัดพลังงานหลายรูปแบบ เหมาะกับงานที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่

ความยืดหยุ่นในการพัฒนา สามารถเขียนโปรแกรมได้หลากหลายแพลตฟอร์ม เช่น Arduino IDE, ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), และ PlatformIO

2.14.2 การประยุกต์ใช้ ESP32

- 1) IoT ใช้ในโครงการ IoT หลากหลาย เช่น ระบบควบคุมไฟฟ้าอัจฉริยะ ระบบตรวจวัดสภาพอากาศ และระบบรักษาความปลอดภัย
- 2) ระบบควบคุมอัตโนมัติ ด้วยจำนวน GPIO Pins ที่มาก ทำให้ ESP32 เหมาะสำหรับควบคุมมอเตอร์ เซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ
- 3) การสื่อสารข้อมูล รองรับเชื่อมต่อ Wi-Fi และ Bluetooth จึงสามารถส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์หรืออุปกรณ์พกพาได้อย่างสะดวก

2.14.3 สรุป

ESP32 มีความสามารถสูงในการเชื่อมต่อกับระบบ BMS โดยเฉพาะการสื่อสารผ่าน UART ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบอนุกรมที่ใช้งานแพร่หลาย งานวิจัยหลายชิ้นได้นำ ESP32 ไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบยานยนต์ เนื่องจากมี ความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่อ ความเร็วในการสื่อสารข้อมูล และความสามารถในการประมวลผลแบบเรียลไทม์ ดังนั้น ESP32 จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยและการพัฒนาระบบที่ต้องการทั้งการประมวลผลที่รวดเร็ว การเชื่อมต่อที่ ยืดหยุ่น และความสามารถในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์จัดการพลังงานสมัยใหม่ เช่น BMS

2.15 Buck Converter หรือ Step-Down Converter

Buck Converter หรือที่เรียกว่า Step-Down Converter เป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ สวิตชิ่งในกลุ่มวงจร DC-DC Converter ที่ใช้เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าจากระดับที่สูงให้ต่ำลงอย่างมีประสิทธิภาพ วงจรชนิดนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยใช้ สวิตชิ่งควบคุมการทำงาน ซึ่งช่วยให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจร Linear Regulator

2.15.1 หลักการทำงานของ Buck Converter

Buck Converter ใช้หลักการของการสวิตช์ที่เปิด-ปิดด้วยความถี่สูง เพื่อควบคุม ปริมาณพลังงานที่ส่งจากแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) ไปยังแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) โดยมี องค์ประกอบหลักดังนี้

- 1) สวิตช์ (Switch) มักใช้ MOSFET หรือ BJT สำหรับเปิด-ปิดการไหลของ กระแสไฟฟ้า
- 2) ไดโอด (Diode) ทำหน้าที่นำกระแสเมื่อสวิตช์ปิด เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับ ของกระแส
- 3) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) กักเก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก และช่วยให้ กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง
- 4) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันขาออกมี ความราบเรียบ

2.15.2 การทำงานในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงสวิตช์เปิด (Switch ON) กระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยัง โหลด ขณะเดียวกันตัวเหนี่ยวนำจะกักเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก

ช่วงสวิตช์ปิด (Switch OFF) กระแสไฟฟ้าจากตัวเหนี่ยวนำยังคงไหลไปยังโหลดผ่าน ไดโอด เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำพยายามรักษาระแสให้คงที่ แม้แหล่งจ่ายจะถูกตัดออก

2.15.3 สมการแรงดันขาออกของ Buck Converter

แรงดันขาออกของ Buck Converter สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2-1)$$

โดยที่

V_{out} = แรงดันไฟฟ้าขาออก

D = Duty Cycle (อัตราส่วนระยะเวลาที่สวิตช์เปิด)

V_{in} = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

จากสมการจะเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้าขาออก จะมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ซึ่ง เป็นคุณลักษณะสำคัญของวงจร Buck Converter

2.15.4 ข้อดีของ Buck Converter

- 1) ประสิทธิภาพสูง ใช้การสวิตชิ่งที่มีการสูญเสียพลังงานต่ำ ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยกว่า Linear Regulator
- 2) ขนาดกะทัดรัด ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่ สามารถออกแบบให้เล็กและน้ำหนักเบา
- 3) การแปลงพลังงานที่มีประสิทธิภาพ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการ โดยมีการสูญเสียพลังงานน้อย

2.15.5 ข้อเสียของ Buck Converter

- 1) การออกแบบที่ซับซ้อน ต้องคำนึงถึงการทำงานของสวิตชิ่งและการเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม
- 2) สัญญาณรบกวนจากการสวิตชิ่ง (Switching Noise) อาจส่งผลกระทบต่อวงจรอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง
- 3) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการทำงานที่ความถี่สูง จำเป็นต้องมีการออกแบบเพื่อลดผลกระทบ

2.15.6 การประยุกต์ใช้งานของ Buck Converter

- 1) อุปกรณ์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ และแล็ปท็อป ที่ต้องการการแปลงแรงดันให้ต่ำลงเพื่อยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
- 2) ระบบยานยนต์ไฟฟ้า ใช้ในการแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่แรงดันสูง เพื่อนำไปใช้กับวงจรควบคุมหรืออุปกรณ์เสริม
- 3) แหล่งจ่ายไฟของคอมพิวเตอร์ ใช้แปลงไฟเพื่อจ่ายแรงดันต่ำให้กับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เช่น CPU และ GPU

2.15.7 สรุป

Buck Converter เป็นวงจรแปลงแรงดันที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ขนาดกะทัดรัด และสามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการประหยัดพลังงานและรองรับอุปกรณ์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ

2.16 SquareLine Studio

SquareLine Studio เป็นซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบและพัฒนาอินเทอร์เฟซผู้ใช้ (User Interface: UI) ที่ทำงานร่วมกับไลบรารี LVGL (Light and Versatile Graphics Library) ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับสร้างกราฟิกบนไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit: MCU) และอุปกรณ์ฝังตัว (Embedded System) โดยเฉพาะ โปรแกรม SquareLine Studio มีจุดเด่นที่ช่วยให้ผู้พัฒนาสามารถสร้างหน้าจอได้ด้วยการลากและวางวิดเจ็ต (Drag-and-Drop Widgets) รวมถึงสามารถกำหนดคุณสมบัติและเหตุการณ์ (Event) ได้อย่างสะดวก โดยไม่จำเป็นต้องเขียนโค้ดทั้งหมดด้วยตนเอง



รูปที่ 2.11 SquareLine Studio ที่มา squareline

2.16.1 ฟังก์ชันสำคัญของ SquareLine Studio

1) การจัดการโปรเจกต์และหน้าจอ (Project and Screen Management) สามารถสร้างโปรเจกต์ใหม่ กำหนดความละเอียดหน้าจอ และเพิ่มหน้าจอหลายหน้าเพื่อรองรับการทำงานที่หลากหลาย

2) การเพิ่มวิดเจ็ต (Widget Library) รองรับวิดเจ็ตมาตรฐานของ LVGL เช่น ป้ายข้อความ (Label) ปุ่มกด (Button) รูปภาพ (Image) แถบเลื่อน (Slider) และเกจ (Gauge)

3) การจัดการทรัพยากร (Asset Management) สามารถนำเข้ารูปภาพ ฟอนต์ และไฟล์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการออกแบบหน้าจอ

4) การกำหนดเหตุการณ์และการโต้ตอบ (Event and Action) ผู้ใช้สามารถกำหนดเหตุการณ์ เช่น การกดปุ่ม หรือการเปลี่ยนค่า เพื่อเชื่อมโยงกับการทำงานของระบบจริง

5) การส่งออกโค้ด (Code Export) เมื่อออกแบบเสร็จแล้ว สามารถส่งออกไฟล์โค้ดภาษา C/C++ ที่รองรับการทำงานร่วมกับ LVGL และนำไปประยุกต์ใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ESP32 หรือ STM32 ได้ทันที

จากคุณสมบัติดังกล่าว SquareLine Studio จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหน้าจอแสดงผลของระบบจัดการแบตเตอรี่ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการพัฒนา และทำให้การออกแบบอินเตอร์เฟซมีความเป็นระบบระเบียบและสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

โดยทั่วไป แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง น้ำหนักเบา และสามารถชาร์จ-คายประจุได้หลายรอบ อายุการใช้งานยาวนาน รวมถึงมีรูปแบบเคมีและโครงสร้างภายในที่สามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพและความปลอดภัยของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น เคมีของเซลล์ อุณหภูมิการทำงาน รูปแบบการชาร์จ-คายประจุ และระบบจัดการแบตเตอรี่ เพื่อควบคุมการทำงานให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการทบทวนงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงในตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	T. Waldmann et al.	บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิเคราะห์กลไกการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนภายใต้อุณหภูมิสูงด้วยวิธี post-mortem พบว่าอุณหภูมิสูงเร่งการเสื่อมหลายด้าน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกขั้วบวก การเสื่อมสภาพของขั้วลบ การสลายตัวของอิเล็กโทรไลต์ และการหนาตัวของชั้น SEI ส่งผลให้ความต้านทานภายในเพิ่มขึ้น กระทั่งต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จึงควรมีการออกแบบระบบระบายความร้อนหรือควบคุมอุณหภูมิอย่างเหมาะสมระหว่างการใช้งาน
2015	F. Leng et al.	บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยทดสอบที่ 25°C และ 55°C พบว่าอุณหภูมิสูงเร่งการเสื่อมของชั้น SEI และกระบวนการ side reactions ทำให้ความจุลดลงและความต้านทานภายในเพิ่มขึ้น แม้อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มการนำไอออนในอิเล็กโทรไลต์ แต่ผลเสียจากการเสื่อมสภาพในระยะยาวมีมากกว่า จึงเน้นย้ำถึงความสำคัญของการควบคุมอุณหภูมิเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	M. Weiss et al.	บทความนี้ศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการชาร์จเร็ว (fast charging) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากมุมมองทางวัสดุ โดยอธิบายว่าการชาร์จที่อัตราสูง (high C-rate) ทำให้เกิด overpotential สูงและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิด lithium plating ซึ่งอาจทำให้เกิดการลัดวงจรภายในและลดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังครอบคลุมการปรับปรุงวัสดุขั้วบวกและขั้วลบเพื่อลดผลกระทบจาก fast charging เช่น การใช้วัสดุที่มีการแพร่กระจายไอออนเร็ว การเคลือบผิวเพื่อป้องกันปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ และการออกแบบโปรไฟล์การชาร์จแบบ multi-stage หรือ pulse charging เพื่อลดความเครียดเชิงกล (mechanical stress) ต่อวัสดุ
2022	T. Rahman	บทความนี้นำเสนอการทบทวนปัจจัยและกลไกการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในระบบกักเก็บพลังงานและรถยนต์ไฟฟ้า ครอบคลุมสาเหตุสำคัญ เช่น การสลายตัวของอิเล็กโทรไลต์ การบวมตัวของขั้วบวก อุดหนุนอายุการใช้งานตามปฏิทิน และความลึกของการคายประจุ พร้อมวิเคราะห์ผลกระทบต่อความจุ ความหนาแน่นพลังงาน ความต้านทานภายใน และประสิทธิภาพโดยรวม โดยกล่าวถึงการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงข้อมูลเพื่อประเมินการเสื่อมสภาพ ตลอดจนเสนอแนวทางปฏิบัติและทิศทางการพัฒนาเพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความยั่งยืนของระบบ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังตารางที่ 2.3 พบแนวโน้มการพัฒนาที่สำคัญ ได้แก่ การควบคุมและจัดการอุณหภูมิระหว่างการใช้งานเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสดุ การออกแบบโปรไฟล์การชาร์จที่เหมาะสมเพื่อลดความเครียดและป้องกันการเกิด lithium plating การวิเคราะห์กลไกการเสื่อมสภาพเชิงซับซ้อนและการใช้เทคนิคปรับปรุงวัสดุ เช่น การดัดแปลงโครงสร้างผลึกและการ

เคลือบผิวของขั้วไฟฟ้า รวมถึงการประยุกต์ใช้ข้อมูลและแบบจำลองขั้นสูงเพื่อการติดตามและควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ ซึ่งแนวทางเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการเพิ่มความปลอดภัย ยืดอายุการใช้งาน และรองรับการใช้งานที่ต้องการความหนาแน่นพลังงานสูง จึงถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้

2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่

โดยทั่วไป ระบบจัดการแบตเตอรี่ มีหน้าที่หลักในการตรวจวัด ควบคุม และปกป้องแบตเตอรี่ ลิเธียมไอออนให้ทำงานอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยทำการติดตามสถานะการทำงาน เช่น สถานะการชาร์จแบตเตอรี่ สถานะสุขภาพ (State of Health : SOH) อุณหภูมิ กระแส และแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ เพื่อป้องกันการทำงานเกินขีดจำกัดที่อาจทำให้เกิดความเสียหายหรืออันตรายต่อระบบ ซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีการพัฒนาเทคโนโลยี BMS อย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อรองรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และอุปกรณ์พกพาต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบ BMS ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเน้นเทคโนโลยีและวิธีการสำคัญ เช่น อัลกอริทึมการประเมินค่า SOC และ SOH วิธีการปรับสมดุลแรงดันระหว่างเซลล์ (Cell Balancing) การควบคุมการชาร์จและการคายประจุที่เหมาะสม และการสื่อสารข้อมูลระหว่าง BMS กับระบบภายนอก โดยสรุปงานวิจัยที่สำคัญแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	X. Yang et al.	บทความนี้นำเสนอวิธี DOD-SOH equalization สำหรับระบบแบตเตอรี่แบบปรับโครงสร้างได้ (Dynamic Reconfigurable Battery Systems : DRB) โดยใช้ Deep Q-Network (DQN) จากเทคนิค deep reinforcement learning เพื่อเรียนรู้และควบคุมการสลับการทำงานของเซลล์ ลดความแตกต่างของ SOH และยืดอายุการใช้งานของแพ็คเกจแบตเตอรี่
2023	R. Li et al.	นำเสนอการประเมิน (State of Power : SOP) แบบหลายช่วงเวลา (multi-time scale) ของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยใช้ H_∞ filter เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการคาดการณ์ SOP ทั้งในสถานะชาร์จและคายประจุ เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบ BMS

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	L. Zhou et al.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการประเมินสถานะของแบตเตอรี่ ในระบบ BMS ครอบคลุม SOC, SOH, SOE และ SOP พร้อมวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของเทคนิคการประเมินแต่ละประเภท
2024	N. Q. Doan et al.	บทความนี้พัฒนาแนวทาง multi-agent deep Q-network (DQN) เพื่อการควบคุมแบบร่วมมือ (cooperative control) สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบต่อขนานและอนุกรม (parallel-series BESS) ช่วยยืดอายุการใช้งานและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน
2025	C. A. Ooi et al.	บทความนี้เสนอวิธีการ active cell balancing แบบใหม่ที่อ้างอิง State of Power (SoP-based) ทั้งในช่วงชาร์จและคายประจุ โดยใช้ SoP เป็นเกณฑ์ในการจัดสรรพลังงานระหว่างเซลล์ แทนการใช้เพียงแรงดันหรือ SOC และผสมผสาน Unscented Kalman Filter (UKF) ในการประเมิน SOC เพื่อความแม่นยำสูงขึ้น
2025	A. Oshnoei et al.	นำเสนอเทคนิค SOH balancing ในแพ็คแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้ Finite Set Model Predictive Control (FS-MPC) เพื่อเร่งการทำสมดุลของ SOH ระหว่างเซลล์ ลดความไม่สมดุล และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของแพ็ค

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่ามีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องทั้งด้านอัลกอริทึมและสถาปัตยกรรมระบบเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน งานวิจัยในช่วงปี 2023 ถึง 2025 แสดงให้เห็นถึงการนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์และการควบคุมขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ เช่น การใช้ deep reinforcement learning เพื่อทำ DOD-SOH equalization สำหรับระบบแบตเตอรี่แบบปรับโครงสร้างได้ การประเมินและควบคุม SOP ด้วย H_∞ filter และ UKF การประยุกต์ multi-agent DQN ในระบบกักเก็บพลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานและการใช้ Finite Set Model Predictive Control (FS-MPC) เพื่อเร่งการทำสมดุลของ SOH ระหว่างเซลล์ นอกจากนี้ยังมีการทบทวนแบบจำลองการประเมินสถานะของแบตเตอรี่เพื่อระบุข้อจำกัดและทิศทางการพัฒนาในอนาคต แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าระบบ BMS กำลังก้าวไปสู่การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีการตรวจวัดขั้นสูง อัลกอริทึมการประเมินสถานะที่แม่นยำ และการ

ควบคุมแบบอัจฉริยะ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen

มาตรฐาน CANopen เป็นหนึ่งในโพรโตคอลการสื่อสารที่พัฒนาต่อยอดจาก CAN โดยถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานในระบบอุตสาหกรรมและระบบควบคุมแบบกระจาย ซึ่งมีข้อดีในด้านความเสถียร ความยืดหยุ่น และการทำงานแบบเรียลไทม์ สามารถรองรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในยานยนต์ หุ่นยนต์ ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ งานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่การพัฒนาโครงสร้างโพรโตคอล การออกแบบซอฟต์แวร์สื่อสาร การผสมผสานการทำงานร่วมกับระบบควบคุมอื่น ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานในระบบพลังงานและการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	X. Zhe and D. Shifeng	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนา CANopen slave stack สำหรับตัวควบคุมระบบส่งกำลัง (Powertrain Controller) ของรถยนต์ไฮบริดชนิดอนุกรม (BJUT-SHEV) โดยใช้ PowerPC MPC565 และ eCos RTOS โครงสร้าง stack ประกอบด้วย driver layer, OS layer และ CANopen layer ที่รองรับการประมวลผลแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งการจัดการข้อความ CANopen ได้แก่ NMT, SDO, PDO, Heartbeat และ SYNC ได้อย่างครบถ้วน ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องตามมาตรฐาน CiA 301 และสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างชนิดในระบบยานยนต์ได้อย่างเสถียรและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	Y. Zhang, X. Zeng, X. Wang and F. Gao	บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายสำหรับหุ่นยนต์สี่ขาโดยใช้เครือข่าย CANopen แบ่งโครงสร้างควบคุมเป็น 3 ระดับ (การจัดการ, การประสานงาน, การปฏิบัติการ) พร้อมใช้ Copley ACJ-055-18 เป็นตัวควบคุมมอเตอร์แบบ closed-loop ที่รองรับตำแหน่ง ความเร็ว และกระแส ซอฟต์แวร์การสื่อสารออกแบบโดยใช้ SDO/PDO ผลการทดลองยืนยันว่าระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวหลายข้อต่อและทำงานแบบ hand-foot fusion ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ
2018	J. Pengfei, W. Rongchuan and X. Linsen	บทความนี้นำเสนอการสร้าง ระบบซอฟต์แวร์การสื่อสารของคอนโทรลเลอร์แบบเรียลไทม์ โดยผสมผสาน CANopen protocol เข้ากับ Robot Operating System (ROS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและมาตรฐานในการพัฒนาซอฟต์แวร์หุ่นยนต์ โครงสร้างระบบใช้โหนดหลัก ได้แก่ command generation, message sending (CanWrite), message parsing (CanRead) และ data processing ที่สื่อสารผ่าน ROS topics เพื่อควบคุมการทำงานของ modular manipulator ผลการทดลองยืนยันความสามารถของระบบในการสื่อสารแบบเรียลไทม์ มีความยืดหยุ่นสูง และช่วยยกระดับประสิทธิภาพการพัฒนา พร้อมรองรับการประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์หลายประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2019	G. Barone et al.	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ CANopen สำหรับเชื่อมต่อและควบคุมการทำงานระหว่างตัวควบคุมนาโนกริดกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 16.4 kWh โดยใช้ C2000 F28379D microcontroller ในการสื่อสารกับ BMS ผลการทดลองยืนยันความถูกต้องและความเสถียรของการแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านกลไก Heartbeat, PDOs, Keep Alive check และ Warning/Error tests ซึ่งสามารถติดตามและตรวจสอบ SOC, SOH, อุณหภูมิ, ความต้านทาน รวมถึงกระบวนการชาร์จ-คายประจุ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	P. . -T. Wu, C. . -C. Chuang, M. . -R. Hong, S. . -P. Wang and J. . -Y. Wu	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ CANopen protocol ในการควบคุมและสื่อสารกับเครื่องชาร์จบนยานยนต์ไฟฟ้า (OBC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความยืดหยุ่นในการชาร์จ ระบบสามารถควบคุมการเริ่มต้นและหยุดการชาร์จ การปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ง่าย และการตรวจสอบสถานะการทำงานทั้งหมดแบบเรียลไทม์ โดยใช้ PCANbus tool ในการทดสอบและแปลคำสั่ง CAN-ID ผลการทดลองยืนยันความเสถียรและความน่าเชื่อถือของ OBC ที่ควบคุมผ่าน CANopen รวมถึงการตรวจจับข้อผิดพลาดได้อย่างแม่นยำ ทำให้การชาร์จมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CANopen ตามตารางที่ 2.5 พบว่ามีการพัฒนาต่อเนื่องตั้งแต่การประยุกต์ใช้กับระบบส่งกำลังของรถยนต์ไฮบริด การควบคุมหุ่นยนต์แบบกระจาย และการผสานกับ ROS เพื่อยกระดับมาตรฐานซอฟต์แวร์หุ่นยนต์ ไปจนถึงการใช้งานในระบบนาโนกริดและการจัดการพลังงาน รวมถึงการประยุกต์ล่าสุดกับเครื่องชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (OBC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่า CANopen เป็นมาตรฐานการสื่อสารที่มีความยืดหยุ่นและเสถียร เหมาะสมต่อการใช้งานทั้งในด้านยานยนต์ หุ่นยนต์ และระบบพลังงานอัจฉริยะ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะในอนาคต

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN

มาตรฐาน CAN ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Bosch ตั้งแต่ปี 1980s เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในยานยนต์ โดยไม่ต้องพึ่งพาโครงสร้าง Master-Slave แบบดั้งเดิม จุดเด่นของ CAN คือสามารถสื่อสารได้แบบ multi-master รองรับ real-time communication มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Noise Immunity) และมีค่าใช้จ่ายด้านฮาร์ดแวร์ต่ำ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งใน ยานยนต์ (Automotive), ระบบควบคุมอุตสาหกรรม (Industrial Control), หุ่นยนต์ (Robotics) รวมถึง ระบบพลังงาน (Energy Systems) งานวิจัยจำนวนมากมุ่งพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัย ความเร็ว และการผสาน CAN เข้ากับ โพรโตคอลระดับสูง (Higher-layer protocols) เช่น CANopen, J1939 และล่าสุดคือ CAN FD เพื่อรองรับการส่งข้อมูลปริมาณมากขึ้น ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	B. J. Ahn, B. R. Park, Y. H. Ki, G. M. Jeong, H. S. Ahn และ D. H. Kim	บทความนี้พัฒนา CAN-based network interface unit สำหรับ Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (FCHEV) พร้อมนำเสนอวิธี holistic scheduling เพื่อแก้ปัญหาความล่าช้าในการส่งข้อมูลจาก priority inversion โดยการปรับ sampling period แบบไดนามิก ผลการทดสอบแสดงว่าสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบควบคุมและลด jitter ได้
2008	D. Wang, J. Nan, และ F. Sun	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ CAN และมาตรฐาน SAE J1939 ในระบบควบคุมแบบกระจายของรถโดยสารไฟฟ้า (electric city bus) โดยใช้ V85070F3239 embedded CAN controller และทำการจำลองบนแพลตฟอร์ม CANoe ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบสื่อสารทำงานได้ดี ลดจำนวนเซ็นเซอร์ เพิ่มความน่าเชื่อถือ และรองรับการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดผ่าน DTC
2010	C. Wanke, L. Cheng, P. Chunlei และ M. Xiang	บทความนี้ศึกษาการเพิ่มความน่าเชื่อถือแบบเรียลไทม์ของ CAN ในระบบขับเคลื่อนอิสระสองมอเตอร์ของ EV (IDEV) โดยใช้การวิเคราะห์ Rate Monotonic Algorithm (RMA) พบว่า CAN ที่ปรับปรุงด้วย RMA มีความเสถียรและน่าเชื่อถือกว่าการใช้ CAN แบบดั้งเดิม โดยลดค่า response time jitter และเพิ่ม reliability margin

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CAN (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	M. R. Vemparala, S. Yerabati and G. I. Mary	บทความนี้นำเสนอการพัฒนาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบความปลอดภัยในยานยนต์ไฟฟ้าที่อิงกับ CAN โดยใช้ CAN bus เชื่อมต่อ ECU ของระบบย่อย ได้แก่ Pedal Assembly, Dashboard, Battery Pack และ Motor Controller ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า CAN protocol สามารถลดความซับซ้อนของการเดินสายไฟ เพิ่มความน่าเชื่อถือ และตอบสนองได้ตามข้อกำหนดด้านเวลา (latency < 20 ms) ผ่านการจำลองและวิเคราะห์ด้วย Vector CANopen ที่อัตรา baud rate ต่าง ๆ (125, 250, 500, 1000 kbps) ซึ่งยืนยันความสามารถของ CAN ในการรองรับการสื่อสารเรียลไทม์และเพิ่มความปลอดภัยของระบบ EV
2024	B. W. Hosny, H. H. Draz, B. A. Elbakry, M. M. A. Mahmoud และ S. R. Abdelrahman	บทความนี้พัฒนาแนวทาง Machine Learning-based Intrusion Detection System (IDS) สำหรับป้องกันการโจมตีบน CAN bus โดยใช้ Artificial Neural Network (ANN) และเทคนิค CAN ID shuffling ผ่าน FPGA (PYNQ-Z1) ผลการทดลองด้วยชุดข้อมูล OTIDS แสดงความแม่นยำสูงถึง 92.2% ในการจำแนกการโจมตี เช่น DoS, Fuzzy และ Impersonation

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและเทคนิคการสื่อสารข้อมูลแบบ CAN ตามตารางที่ 2.6 พบว่ามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่การประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมของยานยนต์ไฟฟ้าและรถโดยสารไฟฟ้า การเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครือข่ายแบบเรียลไทม์ และการวิเคราะห์เวลาการสื่อสารในระบบขับเคลื่อนไฮบริด ไปจนถึงการประยุกต์ใช้ในระบบความปลอดภัยของยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงงานวิจัยล่าสุดที่มุ่งเน้นด้านความปลอดภัยไซเบอร์ของ CAN bus โดยใช้เทคนิค Machine Learning และ FPGA เพื่อป้องกันการโจมตี แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่า CAN ยังคงเป็นมาตรฐานการสื่อสารหลักที่มีความเสถียรและเหมาะสมต่อการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบกระจาย โดยได้รับการพัฒนาให้มีทั้ง ความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนายานยนต์อัจฉริยะและระบบการขนส่งอัจฉริยะในอนาคต

