การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Development and Performance Evaluation of a Real-Time Smart Warehouse Environmental Monitoring System Based on Internet of Things

อนุวัฒน์ ใจดี[1], อภิลักษณ์ สีเยี่ยม[2], สุวินัย มาคะวงค์[3], นภสร พุฒจรูญ[4], เสาวภา เมืองแก่น[5]

[1]*สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี, anuwat_dbc@thonburi-u.ac.th*

[2]*สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี, 6701102057109@trums.thonburi-u.ac.th*

[3]*สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี, 6701102057018@trums.thonburi-u.ac.th*

[4]*สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี, 6701102057016@trums.thonburi-u.ac.th*

[5]*สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรี, ops_tru@thonburi-u.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าอัจฉริยะแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และ 2) ประเมินประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ของการใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาความล่าช้า ข้อจำกัดด้านความต่อเนื่อง และความผิดพลาดจากการตรวจสอบด้วยแรงงานคนแบบดั้งเดิม (Human Error) สถาปัตยกรรมของระบบได้รับการออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง บูรณาการร่วมกับชุดเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดตัวแปร 6 พารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ฝุ่นละออง PM2.5 ฝุ่นละออง PM10 ความเข้มข้นของควัน และการตรวจจับเปลวไฟ ระบบได้รับการกำหนดให้รวบรวมและส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingSpeak อย่างต่อเนื่องทุก 2 วินาที พร้อมทั้งมีฟังก์ชันส่งการแจ้งเตือนความผิดปกติตามเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยผ่าน LINE Messaging API โดยอัตโนมัติ ผลการประเมินประสิทธิภาพจากการทำงานในคลังสินค้าจำลอง พบว่าระบบมีเสถียรภาพระดับสูงในการส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่องยาวนานกว่า 31 ชั่วโมงโดยปราศจากการสูญหายของข้อมูล ด้านความแม่นยำ ผลการทดสอบยืนยันว่าเซ็นเซอร์มีความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะเซ็นเซอร์ DHT22 ที่มีความแม่นยำถึงร้อยละ 98.15 ด้านความรวดเร็วในการตอบสนอง (Latency) ระบบสามารถประมวลผลและส่งข้อความแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉินได้ภายในระยะเวลาเพียง 3-5 วินาที นอกจากนี้ ผลสัมฤทธิ์เชิงการบริหารจัดการพบว่า การประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัตินี้สามารถลดระยะเวลาและลดต้นทุนด้านแรงงานคนในการตรวจสอบลงได้ถึงร้อยละ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจดบันทึกแบบเดิม การพัฒนานวัตกรรมนี้จึงมีส่วนสำคัญในการยกระดับ

มาตรฐานความปลอดภัย ป้องกันความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพของสินค้า และเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการคลังสินค้าให้ก้าวสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 ได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำหลัก: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, คลังสินค้าอัจฉริยะ, การติดตามสภาพแวดล้อม, การแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์

Abstract

The primary objectives of this research are twofold: first, to design and develop a real-time smart warehouse environmental monitoring system utilizing Internet of Things (IoT) technology; and second, to evaluate the system's performance and operational efficacy. This system addresses the critical limitations of traditional manual inspections, particularly latency, data discontinuity, and human error. The system architecture employs an ESP32 microcontroller as the central processing unit, seamlessly integrated with a sensor suite designed to monitor six key environmental parameters: temperature, relative humidity, PM2.5 and PM10 particulate matter, smoke concentration, and flame detection. The system is configured to continuously acquire and transmit data to the ThingSpeak cloud platform at 2-second intervals. Furthermore, it incorporates an automated alert mechanism via the LINE Messaging API, triggered whenever parameters exceed predefined safety thresholds. Performance evaluation conducted in a simulated warehouse environment demonstrated exceptional system stability, sustaining continuous data transmission for over 31 hours with zero data loss. In terms of measurement accuracy, the test results confirmed high sensor reliability, with the DHT22 sensor achieving an accuracy rate of 98.15%. Regarding system latency, the platform successfully processed and dispatched emergency notifications within a rapid timeframe of 3 to 5 seconds. From an operational management perspective, the implementation of this automated system reduced manual inspection time and associated labor costs by 40% compared to traditional manual logging methods. Ultimately, the development of this innovation significantly elevates warehouse safety standards, mitigates the risk of product degradation, and concretely enhances warehouse management efficiency, aligning with the paradigms of Industry 4.0

Keywords: Internet of Things (IoT), Smart Warehouse, Environmental Monitoring, Real-time Alert

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้ก้าวเข้าสู่ยุคดิจิทัลที่เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมใหม่ ๆ กลายเป็นปัจจัยขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม ส่งผลให้การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานต้องปรับตัวอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญในการรองรับการจัดเก็บและกระจายสินค้า (Jarašūnienė et al., 2023) อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่ผู้ประกอบการยังคงประสบอยู่คือการควบคุมปัจจัยทางสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพสินค้า โดยเฉพาะกลุ่มสินค้าที่มีความอ่อนไหวสูง เช่น อาหารสด เวชภัณฑ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Anggraini et al., 2025)

