การพัฒนาระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ชาญชัย เพ็ชรสุริยา

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: chanchai.pe@psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินสมรรถนะระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ โดยมุ่งเน้นการสร้างกลไกการบำรุงรักษาเชิงรุกและลดเวลาหยุดทำงานของระบบ (Downtime) จากปัญหาความผิดปกติของเครื่องทำลมแห้งในห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวิทยาศาสตร์มูลค่าสูงของหน่วยงาน

กระบวนการวิจัยดำเนินการตามแนวคิดการวิจัยและพัฒนา (R&D) โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) เริ่มจากการวิเคราะห์ประวัติการซ่อมบำรุงเพื่อออกแบบโครงสร้างวงจรระบบฮาร์ดแวร์แบบโมดูลาร์ ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ร่วมกับการบูรณาการเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมและโมดูล PZEM-004T สำหรับตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ระบบถูกพัฒนาให้ส่งผ่านข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังแอปพลิเคชัน Blynk และมีกลไกแจ้งเตือนภัยเชิงรุกแบบสองประสาน (Buzzer และ Telegram) เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่ำกว่าเกณฑ์วิกฤต

ผลการวิจัยพบว่าระบบแสดงสมรรถนะและความแม่นยำสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันลมไม่เกิน ± 0.15 บาร์ เมื่อเทียบกับเครื่องมาตรฐาน Anest Iwata และมีค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ± 0.7 โวลต์ กระแสไฟฟ้าไม่เกิน ± 0.13 แอมแปร์ เมื่อเทียบกับแคลมป์มิเตอร์ Fluke 375 FC สรุปได้ว่านวัตกรรมนี้สามารถเปลี่ยนผ่านระบบซ่อมบำรุงจากการตั้งรับไปสู่เชิงรุก ลดความเสี่ยงและป้องกันความเสียหายของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

คำสำคัญ: แรงดันลมอัด, Blynk, Telegram Alert, Scientific Instrument Maintenance

Development of a Dry Air Pressure and Electrical Status Monitoring System of Air Dryers for Scientific Instruments

Chanchai Petsuriya

Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

Corresponding author: chanchai.pe@psu.ac.th

Abstract

This research aims to develop and evaluate the performance of a dry air pressure and electrical status monitoring system of air dryers for scientific instruments. The primary objective is to establish a proactive maintenance mechanism and minimize system downtime resulting from malfunctions in the air drying unit within the laboratory. Such issues directly impact the stability, precision, and operational efficiency of high-value scientific equipment.

The research methodology follows a Research and Development (R&D) framework, utilizing the Systems Development Life Cycle (SDLC) model. Based on historical maintenance data analysis, a modular hardware circuit architecture was designed, controlled by an ESP8266 microcontroller. This setup integrates a pneumatic pressure sensor and a PZEM-004T electrical power module to measure physical and electrical parameters. The system is programmed to transmit real-time data streaming to the Blynk application and features a dual-channel proactive alert mechanism (via buzzer and Telegram) that triggers instantly when parameters drop below critical thresholds.

The experimental results demonstrate high operational efficiency and precision. The system achieved a measurement error of less than ± 0.15 bar for dry air pressure compared to the standard Anest Iwata controller. For electrical parameters, the voltage and current measurement errors were within ± 0.7 V and ± 0.13 A, respectively, when verified against a standard Fluke 375 FC clamp meter. In conclusion, this innovation successfully transforms maintenance operations from a reactive approach to a proactive strategy, effectively reducing risks and preventing damage to scientific instruments sustainably.

Keywords: Compressed Air Pressure, Blynk, Telegram Alert, Scientific Instrument Maintenance

บทนำ

ในยุคปัจจุบัน การวิเคราะห์ทดสอบและวิจัยทางวิทยาศาสตร์จำเป็นต้องพึ่งพาเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงมูลค่าสูงที่มีความซับซ้อนและอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หรือเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องใช้ลมอัดสะอาดและแห้ง (Clean Dry Air: CDA) ในการขับเคลื่อนระบบนิวแมติกส์และควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในเครื่องกลให้บริสุทธิ์ โดยตามมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization [ISO], 2010) ลมอัดสำหรับเครื่องมือวิเคราะห์ระดับสูงต้องมีค่าจุดน้ำค้างความดัน (Pressure Dew Point) ต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส (Purity Class 2) เนื่องจากความชื้นเพียงเล็กน้อยสามารถก่อให้เกิดปรากฏการณ์การปลดปล่อยก๊าซ (Outgassing) ในระบบสุญญากาศ หรือทำปฏิกิริยากับชิ้นส่วนทัศนศาสตร์ภายในเครื่อง FTIR ที่ทำจากผลึกเกลือโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จนเกิดการละลายจากความชื้น (Deliquescence) ส่งผลให้พื้นผิวขรุขระและสูญเสียความโปร่งแสงอย่างถาวร ระบบจ่ายลมอัดแห้งจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการปกป้องชิ้นส่วนภายในไม่ให้ชำรุดเสียหายในระดับหายนะ (Catastrophic Hardware Failure) (Shimadzu Corporation, 2010)

ประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนชื้นที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศสูงเกินกว่าร้อยละ 70 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ทั่วไปที่ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 60 สถานการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ ซึ่งเป็นหน่วยงานกลางที่ให้บริการวิเคราะห์ทดสอบขั้นสูงแก่ภาครัฐและภาคอุตสาหกรรมตามมาตรฐานสากล (เช่น ISO/IEC 17025) แม้ทางสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์ฯ จะมีการติดตั้งเทคโนโลยีเครื่องทำลมแห้งประสิทธิภาพสูงแบบใช้สารทำความเย็น (Refrigerated Air Dryer) แต่อุปสรรคสำคัญคือระบบการจัดการส่วนใหญ่มักเป็นแบบเชิงรับ (Reactive) ที่จะพบปัญหาเมื่อความชื้นหรือแรงดันผิดปกติจนเครื่องมือหยุดทำงาน (Downtime) ไปแล้ว ซึ่งความล่าช้านี้ส่งผลให้ค่าซ่อมบำรุงสูงลิ่วและกระทบต่อความน่าเชื่อถือขององค์กร ดังจะเห็นได้จากข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุงในช่วงปี พ.ศ. 2562 ถึง พ.ศ. 2566 ที่พบเหตุการณ์เครื่องทำลมแห้งขัดข้องรวมทั้งสิ้น 21 ครั้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเสียหายของตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือวิจัย รวมถึงภาระค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหัวปั๊มที่สูงถึง 500,000 บาท

เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว เทคโนโลยีการเฝ้าระวังในปัจจุบันได้ก้าวข้ามไปสู่สถาปัตยกรรมอัจฉริยะผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ทั้งในมิติการแพทย์และวิทยาศาสตร์ (Medical Internet of Things: MIoT) ที่มุ่งเน้นการเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อตอบสนองต่อความปลอดภัยของอุปกรณ์อย่างทันท่วงที ร่วมกับการเติบโตของระบบ Industrial Internet of Things (IIoT) ที่มีอัตราการเติบโตของตลาดทั่วโลกเฉลี่ยสะสมต่อปี (CAGR) สูงถึงร้อยละ 23.3 (Grand View Research, 2024) ทั้งนี้ในการตรวจสอบสถานภาพของระบบจ่ายลมแห้ง “แรงดันลม” (Air Pressure) ถือเป็นตัวแปรต้นวิกฤตที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการทำงานและการอุดตันของฟิลเตอร์ได้รวดเร็วที่สุด ซึ่งการสูญเสียแรงดันในระบบทุกๆ 1 บาร์ จะส่งผลให้เครื่องอัดอากาศต้องทำงานหนักขึ้นและสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การตรวจจับแรงดันในสภาวะเรียลไทม์จึงเป็นดัชนีชี้วัดที่ทั้งปกป้องเครื่องมือและรักษาประสิทธิภาพพลังงานของหน่วยงานไปพร้อมกัน

ด้วยเหตุผลและความจำเป็นดังกล่าว ในประเทศไทยจึงเริ่มมีการตื่นตัวในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ สัตยา บุญรัตนชู และคณะ (2565) ที่ได้พัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอุณหภูมิสำหรับตู้แช่เก็บตัวอย่างภายในสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ จนประสบความสำเร็จและสามารถป้องกันความเสียหายต่อตัวอย่างภายในห้องปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวคิดของ อิทธิพงษ์ เขมะเพชร (2561) ที่ได้พัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนโครงสร้างสะพานแบบเรียลไทม์ (Real-Time Monitoring and Warning System) ซึ่งมุ่งเน้นการตรวจจับความผิดปกติผ่านเซนเซอร์เพื่อแจ้งเตือนภัยและป้องกันความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างทันท่วงที นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มงานวิจัยของ ศศิธร พยัคฆ์ทอง และคณะ (2566) ที่ได้พัฒนาการแสดงผลแบบเรียลไทม์และระบบควบคุมสำหรับชิลเลอร์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยปรับเปลี่ยนระบบควบคุมเดิมที่ใช้รีเลย์เพียงอย่างเดียว มาเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติด้วยพีแอลซี (PLC) ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมและติดตามการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งขยายขีดความสามารถการปกป้องห้องปฏิบัติการ โดยทำการพัฒนาระบบเฝ้าระวังลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์โดยใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อประยุกต์ใช้ในสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ ระบบที่พัฒนาขึ้นจะใช้เซนเซอร์วัดค่าแรงดันลมแห้งและส่งผ่านข้อมูลผ่านแพลตฟอร์ม Blynk ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานบนคลาวด์ที่รองรับการจัดการข้อมูลแบบเรียลไทม์และบูรณาการร่วมกับระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Telegram เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดการประมวลผลข้อมูลที่เน้นการตอบสนองต่อเหตุการณ์วิกฤตได้ทันที (Immediate Response) ระบบนี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นสถาปัตยกรรมดิจิทัลเบื้องต้นที่ช่วยให้ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการและวิศวกรผู้เชี่ยวชาญสามารถตรวจสอบสถานะความปลอดภัยของเครื่องมือวิจัยมูลค่าสูงได้ทุกที่ทุกเวลา ลดความเสี่ยงจากการเกิด Downtime ของเครื่องมือ ลดผลกระทบต่อผู้ใช้บริการวิเคราะห์ทดสอบ และเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาสู่

การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) เพื่อปกป้องโครงสร้างพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และการบริการทดสอบของประเทศอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสร้างระบบเฝ้าระวังและระบบแจ้งเตือนแรงดันลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์
2. เพื่อทดสอบประสิทธิผลของระบบเฝ้าระวังและระบบแจ้งเตือนแรงดันลมแห้ง
3. เพื่อสร้างคู่มือใช้งานของระบบเฝ้าระวังและระบบแจ้งเตือนแรงดันลมแห้ง

ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) เพื่อพัฒนาระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบ (Systems Development Life Cycle: SDLC) เป็นกรอบในการออกแบบ พัฒนา ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของระบบ กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การศึกษาปัญหาและวิเคราะห์ความต้องการของระบบ (2) การออกแบบระบบ (3) การพัฒนาและสร้างต้นแบบ (4) การทดสอบและปรับปรุงระบบ (5) การติดตั้งและประเมินผลการใช้งานระบบ และ (6) การบำรุงรักษาและบริหารจัดการระบบ ทั้งนี้ในแต่ละขั้นตอนได้ดำเนินงานตามหลัก SDLC เพื่อให้การพัฒนาระบบเป็นไปอย่างมีโครงสร้าง สามารถตรวจสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการเฝ้าระวังและป้องกันความเสียหายของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

1.ขั้นตอนการวิเคราะห์ความต้องการระบบ (System Requirements Analysis)

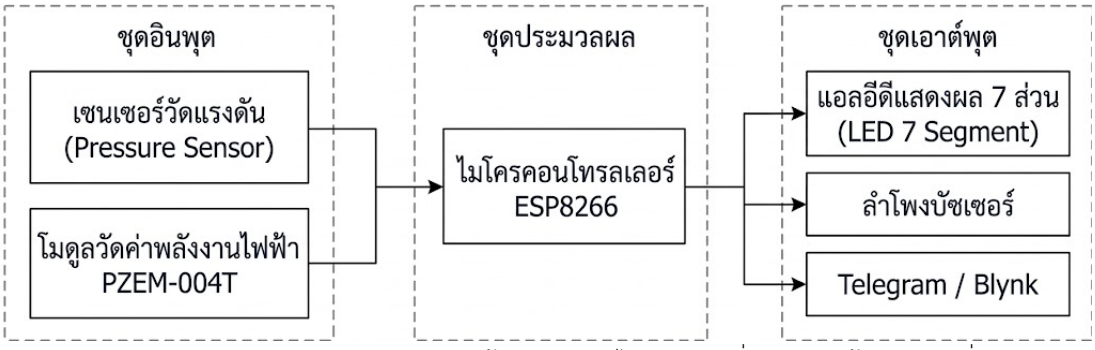
ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากประวัติการซ่อมบำรุงของเครื่องทำลมแห้งในอดีต เพื่อนำมาวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยที่ทำให้เกิดเวลาดาวน์ไทม์ (Downtime) ของระบบ จากผลการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางในการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถในการสื่อสารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมาใช้เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ร่วมกับการบูรณาการเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมและโมดูลตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดและเฝ้าระวังสถานะการทำงานของเครื่องทำลมแห้ง ทั้งนี้ หากระบบตรวจพบความผิดปกติ จะดำเนินการแจ้งเตือนไปยังผู้รับผิดชอบโดยทันที เพื่อให้สามารถเข้าดำเนินการแก้ไขได้อย่างทันท่วงที ซึ่งเป็นการลดเวลาดาวน์ไทม์และเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบเครื่องมือวิทยาศาสตร์