2.21 สรุป

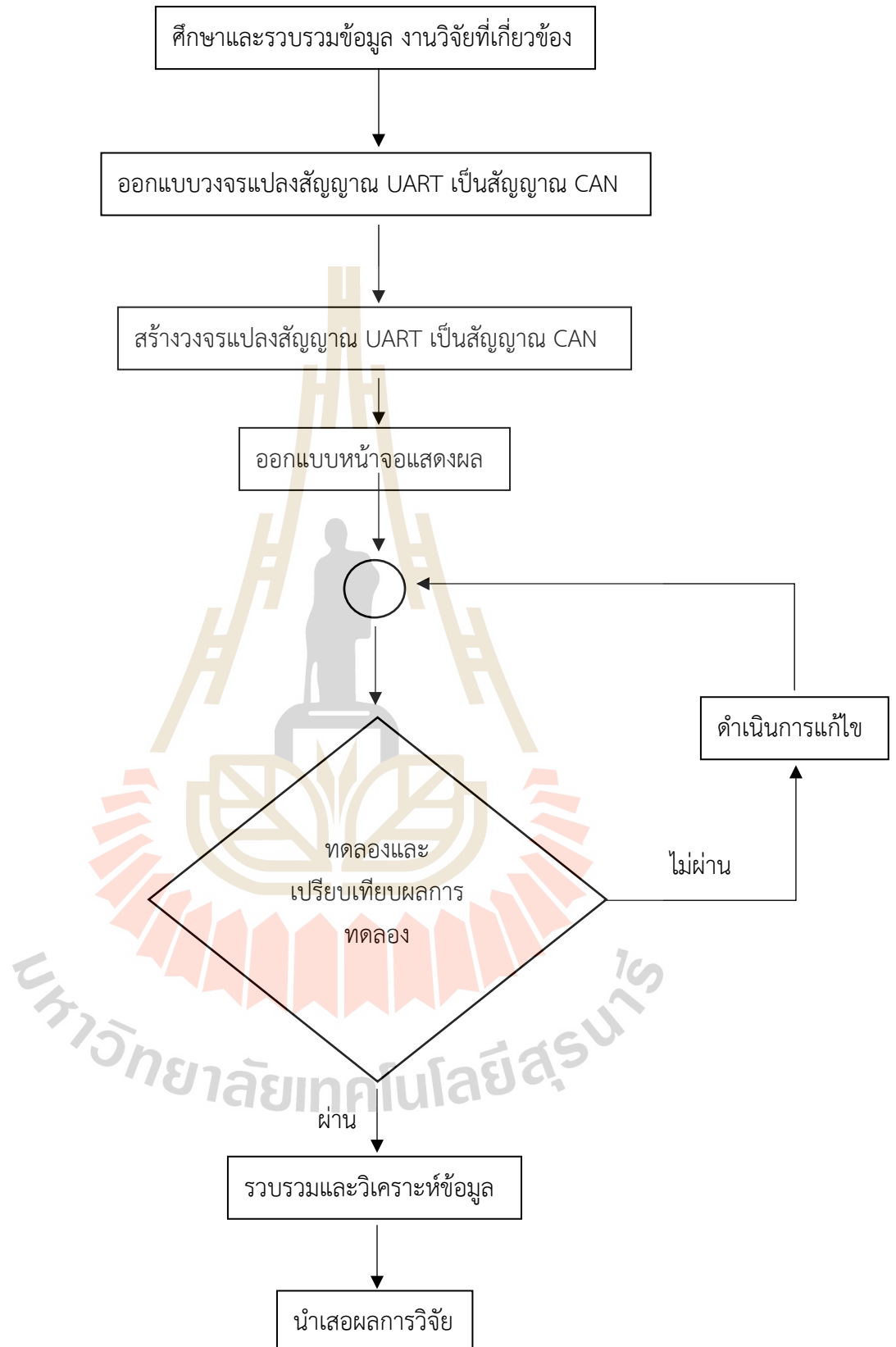
ในบทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาระบบสื่อสารและจัดการพลังงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยได้กล่าวถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของโปรโตคอลการสื่อสาร เช่น CAN และ CANopen รวมถึงอุปกรณ์เสริมอย่าง PCAN-USB และซอฟต์แวร์ PCAN-View ที่ใช้ในการทดสอบและตรวจสอบการสื่อสารบนเครือข่าย CAN นอกจากนี้ยังได้อธิบายลักษณะและข้อดีข้อจำกัดของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะ NMC ซึ่งมีความสำคัญต่อการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าและระบบจัดเก็บพลังงาน พร้อมทั้งกล่าวถึงหลักการแพ็คแบตเตอรี่ที่ถูกต้องและมาตรการด้านความปลอดภัย ในส่วนของระบบจัดการแบตเตอรี่ ได้อธิบายบทบาท หน้าที่ ส่วนประกอบ และประโยชน์ รวมถึงการพัฒนาของ JK BMS ที่มีคุณสมบัติขั้นสูง เช่น Active Balancing และการสื่อสารผ่านโปรโตคอล UART, CAN และ RS485 ตลอดจนการรองรับการควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน สำหรับฮาร์ดแวร์สนับสนุนอื่น ๆ ได้กล่าวถึงโมดูล TJA1051 สำหรับการแปลงสัญญาณ, หน้าจอแสดงผล ATD3.5-S3 ที่ใช้กับ ESP32-S3, โมดูล ESP32 ที่มีความสามารถในการประมวลผลและเชื่อมต่อไร้สาย รวมถึง Buck Converter ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ องค์ความรู้ทั้งหมดนี้ถือเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารระหว่าง BMS และหน้าจอแสดงผล เพื่อเพิ่มความปลอดภัย ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการทำงานของระบบพลังงานและยานยนต์ไฟฟ้าในสภาวะการใช้งานจริง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงพัฒนา (Developmental Research) ที่มุ่งเน้นการ พัฒนาระบบ อินเทอร์เฟซและการแสดงผล สำหรับเชื่อมต่อกับระบบจัดการแบตเตอรี่ รุ่น JK BMS เพื่อให้ผู้ใช้งาน สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์ โดยอาศัยการสื่อสารผ่าน โปรโตคอล CANopen ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ ภายในงานวิจัยได้ใช้ไมโคร ESP32 สำหรับรับสัญญาณ UART จาก BMS และส่งต่อไปยังไมโครแปลง สัญญาณ TJA1051 เพื่อทำการแปลงสัญญาณ UART ให้เป็นสัญญาณ CAN และส่งไปยังหน้า จอแสดงผลสำหรับการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และ สถานะการชาร์จ ของแบตเตอรี่ กระบวนการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการแบตเตอรี่ โปรโตคอลการสื่อสาร CANopen และการ ออกแบบระบบแสดงผลบนหน้าจอสัมผัส เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบระบบเชื่อมต่อ ระหว่าง BMS และหน้าจอ โดยใช้บอร์ด ESP32 ร่วมกับไมโครแปลงสัญญาณ TJA1051 เพื่อให้ สามารถรับ-ส่งข้อมูลจาก BMS ผ่านพอร์ต UART และแปลงเป็นสัญญาณ CAN ที่ส่งต่อไปยังหน้า จอแสดงผล การจำลองและทดสอบระบบจะถูกดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสื่อสาร ผ่านโปรโตคอล CANopen และประสิทธิภาพในการแสดงผลข้อมูลที่สำคัญของแบตเตอรี่ ซึ่ง ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และค่า SOC เพื่อยืนยันความถูกต้อง ความเสถียร และความน่าเชื่อถือของระบบที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ โดยวิธีการดำเนินการวิจัย มีดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัย

3.2 ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณ UART เป็นสัญญาณ CAN

เพื่อให้ระบบอินเทอร์เฟซที่พัฒนาขึ้นสามารถสื่อสารกับระบบแสดงผลและส่วนประกอบอื่นๆ ในยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยได้กำหนดรายละเอียดการออกแบบโปรโตคอล CAN ดังต่อไปนี้

3.2.1 การเลือกใช้รูปแบบ CAN ID

โปรโตคอล CAN Bus มีรูปแบบ ID 2 ชนิดหลัก คือ Standard Frame (11-bit ID) รองรับ ID ได้ 2,048 ค่า (2^{11}), Extended Frame (29-bit ID) รองรับ ID ได้มากกว่า 536 ล้านค่า (2^{29})

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้ Standard Frame เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เพียงพอต่อขอบเขตของระบบ และสอดคล้องกับมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วไป การประยุกต์ใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าตัดแปลง หรือระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก มีจำนวนโหนด ที่ต้องการสื่อสาร เช่น BMS, ชุดควบคุมมอเตอร์, หน้าจอแสดงผล, ระบบชาร์จ โดยทั่วไปไม่เกิน 20-30 โหนด ดังนั้น การใช้ 11-bit ID ซึ่งรองรับได้ถึง 2,048 รหัส จึงถือว่าเพียงพอต่อการใช้งาน และยังช่วยลดภาระการประมวลผล ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อเทียบกับการใช้ 29-bit ID ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบเครือข่ายขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนสูง

3.2.2 การพิจารณาเลือกอัตราการส่งข้อมูล (Baud Rate)

อัตราการส่งข้อมูล ในระบบ CAN Bus มีความสัมพันธ์ผกผันกับระยะทางสูงสุดของสายสัญญาณ โดยอัตราการส่งข้อมูลที่ช้าลง จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อสัญญาณรบกวน และรองรับระยะทางของเครือข่ายได้ไกลขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Baud Rate ที่ 125 kbps (กิโลบิตต่อวินาที) ซึ่งเป็นอัตราการส่งข้อมูลมาตรฐานที่ให้ความสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างความเร็วและความน่าเชื่อถือ แม้ว่าอัตราการส่งข้อมูลนี้จะดูไม่สูงมาก แต่สามารถรองรับความยาวสายสัญญาณได้ไกลถึง 500 เมตร

สำหรับการประยุกต์ใช้งานในยานยนต์ ซึ่งมีความยาวรวมของสายสัญญาณทั้งคัน ไม่เกิน 10-20 เมตร การเลือกใช้ 125 kbps จึงให้ค่า ส่วนเผื่อความปลอดภัยที่สูงมาก ทำให้ระบบมีความเสถียร ทนทานต่อสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมจริงของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ ข้อมูลที่จำเป็นจาก BMS เช่น แรงดัน, กระแส, อุณหภูมิ ไม่ใช่ข้อมูลที่ต้องการการอัปเดตในระดับไมโครวินาที (μs) การอัปเดตข้อมูลทุกๆ 100-500 มิลลิวินาที (ms) ถือว่าเพียงพอต่อการตรวจสอบและแสดงผล ดังนั้น อัตรา 125 kbps จึงเพียงพอต่อความต้องการของระบบ และเน้นความเสถียรเป็นสำคัญ

3.2.3 การออกแบบโครงสร้างข้อมูล และความละเอียด

ในการออกแบบระบบนี้ คือการแปลงข้อมูลทางกายภาพ ซึ่งมักมีค่าทศนิยม เช่น 79.35 V, 27.8 °C ให้เป็นข้อมูลดิจิทัลเลขจำนวนเต็ม เพื่อส่งผ่านเครือข่าย CAN Bus ขนาด 8 ไบต์ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบโครงสร้างข้อมูลโดยกำหนด ความละเอียดที่ชัดเจน

การออกแบบนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการอธิบายความแตกต่างของค่าที่แสดงผล ใน บทที่ 4 โดยความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏ เช่น ระบบต้นแบบแสดงค่า 79 V ในขณะที่แอปพลิเคชัน JK BMS แสดงค่า 79.35 V นั้น ไม่ใช่ความผิดพลาดในการส่งข้อมูล แต่เป็น ความแตกต่างด้านความละเอียดในการแสดงผล ซึ่งระบบต้นแบบ ถูกออกแบบให้แสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็ม เพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า แม้ว่าข้อมูลที่รับ-ส่งผ่าน CAN Bus จะมีความละเอียดสูงก็ตาม

รายละเอียดการออกแบบเฟรมข้อมูลและความละเอียด มีดังนี้

1) CAN ID: 0x355 (ข้อมูลสถานะหลัก)

Byte 0-1: สถานะการชาร์จ

รูปแบบ: 16-bit (Little-Endian)

ความละเอียด: 1 %

ช่วงค่า: 0 - 100

ตัวอย่าง: ค่าที่อ่านได้ 84% แสดงค่าเป็น 84%

2) CAN ID: 0x356 (ข้อมูลการวัดค่า)

Byte 0-1: แรงดันรวมแบตเตอรี่

รูปแบบ: 16-bit (Little-Endian)

ความละเอียด : 1 V

ตัวอย่าง: ค่าที่อ่านได้ 79.35 V แสดงค่าเป็น 79 V

Byte 2-3: กระแสรวม

รูปแบบ: 16-bit (Little-Endian)

ความละเอียด: 1 A

ตัวอย่าง: ค่าที่อ่านได้ 10.40 A แสดงค่าเป็น 10 A

Byte 4-5: อุณหภูมิแบตเตอรี่

รูปแบบ: 16-bit (Little-Endian)

ความละเอียด: 1 °C

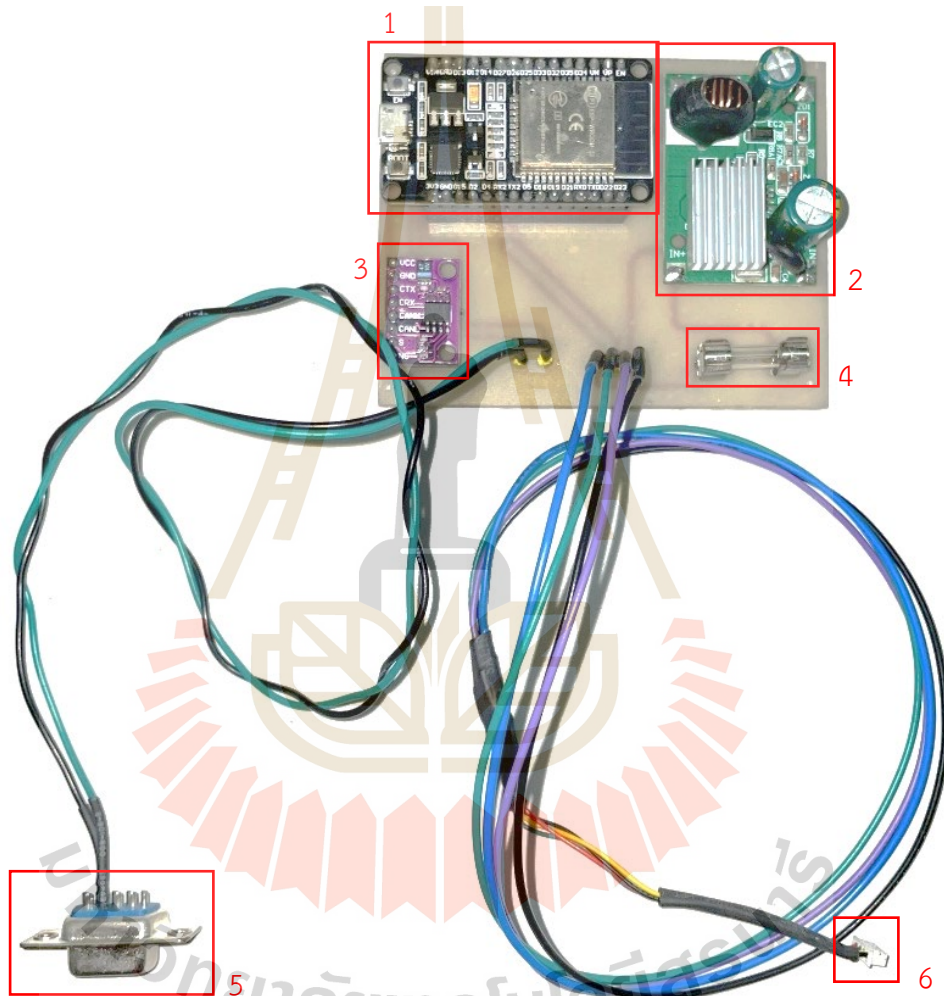
ตัวอย่าง: ค่าที่อ่านได้ 27.2 °C แสดงค่าเป็น 27 °C

3.2.4 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อระหว่าง CAN Transceiver กับไมโครคอนโทรลเลอร์

ในวงจรที่ออกแบบมีการเพิ่มตัวต้านทาน ขนาด 4.7 k Ω เชื่อมต่อระหว่างขา CAN RX ของ TJA1051 และขา GPIO22 ของ ESP32 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดึงสัญญาณ (pull-up) ป้องกันไม่ให้ขาอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ลอย เมื่อ TJA1051 ยังไม่เริ่มทำงาน อีกทั้งยังช่วยลดสัญญาณรบกวนขณะรับข้อมูล และจำกัดกระแสเมื่อเกิดสถานะผิดปกติ การเลือกค่า 4.7 k Ω เป็นค่าที่สมดุลระหว่างความเสถียรของสัญญาณและความเร็วในการสื่อสาร โดยไม่กระทบต่ออัตราการส่งข้อมูลของ บัส CAN ทั้งนี้ การวางตำแหน่งตัวต้านทานไว้ใกล้ขา ESP32 ช่วยให้การรับสัญญาณมีความนิ่งและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การสร้างต้นแบบแผงวงจรจริง

จากแบบที่ได้ออกแบบและจัดทำขึ้น ผู้วิจัยได้ผลิตต้นแบบแผงวงจรพิมพ์ (Prototype PCB) และทำการบัดกรีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรตามทีออกแบบไว้ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบจริง กระบวนการดังกล่าวช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้อง ประสิทธิภาพ และความเหมาะสมของวงจรก่อนนำไปใช้งานในระบบจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผงวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง

โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบ แสดงไว้ในตาราง

ที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด
1	ESP32 Microcontroller (Espressif Systems)	ไมโครคอนโทรลเลอร์หลักสำหรับประมวลผลและเชื่อมต่อการสื่อสาร
2	DC-DC Step-down Converter (Buck Converter)	ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้เหมาะสมกับวงจร
3	TJA1051 CAN Transceiver	โมดูลแปลงสัญญาณสำหรับการสื่อสารผ่านบัส CAN
4	Fuse (Overcurrent Protection Device)	อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินในระบบ
5	CAN Bus Communication Port	พอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อและรับส่งข้อมูลผ่านระบบ CAN
6	BMS Communication Port	พอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับระบบจัดการแบตเตอรี่

3.4 การพัฒนาระบบ

ในขั้นตอนการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการรับข้อมูลจาก JK BMS และส่งต่อข้อมูลผ่านโปรโตคอล CANopen เพื่อใช้ในการแสดงผลค่าที่สำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ของแบตเตอรี่บนหน้าจอแสดงผล ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาระบบแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์บนหน้าจอสัมผัส โดยออกแบบให้ข้อมูลมีความชัดเจน อ่านง่าย และสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ

3.5 การทดสอบและประเมินผล

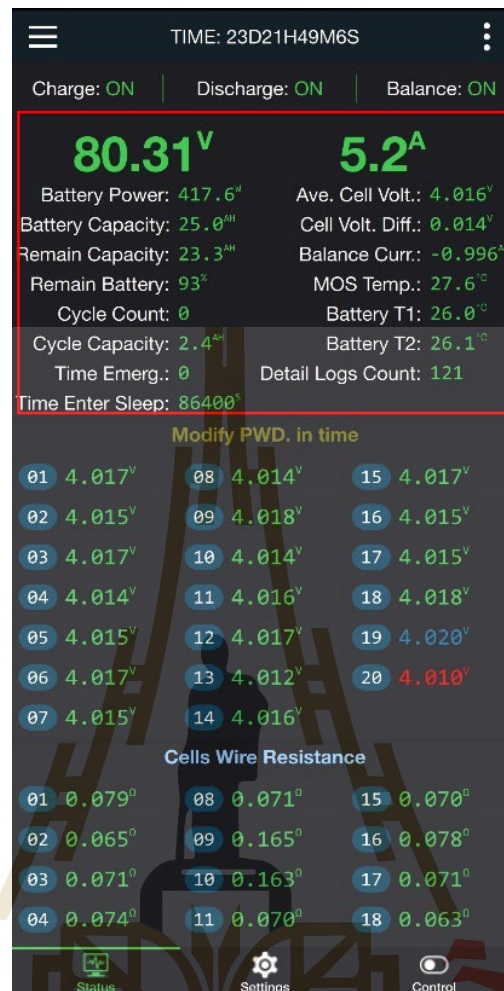
การทดสอบระบบมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของการสื่อสารผ่านโปรโตคอล CANopen โดยประเมินทั้งด้านความแม่นยำ ความเสถียรในการส่งข้อมูล และความถูกต้องของการแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ วิธีการประเมินผลทำโดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในโปรแกรม PCAN-View กับข้อมูลจากแอปพลิเคชัน JK BMS ซึ่งข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ในระบบแบตเตอรี่ กระบวนการทดสอบเริ่มจากการเชื่อมต่อวงจรทดลองระหว่าง BMS กับโปรแกรม PCAN-View ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นได้ทำการบันทึกข้อมูลที่แสดงผลจาก PCAN-View ดังรูปที่ 3.4 และนำข้อมูลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแอปพลิเคชัน JK BMS ดังรูปที่ 3.5 เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องและประเมินความถูกต้องของระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่ กับโปรแกรม PCAN-View

CAN-ID	Type	Length	Data
355h		8	5D 00 64 00 54 24 E8 00
356h		8	50 00 05 00 1A 00 00 00

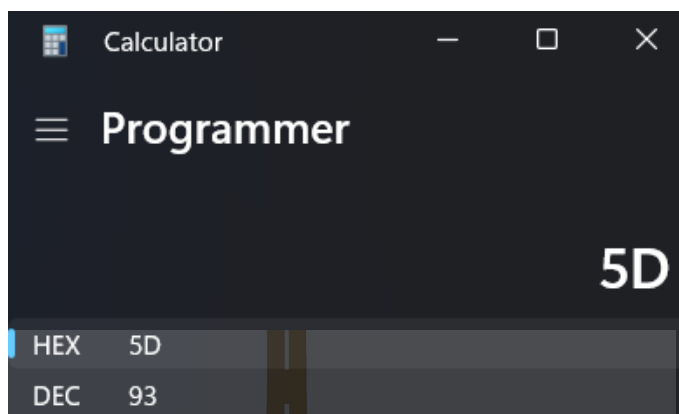
รูปที่ 3.4 โปรแกรม PCAN-View



รูปที่ 3.5 แอปพลิเคชัน JK BMS

3.6 การแปลงตัวเลขฐาน 16 จากโปรแกรม PCAN-View เป็นฐาน 10 CAN ID: 0x355

ในการทดสอบระบบสื่อสารผ่านโปรโตคอล CAN จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับจากโปรแกรม PCAN-View โดยการแปลงค่าตัวเลขจาก เลขฐาน 16 (Hexadecimal: HEX) ไปเป็น เลขฐาน 10 (Decimal: DEC) เพื่อให้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่แสดงผลจากแอปพลิเคชัน JK BMS ได้อย่างชัดเจน จากการทดสอบพบว่า CAN ID: 0x355 Byte ที่ 0-1 ตามข้อมูลจากรูปที่ 3.4 มีค่า Data = 005D (HEX) เมื่อนำค่าดังกล่าวไปแปลงเป็นเลขฐาน 10 ด้วยเครื่องคิดเลขในโหมด Programmer จะได้ค่า 93 (DEC) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “005D” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ในโหมด Programmer

ตารางที่ 3.2 CAN ID: 0x355

Byte Number	Parameter	Value (HEX)	Value (DEC)	Unit	ค่าที่แสดงผลจาก JK BMS
0-1	State of Charge	0x005D	93	%	93%

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผ่าน CAN ID: 0x355 โดย Byte ที่ 0-1 ใช้แทนค่าสถานการณ์ชาร์จของแบตเตอรี่ ซึ่งจากข้อมูลการทดสอบพบว่ามีความเท่ากับ 93% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการแสดงค่าจากแอปพลิเคชัน JK BMS รูปที่ 3.5 พบว่ามีค่า Remain Battery เท่ากับ 93% เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและความสอดคล้องของระบบที่พัฒนาขึ้น

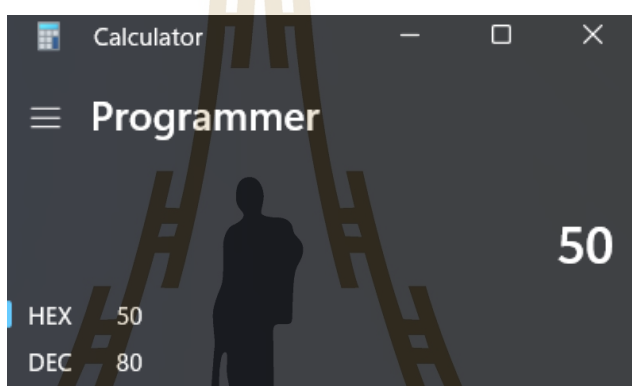
3.7 การแปลงตัวเลขฐาน 16 จากโปรแกรม PCAN-View เป็นฐาน 10

CAN ID: 0x356

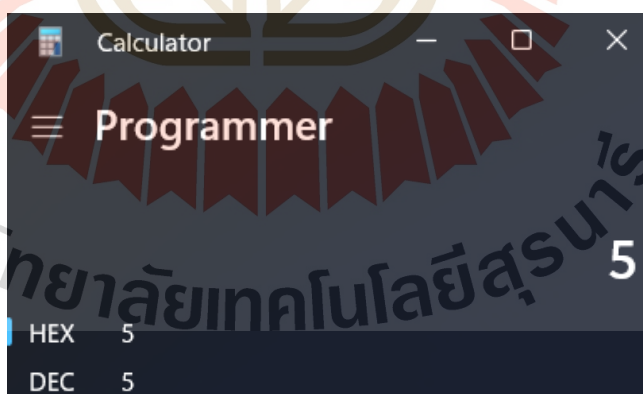
จากการทดสอบ พบว่า CAN ID: 0x356 Byte ที่ 0-1 ตามข้อมูลจากรูปที่ 3.4 มีค่า Data = 0050 (HEX) เมื่อนำค่าดังกล่าวไปแปลงเป็นเลขฐาน 10 ด้วยเครื่องคิดเลขในโหมด Programmer จะได้ค่า 80 (DEC) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ตามตารางที่ 3.3 ค่า CAN ID: 0x356 Byte ที่ 0-1 ถูกกำหนดให้แทนค่า Battery Terminal Voltage หรือแรงดันไฟฟ้ารวมของแบตเตอรี่ ซึ่งหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงมีค่าเท่ากับ $80 \times 1V = 80V$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการแสดงค่าจากแอปพลิเคชัน JK BMS ดังรูปที่ 3.5 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ารวมของแบตเตอรี่ที่แสดงผลคือ 80V ซึ่งตรงกันทุกประการ แสดงถึงความถูกต้องและความสอดคล้องของระบบที่พัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ จากข้อมูล Byte ที่ 2-3 พบว่ามีค่า Data = 0005 (HEX) ซึ่งเมื่อนำไปแปลงเป็นเลขฐาน 10 ได้ค่า 5 (DEC) โดยกำหนดให้แทนค่า Total Pack Current หรือกระแสไฟฟ้ารวมของแบตเตอรี่ ดังนั้นค่าที่ได้จึงเท่ากับ $5 \times 1A = 5A$ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแอปพลิเคชัน JK BMS พบว่าค่ากระแสไฟฟ้ารวมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

