

Development of an Intelligent Air Quality Control System for Shoe Cabinets to Prevent Odor Accumulation

Pimlada Saivivat¹ and Apisake Hongwitayakorn^{2,*}

¹Information Technology Program, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand; Email: ¹pimlada.saivivat@gmail.com

²Department of Computing, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand; Email: ²hongwitayakorn_a@su.ac.th

*Corresponding author: Apisake Hongwitayakorn (hongwitayakorn_a@su.ac.th)

Received: 1 March 2026; Revised: 8 July 2026; Accepted: 10 July 2026; Published: 26 July 2026

Abstract

This research aimed to develop an intelligent shoe care cabinet capable of reducing factors that contribute to unpleasant odors from footwear. The system focuses on controlling environmental conditions related to accumulated humidity and microbial growth, which are primary causes of odor, to promote good hygiene and reduce the burden of shoe maintenance for users. The system integrates a heater, UV-C (253.7 nm), a disinfectant misting system, and a ventilation fan, operating in conjunction with Internet of Things (IoT) technology via an Arduino UNO R4 Wi-Fi board and the ThingsBoard Cloud platform. From system testing, the system reduced relative humidity from 43%RH to 30%RH within 30 minutes of heater operation, and TVOC levels decreased from 184 ppb to 25 ppb within 5 minutes of ventilation. UV-C irradiation at 253.7 nm reduced bacterial counts from 6.80×10^3 to below 30 CFU/ml and fungal counts from 1.04×10^4 to below 30 CFU/ml within 10 minutes. Overall user satisfaction was rated at the highest level ($\bar{x} = 4.65$, S.D. = 0.50).

Keywords: Smart Shoe Cabinet, Internet of Things, Air Quality Control, UV-C Disinfection, Odor Reduction



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

Citation:

Saivivat, P., & Hongwitayakorn, A. (2026). Development of an Intelligent Air Quality Control System for Shoe Cabinets to Prevent Odor Accumulation. *Journal of Computer and Creative Technology*, 4(2), e3714.
<https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3714>

การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพอากาศในตู้รองเท้าเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นสะสม

พิมพ์ลิดา สายวิวัฒน์¹ และ อภิเชก หงษ์วิทยากร^{2,*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม 73000 ประเทศไทย;

Email: ¹pimlida.saivivat@gmail.com

²ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม 73000 ประเทศไทย;

Email: ²hongwitayakorn_a@su.ac.th

*ผู้ประพันธ์บทความ: อภิเชก หงษ์วิทยากร (hongwitayakorn_a@su.ac.th)

รับบทความ: 1 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 8 กรกฎาคม 2569; ตอรับบทความ: 10 กรกฎาคม 2569;

เผยแพร่บทความ: 26 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตู้รองเท้าอัจฉริยะที่สามารถลดปัจจัยที่ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์จากรองเท้า โดยมุ่งเน้นการควบคุมสภาพแวดล้อมด้านความชื้นสะสมและการเจริญเติบโตของเชื้อโรค ที่เป็นสาเหตุหลักของกลิ่น เพื่อส่งเสริมสุขอนามัยที่ดีและลดภาระการดูแลรองเท้าของผู้ใช้งาน ระบบประกอบด้วยการใช้ความร้อน รังสี UV-C (253.7 nm) ระบบฟ่นละอองน้ำยาฆ่าเชื้อ และพัดลมระบายอากาศ โดยทำงานร่วมกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ผ่านบอร์ด Arduino UNO R4 Wi-Fi และแพลตฟอร์ม ThingsBoard Cloud จากการทดสอบระบบพบว่า ระบบสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์จาก 43%RH เหลือ 30%RH ภายใน 30 นาทีของการทำงานของความร้อน และระดับสารระเหยอินทรีย์รวม (TVOC) ลดลงจาก 184 ppb เหลือ 25 ppb ภายใน 5 นาทีของการระบายอากาศ การฉายรังสี UV-C ที่ความยาวคลื่น 253.7 nm สามารถลดจำนวนแบคทีเรียจาก 6.80×10^3 เหลือต่ำกว่า 30 CFU/ml และลดจำนวนเชื้อราจาก 1.04×10^4 เหลือต่ำกว่า 30 CFU/ml ภายใน 10 นาที และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.65$, S.D. = 0.50)

คำสำคัญ: รองเท้าอัจฉริยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การควบคุมคุณภาพอากาศ, ยูวีซี, การลดกลิ่น



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

การอ้างอิง:

พิมพ์ลิดา สายวิวัฒน์, และ อภิเชก หงษ์วิทยากร. (2569). การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพอากาศในตู้รองเท้าเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นสะสม.

วารสารคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์, 4(2), e3714. <https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3714>

1. บทนำ (Introduction)

รองเท้าเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ใช้สำหรับป้องกันเท้าจากสิ่งแวดล้อมภายนอก อีกทั้งยังเป็นองค์ประกอบที่ช่วยเสริมบุคลิกภาพและมีบทบาทสำคัญต่อสุขอนามัยของผู้สวมใส่ อย่างไรก็ตาม การสวมใส่รองเท้าเป็นเวลานานในแต่ละวันย่อมทำให้รองเท้าเกิดการสะสมของความชื้น เหงื่อ แบคทีเรีย และเชื้อรา ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของกลิ่นไม่พึงประสงค์และยังส่งผลเสียต่อสุขอนามัยของผู้ใช้งานโดยตรง (Sánchez-Navarro et al., 2013; Qiu et al., 2022)

ปัญหาดังกล่าวหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้กลิ่นอับภายในรองเท้าสะสมมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้รองเท้าเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เนื่องจากการเจริญเติบโตของ เชื้อราบนวัสดุต่าง ๆ เช่น หนังแท้หรือผ้าใบ ซึ่งอาจส่งผลให้รองเท้าเกิดความเสียหายได้ (Qiu et al., 2022; Summer Neal, 2025) นอกจากนี้ยังทำให้ผู้ใช้งานขาดความมั่นใจและอาจเกิดปัญหาด้านสุขภาพได้อีกด้วย

ปัจจุบันแม้ว่าจะมีการวางจำหน่ายผลิตภัณฑ์ดูแลรองเท้าในประเทศไทยแล้ว แต่จากการสำรวจตลาดพบว่าเงื่อนไขการทำงานของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังไม่สอดคล้องกับข้อเท็จจริงและไม่ครอบคลุมความต้องการการใช้งานจริง เช่น บางรุ่นระบุว่าใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ในการทำความสะอาดรองเท้า โดยกล่าวว่าเป็นอุณหภูมิที่ปลอดภัยเหมาะสำหรับการดูแลรองเท้าโดยไม่ส่งผลทำลายวัสดุของรองเท้า แต่จากข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการพบว่า อุณหภูมิที่สูงกว่า 40 °C อาจส่งผลเสียต่อวัสดุรองเท้าบางชนิด โดยเฉพาะหนังแท้และกาวที่ยึดติดพื้นรองเท้า เป็นต้น (Aero Rubber Company, 2020; EVA Foam, 2016; Rutkowski et al., 2024)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาดูแลรองเท้าอัจฉริยะได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าวในเรื่องของความชื้น กลิ่น และเชื้อโรค โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ร่วมกับระบบเซนเซอร์อัจฉริยะ เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในตู้แบบอัตโนมัติ ทั้งการใช้ Heater เพื่อลดความชื้น การใช้แสง UV-C (253.7 nm) ในการฆ่าเชื้อ (Sottani et al., 2023; Nexa, n.d.) และการใช้ระบบฟ่นละอองน้ำยาฆ่าเชื้อหรือดับกลิ่น เพื่อช่วยให้รองเท้าได้รับการดูแลอย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้ และยืดอายุการใช้งานรองเท้าได้อย่างมีนัยสำคัญ (Qi et al., 2024)

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย (Research Objectives)

1. เพื่อพัฒนาดูแลรองเท้าอัจฉริยะที่สามารถควบคุมความชื้น ฆ่าเชื้อโรค และกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ

3. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qi et al. (2024) ได้ศึกษาปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ตู้รองเท้าอัจฉริยะ โดยพบว่าตู้ที่มีในปัจจุบันมักใช้งานได้ไม่สะดวก ประสิทธิภาพไม่เสถียร และยังคงตอบโจทย์ด้านสุขอนามัยไม่เพียงพอ ทีมผู้วิจัยจึงใช้การสัมภาษณ์ผู้ใช้ร่วมกับแบบสอบถามเพื่อระบุปัญหา เช่น กลิ่นอับ ความอับชื้น การระบายอากาศ และปัญหาสุขภาพจากเชื้อรา พบว่าสิ่งที่ผู้ใช้ให้ความสำคัญมากที่สุด คือ ฟังก์ชัน ฆ่าเชื้อโรค และ ปลูกฝังพันธะการใช้งาน ตามลำดับ โดยผลชี้ว่าต้องพัฒนาเรื่องระบบฆ่าเชื้อ การควบคุมความชื้น การจัดเก็บที่ยืดหยุ่น และส่วนติดต่อผู้ใช้ที่ชัดเจนขึ้น ความต้องการด้านสุขอนามัยคือปัจจัยหลักของแนวทางการออกแบบใหม่

สถาบันวิจัย INESCOP พบว่า ภายในรองเท้าเป็นพื้นที่ปิดที่ซึ่งเอื้อต่อการสะสมเหงื่อและการเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ แนวทางแก้ไขจึงเน้นการใช้สารต้านจุลินทรีย์ เช่น ซิลเวอร์ไอออน โลหะออกไซด์ และสารจากธรรมชาติ เช่น citronellol, linalool และ essential oils ต่าง ๆ ซึ่งมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและแบคทีเรีย (Sánchez-Navarro et al., 2013)

Sottani et al. (2023) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้รังสี UV-C ร่วมกับโอโซนในการลดการปนเปื้อนเชื้อโรคในสถานพยาบาล และพบว่าเทคโนโลยีทั้งสองมีผลเสริมกันในการทำลายแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าใช้เพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง โดย UV-C ทำลาย DNA ของจุลินทรีย์ ส่วนโอโซนออกซิไดซ์ผนังเซลล์ ส่งผลให้ลดจำนวนเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงในพื้นที่

ที่ต้องการความสะอาดระดับสูง แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการโดยไอโซน หลังการใช้งานจำเป็นต้องมีการระบายอากาศอย่างเคร่งครัดเนื่องจากอากาศมีก๊าซไอโซนที่เข้มข้นซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

นอกจากนี้ Best Direction System (Qiu et al., 2022) กล่าวว่า ความชื้นในอากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของเชื้อโรคหลายชนิด โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมปิดซึ่งมีความชื้นสะสมสูง ทำให้เชื้อแบคทีเรียและเชื้อราเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์และปัญหาด้านสุขอนามัยตามมา บทความยังกล่าวถึงความชื้นเกิน 60% RH เป็นช่วงที่เชื้อราเจริญเติบโตได้ดี จึงจำเป็นต้องมีการคำนึงถึงควบคุมความชื้นที่ถูกต้องและเหมาะสมอยู่เสมอ

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่นำเสนอระบบตู้รองเท้าที่บูรณาการการควบคุมความชื้น การฆ่าเชื้อด้วยรังสี UV-C การฟ้นละอองน้ำยา และการติดตามผ่าน IoT แบบ Real-Time ไว้ในระบบเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งการพัฒนาเพื่อรองรับและแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว

3.2 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการดูแลรักษารองเท้า

รองเท้าโดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุหลากหลายประเภท เช่น ผ้า หนัง และยาง ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ไวต่อสภาพแวดล้อมภายนอก โดยเฉพาะความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงหรือการสะสมของเชื้อโรค ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ เช่น การบวมน้ำ การขึ้นรา การแตกร้าว หรือการเปลี่ยนสีของวัสดุผิวรองเท้าได้ เพื่อยืดอายุการใช้งานของรองเท้าและลดโอกาสในการเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ จากการศึกษาข้อมูลพบว่าสภาพแวดล้อมเฉลี่ยที่เหมาะสมภายในพื้นที่จัดเก็บให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 18–25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40–50% RH ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการชะลอการเสื่อมสภาพของวัสดุและช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ อุณหภูมิสะสมภายในตู้ไม่ควรเกิน 40 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินกว่านี้อาจส่งผลให้วัสดุรองเท้าบางชนิดเกิดการเสียรูป เสื่อมสภาพ หรือสูญเสียคุณสมบัติทางกายภาพได้ (Aero Rubber Company, 2020; EVA Foam, 2016; Rutkowski et al., 2024; Summer Neal, 2025; Nexa, n.d.)

