

การออกแบบระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า จักรยานยนต์ไฟฟ้า

Design of a Digital Twin System Based on the Internet of Things for Prototype Electric Motorcycle Supply Equipment

ศุภรัตน์ แยมครวญ¹ ศิริชัย เดิมโชคเกษม² ศักดิ์กมล สีสัจจินดาไกรฤกษ์³

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ suparat.y@bu.ac.th¹ sirichai.t@bu.ac.th²

บริษัท อีโวลท์ เทคโนโลยี จำกัด sakhamon@evolt.co.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบดิจิทัลทวิน (Digital Twin) บนพื้นฐาน IoT สำหรับต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยสามารถติดตามสถานะและควบคุมการอัดประจุไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันบนมือถือ ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ Edge ที่ใช้บอร์ดพัฒนา ESP32 เชื่อมต่อกับมิเตอร์วัดพลังงานและสวิตช์ควบคุมไฟฟ้า ผ่านเครือข่าย Wi-Fi พร้อมส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล MQTT และ REST API ที่ทำงานร่วมกับฐานข้อมูลเรียลไทม์ (Realtime-Database) ตามแนวคิด DESIRED/REPORTED เพื่อให้สถานะจริงของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าและคู่เสมือนสอดคล้องกัน ผู้ใช้สามารถตั้งค่าผ่านแอปพลิเคชัน (DESIRED) และอุปกรณ์จะตอบกลับสถานะจริง (REPORTED) สู่คลาวด์ด้วยเมตาดาต้า (Meta Data) ในรูปแบบของ JSON ระบบมีต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับโครงสร้างพื้นฐานของสถานีชาร์จในอนาคต ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถทำงานได้จริงและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดิจิทัลทวิน เครื่องชาร์จจักรยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

This article presents an IoT-based Digital Twin system for electric motorcycle chargers as Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) prototype, enabling real-time monitoring and control of the charging process on web application. The system comprises edge devices utilizing an ESP32 development board connected to power meter and relay switch, which operating over a Wi-Fi network. Data communication is handled using MQTT broker and REST API protocols which it working with real-time database, following the DESIRED/REPORTED concept to synchronize the states between the physical charger and its digital counterpart. When the users operate the web application, it take a part of DESIRED data, while the device reports actual status as REPORTED data back to the cloud with

meta data which use JSON format. The system is low-cost and well-suited for future infrastructure of electric motorcycle charging stations. Experimental results proven that the system operates effectively and reliably.

Keywords: Digital Twin, Electric Motorcycle Chargers

1. บทนำ

การเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ถือเป็นก้าวสำคัญในการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก พร้อมด้วยการขับเคลื่อนด้วยแรงผลักดันจากนโยบายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และประหยัดพลังงานกว่ารถยนต์เครื่องยนต์สันดาป [1] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การเติบโตของ EV มักเน้นไปที่รถยนต์ไฟฟ้าเป็นหลัก โดยมีการพัฒนาเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันได้เข้าสู่ช่วงของการเติบโตอย่างรวดเร็วของ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Motorcycle) ซึ่งมีบทบาทสำคัญโดยเฉพาะในกลุ่มผู้ใช้ในชีวิตประจำวัน [2] เช่น พนักงานส่งสินค้า และประชาชนทั่วไปในเขตเมือง การขยายตัวของตลาดนี้ได้รับแรงหนุนจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความประหยัดในการใช้งาน และแนวโน้มของธุรกิจบริการที่ต้องการลดต้นทุนเชื้อเพลิงและบำรุงรักษา

แนวโน้มระดับโลกนี้สะท้อนชัดเจนในประเทศไทย โดยเฉพาะตลาดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราการเติบโตสูงถึง 162.5% ในปี 2022 โดยยอดจดทะเบียนเพิ่มจาก 3,778 คัน (ปี 2021) เป็น 9,916 คัน [3] แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้บริโภคและการเริ่มเข้าสู่ยุคใหม่ของการคมนาคมขนส่งที่ยั่งยืนมากยิ่งขึ้น เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการชาร์จ EV จึงมีความจำเป็น แอปพลิเคชันส่วนใหญ่ซึ่งมักทำงานร่วมกับแพลตฟอร์ม Internet of Things (IoT) [4] [5] ช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะการชาร์จ ตั้งค่าพลังงานที่ต้องการ และรับการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ผ่านมือถือหรือเว็บอินเตอร์เฟซ (Web Interface) ทั้งยังแสดงข้อมูลการใช้พลังงานและยอดคงเหลือได้อย่างชัดเจนบนแดชบอร์ด (Dashboard) ซึ่งช่วยยกระดับ