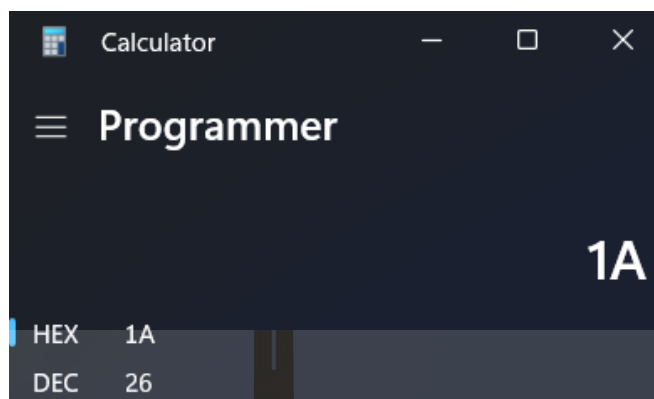
ในส่วนของ Byte ที่ 4-5 มีค่า Data = 001A (HEX) ซึ่งเมื่อนำไปแปลงเป็นเลขฐาน 10 ได้ค่า 26 (DEC) โดยแทนค่า Battery Temperature หรืออุณหภูมิของแบตเตอรี่ จึงได้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เท่ากับ 26°C และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ปรากฏบนแอปพลิเคชัน JK BMS พบว่ามีความสอดคล้องกัน ยืนยันถึงความถูกต้องของการถอดรหัสข้อมูลจาก CAN bus ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “0050” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ในโหมด Programmer



รูปที่ 3.8 การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “0005” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ในโหมด Programmer



รูปที่ 3.9 การแปลงค่าตัวเลขฐาน 16 “001A” เป็นตัวเลขฐาน 10 ด้วยโปรแกรม Calculator ในโหมด Programmer

ตารางที่ 3.3 CAN ID: 0x356

Byte Number	Parameter	Value (HEX)	Value (DEC)	Unit	ค่าที่แสดงผลจาก JK BMS
0-1	Battery Terminal Voltage	0x0050	80	V	80.31 V
2-3	Total Pack Current	0x0005	5	A	5.2 A
4-5	Battery Temperature	0x001A	26	°C	26.05 °C

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผ่าน CAN ID: 0x356 ได้แก่ Battery Terminal Voltage, Total Pack Current และ Battery Temperature ซึ่งได้จากการถอดรหัสข้อมูลจากเลขฐานสิบหก ไปเป็นเลขฐานสิบ จากผลการเปรียบเทียบกับค่าที่ปรากฏในแอปพลิเคชัน JK BMS พบว่าค่ามีความใกล้เคียงกันอย่างมาก เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้ารวมจากการถอดรหัสเท่ากับ 80 V ขณะที่ JK BMS แสดงผลเป็น 80.31 V ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ารวมจากการถอดรหัสเท่ากับ 5 A ขณะที่ JK BMS แสดงผลเป็น 5.2 A และค่าอุณหภูมิจากการถอดรหัสเท่ากับ 26 °C เมื่อเทียบกับ JK BMS ที่แสดงผล 26.05 °C ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความถูกต้อง ความสอดคล้อง และความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารผ่าน CANopen ที่พัฒนาขึ้น

3.8 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินระบบได้มาจากสองแหล่งหลัก ได้แก่ การทดสอบการสื่อสารจาก BMS ผ่านโปรแกรม PCAN-View โดยใช้ PCAN-USB Adapter และการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแอปพลิเคชัน JK BMS ที่ทำหน้าที่เป็นค่าอ้างอิง (Reference Value)

3.8.1 เงื่อนไขการเก็บข้อมูล

- 1) ทำการทดสอบทั้งในสถานะชาร์จและคายประจุ
- 2) ครอบคลุมช่วง SOC ตั้งแต่ 25–100%
- 3) บันทึกค่าทดสอบซ้ำไม่น้อยกว่า 3 รอบ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ

3.9 สรุป

บทที่ 3 ได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยเน้นการออกแบบวงจรที่มุ่งเน้นความเสถียร เช่น การใช้ ตัวต้านทานพูลอัป 4.7kΩ ที่ขา CAN_RX เพื่อป้องกันสถานะลอย ควบคู่กับการอธิบายเหตุผลในการเลือกใช้โปรโตคอล CAN Standard Frame (11-bit) และอัตราการส่งข้อมูล 125 kbps ที่เน้นความน่าเชื่อถือ ตลอดจนการออกแบบโครงสร้างข้อมูล (CAN ID 0x355, 0x356) ที่มีการกำหนด ความละเอียดที่ชัดเจน ซึ่งการออกแบบนี้ได้วางรากฐานเพื่อพิสูจน์ ในบทถัดไปว่า ความแตกต่างของค่าที่ปรากฏระหว่างระบบต้นแบบและแอปพลิเคชัน JK BMS นั้น ไม่ใช่ความผิดพลาด แต่เป็นผลมาจาก ความละเอียดในการแสดงผล ที่ผู้วิจัยตั้งใจออกแบบให้หน้าจอ ต้นแบบแสดงค่าเป็นเลขจำนวนเต็มเพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า

บทที่ 4

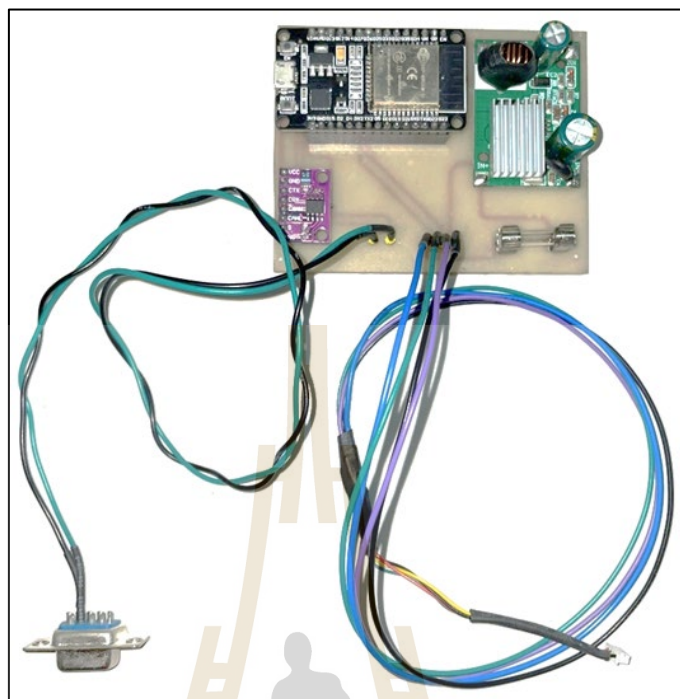
ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างต้นแบบวงจรตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยวงจรต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์และเชื่อมต่อกับระบบจัดการแบตเตอรี่ ผ่านพอร์ต UART เพื่อทำการแปลงสัญญาณเป็นโปรโตคอล CAN และส่งข้อมูลไปยังหน่วยแสดงผลตามที่กำหนด แผงวงจรพิมพ์ถูกผลิตด้วยกระบวนการกัดลายทองแดงและติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามแบบที่ออกแบบด้วยโปรแกรม EasyEDA ภายหลังจากติดตั้งอุปกรณ์และเขียนโปรแกรมควบคุม หน่วยแสดงผลสามารถแสดงข้อมูลสำคัญจาก BMS ได้ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ในบทนี้ จะนำเสนอผลการทดสอบเพื่อยืนยัน ความถูกต้องของกระบวนการส่งข้อมูล (Data Transmission) โดยเปรียบเทียบข้อมูลดิบ (Raw Data) ที่ดึงจับได้จากโปรแกรม PCAN-View กับค่าอ้างอิงจากแอปพลิเคชัน JK BMS นอกจากนี้ ยังนำเสนอผลการเปรียบเทียบค่าที่แสดงผลบนหน้าจอต้นแบบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของค่าที่ปรากฏ เช่น การแสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็ม นั้น สอดคล้องและเป็นผลมาจากการออกแบบ ความละเอียดในการแสดงผล (Display Resolution) และการปัดเศษ (Rounding) ผลการทดสอบโดยรวมพิสูจน์ว่าระบบต้นแบบที่พัฒนามีความเสถียร สามารถประมวลผล จัดรูปแบบ และส่งข้อมูลได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยไม่พบความล่าช้าที่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน

4.2 ผลการสร้างระบบต้นแบบ

จากกระบวนการออกแบบและผลิตที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ผู้วิจัยสามารถสร้างต้นแบบวงจรจริงที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจัดการแบตเตอรี่ผ่านพอร์ต UART และทำการแปลงสัญญาณเป็นโปรโตคอล CAN เพื่อส่งข้อมูลไปยังหน่วยแสดงผลได้สำเร็จ แผงวงจรพิมพ์ผลิตด้วยวิธีกัดลายทองแดง และมีการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามผังวงจรที่ออกแบบด้วยโปรแกรม EasyEDA ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์และเขียนโปรแกรมควบคุมเสร็จสิ้น หน่วยแสดงผลสามารถแสดงค่าข้อมูลสำคัญจากระบบจัดการแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.1 แผงวงจรพิมพ์ที่ผลิต

จากรูปที่ 4.1 เป็นแผงวงจรพิมพ์ที่ผลิตขึ้นจริง พร้อมติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามแบบที่ออกแบบด้วยโปรแกรม EasyEDA ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อและสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบจัดการแบตเตอรี่กับหน่วยแสดงผล

4.3 ผลการทดสอบการสื่อสารข้อมูลผ่าน CANopen

เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ปรากฏบนหน่วยแสดงผล ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบโดยเปรียบเทียบข้อมูลจากสามแหล่ง ได้แก่ โปรแกรม PCAN-View แอปพลิเคชัน JK BMS และค่าที่ปรากฏบนหน่วยแสดงผลของระบบต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่าค่าที่แสดงบนหน่วยแสดงผลมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากทั้งสองแหล่งอ้างอิง โดยค่าที่ได้จากโปรแกรม PCAN-View (รูปที่ 4.2) จำเป็นต้องทำการแปลงจากเลขฐานสิบหก ใน CAN ID ไปเป็นเลขฐานสิบก่อน จึงจะได้ค่าที่ตรงกับค่าที่ปรากฏบนหน่วยแสดงผล ขณะที่ข้อมูลจากแอปพลิเคชัน JK BMS (รูปที่ 4.3) สามารถใช้เปรียบเทียบได้โดยตรง ตัวอย่างการแปลงข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการแปลงค่าข้อมูล CAN Bus ของระบบจัดการแบตเตอรี่ จาก PCAN-View
สู่การแสดงผลจริง

CAN ID	Byte	ค่าที่ได้จาก PCAN-View (HEX)	ค่าที่แปลงได้ (DEC)	ความหมาย	ค่าที่แสดงใน JK BMS
0x355	0-1	0054	84	สถานะการชาร์จ แบตเตอรี่ (%)	84 %
0x356	0-1	004F	79	ค่าแรงดันแบตเตอรี่ (V)	79.35 V
0x356	2-3	000A	10	ค่ากระแสรวมของ แบตเตอรี่ (A)	10 A
0x356	4-5	001B	27	ค่าอุณหภูมิ แบตเตอรี่ (°C)	27.8 °C

PCAN-View

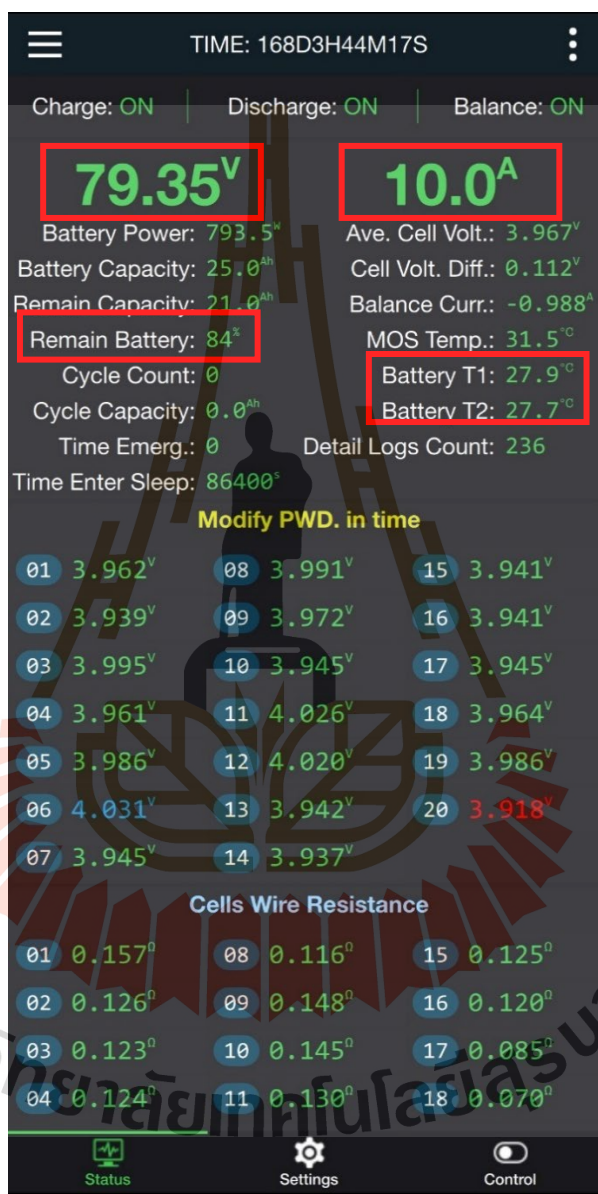
File CAN Edit Transmit View Trace Window Help

Receive / Transmit Trace PCAN-USB

CAN-ID	Type	Length	Data
35Eh		8	50 59 4C 4F 4E 20 20 20
359h		8	00 00 00 00 01 00 00 00
351h		8	73 46 E5 00 80 04 3A 02
355h		8	54 00 64 00 D0 20 D2 00
356h		8	4F 00 0A 00 1B 00 00 00
35Ch		2	C0 00
070h		8	1B 00 1B 00 04 00 03 00
371h		8	01 00 02 00 06 00 14 00
379h		8	19 00 00 00 00 00 00 00

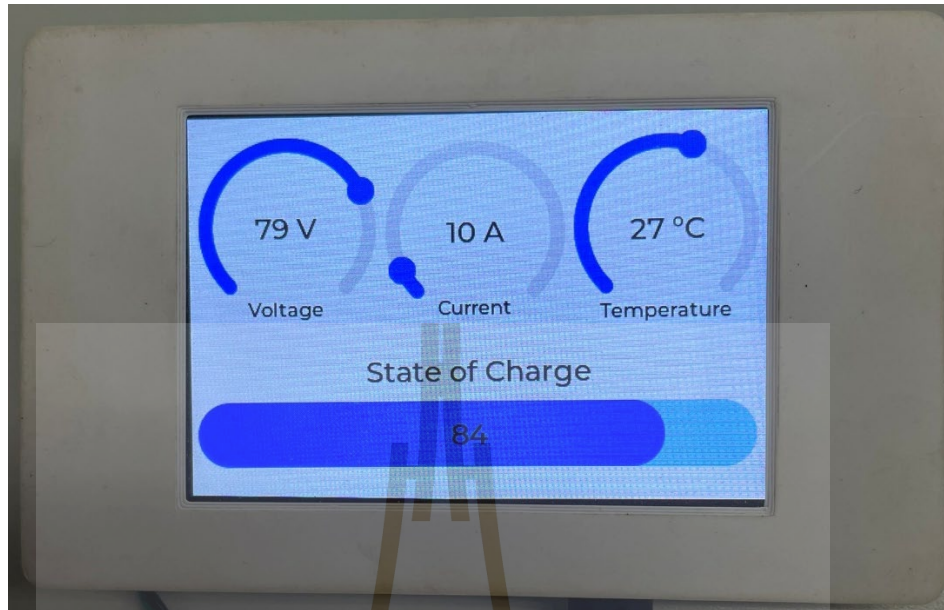
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม PCAN-View ที่แสดงค่าจาก CAN ID 0x355 และ 0x356

จากรูปที่ 4.2 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรม PCAN-View ที่ใช้ในการตรวจสอบค่าข้อมูลจากเฟรม CAN ID 0x355 และ 0x356 โดยจะแสดงค่าข้อมูลในรูปแบบเลขฐานสิบหก ซึ่งต้องทำการแปลงเป็นเลขฐานสิบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ปรากฏบนหน่วยแสดงผลของระบบต้นแบบ



รูปที่ 4.3 หน้าจอแอปพลิเคชัน JK BMS ที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล

จากรูปที่ 4.3 หน้าจอแอปพลิเคชัน JK BMS ที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล โดยแสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า สถานะการชาร์จแบตเตอรี่ และค่าอุณหภูมิ ซึ่งข้อมูลที่ปรากฏถูกนำมาใช้ตรวจสอบความสอดคล้องกับค่าที่แสดงบนหน่วยแสดงผลของระบบต้นแบบ



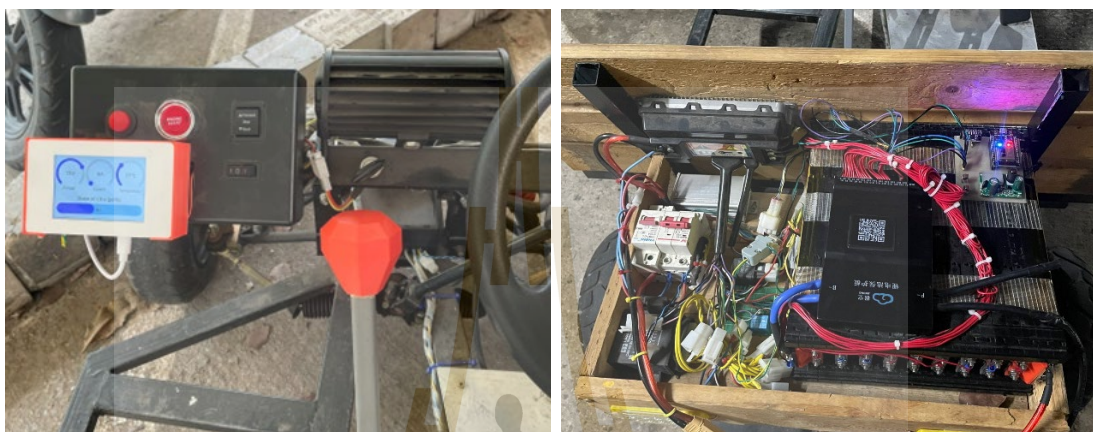
รูปที่ 4.4 หน้าจอระบบต้นแบบที่แสดงพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 4.4 หน่วยแสดงผลของระบบต้นแบบสามารถตรวจสอบพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ สถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิ ได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ในระหว่างการทดสอบการชาร์จเร็วที่ใช้กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าค่าที่แสดงบนหน่วยแสดงผลสอดคล้องกับค่าที่รายงานโดยแอปพลิเคชัน JK BMS ซึ่งยืนยันถึงความถูกต้องของการถอดรหัสและการแปลงข้อมูลจากระบบจัดการแบตเตอรี่มายังหน่วยแสดงผล



รูปที่ 4.5 การตั้งค่าระบบระหว่างการทดสอบการชาร์จเร็ว

จากรูปที่ 4.5 แสดงการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ผ่านระบบต้นแบบที่สื่อสารด้วยโปรโตคอล CANopen ผลการทดสอบชี้ให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการตอบสนองและแสดงผลได้อย่างแม่นยำภายใต้สภาวะการชาร์จความเร็วสูง

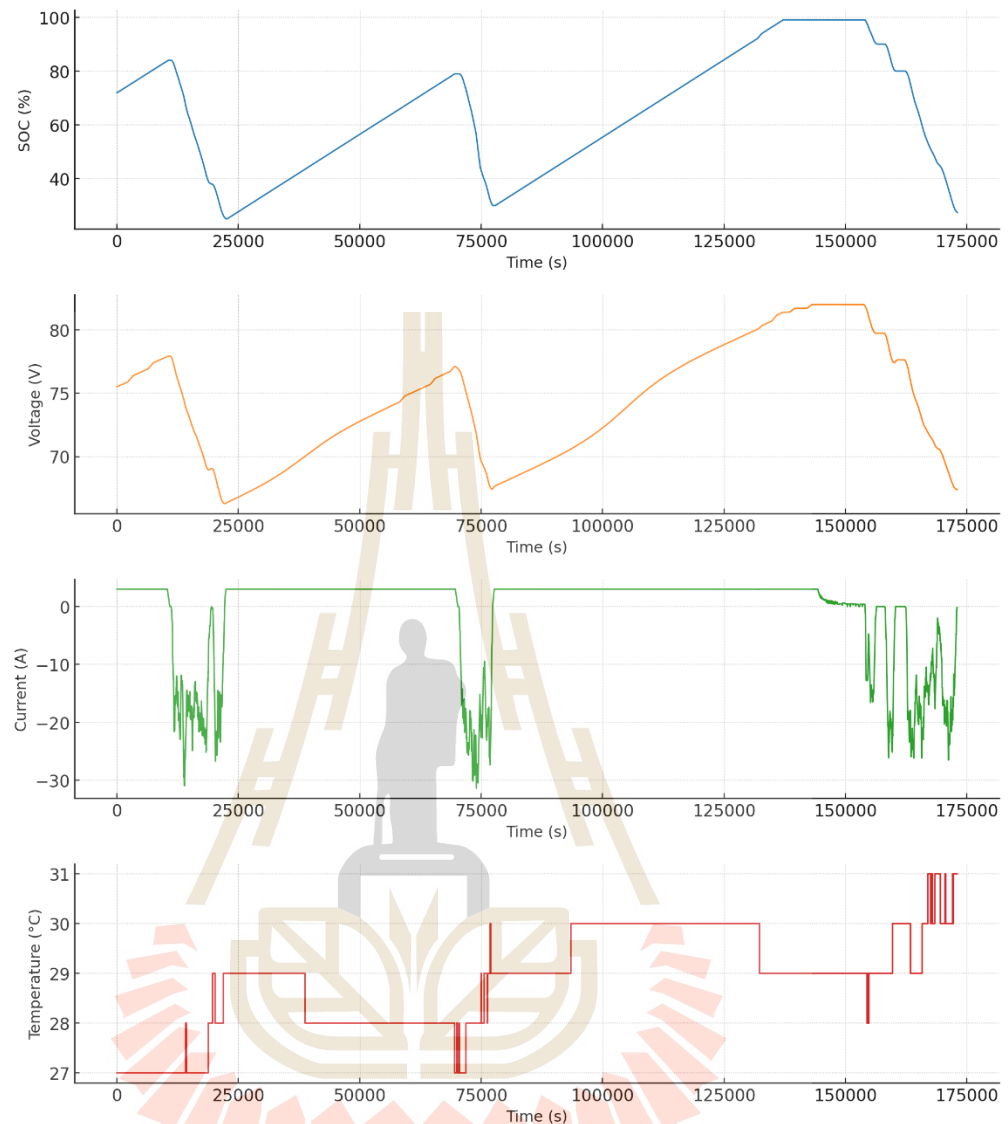


รูปที่ 4.6 การตั้งค่าระบบระหว่างการทดสอบการคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูง

จากรูปที่ 4.6 การตั้งค่าระบบระหว่างการทดสอบการคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูง แสดงการทำงานของระบบต้นแบบในการรักษาความเสถียรและความถูกต้องของการสื่อสารข้อมูล แม้ในสภาวะที่มีกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือและความทนทานของระบบที่พัฒนาขึ้น

4.4 ผลการทดสอบการทำงาน (3 รอบ)

เพื่อทดสอบความแม่นยำและความเสถียรของระบบต้นแบบ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่เป็นจำนวน 3 รอบ ของค่าที่อ่านได้จากระบบต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบการทำงาน 3 รอบ ระหว่างระบบต้นแบบ และ JK BMS โดยแสดง สถานะการชาร์จ, แรงดันแบตเตอรี่, กระแสไฟฟ้า, และ อุณหภูมิ

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.7 พบว่าค่า อุณหภูมิ มีลักษณะเป็นขั้น เนื่องจากระบบต้นแบบ แสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็มเท่านั้น ซึ่งเป็นความแตกต่างด้านความละเอียดในการแสดงผล ตามที่ได้ ออกแบบไว้ ไม่ใช่ความผิดพลาดในการส่งข้อมูล

4.5 การวิเคราะห์ผลและประสิทธิภาพของระบบ

จากผลการทดสอบในหลายสถานการณ์ ได้แก่ ขณะมีการใช้งานโหลด ขณะทำการชาร์จ แบตเตอรี่ และในสภาวะพักของแบตเตอรี่ พบว่าระบบสามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่ ปรากฏอาการสะดุดหรือการสูญหายของข้อมูล ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ ของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของระบบต้นแบบ พบข้อดีที่

สำคัญดังนี้ สามารถรับข้อมูลจากระบบจัดการแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์ การแสดงผลมีความชัดเจน และสอดคล้องกับค่าจริงที่เกิดขึ้นในระบบ และมีความสามารถในการรองรับการขยายผลไปยังระบบควบคุมอื่น ๆ ผ่านการสื่อสารด้วยโปรโตคอล CAN

4.6 ข้อจำกัดของระบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แม้ว่าระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการทำงานและมีความเสถียรภายใต้สภาวะการใช้งานที่หลากหลาย แต่ยังคงมีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา ดังนี้

- 1) ความเสถียรของการสื่อสารอาจลดลงเมื่อใช้สายสัญญาณ CAN bus ที่มีความยาวมาก หรือเมื่อต้องทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความล่าช้าหรือการสูญหายของข้อมูลได้
- 2) การออกแบบระบบต้นแบบในปัจจุบันยังไม่มี การป้องกันความร้อนและการป้องกันสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจจำเป็นต้องอย่างยิ่งต่อการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมของยานยนต์
- 3) การออกแบบและการทดสอบครั้งนี้อ้างอิงกับระบบจัดการแบตเตอรี่เพียงรุ่นเดียว (JK BMS) การนำไปใช้งานกับอุปกรณ์หรือยี่ห้ออื่นอาจจำเป็นต้องปรับแก้การกำหนดค่าโครงสร้างข้อมูล

นอกจากนี้ ระบบต้นแบบในปัจจุบันยังใช้การถอดรหัสข้อความ CAN แบบแยกตามเฟรมโดยตรง และยังไม่ได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงในการประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น การประมาณค่าสถานะการชาร์จและสุขภาพของแบตเตอรี่ ด้วยอัลกอริทึม Kalman Filter หรือวิธีการเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ปัจจุบันระบบใช้เพียงการคำนวณแบบแปลงเชิงเส้น (Linear Conversion) จากค่าข้อมูลเลขฐานสิบหกไปเป็นค่าพารามิเตอร์จริง โดยอาศัยสมการการปรับสเกล ดังแสดงในสมการ (4-1)–(4-4)

$$SOC = HEX_{0-1} \times 100\% \quad (4-1)$$

$$V_{total} = HEX_{0-1} \times 1V \quad (4-2)$$

$$I_{total} = HEX_{2-3} \times 1A \quad (4-3)$$

$$Temp_{avg} = HEX_{4-5} \times 1^{\circ}C \quad (4-4)$$

โดยที่

SOC คือ สถานะการชาร์จแบตเตอรี่

HEX_{0-1} คือ เลขฐาน 16 ในตำแหน่ง Byte ที่ 0-1

HEX_{2-3} คือ เลขฐาน 16 ในตำแหน่ง Byte ที่ 2-3

HEX_{4-5} คือ เลขฐาน 16 ในตำแหน่ง Byte ที่ 4-5

V_{total} คือ ค่าแรงดันแบตเตอรี่

I_{total} คือ ค่ากระแสรวมของแบตเตอรี่

$Temp_{avg}$ คือ ค่าอุณหภูมิแบตเตอรี่

4.7 การประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์จริง

ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงสำหรับการนำไปใช้งานจริงในหลายสถานการณ์ โดยมีจุดเด่นด้านการออกแบบใน ต้นทุนการผลิตต่ำ และความทนทานของการสื่อสาร จึงเหมาะสมกับการใช้งานในบริบทต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ยานยนต์ไฟฟ้าหรือสกูตเตอร์ไฟฟ้าต้นทุนต่ำที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และงบประมาณ
- 2) แพลตฟอร์มวิจัยในมหาวิทยาลัยหรือห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการเรียนรู้และพัฒนาความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารผ่าน CAN และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่
- 3) สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งต้องการแสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้า สถานะการชาร์จ และอุณหภูมิแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มความปลอดภัย
- 4) ระบบกักเก็บพลังงานขนาดเล็กนอกโครงข่ายไฟฟ้า หรือระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้แสดงและบันทึกข้อมูลของแบตเตอรี่