จุดเริ่มต้นและความสนใจของผู้วิจัย เกิดจากการเล็งเห็นถึงข้อจำกัดของกระบวนการตรวจสอบสภาพแวดล้อมในรูปแบบดั้งเดิม (Traditional Inspection) ที่ส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพา แรงงานคน (Manual Labor) หรือใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบแยกส่วน (Standalone Devices) ในการเดินตรวจสอบตามรอบเวลา วิธีการนี้ก่อให้เกิดช่องโหว่สำคัญคือ "การขาดความต่อเนื่องและเสถียรภาพของข้อมูล" (Human Error) กล่าวคือ ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเฝ้าระวังได้ตลอด 24 ชั่วโมง และอาจมีความล่าช้าในการเข้าถึงพื้นที่เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น เหตุอัคคีภัยหรือการรั่วไหลของก๊าซ ซึ่งเป็นความเสี่ยงสูงสุดที่สร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินมหาศาล (Mohanraj* et al., 2019) ปัญหาความล่าช้าและการขาดข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน (Real-time) นี้เองที่เป็นแรงจูงใจสำคัญให้ผู้วิจัยต้องการพัฒนาระบบที่สามารถปิดช่องโหว่ดังกล่าว

จากประเด็นปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างระบบเฝ้าระวังอัตโนมัติที่สามารถติดตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้พร้อมกันแบบเรียลไทม์ โดยมุ่งเน้นการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงอย่าง ESP32 ร่วมกับเซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำ (Yulizar et al., 2023) (Syaputra, 2025) เพื่อยกระดับมาตรฐานความปลอดภัย ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการคลังสินค้าอาหารสดให้สอดคล้องกับยุคอุตสาหกรรม 4.0 อย่างแท้จริง (ZHOU, 2025)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าอัจฉริยะแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ของการใช้งานระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้า

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

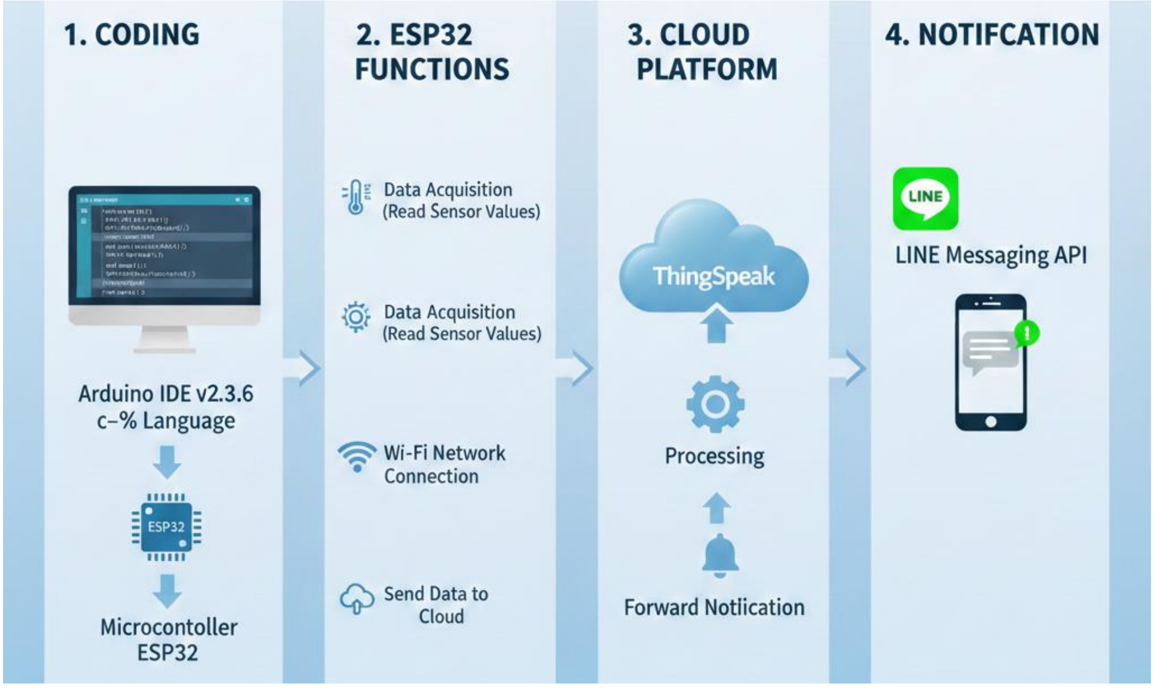
1. สามารถติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าได้แบบเรียลไทม์ทุกที่ทุกเวลา
2. ยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยภายในพื้นที่จัดเก็บ
3. ลดต้นทุนด้านแรงงานและเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน
4. ฐานข้อมูลสภาพแวดล้อมที่มีความเสถียรและแม่นยำสูง

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยดำเนินการตามวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบฮาร์ดแวร์ (Hardware Design)

การพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าอัจฉริยะในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการออกแบบสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ที่มีความเสถียร แม่นยำ และคุ้มค่าต่อการลงทุน โดยผู้วิจัยได้คัดเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถบูรณาการการทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) (Adisheshaiah, 2024) โดยมีรายละเอียดเชิงลึกของส่วนประกอบและการเชื่อมต่อระบบดังนี้