ประสบการณ์ของผู้ใช้งาน และเป็นองค์ประกอบสำคัญในการส่งเสริมการ
ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในวงกว้าง ในขณะที่แนวโน้มของเทคโนโลยีดิจิทัลทวิน
(Digital Twin) กำลังมีบทบาทเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [6] การย้ายการ
ทำงานของอุปกรณ์ทางกายภาพสู่แพลตฟอร์มคลาวด์ (Cloud Platform)
เป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยรองรับความสามารถในการขยายตัวของระบบใน
อนาคตอย่างรวดเร็วและยืดหยุ่น ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยี Internet of
Things (IoT) มาใช้ในการจัดการระบบอัดประจุรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า แต่
อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้ยังสามารถพัฒนาไปสู่การเป็นดิจิทัลทวินอย่าง
เต็มรูปแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการบริหารจัดการ

หลายงานวิจัยได้เสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT โดยเชื่อมต่อ
ผ่านโปรโตคอล MQTT หรือ REST API เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการ
ควบคุมการทำงานหรืออ่านค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการอัดประจุของ
ยานพาหนะไฟฟ้า [7] ได้นำเสนอระบบ IoT สำหรับสถานีอัดประจุ
รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดซึ่งใช้พลังงานหมุนเวียนร่วมกับแหล่งจ่ายอื่น
โดยมุ่งเน้นการติดตามสถานะแรงดัน กระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการ
ชาร์จผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ขณะที่ [8] ได้นำเสนอต้นแบบการจัด
การพลังงานและการติดตามสถานะการทำงานของสถานีอัดประจุผ่านแอป
พลิเคชัน อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้ยังคงจำกัดอยู่ในระดับการดำเนินงาน
ของสถานีเดียว และไม่รองรับการแจ้งเตือนหรือการเปรียบเทียบข้อมูลในเชิง
ประวัติ รวมถึงการขยายศักยภาพไปสู่โครงสร้างพื้นฐานของสถานีอัดประจุ
สาธารณะในยุคใหม่ที่ต้องการปรับตัวแบบเรียลไทม์

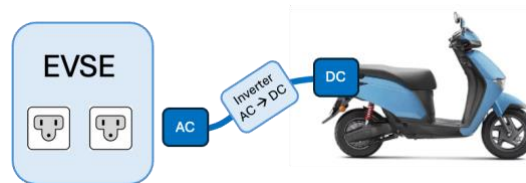
บทความนี้จึงได้นำเสนอระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐานของ IoT สำหรับ
ต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุ
รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยออกแบบให้สามารถติดตามสถานะและควบคุม
การทำงานแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพา ระบบ
ดังกล่าวผสมผสานการทำงานของอุปกรณ์ IoT เข้ากับฐานข้อมูลเรียลไทม์ ซึ่งใช้
การสื่อสารผ่าน REST API เพื่อสร้างแบบจำลองดิจิทัล (Digital Twin) ที่
เหมาะสมสำหรับโครงสร้างพื้นฐานของสถานีชาร์จยุคใหม่ ทั้งนี้เพื่อรองรับ
การเติบโตของยานยนต์ไฟฟ้าและระบบชาร์จที่มีประสิทธิภาพในอนาคต

2. แนวคิดทฤษฎีเกี่ยวข้อง

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงทฤษฎี แนวคิดพื้นฐาน และนิยามที่เกี่ยวข้อง
ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐานของ
IoT สำหรับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

2.1 ระบบอัดประจุรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

โดยทั่วไประบบอัดประจุรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับจะ
ประกอบด้วยระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric
Vehicle Supply Equipment: EVSE) ซึ่งมีหน้าที่หลักในการ ควบคุมการ
จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ไปยังรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยกระบวนการ
แปลงกระแสไฟฟ้าจาก AC เป็น DC จะเกิดขึ้นโดยอินเวอร์เตอร์ (AC-DC
Converter) หรือระบบชาร์จออนบอร์ด (On-board Charger)



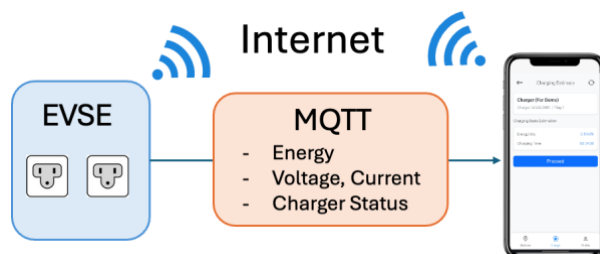
รูปที่ 1 ระบบอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบช้า ระดับที่ 1

