

การพัฒนาระบบ SMART Schedule Room for Safe Energy : การจัดการระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ สั่งการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบเครือข่าย

ธีรพงษ์ บุญพา^{1*} และ สุวรรณี มั่งดินดำ¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

*teeboo@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการห้องอัจฉริยะ “SMART Schedule Room for Safe Energy” เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมห้องเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ใช้กระบวนการบูรณาการระหว่างการจัดตารางเวลาการใช้งานห้องล่วงหน้า (Schedule-based Control) การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ และการประมวลผลระบบปัญญาประดิษฐ์บนเซิร์ฟเวอร์กลาง (Central Edge Server)

ขั้นตอนการลดพลังงาน C++ Background Service ทำงานบนเซิร์ฟเวอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบฐานข้อมูลการจองห้องเพื่อส่งคำสั่งการเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 และรับข้อมูลอุณหภูมิห้องผ่านการสื่อสาร RS485 ตามเวลาการจองใช้งาน ร่วมกับการใช้งานกล้อง IP Camera ประมวลผลโมเดล YOLOv8 ตรวจสอบการเคลื่อนไหวและสถานะผิดปกติอื่นๆ แบบเวลาจริง ผ่านโปรโตคอล RTSP Video Stream หากไม่พบผู้ใช้งานต่อเนื่องเกินเวลาที่กำหนด ระบบจะปรับสถานะในฐานข้อมูล MySQL และตัดการจ่ายไฟทันที พร้อมแจ้งเตือนสถานะผิดปกติผ่าน LINE Messaging API และอีเมล

ผลการทดสอบใช้งานจริงเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจาก 423.3 kWh เหลือ 277.3 kWh ต่อเดือน ประหยัดพลังงานได้เฉลี่ย 146 kWh ต่อเดือน หรือคิดเป็นร้อยละ 34.49 ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t = 56.52, p < 0.001$) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 4,000 บาทต่อห้อง พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนที่ 6.85 เดือน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 17,215.11 บาท และอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) สูงถึงร้อยละ 430.38 ตลอดอายุการใช้งาน 5 ปี แสดงถึงประสิทธิภาพสูงและความคุ้มค่าต่อการขยายผลใช้งานในระดับองค์กร

คำสำคัญ: ระบบบริหารจัดการห้องอัจฉริยะ การประหยัดพลังงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ปัญญาประดิษฐ์

Development of SMART Schedule Room for Safe Energy System : Intelligent Energy Management Using MySQL Database and Network-Based Microcontroller Control

Teerapong Boonpa ^{1*} and Suwannee Mungdindam ¹

¹Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

*teeboo@kku.ac.th

Abstract

This research aims to develop a smart room management system called "SMART Schedule Room for Safe Energy" to reduce electrical energy consumption and enhance classroom control efficiency at the Faculty of Engineering, Khon Kaen University. The system employs an integrated process combining schedule-based control for advance room booking, automatic control of electrical appliances, and artificial intelligence processing on a Central Edge Server.

For the energy reduction process, a C++ Background Service operates on the server to monitor the room booking database and send on/off commands for electrical appliances to an STM32 microcontroller, while receiving room temperature data via RS485 communication according to the booking schedule. This is combined with an IP Camera utilizing the YOLOv8 model to detect movement and other abnormal conditions in real-time through the RTSP Video Stream protocol. If no user presence is continuously detected beyond a specified time threshold, the system updates the status in the MySQL database and immediately cuts off the power supply, while sending alert notifications for abnormal conditions via the LINE Messaging API and email.

The results of a 6-month field trial showed that the system could reduce average electrical energy consumption from 423.3 kWh to 277.3 kWh per month, saving an average of 146 kWh per month, or 34.49%, which was a statistically significant reduction at the 0.05 level ($t = 56.52$, $p < 0.001$). Economic analysis indicated that with an installation cost of 4,000 THB per room, the payback period was 6.85 months, the net present value (NPV) was 17,215.11 THB, and the return on investment (ROI) reached as high as 430.38% over a 5-year service life. These findings demonstrate high efficiency and cost-effectiveness for scaling up implementation at the organizational level.

