



การพัฒนาระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

วรพล กออ่อนตชัย¹ ชาคริต ปานแป้น¹ ภูษเนศ หลีชี¹ ภูริภัทร สุวรรณมณี¹
จิรวรรณ หอมจันทร์² และ อิศราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: issarapom.a@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 5 มีนาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 13 มีนาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยมีการออกแบบระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมขนาด 80 วัตต์ โดยทำการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองด้วยวงจรทดสอบบอร์ดร่วมกับโปรแกรม Microsoft Visual Basic ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุด ส่งผลให้แจ้งต่อการซ่อมบำรุง ผลการทดสอบชุดทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม สามารถใช้งานกับนำไปใช้งานกับโหลดทางไฟฟ้าได้ตามต้องการ นอกจากนี้ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ยังสามารถตรวจสอบความผิดปกติของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด; พลังงานแสงอาทิตย์; พลังงานลม; การตรวจสอบความผิดปกติ



Anomaly Detected System Development for Hybrid Power Generation Experimental Set with Solar and Wind Energy

Worrapol Koranuntachai¹, Chakrit Panpean¹, Phutanet Leese¹, Puriput Suwanmanee¹, Jeerawan Homjan² and Issaraporn Amornsawatwattana^{1*}

¹ Department of Instrument and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvamabhumi

* Corresponding author, E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th

Received: 6 January 2025; Revised: 5 March 2025; Accepted: 13 March 2025

Online Published: 24 April 2025

Abstract: This article aims to design and develop an advanced system for monitoring equipment malfunctions within an integrated solar and wind energy power generation experiment. The system is designed to control an 80-watt hybrid power generation system, combining solar and wind energy. Equipment malfunctions within the experimental setup are monitored through a sophisticated test circuit board in conjunction with Microsoft Visual Basic software, which displays the malfunction status of any damaged equipment, thereby facilitating maintenance procedures. The test results validate that the control and malfunction detection system for the hybrid solar and wind power generation setup can reliably operate with electrical loads as required. Moreover, the equipment monitoring system effectively detects system malfunctions, as verified by the measured values from the test circuit board, which fall within the reference range $\pm 3\%$ of standard measuring instruments.

Keywords: Hybrid Power Generation; Solar Energy; Wind Energy; Anomaly Detection System



1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้คนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และในอนาคต อีกทั้งเป็นกำลังหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จากแนวทางการขับเคลื่อนนโยบายการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรัฐบาลทางด้านระบบขนส่ง [1] เช่น การเปลี่ยนรถโดยสารประจำทางจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า การสนับสนุนให้เปลี่ยนรถยนต์สันดาปภายในเป็นรถยนต์ไฟฟ้า และการลดภาษีรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของการใช้รถยนต์ไฟฟ้าจึงส่งผลโดยตรงต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น เพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าถ่านหิน และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ [2-4] ส่งผลโดยตรงต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานสะอาดจึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญสำหรับการผลิตไฟฟ้าในยุคปัจจุบัน ซึ่งสามารถรองรับความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กำลังการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยี solar photovoltaic (solar PV) มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราที่สูงถึงปีละ 29 % ขณะที่พลังงานลมขยายตัวที่ 14 % ต่อปี ทำให้ ณ ปี 2020 โลกมีกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนรวมอยู่ที่ราว 1,600 จิกะวัตต์ ซึ่งเทียบเท่า 53 เท่าของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด

ของไทย โดยกว่า 90 % เป็นกำลังการผลิตจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (46% ของกำลังการผลิตติดตั้งสะสม ณ ปี 2020) และลม (45%) และที่เหลือเป็นพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ เช่น พลังงานหมุนเวียนที่ต้องการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวภาพ (8%) และพลังงานความร้อนใต้พิภพ (1%) มูลค่าเงินลงทุนในพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นปีละราว 3.7% และสถิติการใช้พลังงานในประเทศไทย ในปี 2024 อยู่ที่ 2646 พันล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 3.9 โดยมูลค่าการใช้น้ำมันสำเร็จรูปซึ่งมีสัดส่วนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 55 ของมูลค่าการใช้พลังงานทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 รองลงมาเป็นมูลค่าการใช้ไฟฟ้าซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 36 ของมูลค่าการใช้พลังงานทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.6 ในขณะที่มูลค่าการใช้ถ่านหิน ลดลงร้อยละ 29.4 มูลค่าการใช้ก๊าซธรรมชาติลดลงร้อยละ 11.7 และมูลค่าการใช้พลังงานทดแทนลดลงร้อยละ 5.8 [5]

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในปี 2022 [6] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดความเร็วลมและพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพาให้ใช้งานกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วลม และพลังงานแสงอาทิตย์และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดความเร็วลมและพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพา ผลจากการวิจัยพบว่าการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วลมจากเครื่องมือ Digital Anemometer และ Wind Transmitter สามารถเก็บข้อมูล และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์จากเครื่องมือ Tenmars TM-750 และ Pyranometer สามารถเก็บข้อมูล และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ,