บทความนี้ได้เลือกใช้งานระบบอัดประจุแบบใช้สาย ด้วยรูปแบบการ
อัดประจุแบบช้า (AC Slow Charging) ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่ 1 (Level 1
Charging) [9] ที่สามารถเชื่อมต่อกับเต้ารับไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไปได้
EVSE จะทำหน้าที่ ควบคุมและตัดต่อการจ่ายไฟฟ้า AC อย่างปลอดภัย
ตามค่าพลังงานที่กำหนดไว้ รวมถึงสามารถทำงานร่วมกับระบบสื่อสารเพื่อ
ตรวจสอบสถานะของการอัดประจุและควบคุมจากระยะไกลได้

2.2 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง หรือ IoT เป็นการนำอุปกรณ์และ
เซนเซอร์ต่าง ๆ เข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถควบคุม
ตรวจสอบ และแลกเปลี่ยนข้อมูลได้จากระยะไกลได้ โดย IoT จะทำงาน
ร่วมกับอุปกรณ์ Edge ที่มีความสามารถเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งเป็น
อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับชุดควบคุมและเซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่ออ่านข้อมูล เช่น
กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า หรือสถานะการทำงานของ
อุปกรณ์ จากนั้นส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังระบบประมวลผล
หรือผู้ใช้งาน โปรโตคอลที่นิยมใช้ในระบบ IoT คือ MQTT (Message
Queuing Telemetry Transport) ซึ่งเป็นโปรโตคอลการสื่อสารที่มี
น้ำหนักเบา เหมาะสำหรับอุปกรณ์ฝังตัวหรือระบบที่มีทรัพยากรจำกัด
MQTT ช่วยให้การส่งข้อมูลเป็นไปอย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และ
รองรับการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์

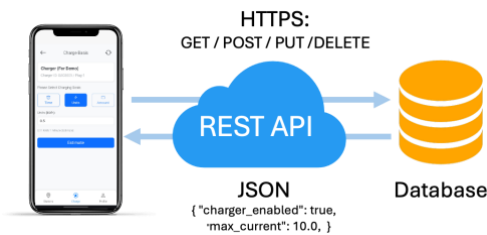
ตัวอย่างการใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับระบบ EVSE [10] เพื่ออ่าน
ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและสถานะการอัดประจุของรถจักรยานยนต์
ไฟฟ้า ผ่านการส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล MQTT ไปยังเว็บแอปพลิเคชัน ทำ
ให้ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะการอัดประจุแบบเรียลไทม์ รวมถึง
สามารถสั่งเปิด-ปิดการจ่ายไฟจากระยะไกลได้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เทคโนโลยี IoT ร่วมกับระบบ EVSE ผ่านการส่งข้อมูลด้วย
โปรโตคอล MQTT

2.3 ฐานข้อมูลเรียลไทม์

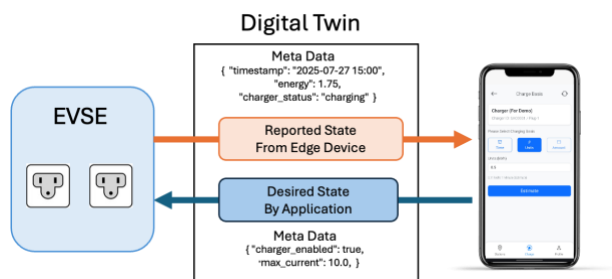
ฐานข้อมูลเรียลไทม์ (Realtime Database) เป็นฐานข้อมูลที่ทำงานบนระบบคลาวด์ โดยรองรับการสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านโปรโตคอล HTTPS ซึ่งสามารถใช้คำสั่ง POST, PUT, GET และ DELETE เพื่อจัดการข้อมูล การเข้าถึงข้อมูลในระบบจะอ้างอิงผ่าน URL ของปลายทางที่กำหนดไว้ ส่วนรูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารจะนิยมใช้ JSON (JavaScript Object Notation) ซึ่งเป็นโครงสร้างข้อมูลที่อ่านง่ายและเหมาะสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างเว็บแอปพลิเคชันและเซิร์ฟเวอร์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านโปรโตคอล HTTPS ของฐานข้อมูลเรียลไทม์