3.3 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเซนเซอร์ SHT35

เซนเซอร์ SHT35 เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิทัลที่ โดยประกอบด้วยตัวตรวจจับความชื้นแบบ Capacitive และตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบ Bandgap ซึ่งมีการปรับเทียบ (Calibration) และชดเชยอุณหภูมิ (Temperature Compensation) มาแล้ว ทำให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำสูง $\pm 1.5\% \text{RH}$ และ $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4 การตรวจวัดสารระเหยอินทรีย์ ด้วยเซนเซอร์ SGP30

เซนเซอร์ SGP30 เป็นเซนเซอร์ก๊าซแบบ Metal Oxide Semiconductor (MOS) เมื่อโมเลกุลของสารระเหยอินทรีย์ (VOC) สัมผัสพื้นผิว ตัวเรือนเซนเซอร์ ระบบภายในจะประมวลผลออกมาเป็นค่าความเข้มข้นของ Total Volatile Organic Compounds หน่วย ppb และคาร์บอนไดออกไซด์เสมือน eCO_2 (หน่วย ppm) ผ่านบัส I²C

3.5 การฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสี UV-C

รังสี UV-C ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 100–280 nm ซึ่งรวมถึงความยาวคลื่น 253.7 nm เป็นช่วงที่มีพลังงานเพียงพอในการทำลายสายพันธุ์กรรมของจุลินทรีย์ ทำให้เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัสตายหรือหยุดการเจริญเติบโต (Sottani et al., 2023) ช่วงคลื่น 253.7 nm ยังเป็นช่วงที่ไม่ทำให้เกิดก๊าซไอโซน (O_3) เนื่องจากไอโซนเป็นแก๊สที่อันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์

3.6 ระบบฟ้นละอองหมอกแบบ Ultrasonic

ระบบฟ้นละอองหมอกแบบ Ultrasonic เป็นระบบที่ใช้หลักการสั่นสะเทือนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (ประมาณ 1.7–2.4 MHz) เพื่อสร้างแรงดันให้ของเหลวแตกตัวกลายเป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียด ละอองดังกล่าวสามารถแขวนลอยในอากาศได้ดี ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและกระจายตัวได้รวดเร็ว

3.7 Arduino IDE และ Arduino UNO R4 Wi-Fi

Arduino IDE เป็นแพลตฟอร์มที่ใช้สำหรับพัฒนาและอัปโหลดโปรแกรมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Arduino โดยรองรับภาษา C/C++ และมีระบบคอมไพเลอร์และอัปโหลดโค้ด ซึ่งจะใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino UNO R4 Wi-Fi พร้อมโมดูล Wi-Fi ในตัว ทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลและเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ บอร์ดรองรับการใช้งานกับเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ

3.8 ThingsBoard Cloud

ThingsBoard Cloud เป็นแพลตฟอร์ม IoT แบบเปิด (Open-Source) ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลเซนเซอร์ แสดงผลแบบเรียลไทม์ และควบคุมอุปกรณ์ระยะไกลผ่านโปรโตคอล MQTT ในระบบนี้ บอร์ดจะทำหน้าที่เป็น Device ส่ง Telemetry ไปยัง ThingsBoard Cloud ผ่าน MQTT โดยใช้ Device Token เป็นตัวระบุตัวตน ข้อมูลต่าง ๆ จะแสดงบน Dashboard และสามารถปรับแต่ง (Custom Widget) เช่น กราฟ แสดงสถานะ และค่าต่าง ๆ ได้แบบเรียลไทม์ โดย ThingsBoard รองรับ RPC (Remote Procedure Call) ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถสั่งงานอุปกรณ์ผ่านมือถือโดยใช้ Mobile Application นอกจากนี้ระบบยังมีการจัดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ลงในฐานข้อมูลบนแพลตฟอร์ม ThingsBoard Cloud ในรูปแบบข้อมูลเชิงเวลา (Time-Series Data) ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามพฤติกรรมการใช้งานและสถานะแวดล้อมภายในตู้ได้อย่างต่อเนื่อง