2.ขั้นตอนการออกแบบระบบ (System Design)

ระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การออกแบบลำดับการของทำงานของระบบ และการออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมและการทำงานของระบบ (System Architecture and Workflow Design)

ระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์เริ่มต้นการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด ESP8266 ทำหน้าที่รับสัญญาณและอ่านค่าข้อมูลดิจิทัลและแอนะล็อกจากเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมแห้งและโมดูลตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อส่งต่อไปยังส่วนแสดงผลและส่วนเอาต์พุต โดยจะแสดงค่าสถานะปัจจุบันผ่านหน้าจอแสดงผล (Display) พร้อมทั้งส่งข้อมูลสถิติผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังแอปพลิเคชันเพื่อการมอนิเตอร์ ในกรณีที่แรงดันในระบบลมแห้งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ หรือเครื่องทำลมแห้งหยุดการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 จะสั่งการให้สัญญาณเตือนภัย (Buzzer) ทำงานเพื่อแจ้งเตือนในพื้นที่ พร้อมทั้งส่งข้อความแจ้งเตือนเหตุการณ์ผิดปกติ (Alert Notification) ผ่านแพลตฟอร์ม Telegram ไปยังผู้ดูแลระบบโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในโครงสร้างการทำงานของระบบในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

2.2 การออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์ของระบบ (Hardware Circuit Design)

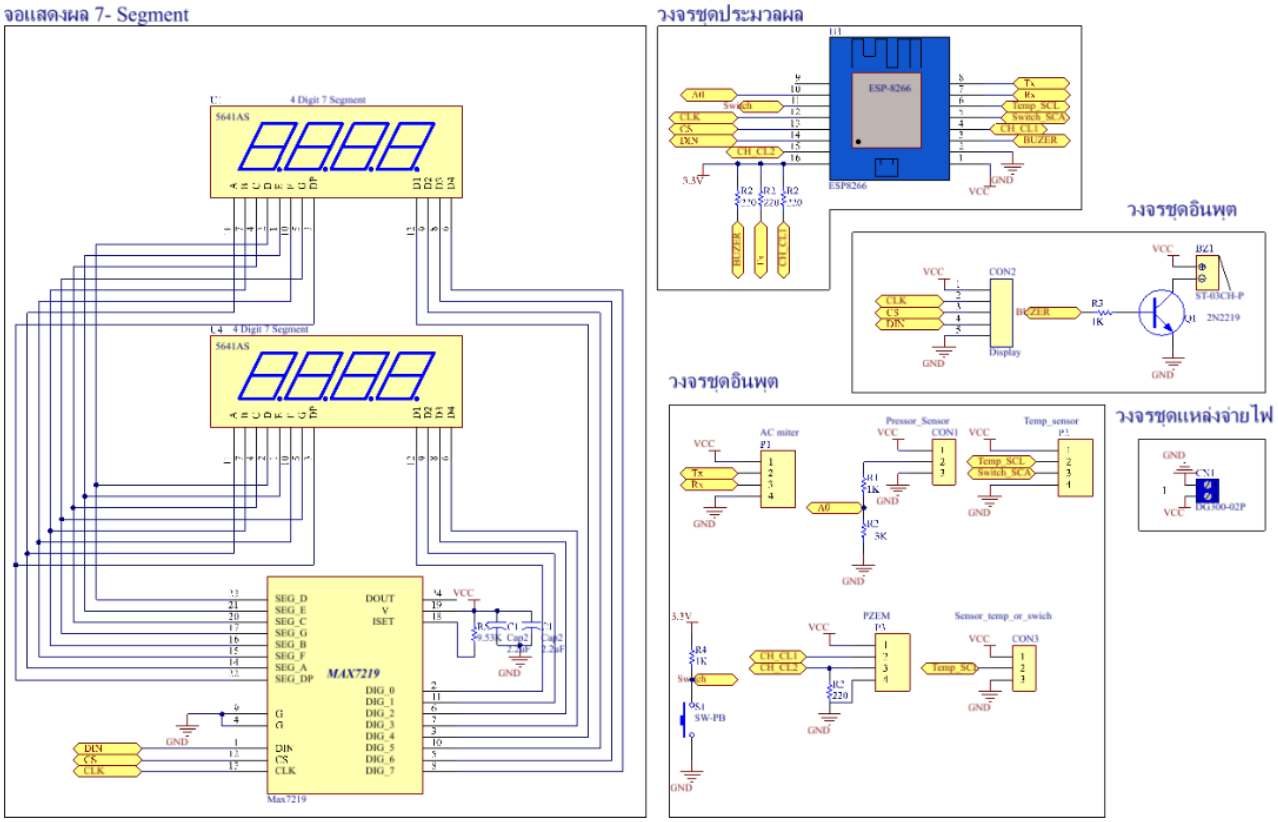
ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบโมดูลาร์ (Modular Design) เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานเฝ้าระวังประเภทอื่นได้หลากหลาย อาทิ ระบบเฝ้าระวังอุณหภูมิ ระบบเฝ้าระวังแรงดันน้ำประปา หรือระบบเฝ้าระวังแก๊สรั่ว โดยวงจรดังกล่าวรองรับสัญญาณอินพุตจากเซนเซอร์ทั้งรูปแบบสัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัล และการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Communication) จากภาพที่ 2 โครงสร้างวงจรสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