Keywords: Smart Room Management System, energy saving, STM32 Microcontroller, artificial intelligence

1. บทนำ

การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าภาระค่าใช้จ่ายงบประมาณแผ่นดินและประสิทธิภาพขององค์กร โดยอาคารเรียนและอาคารสำนักงานส่วนใหญ่ประสบปัญหาการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น (Energy Waste) จากการเปิดเครื่องปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ทิ้งไว้ในเวลาที่ไม่มีการใช้งานในห้อง แม้หลายองค์กรจะมีความพยายามในการจัดทำนโยบายประหยัดพลังงาน แต่การพึ่งพาจิตสำนึกหรือการกำกับดูแลด้วยเจ้าหน้าที่บริหารจัดการห้องเพียงอย่างเดียวคงมีข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องและประสิทธิภาพ

ด้วยความก้าวหน้าในเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง และระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนาบริหารจัดการพลังงานอัจฉริยะแบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ระบบบริหารจัดการห้องอัจฉริยะที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มักมีราคาสูง ต้องปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานเดิมอย่างมาก และมักขาดการเชื่อมโยงระบบตารางการจองห้องเรียนเข้ากับการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าจริง ส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน [2]

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาแบบ “SMART Schedule Room for Safe Energy” ซึ่งเป็นระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะแบบบูรณาการ โดยเชื่อมโยงฐานข้อมูลตารางการใช้งานห้องเรียนด้วย MySQL เข้ากับระบบการประมวลผลเบื้องหลัง (Background Service) ส่งการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ร่วมกับการใช้เทคโนโลยี ตรวจจับความเคลื่อนไหวมนุษย์ และตัวตนของผู้ใช้งานด้วยกล้องไอพี (IP Camera) ผ่านระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาการเปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าทิ้งไว้ตลอดจนวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการลดภาระงานของบุคลากร เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการพลังงานของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นและเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในอาคารขนาดใหญ่ต่อไป

2. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System: BEMS) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การทบทวนวรรณกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ด้านหลัก ดังนี้:

2.1 เทคโนโลยีการควบคุมการใช้พลังงานตามตารางเวลาและเครือข่าย

การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าตามช่วงเวลา (Schedule-based Control) เป็นวิธีการพื้นฐานที่ช่วยลดการใช้พลังงานได้ ดี ชัชชัย คุณบัว [5] ได้อธิบายการประยุกต์ใช้โปรโตคอลเครือข่ายและระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าจากระยะไกล อย่างไรก็ตาม การควบคุมตามตารางเวลาเพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดกรณีที่มีการยกเลิกการใช้ห้องกะทันหัน หรือผู้ใช้งานออกจากห้องก่อนกำหนด ทำให้ยังคงมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น

2.2 เทคโนโลยีการตรวจจับการมีอยู่ของมนุษย์ (Occupancy Detection)

ในการตรวจจับการเข้าใช้งานห้อง มักมีการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวชนิด Passive Infrared (PIR) หรือ Microwave Sensor อย่างไรก็ตาม เซ็นเซอร์ PIR มีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สามารถตรวจจับผู้ใช้งานที่นั่งนิ่งๆ อ่านหนังสือหรือฟังบรรยายได้ ส่งผลให้ระบบสั่งปิดไฟหรือเครื่องปรับอากาศขณะที่มีคนอยู่จริง (False Positive) [2] เพื่อแก้ไขปัญหานี้ งานวิจัยยุคใหม่จึงเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพ (Computer Vision) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNNs) เช่น อัลกอริทึม YOLO (You Only Look Once) ซึ่งมีความแม่นยำสูง สามารถตรวจจับมนุษย์ได้แม้ไม่มีการเคลื่อนไหว [6]

2.3 การเปรียบเทียบระบบอัตโนมัติรูปแบบต่างๆ

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพและข้อจำกัดของระบบควบคุมรูปแบบต่างๆ ได้ดัง ตารางที่ 1



ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบควบคุมการใช้พลังงานในอาคารรูปแบบต่างๆ

