Bulletin of Applied Sciences, Vol. 13 No. 1 January - June 2024: 27 - 36

2

ระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สาย

Automated calibration system for a digital thermo-hygrometer using image processing approaches and wireless communication

เจตนา ทองใบ[1*]
Jettana Tongbai[1*]
รับบทความ 12 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 14 กุมภาพันธ์ 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 19 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบอัตโนมัติสำหรับสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ (Digital thermo-hygrometer) แบบที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสารโดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital image processing) และวิธีการสื่อสารไร้สายแบบเรียลไทม์เพื่อลดระยะเวลาการสอบเทียบและลดข้อผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน (Human error) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาโดยใช้ ESP32-CAM ซึ่งเป็นโมดูลกล้องขนาดเล็กและราคาถูก จับภาพมิเตอร์และส่งไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่ประมวลผลภาพด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) ผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนแดชบอร์ดที่เข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ผลการทดลองตรวจสอบประสิทธิภาพของทั้งอัลกอริทึมและแอปพลิเคชันของผู้ใช้ โดยให้ประสิทธิภาพโดยรวมเทียบเท่ากับกระบวนการสอบเทียบด้วยตนเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการทดลองในระบบที่สร้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการจดจำภาพที่นำเสนอมีความแม่นยำเฉลี่ย 96.48%

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพดิจิทัล จอแสดงผลแบบ 7 ส่วน การสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

[1]กองสอบเทียบเครื่องมือวัด, กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This research presents an automated calibration system for the calibration of a Digital Thermo-Hygrometer not equipped with a communication interface using digital image processing technology and a real-time wireless communication method to reduce time-consuming calibrations and reduce human errors. This research proposes a solution based on an ESP32-CAM, a small and low-cost camera module, capturing a meter image and transferring it to a web server processing using the seven-segment optical character recognition (SSOCR) method. The measurement and calibration results are presented in a dashboard accessible through the web browser. The experimental results validate the effectiveness of both algorithm and user applications, offering overall performance comparable with manual calibrating processes. In particular, the experimental results on the built-up system show that the proposed image recognition methods provide an average accuracy of 96.48%.

Keywords: Digital image processing, 7-Segment Display, Calibration, Digital thermo-hygrometer

[1]Measuring Instrument Calibration Division, Department of Science Service
[*]Corresponding author e-mail address: jettana@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ (Digital thermo-hygrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้วัดสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบที่ต้องการควบคุมระดับอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้หรือใช้บันทึกอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ [1-3] เนื่องจากห้องปฏิบัติการต้องเฝ้าระวัง ควบคุม และบันทึกสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ต้องไม่ให้อุณหภูมิและความชื้นมีอิทธิพลต่อความใช้ได้ของผลการวัดตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 หรือข้อกำหนดทั่วไปว่าด้วยความสามารถของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ(General requirements for the competence of testing and calibration laboratories) [4] นอกจากนั้นดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ยังถูกนำไปใช้ในด้านการแพทย์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของระบบปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด (Operating room, OR) เพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อโรคในห้องผ่าตัดและให้คนทำงานอยู่ในสภาวะสบาย [5] การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคในห้องผู้ป่วยภาวะวิกฤติ (Intensive care unit, ICU) สำหรับผู้ป่วยที่มีอาการบาดเจ็บค่อนข้างรุนแรงหรือมีภาวะล้มเหลวของระบบการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย [6] และการควบคุมอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษายาที่ห้องยาของโรงพยาบาล [7] เป็นต้น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่ช่วยควบคุมคุณภาพของสินค้า ผลิตภัณฑ์และการบริการให้ได้ตามมาตรฐาน อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อสินค้าหรือเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ อันเนื่องมาจากความชื้น เมื่อเครื่องมือดังกล่าวถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องก็อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องสอบเทียบเครื่องมือ เพื่อตรวจสอบว่าเครื่องมือนั้นสามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องและเป็นการสร้างความมั่นใจและความน่าเชื่อถือของผลการวัด

การสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์เป็นการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์กับเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นมาตรฐานอ้างอิงภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นคงที่ภายในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity generator) [8] โดยที่ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จะต้องติดตั้งตัวเครื่องหรือโพรบวัดไว้ภายในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิและเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูง ซึ่งอาจใช้ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์หรือใช้เครื่องวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point hygrometer) ที่มีความถูกต้องที่ดีกว่าอย่างน้อย 4 เท่าเป็นมาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบหรืออาจใช้แหล่งกำเนิดความชื้น (Humidity source) อื่น ๆ เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงทางความชื้นโดยตรงก็ได้ การสอบเทียบแต่ละจุดสอบเทียบต้องให้แหล่งกำเนิดของอุณหภูมิและความชื้นมีความเสถียรภาพ (Stability) เสถียรภาพคือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง หากอุณหภูมิหรือความชื้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือสร้างอุณหภูมิและความชื้นมีความไม่เสถียร (Instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิและความชื้นที่อ่านได้ของทั้งเครื่องมือมาตรฐานอ้างอิงและดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ เมื่ออุณหภูมิและความชื้นของตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นมีความเสถียรภาพจึงทำการอ่านค่าและจดบันทึกการแสดงผลของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นผ่านช่องกระจก จากนั้นคำนวณผลการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของการวัด จะเห็นได้ว่ากระบวนการสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์มีความยุ่งยากและใช้เวลาที่ยาวนานเนื่องจากความเสถียรภาพของตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละจุดสอบเทียบต้องใช้เวลาทำงานที่ค่อนข้างนาน การสอบเทียบแบบอัตโนมัติจึงมีบทบาทสำคัญในการลดระยะเวลาในการสอบเทียบและลดความผิดพลาดในการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางด้านอุณหภูมิ [9] โดยใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Universal Serial Bus (USB) และ General Purpose Interface Bus (GPIB) ในการเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนข้อมูลและประมวลผลในการสอบเทียบได้แบบเรียลไทม์ แต่เนื่องจากดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ที่พบส่วนมากในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเป็นแบบชนิดพกพาใช้จอแสดงผลเพื่อแสดงข้อมูลที่เป็นตัวเลขที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร เครื่องมือดังกล่าวไม่มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และแสดงข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวสถาปัตยกรรมระบบที่เหมาะสมและอัลกอริธึมการประมวลผลภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการอ่านหน้าจอของเครื่องมือวัดที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร เทคโนโลยีการประมวลผลภาพได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบอัตโนมัติ โดยใช้กล้องดิจิทัลสามารถใช้แทนดวงตาของมนุษย์เพื่อจับภาพของจอแสดงผล

ดิจิทัลหรืออะนาล็อก จากนั้นภาพที่ถ่ายจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งจอแสดงผลจะได้รับการจดจำโดยอัลกอริธึมการจดจำรูปภาพ (Image recognition algorithm) สำหรับการรับรู้ของจอแสดงผลดิจิทัลนั้นเพื่อแก้ปัญหาของเครื่องมือวัดที่ไม่มีพอร์ตเชื่อมต่อสื่อสาร [10-11]

ระบบการอ่านมิเตอร์โดยใช้วิธีการประมวลภาพถูกพัฒนาในการส่งภาพผ่านเครือข่ายไร้สายแบบเรียลไทม์โดยใช้กล้องจับภาพมิเตอร์ไฟฟ้าส่งภาพมายังฐานข้อมูลกลางจากนั้นระบบทำการประมวลผลภาพนำข้อมูลมิเตอร์เพื่อทำการออกบิลให้กับลูกค้าได้อย่างรวดเร็วและลดปัญหาความผิดพลาดจากอ่านอ่านมิเตอร์ของเจ้าหน้าที่ [12] ด้วยความสามารถในการอ่านมิเตอร์จากการประมวลผลภาพได้นำไปใช้ในงานทางด้านมาตรวิทยา การสอบเทียบระยะไกลของงานด้านระบบไฟฟ้าที่อยู่ตามโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้กล้องขนาดเล็กจับภาพมิเตอร์ส่งข้อมูลผ่านโมดูลไปยังฐานข้อมูลเพื่อปรับปรุงระบบสอบเทียบให้มีความสะดวกมากขึ้น สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ของการสอบเทียบแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13]

