

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานของโลก (Global Energy Transition) ได้ส่งผลให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy Storage Systems) มีบทบาทสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในระบบพลังงานหมุนเวียน ระบบสำรองพลังงาน และระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery) ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ประสิทธิภาพเชิงพลังงานดี และสามารถรองรับการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Nickel Manganese Cobalt: NMC) ซึ่งมีความสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงาน ความสามารถในการจ่ายกำลัง และเสถียรภาพทางความร้อน ส่งผลให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบกักเก็บพลังงานสมัยใหม่ อย่างไรก็ตาม แม้แบตเตอรี่ชนิด NMC จะมีสมรรถนะที่โดดเด่น แต่ประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยของแบตเตอรี่ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการชาร์จเป็นสำคัญ โดยเฉพาะการกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จให้เหมาะสมกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละระบบ เช่น ระดับแรงดัน กระแส ความจุ และค่าความต้านทานภายใน ซึ่งหากกำหนดค่าที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสะสม ประสิทธิภาพการชาร์จลดลง และเร่งการเสื่อมสภาพของเซลล์แบตเตอรี่ในระยะยาว

จากการศึกษาทางด้านไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ พบว่ากระบวนการชาร์จมีผลโดยตรงต่อ Charge transfer kinetics, Polarization behavior, Thermal distribution และ Electrochemical degradation ภายในเซลล์แบตเตอรี่ โดยเฉพาะการชาร์จแบบกระแสคงที่-แรงดันคงที่ (Constant Current-Constant Voltage: CC-CV) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเรียบง่ายและมีเสถียรภาพในการควบคุม อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ที่มีระดับแรงดันและพิกัดกระแสแตกต่างกัน เช่น 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ย่อมมีคุณลักษณะการตอบสนองทางไฟฟ้าและข้อจำกัดในการชาร์จที่แตกต่างกัน ดังนั้น การใช้พารามิเตอร์การชาร์จแบบเดียวกันกับแบตเตอรี่ทุกระบบอาจไม่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้ และยังเพิ่มความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนจากการตั้งค่าของผู้ปฏิบัติงาน การเลือกโปรไฟล์การชาร์จที่สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้อง โดยปราศจากการตั้งค่าจากมนุษย์ จึงเป็น

แนวทางสำคัญในการลดความผิดพลาด เพิ่มความถูกต้อง และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จแบตเตอรี่

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรโตคอล CANopen เพื่อกำหนดและระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ผ่าน CAN Identifier (CAN ID) ซึ่งทำหน้าที่เป็นข้อมูลอัตลักษณ์เฉพาะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ สำหรับแบตเตอรี่ทั้ง 4 ระดับ แรงดันและกระแสเมื่อระบบตรวจจับ CAN ID ของแบตเตอรี่ได้ ข้อมูลจะถูกส่งไปยังแพลตฟอร์ม Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลและเลือกชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้าสำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ จากนั้น Node-RED จะส่งคำสั่งผ่าน Modbus RTU ไปยังอุปกรณ์ควบคุมการชาร์จ เพื่อเรียกใช้ค่าความต้านทานและพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ที่ได้ผ่านการกำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้าตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบ พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลอินพุตจากระบบเพื่อใช้ในการควบคุมและติดตามสถานะของกระบวนการชาร์จตลอดช่วงการทำงาน

นอกจากนี้ ข้อมูลจากกระบวนการชาร์จ เช่น ค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า พลังงานสะสม และสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ จะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลแบบ Time-Series ผ่าน InfluxDB และแสดงผลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana เพื่อใช้ในการติดตาม วิเคราะห์ และประเมินสมรรถนะของระบบอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่างานส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการออกแบบวงจรชาร์จหรือการประเมินสถานะของแบตเตอรี่ในระดับเซลล์เป็นหลัก ขณะที่การบูรณาการระบบระบุชนิดของแบตเตอรี่ผ่าน CANopen การส่งข้อมูลผ่าน MQTT การประมวลผลผ่าน Node-RED และการควบคุมพารามิเตอร์การชาร์จผ่าน Modbus RTU เพื่อรองรับแบตเตอรี่หลายพิกัดภายใต้แพลตฟอร์มเดียวกัน ยังมีการศึกษาอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแพลตฟอร์มอัจฉริยะสำหรับการระบุชนิดของแบตเตอรี่และเลือกโปรไฟล์การชาร์จได้อย่างถูกต้องโดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน เพื่อช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ เพิ่มความถูกต้องของการเลือกพารามิเตอร์การชาร์จ และเพิ่มประสิทธิภาพ ความยืดหยุ่น และความน่าเชื่อถือของระบบชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ในงานประยุกต์ด้านพลังงานยุคยานยนต์สมัยใหม่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC โดยบูรณาการระบบสื่อสารและการควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) เพื่อให้สามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบกระแสคงที่-แรงดันคงที่ (CC-CV) ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) ทั้งนี้ งานวิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ย่อยดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC โดยใช้โปรโตคอล CANopen ในการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่และกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบ

1.2.2 เพื่อพัฒนากลไกการควบคุมในระดับปฏิบัติการ โดยประยุกต์ใช้ Node-RED, MQTT และ Modbus RTU สำหรับการเลือกและควบคุมพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง

1.2.3 เพื่อทดสอบ ประเมินประสิทธิภาพ และติดตามผลการทำงานของระบบชาร์จแบบ CC-CV แบบเวลาจริง โดยพิจารณาด้านความถูกต้อง ความเสถียร และความน่าเชื่อถือของระบบ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

งานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่า การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยบูรณาการการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ผ่านโปรโตคอล CANopen ร่วมกับกลไกการประมวลผลและควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) ภายใต้ระบบสื่อสารแบบเชิงกำหนด (Deterministic Communication) สามารถเลือกพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้องโดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ เพิ่มความแม่นยำในการควบคุมค่ากระแสและแรงดัน เพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการชาร์จ และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบ โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดลองจริงและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณของค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า พลังงานที่ถ่ายโอน และสมรรถนะของกระบวนการชาร์จแบบเวลาจริงภายใต้ NMC หลายพิกัดการทำงาน

1.4 ข้อจำกัดเบื้องต้น

1.4.1 ระบบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้สถาปัตยกรรมระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC โดยใช้เครื่องชาร์จแบบโปรแกรมได้ ซึ่งมีช่วงการทำงานของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0–120 V และรองรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด 0–30 A ภายใต้กลยุทธ์การชาร์จแบบ CC-CV ตามขอบเขตการทำงานที่กำหนดไว้ในการศึกษา

1.4.2 การระบุและเลือกโปรไฟล์การชาร์จดำเนินการผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับโปรโตคอล CANopen โดยใช้ CAN Identifier เป็นกลไกหลักในการกำหนดพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมกระบวนการสื่อสารแบบ negotiation หรือการแลกเปลี่ยนข้อมูลเชิงโต้ตอบระหว่างระบบกับแบตเตอรี่หรือระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ระหว่างการทำงาน

1.4.3 การควบคุมค่ากระแสและแรงดันของแต่ละโปรไฟล์ดำเนินการในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) โดยอาศัยกลไกการควบคุมแบบฮาร์ดแวร์ผ่านระบบ CC-CV และการสื่อสารผ่าน Modbus RTU ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมถูกกำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้า (Predefined and Calibrated Parameters) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำงานของระบบ

1.4.4 การทดสอบระบบดำเนินการกับชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ขนาด 3.7 V 25 Ah ภายใต้หลายระดับแรงดันและกระแสตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อจำลองสถานะการใช้งานจริงของระบบชาร์จ โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาว (Long-term Degradation)

1.4.5 การวิเคราะห์ผลมุ่งเน้นการประเมินความถูกต้องของการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ความเสถียรของพฤติกรรม CC-CV ความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสาร และความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอนระหว่างด้านอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงการติดตามผลการทำงานแบบเวลาจริง โดยไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรกำลังของเครื่องชาร์จหรือโครงสร้างภายในของระบบ BMS

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยมุ่งเน้นการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ผ่านโปรโตคอล CANopen และใช้ CAN Identifier (CAN ID) เป็นกลไกหลักในการจำแนกแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อเชื่อมโยงกับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบ CC-CV ในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) สำหรับแบตเตอรี่ 4 ระดับการทำงาน ได้แก่ 24V 5A, 48V 5A, 60V 5A และ 72V 15A ทั้งนี้ ขอบเขตของงานวิจัยไม่ครอบคลุมการออกแบบวงจรกำลังของเครื่องชาร์จ หรือการพัฒนาอัลกอริทึมการชาร์จรูปแบบใหม่นอกจาก CC-CV

1.5.2 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการพัฒนากลไกการประมวลผลและควบคุมในระดับปฏิบัติการ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับการสื่อสารผ่าน CANopen, MQTT, Node-RED และ Modbus RTU เพื่อเลือกและเรียกใช้ชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดและสอบเทียบไว้ล่วงหน้าสำหรับแบตเตอรี่แต่ละระบบ โดยค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จถูกกำหนดแบบคงที่ตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าแบบไดนามิกระหว่างการทำงาน ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ครอบคลุมการเจรจาข้อมูล (Negotiation) ระหว่างแบตเตอรี่กับ BMS หรือการพัฒนาโครงสร้างภายในของระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่

1.5.3 งานวิจัยนี้ครอบคลุมการติดตาม ตรวจสอบ และประเมินสมรรถนะของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV โดยทำการจัดเก็บข้อมูลด้านอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Input) ผ่าน Google Sheets เพื่อใช้ในการบันทึกพลังงานไฟฟ้าและคำนวณต้นทุนการชาร์จในแต่ละครั้ง และจัดเก็บข้อมูล

ด้านเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง (DC Output) ผ่าน InfluxDB พร้อมแสดงผลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana เพื่อประเมินความถูกต้อง ความเสถียร และความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอนในแต่ละระบบ ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ครอบคลุมการทดสอบอายุการใช้งานระยะยาว การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพเชิงไฟฟ้าเคมีของเซลล์แบตเตอรี่ หรือการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูงของพฤติกรรมการณ์การเสื่อมสภาพ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้สถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC ที่สามารถบูรณาการการสื่อสารผ่าน CANopen เข้ากับการควบคุมในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่ที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือสูง

1.6.2 ได้กลไกการควบคุมและเลือกพารามิเตอร์การชาร์จแบบ CC-CV ผ่านแพลตฟอร์มการประมวลผลและการสื่อสารที่สามารถกำหนดค่าการทำงานได้อย่างเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) ลดความคลาดเคลื่อนจากการตั้งค่าของผู้ปฏิบัติงานและลดความผิดพลาดในการเลือกพารามิเตอร์การชาร์จ

1.6.3 ได้ระบบต้นแบบสำหรับการระบุชนิดของแบตเตอรี่ NMC หลายระดับแรงดันและกระแสผ่าน CAN Identifier (CAN ID) ซึ่งสามารถเลือกโปรไฟล์การชาร์จให้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละระบบได้อย่างถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

1.6.4 ได้ข้อมูลเชิงทดลองจากการติดตามและประเมินพฤติกรรมการณ์การชาร์จแบบ CC-CV แบบเวลาจริง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ความถูกต้อง ความเสถียร ความสอดคล้องของพลังงานที่ถ่ายโอน และสมรรถนะโดยรวมของระบบชาร์จในแต่ละระดับการทำงาน

1.6.5 ได้องค์ความรู้และแนวทางในการพัฒนาระบบชาร์จแบตเตอรี่ NMC ที่บูรณาการการสื่อสาร การควบคุม และการติดตามผลข้อมูลแบบเวลาจริง ซึ่งสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานและระบบพลังงานอัจฉริยะในอนาคต

1.7 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดเด่นที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.7.1 เสนอแนวทางการระบุพารามิเตอร์ประจำแบตเตอรี่ NMC ผ่านโปรโตคอล CANopen โดยใช้ CAN Identifier (CAN ID) เป็นกลไกหลักในการจำแนกแบตเตอรี่แต่ละระบบ เพื่อเชื่อมโยงกับการเลือกโปรไฟล์การชาร์จแบบ CC-CV ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่หลายพิกัดภายใต้แพลตฟอร์มเดียวกัน

1.7.2 พัฒนากลไกการเลือกโปรไฟล์การชาร์จในระดับปฏิบัติการ (Execution Layer) โดยบูรณาการ ESP32 ร่วมกับการสื่อสารผ่าน MQTT, Node-RED และ Modbus RTU เพื่อให้สามารถเลือกและเรียกใช้ชุดพารามิเตอร์การชาร์จที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และเป็นเชิงกำหนด (Deterministic) โดยปราศจากการตั้งค่าจากผู้ปฏิบัติงาน

1.7.3 ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบควบคุมแบบแยกชั้นระหว่าง supervisory layer และ execution layer อย่างชัดเจน โดยใช้แพลตฟอร์ม Node-RED ในการประมวลผลและบริหารจัดการข้อมูล และใช้ฮาร์ดแวร์ควบคุมในระดับปฏิบัติการสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการชาร์จแบบ CC-CV

1.7.4 พัฒนากลไกการควบคุมแบบ safety-by-design โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การชาร์จผ่านฮาร์ดแวร์ที่ผ่านการสอบเทียบไว้ล่วงหน้า ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดระหว่างการทำงาน ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากมนุษย์ และเพิ่มความปลอดภัยในการควบคุมกระบวนการชาร์จ

1.7.5 บูรณาการระบบติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการชาร์จแบบเวลาจริง โดยจัดเก็บข้อมูลด้านพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน Google Sheets สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและต้นทุนการชาร์จ และจัดเก็บข้อมูลด้านพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน InfluxDB พร้อมแสดงผลผ่าน Grafana ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบได้อย่างต่อเนื่องและครบวงจร

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อจำกัดเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และโครงสร้างของรายงานวิจัย เพื่อกำหนดกรอบแนวคิดและทิศทางของการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC กระบวนการชาร์จแบบ CC-CV ระบบสื่อสาร CANopen, MQTT และ Modbus RTU รวมถึงเทคโนโลยีการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลแบบเวลาจริง เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาสถาปัตยกรรมระบบเลือกโปรไฟล์การชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ NMC ครอบคลุมการระบุพารามิเตอร์ผ่าน CANopen การประมวลผลข้อมูลผ่าน MQTT และ Node-RED การควบคุมผ่าน Modbus RTU และการออกแบบระบบจัดเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบระบบ

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล นำเสนอผลการทดลองของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยครอบคลุมผลการเลือกโปรไฟล์การชาร์จ ความถูกต้องของการควบคุมแบบ CC-CV ความเสถียรของระบบสื่อสาร และการติดตามข้อมูลแบบเวลาจริงผ่าน Grafana Dashboard เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด อภิปรายผล พร้อมนำเสนอข้อจำกัดของงานวิจัยและแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

ภาคผนวก ประกอบด้วยวารสารวิชาการที่ได้ตีพิมพ์และตัวอย่างโค้ดที่ใช้สำหรับโปรโตคอลการสื่อสาร CANopen