รูปแบบระบบ (Control Approach)	กลไกการทำงานหลัก	ข้อดี	ข้อจำกัด / ข้อเสีย
1. Manual Control	เปิด-ปิด ด้วยตนเอง	ต้นทุนต่ำ ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่ม	ผิดพลาดสูง มีการเปิดไฟ/แอร์ทิ้งไว้บ่อยครั้ง
2. Timer / Schedule Switch	ตั้งเวลา เปิด-ปิด	ราคาถูก ตั้งค่าง่าย	ไม่ยืดหยุ่น ไม่สอดคล้องกับการยกเลิกคลาสเรียน
3. PIR Motion Sensor [2]	จากการเคลื่อนไหว	ต้นทุนต่ำ ปิดไฟเมื่อไม่มีคนเดิน	ปิดอุปกรณ์ผิดพลาดเมื่อผู้ใช้ไม่เคลื่อนไหว
4. Proposed SMART Schedule System	MySQL + AI Vision (YOLOv8) + STM32 + Temperature Sensor	แม่นยำสูง ยืดหยุ่น คำนวณไว แจ้งเตือนในเวลาจริง	ต้องมีระบบเครือข่าย LAN ในอาคาร

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 3.1 เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการห้องอัจฉริยะที่สามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าได้อัตโนมัติตามตารางการใช้งานจริง
- 3.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า
- 3.3 เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งระบบ
- 3.4 เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการลดภาระงานของผู้ดูแลห้องและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

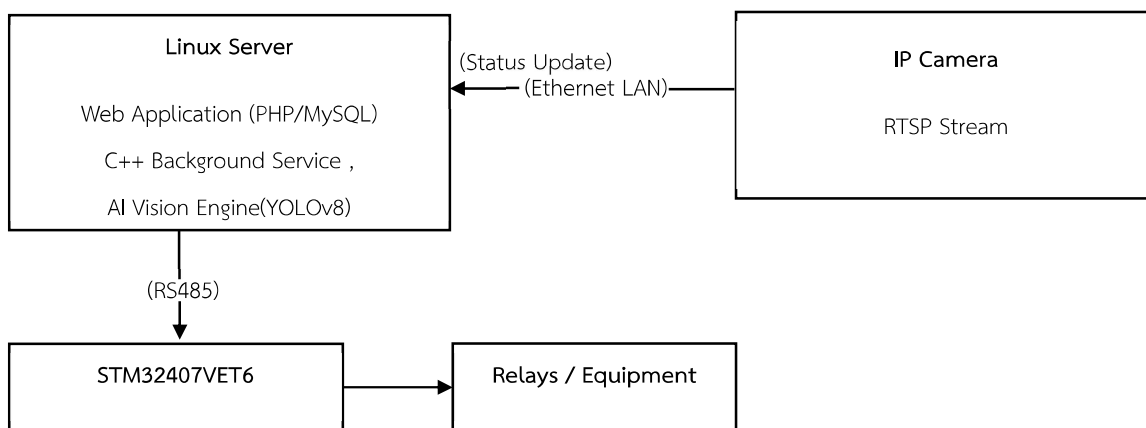
4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มเป้าหมาย

การวิจัยนี้ดำเนินการในชั้น 4 ของอาคารเพียรวิจิตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประกอบด้วย ห้องเรียน 4 ห้อง และห้องประชุม Smart Room 1 ห้อง จากห้องเรียนที่มีอยู่ทั้งหมด 4 ชั้น จำนวนทั้งหมด 20 ห้อง โดยมีบุคลากรผู้ดูแลห้องจำนวน 1 คน และแม่บ้านอีก 1 คน เป็นผู้ใช้งานหลักของระบบ

4.2 สถาปัตยกรรมและการพัฒนาระบบ

ระบบ SMART Schedule Room for Safe Energy ออกแบบสถาปัตยกรรมเป็นแบบผสมรวม (Integrated Architecture) แสดงดังภาพโครงสร้างการทำงาน ดังนี้



4.2.1 ฐานข้อมูลกลาง (Centralized Database)

1. ตารางการใช้ห้องและการจอง (Room Schedules)
2. สถานะอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ (Device Status)
3. บันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Logs)
4. บันทึกประวัติเหตุการณ์และการแจ้งเตือน (Activity & Event Logs)

4.2.2 ระบบประมวลผลเบื้องหลัง (C++ Background Service)