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคโนโลยีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สายสำหรับการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้ ESP32-CAM ซึ่งเป็นโมดูลกล้องขนาดเล็กและราคาถูก จับภาพหน้าจอแสดงผลของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์และส่งไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่ประมวลผลด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) ผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนแดชบอร์ดที่เข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่นำเสนอได้ทดสอบในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงกับการสอบเทียบตามขั้นตอนมาตรฐานการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานระบบอัลกอริทึมและแอปพลิเคชัน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติประกอบด้วย เครื่องมือมาตรฐานอ้างอิงและเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบ, (Unit under calibration; UUC) ดังนี้

2.1.1 ตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity generator: 2500ST-LT, Thunder Scientific, U.S.A.)

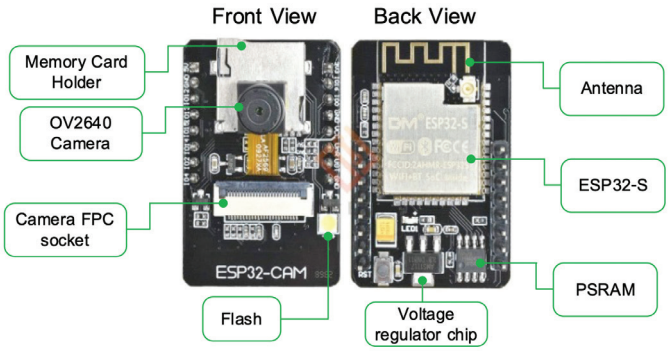
2.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point hygrometer: 473-SH2, MBW calibration, Switzerland

2.1.3 ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลชนิด Seven-segment (ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์, testo 608-H1, Testo SE & Co. KGaA, Germany)

รูปที่ 1 ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลชนิด 7-Segment (UUC)

2.1.4 โมดูล ESP32-CAM

อุปกรณ์ต้นแบบระบบเครือข่ายไร้สายและประมวลผลภาพใช้โมดูล ESP32-CAM [14] ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi 802.11b/ g/ n ในตัว โดยเป็นตัวรับสัญญาณ (Station-mode) และตัวส่งสัญญาณ (Access point-mode) ได้ในตัวเดียวเป็นบอร์ดที่มีราคาถูกและประหยัดพลังงานความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุด 160 MHz มีหน่วยความจำ 520 KB พร้อมกล้องขนาดเล็ก OV2640 ขนาดเซ็นเซอร์ 2 ล้านพิกเซล พร้อมไฟแฟรชในตัวและมีช่องเสียบการ์ดสำหรับใส่หน่วยความจำ SD Card ซึ่งโมดูล ESP32-CAM ดังรูปที่ 2