ด้วยคุณสมบัติของระบบที่เป็นแบบเปิดและสามารถปรับขยายได้ จึงสามารถเชื่อมต่อกับเกตเวย์ IoT เพื่อรองรับการตรวจสอบและการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) ได้ในอนาคต ทั้งนี้ หากมีการเสริมมาตรการป้องกันสัญญาณรบกวนเพิ่มเติม ระบบดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กหรือรถเชิงพาณิชย์ที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงเช่นกัน

4.8 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แม้ว่าระบบต้นแบบนี้ จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดตามพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แบบเวลาจริงผ่านการสื่อสาร CANopen ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีแนวทางการพัฒนาที่สามารถต่อยอดได้อีกหลายด้าน ได้แก่

- 1) เพิ่มความสามารถในการรองรับระบบจัดการแบตเตอรี่ที่หลากหลายรุ่นและโปรโตคอลการสื่อสารที่แตกต่างกัน
- 2) ทดสอบความทนทานของระบบในสภาพแวดล้อมจริงที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก
- 3) ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณสถานะการชาร์จ และสุขภาพของแบตเตอรี่
- 4) ปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ (Graphical User Interface: GUI) ให้ใช้งานง่ายขึ้นและรองรับการใช้งานหลายภาษา

5) เพิ่มการเชื่อมต่อแบบไร้สาย เพื่อรองรับการทำงานร่วมกับ IoT และระบบคลาวด์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและบริหารจัดการยานยนต์ไฟฟ้าแบบเรียลไทม์

นอกจากนี้ ระบบต้นแบบยังได้ผ่านการทดสอบการใช้งานจริงในยานยนต์ไฟฟ้าแบบ ATV ซึ่งเป็นตัวอย่างการใช้งานในพื้นที่ชนบทหรือสภาพแวดล้อมนอกถนน ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบมีขนาดกะทัดรัด สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างเสถียร และมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในแพลตฟอร์มยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับการวิจัยหรือการฝึกอบรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.9 การวิเคราะห์ต้นทุน

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบต้นแบบในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ ได้มีการจัดทำตารางเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่าง 2 สถานการณ์ ดังนี้

สถานการณ์ที่ 1 ระบบเชิงพาณิชย์ การจัดซื้อระบบจัดการแบตเตอรี่ ที่รองรับการสื่อสารผ่านโปรโตคอล CAN จากโรงงานผู้ผลิตโดยตรง

สถานการณ์ที่ 2 ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น ระบบจัดการแบตเตอรี่ รุ่นที่ไม่รองรับ CAN ร่วมกับวงจรที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของส่วนประกอบหลักในทั้งสองสถานการณ์ (ราคาเป็นราคาโดยประมาณ ณ วันที่ 19 ต.ค. 68)

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบต้นทุน

ลำดับ	รายการ	สถานการณ์ที่ 1 ระบบเชิงพาณิชย์ (มี CAN ในตัว)	สถานการณ์ที่ 2 ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น
1	ระบบจัดการแบตเตอรี่	6,092	2,750
2	ESP32 Microcontroller	-	158
3	TJA1051 CAN Transceiver	-	45
4	แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และส่วนประกอบอื่นๆ	-	500
5	ค่าแรงในการประกอบและทดสอบระบบ	-	500
รวมต้นทุนต่อหน่วย (บาท)		6,092	3,953
ส่วนต่างต้นทุน		2,139	
เปอร์เซ็นต์การลดต้นทุน		35.11%	

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่า ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น มีต้นทุนรวมต่อหน่วยอยู่ที่ 3,953 บาท ในขณะที่ระบบเชิงพาณิชย์ที่มีฟังก์ชัน CAN ในตัว มีราคาสูงถึง 6,092 บาท

ดังนั้น ระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถ ลดต้นทุนลงได้ถึง 2,139 บาท หรือคิดเป็น 35.11% เมื่อเทียบกับการจัดซื้อระบบเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 ในการลดต้นทุนการพัฒนาระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.10 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) โดยจำลองสถานการณ์ที่ต้นทุนรวมของระบบต้นแบบ (สถานการณ์ที่ 2) มีความผันผวนเพิ่มขึ้นหรือลดลง 15% ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุน

สถานการณ์จำลอง	ต้นทุนระบบเชิงพาณิชย์	ต้นทุนระบบต้นแบบ	ส่วนต่าง	ผลการลดต้นทุน
กรณีฐาน (Base Case)	6,092.00	3,953.00	2,139.00	35.11%
A: ต้นทุนเพิ่ม 15%	6,092.00	4,545.95	1,546.05	25.38%
B: ต้นทุนลด 15%	6,092.00	3,360.05	2,731.95	44.84%

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว พบว่าแม้ในกรณีที่ต้นทุนของระบบต้นแบบเพิ่มสูงขึ้น 15% ระบบที่พัฒนาก็ยังคงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าระบบเชิงพาณิชย์อย่างชัดเจน โดยยังคงสามารถลดต้นทุนได้ถึง 25.38%

จึงสรุปได้ว่าแนวทางการพัฒนานี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จริง และทนทานต่อความผันผวนของราคาชิ้นส่วนและค่าแรงในตลาด

4.11 สรุป

ในบทที่ 4 นำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น โดยมีข้อสรุปสำคัญ 2 ประการหลัก เริ่มจาก การวิเคราะห์ต้นทุน (หัวข้อ 4.2) ซึ่งพิสูจน์ว่าระบบต้นแบบ (ต้นทุน 3,953 บาท) สามารถ ลดต้นทุนได้จริงถึง 35.11% เมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ (ต้นทุน 6,092 บาท) และผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (ตาราง 4.3) ยังยืนยันว่าระบบยังคงความคุ้มค่าแม้ต้นทุนขึ้นส่วนจะผันผวน +/- 15% ประการที่สองคือ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ (หัวข้อ 4.3) ซึ่งผลการทดสอบ 3 รอบการทำงาน (รูปที่ 4.3) ได้ยืนยันว่า กระบวนการส่งข้อมูล มีความถูกต้อง เสถียร และไม่พบการสูญหายของข้อมูล โดยประเด็นสำคัญที่สุด (หัวข้อ 4.3.1) คือการชี้แจงว่าลักษณะ กราฟ ขึ้นบันได หรือค่าที่แสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็ม (เช่น 79 V) นั้น ไม่ใช่ความผิดพลาด (Error) แต่เป็นผลโดยตรงมาจาก ความละเอียดในการแสดงผล ที่ผู้วิจัยได้ตั้งใจออกแบบไว้ในบทที่ 3 แม้ระบบจะมีข้อจำกัดด้านความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน (EMI) แต่ผลโดยรวมก็สะท้อนศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าต้นทุนต่ำ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาอินเทอร์เฟซสำหรับระบบจัดการแบตเตอรี่ โดยมุ่งเน้นการแสดงผลพารามิเตอร์สำคัญของแบตเตอรี่ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ แบบเรียลไทม์บนจอสัมผัส การศึกษานี้ได้เริ่มต้นจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารข้อมูลของระบบ BMS การประยุกต์ใช้โปรโตคอล CAN และ CANopen ตลอดจนแนวทางการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจดังกล่าวถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบ โดยรายละเอียดของปริทัศน์วรรณกรรมทั้งหมดได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 2

สำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบ อินเทอร์เฟซต้นแบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก BMS รุ่น JK ผ่านพอร์ต UART จากนั้นทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของโปรโตคอล CANopen ด้วยโมดูล TJA1051 ก่อนส่งต่อไปยังจอแสดงผลแบบสัมผัส การออกแบบวงจรถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม EasyEDA และผลิตแผงวงจรพิมพ์ ด้วยวิธีการกัดลายทองแดง พร้อมติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ครบถ้วนตามแผนผังที่กำหนด รายละเอียดเชิงเทคนิคและกระบวนการสร้างวงจรได้รับการอธิบายไว้อย่างครบถ้วนในบทที่ 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การอธิบายเหตุผลประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรม ในการเลือกใช้ CAN 11-bit และ Baud Rate 125k และการออกแบบโครงสร้างข้อมูล ที่มีการกำหนด ความละเอียดไว้อย่างชัดเจน

ผลการทดสอบระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น ได้แสดงผลลัพธ์สำคัญ 2 ประการ คือ การวิเคราะห์ต้นทุนเชิงปริมาณ ที่พิสูจน์ว่าระบบสามารถลดต้นทุนได้จริง และ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ซึ่งยืนยันว่า กระบวนการส่งข้อมูล มีความถูกต้องและเสถียร ทั้งนี้ ผลการทดสอบยังได้ชี้แจงประเด็นสำคัญว่า ความแตกต่างของค่าที่ปรากฏบนหน้าจอต้นแบบ (เช่น 79 V) เมื่อเทียบกับแอปพลิเคชัน JK BMS (เช่น 79.35 V) นั้น ไม่ใช่ความผิดพลาด แต่เป็นผลโดยตรงมาจาก ความละเอียดในการแสดงผล ที่ผู้วิจัยได้แจ้งใจออกแบบไว้ในบทที่ 3 ให้แสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็มเพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า โดยรายละเอียดทั้งหมดได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 4

โดยสรุป งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาอินเทอร์เฟซสำหรับระบบจัดการแบตเตอรี่ ที่มีกระบวนการส่งข้อมูลที่เสถียรและน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าระบบเชิงพาณิชย์อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ และสามารถเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการจัดการพลังงานไฟฟ้า และระบบยานยนต์ไฟฟ้าในระยะยาวต่อไป

5.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาอินเทอร์เฟซสำหรับระบบจัดการแบตเตอรี่ ที่สามารถแสดงพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ ได้แบบเรียลไทม์ผ่านการสื่อสารด้วยโปรโตคอล CANopen โดยมีจุดเด่นที่การออกแบบระบบให้มีโครงสร้างแบบโมดูลาร์ ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับโมดูลรับ-ส่งสัญญาณ TJA1051 เพื่อให้การสื่อสารมีความเสถียร

จุดเด่นที่สำคัญที่สุดคือการลดต้นทุนการผลิตที่พิสูจน์ได้เชิงปริมาณ โดยสามารถ ลดต้นทุนได้จริง 35.11% เมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ และผลการ วิเคราะห์ความอ่อนไหว ยังยืนยันความคุ้มค่า นอกจากนี้ ยังมีจุดเด่นในการ ยืนยันความถูกต้องของกระบวนการส่งข้อมูล ควบคู่กับการชี้แจงว่าความแตกต่างของค่าที่แสดงผลนั้นเกิดจาก การออกแบบความละเอียดในการแสดงผล ไม่ใช่ความผิดพลาดของระบบ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ทั้งในยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ระบบกักเก็บพลังงาน และการวิจัยเชิงวิชาการ จึงแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงและต่อยอดได้ในอนาคต

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ระบบต้นแบบในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบให้แสดงผลค่าพารามิเตอร์เป็น เลขจำนวนเต็ม เพื่อความชัดเจนในการอ่านค่า ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานทั่วไป อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยในอนาคต หากการประยุกต์ใช้งาน (เช่น งานวิจัยในห้องปฏิบัติการ) ต้องการการอ่านค่าที่ละเอียดขึ้น ควรพัฒนาซอฟต์แวร์ของหน้าจอแสดงผล ให้สามารถแสดงค่า ทศนิยมได้ โดยดึงข้อมูลความละเอียดสูงที่มีอยู่แล้วใน CAN Bus มาคำนวณและแสดงผล (เช่น 79.35 V)

2) ระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ยังเน้นการทดสอบกับแบตเตอรี่เพียงประเภทเดียวคือ BMS รุ่น JK ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรออกแบบระบบให้สามารถทำงานร่วมกับ BMS จากผู้ผลิตหลายรายและรองรับมาตรฐานการสื่อสารที่หลากหลาย เช่น Modbus หรือ RS-485 เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน แม้ว่าระบบต้นแบบสามารถยืนยันความถูกต้องของข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับ PCAN-View และแอปพลิเคชัน JK BMS ได้ แต่ยังไม่ได้มีการทดสอบในสถานะการใช้งานจริงระยะยาว เช่น การทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานานในสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือน อุณหภูมิสูง หรือความชื้นสูง ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการทดสอบความทนทาน (Reliability Test) และการประเมินอายุการใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถนำไปใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

- T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Sauer, and M. Wohlfahrt-Mehrens, "Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries: A post-mortem study," *Journal of Power Sources*, vol. 262, pp. 129–135, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.03.112.
- F. Leng, C. Tan, and M. Pecht, "Effect of temperature on the aging rate of Li-ion battery operating above room temperature," *Scientific Reports*, vol. 5, no. 12967, 2015, doi: 10.1038/srep12967.
- M. Weiss, R. Ruess, A. Sauer, J. Schneider, and M. Keil, "Fast charging of lithium-ion batteries: A review of materials aspects," *Advanced Energy Materials*, vol. 11, no. 33, 2101126, Sep. 2021, doi: 10.1002/aenm.202101126.
- T. Rahman and T. Alharbi, "Exploring lithium-ion battery degradation: A concise review of critical factors, impacts, data-driven degradation estimation techniques, and sustainable directions for energy storage systems," *Batteries*, vol. 10, no. 7, p. 220, 2024, doi: 10.3390/batteries10070220.
- X. Yang, J. Li, Z. Zhang, and S. Liu, "DOD-SOH equalization control method for dynamic reconfigurable battery systems based on DQN algorithm," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, Art. no. 1333147, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1333147>
- Shreasth, C. A. Ooi, N. Khan, et al., "A novel active lithium-ion cell balancing method based on charging and discharging state of power in electric vehicles," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 15764, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-96581-8.
- R. Li, K. Li, P. Liu, and X. Zhang, "Research on multi-time scale SOP estimation of lithium-ion battery based on H^∞ filter," *Batteries*, vol. 9, no. 4, Art. no. 191, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries9040191>

- L. Zhou, et al., "State estimation models of lithium-ion batteries for battery management system: Status, challenges, and future trends," *Batteries*, vol. 9, no. 2, Art. no. 131, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries9020131>
- A. Oshnoei, H. Sorouri, A. Safari, P. Davari, M. Zacho, A. D. Johnsen, and R. Teodorescu, "Accelerated SOH balancing in lithium-ion battery packs using finite set MPC," in *Proc. 23rd Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE'25 ECCE Europe)*, pp. 1–8, 2025. [Online]. Available: https://vbn.aau.dk/files/774149320/EPE_25-1.pdf
- N. Q. Doan, S. M. Shahid, T. M. Duong, S.-J. Choi, and S. Kwon, "Extending the BESS lifetime: A cooperative multi-agent deep Q network framework for a parallel-series connected battery pack," *Energies*, vol. 17, no. 18, Art. no. 4604, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17184604>
- X. Zhe and D. Shifeng, "The design and implementation of a CANopen slave stack for powertrain controller in hybrid electric vehicle," in *Proc. Int. Conf. Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010*, pp. 755–758, doi: 10.1109/ICICTA.2010.239.
- Y. Zhang, X. Zeng, X. Wang, and F. Gao, "Distributed control system design for quadruped robot based on CANopen network," in *Proc. Int. Conf. Intelligent System Design and Engineering Application, Changsha, China, 2010*, pp. 633–636, doi: 10.1109/ISDEA.2010.22.
- P.-T. Wu, C.-C. Chuang, M.-R. Hong, S.-P. Wang, and J.-Y. Wu, "Research on CANopen communication protocol for electric vehicle on-board chargers," in *Proc. IET Int. Conf. Eng. Technol. Appl. (ICETA 2023), Yunlin, Taiwan, 2023*, pp. 99–100, doi: 10.1049/icp.2023.3209.
- G. Barone, et al., "CANopen communication of a 16.4 kWh Li-ion battery energy storage system for nanogrids in energy community framework," in *Proc. Int. Conf. Power and Energy Systems (ICPES), Perth, Australia, 2019*, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPES47639.2019.9105608.

- J. Pengfei, W. Rongchuan, and X. Linsen, "Building software system of real-time controller communication by CANOpen protocol based on ROS," in Proc. IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, China, 2018, pp. 833–840, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397829.
- M. R. Vemparala, S. Yerabati, and G. I. Mary, "Performance analysis of controller area network based safety system in an electric vehicle," in Proc. IEEE Int. Conf. Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2016, pp. 461–465, doi: 10.1109/RTEICT.2016.7807863.
- D. Wang, J. Nan, and F. Sun, "The application of CAN communication in distributed control system of electric city bus," in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), Harbin, China, 2008, pp. 1–4, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677533.
- C. Wanke, L. Cheng, P. Chunlei, and M. Xiang, "Real-time reliability optimization of CAN control network based on RMA for independent drive electric vehicle's powertrain," in Proc. Int. Conf. Optoelectronics and Image Processing, Haikou, China, 2010, pp. 157–160, doi: 10.1109/ICOIP.2010.240.
- B. W. Hosny, B. A. Elbakry, S. R. Abdelrahman, H. H. Draz, and M. M. A. Mahmoud, "A machine learning approach towards secure in-vehicle CAN bus network," in Proc. Int. Conf. Computer and Applications (ICCA), Cairo, Egypt, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICCA62237.2024.10927910.
- B.-J. Ahn, B.-R. Park, Y.-H. Ki, G.-M. Jeong, H.-S. Ahn, and D.-H. Kim, "Development of a controller area network interface unit and its application to a fuel cell hybrid electric vehicle," in Proc. SICE-ICASE Int. Joint Conf., Busan, Korea, 2006, pp. 5545–5549, doi: 10.1109/SICE.2006.315774.
- M. S. H. Lipu, A. A. Mamun, S. Ansari, M. S. Miah, K. Hasan, S. T. Meraj, M. G. M. Abdolrasol, T. Rahman, M. H. Maruf, and M. R. Sarker, et al., "Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals," *Batteries*, vol. 8, p. 119, 2022, doi: 10.3390/batteries8090119.

- A. K. Ghazali, N. A. A. Aziz, and M. K. Hassan, "Advanced algorithms in battery management systems for electric vehicles: A comprehensive review," *Symmetry*, vol. 17, p. 321, 2025, doi: 10.3390/sym17030321.
- M. Uzair, G. Abbas, and S. Hosain, "Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, p. 120, 2021, doi: 10.3390/wevj12030120.
- D. H. Castillo-Martínez, A. J. Rodríguez-Rodríguez, A. Soto, A. Berrueta, D. T. Vargas-Requena, I. R. Matias, P. Sanchis, A. Ursúa, and W. E. Rodríguez-Rodríguez, "Design and on-field validation of an embedded system for monitoring second-life electric vehicle lithium-ion batteries," *Sensors*, vol. 22, p. 6376, 2022, doi: 10.3390/s22176376.
- A. Alzahrani, S. M. Wangikar, V. Indragandhi, R. R. Singh, and V. Subramaniaswamy, "Design and implementation of SAE J1939 and Modbus communication protocols for electric vehicle," *Machines*, vol. 11, p. 201, 2023, doi: 10.3390/machines11020201.
- M. Choi, M. Lee, H. Im, J. Lee, and S. Lee, "Shallow learning-based intrusion detection system for in-vehicle network: ASIC implementation," *Electronics*, vol. 14, p. 683, 2025, doi: 10.3390/electronics14040683.
- W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "An open-source supervisory control and data acquisition architecture for photovoltaic system monitoring using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED," *Energies*, vol. 17, p. 2295, 2024, doi: 10.3390/en17102295.
- M. Pooyandeh and I. Sohn, "Smart lithium-ion battery monitoring in electric vehicles: An AI-empowered digital twin approach," *Mathematics*, vol. 11, p. 4865, 2023, doi: 10.3390/math11234865.

- K. M. Nichols, R. A. Roembke, and P. G. Adamczyk, "Real-time motor control using a Raspberry Pi, ROS, and CANopen over EtherCAT, with application to a semi-active prosthetic ankle," *Actuators*, vol. 14, p. 84, 2025, doi: 10.3390/act14020084.
- M. Assi and M. Amer, "A comparative analysis of lithium-ion batteries using a proposed electrothermal model based on numerical simulation," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, p. 60, 2025, doi: 10.3390/wevj16020060.
- S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, and P. Famouri, "Battery energy storage systems: A review of energy management systems and health metrics," *Energies*, vol. 17, p. 1250, 2024, doi: 10.3390/en17051250.
- M. Jimenez-Martinez, J. L. Valencia-Sánchez, S. G. Torres-Cedillo, and J. Cortés-Pérez, "Battery housing for electric vehicles, a durability assessment review," *Designs*, vol. 8, p. 113, 2024, doi: 10.3390/designs8060113.
- J. R. Galvão, L. B. Calligaris, K. M. de Souza, J. D. Gotz, P. B. Junior, and F. C. Corrêa, "Hybrid equalization topology for battery management systems applied to an electric vehicle model," *Batteries*, vol. 8, p. 178, 2022, doi: 10.3390/batteries8100178.
- K. Sornek, J. Augustyn-Nadzieja, I. Rosikoń, R. Łopusiewicz, and M. Łopusiewicz, "Status and development prospects of solar-powered unmanned aerial vehicles: A literature review," *Energies*, vol. 18, p. 1924, 2025, doi: 10.3390/en18081924.
- V.-T. Bui, C.-R. Dow, Y.-C. Huang, P. Liu, and V. D. Thai, "A CANopen-based gateway and energy monitoring system for electric bicycles," *Energies*, vol. 13, p. 3766, 2020, doi: 10.3390/en13153766.
- D. Rimpas, V. A. Orfanos, P. Chalkiadakis, and I. Christakis, "Design and development of a low-cost and compact real-time monitoring tool for battery life calculation," *Engineering Proceedings*, vol. 58, p. 17, 2023, doi: 10.3390/ecsa-10-16146.

- Q. Bu, S. Zhang, N. Ma, Q. Luo, and B. Sun, "Research on energy management method of fuel cell/supercapacitor hybrid trams based on optimal hydrogen consumption," *Sustainability*, vol. 15, p. 11234, 2023, doi: 10.3390/su151411234.
- T. Zhu, H. Min, Y. Yu, Z. Zhao, T. Xu, Y. Chen, X. Li, and C. Zhang, "An optimized energy management strategy for preheating vehicle-mounted Li-ion batteries at subzero temperatures," *Energies*, vol. 10, p. 243, 2017, doi: 10.3390/en10020243.
- D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and implementation of ESP32-based IoT devices," *Sensors*, vol. 23, p. 6739, 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- A. Hafeez, H. Malik, O. Avatefipour, and P. Rongali, "Comparative study of CAN-Bus and FlexRay protocols for in-vehicle communication," *SAE Technical Paper 2017-01-0017*, 2017, doi: 10.4271/2017-01-0017.
- Y. Xie, G. Zeng, Y. Chen, R. Kurachi, H. Takada, and R. Li, "Worst case response time analysis for messages in controller area network with gateway," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E96.D, no. 7, pp. 1467–1477, 2013, doi: 10.1587/transinf.E96.D.1467.
- G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation," *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.02.033.
- J. Xing and P. Wu, "State of charge estimation of lithium-ion battery based on improved adaptive unscented Kalman filter," *Sustainability*, vol. 13, p. 5046, 2021, doi: 10.3390/su13095046.
- L. Yao, S. Xu, A. Tang, F. Zhou, J. Hou, Y. Xiao, and Z. Fu, "A review of lithium-ion battery state of health estimation and prediction methods," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, p. 113, 2021, doi: 10.3390/wevj12030113.

- M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010, doi: 10.1201/9781420054002.
- M. Haghani, F. Sprei, K. Kazemzadeh, Z. Shahhoseini, and J. Aghaei, "Trends in electric vehicles research," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 123, p. 103881, 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103881.
- M. S. Sureshkumar, R. Rahul, S. Joshika, and S. Suraj, "Internet-of-things-based smart home energy management system with multi-sensor data fusion," *Engineering Proceedings*, vol. 66, p. 10, 2024, doi: 10.3390/engproc2024066010.
- S. D. Kalamaras, M.-A. Tsitsimpikou, C. A. Tzenos, A. A. Lithourgidis, D. S. Pitsikoglou, and T. A. Kotsopoulos, "A low-cost IoT system based on the ESP32 microcontroller for efficient monitoring of a pilot anaerobic biogas reactor," *Applied Sciences*, vol. 15, p. 34, 2025, doi: 10.3390/app15010034.
- P. M. Valero-Mora and A. Stevens, "Human-centred design and assessment of information technologies in traffic," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 7, pp. 171–173, 2013, doi: 10.1049/iet-its.2013.0105.
- M. Salgado and P. Garcia, "Integration of a CANopen protocol stack in an embedded application employing the CANFestival stack," *ResearchGate*, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/309827484_Integration_of_a_CANopen_Protocol_Stack_in_an_Embedded_Application_Employing_the_CANFestival_Stack [Accessed: 28-Sep-2024].
- PEAK-System Technik GmbH, *PCAN-View User Manual*, Rev. 4.4.2, 2022.
- JK BMS, *User Manual for JK Smart BMS Series*, Shenzhen Jingke Energy Technology Co., Ltd., 2023.
- NXP Semiconductors, *TJA1051 High-Speed CAN Transceiver Datasheet*, 2022.
- ATD Display, *ATD3.5-S3 Display Module Technical Datasheet*, 2023.
- Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, Version 4.4, 2023.

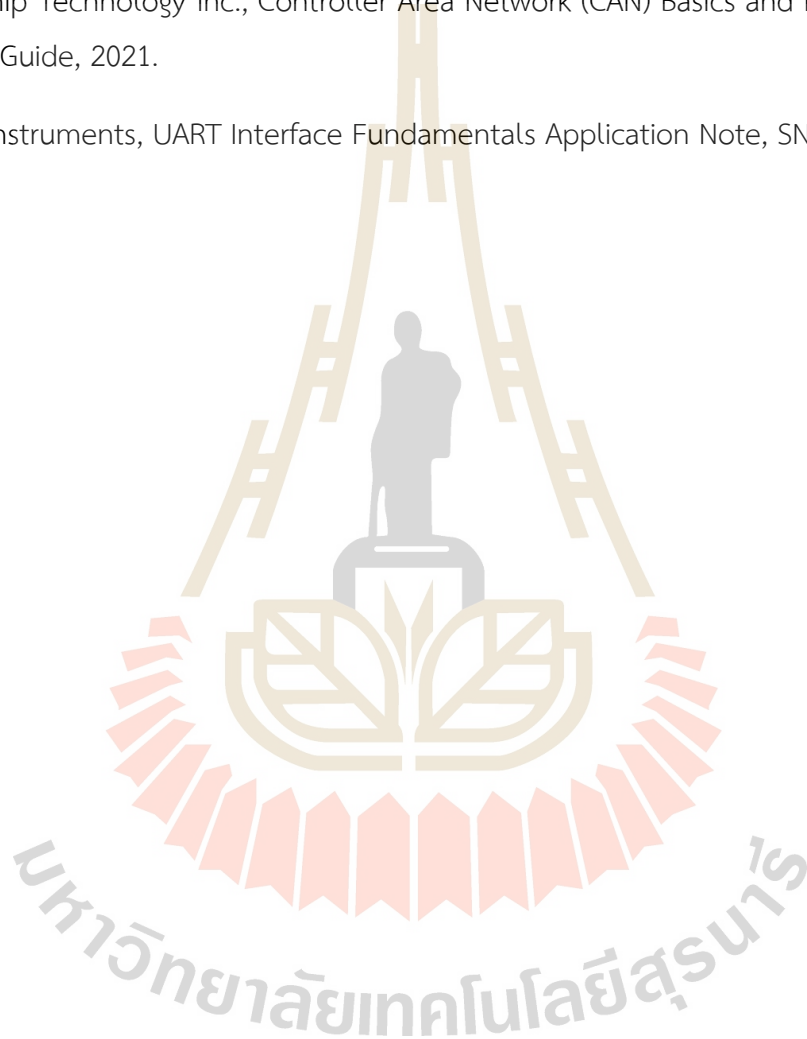
EasyEDA, EasyEDA User Guide, 2024. [Online]. Available: <https://docs.easyeda.com/>

[Accessed: 28-Sep-2024].