2.4 ดิจิทัลทวิน

ดิจิทัลทวิน (Digital Twin) คือการสร้างแบบจำลองดิจิทัลที่สะท้อนพฤติกรรมและสถานะของอุปกรณ์จริงในโลกเสมือน เพื่อช่วยในการเฝ้าติดตาม วิเคราะห์ และควบคุมระบบได้อย่างแบบเรียลไทม์ ตามแนวคิด DESIRED/REPORTED [11] [12] เพื่อให้สถานะจริงของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าและคู่เสมือนสอดคล้องกัน โดยการตั้งค่า (DESIRED) และการตอบกลับสถานะจริง (REPORTED) สู่คลาวด์ ใช้การจัดเก็บและแลกเปลี่ยนข้อมูลโดย ข้อมูลเมตา (Metadata) เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการระบุข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อมูลหลัก เช่น เวลาเก็บข้อมูล สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ หน่วยของข้อมูล สถานะอุปกรณ์ หรือประเภทข้อมูลต่างๆ ไปยังฐานข้อมูลเรียลไทม์ผ่านทาง REST API ทำให้อุปกรณ์ Edge ในระบบ IoT การสื่อสารแบบ DESIRED/REPORTED ทำให้เกิดคู่เสมือนของอุปกรณ์จริง ดังรูปที่ 4

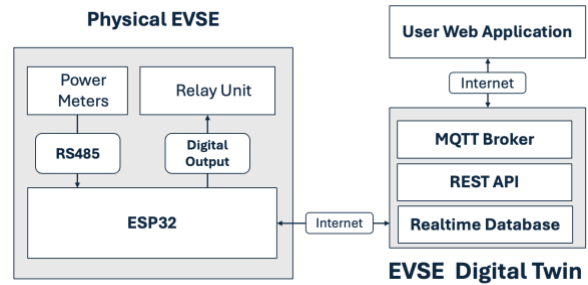


รูปที่ 4 การสร้างแบบจำลองดิจิทัลทวิน

3 ระบบที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐาน IoT สำหรับต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งระบบประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์

ไฟฟ้า ระบบดิจิทัลทวินของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และเว็บแอปพลิเคชันสำหรับติดตามและควบคุมการทำงานของระบบ ทั้งสามส่วนทำงานร่วมกันโดยเชื่อมต่อข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ดังรูปที่ 5

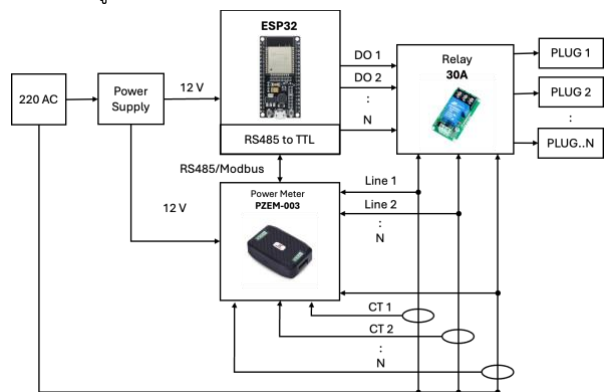


รูปที่ 5 ระบบที่นำเสนอ

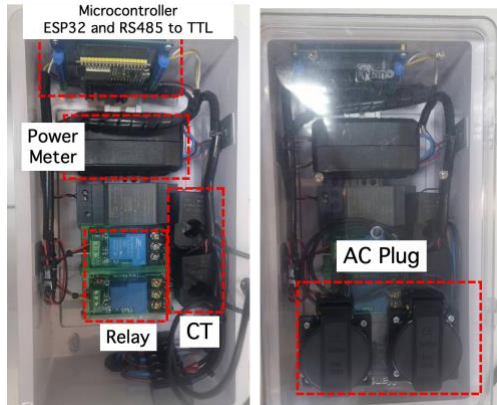
3.1 ต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ระบบที่นำเสนอ ส่วนของต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วย บอร์ดพัฒนา ESP32 แบบ 38 พิน ซึ่งทำหน้าที่หลักในการอ่านค่าพลังงานและควบคุมการจ่ายไฟ โดยใช้ การสื่อสารแบบอนุกรม TTL เชื่อมต่อกับ โมดูลแปลงสัญญาณ RS-485 เพื่อสื่อสารกับ มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า รุ่น PZEM-003 ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU สำหรับการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (A) และพลังงานไฟฟ้า (kWh) การวัดพลังงานจะอาศัยการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer) ติดตั้งเข้ากับสาย Line (L) ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ก่อนต่อร่วมกับเต้ารับปลั๊กไฟ ที่เชื่อมต่อกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