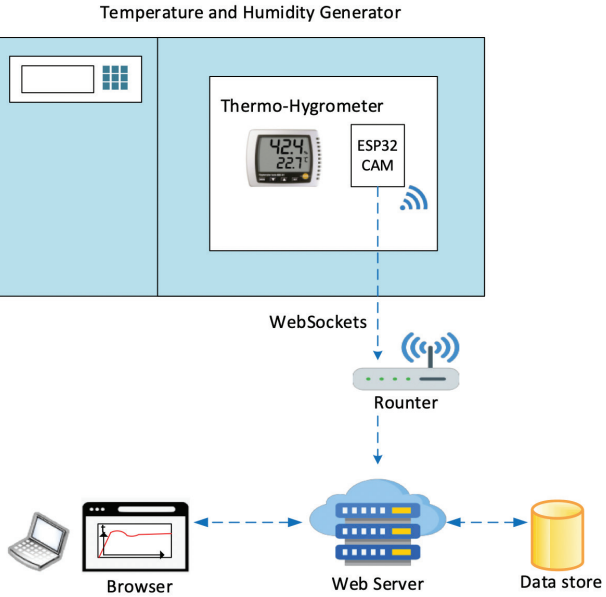


รูปที่ 2 โมดูล ESP32-CAM

2.2 การออกแบบภาพรวมของระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

การออกแบบภาพรวมของระบบสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการสอบเทียบเครื่องมือที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร (Communication interface) ได้มีการนำวิธีการ SSOCR มาใช้กับระบบนี้ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3 การออกแบบระบบทางด้านฮาร์ดแวร์แยกเป็นสองส่วนหลัก ในส่วนแรกเป็นการถ่ายภาพหน้าจอของ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ที่สอบเทียบในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นผ่านกระจกโดยใช้โมดูล ESP 32-CAM ภาพจะถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายมายังเว็บเซิร์ฟเวอร์ (WebServer) การทำงานการสื่อสารสำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเซิร์ฟเวอร์บนโปรโตคอลเว็บซ็อกเก็ต (WebSocket) ส่วนที่สองเซิร์ฟเวอร์ทำการประมวลผลภาพ ภาพจะถูกแปลงเป็นค่าตัวเลข สุดท้ายผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนเว็บเบราว์เซอร์

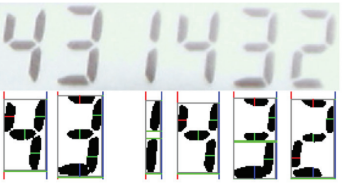
การออกแบบซอฟต์แวร์ในส่วนของ Front-end และ Back-end ที่ทำงานในระบบที่นำเสนอ ในส่วนของซอฟต์แวร์ด้าน Front-end ใช้ภาษาสำหรับพัฒนาเว็บ เช่น HTML, CSS และ JavaScript/ES6 ถึงมั่นใจได้ว่าแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้ในทุกเบราว์เซอร์ ซอฟต์แวร์ Front-end เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ทำงานบนเว็บเบราว์เซอร์สามารถทำงานได้ทั้งคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน แอปพลิเคชันออกแบบมาสำหรับ Graphical user interface สำหรับซอฟต์แวร์ส่วน Back-end จะถูกนำไปใช้กับ JavaScript/ES6 ทำงานบน ซอฟต์แวร์ Node.js Back-end ทำงานบนเว็บและเซิร์ฟเวอร์ข้อมูลเป็นแกนหลักของระบบสอบเทียบอัตโนมัติ ซึ่งมีหน้าที่ การจดจำภาพ การคำนวณ การจัดเก็บ และยังดำเนินการเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านโปรโตคอล WebSocket สำหรับเว็บเซิร์ฟเวอร์



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบสอบเทียบอัตโนมัติที่นำเสนอ

2.3 **อัลกอริทึม** Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR)