ในปี 2013 [7] ได้สร้างชุดสาริตการผลิตรกระแสไฟฟ้า ด้วยพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน โดยใช้พลังงานทดแทน 3 ระบบ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ เพื่อเป็นสื่อการสอน มีผลการทดลองดังนี้ พลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้น พลังงานน้ำ เมื่อความเร็วรอบของกังหันน้ำเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำจะสูงขึ้นด้วย และพลังงานลมเมื่อความเร็วรอบของกังหันลมเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานลมจะสูงขึ้นด้วย, และในปี 2014 [8] ได้สร้างอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์ขนาด 500 วัตต์ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องใช้ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์จากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ รายละเอียดงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบการทำงานของ วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ รูปคลื่นไซน์ จนถึงการทดสอบและสรุปผลการผลิตรกระแสไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สามารถรับแรงดันด้านเข้าขนาด 12-24 โวลต์ ได้ จากเซลล์แสงอาทิตย์ และมีแรงดันด้านออกขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จะมีการทำงาน 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้ พลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะสูงขึ้นซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับความเข้มแสง อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ รูปคลื่นไซน์ ได้นำเอาพลังงานแสงอาทิตย์

มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะใช้แบตเตอรี่มาประจุเก็บไว้ เพื่อจ่ายให้วงจร พุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ ทางคณะวิจัยจึงได้นำแนวคิด และหลักการมาประยุกต์ใช้งานกับบทความวิจัยนี้ โดยจุดเด่นของบทความนี้คือการสลับการทำงานระหว่างกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถใช้งานพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งกลางวันและกลางคืน โดยควบคุมการทำงานผ่านบอร์ด Arduino อีกทั้งยังมีซอฟต์แวร์ และวงจรตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุดทำให้ง่ายต่อการซ่อมแซม และการพัฒนาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในอนาคต

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [9] และพลังงานลม [10] เป็นหนึ่งในทางเลือกของพลังงานพลังงานสะอาดที่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมีระบบการแปลงผันและการจัดการพลังงานที่ซับซ้อน [11-12] หากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทำงานผิดปกติ จะเป็นเรื่องยากในการตรวจสอบและซ่อมบำรุง ซึ่งจะต้องใช้ความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานในการตรวจสอบ รวมถึงการซ่อมบำรุง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งสามารถแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดระยะเวลา



การตรวจสอบอุปกรณ์ที่ชำรุดเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบผลิตไฟฟ้า และสามารถซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ชำรุดได้อย่างถูกต้อง

การสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดเริ่มต้นจากความต้องการใช้พลังงานสะอาดในการผลิตไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน [13] และพลังงานลมที่มีความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืน [14] จึงเป็นเหตุผลในการสร้างชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลม ซึ่งสามารถรองรับการผลิตไฟฟ้าได้ทั้งในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืน โดยมีระบบควบคุมการแปลงผันพลังงานไปเก็บสะสมที่แบตเตอรี่ เพื่อจ่ายไปยังโหลดที่ต้องการใช้งาน นอกจากนี้ ในชุดทดลองดังกล่าวมีระบบตรวจสอบความผิดปกติในระบบไฟฟ้าและความผิดปกติของอุปกรณ์ ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุด ทำให้ง่ายในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงระบบผลิตเป็นการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าและรองรับการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าในอนาคต

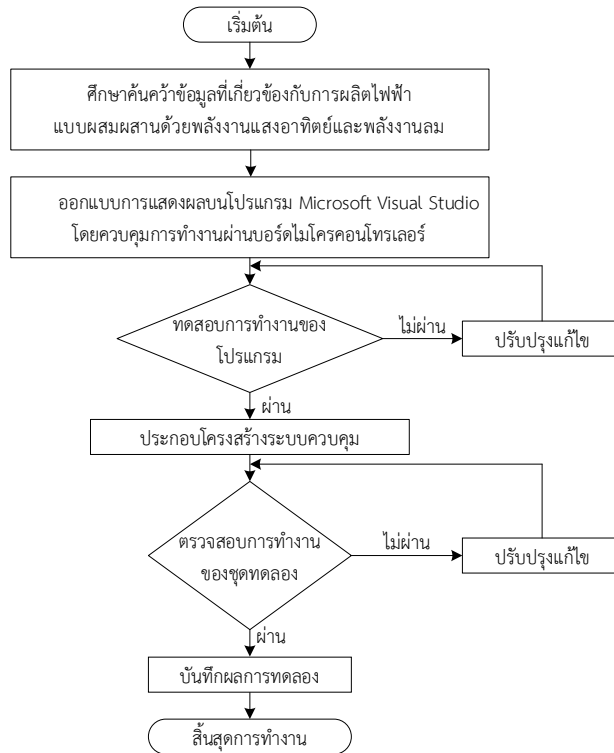
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ไปจนถึงการออกแบบชิ้นงานและการจัดทำชิ้นงาน โดยสามารถแสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