Syssi, ESPHome Component for JK-BMS. GitHub Repository. [Online]. Available: <https://github.com/syssi/esphome-jk-bms>[Accessed: 28-Sep-2024].

Microchip Technology Inc., Controller Area Network (CAN) Basics and Implementation Guide, 2021.

Texas Instruments, UART Interface Fundamentals Application Note, SNLA101A, 2020.





ภาคผนวก ก

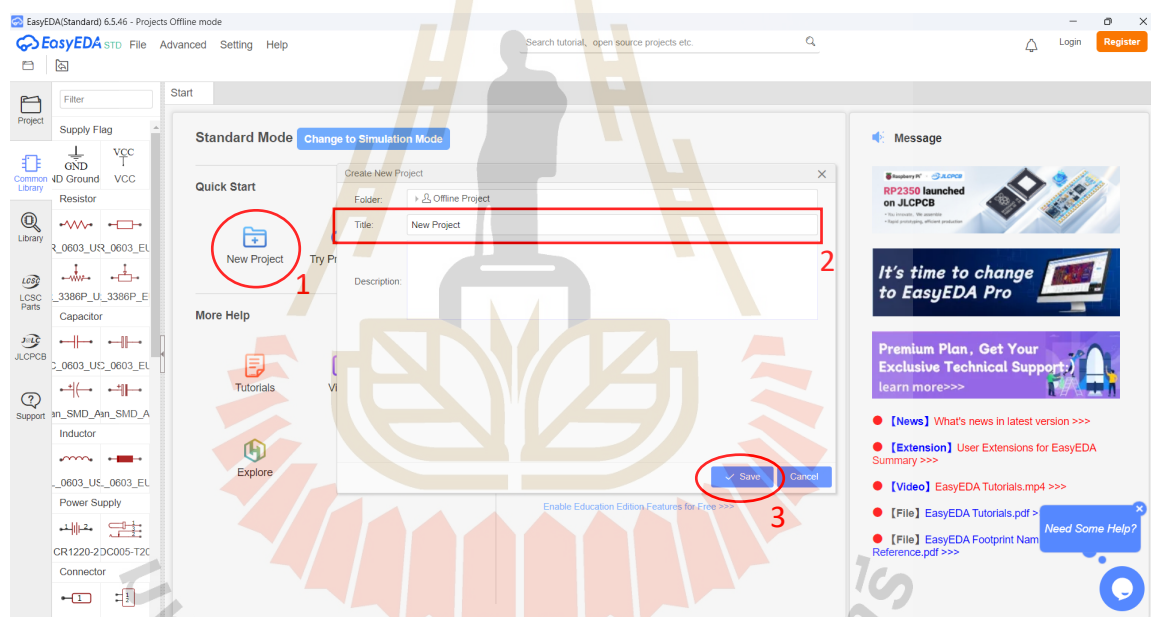
การออกแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EasyEDA

การออกแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EasyEDA

การออกแบบวงจรไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม EasyEDA ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ออกแบบวงจรและแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน ครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบแผนผังวงจรไฟฟ้า (Schematic Design) การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB Layout) ตลอดจนการส่งออกไฟล์สำหรับการผลิตได้โดยตรง กระบวนการออกแบบวงจรไฟฟ้าด้วย EasyEDA ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นตอน ดังนี้

1) การสร้างโปรเจกต์ใหม่

กระบวนการออกแบบเริ่มต้นด้วยการสร้างโปรเจกต์ใหม่ในโปรแกรม EasyEDA โดยเลือกเมนู New Project จากหน้าเริ่มต้นของโปรแกรม จากนั้นกรอกชื่อโปรเจกต์ที่ต้องการ และกดปุ่ม Save เพื่อบันทึกข้อมูลและเริ่มต้นเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบแผนผังวงจรไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ก.1

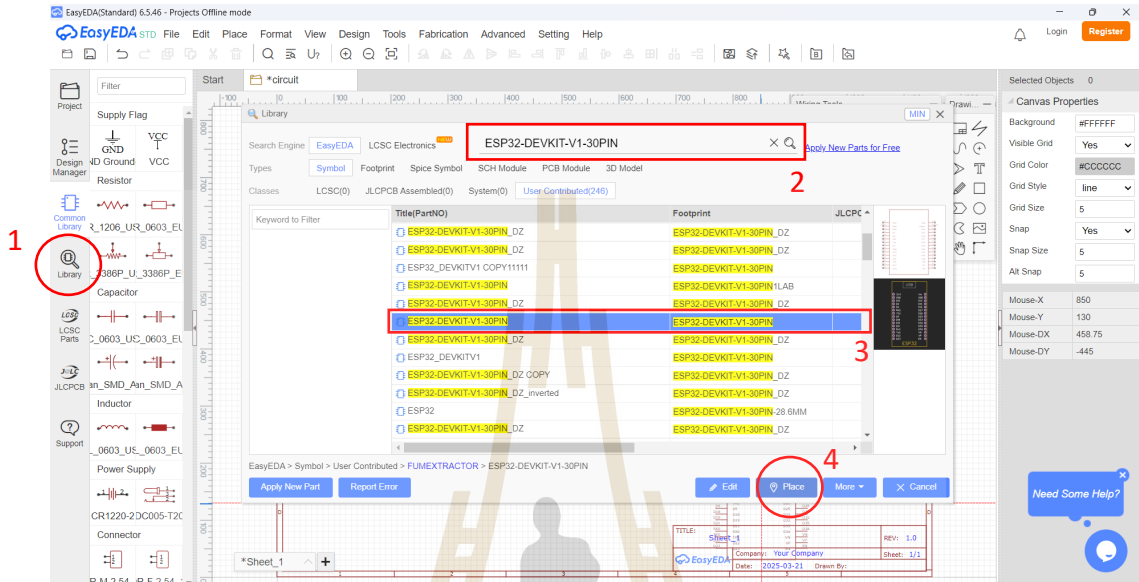


รูปที่ ก.1 หน้าต่างการสร้างโปรเจกต์ใหม่ในโปรแกรม EasyEDA

2) การค้นหาและเลือกอุปกรณ์ในไลบรารี

เมื่อสร้างโปรเจกต์ใหม่แล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการค้นหาและเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้งานจากไลบรารีของโปรแกรม EasyEDA โดยสามารถใช้ช่องค้นหา (Search) บนแถบ Library เพื่อระบุชื่อหรือรหัสของอุปกรณ์ที่ต้องการ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32, ตัวต้านทาน (Resistor), ตัวเก็บประจุ (Capacitor), และโมดูล Step-Down Converter

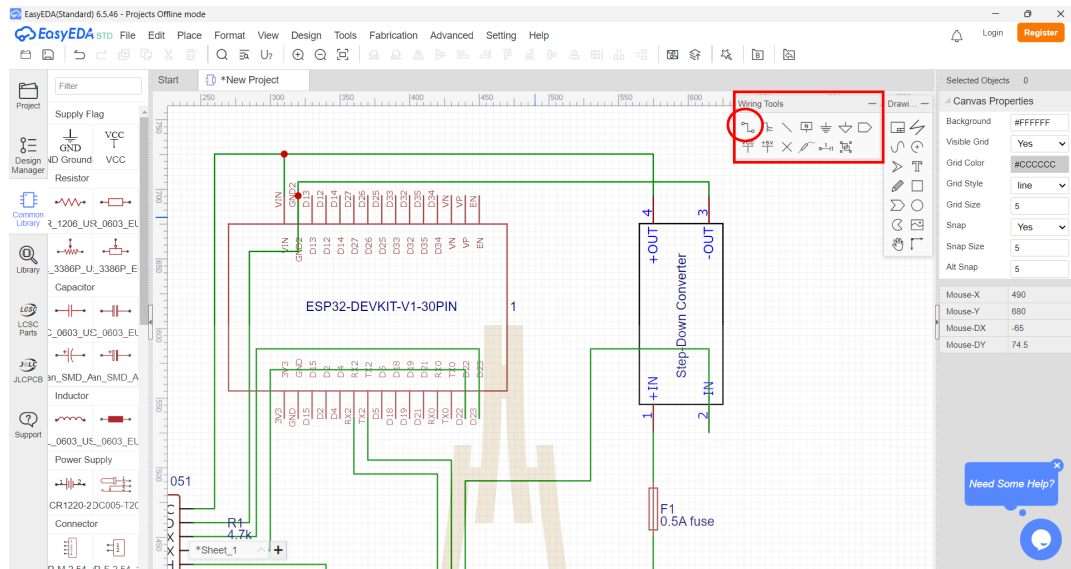
(Buck Converter) เป็นต้น จากนั้นผู้ใช้งานสามารถลากอุปกรณ์ที่เลือกไปวางบนพื้นที่ออกแบบเพื่อใช้ในการสร้างแผนผังวงจรไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 การค้นหาและเลือกอุปกรณ์ จากไลบรารีอุปกรณ์

3) การลากสายเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

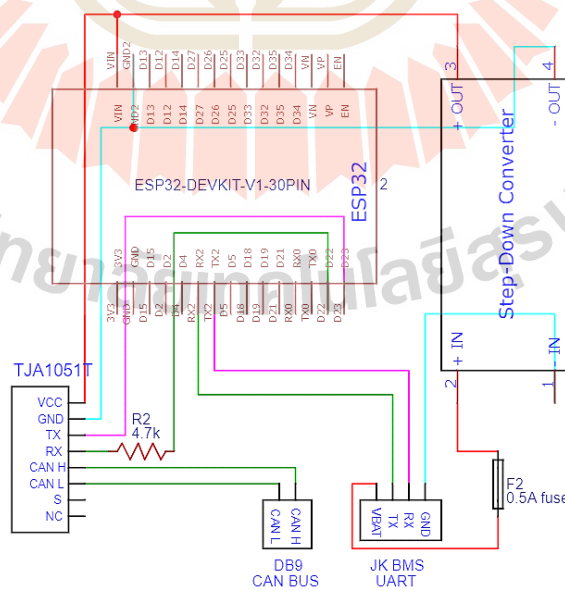
หลังจากการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ครบถ้วนตามที่กำหนดแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการเชื่อมต่อขาของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องมือ Wire ภายในโปรแกรม EasyEDA เพื่อสร้างเส้นเชื่อมโยงระหว่างขา (Pin) ที่ต้องการเชื่อมต่อ การเดินสายไฟฟ้าต้องไม่ซ้อนทับหรือตัดกัน เพื่อลดความสับสนในการตรวจสอบและแก้ไขในภายหลัง ทั้งนี้การจัดวางเส้นเชื่อมต่อที่เป็นระบบยังช่วยเพิ่มความถูกต้องและความเข้าใจในการอ่านแผนผังวงจร ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 การลากสายไฟเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

4) การออกแบบแผนผังวงจร (Schematic Diagram)

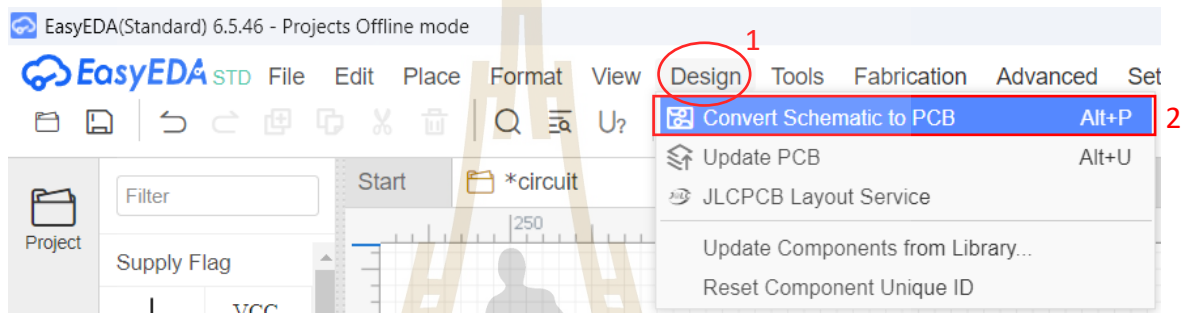
เมื่อทำการวางอุปกรณ์และเชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว จะได้แผนผังวงจรไฟฟ้าหลัก (Schematic Diagram) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความสัมพันธ์ของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบ แผนผังวงจรดังกล่าวถือเป็นต้นแบบสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมต่อก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบแผนผังวงจรพิมพ์ (PCB Layout) ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 แผนภาพวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม EasyEDA

5) การแปลง Schematic เป็น PCB

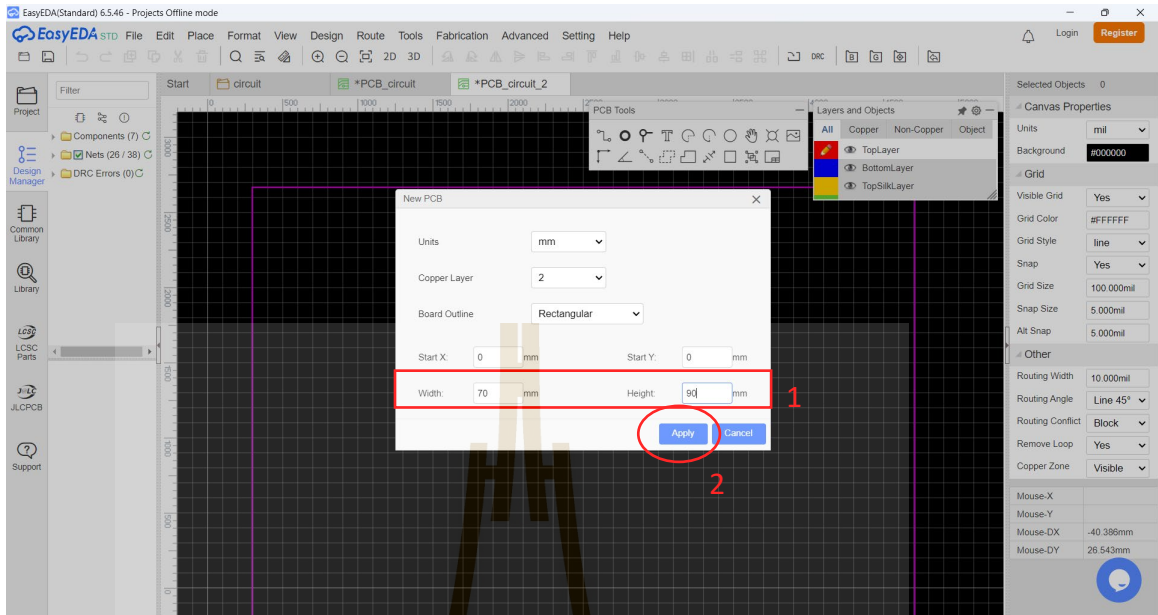
หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแผนผังวงจร (Schematic) เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการแปลงแผนผังวงจรไปสู่การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB Layout) โดยผู้วิจัยเลือกเมนู Design และกดปุ่ม Convert Schematic to PCB ภายในโปรแกรม EasyEDA เพื่อเข้าสู่กระบวนการจัดวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB ทั้งนี้การแปลงข้อมูลดังกล่าวจะทำให้ตำแหน่งขาและการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกส่งต่อไปยังหน้าออกแบบ PCB โดยอัตโนมัติ เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการจัดเรียง ตำแหน่ง และวางโครงสร้างแผ่นวงจรได้อย่างเป็นระบบ ดังแสดงในรูปที่ ก.5



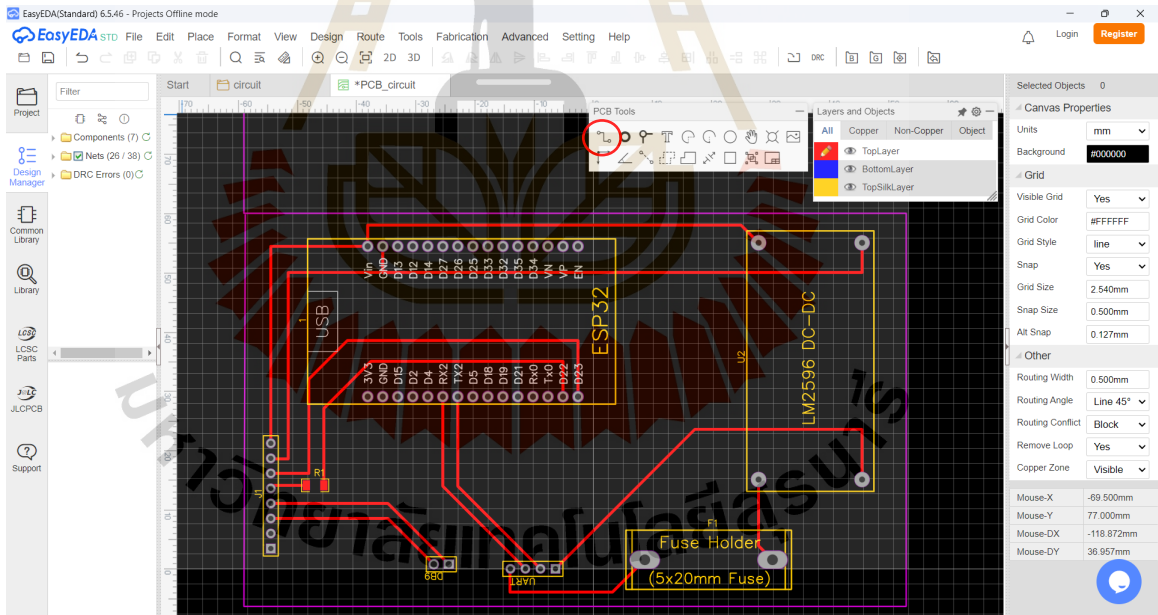
รูปที่ ก.5 เมนูการแปลงแผนผังวงจรเป็นแผ่น PCB

6) การกำหนดขนาดและวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB

ในการออกแบบ PCB ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดของแผ่น PCB ให้มีความกว้าง 70 มิลลิเมตร และความสูง 90 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงและการติดตั้งในระบบ จากนั้นจึงดำเนินการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่น PCB โดยคำนึงถึงหลักการออกแบบที่ถูกต้อง ได้แก่ การเว้นระยะห่างระหว่างขาอุปกรณ์ การกำหนดความกว้างของลายทองแดง (Copper Trace) ให้สอดคล้องกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และการจัดเรียงอุปกรณ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่สามารถตรวจสอบและซ่อมบำรุงได้สะดวก การจัดวางดังกล่าวมีความสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพการทำงานและความน่าเชื่อถือของวงจร ดังแสดงในรูปที่ ก.6 และรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.6 การตั้งค่าขนาดแผ่น PCB

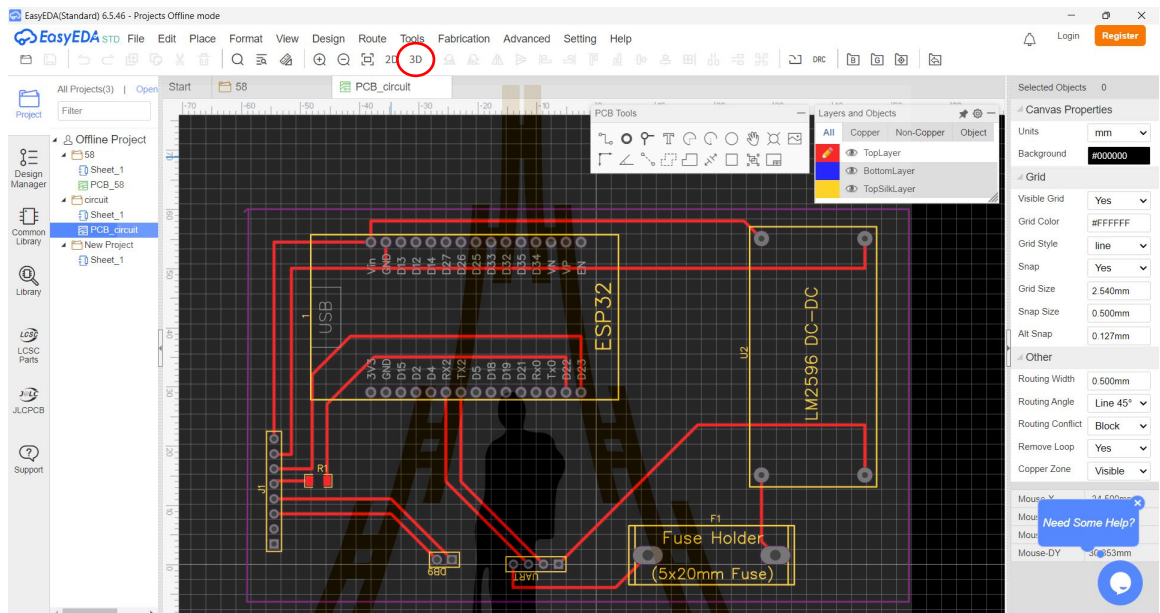


รูปที่ ก.7 การวางอุปกรณ์และเดินสายทองแดงบนแผ่น PCB

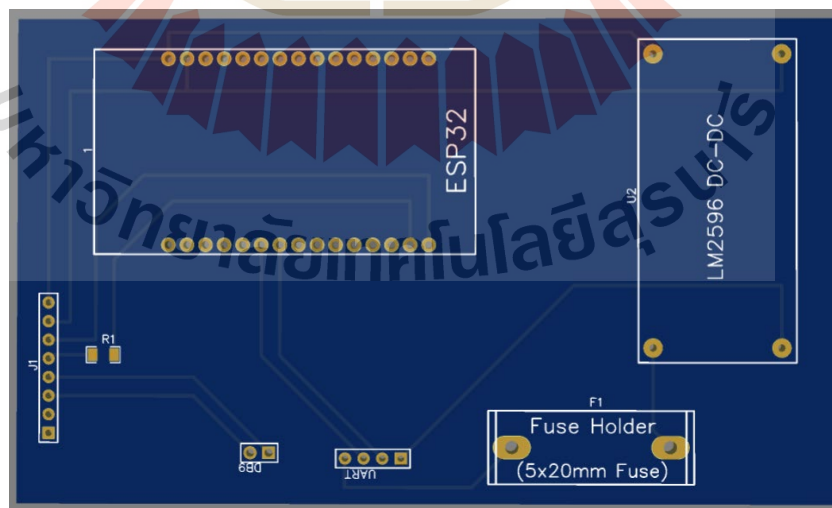
7) การดูตัวอย่าง 3 มิติและการเตรียมไฟล์ผลิต

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการออกแบบแผ่น PCB ผู้วิจัยได้ทำการแสดงผลต้นแบบในรูปแบบสามมิติ (3D View) โดยคลิกที่ปุ่ม “3D” ภายในโปรแกรม EasyEDA เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งและการจัดวางอุปกรณ์ รวมถึงการประเมินภาพรวมของแผ่น PCB ก่อนการ

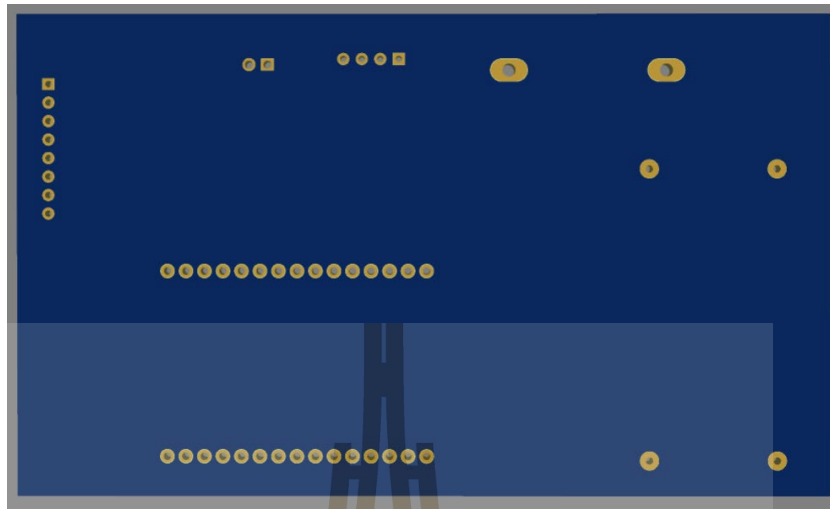
ผลิตจริง จากนั้นจึงใช้คำสั่ง “Generate Gerber” เพื่อส่งออกไฟล์ Gerber File ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ในเชิงอุตสาหกรรม ไฟล์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการสั่งผลิต PCB ได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ ก.8, ก.9, ก.10 และรูปที่ ก.11



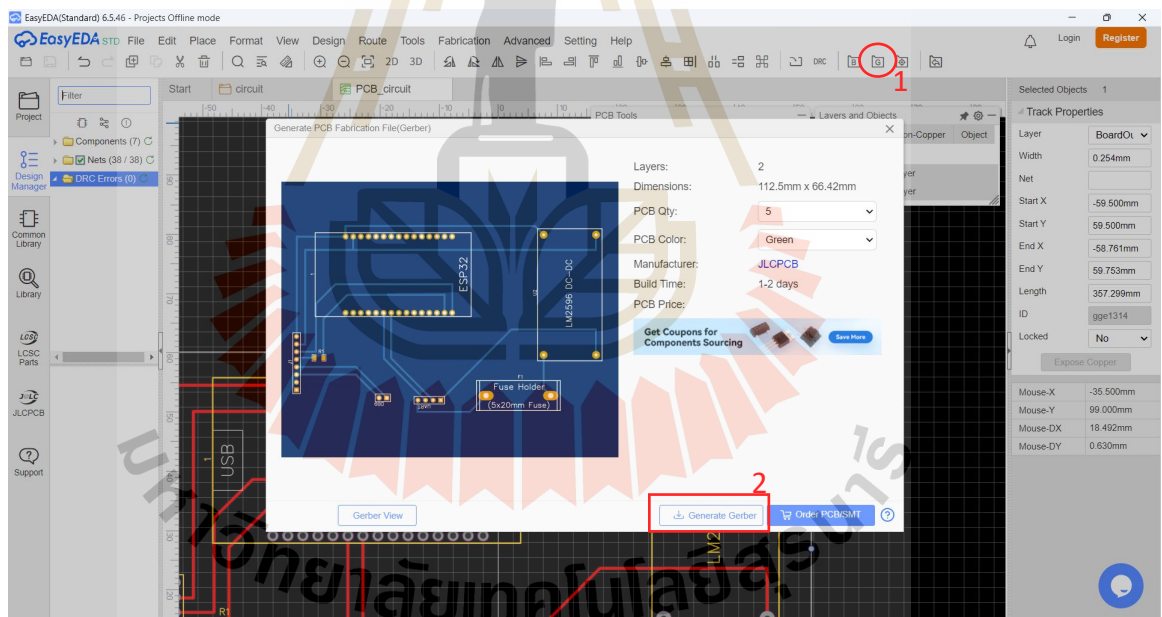
รูปที่ ก.8 การดูตัวอย่าง 3 มิติของแผ่น PCB