(1) ส่วนวงจรอินพุต (Input Circuit) ออกแบบเพื่อรองรับเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมแห้ง และติดตั้งจุดเชื่อมต่อสัญญาณอนุกรมสำหรับสื่อสารกับโมดูลวัดพลังงานไฟฟ้า PZEM-004T เพื่อตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้ง นอกจากนี้ยังรวมถึงปุ่มกดสำหรับตั้งค่าและรีเซ็ตการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายเพื่อความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน

(2) ส่วนประมวลผลหลัก (Processing Unit) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP8266 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ซึ่งมีโมดูลสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) ในตัว

(3) ส่วนวงจรเอาต์พุต (Output Circuit) ประกอบด้วยวงจรขับสัญญาณเสียงเตือน (Buzzer) ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด PNP โดยรับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 และส่วนแสดงผลค่าสถานะผ่านหน้าจอแสดงผล 7-Segment ขนาด 4 หลัก จำนวน 2 โมดูล ซึ่งควบคุมการทำงานและจัดสรรการแสดงผลร่วมกันผ่านไอซีขับหน้าจอแสดงผล (Display Driver IC) หมายเลข MAX7219 ด้วยการสื่อสารข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

(4) ส่วนวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply Unit) ออกแบบให้ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์ ในการขับเคลื่อนระบบทั้งหมด



ภาพที่ 2 วงจรของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

3.ขั้นตอนการพัฒนาและการเขียนโค้ดโปรแกรม (Implementation and Coding)

การพัฒนาชุดคำสั่งควบคุมและสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สามารถแบ่งลักษณะการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

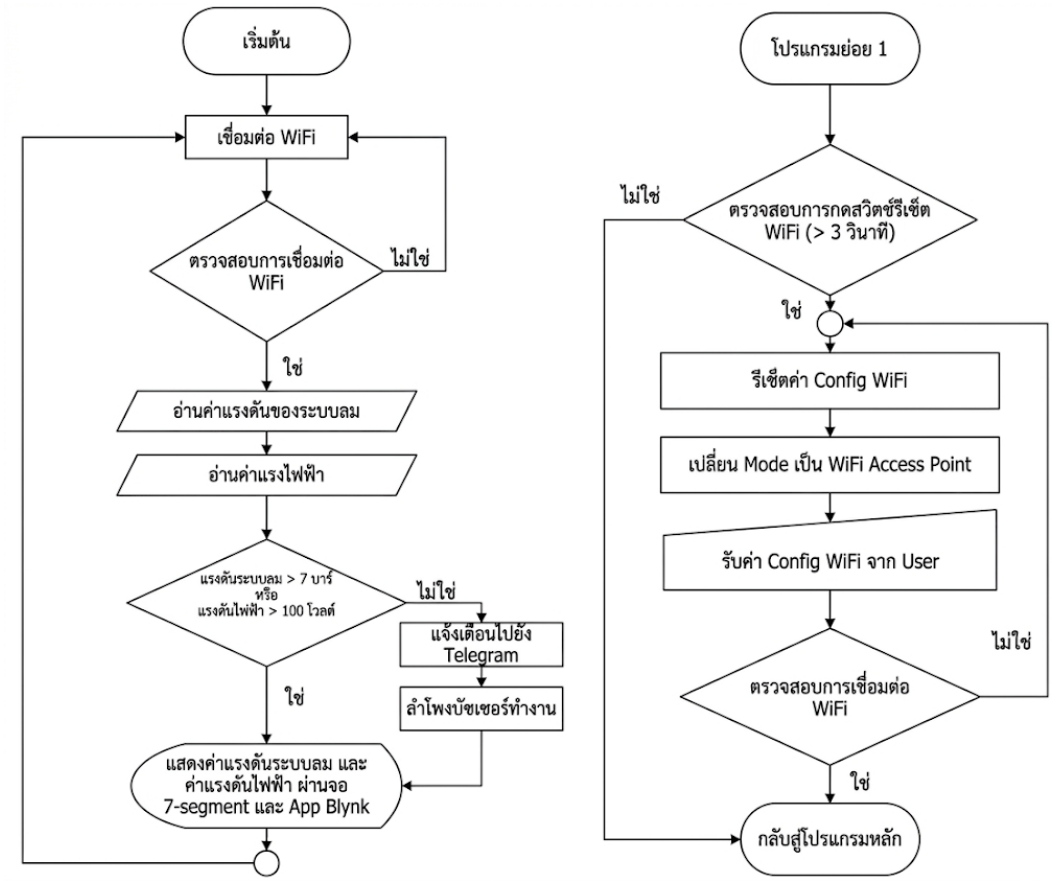
3.1 การทำงานของโปรแกรมหลัก (Main Program Flow)

เมื่อระบบเริ่มทำงาน (Power-on) โปรแกรมจะเริ่มต้นกระบวนการเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi ตามค่าที่กำหนดไว้ หากการเชื่อมต่อล้มเหลว ระบบจะทำการวนรอบเพื่อเชื่อมต่อใหม่จนกว่าจะสำเร็จ (Loop Connection) เมื่อระบบเชื่อมต่อเครือข่ายเรียบร้อยแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านค่าแรงดันลมจากเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดัน และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากโมดูล PZEM-004T เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปตรวจสอบกับเงื่อนไขการแจ้งเตือน หากระบบตรวจพบว่าแรงดันในถังลมแห้งต่ำกว่า 7 บาร์ (จากการทดสอบหน้างานจริงขณะเครื่องทำลมแห้งหยุดทำงาน พบว่าแรงดันลมจะลดลง 1 บาร์ ในทุก ๆ 5 นาที ดังนั้นในระยะเวลา 20 นาที วิศวกรประจำเครื่องมือจะสามารถปิดระบบเครื่องมือวิจัย หรือสลับไปใช้ปั๊มลมสำรองได้ทันเวลาก่อนที่ระดับแรงดันในถังเก็บจะหมด) หรือแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 100 โวลต์ (ช่วงการวัดต่ำสุดของเซนเซอร์ 80 โวลต์)ระบบจะดำเนินการส่งข้อความแจ้งเตือนสถานะผิดปกติ (Alert Notification) ผ่านแพลตฟอร์ม Telegram ไปยังผู้ดูแลระบบในทันที พร้อมทั้งสั่งการให้วงจรขับสัญญาณเสียง (Buzzer) ส่งสัญญาณเสียงเตือนอย่างต่อเนื่องจนกว่าผู้ดูแลระบบจะเข้าดำเนินการแก้ไขหรือกดปุ่มรีเซ็ตระบบ ในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้อยู่ในเกณฑ์ปกติ ระบบจะดำเนินการแสดงผลค่าแบบเรียลไทม์ (Real-time Display) ผ่านหน้าจอ 7-Segment และส่งข้อมูลไปแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk

3.2 การทำงานของโปรแกรมย่อยสำหรับจัดการเครือข่าย (Wi-Fi Reset Subroutine)

เป็นโปรแกรมย่อยที่ออกแบบมาเพื่อล้างค่าและตั้งค่าการเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi ใหม่ โดยระบบจะตรวจสอบสถานะของปุ่มกดหากผู้ใช้งานกดปุ่มสวิตช์รีเซ็ตค้างไว้เป็นเวลามากกว่า 3 วินาที ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการลบข้อมูลชื่อผู้ใช้ (SSID) และรหัสผ่าน (Password) ของ Wi-Fi เดิมที่บันทึกอยู่ในหน่วยความจำถาวร แล้วปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของอุปกรณ์ให้เป็นโหมดกระจายสัญญาณ (Access Point: AP Mode) เพื่อเปิดช่องทางให้ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อและระบุค่า Wi-Fi ใหม่ผ่านหน้าเว็บเพจ

อินเทอร์เฟซได้ เมื่อกระบวนการตั้งค่าและเชื่อมต่อ Wi-Fi ใหม่เสร็จสิ้น ระบบจะบันทึกค่าและกลับเข้าสู่การทำงานของโปรแกรมหลักโดยอัตโนมัติ ดังแสดงผังงานการทำงานในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทำงานของโปรแกรมระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

4. ขั้นตอนการทดสอบระบบ (System Testing)

วัตถุประสงค์ในขั้นตอนนี้คือการประเมินสมรรถนะและความถูกต้องในการทำงานของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริงในสถานการณ์จำลองและสถานการณ์จริง ผู้วิจัยได้กำหนดกระบวนการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

4.1 การทดสอบความถูกต้องแม่นยำของภาคอินพุต (Input Accuracy Verification)

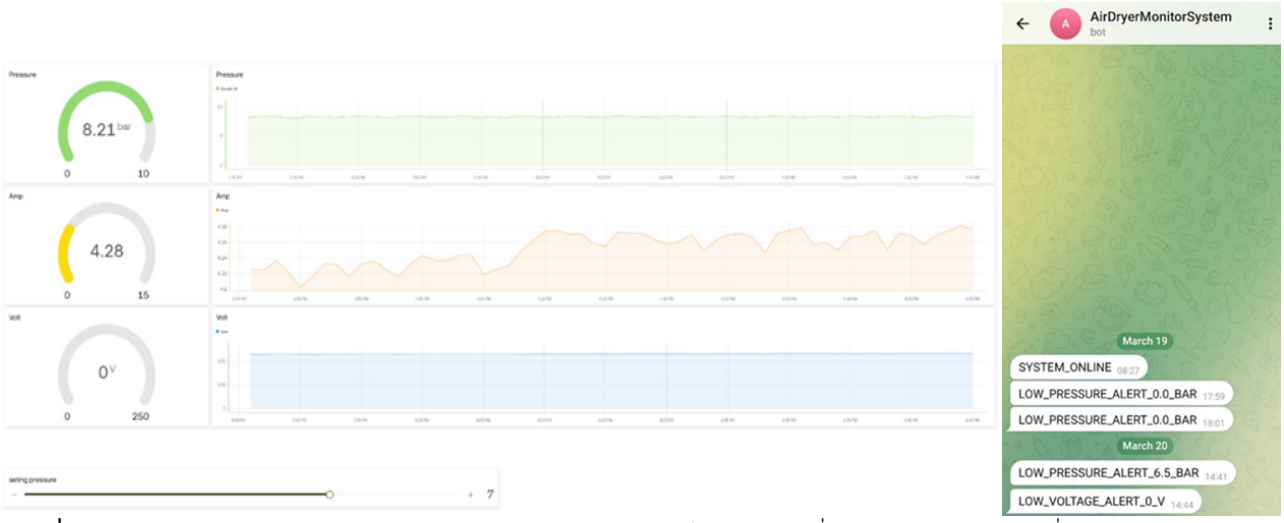
ดำเนินการทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าพารามิเตอร์ของเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมและโมดูล PZEM-004T โดยทำการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 กับเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิง (Standard Calibrator) ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการบันทึกผลการวัดซ้ำเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) เพื่อให้มั่นใจว่าค่าแรงดันลม (บาร์) และแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) ที่ระบบตรวจวัดได้ มีความถูกต้องแม่นยำตามเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรม

4.2 การทดสอบฟังก์ชันและเงื่อนไขการทำงานของซอฟต์แวร์ (Functional and Logic Testing)

ดำเนินการทดสอบความถูกต้องของสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ในการตอบสนองต่อเงื่อนไข (Logic Gate Testing) โดยแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ

สภาวะปกติ (Normal State) ทดสอบการส่งผ่านข้อมูลพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real-time Data Streaming) ไปยังหน้าจอ 7-Segment และแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงในภาพที่ 4

สภาวะผิดปกติ (Abnormal State) ทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ให้แรงดันลมต่ำกว่า 7 บาร์ หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 100 โวลต์ เพื่อทดสอบความแม่นยำของระบบอินเทอร์รัปต์ (Interrupt Service Routine) ในการสั่งการให้วงจรเอาต์พุตขับสัญญาณเสียงเตือน (Buzzer) ทำงานทันที และความถูกต้องในการจัดส่งแพ็กเกจข้อมูลแจ้งเตือน (Alert Notification) ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังแพลตฟอร์ม Telegram ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 หน้าจอแสดงผลของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ผ่าน Blynk และการแจ้งเตือนของระบบลมแห้ง ผ่าน Telegram

4.3 การทดสอบความเสถียรของระบบเครือข่ายและการรับส่งข้อมูล (Network Reliability and Stress Testing)

ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือในการสื่อสารข้อมูลภายใต้สภาวะเครือข่ายไร้สายที่มีความหนาแน่นสูง (Network Congestion) เพื่อประเมินอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet Delivery Ratio) ยิ่งไปกว่านั้น ได้ทำการทดสอบการจำลองสภาวะเครือข่ายหลุด (Network Disconnection) เพื่อพิสูจน์การทำงานของกล่องฟังก์ชันตรวจสอบเครือข่าย (Keep-Alive Function) ว่าสามารถสั่งรีบูตระบบอัตโนมัติ พบว่าระบบเฝ้าระวังลมแห้งสามารถกลับมาเชื่อมต่อเพื่อทำงานต่อได้อย่างราบรื่นโดยที่ข้อมูลไม่สูญหาย