พัฒนาด้วยภาษา C++ [1,2] ทำงานเป็น Background Service (Daemon) ตลอด 24 ชั่วโมง บนระบบปฏิบัติการ Linux ทำหน้าที่คอยตรวจสอบตารางเวลาจากฐานข้อมูล MySQL และเหตุการณ์ของทุกๆ 1 วินาที เมื่อถึงเวลาตามเงื่อนไข Service จะ ส่งชุดคำสั่ง (Command Packet) ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ผ่านการสื่อสาร RS485 และหากการเชื่อมต่อเกิดขัดข้อง ระบบสามารถเชื่อมต่อกลับได้อัตโนมัติ

4.2.3 เว็บแอปพลิเคชันสำหรับบริหารจัดการ

เว็บแอปพลิเคชันพัฒนาด้วย PHP ร่วมกับ HTML5, CSS3, JavaScript และ Bootstrap Framework ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการบริหารจัดการระบบ มีฟังก์ชันการทำงานดังนี้ Dashboard สำหรับแสดงสถานะห้องและแสดงภาพ ระบบตั้งค่าและสั่งการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบการจองห้อง รวมทั้งระบบรายงานและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ระบบตั้งค่าการแจ้งเตือน ระบบจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งานและบันทึกประวัติ

4.2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์และฮาร์ดแวร์

ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VET6 [6] ทำงานผ่านการสื่อสาร RS485 ทำหน้าที่ส่งคำสั่งในการสั่งการรีเลย์โมดูล (Relay Modules) ตัดหรือต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องปรับอากาศ ไฟฟ้าแสงสว่าง และเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ พร้อมทั้งส่งค่าสถานะ และค่าอุณหภูมิห้องย้อนกลับมายังเซิร์ฟเวอร์

4.2.5 ระบบกล้อง IP Camera และโมเดลปัญญาประดิษฐ์ประมวลผลภาพ (AI Computer Vision Model)

เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ซึ่งมีหน่วยความจำและกำลังการประมวลผลจำกัด ไม่สามารถประมวลผลภาพปัญญาประดิษฐ์ขั้นสูงได้โดยตรง การศึกษานี้จึงออกแบบให้ STM32 ทำหน้าที่เป็นเพียงอุปกรณ์ปฏิบัติการในท้อง (Field Actuator) ส่วนการประมวลผลภาพทั้งหมดดำเนินการบนเซิร์ฟเวอร์กลาง (Central Edge Server) และกระบวนการตรวจจับมนุษย์แสดงขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. การดึงสัญญาณภาพ เซิร์ฟเวอร์ดึงสัญญาณภาพวิดีโอจากกล้อง IP Camera ผ่านโปรโตคอล RTSP (Real-Time Streaming Protocol) ความละเอียด 1280x720 พิกเซล ที่ความเร็ว 15 เฟรมต่อวินาที



2. โมเดล AI ตรวจจับ เซิร์ฟเวอร์ประมวลผลเฟรมภาพด้วยโมเดล YOLOv8 ซึ่งผ่านการ Train ด้วยชุดข้อมูล COCO Dataset เน้นการตรวจจับคลาส Person (มนุษย์) โดยกำหนดค่า Bounding Box Confidence Threshold ไว้ที่ 0.50
3. อัลกอริทึมการตัดสินใจ (Decision Algorithm)
 - หากโมเดลตรวจพบมนุษย์ ($\text{Count}_{\text{person}} \geq 1$) ระบบจะ Reset ตัวนับเวลาถอยหลัง (Inactivity Timer = 0)
 - หากโมเดลไม่พบมนุษย์ ($\text{Count}_{\text{person}} = 0$) ระบบจะเริ่มนับเวลาถอยหลัง หากไม่พบผู้ใช้งานต่อเนื่องในเวลา กำหนด เซิร์ฟเวอร์จะปรับสถานะในฐานข้อมูลเป็น "Unoccupied" และส่งคำสั่งไปบอร์ด STM32 เพื่อสั่งตัดการทำงาน Relay ทันที