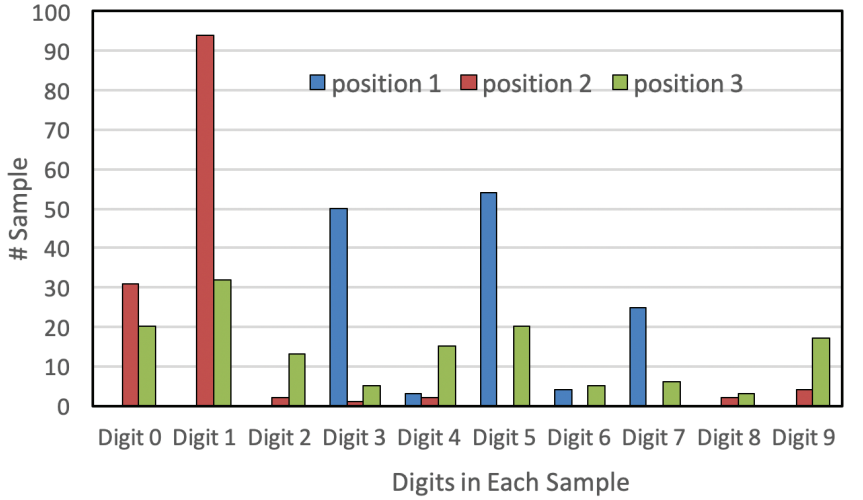
การกำหนดขอบเขตบริเวณบนภาพที่สนใจ (Region of interest: ROI) จะถูกวาดบนเว็บเบราว์เซอร์โดยผู้ปฏิบัติงานจุดที่สนใจเฉพาะตัวเลขบนหน้าจอแสดงผลของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ จากนั้นประมวลผลภาพ ด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) [15] อัลกอริทึม SSOCR ที่ใช้นั้นค่อนข้างเรียบง่ายและถูกกำหนดขึ้นอย่างครบถ้วน มีความเชี่ยวชาญในการรับรู้จอ 7-Segment ภาพจะถูกกรองและแปลงเป็นภาพขาวดำโดยมีตัวเลขเป็นฉากหน้าโดยใช้วิธีเทคนิคเทรชโฮลด์ (Threshold) รูปภาพนี้ถูกแบ่งส่วน (Image Segmentation) เพื่อค้นหาตัวเลข จากนั้นระบบจะจดจำแต่ละหลักแยกกัน เส้นขอบด้านซ้ายของตัวเลขแสดงด้วยคอลัมน์สีแดง เส้นขอบด้านขวาเป็นคอลัมน์สีน้ำเงิน เส้นสีเขียวแนวนอนแสดงความกว้างของตัวเลขแต่ละหลักที่เชื่อมต่อกัน สี่เหลี่ยมสีเทาแสดงถึงขนาดพิกเซลของตัวเลขที่พบ ในเส้นสแกนแนวตั้งจะแสดงเป็นสีแดงสำหรับตำแหน่งด้านบน สีเขียวตำแหน่งตรงกลาง และน้ำเงินตำแหน่งด้านล่าง เส้นสแกนในแนวนอนจะแสดงเป็นสีแดงในตำแหน่งด้านซ้ายและสีเขียวตำแหน่งด้านขวาของตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัลกอริทึม Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

การทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลแบบ 7-Segment ที่มีความละเอียด (Resolution) 0.1 %RH ทำการสอบเทียบการจับภาพในสภาวะที่มีแฟลชหรือแสงสะท้อนจากจอแสดงผล ดังรูปที่ 6 จำนวนตัวอย่างที่เก็บได้ทั้งหมด 398 ตัวอย่าง จากการอ่านหน้าจอทุก 1 นาที การกระจายตัวของหน้าจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ภายใต้เงื่อนไขจุดสอบเทียบที่แตกต่างกันโดยมีจุดการสอบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ที่ (30, 50 และ 70) %RH พบว่าการกระจายของตัวเลขส่วนใหญ่จะอยู่ในตำแหน่งที่ 2 (Position 2) และตำแหน่งที่ 3 (Position 3) ส่วนตัวเลข (Digit) เกือบที่มีการกระจายเหมือนกันหมดยกเว้นตัวเลข 1 (Digit 1) ที่จำนวนตัวอย่างมากที่สุด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การกระจายตัวของหน้าจอแสดงผล

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ชนิด 7-Segment ความแม่นยำในการจดจำ การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy) ดังสมการที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy) ของแต่ละตัวเลขตั้งแต่ “0” ถึง “9” ของการอ่านหน้าจอ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ มีอัตราเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุดอยู่ที่ 89.68 % ที่ตัวเลข “0” และ 98.04% ที่ตัวเลข “2” ตามลำดับ นอกนั้นมีความถูกต้องที่ 100% ความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 96.48 % ดังตารางที่ 1

$$Accuracy\ (\%) = \frac{Regcognized\ digits}{total\ no.of\ digits} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

Digit	total no. of digits	Recognized digits	Accuracy (%)
Digit 0	51	50	98.04
Digit 1	126	113	89.68
Digit 2	15	15	100.00
Digit 3	52	52	100.00
Digit 4	17	17	100.00
Digit 5	74	74	100.00
Digit 6	8	8	100.00
Digit 7	30	30	100.00
Digit 8	5	5	100.00
Digit 9	20	20	100.00
Total	398	384	96.48