หลังจากได้ค่าพลังงานไฟฟ้าแล้ว ESP32 จะส่งข้อมูลไปยังระบบดิจิทัลทวินบน ผ่านการเชื่อมต่อ Wi-Fi เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้งานจริงกับค่าที่ผู้ใช้งานตั้งไว้ เมื่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานถึงหรือเกินค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะส่งสัญญาณจากขาดิจิทัลเอาต์พุต (Digital Output) ของ บอร์ดพัฒนา ESP32 ไปควบคุมรีเลย์ (Relay) เพื่อตัดการจ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์อัดประจุ โดยกระบวนการควบคุมนี้สามารถตั้งค่าผ่าน เว็บแอปพลิเคชันที่ผู้ใช้งานก่อนหน้านี้ ภาพรวมของระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงใน รูปที่ 6



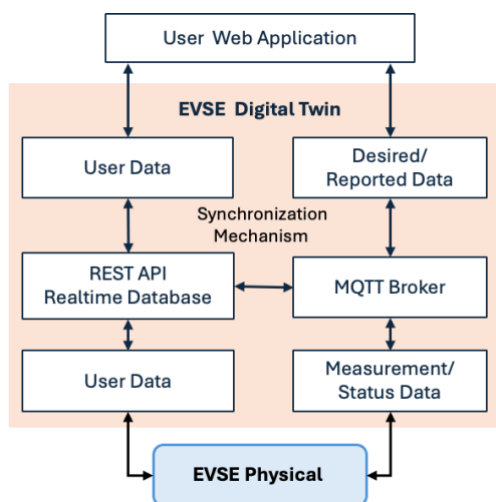
รูปที่ 6 ภาพรวมของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 7 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

3.2 ดิจิทัลทวินของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

ส่วนของระบบดิจิทัลทวินของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า ได้รับการออกแบบบนพื้นฐานแนวคิดของ IoT โดยใช้โปรโตคอลการสื่อสาร MQTT ผ่าน MQTT Broker ซึ่งในบทความนี้ได้เลือกใช้ broker.emqx.io เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจวัดค่าพลังงาน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (Voltage: V), กระแสไฟฟ้า (Current: A) และ พลังงานไฟฟ้า (Energy: kWh) รวมถึงการควบคุมการตัดจ่ายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์อัดประจุ โดยการสื่อสารข้อมูลในรูปแบบของสถานะ DESIRED และ REPORTED ตามแนวคิดของดิจิทัลทวินบน ซึ่งบอร์ดพัฒนา ESP32 จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยง และซิงค์ข้อมูล (Synchronization Mechanism) [13] [14] ระหว่าง MQTT Broker และ ฐานข้อมูลเรียลไทม์ผ่านโปรโตคอล HTTPS ด้วยวิธีการเรียกใช้ REST API ซึ่งบทความนี้ใช้ฐานข้อมูล Firebase กระบวนการดังกล่าวทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเสมือนของอุปกรณ์ (Virtual Model) บนระบบคลาวด์ ที่มีสถานะสอดคล้องกับอุปกรณ์จริงได้แบบเรียลไทม์ ระบบภาพรวมแสดงดังรูปที่ 8



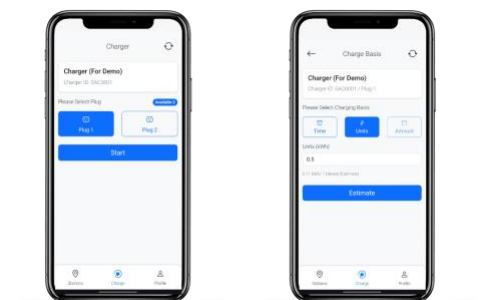
รูปที่ 8 ดิจิทัลทวินของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของระบบดิจิทัลทวินและการดำเนินการ

องค์ประกอบ	การดำเนินการ	แนวคิด
ระบบจริง	บอร์ดพัฒนา ESP32 ชุดควบคุมรีเลย์, มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบ RS-485	อุปกรณ์ทางกายภาพ (Physical Asset)
ดิจิทัลทวิน	กำหนดการ DESIRED, REPORTED	แบบจำลองเสมือนในระบบคลาวด์ (Virtual Model)
การสื่อสาร	MQTT และ HTTP + REST API	กลไกการซิงค์ข้อมูล (Synchronization Mechanism)
คำสั่งผู้ใช้	JSON หัวข้อ DESIRED จากผู้ใช้งาน ดังตัวอย่าง {"ss": 240729133218390, "s": 1, "uid": "095962XXXX", "pl": 0, "dP": 0.5, "dT": 4.5}	การตั้งค่าสถานะที่ต้องการ
รายงานสถานะ	ESP32 ส่ง JSON ไปยังหัวข้อ REPORTED และ REST API และ MQTT ดังตัวอย่าง {"s": 2, "pl": 0, "dP": 0.5, "dT": 4.5, "V": 229.1, "A": 3.21, "cP": 0.12, "cPW": 0.66}	การรายงานสถานะจริง