ภาพ 1 การพัฒนาซอฟต์แวร์

1.1 หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) หัวใจสำคัญของระบบคือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งถูกเลือกใช้เป็นหน่วยควบคุมหลัก (Main Controller) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทั้งหมดและส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย เหตุผลสำคัญในการเลือกใช้ ESP32 สืบเนื่องจากประสิทธิภาพในการประมวลผลที่รวดเร็ว รองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi และ Bluetooth ในตัว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Syaputra, 2025) ที่ยืนยันว่า ESP32 มีความเสถียรสูงในการส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์ม Cloud อย่างต่อเนื่องยาวนานโดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล นอกจากนี้ บอร์ด ESP32 ยังมีจำนวนขา GPIO (General Purpose Input/Output) ที่เพียงพอต่อการเชื่อมต่อกับชุดเซ็นเซอร์ที่หลากหลายผ่าน Expansion Board ช่วยลดความซับซ้อนในการเดินวงจรและเพิ่มความสะดวกในการติดตั้ง

1.2 ส่วนตรวจวัดสภาพแวดล้อมและคุณภาพอากาศ (Environmental and Air Quality Sensing) เพื่อให้ครอบคลุมตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพสินค้า (Srilatha et al., 2023) ผู้วิจัยได้ติดตั้งเซ็นเซอร์ 2 ชนิดหลัก ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) และ เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS7003 G7)

1.3 ส่วนตรวจจับความปลอดภัยและอัคคีภัย (Safety and Fire Detection) เพื่อยกระดับความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากอัคคีภัย ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย ระบบได้ผนวกเซ็นเซอร์นิรภัย 2 ชนิด ได้แก่ เซ็นเซอร์ตรวจจับควันและก๊าซ (MQ-2) และ เซ็นเซอร์ตรวจจับเปลวไฟ (KY-026)

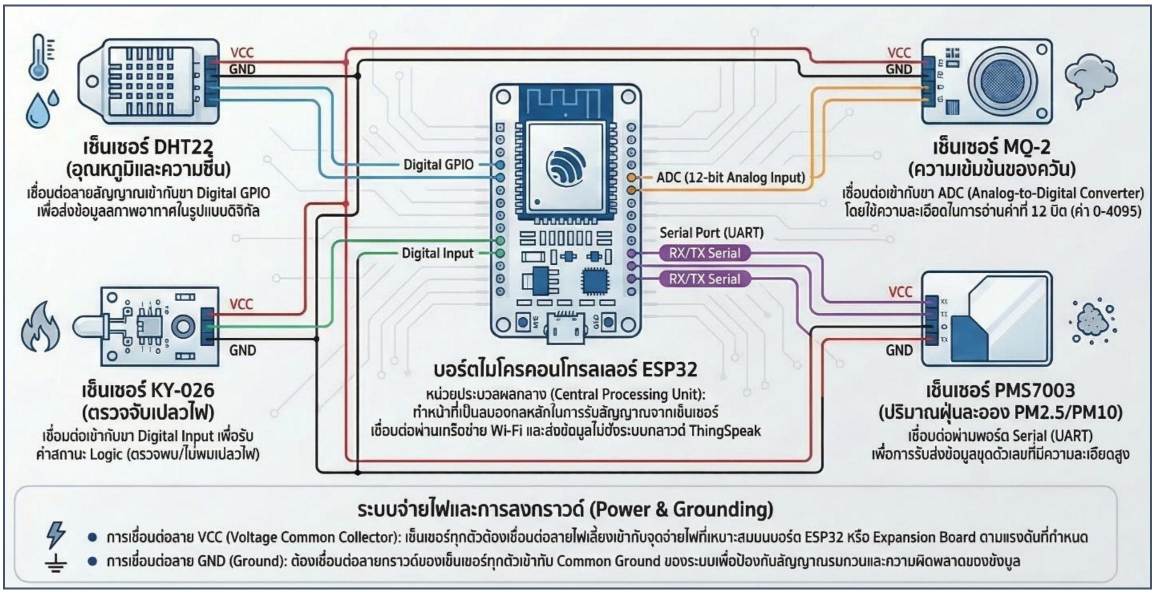
2. การพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development) การพัฒนาส่วนซอฟต์แวร์ดำเนินการผ่าน Arduino IDE เวอร์ชัน 2.3.6 โดยเขียนโปรแกรมภาษา C++ เพื่อควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งมีหน้าที่หลัก 3 ประการ ได้แก่ 1) การอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ (Data Acquisition) 2) การเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi และ 3) การส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingSpeak เพื่อประมวลผลและส่งต่อการแจ้งเตือนไปยัง LINE Messaging API ดังภาพ 1

การทำงานของระบบซอฟต์แวร์เริ่มต้นด้วยการกำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่รับค่าสัญญาณอินพุตจากชุดเซ็นเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้น (DHT22), ความเข้มข้นของควัน (MQ-2 ผ่านขา ADC), การตรวจจับเปลวไฟ (KY-026) และปริมาณฝุ่นละออง (PMS7003 ผ่านพอร์ต Serial) เพื่อนำมารวบรวมและจัดรูปแบบข้อมูล จากนั้นระบบจะดำเนินการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingSpeak แบบเรียลไทม์ทุก ๆ 2 วินาทีเพื่อให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องและแม่นยำ โดยที่ฝั่งเซิร์ฟเวอร์จะใช้ฟังก์ชัน ThingSpeak React ในการเฝ้าระวังและตรวจสอบเงื่อนไขความปลอดภัย หากพบว่าค่าพารามิเตอร์ใดเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งการไปยัง LINE Messaging API โดยอัตโนมัติเพื่อส่งข้อความแจ้งเตือนความผิดปกติไปยังผู้ใช้งานทันที

ภาพ 2 สถาปัตยกรรมระบบ

3. สถาปัตยกรรมระบบระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง แสดงให้เห็นแผนภาพแสดงการไหลของข้อมูลจากล่างขึ้นบนในภาพ 2 เริ่มจากเซ็นเซอร์ในชั้น Perception Layer อ่านค่าสภาพแวดล้อม ส่งข้อมูลเข้าสู่ ESP32 เพื่อประมวลผลเบื้องต้น จากนั้นส่งผ่านเครือข่าย Wi-Fi ในชั้น Network Layer ไปยัง Cloud Server (ThingSpeak) ในชั้น Application Layer เพื่อแสดงผลกราฟ และหากค่าเกินกำหนด ระบบ Cloud จะสั่งการไปยัง LINE API ให้ส่งข้อความแจ้งเตือนทันที

4. การกำหนดเกณฑ์การเฝ้าระวังและการสอบเทียบความแม่นยำของเซ็นเซอร์ การสอบเทียบความแม่นยำ (Sensor Calibration) ในด้านการประเมินความแม่นยำของฮาร์ดแวร์ ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิง ยี่ห้อ Fluke 971 ผลการทดสอบยืนยันว่าเซ็นเซอร์มีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 98.15 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Anggraini et al., 2025) และเหมาะสมกับการใช้งานในคลังสินค้าอุตสาหกรรม การกำหนดเกณฑ์แจ้งเตือน (Alert Threshold Setting) สำหรับตาราง 1 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อการแจ้งเตือน ซึ่งสังเคราะห์จากมาตรฐานสากลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็นระดับเฝ้าระวังและระดับอันตราย ดังนี้ พารามิเตอร์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิงเกณฑ์ควบคุมของมาตรฐานคลังสินค้าเกษตร (ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส และร้อยละ 70) เพื่อป้องกันการเกิดมอดและเชื้อรา ส่วนฝุ่นละออง PM2.5 อ้างอิงมาตรฐานคุณภาพอากาศเพื่อสุขอนามัย ในด้านการตรวจจับควันและอัคคีภัย เซ็นเซอร์ MQ-2 ได้รับการตั้งค่าความไวผ่านค่าความละเอียด ADC 12 บิต โดยกำหนดเกณฑ์เฝ้าระวังที่ 1,500 และเกณฑ์อันตรายที่ 2,500 เพื่อแยกแยะควันทั่วไปออกจากเหตุเพลิงไหม้จริง และเซ็นเซอร์ KY-026 ใช้สถานะ Logic 0 เมื่อตรวจพบคลื่น IR ซึ่งการกำหนดเกณฑ์ที่ชัดเจนนี้ ช่วยให้ระบบส่งการแจ้งเตือนได้อย่างแม่นยำภายใน 3-5 วินาที

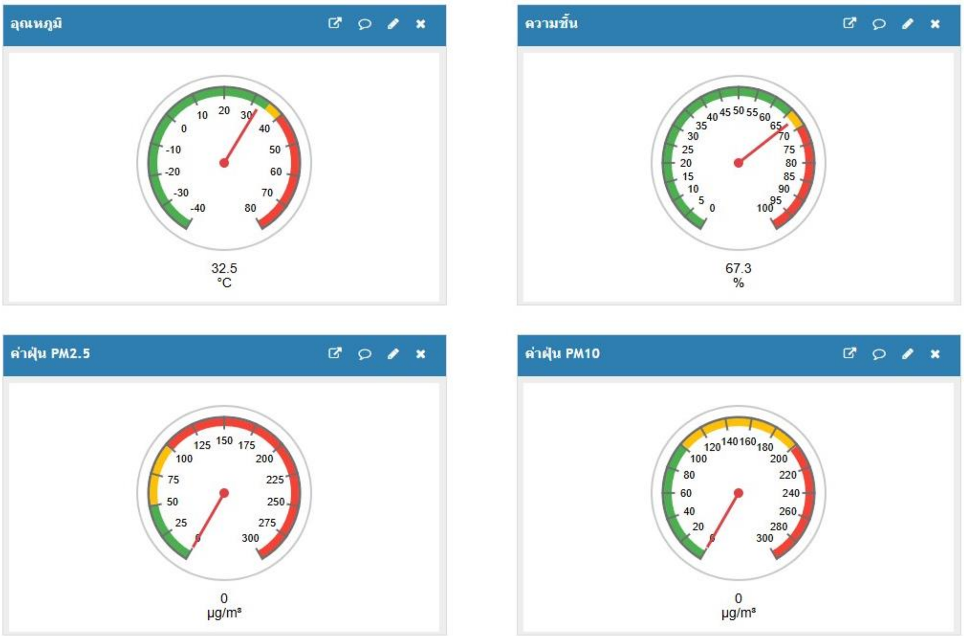


ภาพ 3 การออกแบบผังวงจรระบบ

5. การออกแบบผังวงจรระบบติดตามคลังสินค้าอัจฉริยะประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลางหลักซึ่งติดตั้งบน Expansion Board เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดความซับซ้อนในการเชื่อมต่อขา GPIO สถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ในส่วน Perception Layer นี้ประกอบด้วยชุดเซ็นเซอร์บูรณาการที่เชื่อมต่อผ่านพอร์ตสื่อสารที่หลากหลาย ได้แก่ DHT22 สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น, PMS7003 สำหรับตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ผ่านพอร์ต Serial (UART), MQ-2 สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของควันผ่านขา ADC ความละเอียด 12 บิต และ KY-026 สำหรับตรวจจับเปลวไฟผ่านขา Digital Input ที่ให้สถานะ Logic 0 เมื่อตรวจพบความร้อนหรือเปลวไฟ การออกแบบวงจรในลักษณะนี้ช่วยให้ระบบสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมได้ครบถ้วนทั้ง 6 พารามิเตอร์ พร้อมส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ทุก 2 วินาทีผ่านเครือข่าย Wi-Fi ได้อย่างมีเสถียรภาพและมีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 98.15 แสดงดังในภาพ 3

ผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบและทดสอบประสิทธิภาพ ผลการวิจัยแบ่งออกเป็นส่วนการแสดงผลและการประเมินประสิทธิภาพดังนี้การแสดงผลและการแจ้งเตือน ระบบสามารถแสดงผลผ่าน Dashboard ในรูปแบบ Gauge Widget โดยแบ่งระดับการแจ้งเตือนตามเกณฑ์ความปลอดภัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับเฝ้าระวัง และระดับอันตราย และสามารถแสดงข้อมูลบนแดชบอร์ดได้ดังภาพ 3



ภาพ 4 แดชบอร์ดแสดงข้อมูลจาก ThingSpeak

ตาราง 1 แสดงการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยและการแจ้งเตือนของระบบได้สังเคราะห์องค์ความรู้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ด้านหลัก เพื่อให้ครอบคลุมทั้งการรักษาคุณภาพสินค้าและความปลอดภัย โดยด้านอุณหภูมิและความชื้นอ้างอิงมาตรฐานคลังสินค้าข้าวของ (Phongsuwan & Thamviset, 2025) ที่กำหนดเพดานอุณหภูมิไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 70 เพื่อป้องกันการเกิดมอดและเชื้อรา (J et al., 2022) สำหรับการตรวจจับควันไฟใช้หลักการสอบเทียบเซ็นเซอร์ MQ-2 บนบอร์ด ESP32 ตามแนวทางของ โดยแบ่งค่าความละเอียด ADC (สูงสุด 4095) ออกเป็นเกณฑ์เฝ้าระวังที่ค่า 1,500 และเกณฑ์อันตรายที่ค่า 2,500 เพื่อแยกแยะความแตกต่างระหว่างควันทั่วไปกับควันจากเพลิงไหม้ ส่วนเกณฑ์ฝุ่นละอองได้ประยุกต์ใช้มาตรฐานคุณภาพอากาศเพื่อสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน (Puig & Darbra, 2024) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนานวัตกรรมติดตามสภาพแวดล้อมของ (Phongsuwan & Thamviset, 2025)

ผลการประเมินประสิทธิภาพและการประหยัดต้นทุน จากการทดสอบพบว่าระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนได้ภายใน 3-5 วินาที และจะแจ้งเตือนซ้ำทุก 1 นาทีหากค่าวิกฤตยังคงอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการ

ตาราง 1 เกณฑ์การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการแจ้งเตือน

ประเภทการวัด	เกณฑ์ระดับ 1 (เฝ้าระวัง - สีเหลือง)	เกณฑ์ระดับ 2 (อันตราย - สีแดง)	มาตรฐานอ้างอิง
อุณหภูมิ (℃)	เริ่มสูงกว่าปกติ	เสี่ยงต่อคุณภาพสินค้า	มาตรฐานคลังสินค้าเกษตร (Anggraini et al., 2025)
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความชื้นเริ่มสะสม	เสี่ยงเกิดเชื้อราในสินค้า	เสถียรภาพการวัดความชื้น (Syaputra, 2025)
ฝุ่นละออง PM2.5 ($\mu g/m3$)	มีผลต่อสุขภาพ	ระดับอันตรายตามมาตรฐาน	การเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อม (Phongsuwan & Thamviset, 2025)
ความเข้มข้นของควัน (ค่า ADC 0-4095)	ควันเจือจาง	ยืนยันเหตุเพลิงไหม้	การตอบสนองของเซ็นเซอร์ (Anggraini et al., 2025)
การตรวจจับเปลวไฟ (สถานะ Digital)	-	Logic 0 (Low) (ตรวจพบคลื่น IR จากไฟ)	ระบบตรวจจับอัคคีภัย (J et al., 2022)

ตรวจสอบแบบเดิม (Manual) พบว่าระบบ IoT ช่วยลดต้นทุนและเวลาดังตาราง 2 การคำนวณการลดต้นทุนแรงงานร้อยละ 40 อย่างเป็นระบบในสมการด้านล่างนี้ เริ่มต้นจากการเปรียบเทียบเวลาปฏิบัติงานแบบเดิม (Manual) ที่พนักงานต้องเดินตรวจคลังสินค้า 3 รอบต่อวัน รอบละ 30 นาที รวมเป็น 90 นาทีต่อวัน กับระบบ IoT ใหม่ที่ทำงานอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง ซึ่งพนักงานใช้เวลาเพียง 54 นาทีต่อวันในการตรวจสอบแดชบอร์ดและตอบสนองต่อการแจ้งเตือน ส่งผลให้ประหยัดเวลาได้ 36 นาทีต่อวัน หรือคิดเป็นส่วนต่างที่ลดลงร้อยละ 40 โดยผลกระทบเชิงบวกที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดเวลา แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการผ่านการตรวจสอบข้อมูลทุก 2 วินาที แทนการตรวจเป็นรอบเวลา ช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error) เพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล และยกระดับความปลอดภัยด้วยการแจ้งเตือนที่รวดเร็วภายใน 3-5 วินาที

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดต้นทุน} = \left(\frac{\text{เวลาที่ใช้ในระบบเดิม} - \text{เวลาที่ใช้ในระบบใหม่}}{\text{เวลาที่ใช้ในระบบเดิม}}\right) \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดต้นทุน } 40 = \left(\frac{90 - 54}{90}\right) \times 100$$

ตาราง 2 เปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่างระบบเดิมและระบบใหม่

รายการประเมิน	ระบบเดิม	ระบบใหม่	ผลลัพธ์ (Impact)
ความถี่ในการตรวจสอบ	เป็นรอบเวลา (ไม่ต่อเนื่อง)	ทุก ๆ 2 วินาที	ข้อมูลละเอียดมากขึ้นและวิเคราะห์ได้หลากหลาย
ความเร็วในการแจ้งเหตุ	ขึ้นอยู่กับรอบการเดินตรวจ	3-5 วินาที	ระงับเหตุได้ทันเวลา
ต้นทุนแรงงาน	ใช้พนักงานเดินตรวจ	ระบบอัตโนมัติ	ลดการใช้แรงงาน 40%
ความแม่นยำของข้อมูล	อาจเกิด Human Error	มีความเสถียรสูง	ข้อมูลน่าเชื่อถือ

ตาราง 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบกับเกณฑ์มาตรฐาน (Benchmarking Analysis)

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ	ผลการวิจัยของระบบนี้	เกณฑ์มาตรฐานอ้างอิง (Benchmarks)	บทวิเคราะห์ความสอดคล้อง
ความแม่นยำ (Accuracy)	98.15% (DHT22)	มาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปยอมรับที่ > 95%	สูงกว่ามาตรฐาน เหมาะสมกับสินค้าอ่อนไหวสูง เช่น เวชภัณฑ์และอาหารสด
ความเร็วการแจ้งเตือน (Latency)	3 - 5 วินาที	มาตรฐานสากลการระงับเหตุอัคคีภัยขั้นต้น < 10 วินาที	สอดคล้อง อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากลที่จำเป็นต่อการระงับเหตุฉุกเฉิน
ความต่อเนื่องข้อมูล	2 วินาที	60 วินาที	สูงกว่ามาตรฐาน ให้ข้อมูลละเอียดกว่าระบบเฝ้าระวังทั่วไปมาก
ความเสถียร (Stability)	ทำงานต่อเนื่อง > 31 ชม.	24 ชั่วโมง Syaputra (2025)	สอดคล้อง ยืนยันความเสถียรของ ESP32 ในการส่งข้อมูลคลาวด์ระยะยาว
การลดต้นทุนแรงงาน	54 นาที/วัน	90 นาที/วัน	โดดเด่น ปิดช่องโหว่เรื่อง Human Error และการตรวจที่ไม่ต่อเนื่อง

มาตรฐานการจัดการคลังสินค้าเกษตร ระบบถูกออกแบบโดยอ้างอิงเกณฑ์ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 35 °C และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 70% เพื่อป้องกันการเกิดมอดและเชื้อรา ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับคลังสินค้าข้าวและผลผลิตทางการเกษตร

มาตรฐานความปลอดภัยด้านอัคคีภัย การที่ระบบสามารถแจ้งเตือนผ่าน LINE ภายใน 3-5 วินาทีหลังจากตรวจพบควัน (ADC > 2,500) หรือเปลวไฟ (Logic 0) ถือเป็นจุดแข็งเชิงวิศวกรรมที่เหนือกว่าการรอให้พนักงานเดินตรวจพบตามรอบเวลา ซึ่งอาจใช้เวลาหลายนาทีถึงหลายชั่วโมง

มาตรฐานสุขอนามัยในที่ทำงาน การบูรณาการเซ็นเซอร์ PMS7003 เพื่อวัดฝุ่น PM2.5 และ PM10 เป็นการยกระดับสู่มาตรฐานคุณภาพอากาศเพื่อสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งเป็นแนวโน้มใหม่ในอุตสาหกรรม 4.0 ที่งานวิจัยเดิมส่วนใหญ่มักมองข้าม ความคุ้มค่าเชิงวิศวกรรมการใช้ ESP32 เป็นการ

เลือกที่คุ้มค่าต่อการลงทุน (Cost-effective) เนื่องจากรองรับการเชื่อมต่อไร้สายในตัวและมีขา GPIO เพียงพอต่อเซ็นเซอร์ทั้ง 6 พารามิเตอร์ ซึ่งเป็น Benchmark สำคัญของการออกแบบระบบ IoT สมัยใหม่

สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบติดตามสภาพแวดล้อมคลังสินค้าประสบความสำเร็จในการพัฒนาฮาร์ดแวร์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง โดยบูรณาการร่วมกับชุดเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อม 6 พารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ (DHT22), ฝุ่นละออง PM2.5, PM10 (PMS7003), ความเข้มข้นของควัน (MQ-2) และการตรวจจับเปลวไฟ (KY-026) การพัฒนาซอฟต์แวร์และการแสดงผล ระบบสามารถรวบรวมและส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ทุก ๆ 2 วินาที ไปยังแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingSpeak ได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการแสดงผลผ่านแดชบอร์ด (Dashboard) ในรูปแบบ Gauge Widget ซึ่งแบ่งเกณฑ์การแจ้งเตือนเป็นระดับเฝ้าระวัง (สีเหลือง) และระดับอันตราย (สีแดง) ตามมาตรฐานความปลอดภัย ระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติได้ถูกพัฒนาให้สามารถสั่งการและส่งข้อความแจ้งเตือนความผิดปกติไปยังผู้ใช้งานผ่าน LINE Messaging API ได้โดยอัตโนมัติ ด้านการประเมินประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ของการใช้งานระบบ ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานต่อเนื่องยาวนานกว่า 31 ชั่วโมง ในคลังสินค้าจริงขนาด 150 ตารางเมตร (กว้าง 10 เมตร ยาว 15 เมตร) ยืนยันว่าระบบมีเสถียรภาพสูง โดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล (Data Loss) นอกจากนี้ เซ็นเซอร์ DHT22 ยังแสดงผลความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 98.15 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไป ด้านความรวดเร็วในการตอบสนอง (Latency) พบว่าเมื่อตรวจพบความผิดปกติทางสภาพแวดล้อม (Syelviana Meisyaroh et al., 2026) ระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนฉุกเฉินได้ภายในเวลาเพียง 3-5 วินาที และจะแจ้งเตือนซ้ำทุก 1 นาทีหากสถานการณ์ยังอยู่ในระดับวิกฤต ด้านผลสัมฤทธิ์ในการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพ (Cost Reduction & Efficiency) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการจดบันทึกและเดินตรวจสอบแบบดั้งเดิม (Manual) พบว่าระบบ IoT นี้สามารถช่วยลดเวลาและต้นทุนด้านแรงงานคนลงได้ถึงร้อยละ 40 (ประหยัดเวลาจาก 90 นาทีเหลือ 54 นาทีต่อวัน) พร้อมทั้งช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error) และเพิ่มความต่อเนื่องในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อมตลอด 24 ชั่วโมง

อภิปรายผล

สรุปการอภิปรายผลการวิจัย ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบพบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหลายมิติ โดยเฉพาะด้านความแม่นยำ (Accuracy) ของเซ็นเซอร์ DHT22 มีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 98.15 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปที่ยอมรับในระดับร้อยละ 95 ขึ้นไป ความแม่นยำระดับนี้ช่วยยืนยันว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับภาคอุตสาหกรรม (Yuvaraj, 2025) และสอดคล้องกับข้อค้นพบของ (Anggraini et al., 2025) ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการรักษา

สภาพสินค้าที่มีความอ่อนไหวสูง เช่น อาหารสดและเวชภัณฑ์ ด้านความรวดเร็วในการแจ้งเตือน (Latency) ระบบสามารถประมวลผลและส่งการแจ้งเตือนผ่าน LINE ได้ภายใน 3-5 วินาที ซึ่งถือเป็นระดับที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลที่จำเป็นต่อการระงับเหตุอัคคีภัยขั้นต้นการแจ้งเตือนที่รวดเร็วนี้ถือเป็นจุดแข็งเชิงวิศวกรรมที่เหนือกว่ากระบวนการเดินตรวจสอบตามรอบเวลา ซึ่งอาจมีความล่าช้าและข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่ ด้านผลสัมฤทธิ์และการลดต้นทุน (Efficiency & Cost Reduction) สามารถลดการพึ่งพาแรงงานคน (Manual Labor) ได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยสามารถลดเวลาและต้นทุนแรงงานลงได้ถึงร้อยละ 40 การทำงานแบบอัตโนมัติ 24 ชั่วโมง (Syaputra, 2025) ช่วยปิดช่องโหว่เรื่องความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error) และเพิ่มความปลอดภัยให้กับคลังสินค้า (Harianto et al., 2024) อย่างมีนัยสำคัญ