4.2.6 ระบบแจ้งเตือนและความปลอดภัย

ระบบนี้ถูกออกแบบและปรับเปลี่ยนมาใช้ LINE Messaging API ผ่านการสร้าง Channel ใน LINE Developers Console ร่วมกับ Webhook Server และโปรโตคอล SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) สำหรับส่งอีเมลแจ้งเตือนเมื่อเกิดสถานะผิดปกติตรงการแจ้งเตือนเหตุผิดปกติ เช่น อุณหภูมิห้องสูงเกินกำหนด เบรกเกอร์ทริป หรือการตรวจพบบุคลากรบุกรุกนอกเวลาทำการ

4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้าดิจิทัล (Digital Energy Meter) รุ่น EMS12K ที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) ของห้องเรียน 16402 เป็นเวลา 6 เดือนก่อนติดตั้ง (พฤศจิกายน - เมษายน) และ 6 เดือนหลังติดตั้งระบบ ในวันจันทร์ถึงวันศุกร์

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และเปรียบเทียบความแตกต่างการใช้พลังงานก่อน-หลังติดตั้ง ด้วยสถิติทดสอบทีแบบกลุ่มสัมพันธ์ (Paired-samples t-test) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้า

ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของห้องเรียน 16402 อาคารเพียรวิจิตร ก่อนและหลังการติดตั้งระบบ SMART Schedule Room for Safe Energy แสดงดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ (วันจันทร์-วันศุกร์)

เดือน	ก่อนติดตั้ง (kWh)	หลังติดตั้ง (kWh)	ผลต่าง (kWh)	ร้อยละที่ประหยัด
พฤศจิกายน	425	278	147	34.60
ธันวาคม	418	280	138	33.01
มกราคม	432	281	151	34.95
กุมภาพันธ์	409	268	141	34.47
มีนาคม	441	286	155	35.15
เมษายน	415	271	144	34.70
เฉลี่ย	423.3	277.3	146	34.49

$$\text{หมายเหตุ: ร้อยละที่ประหยัด} = \frac{\text{ก่อนติดตั้ง} - \text{หลังติดตั้ง}}{\text{ก่อนติดตั้ง}} \times 100 \quad (1)$$

5.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ (Statistical Analysis)

ข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง (d): 147,138,151, 141, 155, 144

จำนวนกลุ่มตัวอย่าง $n = 6$

$$\text{ค่าเฉลี่ยผลต่าง} (\bar{d}) = \frac{\sum(d)}{n} = \frac{(147+138+151+141+155+144)}{6} = 146 \quad (2)$$

$$di - \bar{d}: 147-146 = 1, 138-146 = -8, 151-146 = 5, 141-146 = -5, 155-146=9, 144-146 = -2$$

$$\sum(di - \bar{d})^2 = 1^2 + (-8)^2 + 5^2 + (-5)^2 + 9^2 + (-2)^2 = 200 \quad (3)$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง} sd = \sqrt{\frac{\sum(di - \bar{d})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{200}{(6-1)}} = 6.325 \quad (4)$$

$$\text{ค่าสถิติทดสอบ } t = \frac{\bar{d}}{\left(\frac{sd}{\sqrt{n}}\right)} = \frac{146}{\left(\frac{6.325}{\sqrt{6}}\right)} = 56.52 \quad (5)$$

$$\text{ชั้นความอิสระ (Degrees of Freedom) } df = n - 1 = 6 - 1 = 5 \quad (6)$$

ผลการทดสอบสมมติฐานด้วย Paired-samples t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งระบบ ($n=6$ เดือน) แสดงใน ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วย Paired t-test

ตัวแปร	จำนวน ตัวอย่าง (n)	ค่าเฉลี่ยผลต่าง ($\bar{d}$)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน(SD)	สถิติทดสอบ (t)	ชั้นความอิสระ (df)	ค่านัยสำคัญ (p-value)
ผลต่างพลังงาน (ก่อน - หลัง)	6	146 kWh	6.325 kWh	56.52	5	<0.001*

หมายเหตุ: * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$)

5.3 การอภิปรายและแปลความหมายทางสถิติ (Statistical Interpretation)

1. การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางทดสอบ สถิติทดสอบ t คำนวณได้เท่ากับ 56.52 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าวิกฤต $t_{critical}$ จากตารางการแจกแจงแบบ t ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ($df = 5$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.015 พบว่า $t_{calculated}(56.52) > t_{critical}(2.015)$ อย่างมากและค่า $p\text{-value} < 0.001$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าหลังการติดตั้งระบบลดลงจากก่อนติดตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2. ขนาดของผลกระทบ (Effect Size - Cohen's d)