3.9 MQTT Protocol

MQTT เป็นโปรโตคอลสื่อสารแบบ Publish/Subscribe ที่ ThingsBoard รองรับเพื่อใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT กับแพลตฟอร์มคลาวด์ โดยออกแบบให้มีการส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ThingsBoard กำหนดให้อุปกรณ์ทำการเชื่อมต่อผ่าน MQTT Broker ของแพลตฟอร์ม การสื่อสารทั้งหมดส่งผ่าน Topic ที่กำหนด เช่น Telemetry, Attributes และ RPC

4. กรอบแนวคิดงานวิจัย (Conceptual Framework)

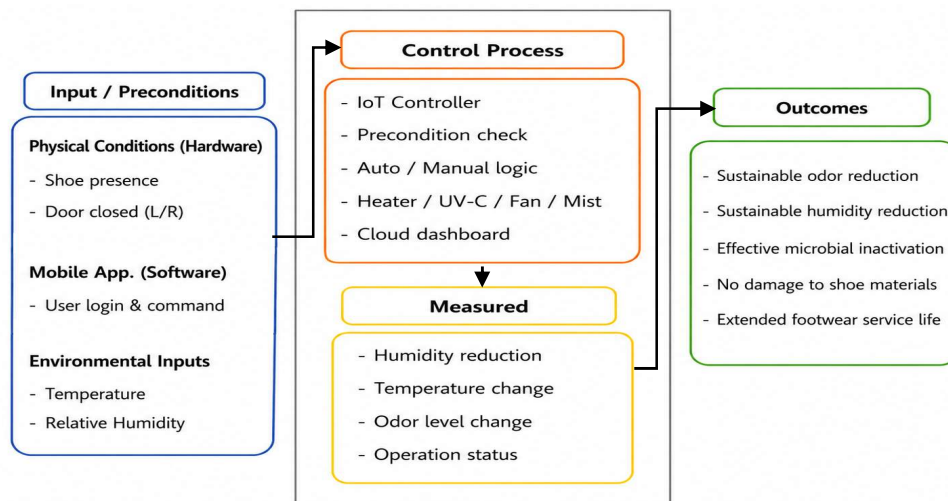


Figure 1. Conceptual Framework of the Internal Air-Quality Control System for Shoe Cabinets

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนา ระบบควบคุมคุณภาพอากาศภายในตู้รองเท้าอัจฉริยะ เพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นสะสม ความชื้น และการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยกรอบแนวคิดงานวิจัยถูกออกแบบขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เงื่อนไขนำเข้า กระบวนการทำงานของระบบ และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานของระบบอย่างเป็นระบบ กรอบแนวคิดดังกล่าวครอบคลุมการตรวจสอบเงื่อนไขเริ่มต้นของตู้รองเท้า การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ผ่านระบบ ควบคุมแบบอัตโนมัติและแบบสั่งงานด้วยผู้ใช้ กรอบแนวคิดงานวิจัยยังสะท้อนถึงผลลัพธ์ปลายทางที่มุ่งเน้นความยั่งยืนใน การดูแลรองเท้า โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุรองเท้าและช่วยยืดอายุการใช้งานของรองเท้าในระยะยาว

5. วิธีดำเนินงานวิจัย (Research Methodology)

5.1 สถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture)

สถาปัตยกรรมระบบของตู้รองเท้าอัจฉริยะถูกออกแบบในรูปแบบเลเยอร์ (Layered Architecture) เพื่อแสดง โครงสร้างการทำงานของระบบในลักษณะลำดับชั้น โดยแบ่งหน้าที่ของแต่ละส่วนอย่างชัดเจนตั้งแต่ระดับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

จนถึงระดับผู้ใช้งาน โดยสถาปัตยกรรมดังกล่าวประกอบด้วย 4 เลเยอร์หลัก ได้แก่ Device Layer, Network Layer, Platform Layer และ User Layer โดยมีรายละเอียดดัง Figure 2.