3.3 เว็บแอปพลิเคชัน

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อเป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) สำหรับควบคุมและตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ในบทความนี้ใช้เทคโนโลยี Node.js สำหรับการประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์และการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลเรียลไทม์ รวมถึงใช้ไลบรารี Bootstrap ในการออกแบบอินเทอร์เฟซผู้ใช้งานให้สามารถเข้าถึงได้จากทุกอุปกรณ์ โดยเว็บแอปพลิเคชันจะใช้ Firebase Hosting เพื่อรองรับการเข้าถึงจากอินเทอร์เน็ต Ffp ฟังก์ชันหลัก คือการแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งาน ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า การส่งคำสั่งจากผู้ใช้งาน เช่น การเปิด-ปิดระบบ การตั้งค่าพลังงานที่ต้องการใช้ หรือระยะเวลาในการอัดประจุ โดยคำสั่งจะถูกส่งในรูปแบบ JSON ไปยังหัวข้อ DESIRED/REPORTED ของ MQTT Broker และฐานข้อมูลเรียลไทม์ เพื่อรับส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับดิจิทัลทวิน ตัวอย่างเว็บแอปพลิเคชันแสดงดังรูปที่ 9



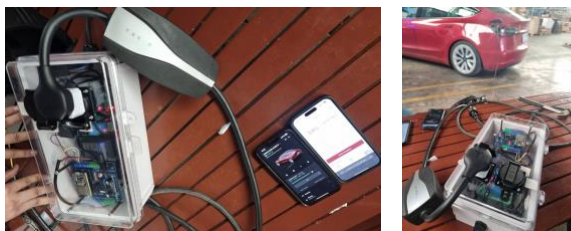
รูปที่ 9 ตัวอย่างหน้าเว็บแอปพลิเคชัน

4 ผลการดำเนินงาน

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบระบบต้นแบบของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยระบบจริง (บอร์ดพัฒนา ESP32 ชุดควบคุมรีเลย์, มิตเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า) ระบบดิจิทัลทวิน (MQTT Broker และ ฐานข้อมูลเรียลไทม์ผ่านโปรโตคอล HTTPS ด้วยวิธีการเรียกใช้ REST API) และเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานร่วมกันของแต่ละองค์ประกอบ โดยแบ่งการดำเนินการออกเป็น 2 ส่วน การควบคุมการอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าผ่านเว็บแอปพลิเคชัน และการวัดค่าความหน่วงของระบบ (Latency)

4.1 การทดลองใช้งานต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

การทดสอบการทำงานจริงของระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้นสำหรับต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าจักรยานยนต์ไฟฟ้างานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นโหลดจำลองแทนการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 10

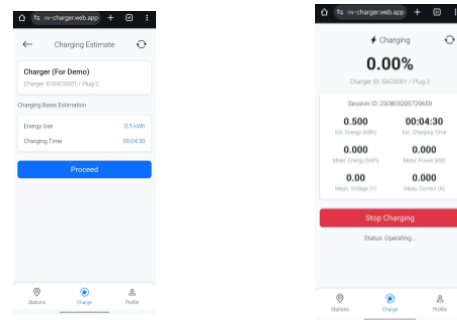


รูปที่ 10 การเชื่อมต่อต้นแบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าเข้ากับรถยนต์ไฟฟ้าเป็นโหลดจำลองแทนการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า

ทั้งนี้เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าสามารถกำหนดโพรไฟล์การชาร์จได้หลากหลาย และสามารถปรับให้ใกล้เคียงกับช่วงการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งช่วยลดข้อจำกัดด้านความพร้อมใช้งานของแบตเตอรี่ต้นแบบ และเพิ่มความสะดวกในการปรับค่าพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบ โดยระบบต้นแบบถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องชาร์จรถยนต์สำหรับพิกพาไปยังรถยนต์ไฟฟ้า ข้อมูลแรงดัน กระแส และสถานะการชาร์จจากรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าระบบดิจิทัลทวินผ่านโปรโตคอล MQTT และ REST API แบบเรียลไทม์ ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแอปพลิเคชันของตัวรถจริง เพื่อประเมินการทำงานได้ตลอดจนความสามารถจ่ายไฟฟ้าไปยังรถยนต์ไฟฟ้า โดยทำการเทียบความถูกต้องของพลังงาน แรงดัน และ กระแส กับแอปพลิเคชันของรถยนต์ไฟฟ้า