5. ขั้นตอนการติดตั้งและส่งมอบระบบ (System Deployment)

การกำหนดตำแหน่งและติดตั้งเชิงกายภาพของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการตรวจวัด ดำเนินการดังนี้

5.1 การติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมแห้ง ดำเนินการติดตั้งเซนเซอร์ที่บริเวณท่อทางจ่ายออก (Outlet) ของถังเก็บลมแห้งโดยตรง เพื่อลดผลกระทบจากความดันแปรปรวนภายในถัง และทำให้ได้ค่าการวัดแรงดันที่เป็นเชิงเส้นและมีความเสถียรสูงที่สุด (Steady State)

5.2 การติดตั้งโมดูลตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ดำเนินการเชื่อมต่อตัวตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สายส่งกำลังไฟฟ้าฝั่งเข้า (Input Power Line) ของเครื่องทำลมแห้ง เพื่อใช้สำหรับเฝ้าระวังและวิเคราะห์สถานะการทำงาน รวมถึงพฤติกรรมการใช้พลังงานของเครื่องทำลมแห้งได้อย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ดังแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ในภาพที่ 5

ภาพที่ 5 ระบบเครื่องทำลมแห้ง (A) และตำแหน่งที่ติดตั้งระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (B)

6. ขั้นตอนการบำรุงรักษาและการบริหารจัดการระบบ (System Maintenance and Lifecycle Management)

เพื่อหลักประกันด้านเสถียรภาพ (Reliability) ความพร้อมใช้งาน (Availability) และความต่อเนื่องในการปฏิบัติงาน (Business Continuity) ของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ผู้วิจัยได้วางกรอบแนวทางและสถาปัตยกรรมรองรับการบำรุงรักษาระบบในระยะยาว โดยแบ่งออกเป็น 3 มิติหลัก ดังนี้

6.1 การบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการสอบเทียบมาตรฐาน (Preventive Maintenance and Standard Calibration)

กำหนดมาตรการเชิงรุก (Proactive Measures) ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ทางกายภาพของโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ จุดเชื่อมต่อสัญญาณ (Terminal Interfaces) และระบบท่อทางเดินลม (Pneumatic Lines) ทุกวงรอบ 6 เดือน ควบคู่ไปกับการดำเนินการสอบเทียบ (Calibration) เซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันลมและโมดูล PZEM-004T เทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน เพื่อขจัดค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Sensor Drift) และรักษาความแม่นยำในการวิเคราะห์ผลให้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

6.2 สถาปัตยกรรมการทนทานต่อความผิดพร่องและการกู้คืนระบบ (Fault Tolerance and Automated System Recovery)

ในส่วนสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ได้มีการเปิดใช้งานกลไกฮาร์ดแวร์ไทม์เมอร์ควบคุม (Hardware Watchdog Timer: WDT) เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับสภาวะระบบค้างหรือหยุดชะงัก (System Hang / Freeze) ยิ่งไปกว่านั้น ได้มีการพัฒนาระบบตรวจสอบความเสถียรของเครือข่าย (Network Connection Keep-alive) หากเกิดสภาวะสูญเสียการเชื่อมต่อ Wi-Fi หรือคลาวด์เซิร์ฟเวอร์เกินกว่าระยะเวลาที่กำหนด (Timeout) ซอฟต์แวร์จะสั่งการให้เกิดกระบวนการซอฟต์รีบูต (Soft Reboot) เพื่อเริ่มต้นกระบวนการจัดสรรเซสชันใหม่ (Re-establishment) โดยอัตโนมัติ

6.3 การปรับปรุงซอฟต์แวร์แบบไม่กระทบระบบและการรองรับการขยายตัว (Seamless Firmware Updates and Scalability)

โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบในลักษณะโมดูลาร์ (Modular Architecture) ช่วยให้การซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance) เช่น การเปลี่ยนอุปกรณ์เซนเซอร์ที่เสื่อมสภาพ สามารถทำได้ในลักษณะ Hot-Swappable หรือลดระยะเวลา Downtime ในการซ่อมบำรุงให้เหลือน้อยที่สุด ในด้านซอฟต์แวร์ ระบบได้รับการออกแบบให้รองรับสถาปัตยกรรมการอัปเดตเฟิร์มแวร์ระยะไกล (Over-the-Air: OTA Firmware Update) ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถปรับปรุงซอร์สโค้ด แก้ไขช่องโหว่ความปลอดภัย หรือปรับแต่งเงื่อนไขพารามิเตอร์ของโปรแกรมย่อย (Subroutine) ได้โดยไม่ต้องถอดถอนอุปกรณ์ออกจากหน้างานจริง พร้อมทั้งรองรับการปรับขยาย (Scalability) เพื่อบูรณาการเข้ากับเซนเซอร์ประเภทอื่นในอนาคตได้อย่างสมบูรณ์

6.4 จัดทำคู่มือการใช้งานระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ฉบับสมบูรณ์ พร้อมทั้งนำไปเผยแพร่ผ่านระบบคลังความรู้ (Knowledge Management System) ของหน่วยงาน เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงให้แก่บุคลากรผู้ปฏิบัติงาน ผู้ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้ที่สนใจ สามารถเข้ามาศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบการทำงานในส่วนสถาปัตยกรรมเครือข่ายพบว่า ระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สามารถดำเนินการจัดส่งแพ็กเกจข้อมูลพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าแรงดันลมแห้ง ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า จากหน่วยประมวลผลหลักไปยังเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) และโมบายแอปพลิเคชัน (Mobile Application) บนแพลตฟอร์ม Blynk ได้อย่างถูกต้องและมีความเสถียรสูง โดยระบบสามารถจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลเชิงสถิติในรูปแบบกราฟแสดงแนวโน้ม (Trend Graph) ย้อนหลังได้สูงสุดเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงพอและตอบโจทย์วัตถุประสงค์ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเฝ้าระวังและวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบลมแห้งในระยะยาว

ในการประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องแม่นยำของการตรวจวัดแรงดันลมแห้ง ระบบที่พัฒนาขึ้นผู้วิจัยได้เซนเซอร์วัดแรงดันที่รองรับช่วงการวัด (Measurement Range) ตั้งแต่ 0 - 16 บาร์ และมีค่าความแม่นยำร้อยละ 0.25 ซึ่งอ้างอิงความแม่นยำตามใบรับรองมาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิต (Factory Calibration Certificate) ทั้งนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้อง ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบผลการวัด (Comparative Measurement) ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบควบคุมมาตรฐานที่ติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องทำลมแห้งยี่ห้อ Anest Iwata รุ่น SLPA-1501E-385 โดยทำการทดสอบวัดค่า ณ ตำแหน่งจุดต่อเชื่อมเดียวกัน (Same Node) และอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมความดันในการวัดให้เท่ากันในทุกชุดการทดลอง ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด (Measurement Error) ไม่เกิน ± 0.15 บาร์ (bar) และมีค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.034

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการวัดกระแสไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ทำการต่อร่วมกับภาระไฟฟ้าจำลอง (Dummy Load) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องเป่าลมร้อนที่สามารถปรับระดับสภาวะโหลดได้ 3 ระดับ ในการทดสอบนี้ได้นำเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิงที่มีความแม่นยำสูง ได้แก่ แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 375 FC มาทำการวัดเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากโมดูลตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า PZEM-004T รองรับช่วงการวัดที่แรงดันไฟฟ้า 80 - 260 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0 - 10 แอมป์ ความแม่นยำในการวัดร้อยละ 0.5 ที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบ ณ ตำแหน่งสายส่งกำลังไฟฟ้าเดียวกัน ผลการทดสอบเปรียบเทียบเชิงสถิติดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน ± 0.130 แอมแปร์ และมีค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.008

ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Fluke 375 FC เทียบกับระบบเฝ้าระวังลมแห้ง ดังตารางที่ 3 ค่าความผิดพลาดในการวัดแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ ± 0.7 โวลต์

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบจากการติดตั้งและใช้งานจริง (Field Test) ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2569 พบว่า ระบบสามารถตรวจจับและแจ้งเตือนความผิดปกติได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยมีการแจ้งเตือนสภาวะแรงดันลมต่ำกว่า 7 บาร์ จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าเกิดจากปัญหาท่อส่งลมรั่วจริง รวมทั้งมีการแจ้งเตือนสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 100 โวลต์ จำนวน 3 ครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับบันทึกการซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าของทางมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการวัดแรงดันลมของระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

จุดทดสอบระดับแรงดัน (บาร์)	ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Anest Iwata (บาร์)	ค่าที่ได้จากระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (บาร์)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	1.00	1.02	1.05	1.08	1.05	0.030	±0.05
3	3.00	3.01	3.04	3.10	3.05	0.046	±0.05
5	5.00	5.12	5.15	5.18	5.15	0.030	±0.15
7	7.00	7.03	7.05	7.07	7.05	0.020	±0.05
9	9.00	9.00	9.06	9.09	9.05	0.046	±0.05

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าระหว่าง Fluke 375 FC เทียบกับระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ระดับความแรงของเครื่องเป่าลมร้อน	ค่าที่อ่านได้จาก Fluke	ค่าที่ได้จากระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (แอมแปร์)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	0.2	0.21	0.22	0.21	0.21	0.006	±0.01
2	4.0	4.13	4.12	4.13	4.13	0.006	±0.13
3	7.3	7.42	7.42	7.40	7.41	0.012	±0.11

ตารางที่ 3 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Fluke 375 FC เทียบกับระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ค่าที่อ่านได้จาก Fluke 375 FC	ค่าที่ได้จากระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (โวลต์)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
230.7	230	230	230	230	0	± 0.7

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการตอบสนองของระบบแจ้งเตือนต่อเหตุการณ์จริงตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 ถึงช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2569

ประเภทเหตุการณ์	จำนวนครั้งที่เกิดเหตุจริง	ระบบแจ้งเตือนถูกต้อง	ระบบไม่แจ้งเตือน	การแจ้งเตือนผิดพลาด	สถานะ Telegram / Buzzer
แรงดันลมผิดปกติ (< 7 บาร์)	6 ครั้ง	6 ครั้ง	0 ครั้ง	0 ครั้ง	แจ้งเตือน
แรงดันไฟฟ้าผิดปกติ	3 ครั้ง	3 ครั้ง	0 ครั้ง	0 ครั้ง	แจ้งเตือน

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ประสบความสำเร็จบรรลุวัตถุประสงค์โครงการ โดยระบบแสดงสมรรถนะและความแม่นยำทางวิศวกรรมในระดับสูง ซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

ความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัด ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิงพบว่า ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันลมแห้งไม่เกิน ± 0.15 บาร์ เมื่อเทียบกับเครื่องควบคุมของ Anest Iwata รุ่น SLPA-1501E-385 ส่วนพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ± 0.7 โวลต์ และค่าความคลาดเคลื่อนกระแสไฟฟ้าไม่เกิน ± 0.13 แอมแปร์ เมื่อเทียบกับแคลมป์มิเตอร์ Fluke 375 FC ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานและยอมรับได้สำหรับห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ประสิทธิภาพการจัดส่งข้อมูลและการแจ้งเตือนระบบสามารถส่งผ่านพารามิเตอร์ทั้งหมดไปยังแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อจัดเก็บสถิติและเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์ย้อนหลังได้ 7 วันได้อย่างมีเสถียรภาพ พร้อมทั้งมีกลไกแจ้งเตือนภัยเชิงรุกแบบสองประสานกรณีเกิดสภาวะต่ำกว่าเกณฑ์วิกฤต โดยส่งสัญญาณเสียงเตือน Buzzer ควบคู่ไปกับการส่งข้อความแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแพลตฟอร์ม Telegram ไปยังผู้รับผิดชอบโดยทันที

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการพัฒนาระบบเฝ้าระวังแรงดันลมแห้งและสถานะไฟฟ้าของเครื่องทำลมแห้งสำหรับเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการสร้างกลไกเฝ้าระวังเชิงรุก และเป็นไปตามสมมติฐานทางวิศวกรรมที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยมีประเด็นสำคัญที่สมควรนำมาอภิปรายผลดังนี้

การควบคุมเสถียรภาพและความแม่นยำทางกายภาพ การที่ระบบควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันลมแห้งได้ต่ำกว่า ± 0.15 บาร์ และความคลาดเคลื่อนทางไฟฟ้าสูงสุดเพียง ± 0.7 โวลต์ และ ± 0.13 แอมแปร์ นั้น สอดคล้องกับแนวทางการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ฝังตัว (Embedded System) ของ ศราวุธ จินดาประพันธ์ (2566) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบโมดูลาร์ (Modular Design) ร่วมกับภาคจ่ายไฟที่นิ่ง มีผลโดยตรงต่อการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบวัด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้ได้แก้ปัญหาทางกายภาพเพิ่มเติมโดยการย้ายตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ไปไว้ที่ท่อทางจ่ายออก (Outlet) ของถังเก็บลมโดยตรง ซึ่งเป็นจุดที่มวลลมก้าวเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) และมีความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุด ความแม่นยำที่เกิดขึ้นจึงไม่ได้มาจากความเสถียรของวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการเลือกตำแหน่งทางกลศาสตร์นิวแมติกส์ที่ถูกต้องด้วย