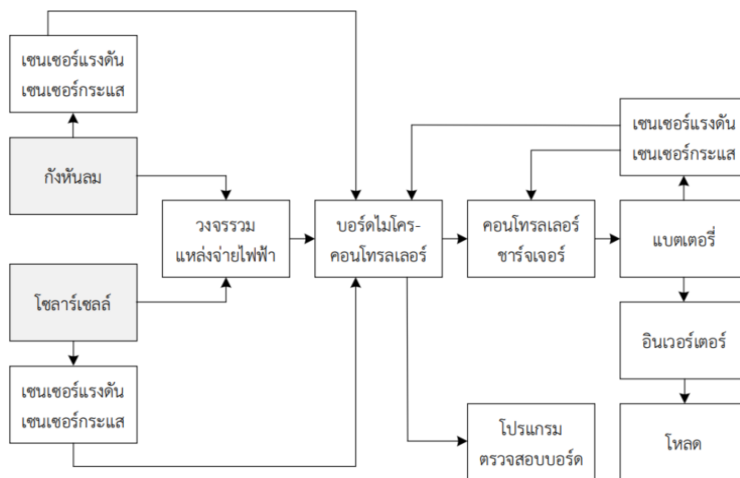
2.1 ภาพรวมของงานวิจัย

เริ่มต้นการทำวิจัย โดยการศึกษาข้อมูลหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบอุปกรณ์ จัดซื้ออุปกรณ์ และดำเนินการจัดทำตัวชุดทดลอง ตรวจสอบการทำงาน และแก้ไขข้อผิดพลาด และสรุปผล โดยสามารถเขียนแผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 1

โครงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม แสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และกังหันลมทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีเซนเซอร์แรงดันและเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยค่าที่ได้จากการวัดจะถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และควบคุมการชาร์จพลังงานไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ นอกจากนี้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปยังระบบตรวจสอบความผิดปกติของระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อแสดงสถานะให้กับผู้ใช้งาน พลังงานที่ได้ประจุลงแบตเตอรี่จะถูกแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายให้กับโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการ โดยมีการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อส่งข้อมูลให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับตรวจสอบสถานะการทำงานทางด้านเอาต์พุตที่จ่ายไปยังโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้า การแสดงผลสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ดำเนินการบนโปรแกรม Microsoft Visual Studio



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม



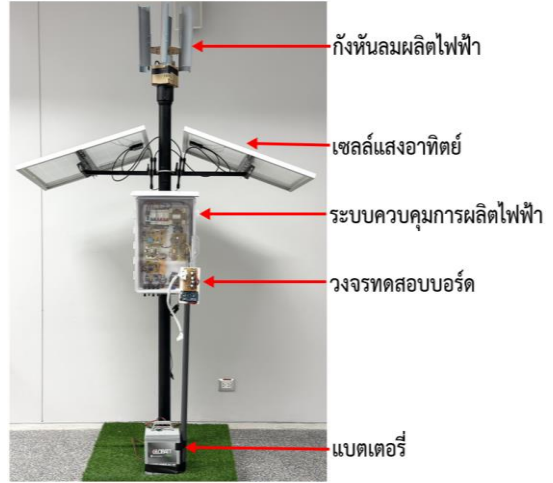
2.2 การออกแบบทางด้านระบบฮาร์ดแวร์

ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ของชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย กังหันลมผลิตไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า วงจรทดสอบบอร์ด และแบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

การสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะใช้ท่อพลาสติกพีวีซีขนาด 2 นิ้ว ทำการตัดแบ่งครึ่งเพื่อเป็นใบพัดในแนวตั้ง จำนวน 6 ใบ ซึ่งทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางก้าน (D) เท่ากับ 36 เซนติเมตร และมีความสูง (h) เท่ากับ 30 เซนติเมตร สำหรับการรับพลังงานจากลม โดยตัวแกนของใบพัดจะต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (P_{gen}) พิจารณาได้จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด (P_{use}) ร่วมกับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (η_{gen}) และประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานลมทางกล (η_{wind}) แสดงได้ดังสมการที่ (1) ซึ่งชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดในงานวิจัยนี้มีความต้องการใช้พลังงาน 80 วัตต์ และพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 70% และประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานลมทางกลเท่ากับ 60% [15] ดังนั้น จึงเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 180 วัตต์

$$P_{gen} = \frac{P_{use}}{\eta_{gen} \times \eta_{wind}} = \frac{80}{0.8 \times 0.6} = 166.67 \text{ W} \quad (1)$$