4.1 การควบคุมการอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

ทำการทดสอบคำสั่งเปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าผ่านอินเทอร์เน็ตของเว็บแอปพลิเคชัน โดยผู้ใช้งานควบคุมเปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าผ่านเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อส่งข้อมูลในรูปแบบ JSON ไปยังหัวข้อ DESIRED เพื่อควบคุมระบบต้นแบบของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และบอร์ดพัฒนา ESP32 ตอบสนองโดยชุดควบคุมรีเลย์การตัดหรือจ่ายไฟฟ้าได้ตามค่าที่กำหนด



รูปที่ 11 ตัวอย่างหน้าเว็บแอปพลิเคชันควบคุมเปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 2 การทดสอบคำสั่งเปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าผ่านอินเทอร์เน็ตของเว็บแอปพลิเคชัน

ควบคุม	ครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เปิด	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ปิด	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 2 พบว่าการทดสอบคำสั่งเปิด-ปิดระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าทั้งหมด 10 ครั้ง พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ โดยไม่พบปัญหาหรือความผิดพลาดในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์

4.2 การวัดค่าความหน่วงของระบบ

ในการทดลองส่วนนี้ได้ทำการวัดระยะเวลาการตอบสนองของระบบดิจิทัลทวินบนพื้นฐาน IoT โดยเน้นที่ช่วงเวลาตั้งแต่ผู้ใช้งานส่งคำสั่งผ่านเว็บแอปพลิเคชันไปยังระบบ ซึ่งคำสั่งดังกล่าวจะถูกส่งผ่านหัวข้อ DESIRED ของ MQTT Broker และถูกรับโดยบอร์ด ESP32 ผ่านกลไกการซิงค์ข้อมูล จากนั้นอุปกรณ์ต้นแบบจึงทำการเปลี่ยนสถานะการทำงาน (เช่น เปิดหรือปิดรีเลย์) พร้อมส่งข้อมูลสถานะกลับมายังหัวข้อ REPORTED และบันทึกลงฐานข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่าน REST API

ตารางที่ 3 การทดสอบวัดระยะเวลาการตอบสนองของระบบดิจิทัลทวิน

ครั้งที่	เวลาเริ่มต้น	เวลาตอบสนอง	ความหน่วง (ms)
1	250803205729659	250803205731236	1,577
2	250803210258290	250803210259216	926
3	250803210640283	250803210641715	1,432
4	250803210815965	250803210817366	1,401
5	250803210943478	250803210944411	933
6	250803211103948	250803211105202	1,254
7	250803211159047	250803211200407	1,360
8	250803211259467	250803211300725	1,258
9	250803211436427	250803211437241	814
10	250803211622144	250803211623661	1,517
ค่าเฉลี่ย			1257.2

จากตารางที่ 3 การวัดค่าความหน่วงนี้ดำเนินการทั้งหมด 10 ครั้ง บันทึกค่าเวลาเริ่มต้น และเวลาตอบสนองเป็นรูปแบบตัวเลขของปี เดือน วัน และเวลาในหน่วยชั่วโมง นาที วินาที และมิลลิวินาทีดังนี้ YMMDDhhmmssSSS โดยจับเวลาเริ่มต้นจากเวลาที่ผู้ใช้กดปุ่มคำสั่งบน เว็บแอปพลิเคชัน และจับเวลาสิ้นสุดจากเวลาที่ระบบตอบสนองพบว่าโดย วัดเวลาเฉลี่ยจากหลายกรณี พบว่า ความหน่วงค่าสูงสุดที่ 1577 มิลลิวินาที ค่าต่ำสุดที่ 814 มิลลิวินาที และเฉลี่ยอยู่ที่ 1257.2 มิลลิวินาที ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