รูปที่ ก.9 ตัวอย่าง 3 มิติ มุมมองด้านบน



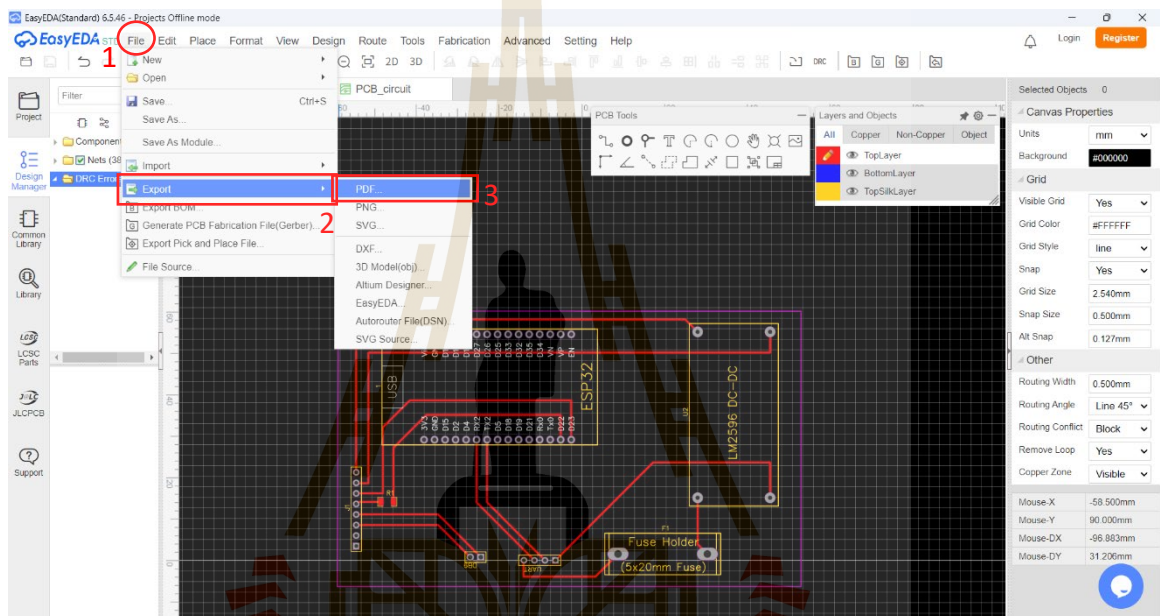
รูปที่ ก.10 ตัวอย่าง 3 มิติ มุมมองด้านล่าง



รูปที่ ก.11 หน้าต่าง Generate Gerber File

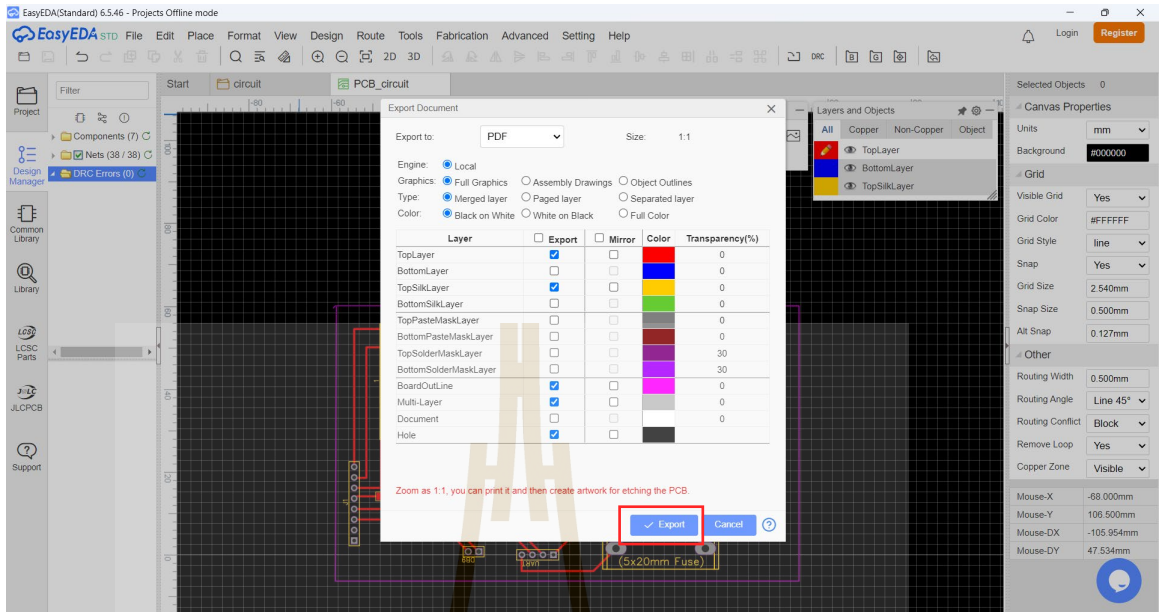
8) การส่งออกแผ่นวงจรแบบ PDF สำหรับพิมพ์

ในกรณีที่ต้องการผลิตแผ่น PCB ด้วยตนเอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการส่งออกแบบแผ่นวงจรเป็นไฟล์ PDF ในรูปแบบ ขาว-ดำ (Black & White) เพื่อใช้ในการพิมพ์ลงบนกระดาษ Transfer ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการถ่ายโอนลายวงจรไปสู่แผ่นทองแดง หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการกัดลายทองแดง (Etching Process) เพื่อสร้างลายวงจรจริงบนแผ่น PCB กระบวนการดังกล่าวช่วยให้สามารถผลิตแผ่นวงจรต้นแบบได้ด้วยตนเองโดยไม่จำเป็นต้องส่งออกไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ ก.12, ก.13 และรูปที่ ก.14

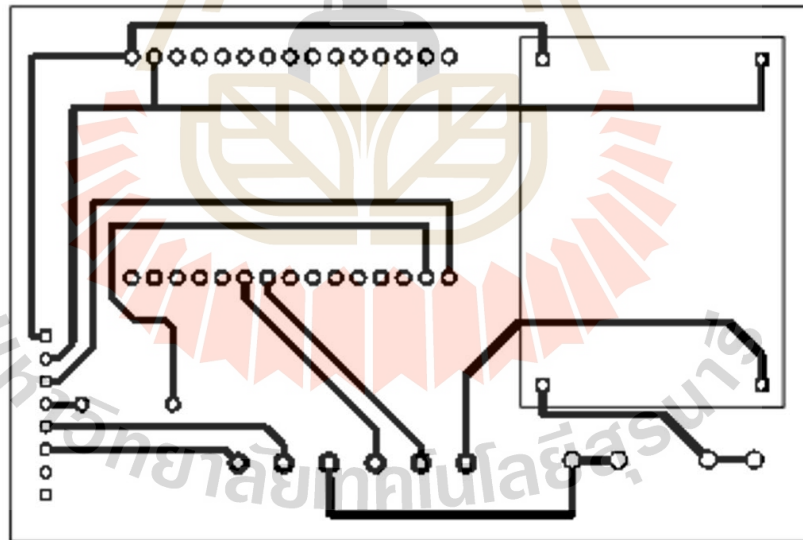


รูปที่ ก.12 เมนูส่งออก PDF

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



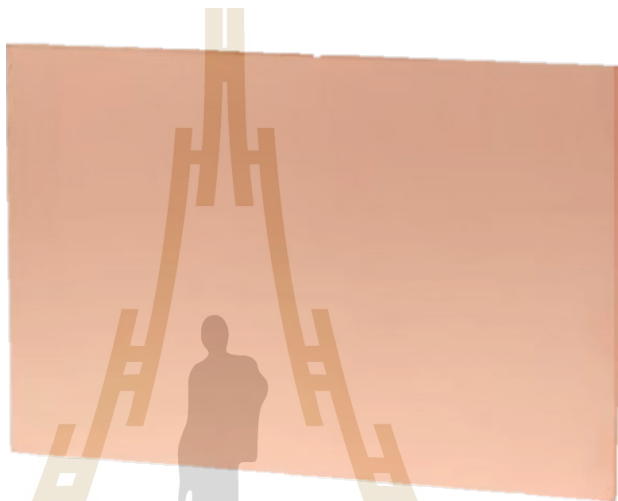
รูปที่ ก.13 ขั้นตอนการส่งออก PDF



รูปที่ ก.14 ไฟล์ลายวงจรขาสำหรับกัดแผ่น PCB

9) การเตรียมแผ่น PCB

ในการผลิตแผ่น PCB ผู้วิจัยได้นำแผ่นลามิเนตเคลือบทองแดง (Copper Clad Board) มาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยกระดาษทรายละเอียดและเช็ดด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อขจัดคราบไขมัน สิ่งสกปรก หรือสิ่งปนเปื้อนที่อาจส่งผลต่อการถ่ายโอนลายวงจร การทำความสะอาดดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยให้ลายวงจรถูกถ่ายลงบนแผ่นทองแดงได้อย่างคมชัดและสมบูรณ์ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดข้อบกพร่องในขั้นตอนการกัดลายทองแดงภายหลัง ดังแสดงในรูปที่ ก.15



รูปที่ ก.15 แผ่นลามิเนตเคลือบทองแดง

10) การถ่ายโอนลายวงจรลงแผ่น PCB

เมื่อเตรียมแผ่นลามิเนตเคลือบทองแดงเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำกระดาษ Transfer ที่พิมพ์ลายวงจรไว้ มาวางทับบนแผ่นทองแดงที่ผ่านการทำความสะอาด และใช้ความร้อนจากเตารีดกดรีดลงบนกระดาษ เพื่อถ่ายโอนลายวงจรไปยังแผ่นทองแดง กระบวนการนี้มีความสำคัญต่อความคมชัดและความสมบูรณ์ของลายวงจรที่จะนำไปใช้งานจริง

11) การล้างคราบลายวงจร

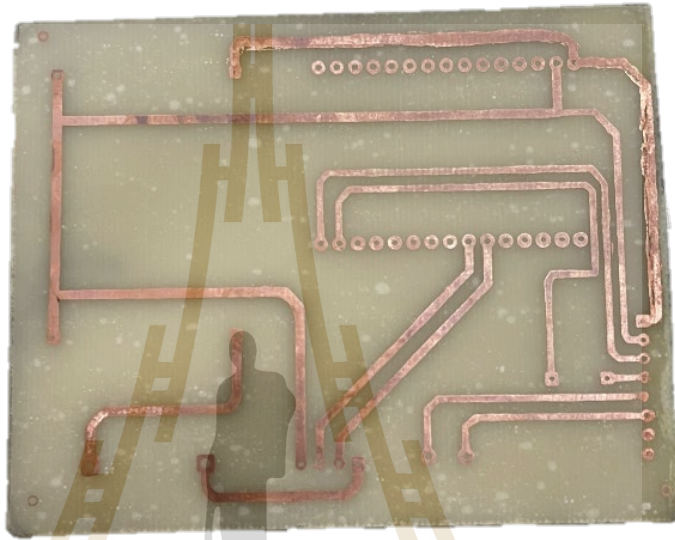
หลังจากการถ่ายโอนลายวงจรแล้ว ผู้วิจัยได้นำแผ่น PCB ไปผ่านกระบวนการล้างด้วย น้ำยาล้างลาย (Developer Solution) เพื่อละลายและล้างส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ให้เหลือเฉพาะบริเวณทองแดงที่เป็นลายวงจรตามที่ต้องการ

12) การกัดแผ่นทองแดง

แผ่น PCB ที่ผ่านการล้างลายแล้วจะถูกนำไปแช่ใน น้ำยากัดทองแดง เช่น Ferric Chloride ($FeCl_3$) หรือ Sodium Persulfate เพื่อกัดและกำจัดทองแดงส่วนเกินที่ไม่ใช่วงจรออกไปทั้งหมด ทำให้คงเหลือเฉพาะลายทองแดงที่ต้องการใช้งานเป็นเส้นทางการนำกระแสไฟฟ้าในวงจร

13) การล้างและทำความสะอาด

เมื่อการกัดแผ่นทองแดงเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำแผ่น PCB มาล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อล้างคราบน้ำยากัด จากนั้นใช้แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดเพื่อลดการตกค้างของสารเคมี และปล่อยให้แผ่น PCB แห้งสนิทเพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการใช้งานหรือการบัดกรีอุปกรณ์ต่อไป ดังรูปที่ ก.16



รูปที่ ก.16 แผ่นทองแดงที่ผ่านกระบวนการล้างและทำความสะอาดแล้ว

14) การเจาะรูและตัดแผ่น

เมื่อได้ลายวงจรที่สมบูรณ์แล้ว ผู้วิจัยได้นำแผ่น PCB ไปทำการเจาะรูด้วยเครื่องเจาะ PCB (PCB Drilling Machine) เพื่อเตรียมตำแหน่งสำหรับขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามที่กำหนดไว้ในแบบ จากนั้นทำการตัดขอบแผ่น PCB ให้มีขนาดที่ถูกต้องตามแบบการออกแบบ

15) การติดตั้งอุปกรณ์และการบัดกรี

หลังจากการเจาะรูและตัดขนาดแผ่นเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในผังวงจร (Schematic Diagram) และทำการบัดกรีขาอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB เพื่อให้การเชื่อมต่อของวงจรมีความสมบูรณ์และสามารถใช้งานได้จริง



ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการออกแบบหน้าจอด้วยโปรแกรม SquareLine Studio

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการออกแบบหน้าจอด้วยโปรแกรม SquareLine Studio

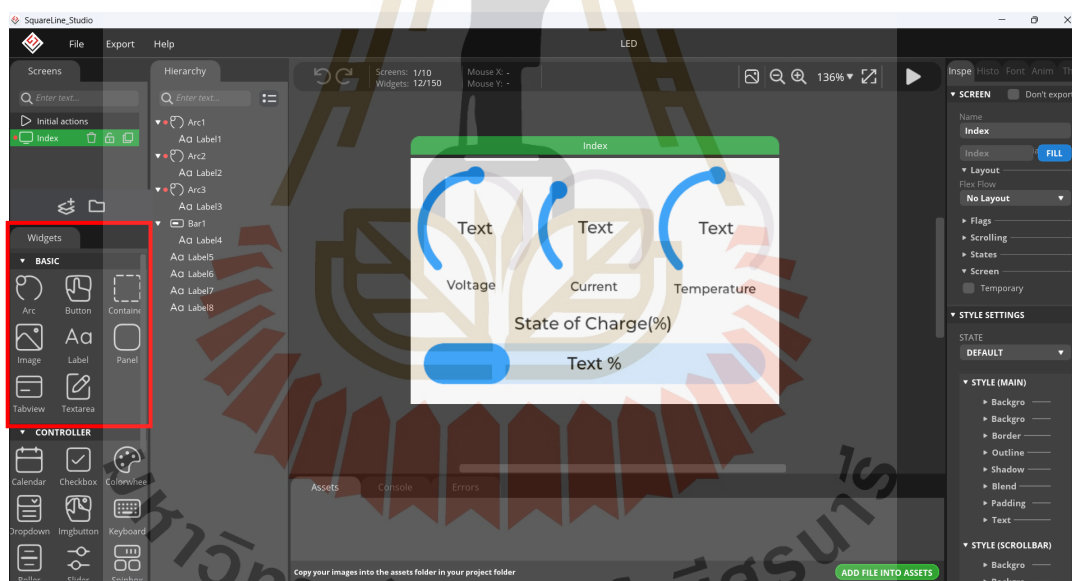
การออกแบบและพัฒนาอินเตอร์เฟซผู้ใช้ ของระบบจัดการแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SquareLine Studio ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับสร้างหน้าจอบนไลบรารี LVGL โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการออกแบบได้ดังนี้

1) การสร้างโปรเจกต์ใหม่ (Create New Project)

เริ่มต้นด้วยการสร้างโปรเจกต์ใหม่ภายใน SquareLine Studio โดยกำหนดชื่อโปรเจกต์ โพลเดอร์จัดเก็บ และความละเอียดของหน้าจอ (Target Resolution) ให้สอดคล้องกับฮาร์ดแวร์จริง รวมถึงเลือกเวอร์ชันของไลบรารี LVGL ที่ใช้

2) การเพิ่มวิดเจ็ต (Widget Placement)

ทำการลากและวางวิดเจ็ต (Widgets) ลงบนหน้าจอ เช่น ป้ายข้อความ (Label) ปุ่มกด (Button) รูปภาพ (Image) แถบเลื่อน (Slider) หรือเกจ (Gauge) เพื่อใช้แสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่



รูปที่ ข.1 การเพิ่มวิดเจ็ต ลงบนหน้าจอ

3) การปรับแต่งคุณสมบัติ (Property Adjustment)

ปรับแต่งคุณสมบัติของวิดเจ็ต เช่น ขนาด สี ฟอนต์ การจัดวาง (Alignment) และการเปลี่ยนแปลงสถานะของปุ่ม (Normal/Pressed/Disabled)

4) การสร้างเหตุการณ์และการตอบสนอง (Event and Action Setup)

กำหนดเหตุการณ์ (Event) สำหรับวิดเจ็ต เช่น เมื่อกดปุ่ม (On Click) หรือเมื่อค่ามีการเปลี่ยนแปลง (On Value Changed) โดยเชื่อมโยงไปยังการทำงานที่ต้องการ เช่น การเปลี่ยนหน้าจอ การอัปเดตข้อความ หรือการเรียกใช้ฟังก์ชันในโปรแกรมหลัก

5) การทดสอบการทำงานเบื้องต้น (Preview and Testing)

ใช้ฟังก์ชัน Preview เพื่อตรวจสอบการทำงานของหน้าจอ เช่น การตอบสนองของปุ่ม การเปลี่ยนหน้าจอ และการอัปเดตค่าของวิดเจ็ต

6) การส่งออกไฟล์โค้ด (Code Exporting)

เมื่อออกแบบและทดสอบเสร็จสิ้น จึงทำการส่งออกไฟล์โค้ด (C/C++) เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (เช่น ESP32 หรือ STM32) โดยเชื่อมต่อกับข้อมูลจากระบบจัดการแบตเตอรี่และระบบสื่อสาร CAN



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Yanpreechaset, C.; Donjaroennon, N.; Nuchkum, S.; Leeton, U. Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication. World Electr. Veh. J. 2025, 16, 375. <https://doi.org/10.3390/wevj16070375>

ชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ, อุเทน ลีตน, นพฤทธิ พรหมลิ่ง, ศจรศักดิ์ สิงห์ตันต์. (2567). ลดการสูญเสียพลังงานให้เหลือน้อยที่สุดโดยใช้การไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากอัลกอริทึมทางพันธุกรรม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 (EENET). นนทบุรี: หน้า 1-4



Article

Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication

Chanon Yanpreechaset ¹, Natthapon Donjaroenon ¹, Suphachakan Nuchkum ² and Uthen Leeton ^{1,*}

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; m6601263@g.sut.ac.th (C.Y.); d6500467@g.sut.ac.th (N.D.)

² School of Mechatronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; suphachakan@sut.ac.th

* Correspondence: uthenleeton@sut.ac.th

Abstract

The increasing adoption of electric vehicles (EVs) presents a growing demand for efficient, real-time battery monitoring systems. Many existing Battery Management Systems (BMS) with built-in Controller Area Network (CAN) communication are often expensive or lack user-friendly interfaces for displaying data. Moreover, integrating such BMS units with standard Human–Machine Interface (HMI) displays remains a challenge in cost-sensitive applications. This article presents the design and development of an interface for integrating the BMS of electric vehicles with the ATD3.5-S3 display using the CANopen protocol. The system enables the real-time visualization of essential battery parameters, including voltage, current, temperature, and state of charge (SOC) percentage. The proposed system utilizes a JK BMS, an ESP32 microcontroller, and a TJA1051 CAN transceiver to convert UART data into CAN Open messages. The design emphasizes affordability, modular communication, and usability in EV applications. Testing under various load conditions confirms the system's stability, reliability, and suitability for practical use in electric vehicles.

Keywords: battery management system; CANopen; display



Academic Editors: Joeri Van Mierlo, Quan Yuan and Xiaoyuan Fu

Received: 23 April 2025

Revised: 21 June 2025

Accepted: 2 July 2025

Published: 4 July 2025

Citation: Yanpreechaset, C.; Donjaroenon, N.; Nuchkum, S.; Leeton, U. Development of an EV Battery Management Display with CANopen Communication. *World Electr. Veh. J.* **2025**, *16*, 375. <https://doi.org/10.3390/wevj16070375>

Copyright: © 2025 by the authors. Published by MDPI on behalf of the World Electric Vehicle Association. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

EVs have become increasingly popular as a sustainable solution to reduce greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels [1,2]. At the core of EV performance is the BMS, which ensures safe and efficient battery operation [3,4]. A major challenge in EV development lies in implementing cost-effective and reliable systems for real-time battery data visualization and communication [5,6]. This study presents the development of a low-cost and modular BMS interface using CANopen communication for use in EV applications [7,8].

Literature Review

Numerous studies have addressed the integration of BMS with various communication protocols [3,5,9]. Traditional BMS solutions typically utilize CAN communication but lack compatibility with modern graphical user interfaces (GUIs) [6,7]. Some commercial systems offer high integration but come at a significant cost, limiting their feasibility for low-budget EV projects [1,4]. Research has also explored protocols such as Modbus and UART-based communication [6,9,10], though these often require custom development and are not modular [8]. However, most existing solutions do not focus on low-cost, open-source implementations that integrate easily with HMI displays like the ATD3.5-S3 [11,12].

Despite advances in BMS communication, few studies address the need for an affordable, open, and flexible system that supports real-time visualization using standard HMI hardware [8,13]. Existing commercial options are either costly or closed-source, making them difficult to adapt for educational, prototyping, or budget-sensitive projects [1,3]. Moreover, CANopen—though widely used in industrial automation—remains underexplored in EV BMS display applications [7,11].

This study introduces a CANopen-based communication interface between a JK BMS and an ATD3.5-S3 touch display using an ESP32 microcontroller [8,12,14]. The novelty lies in the implementation of a low-cost, open-source solution that bridges UART-to-CANopen conversion for real-time battery parameter monitoring [7,10,11]. This modular design facilitates easy integration, scalability, and cost-efficiency, making it highly suitable for academic research and small-scale EV development [5,15].

2. CAN Communication Between BMS and Display Units

CAN Communication Between BMS and Display Units Communication between a BMS and an HMI display through the CAN protocol has become a key approach in modern EV architectures [1,6,16]. This method enables real-time monitoring and visualization of critical battery parameters, such as voltage, current, temperature, and state of charge [5,7,17]. CAN's robustness in data transmission, coupled with its noise immunity and arbitration mechanisms, ensures the reliability and accuracy of information exchanged between the BMS and the display unit [9,18]. By employing CAN transceivers—such as the TJA1051 module—and microcontrollers like the ESP32 [10,19,20], data can be retrieved from BMS devices via UART [10,14,19] and subsequently transmitted to the display using standardized CAN frames [6,21]. This architecture not only enhances system integration but also reduces communication latency and increases diagnostic capabilities [9,18], making it an effective solution for EV battery monitoring systems [19,22].

2.1. CAN

The CAN is a digital communication protocol originally developed for use in automotive systems and has since been widely adopted in industrial and medical applications. It enables communication between ECUs [9,21] without the need for a centralized controller, allowing each node within the network to communicate independently. CAN is known for being dependable, strong, and effective at handling real-time data [9,18], making it suitable for applications requiring high accuracy and stability, such as automotive control systems [9,21], industrial automation, and critical medical devices [18].

2.2. CANopen

CANopen is a communication protocol developed on the foundation of CAN to support automation control, particularly within industrial domains such as manufacturing systems, robotics, and medical devices [7]. It is designed to be highly flexible and easily extensible, enabling efficient communication between devices within a network [18]. CANopen includes specialized control functions such as parameter configuration and device status monitoring, enhancing the usability of CAN-based systems in complex and scalable applications [21].

Although traditional CAN is sufficient for simple EV battery systems with limited nodes and custom message formats, it lacks standardization at higher layers, which can lead to integration issues across devices from different vendors [18,21]. CANopen, by extending the CAN protocol with standardized communication profiles, offers enhanced interoperability, structured data handling through Object Dictionaries, and built-in support for diagnostics, synchronization, and real-time communication via Process Data Objects

(PDOs) and Service Data Objects (SDOs) [7,11]. These features make CANopen more suitable for complex, modular EV systems where safety, performance monitoring, and multi-device coordination are critical [8,11]. However, it introduces greater complexity and may not be ideal for resource-constrained systems [9]. Therefore, the choice between CAN and CANopen should depend on system requirements for scalability, diagnostics, and vendor interoperability [11,21].

2.3. PCAN-USB

The PCAN-USB is a hardware interface device that enables the connection between a CAN and a computer via a USB port [9,18]. It functions as a signal converter, allowing users to monitor, analyze, and interact with data transmitted over a CAN bus [9,21]. This device is particularly valuable in automotive development environments or any applications requiring CAN-based communication [9,18], as shown in Figure 1.



Figure 1. PCAN-USB [23].

2.3.1. D-Sub Pin Configuration

The PCAN-USB device employs a 9-pin D-Sub connector to facilitate CAN communication. The standard pin assignment is detailed in Table 1 and typically adheres to the layout specified by the manufacturer, as shown in Figure 2.

Table 1. PCAN-USB D-Sub pin assignment [23].

Pin	Connection Type
1	Not connected/optional + 5 V
2	CAN-L
3	GND
6	GND
7	CAN-H
9	Not connected/optional + 5 V

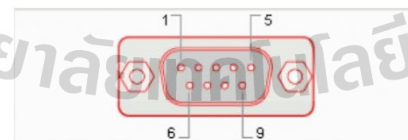


Figure 2. PCAN-USB D-Sub pin layout [23].

2.3.2. Key Features of PCAN-USB

The device connects directly to a computer or laptop via a USB interface, allowing easy integration with analysis and diagnostic software. The PCAN-USB also allows direct

communication with CAN-based systems, including reading sensor data and sending control messages to other devices on the CAN network.

2.4. Lithium-Ion Battery with Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

NMC lithium-ion batteries are a class of rechargeable batteries that combine lithium with nickel, manganese, and cobalt (LiNiMnCoO_2) as cathode materials [24,25]. This formulation provides a well-balanced combination of high energy density, safety, and operational versatility [24,26], making NMC batteries highly suitable for applications that demand high performance, particularly EVs [8,24] and energy storage systems (ESS) [27].

2.5. Lithium Battery Pack Assembly

The assembly of lithium battery packs is essential for ensuring the safety, reliability, and performance of energy storage systems [27,28]. It involves configuring multiple cells in series or parallel to meet voltage and capacity requirements [25], integrating a BMS for monitoring and protection [18,25,28], as shown in Figure 3, and using protective materials to prevent potential hazards. Effective thermal management is crucial for dissipating heat and maintaining performance, while a robust mechanical structure with durable enclosures ensures physical protection [15,28].



Figure 3. Lithium battery pack assembly.

In this study, 20 lithium-ion cells (3.7 V, 25 Ah) were connected in series. The total voltage and capacity of the battery pack are calculated using the following equations:

$$V_{total} = N \times V_{cell} \quad (1)$$

$$C_{total} = C_{cell} \quad (2)$$

where

V_{total} is the total voltage of the battery pack;
 C_{total} is the total capacity of the battery pack;
 N is the number of cells connected in series;
 V_{cell} is the voltage of a single cell;
 C_{cell} is the capacity of a single cell.