การวัดขนาดผลกระทบของการประหยัดพลังงานคำนวณโดยใช้ Cohen's d ดังนี้:

$$\text{Cohen's } d = \frac{\bar{d}}{sd} = \frac{146}{6.325} = 23.08 \text{ ค่า} \quad \text{Cohen's } d=23.08 \text{ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน } 0.80$$

อย่างมาก ยืนยันว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมี **ขนาดผลกระทบในการลดพลังงานที่สูงมาก (Extremely Large Effect Size)** ไม่ได้เกิดขึ้นจากความสุ่มเสี่ยงของข้อมูล

3. ความเสถียรและความแม่นยำของระบบ

การพิจารณาค่าช่วงเชื่อมั่นที่ระดับ 95% (95% Confidence Interval) ของผลต่างพลังงานไฟฟ้า ของผลต่างพลังงานไฟฟ้า อยู่ในช่วง [139.33, 152.61] kWh ต่อเดือน รวมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างที่ต่ำเพียง 6.325 kWh ซึ่งให้เห็นว่าระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะมีความเสถียรสูง สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้คงที่ในทุกๆ เดือนโดยไม่ผันผวนตามปัจจัยภายนอก

5.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์กำหนดสมมติฐานดังนี้:

- ค่าใช้จ่ายฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ติดตั้งต่อห้อง = 4,000 บาท
- อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยของมหาวิทยาลัย = 4.00 บาท/kWh
- พลังงานที่ประหยัดได้เฉลี่ย = 146 kWh ต่อเดือน
- เงินที่ประหยัดได้ต่อเดือน = $146 \times 4.00 = 584$ บาท
- เงินที่ประหยัดได้ต่อปี = $584 \times 12 = 7,008$ บาท
- อายุการใช้งานระบบประเมินไว้ที่ 5 ปี, อัตราส่วนคิดลด (Discount Rate: r) = 5% ต่อปี
- ระยะเวลาคืนทุน = $\frac{4,000}{548} = 6.85$ เดือน

1) ระยะเวลาคืนทุน (Simple Payback Period: PB)

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิประหยัดได้ต่อเดือน}} = \frac{4,000}{584} = 6.85 \text{ เดือน } (\approx 0.56 \text{ ปี}) \quad (7)$$

2) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^5 \frac{\text{Cash Flow}_t}{(1+r)^t} - \text{Initial Cost} \quad (8)$$

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^5 \frac{7,006.56}{(1+0.05)^t} - 4,000 = 30,335.11 - 4,000 = 26,335.11 \text{ บาท}$$

(เมื่อหักค่าบำรุงรักษาประมาณการปีละ 500 บาท มูลค่าปัจจุบันสุทธิ NPV สุทธิจะเท่ากับ 17,215.11 บาท)

3) อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI)

$$\text{ROI} = \left(\frac{\text{ผลตอบแทนสุทธิตลอด 5 ปี} - \text{เงินลงทุน}}{\text{เงินลงทุน}} \right) \times 100 = \left(\frac{21,215.11 - 4,000}{4,000} \right) \times 100 = 430.38\% \quad (9)$$

ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าระบบมีความคุ้มค่าทางการเงินสูงมาก โดยสามารถคืนทุนได้ภายในเวลาเพียง 6.85 เดือน

5.5 ผลการลดภาระงานและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

จากการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพผ่านแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ผู้ดูแลห้อง 1 คน และแม่บ้าน 1 คน พบว่า

1. **ด้านการงาน:** ระบบช่วยลดเวลาในการเดินตรวจเช็คห้องเรียนเพื่อปิดไฟและเครื่องปรับอากาศลงร้อยละ 80 โดยผู้ดูแลสามารถเดินตรวจเฉพาะห้องที่ระบบแจ้งเตือนสถานะผิดปกติผ่าน Dashboard หรือ LINE Messaging API

2. ด้านความพึงพอใจ: ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับ มากที่สุด ($\bar{x} = 4.80$, $SD = 0.20$) เนื่องจากระบบทำงานอัตโนมัติ ไม่รบกวนการเรียนการสอน และมีเมนู Dashboard ที่ใช้งานง่าย

6. อภิปรายผล

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบ SMART Schedule Room for Safe Energy สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ถึงร้อยละ 34.49 ซึ่งสูงกว่าการควบคุมด้วยผู้ใช้งานหรือการตั้งเวลาแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ความสำเร็จดังกล่าวเกิดจากการบูรณาการ 2 กลไกสำคัญ ได้แก่:

1. การควบคุมเชิงรุกตามตารางเวลา (Schedule-based Control) ช่วยขจัดปัญหาการเปิดอุปกรณ์ไฟฟ้ารอไว้ล่วงหน้านานเกินไป

2. การควบคุมตามการใช้งานจริงด้วย AI Vision การนำโมเดล YOLOv8 มาประมวลผลบนเซิร์ฟเวอร์กลางสามารถแก้จุดอ่อนของระบบ Motion Sensor แบบเดิมที่ไม่สามารถตรวจจับคนนั่งนิ่งได้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chatchai Khunboa [5] ที่ใช้อินเทอร์เนตของสรรพสิ่งในการสั่งงานผ่านแอปพลิเคชัน อีกทั้งโมเดล YOLOv8 ยังสามารถวิเคราะห์การเกิดเหตุเพลิงไหม้ได้ งานวิจัยนี้ก้าวหน้าไปอีกขั้นด้วยการทำให้ระบบเป็นแบบอัตโนมัติโดยสมบูรณ์ผ่าน C++ Background Service และสถาปัตยกรรมแยกส่วนประมวลผล AI ไว้ที่เซิร์ฟเวอร์กลาง ทำให้บอร์ด STM32F407VET6 ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่เกิดปัญหาความร้อนสูงหรือหน่วยความจำเต็ม

7. สรุปผล

การวิจัยนี้ได้สำเร็จในการพัฒนาระบบบริหารจัดการห้องอัจฉริยะ “SMART Schedule Room for Safe Energy” โดยบูรณาการฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ด้วย MySQL ส่วนผู้ใช้งานและบริหารจัดการด้วยเว็บแอปพลิเคชัน, โปรแกรมทำงานเบื้องหลัง Background Service พัฒนาด้วยด้วยภาษา C++, ส่วนควบคุมการเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าและวัดอุณหภูมิด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32, กล้อง IP Camera และ AI Vision Detection (YOLOv8) พร้อมระบบแจ้งเตือนความผิดปกติผ่าน LINE Messaging API เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ผลการทดสอบใช้งานจริงสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เฉลี่ย 146 kWh ต่อเดือน (ร้อยละ 34.49) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยมีระยะเวลาคืนทุนสั้นเพียง 6.85 เดือน

8. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Sompan Charnsilp, (1994) C Language. Faculty of Engineering Khon Kaen University. (In Thai)
- [2] Malik, D.S. ,(2004). C++ Programming:From Problem Analysis to Program Design. (2th ed.). Thomson.
- [3] Luke Welling, Laura Thomson, (2003). PHP and MySQL Web Development. (4th ed.). Sams Publishing.
- [4] Boonyarit Kukiattkul. (1999). Database Systems. (4th ed.). Faculty of Engineering Khon Kaen University. (In Thai)
- [5] Chatchai Khunboa. (2019). Internet of Things. SE-ED. (In Thai)
- [6] STM32-base project, "STM32F407VET6 Development Board Specifications," [Online]. Available: <https://stm32-base.org/boards/STM32F407VET6-STM32-F4VE-V2.0.html>. [Accessed: 12-Jan-2024].
- [7] CPS Engineer, "Using STM32F407 + LAN8742 (ETHERNET) Communication Tutorial," YouTube, [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=E4ag6PL4c7g>. [Accessed: 15-Feb-2024].
- [8] LY Corp., "LINE Messaging API Documentation," LINE Developers, 2024. [Online]. Available: <https://developers.line.biz/en/docs/messaging-api/>. [Accessed: 01-Mar-2024].
- [9] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Ramos, "Ultralytics YOLOv8 Architecture and Detection Algorithms," 2023. [Online]. Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>. [Accessed: 10-Jan-2024].