5 สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอความคิดดิจิทัลบนพื้นฐานของเทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ประยุกต์ใช้กับระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับ จักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบที่สามารถ ควบคุมการเปิด-ปิด และกำหนดค่าพลังงานในการจ่ายไฟฟ้าได้จากระบบ เว็บแอปพลิเคชัน ที่พัฒนาด้วย Node.js, Bootstrap และ Firebase Hosting ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์จริง ได้แก่ บอร์ดพัฒนา ESP32, รีเลย์ควบคุม, และมอเตอร์วัดพลังงาน RS-485 ทำงานร่วมกับระบบจำลองเสมือนใน คลาวด์ผ่านโปรโตคอล MQTT และ REST API ที่เชื่อมโยงกับฐานข้อมูล แบบเรียลไทม์ด้วยกลไกการซิงค์ข้อมูลตามแนวคิดดิจิทัลวิน เว็บแอปพลิเคชันทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานสามารถส่งคำสั่ง DESIRED เพื่อ ควบคุมอุปกรณ์ และแสดงสถานะ REPORTED ที่อุปกรณ์ส่งกลับมา รวมถึงข้อมูลพลังงานและเวลาใช้งานจริง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม และควบคุมอุปกรณ์ได้แบบเรียลไทม์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองคำสั่งจาก ผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว และมีค่าความหน่วงต่ำ จึงถือได้ว่าระบบมี ประสิทธิภาพ และมีความพร้อมสำหรับการนำไปใช้งานจริงในสถานการณ์ ที่ต้องการควบคุมการจ่ายพลังงานที่ต้องการความเสถียรภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายวิจัยนโยบาย, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ, “อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า,” กันยายน 2560.
- [2] ทศมศล พงศ์พันธ์, “ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าของกลุ่มเจนเอเรชั่นวาย ในพื้นที่ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล,” ปริญญาโท, คณะ พาณิชยศาสตร์และการบัญชี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2564.
- [3] Thailand Convention and Exhibition Bureau (TCEB), “Explore the Potential of EV Market Growth in Thailand,” [Online]. Available: https://intelligence.busessevents-thailand.com/files/keyindustries/keyindustries_document_9b8191fa4be819932e47ed03faaa353b.pdf.
- [4] Md Hassain, I. H. Jamil, M. M. Hoque, and M. J. Hasan, “Electric Vehicle Charging System Using RFID and IoT for Enhanced User Experience,” MENACOMM 2025, pp. 1–6, doi: 10.1109/MENACOMM62946.2025.10911013.
- [5] F. Basholli, “IoT Integration of Electric Vehicle Charging Infrastructure,” 2023.
- [6] สุทธิศักดิ์ ต้นตะโยธิน, “แนวทางการนำเทคโนโลยี Digital Twin มาใช้เพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานโทรคมนาคมของประเทศ,” วารสารรัฐกิจ, ปีที่ 66, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม – ธันวาคม 2567.
- [7] M. N. Hidayat, A. Nugroho, A. F. Munir, and R. I. Putri, “Internet of things (IoT) based monitoring system for hybrid powered E-bike charging station,” International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), vol. 16, no. 1, pp. 243–250, 2025, doi:10.11591/ijpeds.v16.i1.pp243-250.
- [8] M. R. Dhavale, R. B. Nimbalkar, P. R. Gavhane, S. N. Satbhai, and K. B. Thorat, “Development of an IoT-Based Adaptive Charging System for Electric Vehicles,” International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), vol. 13, no. 2, Feb. 2025, ISSN: 2320-2882.
- [9] สำนักงานนโยบายและพลังงาน, กระทรวงพลังงาน, “คู่มือโครงการ จัดทำแผนการพัฒนาสถานีประจุแบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อรองรับเป้าหมายการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศ,” [Online].
- [10] E. A. Mohammed, M. H. Qahtan, and A. J. Ali, “Internet of Things based Real-Time Electric Vehicle and Charging Stations Monitoring System,” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS), 2023.
- [11] ทศพล กลิ่นสุคนธ์, “DIGITAL TWIN แบบจำลองเสมือนจริงจาก ระบบทางกายภาพ,” กลุ่มวิจัยไอโอทีและระบบอัตโนมัติสำหรับงาน อุตสาหกรรม, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ (NECTEC).
- [12] M. Shapna, B. Yoo, and H. Ko, “Designing a Semantic Digital Twin Model for IoT,” IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2020, pp. 1–2, doi: 10.1109/ICCE46568.2020.9043088.
- [13] A. Awouda, E. Traini, G. Bruno, and P. Chiabert, “IoT-Based Framework for Digital Twins in the Industry 5.0 Era,” Sensors, vol. 24, no. 2, p. 594, 2024, <https://doi.org/10.3390/s24020594>.
- [14] F. Abdoune, O. Cardin, M. Nouri, and P. Castagna, “Real-Time Field Synchronization Mechanism for Digital Twin Manufacturing Systems,” IFAC-PapersOnLine, vol. 56, no. 2, pp. 5649–5654, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.487>.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48

The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)

วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูรามา จังหวัดเชียงใหม่



ศุภรัตน์ แยมครวญ จบการศึกษาระดับปริญญาเอก
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าและสารสนเทศ
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมปัญญาประดิษฐ์
และวิทยาการข้อมูล มหาวิทยาลัยกรุงเทพ



ศิริชัย เต็มโชคเกษม จบการศึกษาระดับปริญญาเอก
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าและสารสนเทศ
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ



ศักดิ์กมล สีสัจจินดาไกรฤกษ์ จบการศึกษาระดับ
ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ตำแหน่ง Chief
Operation & Engineer Officer บริษัท อีโวลท์
เทคโนโลยี จำกัด