2.6. BMS

A BMS is an essential component designed to monitor, regulate, and optimize the performance of rechargeable batteries, especially lithium-ion types that require precise control due to their electrochemical complexity [1,3,22]. The BMS performs several core functions, including monitoring cell voltage and temperature to prevent overcharging, overheating, and thermal runaway; managing current flow to avoid overcurrent damage; and balancing cell voltages to ensure consistent performance and maximize battery lifespan [4,17]. It also detects faults and alerts users to abnormal conditions while activating protective measures to prevent failure [4,18]. Key components of a BMS include sensors for real-time monitoring [5,29], a microcontroller unit (MCU) for processing data and executing control strategies [14,20], and balancing circuitry to maintain voltage uniformity across cells [4,22,25]. The BMS offers significant benefits, such as enhanced safety, extended battery life, and improved overall performance [1,4,16]. Its applications span a wide range of industries, including EVs [2,3], where it supports stable and efficient operation, and ESS [17,27] that rely on renewable sources like solar and wind. In conclusion, BMS is a critical technology that ensures the safe, reliable, and efficient use of lithium-ion batteries in modern energy and mobility solutions [1,2,4].

2.7. JK BMS (JiKong Battery Management System)

JK BMS, or the JiKong Battery Management System, is a widely used BMS solution designed for various energy applications [14,22], particularly in EVs [2] and ESS [17], where reliability and efficient power management are essential [22], as shown in Figure 4. JK BMS is recognized for offering comprehensive features for monitoring and managing lithium-ion batteries [14,29] while also demonstrating robust compatibility with other electronic systems [21].

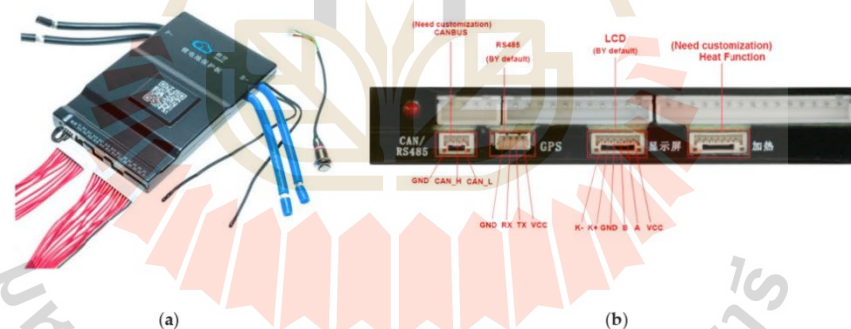


Figure 4. (a) JK BMS; (b) interface ports of JK BMS Module [30].

While the JK BMS is chosen in this study due to its affordability and functionality, it is essential to recognize that other low-cost alternatives, such as the LTT BMS and SmartBMS, also exist. However, the JK BMS offers specific technical advantages that align well with the goals of this study [14,22,30]. For instance, it provides a highly stable UART communication protocol that can be adapted to CAN through hardware-level conversion (e.g., using the TJA1051 transceiver) [14,21,31], whereas some other budget BMS options may lack detailed documentation or support for communication scalability [29].

2.8. UART

UART is a serial communication protocol used for data transmission between two devices, such as a microcontroller and a sensor or computer [18]. It operates asynchronously, without requiring an external clock, using two primary lines: TX (Transmit) and RX (Receive). Data transmission involves a structure with a start bit, data bits, an optional parity bit, and stop bits, with the sender and receiver agreeing on a baud rate for synchronization. UART supports various operation modes, including simplex, half-duplex, and full-duplex, and is commonly used in microcontrollers [14,20], computer interfaces, and embedded systems like BMS [5,22] and electric vehicles [2,10]. It offers advantages such as simplicity, low cost, and full-duplex communication, but it has limitations, including lower speed compared to other protocols like SPI and I2C, as well as limited multi-device support.

2.9. TJA1051 Transceiver Module

The TJA1051 is a CAN transceiver module designed to interface CAN systems with external embedded devices [21]. This device is manufactured by NXP Semiconductors, which is headquartered in Eindhoven, The Netherlands. It is widely utilized in automotive and industrial applications, particularly within electric vehicle systems [2], to facilitate efficient communication between internal components such as ECUs [18] and various sensors, as shown in Figure 5. The TJA1051 acts as a bridge that converts differential CAN signals into logic-level signals usable by microcontrollers [14,20] and other control units.



Figure 5. TJA1051 transceiver module [31].

2.10. ATD3.5-S3 Display Module

The ATD3.5-S3, manufactured by Artron Shop Co., Ltd. (ArtronShop), with operations based in Nonthaburi, Thailand, is a 3.5-inch TFT capacitive touch display designed for integration with the ESP32-S3 board, manufactured by Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. from Shanghai, China [14,20], which offers high-performance processing and wireless communication capabilities, including Wi-Fi and Bluetooth, as shown in Figure 6. This display module serves as a practical solution for embedded systems that require interactive graphical user interfaces [11], particularly in applications such as the Internet of Things (IoT) [32], automation systems, and smart home devices [20].



Figure 6. ATD3.5-S3 display module [12].

2.11. CAN Bus Expansion Module for ATD3.5-S3

The CAN bus expansion module for the ATD3.5-S3 display serves as an auxiliary interface designed to enable microcontroller-based systems—such as those utilizing Arduino boards—to communicate over a CAN [18,21]. CAN is a widely adopted communication protocol in automotive and industrial systems [1,9,16], providing robust and efficient data exchange between distributed devices within the same network, as shown in Figure 7.



Figure 7. ATD3.5-S3 CAN bus shield [33].

This CAN bus shield acts as a bridge between the main ATD3.5-S3 system and the CAN network, allowing the system to both transmit and receive data reliably and securely [18]. It converts electrical signals and manages protocol-level communications to ensure compatibility with other CAN-enabled components, such as BMS [14,22], sensors, or ECUs [21].

By integrating this module, the ATD3.5-S3 platform can function not only as a display and control interface [11] but also as a node within a distributed embedded system [14,32]. This expands its applicability to fields requiring real-time communication and diagnostics—particularly in smart energy systems, electric vehicles [2], and factory automation [18].

2.12. ESP32 Module

The ESP32 is a high-performance microcontroller developed by Espressif Systems. It is equipped with integrated Wi-Fi and Bluetooth capabilities [10,14,19] and is designed for a wide range of applications, including automation systems [32], the IoT [20], and intelligent control systems [10,14,32], as shown in Figure 8. Its versatility and adaptability for interfacing with various sensors and peripherals make it a popular choice in embedded system development [10,14,19].

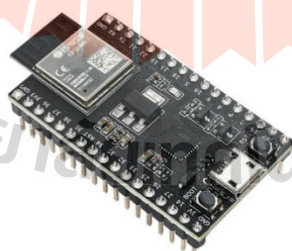


Figure 8. ESP32 module [34].

2.13. Buck Converter or Step-Down Converter

A buck converter, also known as a step-down converter, is a type of switching voltage regulator designed to efficiently reduce a higher input voltage to a lower output voltage. It belongs to the family of DC-DC converters and is widely utilized in applications requiring regulated DC power. Unlike linear regulators, the buck converter uses high-frequency switching to control and regulate the voltage conversion process, offering significantly higher efficiency.

3. Methodology

This article focuses on the development of the JK Battery Management System (JK BMS) [14] and its connection to a display interface, allowing users to monitor battery status in real time [22]. The BMS and the display communicate via the CANopen protocol [21], a standard widely used in the automotive industry [1,2]. In this study, an ESP32 module is used to receive UART signals from the BMS [14,20] and forward them to a TJA1051 transceiver module [14,20]. The UART signals are then converted into CAN signals and transmitted to the display [18]. The system presents key battery parameters, such as voltage, current, temperature, and SOC for user monitoring [17].

An overview of the battery monitoring system architecture is shown in Figure 9. The JK BMS communicates via UART to the ESP32 [14,20], which then sends CAN messages via the TJA1051 transceiver [21,31] to the ATD3.5-S3 display [12].

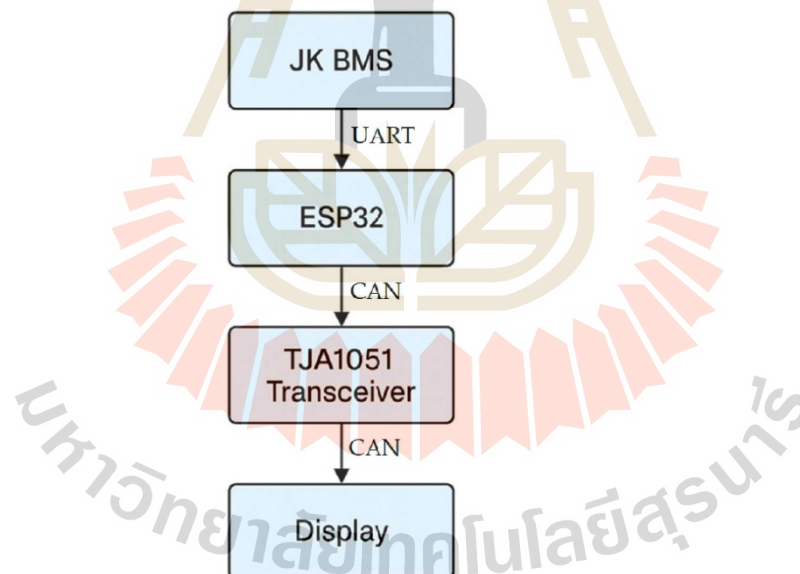


Figure 9. System architecture of the battery monitoring system.

3.1. Electrical Circuit Design

The electrical circuit design in this study was carried out using EasyEDA version 2.2.40.3, a popular software for circuit and printed circuit board (PCB) design. EasyEDA is user-friendly and supports the complete workflow, including schematic drawing, PCB

layout, and direct export of files for manufacturing [15]. The prototype circuit was created as shown in Figure 10. The details of each component are shown in Table 2.

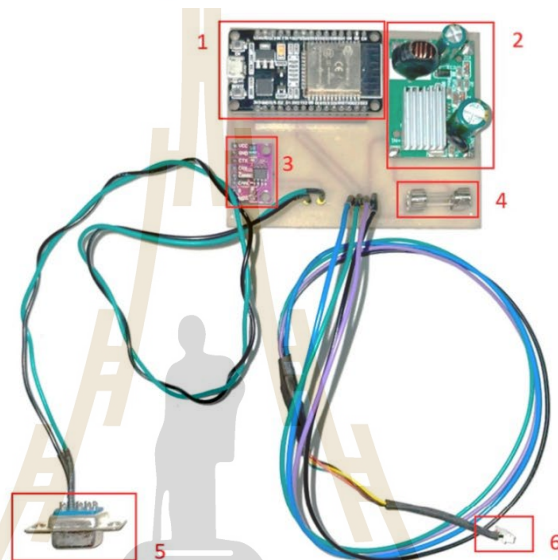


Figure 10. Prototype circuit board.

Table 2. Component details.

Number	Name
1	ESP32 Microcontroller
2	Buck Converter
3	TJA1051 CAN Transceiver
4	Fuse
5	CAN Bus Communication Port
6	Battery Management System (BMS) Communication Port

The ESP32 was selected for this research due to its cost-effectiveness, sufficient computational power, and built-in Wi-Fi/Bluetooth capabilities, making it ideal for cost-sensitive EV prototyping [10,14,20]. With its dual-core 32-bit Xtensa LX6 processor running up to 240 MHz, the ESP32 can efficiently handle real-time data parsing, CAN frame processing, and GUI control without the need for additional hardware [13,14]. Compared to STM32F series MCUs, which offer strong real-time performance but often require more complex setups and lack native wireless interfaces, ESP32 provides a more integrated and developer-friendly solution [32]. Its large open-source ecosystem, support for libraries like LVGL, and low power consumption in sleep modes further enhance its suitability for embedded EV monitoring applications [20,32]. While STM32 may be preferred for applications demanding strict real-time control and industrial-grade support, ESP32 offers a well-balanced alternative that simplifies development and meets the performance needs of this project [14].

3.2. Testing and Evaluation Method

The communication system, implemented through CANopen, is tested to ensure accuracy and stability in data transmission [21] and to verify the correctness of the data displayed on the monitor [11]. The results are analyzed, and the system is improved to achieve optimal performance [8]. Data analysis is performed by comparing the test results from the PCANView program version 4.2.2.55 with the data from the JK BMS application. The parameters compared include voltage, current, temperature, and SOC values measured by the battery system sensors [35]. The testing begins by connecting the test circuit between the BMS and the PCANView program, as shown in Figure 11. Data is acquired from PCAN-View, as shown in Figure 12, and this data is compared with the JK BMS application, as shown in Figure 13.

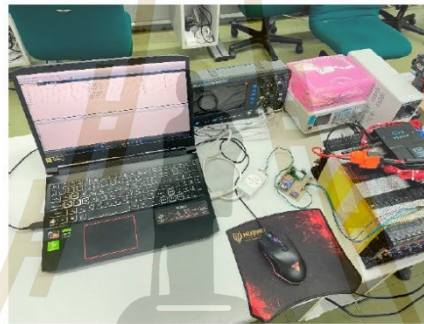


Figure 11. Connection of the test circuit between the BMS and the PCANView program.

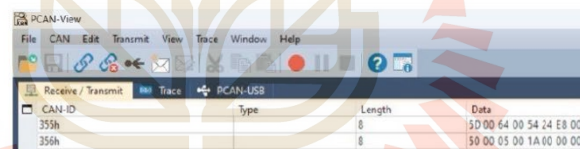


Figure 12. PCANView program.

3.3. Conversion of Hexadecimal (HEX) Values from PCAN-View Software to Decimal (DEC)

Example 1: CAN ID 0x355 (State of Charge)

The conversion process for CAN ID 0x355, bytes 0–1, is demonstrated as follows. Referring to Figure 12, the data obtained for these bytes is the hexadecimal value 0x005D. This value was converted to its decimal equivalent using the programmer mode of a calculator, yielding the decimal number 93, as depicted in Figure 14. According to Table 3, CAN ID 0x355, bytes 0–1, represents the SOC. Therefore, the battery's SOC is calculated as $93 \times 1\% = 93\%$. This calculated value was then compared with the "Remain Battery" value displayed in the JK BMS application (shown in Figure 13), which also indicated 93%, confirming the equivalence of the values [36].

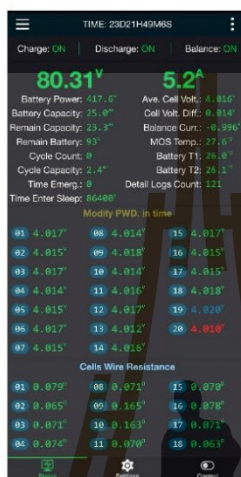


Figure 13. JK BMS application.

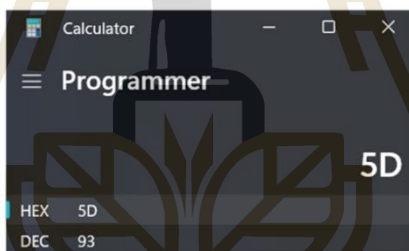


Figure 14. Conversion of the hexadecimal value "0x005D" to decimal using the Calculator program.

Table 3. Definition for CAN ID 0x355.

Byte Number	Parameter Name	Value/Unit
0	State of Charge	1%
1		

Example 2: CAN ID 0x356 (Battery Terminal Voltage)
 Similarly, for CAN ID 0x356, bytes 0–1, the data from Figure 12 is the hexadecimal value 0x0050. Converting this value to a decimal using the programmer mode of a calculator results in 80, as illustrated in Figure 15. Based on Table 4, CAN ID 0x356, bytes 0–1, represent the battery terminal voltage. This indicates that the total battery voltage is $80 \times 1 \text{ V} = 80 \text{ V}$. Upon comparison with the total battery voltage displayed in the JK BMS application (Figure 13), the value was confirmed to be identical at 80 V [36].

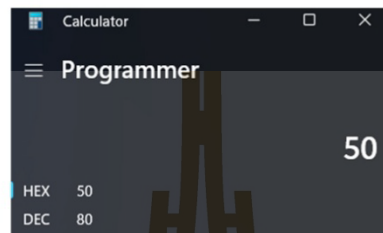


Figure 15. Conversion of the hexadecimal value "0x0050" to decimal using the Calculator program.

Table 4. Definition for CAN ID 0x356.

Byte Number	Parameter Name	Value/Unit
0	Battery Terminal Voltage	1 V
1		
2		
3	Total Pack Current	1 A
4	Battery Temperature	1 °C
5		

4. Discussion

Following the design and fabrication procedures outlined in Chapter 3, the researchers successfully constructed a functional circuit prototype. This prototype interfaces with the BMS via its UART port, converts the signals to the CAN protocol, and transmits them to a display unit [26]. The PCB was fabricated using a copper etching process, and components were mounted according to the schematic designed in EasyEDA software, as depicted in Figure 10 [15]. Upon completion of component installation and control system programming, the display unit accurately presented key data acquired from the BMS, namely voltage, current, temperature, and SOC.

The development and implementation of the proposed battery monitoring system represents an important contribution to the design of affordable and scalable EV diagnostic tools. The integration of CANopen communication and real-time display enables enhanced system observability for low-cost EV platforms [1,5,6,8]. Through detailed testing across a range of operational scenarios—such as fast charging, high-current discharge, and idle states—the system demonstrated high data fidelity, stability, and robustness [5,15,24].

The consistent matching of data between the prototype system, PCAN-View, and the JK BMS application underscores the accuracy of the data transmission process. This validates the correctness of the hexadecimal-to-decimal conversions and the proper assignment of CAN IDs to specific battery parameters [23,30]. Notably, the system maintained accurate and real-time performance without packet loss or delay even under rapid current fluctuations and thermal changes during high-load conditions [5,13].

One of the technical highlights is the successful use of the ESP32 to decode UART messages and generate CANopen-compliant frames. This lightweight microcontroller reliably parses, formats, and forwards data, with no noticeable delays throughout the testing period [10,13,32].

4.1. Data Communication Test Results via CAN Bus

To verify the accuracy of the data presented on the display unit, the researchers conducted system testing by comparing data from three distinct sources: PCAN-View

software version 4.2.2.55, as depicted in Figure 16; the JK BMS mobile application, as depicted in Figure 17; and the prototype system's display unit, as depicted in Figure 18 [35].

CAN-ID	Type	Length	Data
355h	8	8	50 59 4C 4F 4E 20 20 20
355h	8	8	73 48 E3 00 00 04 3A 02
355h	8	8	54 00 04 00 00 20 02 00
356h	8	8	4F 00 0A 00 1B 00 00 00
35Ch	2	2	C0 00
070h	8	8	1B 00 1B 00 04 00 03 00
371h	8	8	01 00 02 00 06 00 14 00
379h	8	8	19 00 00 00 00 00 00 00

Figure 16. Sample PCAN-View software interface displaying data for CAN IDs 0x355 and 0x356.

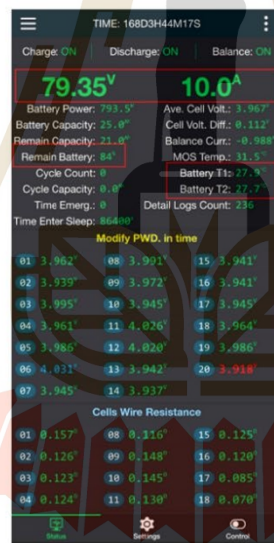


Figure 17. JK BMS application interface used for data comparison.

The test results indicated a high degree of consistency between the values shown on the prototype display and the data obtained from both the PCAN-View software and the JK BMS application. It was necessary to convert the HEX values associated with specific CAN IDs captured by PCAN-View into their DEC equivalents to achieve direct correspondence with the values presented on the prototype display and within the JK BMS application. Table 5 provides examples of this data conversion process [36].

To validate the accuracy of the data presented on the display, the researchers conducted system tests by comparing information from three distinct sources: the PCAN-View software, the JK BMS mobile application, and the prototype system's display unit.

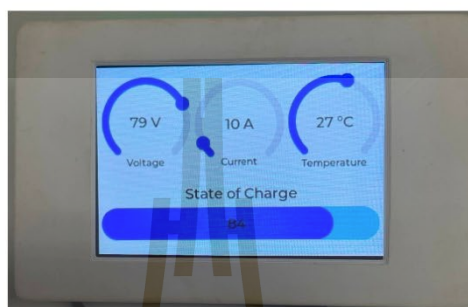


Figure 18. Prototype system display showing measured values during fast charging tests.

Table 5. Sample data conversion and comparison.

CAN ID	Byte	Raw Value (HEX)	Converted Value (DEC)	Parameter/Meaning	Value in JK BMS App
0x355	0-1	0x0054	84	SOC (%)	84%
0x356	0-1	0x004F	79	Battery Voltage (V)	79 V
0x356	2-3	0x000A	10	Total Pack Current (A)	10 A
0x356	4-5	0x001B	27	Battery Temperature (°C)	27 °C

Figure 18: The prototype system display illustrates the real-time monitoring of key battery parameters—including SOC, terminal voltage, current, and temperature—during a fast charging session (10 A for 1 h). The observed values for all parameters are in precise agreement with those reported by the JK BMS mobile application [30]. This outcome confirms the accuracy of data conversion and synchronization between the BMS and the display interface across multiple critical metrics [5,8,10,13].

Figure 19: The experimental setup during the fast charging test, demonstrating real-time monitoring of terminal voltage, current, temperature, and SOC via the CANopen-based display system under high-rate charging conditions. This setup was used to evaluate the system's responsiveness and reliability in transmitting and displaying dynamic battery parameters [5,8,13,30].



Figure 19. The system setup during the fast charging tests.

Figure 20: The experimental setup during the high-current discharge test, illustrating the system's capability to maintain stable and accurate data communication under conditions of rapid current fluctuation [5,7,8,13,30].

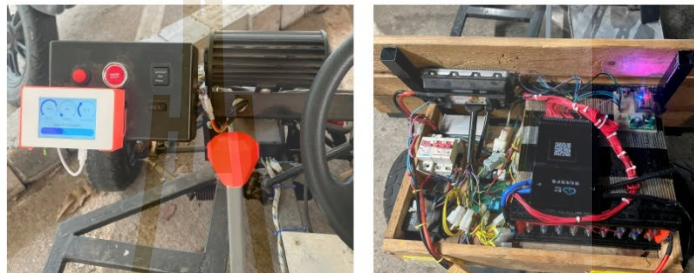


Figure 20. The system setup during the high-current discharge test.

4.2. Results Analysis and System Performance Evaluation

To address the need for broader testing conditions, additional stability tests were conducted under various operational scenarios, including fast charging, high current discharge, and load fluctuation conditions [26,36]. The system demonstrated reliable real-time data transmission, accurate parameter display, and no packet loss or communication delays under all scenarios [13,35]. During fast charging, the display unit consistently reflected the actual values of voltage, current, and temperature reported by the BMS [36]. Figure 19 shows the system setup during the fast charging tests. Similarly, during high current discharge tests, the system maintained stable performance, with accurate real-time reporting of rapid current variations and temperature rise, confirming the robustness of both the BMS and communication modules [22]. Figure 20 shows the system setup during the high current discharge test. These extended tests validate the system's robustness and suitability for real-world EV operating environments [13].

Testing conducted under various operational scenarios, including under load, during battery charging, and during idle periods, revealed that the system maintained consistent data transmission without interruptions or loss of data packets [13].

The identified advantages of the prototype system include the following:

1. Real-time data acquisition from the BMS.
2. Clear and accurate display corresponding to the actual system values.
3. Scalability for integration with other control systems via the CAN bus.

Nevertheless, certain limitations were observed:

1. Potential for signal stability issues over extended CAN bus cable lengths.
2. The physical layout and arrangement of components may require further optimization in specific areas to mitigate potential signal interference.

4.3. Limitations and Mathematical Modeling

Despite the system's successful implementation and stable performance under various operational conditions, several limitations must be acknowledged. First, the system's communication stability may degrade over extended CAN bus cable lengths or in electromagnetically noisy environments, which could potentially introduce latency or data corruption [18,21]. Second, the current prototype design lacks thermal and electromagnetic shielding, which might be required for deployment in harsh automotive environments [28]. Third, the design and testing were based on a specific BMS model (JK BMS); adaptation

to other BMS brands or different CANopen object dictionaries may require significant reconfiguration [11,30].

Moreover, while the system operates based on discrete decoding of CAN messages, it does not yet implement advanced mathematical algorithms such as battery state estimation (e.g., SOC or SOH estimation using Kalman Filters or equivalent models) [17,22,29]. The current implementation uses direct linear conversion from raw hexadecimal values to real-world parameters using scaling equations, such as

$$SOC = HEX_{0-1} \times 100\% \quad (3)$$

$$V_{total} = HEX_{0-1} \times 1 \text{ V} \quad (4)$$

$$I_{total} = HEX_{2-3} \times 1 \text{ A} \quad (5)$$

$$Temp_{avg} = HEX_{4-5} \times 1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6)$$

4.4. Real-World Applications

The developed prototype system demonstrates strong potential for real-world implementation across various EV and energy storage applications. Its modular design, low cost, and communication robustness make it particularly suitable for the following scenarios:

1. Low-cost electric vehicles and scooters where space and budget constraints limit the integration of proprietary BMS displays [1,4,8].
2. University research platforms and educational labs where modular, open-source monitoring systems help students and developers experiment with CAN communication and battery diagnostics [10,13,15].
3. Battery swapping stations where real-time data on pack voltage, SOC, and temperature is needed for safety and charge management [5,6,8].
4. Off-grid or solar-powered systems for visualizing and logging battery parameters in small energy storage units [24,26,27].

The modularity and openness of the system also enable integration with IoT gateways, allowing remote monitoring, diagnostics, and predictive maintenance in larger fleet or infrastructure applications [10,13,20,32]. With additional shielding and robustness upgrades, the system could be adapted for deployment in light-duty EVs or commercial delivery vehicles operating in electromagnetically noisy environments [7,9,28].

4.5. Future Work and Research Directions

Although the proposed system demonstrates reliable real-time battery monitoring using CANopen communication, several areas remain for further improvement. Future work may focus on the following directions:

1. **Enhanced Compatibility:** Expanding the system to support a wider range of BMS models with different communication protocols or CANopen object dictionaries will increase its applicability across diverse EV platforms [1,6,8,11].
2. **Robustness and Environmental Testing:** Conducting long-term field testing under harsh environmental conditions, including high electromagnetic interference (EMI) and temperature variations, will help assess durability and communication stability in real-world EV deployments [5,24,26,28].
3. **Advanced Battery State Estimation:** Future iterations of the system may incorporate mathematical models or machine learning algorithms for SOC and state-of-health (SOH) estimation, such as Kalman Filters or neural network-based methods, to provide more accurate battery diagnostics [3,17,22,29].

4. GUI Improvements: Enhancing the display interface for better usability, including interactive touch features, customizable dashboards, and multi-language support, will improve user experience, especially in commercial applications [12,37].
5. Integration with IoT and Cloud Platforms: Adding wireless connectivity for remote data logging, diagnostics, and predictive maintenance via IoT or cloud platforms will enable real-time fleet management and analytics [10,13,20,32,35].

By addressing these directions, future development can extend the usability, scalability, and intelligence of the system, contributing more broadly to smart energy management in electric vehicles and related applications [1,2,4,16].

Furthermore, the practical applicability of the system was validated through its integration into an electric all-terrain vehicle (ATV), which served as a real-world test platform. This vehicle exemplifies a representative use case for low-cost electric mobility in rural and off-road settings, where continuous and accurate monitoring of battery health is critical [1,4,5]. The system's compact form factor, robust data transmission via the CANopen protocol, and reliable performance under dynamic load conditions underscore its suitability for deployment in experimental electric vehicle platforms, vocational training environments, and lightweight electric utility vehicles operating in constrained or demanding conditions [7,8,13].