ข้อเสนอแนะ

เพื่อการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะแบ่งเป็น 2 มิติหลัก ได้แก่ มิติด้านการออกแบบและพัฒนาระบบ ควรเพิ่มระบบความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cybersecurity) เพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลคลังสินค้าจากบุคคลภายนอก รวมถึงพัฒนาต่อยอดให้ระบบสามารถสั่งการควบคุมอุปกรณ์ได้แบบอัตโนมัติ และควรพิจารณาเครือข่ายไร้สายรูปแบบอื่นเพื่อลดข้อจำกัดของสัญญาณ Wi-Fi ในพื้นที่ขนาดใหญ่ สำหรับ มิติด้านการประเมินผลสัมฤทธิ์ เสนอให้นำฐานข้อมูลสภาพแวดล้อมไปประมวลผลร่วมกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อทำนายแนวโน้มในอนาคต (Predictive Analysis) ตลอดจนขยายขอบเขตการทดสอบระบบไปยังคลังสินค้าที่มีสภาพแวดล้อมรุนแรงหรือมีคลื่นรบกวนสัญญาณสูง เพื่อพิสูจน์เสถียรภาพการทำงานขั้นสูงสุด ซึ่งจะช่วยยกระดับการบริหารจัดการคลังสินค้าจากการแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุ (Reactive) ไปสู่การป้องกันความเสียหายเชิงรุก (Proactive) ได้อย่างสมบูรณ์แบบ

เอกสารอ้างอิง

Adisheshaiah, M. (2024). *SMART WAREHOUSE MONITORING SYSTEM USING IOT.* 20(3). https://doi.org/10.62643/ijerst.2024.v17.i3.pp1-9

Anggraini, D., Fitriani, E., Paramytha, N., & Dasmen, R. N. (2025). Prototype of Temperature, Humidity and Fire Detection Monitoring System in Rice Warehouse Based on ESP32 Microcontroller. *Journal of Applied Informatics and Computing,* 9(6), 3562-3566. https://doi.org/10.30871/jaic.v9i6.11311

Harianto, D., Bintang, H. S., Ardiyanto, A., & Widyawan, V. L. D. (2024). Development and Evaluation of an ESP32-based Temperature and Humidity Control Unit for Textile Storage. *International Journal of Engineering Continuity,* 4(1), 1-19. https://doi.org/10.58291/ijec.v4i1.309

J, L., S, L. S. V., R, M., & R, M. (2022). Automated food grain monitoring system for warehouse using IOT. *Measurement: Sensors,* 24, 100472. https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100472

Jarašūnienė, A., Čižiūnienė, K., & Čereška, A. (2023). Research on Impact of IoT on Warehouse Management. *Sensors,* 23(4), 2213. https://doi.org/10.3390/s23042213

Mohanraj*, K., Vijayalakshmi, S., Balaji, N., Chithrakkannan, R., & Karthikeyan, R. (2019). Smart Warehouse Monitoring Using Iot. *International Journal of Engineering and Advanced Technology,* 8(6), 3597-3600. https://doi.org/10.35940/ijeat.F9355.088619

Phongsuwan, H., & Thamviset, W. (2025). Detecting Fish Movement Behavior based on Constant Temperature and pH using the IoT and Realtime Object Detection Model. *Journal of Applied Informatics and Technology,* 8(1), 254657. https://doi.org/10.14456/jait.2026.3

Puig, M., & Darbra, R. M. (2024). Innovations and insights in environmental monitoring and assessment in port areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability,* 70, 101472. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101472

Srilatha, K., Rushikeshwar, D., & Bhaskar Chowdary, N. R. (2023). Smart Warehouse Monitoring System using Internet of Things (IoT). *2023 2nd International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking Technologies (ViTECoN),* 1-6. https://doi.org/10.1109/ViTECoN58111.2023.10157621

Syaputra, F. R. (2025). Design and build an IoT system for temperature and humidity observation using DHT 22 with ThingSpeak. *Journal of Computation Physics and Earth Science (JoCPES),* 5(1). https://doi.org/10.63581/JoCPES.v5i1.12

Syelviana Meisyaroh, Hari Purwadi, & Ansar Rizal. (2026). An Internet of Things (IoT)-Based Room Temperature and Humidity Monitoring System Using ESP8266 and DHT22 Sensors. *Journal of Engineering, Electrical and Informatics,* 6(1), 01-08. https://doi.org/10.55606/jeei.v6i1.6670

Yulizar, D., Soekirno, S., Ananda, N., Prabowo, M. A., Perdana, I. F. P., & Aofany, D. (2023). *Performance Analysis Comparison of DHT11, DHT22 and DS18B20 as Temperature Measurement* (pp. 37-45). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-232-3_5

Yuvaraj, R. (2025). Smart Warehouse Monitoring System using IoT. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology,* 13(7), 1290-1292. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.73170

ZHOU, X. (2025). Automated Warehouse Environment Monitoring and Intelligent Control Strategy Based on IoT Sensors. *Electrotehnica, Electronica, Automatica,* 73(3), 72-81. https://doi.org/10.46904/eea.25.73.3.1108009