รูปที่ 3 ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด

การเลือกขนาดท่อพลาสติกพีวีซี 2 นิ้ว ที่ทำการตัดแบ่งครึ่งเพื่อเป็นใบพัดในแนวตั้ง จำนวน 6 ใบ พิจารณาได้จากสมการที่ (2)

$$P_{wind} \geq P_{gen} = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (2)$$

เมื่อ v คือ อัตราเร็วของลมประมาณเท่ากับ 10 m/s
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศประมาณเท่ากับ 1.23 kg/m^3

A คือ พื้นที่กวาดอากาศประมาณเท่ากับ πDh

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) สามารถยืนยันการออกแบบพัดของการสร้างกังหันลมได้ดังสมการที่ (3)

$$P_{wind} \geq P_{gen} = \frac{1}{2} \times 1.23 \times 10^3 \times \pi \times 0.36 \times 0.3 = 200 \text{ W} \quad (3)$$



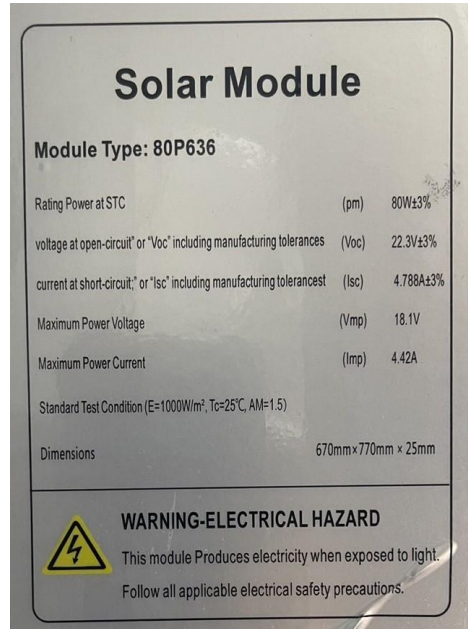
2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกออกแบบให้ติดตั้งท่า มุมเอียง 15 องศา เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับ แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16] การคำนวณ ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) สำหรับนำมาสร้าง ชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่มีความต้องการใช้พลังงาน 80 วัตต์ แสดงได้ดังสมการที่ (4) โดยพิจารณาการ ผลิตไฟฟ้า (PSH) 4.8 ชั่วโมงต่อวัน และ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (η_{PV}) เท่ากับ 50% [17] ดังนั้นจึงเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 80 วัตต์ จำนวน 2 แผง โดยรายละเอียดของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ใช้ สามารถแสดงได้จากป้ายบอกพิกัด (name plate) แสดงดังรูปที่ 4

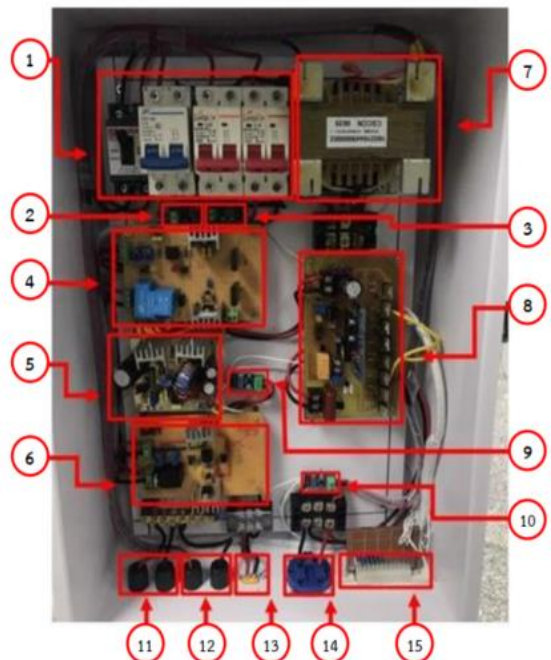
$$P_{PV} = \frac{P_{use}}{\eta_{PV}} = \frac{80}{0.5} = 160 \text{ W} \quad (4)$$

2.2.3 ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า

ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่ สำคัญทั้งหมด 15 ส่วน แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่ง ประกอบด้วย เบรกเกอร์ (1) เซนเซอร์วัดกระแสของ เซลล์แสงอาทิตย์ (2) เซนเซอร์วัดกระแสกึ่งหน้ลม (3) วงจรรวมแหล่งจ่ายไฟฟ้า (4) วงจรแปลงผันแบบบัคกิ้ง (5) วงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่ (6) หม้อ แปลงความถี่ต่ำ (7) วงจรอินเวอร์เตอร์ (8) เซนเซอร์ วัดกระแสแบตเตอรี่ (9) เซนเซอร์วัดกระแสโหลด (10) ขั้วรับพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (11) ขั้วรับ พลังงานจากกึ่งหน้ลม (12) ขั้วรับพลังงานจาก แบตเตอรี่ (13) ขั้วสำหรับต่อโหลด (14) ขั้วต่อ สายสัญญาณไปยังวงจรทดสอบบอร์ด (15)