หัวข้อนี้จะใช้แนวทางวิธีการทางสถิติสำหรับใช้ในการทดสอบความชำนาญโดยการเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ (ISO 13528:2015) [16] คำนวณการเปรียบเทียบการอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เงื่อนไข ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งจะนำค่าแก้จากผลการสอบเทียบพร้อมค่าความไม่แน่นอนมาเปรียบเทียบกันด้วยสถิติ E_n number ตามสมการที่ 2 พร้อมเกณฑ์การตัดสินดังนี้

$$E_n = \frac{X_m - X_a}{\sqrt{U_m^2 + U_a^2}} \quad (2)$$

โดยที่

X_a ค่าแก้ของการสอบเทียบด้วยอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ

X_m ค่าแก้ของการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

U_a ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการสอบเทียบด้วยอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ

U_m ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

$|E_n| < 1.0$ เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

$|E_n| \geq 1.0$ ไม่เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าอุณหภูมิของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เนื่องจากค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ของจุดสอบเทียบทั้งหมดทั้ง 2 เงื่อนไขมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วยสถิติ E_n number ตามสมการที่ 2 เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีค่าเทียบเคียงกับการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

Point of Calibration (%RH)	Automated Calibration		Manual Calibration		E_n
	Correction (%RH)	Uncertainty ± (%RH)	Correction (%RH)	Uncertainty ± (%RH)	
30	1.1	0.8	1.0	0.8	0.09
50	1.4	0.9	1.4	0.9	0.00
70	1.2	1.0	1.2	1.0	0.00

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าอุณหภูมิของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

Point of Calibration (°C)	Automated Calibration		Manual Calibration		E_n
	Correction (°C)	Uncertainty ± (°C)	Correction (°C)	Uncertainty ± (°C)	
20	0.1	0.3	0.1	0.3	0.00
25	0.2	0.3	0.2	0.3	0.00
30	0.2	0.3	0.2	0.3	0.00

จากตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ จากการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ตามขั้นตอนในการสอบเทียบทั้งกระบวนการโดยมีจุดสอบเทียบทั้งหมด 6 จุดสอบเทียบระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีการลดระยะเวลาในการอ่านและจดบันทึก การคำนวณผลการสอบเทียบ การออกรายงานและใบรับรองผลการสอบเทียบ แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอช่วยให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบลดระยะในการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนหลักในการสอบเทียบ	ระบบอัตโนมัติ (นาที)	เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ (นาที)
ระยะเวลาตู้สร้างอุณหภูมิและความความชื้นมีความเสถียรภาพ (6 จุดสอบเทียบ)	670	670
การอ่านและจดบันทึก (6 จุดสอบเทียบ)	30	70
การคำนวณผลการสอบเทียบ	2	30
การออกรายงานและใบรับรองผลการสอบเทียบ	2	30
เวลารวม	704	800

4. สรุป (Conclusion)

การออกแบบระบบสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและวิธีการสื่อสารไร้สายแบบเรียลไทม์ ระบบเครือข่ายไร้สายและประมวลผลภาพใช้โมดูล ESP32-CAM ที่มีขนาดเล็กและราคาถูกสามารถสื่อสารแบบไร้สายในการส่งภาพของหน้าจอของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ได้แบบเรียลไทม์และในการอ่านหน้าจอแสดงผลดิจิทัลในระบบประมวลผลภาพมีการนำเสนอวิธีการประมวลผลภาพและการรับรู้ (Recognition) จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลในการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ชนิด 7-Segment ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแต่ละจุดสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำในการจดจำรวมอยู่ที่ 96.48% และประสิทธิภาพระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยรวมจากการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วยการอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการด้วยสถิติผลการสอบเทียบของทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($E_n < 1$) แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีค่าเทียบเคียงกับการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการช่วยลดระยะเวลาการสอบเทียบที่ต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการจดบันทึกและถ่ายโอนข้อมูลลงในคอมพิวแตอร์ หลีกเลี่ยงการพิมพ์ด้วยเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน ลดข้อผิดพลาด ระบบสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์นี้ จึงสามารถนำมาใช้ในการสอบเทียบเพื่อลดระยะเวลาการสอบเทียบและลดข้อผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานได้ แนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป คือ เพิ่มประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติในเรื่องการอ่านมิเตอร์ที่ยังมีข้อผิดพลาดจากความสว่างที่ค่อนข้างน้อยและระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติโดยสมบูรณ์ (Fully automated) ที่สามารถทำงานแบบอัตโนมัติทั้งหมดโดยปราศจากคนเข้าไปเกี่ยวข้อง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน ตลอดจนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ประกอบในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่กองสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] จิตตกานต์ อินเที่ยง. ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์. Bull Appl Sci. 2022;11(11):105-112.