ความเหนือกว่าของกลไกแจ้งเตือนเชิงรุกแบบสองประสาน (Dual-channel Alert)ในสภาวะวิกฤตที่พารามิเตอร์ต่ำกว่าเกณฑ์ (แรงดันลมแห้งต่ำกว่า 7 บาร์ หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 100 โวลต์) กลไกของระบบจะขับสัญญาณเสียง (Buzzer) หน้างานพร้อมยิงข้อความฉุกเฉินเข้าแพลตฟอร์ม Telegram ทันที ซึ่งเป็นจุดเด่นที่พัฒนาและแก้ข้อจำกัด (Pain Point) จากงานวิจัยของ ศราวุธ จินดาประพันธ์ (2566) ที่รายงานผลและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เป็นหลัก การบูรณาการระบบแจ้งเตือนแบบสองประสานในงานวิจัยนี้ ช่วยขจัดปัญหาการหลุดพ้นสายตา (Blind Spot) ของผู้ดูแลระบบ แม้ไม่ได้อยู่ปฏิบัติงานในพื้นที่หน้างาน ยืนยันถึงการประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนผ่านระบบบำรุงรักษาจาก “เชิงตั้งรับ” (Reactive) ที่ต้องรอให้เครื่องมือเสียหาย ไปสู่ “เชิงรุก” (Proactive Maintenance) ที่ตัดวงจรความเสียหายได้ทันท่วงที

จากผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยการติดตั้งและใช้งานจริง (Field Test) อย่างต่อเนื่องระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2569 พบว่าระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยสถิติการแจ้งเตือนสอดคล้องกับบันทึกการซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าของทางมหาวิทยาลัยอย่างชัดเจน (ตรวจพบท่อส่งลมรั่ว 6 ครั้ง และสภาวะแรงดันไฟฟ้าตก 3 ครั้ง) ผลลัพธ์เชิงประจักษ์นี้เป็นการยืนยันว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่ได้มีประสิทธิภาพเพียงแค่ในสภาวะควบคุมระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ยังมีความทนทานและเสถียรภาพสูงเพียงพอต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง สามารถช่วยป้องกันและลดความเสี่ยงที่เครื่องมือวิทยาศาสตร์มูลค่าสูงจะได้รับความเสียหายจากความผันผวนของระบบสาธารณูปโภคได้อย่างเป็นรูปธรรม

การที่ระบบสามารถดำเนินการส่งข้อมูลพารามิเตอร์ได้อย่างมีเสถียรภาพ พร้อมทั้งจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลเชิงสถิติในรูปแบบกราฟแสดงแนวโน้ม (Trend Graph) ย้อนหลังได้ 7 วัน ผ่านแพลตฟอร์ม Blynk นั้น นับเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรและสังเกตเห็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Degradation) ได้ ข้อมูลพฤติกรรมเชิงลึก (Data Insight) เหล่านี้ ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ต่อการเฝ้าระวังในปัจจุบัน แต่ยังถือเป็นการสร้างฐานข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐาน (Baseline Data) ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่สนใจ และต้องการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อตอบคำถามวิจัยที่ว่าระบบจะสามารถคาดการณ์ความเสียหายล่วงหน้าได้อย่างไร ก่อนที่เครื่องจักรจะหยุดทำงาน การวิจัยครั้งต่อไปควรยกระดับระบบไปสู่ สถาปัตยกรรมเซนเซอร์เครือข่ายไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) เพื่อตรวจวัดแรงดันลมแบบกระจายศูนย์หลายจุดพร้อมกันทั้งโครงข่าย (Multi-Point Monitoring) และนำข้อมูลสถิติพารามิเตอร์ย้อนหลังไปประมวลผลร่วมกับอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ (Machine Learning) เพื่อพัฒนาไปสู่ การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) ที่สมบูรณ์แบบ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ นายแพทย์ วิระชัย สมัย ผู้อำนวยการและคณะผู้บริหารสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณคุณสัตยา บุญรัตนชู และคุณยุทธชัย เรืองรัตน์ ที่ให้ข้อเสนอแนะ และการตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยตลอดกระบวนการดำเนินงานรวมทั้งที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล สถานที่ เครื่องมือ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนการดำเนินงานในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว

เอกสารอ้างอิง

ศราวุธ จินดาประพันธ์. (2566). *การพัฒนาระบบเฝ้าระวังแบตเตอรี่ด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยรังสิต]. คลังปัญญามหาวิทยาลัยรังสิต.

ศศิธร พยัคฆ์ทอง, สมเกียรติ หมายถมกลาง และ ณัฐพงศ์ แพน้อย. (2566). การพัฒนาการแสดงผลแบบเรียลไทม์และระบบควบคุมสำหรับซิลเลอร์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. *PSRU Journal of Industrial Technology and Engineering*, *5*(1), 11-29.

สัตยา บุญรัตนชู, ทรงสุดา พรหมทอง และ ฮัมดัน มะเซ็ง. (2565). การพัฒนาระบบเฝ้าระวังอุณหภูมิสำหรับตู้แช่เก็บตัวอย่าง. *วารสารวิชาการ ปขมท.*, *11*(2), 93-102.

อิทธิพงษ์ เขมะเพชร. (2561). การพัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนโครงสร้างสะพานแบบเรียลไทม์. *Journal of Information Science and Technology*, *8*(2), 83-96.

Grand View Research. (2024). *Industrial Internet of Things (IIoT) market size, share & trends analysis report by component, by end-use, by region, and segment forecasts, 2024 - 2030* (GVR-2-44321-2). https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-internet-of-things-iiot-market

International Organization for Standardization. (2010). *Compressed air — Part 1: Contaminants and purity classes* (ISO 8573-1:2010).

Shimadzu Corporation. (2010). *FTIR talk letter Vol. 19* (Application Note No. C103-E087). https://www.shimadzu.com.ua/wp-content/uploads/2019/10/TalkLetter-Vol_19-1.pdf