รูปที่ 4 ป้ายบอกพิกัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์



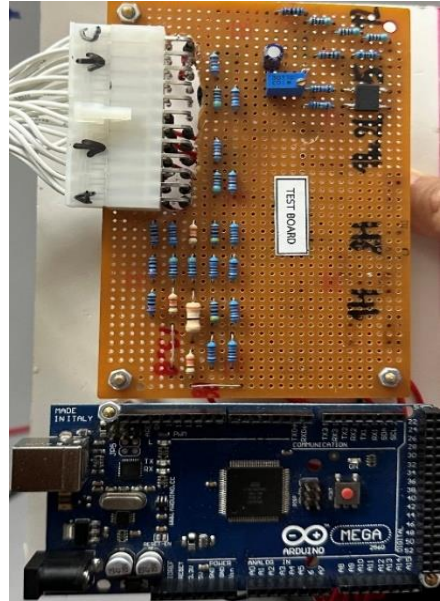
รูปที่ 5 ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า



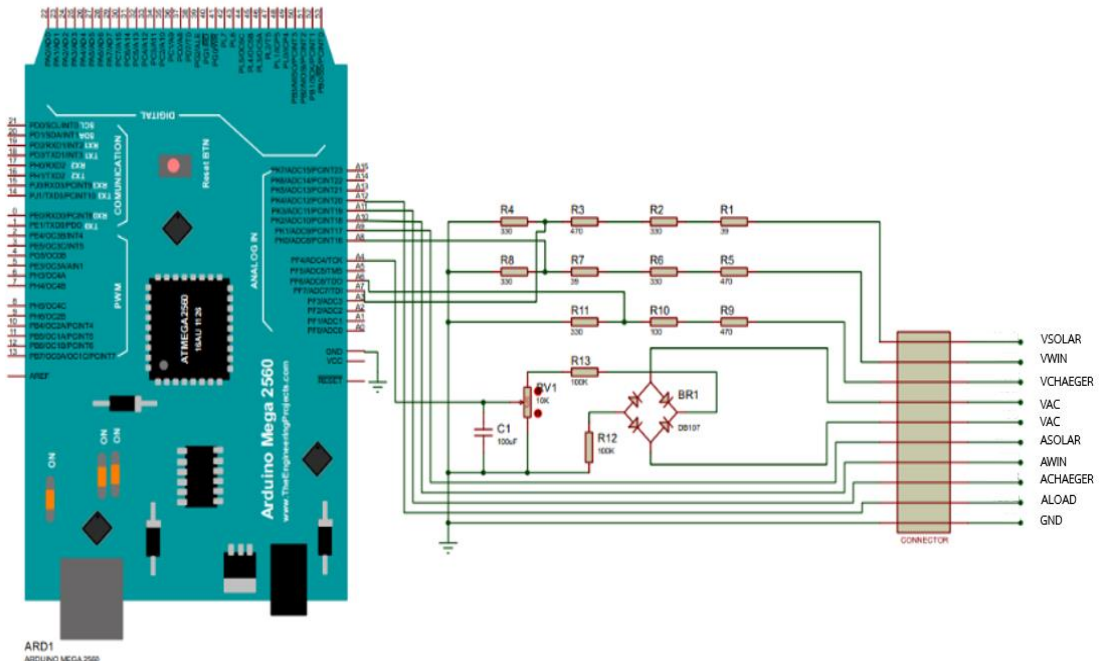
บทความวิจัย

2.2.4 วงจรทดสอบบอร์ด

วงจรทดสอบบอร์ดเป็นวงจรที่ใช้สำหรับรับข้อมูลจากกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าและทำการปรับระดับแรงดันให้เหมาะสม จากนั้นใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560 ทำการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า สำหรับตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่พิจารณา นอกจากนี้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปแสดงผลไปยังโปรแกรม Microsoft Visual Studio โดยวงจรทดสอบบอร์ดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 6 และตำแหน่งจุดวัดต่างๆ ของบอร์ด ARDUINO แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 วงจรทดสอบบอร์ด



รูปที่ 7 ตำแหน่งจุดวัดต่างๆ ของบอร์ด ARDUINO



จากรูปที่ 7 แสดงจุดวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภายในชุดทดลองดังกล่าวจะถูกส่งข้อมูลไปยังบอร์ด Arduino เพื่อทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากนั้นส่งข้อมูลไปแสดงผลที่โปรแกรม TESTBOARD

1. จุดวัดกระแสกังหันลม (Awin)
2. จุดวัดกระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (Asolar)
3. จุดวัดแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (Vsolar)
4. จุดวัดแรงดันกังหันลม (Vwin)
5. จุดวัดแรงดันชาร์จแบตเตอรี่ (Vcharge)
6. จุดวัดกระแสแบตเตอรี่ (Acharge)
7. จุดวัดกระแสโหลด (Aload)
8. จุดวัดแรงดันด้านเอาต์พุตกระแสสลับ (VAC)