5. Conclusions

This study presents the development of a BMS interface designed to provide real-time monitoring of critical battery parameters, including voltage, current, temperature, and SOC, through a touchscreen display. The system architecture integrates an ESP32 microcontroller for receiving UART signals from the JK BMS, which are subsequently converted to the CANopen protocol via a TJA1051 CAN transceiver and transmitted to the display unit [8,10,30,31].

The circuit was designed using EasyEDA and fabricated through a copper etching process. A fully functional prototype was assembled and subjected to a range of operational tests, including fast charging and high-current discharge conditions. The results demonstrated that the system maintained accurate and reliable real-time monitoring of dynamic battery behaviors, with no detectable data loss or latency. Measurements displayed on the prototype interface were found to be in strong agreement with reference values obtained from PCAN-View software and the JK BMS mobile application [5,23].

Overall, the system exhibited high levels of stability, precision, and robustness under high-load conditions. Its cost-effectiveness, modularity, and ease of integration render it a promising solution for low-cost electric vehicles, academic research, and small-scale energy storage applications that require dependable battery diagnostics and CAN-based communication [1,4,8].

Author Contributions: Conceptualization, C.Y. and U.L.; methodology, C.Y. and S.N.; software, C.Y. and N.D.; validation, C.Y., S.N. and U.L.; data curation, C.Y. and N.D.; writing—original draft preparation, C.Y.; writing—review and editing, C.Y.; visualization, C.Y. and S.N.; supervision, C.Y. and U.L.; project administration, C.Y. and S.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article; further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: We would like to thank the Suranaree University of Technology, the Faculty of Engineering, for their assistance in terms of budget and equipment for the thesis, as well as advice and close monitoring of the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Lipu, M.S.H.; Al Mamun, A.; Ansari, S.; Miah, S.; Hasan, K.; Meraj, S.T.; Abdolrasol, M.G.M.; Rahman, T.; Maruf, H.; Sarker, M.R.; et al. Battery Management, Key Technologies, Methods, Issues, and Future Trends of Electric Vehicles: A Pathway toward Achieving Sustainable Development Goals. *Batteries* **2022**, *8*, 119. [CrossRef]
- Haghani, M.; Sprei, F.; Kazemzadeh, K.; Shahhoseini, Z.; Aghaei, J. Trends in electric vehicles research. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2023**, *123*, 103881. [CrossRef]
- Ghazali, A.K.; Aziz, N.A.A.; Hassan, M.K. Advanced Algorithms in Battery Management Systems for Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Symmetry* **2025**, *17*, 321. [CrossRef]
- Uzair, M.; Abbas, G.; Hosain, S. Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process. *World Electr. Veh. J.* **2021**, *12*, 120. [CrossRef]
- Castillo-Martínez, D.H.; Rodríguez-Rodríguez, A.J.; Soto, A.; Berrueta, A.; Vargas-Requena, D.T.; Matias, I.R.; Sanchis, P.; Ursúa, A.; Rodríguez-Rodríguez, W.E. Design and On-Field Validation of an Embedded System for Monitoring Second-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. *Sensors* **2022**, *22*, 6376. [CrossRef]
- Alzahrani, A.; Wangikar, S.M.; Indragandhi, V.; Singh, R.R.; Subramaniaswamy, V. Design and Implementation of SAE J1939 and Modbus Communication Protocols for Electric Vehicle. *Machines* **2023**, *11*, 201. [CrossRef]
- Nichols, K.M.; Roembke, R.A.; Adameczyk, P.G. Real-Time Motor Control Using a Raspberry Pi, ROS, and CANopen over EtherCAT, with Application to a Semi-Active Prosthetic Ankle. *Actuators* **2025**, *14*, 84. [CrossRef]
- Bui, V.-T.; Dow, C.-R.; Huang, Y.-C.; Liu, P.; Thai, V.D. A Canopen-Based Gateway and Energy Monitoring System for Electric Bicycles. *Energies* **2020**, *13*, 3766. [CrossRef]
- Choi, M.; Lee, M.; Im, H.; Lee, J.; Lee, S. Shallow Learning-Based Intrusion Detection System for In-Vehicle Network: ASIC Implementation. *Electronics* **2025**, *14*, 683. [CrossRef]
- He, W.; Baig, M.J.A.; Iqbal, M.T. An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. *Energies* **2024**, *17*, 2295. [CrossRef]
- Salgado, M.; Garcia, P.; Integration of a CANopen Protocol Stack in an Embedded Application Employing the CANFestival Stack. ResearchGate. 2016. Available online: https://www.researchgate.net/publication/309827484_Integration_of_a_CANopen_Protocol_Stack_in_an_Embedded_Application_Employing_the_CANFestival_Stack (accessed on 20 September 2024).
- Artronshop. ATD3.5-S3 Board: ESP32-S3 with 3.5" Capacitive Touchscreen Display. Available online: <https://www.artronshop.co.th/product/567> (accessed on 20 April 2025).
- Hercog, D.; Lerher, T.; Truntič, M.; Težak, O. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors* **2023**, *23*, 6739. [CrossRef] [PubMed]
- Syssi. ESPHome Component for JK-BMS. GitHub. Available online: <https://github.com/syssi/esphome-jk-bms> (accessed on 20 September 2024).
- Rimpas, D.; Orfanos, V.A.; Chalkiadakis, P.; Christakis, I. Design and Development of a Low-Cost and Compact Real-Time Monitoring Tool for Battery Life Calculation. *Eng. Proc.* **2023**, *58*, 17. [CrossRef]
- Ehsani, M.; Gao, Y.; Emadi, A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 2nd, ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017. [CrossRef]
- Plett, G.L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation. *J. Power Sources* **2004**, *134*, 277–292. [CrossRef]
- Xie, Y.; Zeng, G.; Chen, Y.; Kurachi, R.; Takada, H.; Li, R. Worst Case Response Time Analysis for Messages in Controller Area Network with Gateway. *IEICE Trans. Inf. Syst.* **2013**, *E96.D*, 1467–1477. [CrossRef]
- Pooyandeh, M.; Sohn, I. Smart Lithium-Ion Battery Monitoring in Electric Vehicles: An AI-Empowered Digital Twin Approach. *Mathematics* **2023**, *11*, 4865. [CrossRef]
- Suresh Kumar, M.S.; Rahul, R.; Joshika, S.; Suraj, S. Internet-of-Things-Based Smart Home Energy Management System with Multi-Sensor Data Fusion. *Eng. Proc.* **2024**, *66*, 10. [CrossRef]
- Hafeez, A.; Malik, H.; Avatefipour, O.; Rongali, P.R.; Zehra, S. Comparative Study of CAN-Bus and FlexRay Protocols for In-Vehicle Communication. *SAE Tech. Pap.* **2017**, *1*, 17. [CrossRef]
- Xing, J.; Wu, P. State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Improved Adaptive Unscented Kalman Filter. *Sustainability* **2021**, *13*, 5046. [CrossRef]
- PEAK-System. PCAN-USB Product Image and Technical Specifications. Available online: <https://www.peak-system.com/PCAN-USB.199.0.html?L=1> (accessed on 20 April 2025).
- Assi, M.; Amer, M. A Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries Using a Proposed Electrothermal Model Based on Numerical Simulation. *World Electr. Veh. J.* **2025**, *16*, 60. [CrossRef]

25. Galvão, J.R.; Calligaris, L.B.; de Souza, K.M.; Gotz, J.D.; Junior, P.B.; Corrêa, F.C. Hybrid Equalization Topology for Battery Management Systems Applied to an Electric Vehicle Model. *Batteries* **2022**, *8*, 178. [CrossRef]
26. Sornek, K.; Augustyn-Nadzieja, J.; Rosikoń, I.; Lopusiewicz, R.; Łopusiewicz, M. Status and Development Prospects of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles—A Literature Review. *Energies* **2025**, *18*, 1924. [CrossRef]
27. Nazaralizadeh, S.; Banerjee, P.; Srivastava, A.K.; Famouri, P. Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics. *Energies* **2024**, *17*, 1250. [CrossRef]
28. Jimenez-Martinez, M.; Valencia-Sánchez, J.L.; Torres-Cedillo, S.G.; Cortés-Pérez, J. Battery Housing for Electric Vehicles, a Durability Assessment Review. *Designs* **2024**, *8*, 113. [CrossRef]
29. Yao, L.; Xu, S.; Tang, A.; Zhou, F.; Hou, J.; Xiao, Y.; Fu, Z. A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Methods. *World Electr. Veh. J.* **2021**, *12*, 113. [CrossRef]
30. Jikong BMS. JKBMS B2A24S20P 7S-24S Active Balance BMS—Product Specifications and Images. Available online: <https://jikongbms.com/product/jkbms-b2a24s20p-7s-24s-active-balance-bms-balance-current-2a-continuous-current-200a-lifepo4-li-ion-lto-battery/> (accessed on 20 April 2025).
31. NXP Semiconductors. TJA1051T High-Speed, Low-Power CAN Transceiver. Available online: <https://www.nxp.com/products/automotive/can-and-automation/can-transceivers/tja1051-high-speed-low-power-can-transceiver:TJA1051T> (accessed on 20 April 2025).
32. Kalamaras, S.D.; Tsitsimpikou, M.-A.; Tzenos, C.A.; Lithourgidis, A.A.; Pitsikoglou, D.S.; Kotsopoulos, T.A. A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 34. [CrossRef]
33. Artronshop. ATD3.5-S3 CAN Bus Shield: CAN Bus Expansion Module for ATD3.5-S. Available online: <https://www.artronshop.co.th/product/585> (accessed on 20 April 2025).
34. Espressif Systems. Development Boards and Kits Overview. Available online: <https://www.espressif.com/en/products/devkits> (accessed on 20 April 2025).
35. Bu, Q.; Zhang, S.; Ma, N.; Luo, Q.; Sun, B. Research on Energy Management Method of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Trams Based on Optimal Hydrogen Consumption. *Sustainability* **2023**, *15*, 11234. [CrossRef]
36. Zhu, T.; Min, H.; Yu, Y.; Zhao, Z.; Xu, T.; Chen, Y.; Li, X.; Zhang, C. An Optimized Energy Management Strategy for Preheating Vehicle-Mounted Li-ion Batteries at Subzero Temperatures. *Energies* **2017**, *10*, 243. [CrossRef]
37. Valero-Mora, P.M.; Stevens, A. Human-centred design and assessment of information technologies in traffic. *IET Intell. Transp. Syst.* **2013**, *7*, 171–173. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)

ลดการสูญเสียพลังงานให้เหลือน้อยที่สุดโดยใช้การไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด
โดยพิจารณาจากอัลกอริทึมทางพันธุกรรม

Minimize Power Loss by Using Optimal Power flow Considering by Genetic Algorithms

ชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ์¹ อุเทน ลีตัน¹ นพฤทธิ์ พรหมลิ่ง² และ คอศศักดิ์ สิงห์ศักดิ์³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 E-mail: newchm02@gmail.com, uthen.leeton@gmail.com

²สาขาวิชาช่างยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยรัตนนคร

214 หมู่ที่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000 E-mail: noppalith5333@gmail.com

³สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยรัตนนคร

214 หมู่ที่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000 E-mail: kjsrb05082514@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ นำเสนอ Genetic Algorithms ที่อธิบายการไหลของพลังงาน โดยพิจารณา Power loss เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา ปัญหาการไหลของพลังงานส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับระบบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี วัตถุประสงค์อาจแตกต่างกันไป ในบทความนี้วัตถุประสงค์คือ การลด Power loss ให้เหลือน้อยที่สุด พร้อมตัวแปรการแก้ปัญหา ได้แก่ 1) กำลังไฟฟ้าที่ได้ออกการผลิต 2) ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมโดยสถานีย่อย 3) แท็ปของหม้อแปลง และ 4) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ออกจ่ายสู่มัส Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shamo อัลกอริทึม (BFGS) เป็นที่รู้จักและยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้น วิธ BFGS Quasi-Newton จึงได้รับการทดสอบและเปรียบเทียบกับ Genetic Algorithm (GA) เพื่อการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์ของวิธ BFGS ได้รับการประเมินโดยเทียบกับ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อวัตถุประสงค์ในการทดสอบ ระบบกำลังไฟฟ้า IEEE 13 ถูกนำมาใช้ ผลลัพธ์เผยให้เห็นว่าการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุดตามอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธ BFGS ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทางพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA), การไหลของพลังงานที่เหมาะสม, อัลกอริทึม BFGS

Abstract

In this paper, we propose a Genetic Algorithm (GA) that describes appropriate power flow by considering power loss as an objective function of the problem. The optimal power flow problem is often associated with total electricity production cost system. However, in some cases, the objectives may vary. In this paper, the objective is minimize the power loss with decision variables including i) electricity caused by power plants, ii) voltage levels controlled by substations, iii) tap positions of transformers during loading, and iv) injection of reactive power from reactive power sources. The Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shamo (BFGS) Algorithm is well-known and widely accepted as an intelligent optimization method for solving such problem. Therefore, the BFGS Quasi-Newton method is tested and compared with the Genetic Algorithm (GA) for optimal power flow. The results of the BFGS method are evaluated against the Genetic Algorithm (GA), a widely used optimization technique. For testing purposes, the IEEE 13-bus power system is used. The results reveal that the optimal power flow according to the Genetic Algorithm (GA) outperforms the BFGS method, demonstrating the efficiency of the Genetic Algorithm in solving optimal power flow problems.

Keywords—Genetic Algorithm (GA), optimal power flow, BFGS algorithm

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)



1. บทนำ

การไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุดมักมีข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และบางครั้งอาจมีความท้าทายในการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบอย่างมีประสิทธิภาพ อัลกอริทึมต่างๆ นับตั้งแต่เปิดตัวครั้งแรก Carpenter ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ไขปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด [1]. การกำหนดเป้าหมายพลังงานที่เหมาะสมจะเป็นประโยชน์ต่อปัญหาการไหลของพลังงาน และเป็นเป้าหมายหลักของการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยพื้นฐานแล้วเป็นการลดต้นทุนการผลิตทั้งหมดให้เหลือน้อยที่สุด

การพัฒนาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสำหรับแก้ปัญหาด้านคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและขนาดใหญ่นั้นใช้เวลามากมายหลายทศวรรษ มีการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อค้นหาวิธีแก้ไข วิธีการถ่วงดุลในบทความนี้ได้แก่ 1) วิธีการวนซ้ำ 2) วิธีการไล่ระดับ 3) วิธีการของนิวตัน 4) การโปรแกรมเชิงเส้น และ 5) ภายใต้วิธีจุด นอกจากนี้ การพัฒนาล่าสุดในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงตัวเลข เช่น อัลกอริทึมเมทาฮิวริสติก (เช่น อัลกอริทึมพันธุกรรม การเพิ่มประสิทธิภาพฝูงอนุภาค) ได้รับความนิยมนในการแก้ปัญหาด้านการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด

โดยสรุป บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม เพื่อแก้ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ด้วยควบคุมของระบบกำลังไฟฟ้าของทุกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าควบคุม และกำลังไฟฟ้าที่รีแอกทีฟที่ได้รับจากแหล่งพลังงานรีแอกทีฟ และตำแหน่งที่ปรับของหม้อแปลงไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการสูญเสียการส่งกำลังทั้งหมด โดยการปรับควบคุมความถี่ในการจัดจำกัดที่กำหนดโดยไม่ละเมิดปริมาณอื่น (เช่น การไหลของ MVA ของสายส่ง ขนาดแรงดันบัส เอคต์พุด MVAR ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ในระหว่างการทำงานของระบบปกติ ทดสอบวิธี BFGS บนระบบ 13 บัส และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับวิธีใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) เพื่อเปรียบเทียบการจำลอง

2. การไหลของพลังงาน

2.1 ปัญหาการไหลของพลังงาน

กำหนดปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้คุณสมบัติการปรับให้เหมาะสมที่ไม่เป็นเชิงเส้น คุณลักษณะซึ่งต้องใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าว วัตถุประสงค์หลักของปัญหาคือการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ ลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้เหลือน้อยที่สุด และรับประกันการทำงานที่ปลอดภัยของระบบไฟฟ้า โดยมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{Subject to } g(x) = 0, \text{ ข้อจำกัดที่เท่ากัน} \\ & h(x) \leq 0, \text{ ข้อจำกัดที่ความไม่เท่ากัน} \end{aligned}$$

โดยเปลี่ยนข้อจำกัดที่เท่ากันและข้อจำกัดที่ความไม่เท่ากันเป็นเงื่อนไขการเพิ่มเข้ามาในรูปแบบฟังก์ชันโหนด

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \tag{1}$$

$$\Omega(x) = \rho \left(g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2 \right) \tag{2}$$

การใช้แนวคิดของการลงโทษ [2] ปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่จำกัดถูกแปลงเป็นปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่ไม่ได้รวมการลงโทษ ลดขนาดฟังก์ชันข้างต้นให้เหลือน้อยที่สุด

2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุดส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการลดต้นทุนการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าทั้งหมดให้เหลือน้อยที่สุด แต่ในบางกรณีก็สามารถเลือกวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันได้ในบทความนี้ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันการสูญเสียในสายส่งดังต่อไปนี้

$$F_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \left\{ V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right\} \tag{3}$$

2.3 ข้อจำกัดของระบบ

ความสามารถในการควบคุมของระบบนี้ประกอบด้วยค่าจำกัดการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่รวมกะวัตต์ (MW) ความกว้างของแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้พลังงานปฏิกิริยาที่ติดจากแหล่งจ่ายไปปฏิกิริยาและตำแหน่งที่ปรับของหม้อแปลง ในกรณีนี้ เป้าหมายคือการลดฟังก์ชันการสูญเสียการส่งผ่าน โดยการปรับควบคุมอย่างเหมาะสม สมชายได้เงื่อนไขที่กำหนดระหว่างการทำงานของระบบปกติ โดยไม่ละเมิดปริมาณอื่น ๆ (เช่น อัตราการไหลของ MVA ของสายส่ง ขนาดของแรงดันไฟฟ้าบัสบาร์ และพลังงานปฏิกิริยาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า MVAR) เงื่อนไขเหล่านี้เป็นสมการและอสมการดังนี้

1) ข้อจำกัดที่เป็นเชิงเส้น: สมการการไหลของกำลัง

$$P_{G,j} - P_{D,j} - \sum_{i=1}^{N_B} |V_i| |V_j| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \tag{4}$$

$$Q_{G,j} - Q_{D,j} - \sum_{i=1}^{N_B} |V_i| |V_j| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \tag{5}$$

2) ข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้น: ข้อจำกัดของตัวแปร

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \tag{6}$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \tag{7}$$

$$Q_{comp,j}^{\min} \leq Q_{comp,j} \leq Q_{comp,j}^{\max} \tag{8}$$

$$P_{G,j}^{\min} \leq P_{G,j} \leq P_{G,j}^{\max} \tag{9}$$

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)



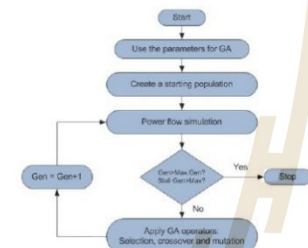
ฟังก์ชันการลงโทษสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$P(x) = F_{loss} + \Omega_p + \Omega_Q + \Omega_C + \Omega_T + \Omega_V + \Omega_G \quad (10)$$

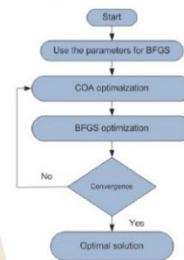
ที่สุดที่ไม่มีข้อจำกัด คล้ายกับวิธีของนิวตันและวิธีการเสมือนนิวตันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด วิธี BFGS เป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาในท้องถิ่นที่ได้รับคามนิยมมากที่สุด ขั้นตอนหลักมีดังนี้:

3. วิธีการแก้ปัญหา

3.1) อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA)



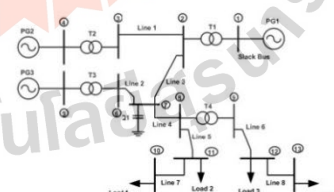
รูปที่ 1 ฟังก์ชันของ อัลกอริทึมทางพันธุกรรม



รูปที่ 2 ฟังก์ชันของ อัลกอริทึม BFGS

4. ผลการจำลอง

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธี GA ที่เสนอ ประสิทธิภาพของระบบได้รับการปรับปรุงในระบบทดสอบด้วยบัส 13 ตัว [6] ดังรูปที่ 3 ข้อมูลระบบทดสอบในตารางที่ 1 การจำลองดำเนินการโดยใช้ MATLAB [7] ซอฟต์แวร์ ประสิทธิภาพโดยการแก้ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ลดขีดจำกัดการสูญเสียพลังงานตามที่กำหนดในตารางที่ 2 โหลดระบบทดสอบคือ 240 + j120 MVA, 480 + j320 MVA, 640 + j480 MVA และ 320 + j560 MVA สำหรับบัสที่ 9, 10, 11, 12 และ 13 คนลำดับ วัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึม BFGS และอัลกอริทึมทางพันธุกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการทดสอบนี้การปรับวิธีแก้ปัญหาการไหลของพลังงานให้เหมาะสมด้วยวิธีการทดลองแบบสุ่ม มีการดำเนินการ ประเมิน และนำเสนอการทดลองจำนวน 24 รอบในตารางที่ 3 นอกจากนี้ จะพิจารณาคุณลักษณะการเข้าสู่ของค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ BFGS และอัลกอริทึมทางพันธุกรรม จำลองการไหลของพลังงานในรูปที่ 3 สำหรับ 13 บัส ผลลัพธ์บ่งชี้พฤติกรรมการเข้าสู่ของค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจากอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA)



รูปที่ 3 ระบบทดสอบกำลัง 13 บัส

มีหลายวิธีในการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่รู้จักกันดี [3] โดยคำนึงถึงว่าส่วนสำคัญของงานใช้เทคนิค GA เพื่อระบุพารามิเตอร์ของระบบในรูปแบบต่างๆ GA จึงเป็นเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดที่แนะนำประชากรไปสู่ที่ปัญหาผ่านหลักการวิวัฒนาการ โดยใช้หลักการทางพันธุกรรมและรวมชาติกระบวนการคัดเลือกที่เรียกว่าตัวดำเนินการทางพันธุกรรม เช่น คrossover, inverter, การกลายพันธุ์ และอัตราการแคงตัวของคนรุ่นใหม่อย่างคี่เนื่อง การแก้ปัญหาจะค่อยๆ ทบวิธีแก้ปัญหาที่แท้จริง เนื่องจาก GA เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาการวิจัยส่วนใหญ่ เมื่อผสมผสานกับเทคนิคการค้นหาอันชาญฉลาดที่สามารถบรรลุผลสำเร็จได้โดยสรุป ดังที่ปรากฏในฟังก์ชันในรูปที่ [4] บทความนี้ได้เลือก GA เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละวันจากหน่วยการผลิตที่มีอยู่ นี้คือการลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรมในสถานการณ์ที่ซับซ้อน อัลกอริทึมและระบบการพัฒนาทางพันธุกรรม (กล่องเครื่องมือ GADS ใน MATLAB [5]) ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างชุดของพารามิเตอร์เริ่มต้นกระบวนการค้นหาเกี่ยวกับการปรับพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

3.2) อัลกอริทึม BFGS

วิธีการ BFGS ถูกเสนอในปี 1970 โดย Broyden, Fletcher, Goldfarb และ Shanno เป็นวิธีการวนซ้ำสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะ

บทความวิจัย

การประมวลผลวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)



ตารางที่ 1 ข้อมูลสายระบบทดสอบ 13-BUS 400 MVA, 13.8 KV BASE

Line Number	Bus Number		Impedance (p.u.)		Tap ratio
	From	To	R	X	
T1	1	2	0.006	0.080	16.67
1	2	3	0.036	0.064	-
T2	3	4	0.003	0.040	16.67
T3	5	6	0.003	0.040	16.67
2	6	7	0.025	0.050	-
3	2	7	0.025	0.050	-
4	7	8	0.024	0.036	-
T4	8	9	0.005	0.050	16.67
5	8	11	0.024	0.036	-
6	9	12	0.024	0.036	-
7	11	10	0.024	0.036	-
8	12	13	0.024	0.036	-

ตารางที่ 2 ขีดจำกัดของตัวแปรที่ใช้ในการไหลของพลังงาน

Variable	Limits	
	MIN	MAX
V1-V13 (p.u.)	0	1.1
T1-T4 (p.u.)	0	16.67
Q1 (Mvar)	0	240
PG2 (MW)	280	400
PG3 (MW)	200	320

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ OPF ที่ได้รับโดยใช้ BFGS และ GA สำหรับ 13 BUS

Methodology	Power transmission losses (MW)
GA	1.86
BFGS	1.90

4. บทสรุป

การแก้ปัญหาการไหลของพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการสูญเสียการส่งผ่านพลังงานในสายส่งลมที่อธิบายไว้ในบทความนี้ มีการใช้วิธีการหาที่มีประสิทธิภาพ เช่น วิธีที่คล้ายกับวิธีของนิวตัน BFGS และอัลกอริทึมทางพันธุกรรม ได้มีการ

จำลองระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย 13 บัส เพื่อเป็นการทดสอบสำหรับการเปรียบเทียบและประเมินผล

ผลการทดสอบสรุปได้ว่าวิธีแก้ปัญหาลดการสูญเสียของพลังงานในสายส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือวิธีการที่ใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการค้นหาตำแหน่งศูนย์กลางในการค้นหา มีการใช้วิธีการต่างๆ เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหามีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อแก้ไขปัญหาการไหลของพลังงาน

ร. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้จัดเตรียมสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ที่เอื้ออำนวยและทรัพยากรที่จำเป็นสำหรับการเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.R. AlRasheed and M.E. El-Hawary, "Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects", IEEE Transactions on Power Systems, Issue 4, Vol. 22, pp.2030 – 2038, 2007
- [2] P. Dutta and A. K. Sinha, "Voltage Stability Constrained Multi-objective Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization", 1st International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 161 – 166, 8-11 August 2006
- [3] Z. Habbo, Z. Lizi and M. Fanling, "Reactive power optimization based on genetic algorithm", International Power Conference on Power System Technology, pp.1448 – 1453, 18-21 August 1998.
- [4] K. Somsai, A. Oonsivilai, A. Srikaw, and T. Kulworawanchong, "Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLAB's SIMULINK", The 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS, Beijing, China, pp. 30 – 35, September 2007
- [5] The MathWorks Inc., Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual, 2004.
- [6] S. S. salament, H. T. James and F. H. Eugene, "Online optimal reactive Power Flow by Energy Loss Minimization", The 35th IEEE Decision and Control, 1996, pp. 3851 – 3856, 11-13 December 1996
- [7] The MathWorks Inc., Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual, 2004.



นายชานนท์ ฐานปรีชาเศรษฐ
 วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 E-mail: newchn02@gmail.com

ประวัติผู้เขียน

นายชานนท์ ญาณปรีชาเศรษฐ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเกตุพิชัยวิทยา ระดับชั้นมัธยมศึกษา 1-6 ที่โรงเรียนวินิตศึกษา ฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2566 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ณ สถาบันเดิม โดยได้รับทุนเรียนดีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขา วิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 4 รายวิชา ดังนี้ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบฝังตัว (Electrical Machines, Power Electronics and Embedded Systems Laboratory) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Eelectrical Machines Laboratory) ปฏิบัติการวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน (Electric Circuit and Basic Electronics) และปฏิบัติการการเสริมสร้างความสามารถสำหรับวิศวกรไฟฟ้า 3 (Competency Strengthening for Electrical Engineers III)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี