

การออกแบบระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร

Design of Building Energy Measurement and Monitoring System

พรหมพักตร์ บุญรักษา¹ ชีระพงษ์ บุญรักษา^{2*} ภัทรพล ภูยอดยั้ง² ชีรวัดน์ ป้องกัน² เศรษฐวัฒน์ หนูขาว² วรสิทธิ์ แย้มวงษา²
อนุสรณ์ ผ่องประภา³ เกศรา พลไชย⁴ และ บุญเรือง มะรังศรี⁵

Promphak Boonraksa¹ Terapong Boonraksa² Pattarapon Pooyodying² Teerawat Pongkan²
Settawat Nookhaw² Valit Yamwongsa² Anusorn Phongprapa³ Kedsara Palachai⁴ and Boonruang Marungsri⁵

- ¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และเทคโนโลยีอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี 11000
- ² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170
- ³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170
- ⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170
- ⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

¹ Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi 11000

² School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Nakhon Pathom, 73170

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, 10170

⁴ School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, 10170

⁵ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel.: 0897177065 E-mail address: terapong.boon@rmutr.ac.th

Abstract

The electrical energy demand in buildings continues to rise, making energy monitoring and tracking an essential factor for effective energy management. This study aims to design and develop an electrical energy measurement system capable of collecting accurate and reliable data, while supporting real-time monitoring of energy usage. The developed system can seamlessly transfer measurement data from monitoring devices to a user-friendly display platform, enabling convenient access for users. System testing, conducted in comparison with a standard energy measurement instrument (Fluke 1738 Power Logger), showed that the real power (P) and apparent power (S) have deviations of only 3.485% and

0.832%, respectively. The measurement results had relatively small measurement deviations. These findings demonstrate that the proposed system is accurate and practical for real-world applications, and holds strong potential as a tool to support building energy management and future development toward smart building systems.

Keywords: Energy measurement system, Energy management system, Power meter, Energy monitoring system

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้อง เชื่อถือได้ และรองรับการติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดไปยังแพลตฟอร์มแสดงผลที่ใช้งานง่าย เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งาน ทำการทดสอบระบบโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดพลังงานมาตรฐาน Fluke 1738 Power Logger พบว่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) มีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.485% และ 0.832% ผลการวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมืออ้างอิง แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องเหมาะสมต่อการใช้งานจริง และมีศักยภาพในการสนับสนุนการจัดการพลังงานในอาคาร รวมถึงการต่อยอดสู่ระบบอาคารอัจฉริยะในอนาคต

คำสำคัญ: การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ระบบจัดการพลังงาน พาวเวอร์มิเตอร์ ระบบติดตามการใช้พลังงาน

บทนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการใช้งานด้านความสะดวกสบายและเทคโนโลยีสมัยใหม่ การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความยั่งยืนของการดำเนินงาน ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ การออกแบบระบบตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับอาคารจึงมีบทบาทสำคัญต่อการวางแผนด้านพลังงาน การบำรุงรักษา และการพัฒนาสู่มาตรฐานอาคารอัจฉริยะ

การบริหารจัดการพลังงานในอาคารถือเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอาคารเป็นแหล่งใช้พลังงานขนาดใหญ่และมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาระบบตรวจวัดและจัดการพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดการสิ้นเปลืองพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงมุ่งเน้นไปที่แนวทางการออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานอาคาร เทคโนโลยีด้านสถาปัตยกรรมระบบการจัดการพลังงาน และวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวางแผนพลังงานอย่างยั่งยืน จากงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและจัดการพลังงานในอาคารโดยใช้โครงสร้างแบบสามชั้น ซึ่งประกอบด้วย (1) Field spacing tier สำหรับเก็บข้อมูลการใช้พลังงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้า น้ำ และก๊าซ, (2) Network communication tier สำหรับถ่ายโอนและประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์วัดไปยังระบบคอมพิวเตอร์ และ (3) Station level management tier สำหรับการเฝ้าติดตาม วิเคราะห์ข้อมูล และคาดการณ์แนวโน้มการใช้พลังงานในอนาคต ระบบสามารถทำการตรวจวัดและวิเคราะห์พลังงานแบบเรียลไทม์ ทำให้การจัดการพลังงานในอาคารมีความละเอียดมากขึ้นและตอบสนองต่อเป้าหมายด้านการประหยัดพลังงานและการลดการปล่อยคาร์บอน สะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์ของระบบ

ตรวจวัดพลังงานอาคารที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือเชิงปฏิบัติในการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทำนายแนวโน้มการใช้พลังงานเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ในการวางแผนและตัดสินใจเชิงนโยบายในอนาคต [1] มีการเสนอแนวคิดใหม่โดยเน้นการออกแบบเชิงสังคม-เทคนิค (Sociotechnical design) ซึ่งไม่ได้พิจารณาเพียงมิติทางเทคโนโลยี แต่ยังผสมกลยุทธ์ด้านพฤติกรรมผู้ใช้อาคารเข้าไปในระบบจัดการพลังงานด้วย งานวิจัยพัฒนาหลักการออกแบบที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเชิงปฏิบัติในการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบจัดการพลังงานให้ตอบสนองทั้งประสิทธิภาพพลังงานและพฤติกรรมการใช้งานจริง นอกจากนี้ยังมีการสร้างต้นแบบการทดสอบ เพื่อยืนยันความเป็นไปได้และศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในอาคารภาครัฐ [2] งานวิจัยด้านการปรับปรุงอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน (Building energy retrofits) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอาคารเก่ามีการใช้พลังงานสูงและมักเกิดช่องว่างระหว่างค่าพลังงานที่คาดการณ์กับค่าจริง (Performance gap) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของมาตรการปรับปรุงที่ผ่านมา งานวิจัยหลายชิ้นเน้นการใช้การจำลองพลังงานของอาคาร (Building energy simulations) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และตัดสินใจ แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถสะท้อนข้อมูลจริงของการใช้งานอาคารได้ครบถ้วน จึงเกิดความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแนวทางที่รวมการตรวจวัดจริงเข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประยุกต์ใช้ Error Domain Model Falsification (EDMF) ซึ่งเป็นเทคนิค Bayesian inference สำหรับจัดการกับความไม่แน่นอน ร่วมกับ Hierarchical algorithm ที่เน้นการเลือกตำแหน่งและเวลาการตรวจวัดโดยใช้เกณฑ์การเพิ่มค่าสารสนเทศสูงสุด (Maximizing joint entropy) การบูรณาการสองแนวทางนี้ช่วยลดจำนวนการตรวจวัดที่จำเป็นลงครึ่งหนึ่ง แต่ยังคงได้ผลลัพธ์ในการระบุแบบจำลองใกล้เคียงกับการตรวจวัดเต็มรูปแบบ อีกทั้งยังช่วยลดความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์และการพยากรณ์พลังงาน [3] มีการเสนอแนวทางแบบผสมผสานในการออกแบบ Building Automation and Control Systems (BACS) โดยผสมมาตรฐาน EN 15232 ซึ่งเป็นกรอบทางเทคนิคในการประเมินฟังก์ชันการควบคุมพลังงานอาคาร ร่วมกับ Smart Readiness Indicator (SRI) ที่พัฒนาตาม Energy Performance of Buildings Directive 2018 (EPBD 2018) เพื่อใช้วัดระดับความอัจฉริยะของอาคาร แนวทางนี้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาอาคารให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้และการทำงานร่วมกับไมโครกริด [4]

อาคารเป็นแหล่งใช้พลังงานขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพกลายเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อลดค่าใช้จ่ายและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และวางแผนการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามระบบตรวจวัดแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำและการเข้าถึงข้อมูล งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบและพัฒนา ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และรองรับการใช้งานจริง เพื่อสนับสนุนการจัดการพลังงานและการพัฒนาอาคารสู่ความเป็นอัจฉริยะในอนาคต

การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้สามารถประเมินและวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง การตรวจวัดที่แม่นยำทำให้สามารถระบุพฤติกรรมการใช้พลังงาน ค้นหาจุดที่สิ้นเปลือง และวางแผนปรับปรุงประสิทธิภาพได้อย่างเป็นระบบ ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์วัดและระบบสื่อสารข้อมูลที่ทันสมัยมาใช้ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการติดตามและจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ การตรวจวัดที่มีมาตรฐานจึงเป็นรากฐานของการจัดการพลังงานทั้งในระดับครัวเรือน อาคาร และโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีส่วนสำคัญต่อการลดต้นทุนและการพัฒนาอย่างยั่งยืน มิเตอร์ไฟฟ้าแบบสองทิศทาง (Bidirectional Energy Meter) ถูกออกแบบให้มีฟังก์ชันด้าน Home Automation เพิ่มเติม โดยสามารถวัดค่าพลังงานจากโหนดและข้อมูลจากตัวควบคุมการชาร์จ แล้วส่งข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูล แอปพลิเคชัน Android จะดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงผลบนหน้าจอ พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบสถานะของสวิตช์โหนดผ่านฐานข้อมูลได้อีกด้วย [5][6] โครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบอัตโนมัติภายในอาคารแสดงในรูปที่ 1 กรอบการดำเนินงานประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรก คือ การตรวจสอบพลังงานและการเก็บข้อมูล โดยทำการรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคาร เช่น ทิศทางอาคาร ผนัง หลังคา ระบบหน้าต่างและกระจก ประตู พื้นฐานและชั้นใต้ดิน วัสดุผิวภายนอก กันสาด ค่า SHGC ค่าการเป็นฉนวน (R-value, U-value) และการส่งผ่านแสง ตลอดจนการติดตามพฤติกรรมการใช้พลังงานของผู้ใช้อาคารผ่านแบบสอบถาม การสำรวจ การสัมภาษณ์ และการตรวจวัด

แบบเรียลไทม์ด้วยเซนเซอร์ IoT ขั้นตอนที่สอง คือ การพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมผู้ใช้อาคารเพื่อสร้างตารางการใช้งาน และรูปแบบการใช้พลังงานสังเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บได้ และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำข้อมูลจากทั้งสองขั้นตอนมาวิเคราะห์ด้วยการสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารและการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สะท้อนถึงพฤติกรรมจริงและสภาพการใช้พลังงานของอาคารอย่างครบถ้วน [7]



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารอัจฉริยะ

วิธีการวิจัย

การจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยทั้งการตรวจวัดและการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำ การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจะช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลด้านแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ ข้อมูลเหล่านี้เป็นรากฐานสำคัญในการวิเคราะห์รูปแบบการใช้ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของโหลด ในขณะเดียวกัน การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าก็เป็นอีกส่วนที่มีความสำคัญ เพราะช่วยแปลงข้อมูลที่วัดได้ให้กลายเป็นตัวเลขที่สะท้อนต้นทุนการใช้พลังงานจริง การคำนวณดังกล่าวสามารถทำได้ทั้งในมิติของพลังงานแอมป์พลังงานรีแอคทีฟ และการคำนวณค่าไฟฟ้าตามอัตราของการไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการวางแผนประหยัดพลังงานและการจัดการด้านเศรษฐศาสตร์พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1) การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการติดตามและควบคุมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบที่ดีจะต้องสามารถเก็บข้อมูลแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานได้อย่างถูกต้องเพื่อนำไปวิเคราะห์และปรับปรุงการจัดการพลังงาน รูปที่ 2 แสดงชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้า ประกอบด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสไฟฟ้า จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งเข้าสู่ตู้ควบคุมซึ่งทำหน้าที่รวมอุปกรณ์และป้องกันระบบไฟฟ้า ก่อนจะส่งต่อไปยัง V-BOX H-WF ที่เป็นเกตเวย์สำหรับรวบรวมและแปลงสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลขึ้นสู่ระบบคลาวด์ผ่านเครือข่าย LAN หรือ Wi-Fi ข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมวลผลและจัดเก็บบนแพลตฟอร์ม MALIN 1 และสามารถแสดงผลในรูปแบบกราฟ รายงาน หรือข้อมูลเรียลไทม์ผ่าน mDashboard ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและแม่นยำ รูปที่ 3 แสดงชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งจริง ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหรือเกตเวย์สำหรับการสื่อสารข้อมูล แต่เลือกใช้ V-BOX H-WF เป็นอุปกรณ์เกตเวย์หลักในการรวบรวมข้อมูลจากพาวเวอร์มิเตอร์และส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย LAN หรือ Wi-Fi ไปยังระบบคลาวด์ โดยข้อมูลถูกจัดเก็บและประมวลผลผ่านแพลตฟอร์ม MALIN 1 และแสดงผลผ่าน mDashboard การเลือกใช้โครงสร้างดังกล่าวช่วยลดความซับซ้อนในการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งเน้นการตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ระบบกำหนดช่วงเวลาการบันทึกและจัดเก็บข้อมูลพาวเวอร์มิเตอร์ทางไฟฟ้าทุก 5 นาที โดยข้อมูลจะถูกส่งผ่าน V-BOX H-WF ไปยังระบบคลาวด์และจัดเก็บบนแพลตฟอร์ม MALIN 1 เพื่อใช้ในการติดตามและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ทั้งนี้ ในหนึ่งวันจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 288 ช่วงเวลา



รูปที่ 2 ชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3 ชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งจริง

2) การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณกำลังและพลังงานไฟฟ้าในระบบสามเฟสมีความสำคัญต่อการติดตามการใช้ไฟฟ้าและการประเมินค่าใช้จ่ายพลังงานอย่างแม่นยำ โดยใช้การบันทึกข้อมูลเป็นช่วงเวลา เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการใช้โหลดจริงได้อย่างละเอียดและต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าจริง กำลังรีแอกทีฟ และพลังงานรวม เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนจัดการพลังงานและคิดค่าไฟฟ้าได้ถูกต้องตามเกณฑ์ สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏได้ดังสมการที่ (1) และสามารถหาตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าจริงได้จากสมการที่ (2) และ (3)

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \quad (1)$$

$$PF_t = \frac{P_t}{S_t} \quad (2)$$

$$P_t = \sqrt{3} V_{LL} I_L \cos \theta \quad (3)$$

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา 5 นาที โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยถูกนำมาคูณกับช่วงเวลา เพื่อให้ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงนั้น ซึ่งจะได้ทั้งพลังงานไฟฟ้า (kWh) ตามสมการที่ (4) จากนั้นเมื่อนำค่าพลังงานที่ได้จากแต่ละช่วงเวลา 5 นาทีมาบวกกันตลอด 24 ชั่วโมง หรือ 288 ช่วงเวลา จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมต่อวันตามสมการที่ (5) ซึ่งสามารถสะท้อนถึงปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงในหนึ่งวัน ทั้งด้านพลังงานที่นำไปใช้งานโดยตรงและพลังงานรีแอกทีฟ

$$E_{kWh,t} = P_t \times \frac{5}{60} \quad (4)$$

$$E_{day} = \sum_{t=1}^{288} E_{kWh,t} \quad (5)$$

บทความนี้คำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้อิฟฟ้าประเภทที่ 3 ตารางที่ 1 แสดงอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ ซึ่งจะอาศัยข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่บันทึกทุก 5 นาที นำมาคูณกับช่วงเวลา เพื่อหาพลังงานไฟฟ้า (kWh) ของแต่ละช่วง และรวมผลตลอดทั้งวัน จากนั้นจะแยกพลังงานเป็นช่วง On-peak และ Off-peak ตามโครงสร้างอัตราของการไฟฟ้า นอกจากนี้ยังต้องหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand) โดยคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังในระยะเวลา 15 นาที และเลือกค่าสูงสุด ซึ่งจะถูกนำไปคิดค่า Demand ร่วมกับค่าพลังงานไฟฟ้า เมื่อได้พลังงานช่วง Peak และ Off-peak แล้ว จึงนำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ส่วน Demand ที่ได้จากค่ากำลังสูงสุดถูกคิดตามอัตราที่กำหนด พร้อมรวมค่าบริการประจำเดือน ค่า Ft และค่าปรับด้านเพาเวอร์แฟกเตอร์ และนำมารวมกับ VAT 7% เพื่อให้ได้ค่าไฟฟ้ารวมต่อเดือน

$$Cost_{energy} = (C_{on_peak} \times E_{on_peak}) + (C_{off_peak} \times E_{off_peak}) \quad (6)$$

$$Cost_{demand} = (C_{demand} \times P_{demand}) \quad (7)$$

$$Cost_{Ft} = [C_{Ft} \times (E_{on_peak} + E_{off_peak})] \quad (8)$$

$$C_{subtotal} = Cost_{energy} + Cost_{demand} + Cost_{Ft} + C_{service} \quad (9)$$

$$VAT = 0.07 \times C_{subtotal} \quad (10)$$

$$Cost_{total} = C_{subtotal} + VAT \quad (11)$$

โดยที่

C_{on_peak} คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานช่วง On peak (บาท/kWh)

C_{off_peak} คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานช่วง Off-peak (บาท/kWh)

C_{demand} คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kW)

$C_{service}$ คือ ค่าบริการรายเดือน (บาท/เดือน)

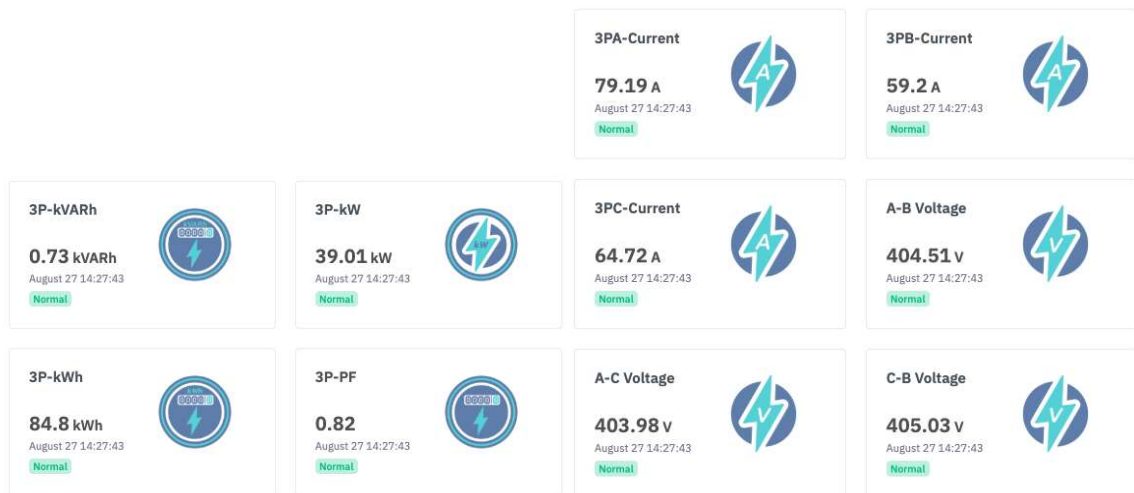
C_{Ft} คือ ค่า Ft (บาท/kWh)

ตารางที่ 1 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff : TOU Tariff)

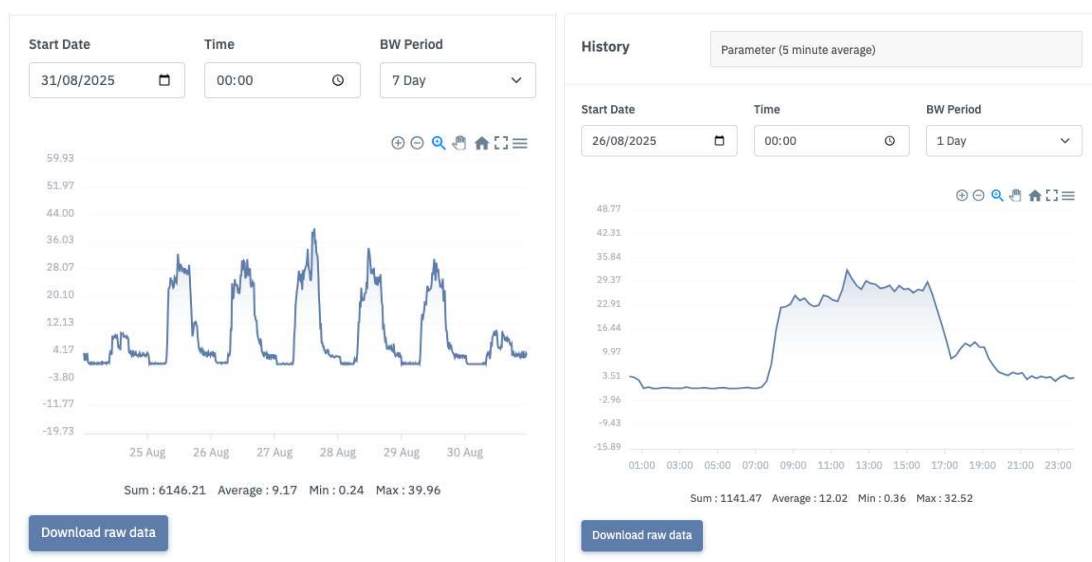
ระดับแรงดันไฟฟ้า	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (Peak) (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
		On-Peak	Off-Peak	
แรงดัน 22 – 33 กิโลโวลต์	132.93	4.1839	2.6037	312.24

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลแสดงให้เห็นผลการดำเนินงานวิจัย ทั้งในเชิงข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ พร้อมทั้งการตีความหมายและเชื่อมโยงกับทฤษฎี จากการออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารและทำการทดสอบวัดพลังงานในอาคารแสดงให้เห็นว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบ รูปที่ 4 แสดงผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ในการประเมินความถูกต้องของระบบ ได้เปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมืออ้างอิง Fluke 1738 Power Logger ภายใต้อาการการทำงานเดียวกัน โดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ความถี่ และตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 4 ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า



(ก)

(ข)

รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าราย 7 วัน และกำลังไฟฟ้ารายวันที่ตรวจวัดในหน่วยกิโลวัตต์

รูปที่ 5 (ก) แสดงกำลังไฟฟ้าราย 7 วันที่ตรวจวัดในหน่วยกิโลวัตต์ ระหว่างวันที่ 25 - 31 สิงหาคม 2568 มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 39.96 kW รูปที่ 5 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้ารายวัน ของวันที่ 26/08/2025 (ค่าเฉลี่ยทุก 5 นาที) ภาพรวมแสดงโหลดฐานช่วงกลางคืนประมาณ 2-3 kW โหลดของช่วงกลางวัน 20-28 kW และโหลดสูงสุดที่ 32.52 kW ในช่วงเที่ยง จากนั้นโหลดค่อย ๆ ลดลง มีค่าโหลดเฉลี่ยทั้งวัน 12.02 kW ค่าต่ำสุด 0.36 kW และคิดเป็นพลังงานตลอดวัน 288.5 kWh

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ค่าจาก Power meter Fluke 1738 Power Logger			ระบบตรวจวัดพลังงาน ที่สร้างขึ้น			ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
แรงดันไฟฟ้า (V)	400.55	401.99	401.45	399.26	401.60	399.83	0.274
กระแสไฟฟ้า (A)	67.71	53.74	59.38	71.07	53.08	59.42	1.515
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA)	42.09			42.44			0.832
กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	34.43			35.63			3.485
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar)	24.21			22.79			5.865
ความถี่ (Hz)	50.03			50.03			0.00
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.83			0.84			1.20

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดจาก Fluke 1738 Power Logger และระบบตรวจวัดพลังงานที่สร้างขึ้น ของวันที่ 3 กันยายน 2568 เวลา 15:30 น. จากการทดสอบ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและติดตามพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งสามารถส่งข้อมูลผ่าน V-BOX H-WF ไปยังระบบคลาวด์และแสดงผลผ่าน mDashboard ได้แบบเรียลไทม์ การเปรียบเทียบกับ Fluke 1738 Power Logger พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าจริง ความถี่ และตัวประกอบกำลังอยู่ที่ 0.274%, 1.515%, 0.832%, 3.485%, 0.000% และ 1.20% ตามลำดับ ขณะที่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5.865% ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรปรับปรุงในอนาคต ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดและติดตามรูปแบบการใช้พลังงานในอาคารได้ อย่างไรก็ตาม การใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงควรพิจารณาคุณลักษณะความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่มเติม รูปที่ 6 แสดงการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ Fluke 1738 Power Logger เปรียบเทียบกับชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น



รูปที่ 6 การตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ Fluke 1738 Power Logger เปรียบเทียบกับชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานไฟฟ้าเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2568

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	ความต้องการพลังงานไฟฟ้า	พลังงานไฟฟ้าช่วง On Peak	พลังงานไฟฟ้าช่วง Off Peak	พลังงานไฟฟ้าช่วง Holiday	รวมเงินค่าไฟฟ้า
ประเภทที่ 3.2 กิจการขนาดกลาง (TOU)	22-33 kV	39.60 kW	5,493.60 kWh	756.00 kWh	1,024.00 kWh	36,965.83 บาท

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดกลาง ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2568 โดยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 39.60 กิโลวัตต์ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแบ่งเป็นช่วงเวลา ได้แก่ ช่วง On Peak 5,493.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง ช่วง Off Peak 756.00 กิโลวัตต์ชั่วโมง และช่วง Holiday 1,024.00 กิโลวัตต์ชั่วโมง รวมการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 7,273.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อรวมค่าใช้ไฟฟ้าทุกส่วนแล้วคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 36,965.83 บาท

สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคาร พบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้ครบถ้วนตามที่ออกแบบ ทั้งแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และค่าตัวประกอบกำลัง ผลการทดสอบการวัดกำลังไฟฟ้ายาวในวันที่ 26 สิงหาคม 2568 แสดงให้เห็นรูปแบบโหลดที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานอาคาร โดยมีโหลดฐานช่วงกลางวันอยู่ที่ 2-3 kW และมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 32.52 kW ในช่วงกลางวัน รวมพลังงานตลอดวัน 288.5 kWh ขณะที่ค่าเฉลี่ยทั้งวันอยู่ที่ 12.02 kW ส่วนการตรวจวัดต่อเนื่องในช่วง 7 วันระหว่างวันที่ 25-31 สิงหาคม 2568 พบว่ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 39.96 kW แสดงถึงความสามารถของระบบในการเก็บและติดตามข้อมูลระยะยาว เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมืออ้างอิง Fluke 1738 Power Logger พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระดับความต่างเพียงเล็กน้อย ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้แทนเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ในการติดตามและจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังรองรับการแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้เพื่อการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน งานวิจัยในอนาคตจะทำการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมโหลด คาดการณ์การใช้พลังงาน และแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB68023/2568 รหัสโครงการ 202970 โครงการวิจัย เรื่อง การจัดการพลังงานที่เหมาะสมของอาคารอัจฉริยะด้วยอัลกอริทึมเมตาฮิวริสติก โดยพิจารณาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย: กรณีศึกษาโหลดการใช้งานไฟฟ้าในอาคารเรียน ปีงบประมาณ 2568 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bocheng, Z., "Design of Building Energy Monitoring and Management System," 2012 Second International Conference on Business Computing and Global Informatization, Shanghai, China, 2012, pp. 645-648, doi: 10.1109/BCGIN.2012.173.

- [2] Lima Baima, R., Andolfi, L., Burcheri, L. M., Pavić, I., and Fridgen, G. (2024). *Sociotechnical Design of Building Energy Management Systems in the Public Sector: Five Design Principles*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4851104>
- [3] Quesada-Allerhand, J., Kazanci, O. B., Hepf, C., Auer, T., and Smith, I. F. C. (2025). A combined approach to Measurement-System-Design and system identification in building energy retrofits. *Energy and Buildings*, 338, Article 115711. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115711>
- [4] Ożadowicz, A. (2022). A Hybrid Approach in Design of Building Energy Management System with Smart Readiness Indicator and Building as a Service Concept. *Energies*, 15(4), 1432. <https://doi.org/10.3390/en15041432>
- [5] Saleem, M. S., Asad, A., Muwahid, U., Raza, A., and Haider, A. (2023). Design and Development of Net Metering-Based Energy Meter. *Engineering Proceedings*, 46(1), 22. <https://doi.org/10.3390/engproc2023046022>
- [6] Boonraksa, T., *et al.*, "Optimal Appliance Scheduling in Grid-Connected Commercial Buildings by Considering the Electric Vehicle Charging Load Using Metaheuristic Optimization Algorithms," *2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2024, pp. 145-150, doi: 10.1109/ICPEI61831.2024.10748852.
- [7] Azhar, N., Arif, F., and Khan, A. B. (2023). Framework for Energy Performance Measurement of Residential Buildings Considering Occupants' Energy Use Behavior. *Engineering Proceedings*, 44(1), 15. <https://doi.org/10.3390/engproc2023044015>