[2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). ข้อแนะนำการสอบเทียบเวอร์เนียรคาลิปเปอร์ (Vernier calipers) พิสัยการวัด 0 mm ถึง 1000 mm (GLA-21) [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [เข้าถึงเมื่อ 18 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://mx.nimt.or.th/wp-content/uploads/2022/11/GLA_21_Vernier-Calipers_TH.pdf

[3] จิระศักดิ์ ชัยสนิท, สุรเดช พานเพ็ง, ขวัญใจ สมบุญ, ภูวดี ตู้จินดา. การศึกษาแนวทางการทดสอบความชำนาญของห้องปฏิบัติการทดสอบความต้านแรงกดกล่องกระดาษลูกฟูก. Bull Appl Sci. 2017;6(6):101-7.

[4] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025: 2017. Geneva, Switzerland: ISO; 2017.

[5] จักรพันธ์ ภวังคะรัตน์. การควบคุมการติดเชื้อทางอากาศสำหรับโรงพยาบาล. บทความวิชาการสมาคมเครื่องปรับอากาศแห่งประเทศไทย. 2543;6(6):105-111.

[6] สุพจน์ เตชะอำนวยวิทย์. แนวทางการออกแบบการปรับอากาศและระบายอากาศสำหรับโรงพยาบาล. บทความวิชาการสมาคมเครื่องปรับอากาศแห่งประเทศไทย. 2551;21(18):51-59.

[7] ชะอรสิน สุขศรีวงศ์. เก็บยาในโรงพยาบาลให้ถูกวิธี [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [เข้าถึงเมื่อ 18 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://pharmacy.mahidol.ac.th/knowledge/files/0328.pdf

[8] Institute of Measurement and Control. A guide to the measurement of humidity [Internet]. 1996 [cited 2023 Mar 10]. Available from: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/a-guide-to-the-measure-of-humidity-gpg103

[9] Bojkovski J, Drnovsek J, Pusnik I, Tasic T. Automation of a precision temperature calibration laboratory. IEEE Trans Instru Meas. 2000 Jun;49(3):596-601.

[10] Grzeczka G, Klebba M. Automated calibration system for digital multimeters not equipped with a communication interface. Sensors. 2020 Jun 29;20(13):3650.

[11] Belan PA, Araujo SA, Librantz AFH. Segmentation-free approaches of computer vision for automatic calibration of digital and analog instruments. Measurement. 2013 Jan;46(1):177 - 84.

[12] Vemuri R, Sapte V, Cheriyan J, Maniyar R, Kshirsagar A, Real time & automated meter reading using image processing reducing human error. Int Res J Eng Technol (IRJET). 2022 Nov;11(9):875-881.

[13] Wang Q, Li H, Wang H, Zhang J, Fu J. A Remote calibration device using edge intelligence. Sensors. 2022; 22(1):322. doi: 10.3390/s2201032.

[14] Jackson L. ESP32-CAM: Machine vision tips, camera guides and projects [Internet]. 2021 [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://www.arducam.com/esp32-machine-vision-learning-guide/

[15] Auerswald E. Seven segment optical character recognition [Internet]. 2017 [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://www.unix-ag.uni-kl.de/~auerswal/ssocr/

[16] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. ISO/IEC 13528: 2015. Geneva, Switzerland: ISO; 2015.