จากรูปที่ 8 แสดงถึงการแจ้งเตือนถึงผู้ใช้งานกรณีที่เกิดความผิดปกติ ดังนี้

1. กระแสเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 2 ครั้ง
2. แรงดันเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 3 ครั้ง
3. แรงดันต่ำกว่าพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 4 ครั้ง
4. อุณหภูมิเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 5 ครั้ง

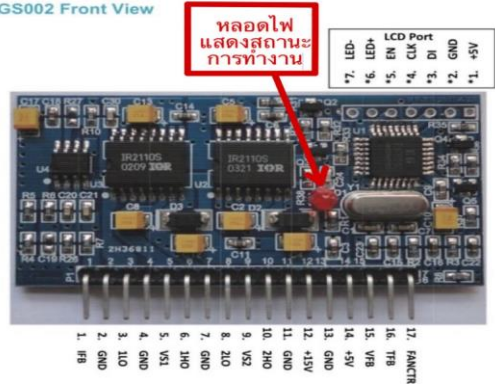
โดยเมื่อระบบทำงานปกติ หลอดไฟจะเปิดตลอดเวลา

2.2.5 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตต์ประสงค์เพื่อรองรับการใช้พลังงาน (P_{use}) 80 วัตต์ เป็นระยะเวลา (t_{use}) 3 ชั่วโมง และพิจารณาความลึกของการคายประจุ (DoD) ที่ 60% ดังนั้น จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 45 แอมป์แอมป์-ชั่วโมง แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$Ah = \frac{P_{use} \times t_{use}}{V_{batt} \times DoD} = \frac{80 \times 3}{12 \times 0.6} = 33.33 \text{ Ah} \quad (5)$$

EGS002 Front View



รูปที่ 8 การแจ้งเตือนความผิดปกติ

2.3 การออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์

2.3.1 การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE

การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE มีจุดประสงค์เพื่อเป็นตัววัดแรงดันที่จุดตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง ซึ่งจะทำให้การอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกที่ส่งมาจากวงจรตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลองที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าผลลัพธ์ในช่วง 0-1023 สามารถแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE มี ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขาอินพุตสำหรับอ่านค่าสัญญาณแอนาล็อก

ขั้นตอนที่ 2 ประกาศชื่อตัวแปรเพื่อใช้เก็บค่าจากเซนเซอร์ แสดงค่าผลลัพธ์ และใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆในระบบตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 สร้างฟังก์ชันเพื่อให้ง่ายต่อการเรียกใช้งานโดยที่แต่ละฟังก์ชันจะมีรูปแบบการทำงานที่ใกล้เคียงกันคือใช้คำสั่งวนซ้ำ For Loop เพื่อกำหนดให้อ่านค่าสัญญาณอนาล็อก 5 ครั้ง เนื่องจากในการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกแต่ละครั้งของ Arduino Mega 2560 นั้นอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้น



ขั้นตอนที่ 4 กำหนดลำดับการทำงานของแต่ละฟังก์ชันให้ทำงานอย่างเป็นระบบแบบวนซ้ำภายในคำสั่ง void loop และกำหนดอัตราการความเร็วการสื่อสารพอร์ตอนุกรมด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที รวมถึงกำหนดการหน่วงเวลา 10 วินาทีที่ก่อนที่ระบบอื่นๆจะทำงานภายในคำสั่ง void setup

2.3.2 การเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio

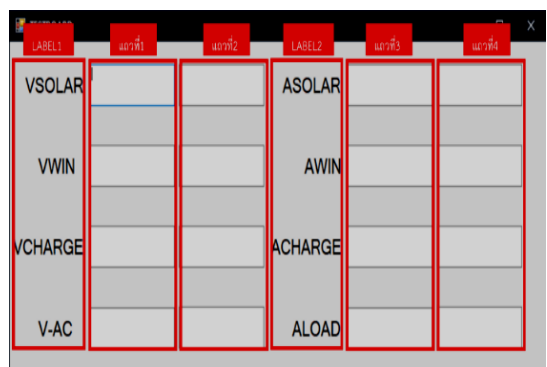
การเขียนโปรแกรมบนการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio มีจุดประสงค์เพื่อสร้างโปรแกรมแสดงผลการตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง ซึ่งเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยจะนำค่าผลลัพธ์ที่ได้จาก Arduino Mega 2560 มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการใช้งานว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่แล้วระบบจะสรุปการทำงานแต่ละจุดตรวจสอบให้ผู้ใช้งานได้รับทราบ กรณีที่ระบบไม่มีความผิดปกติจะแสดงค่าผลลัพธ์ว่า Pass รวมถึงค่าแรงดันที่วัดได้ และกรณีที่ระบบมีความผิดปกติเกิดขึ้นจะแสดงค่าผลลัพธ์ว่า Fault รวมถึงค่าแรงดันที่วัดได้ การเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio ใช้ ภาษา Visual basic มีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือก Control สำหรับแสดงผลลัพธ์ติดต่อกับผู้ใช้งาน และใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบโดย Control ที่ใช้คือ TextBox ทั้งหมด 16 ช่อง โดยแถวที่ 1 และ 3 จะเปลี่ยน Name เป็น TxtA-TxH แถวที่ 2 และ 4 จะเปลี่ยน Name เป็น Txttest1- Txttest8 ตามลำดับ และ Label ทั้งหมด 8 ช่อง โดยจะเปลี่ยน Text เป็น VSOLAR (แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์), VWIN (แรงดันกังหันลม), VCHARGE (แรงดันชาร์จเจอร์), V-AC (แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต), ASOLAR (กระแสเซลล์แสงอาทิตย์), AWIN

(กระแสกังหันลม), ACHARGE (กระแสชาร์จแบตเตอรี่), ALOAD (กระแสโหลด) ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 9

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดการเชื่อมต่อระหว่าง Microsoft Visual Studio กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 โดยใช้คำสั่ง SerialPort1.Port Name เพื่อกำหนดชื่อพอร์ตที่ต้องการเชื่อมต่อรับส่งข้อมูลจากนั้นใช้คำสั่ง SerialPort1.BaudRate เพื่อกำหนดอัตราการความเร็วการรับส่งข้อมูล ซึ่งต้องกำหนดให้ตรงกับความเร็วการรับส่งข้อมูลที่ Arduino Mega 2560 ใช้รับส่งข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 ใช้งานคำสั่ง SerialPort1_Data Received เพื่อรับข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ข้อมูลที่ถูกส่งมาจะอยู่ในบรรทัดเดียวกันทั้งหมดดังนั้นจึงใช้คำสั่ง SerialPort1.Read Line เพื่ออ่านค่าข้อมูลทั้งบรรทัด และสร้างตัวแปรชนิด String คือ srt เพื่อเก็บค่าข้อมูลที่ถูกส่งมาจากนั้นกำหนดตัวแปรชนิด String array คือ a, b, c, d, e, f, g, h และคำสั่ง srt.Split(",") เพื่อแยกการเก็บข้อมูลไว้ในตัวแปร a, b, c, d, e, f, g และ h



รูปที่ 9 การแสดงผลลัพธ์สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน



3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ดำเนินการโดยการสร้างเงื่อนไขในการทำงาน ซึ่งจะใช้โหลดที่กำลังวัตต์แตกต่างกันสามระดับ โดยใช้หลอดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นภาระทางไฟฟ้า โดยการทดลองจะทำการตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มทดลอง โดยตั้งค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และระดับกระแสไฟฟ้าที่ 0 แอมแปร์ หลังจากนั้นทำการปรับระดับกระแสไฟฟ้าจนถึงระดับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของโหลดแต่ละระดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มต้นทดลองเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าสูงสุดเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของระดับแรงดันไฟฟ้าที่กำลังวัตต์แต่ละระดับ โดยใช้โหลดที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- 1) ขนาด 2 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 1 หลอด
- 2) ขนาด 4 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 2 หลอด
- 3) ขนาด 6 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 2 หลอด และหลอดไฟ Led 9 วัตต์ 5 หลอด

ผลการทดลองการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์กึ่ง ซึ่งผลการทดลองในตารางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันแบบบัคค์ สามารถทำงานได้ตามความต้องการของโหลดทางไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ทดสอบครั้งที่ 1

กระแส โหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	11.9	1.9
4	12.0	0	12.0	3.5
6	12.0	0	11.2	5.2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ทดสอบครั้งที่ 2

กระแส โหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.1	1.8
4	12.0	0	11.9	3.6
6	12.0	0	11.2	5.3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ทดสอบครั้งที่ 3

กระแส โหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.0	1.7
4	12.0	0	11.8	3.4
6	12.0	0	11.2	5.4



3.2 การทดสอบระบบตรวจสอบความผิดปกติที่จุดทดสอบ

การทดลองนี้จะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดทดสอบของเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ซึ่งประกอบด้วย แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (Vsolar) แรงดันการชาร์จ (Vcharge) กระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (Asolar), กระแสแบตเตอรี่ (Abatt) กระแสโหลด (Aload) กระแสกังหันลม (Awind) และแรงดันกังหันลม (Vwind) โดยจะเปรียบเทียบการทำงานระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรทดสอบบอร์ด (Check Board) และแรงดันที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Digital Multimeter รุ่น Fluke 113) โดยการพิจารณาเงื่อนไขการชาร์จของอุปกรณ์ด้วยการเก็บค่าแรงดันและกระแสที่จุดทดสอบจากเครื่องมือวัดมาตรฐานในขณะที่การทำงานปกติของชุดทดสอบ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงให้กับการตรวจสอบการชาร์จของอุปกรณ์ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน แสดงว่า ที่จุดทดสอบอุปกรณ์มีการทำงานเป็น "ปกติ"

- เมื่อค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดมีค่าเกินในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน แสดงว่า ที่จุดทดสอบอุปกรณ์มีการทำงานเป็น "ผิดปกติ" จึงประเมินว่าอุปกรณ์ที่จุดวัดดังกล่าว เกิดการชาร์จ

ผลการทดสอบระบบตรวจสอบความผิดปกติที่จุดทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นชัดว่าการทำงานของชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่จุดทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัก์ ค่าเฉลี่ย

กระแส โหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.0	1.8
4	12.0	0	11.9	3.5
6	12.0	0	11.2	5.3

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์การตรวจสอบการทำงานของระบบตรวจสอบความผิดปกติ

จุด ทดสอบ	Check Board (V)	DMM (V)	ค่าความ ผิดพลาด (%)	สถานะการ ทำงาน
Vsolar	15.92	15.98	0.38	Pass
Vcharge	13.87	13.90	0.22	Pass
Asolar	2.57	2.64	2.73	Pass
Abatt	2.57	2.50	2.76	Pass
Awin	2.38	2.66	10.46	Fault
Aload	2.53	2.50	1.16	Pass
Vwind	4.39	4.41	0.45	Pass

กระแสกังหันลม (Awind) มีการทำงานผิดปกติ ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขอุปกรณ์ที่ชาร์จซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลม และทำการทดลองการตรวจสอบความแม่นยำของระบบตรวจสอบความผิดปกติของจุดทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดทดสอบของเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าโดยจะเปรียบเทียบการทำงานระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมทดสอบบอร์ดแรงดันที่ได้จากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด



4. สรุปผลการทดลอง

ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถรองรับการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าได้ 80 วัตต์ ตามวัตถุประสงค์การออกแบบ นอกจากนี้จึงตรวจสอบบอร์ดและโปรแกรมตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดยังสามารถให้สมรรถนะที่ดีในการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ โดยยืนยันได้จากผลการตรวจสอบในกรณีที่เกิดความผิดในอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและ อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Zhang, Z. Qu, Y. Zhang, X. Han and Y. Chai, Research on carbon emission reduction and carbon peaking strategies for power grid enterprises, 4th International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Proceeding, 2003, 944–949.
- [2] I. Purkayastha, and P.J. Savoie, Effect of harmonic on power measurement, IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 26(5), 944–949.

- [3] K. Yamashita, R. Minami, T. Inoue, T. Ohno, H. Ichimiya and H. Kamei, A study on dynamic behavior of coal-fired thermal power plant during significant system frequency rise after system separation, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Proceeding, 2011, 1–8.
- [4] J.L. Márquez, M.G. Molina and J.M. Pacas, Dynamic modeling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications, International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(1), 5772–5777.
- [5] <https://kc.dede.go.th/news-view.aspx?p>. (Accessed on 1 March 2025)
- [6] P. Khemmook and S. Thongsuk, Development and efficiency of portable wind speed and solar radiation, Journal of Industrial Technology and Innovation, 2022, 1(1), 24670.
- [7] V. Malavech, The demonstration set of electrical generation with hybrid renewable energy system, Journal of Thaksin University, 2013, 16(3), 29–38. (in Thai)
- [8] P. Kraisungnern and P. Chantachot, Sine wave inverter for solar cell, Project Report, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2014.



- [9] Y. Ying, E.J. Hu and R. Beebe, Solar aided regenerative rankine cycle, ASME 1997 International Joint Power Generation Conference, Proceeding, 1997, 555–560.
- [10] V. Yaramasu, B. Wu, P.C. Sen, S. Kouro and M. Narimani, High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies, Proceedings of the IEEE, Proceeding, 2015, 740–788.
- [11] H. Li, Y. Lei, Y. Geng, H. He, Q. Niu and K. Wang, A test methodology to verify reactive power support ability of wind turbines, 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Proceeding, 2022, 449–454.
- [12] H. Tebibel, Wind turbine power system for hydrogen production and storage: Techno-economic analysis, International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), Proceeding, 2018.
- [13] S.S. Ghosh and P. Mukhija, Backstepping controller design for maximum power harvesting from solar-wind hybrid energy conversion system, 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE), Proceeding, 2023.
- [14] R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, D.S. Prokopenko and L.V. Zaitseva, Development of hybrid solar generating module for high-efficiency solar energy station, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Proceeding, 2017, 360–364.
- [15] A.C. Bayeul-Lainé and G. Bois, Unsteady simulation of flow in micro vertical axis wind turbine, The International Symposium on Transport Phenomena, Proceeding, 2010, 1–8.
- [16] T.N. Tamer and A. Khatib, Review of designing, Installing and evaluating standalone photovoltaic power systems, Journal of Applied Sciences, 2010, 10(13), 1212–1228.
- [17] S. Yoomak, T. Patcharoen and A. Ngaopitakkul, Performance and economic evaluation of solar rooftop systems in different regions of Thailand, Sustainability, 2019, 11(23), 1–20.