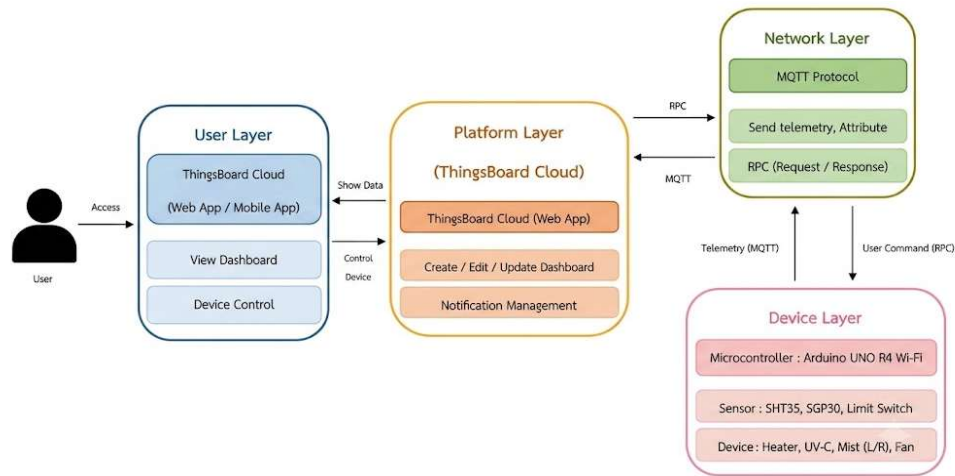


Figure 2. System Architecture of the Internal Air-Quality Control System for Shoe Cabinets

5.2 Use Case Diagram

ผลการออกแบบ Use Case Diagram ดัง Figure 3.

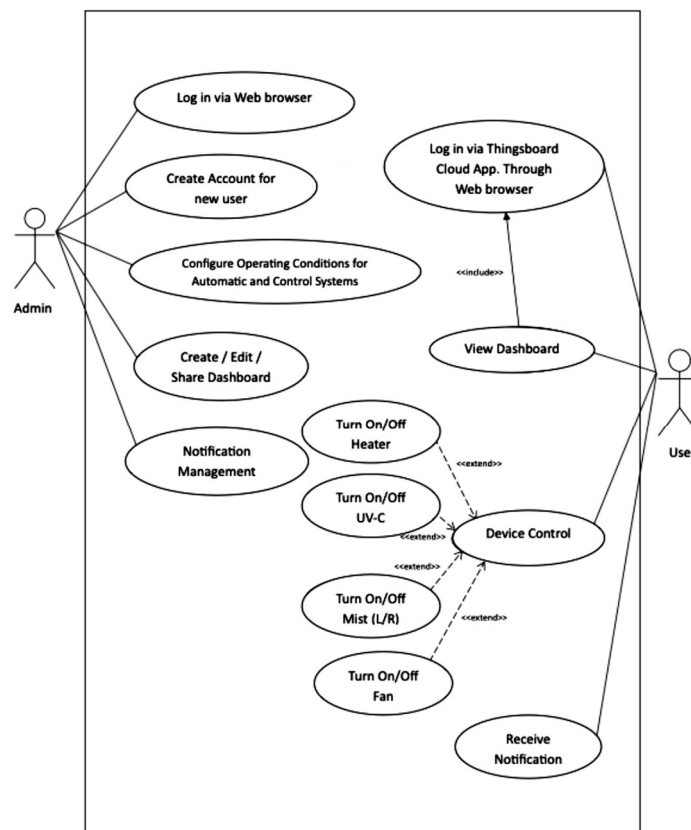


Figure 3. Use Case Diagram of the Internal Air-Quality Control System for Shoe Cabinets

จาก Figure 3. พบว่า

- 1) ผู้ดูแลระบบ (Admin) สามารถทำหน้าที่จัดการและกำหนดค่าต่าง ๆ ของระบบ
- 2) ผู้ใช้งาน (User) สามารถดูหรือควบคุมการทำงานของระบบผ่านแอป ThingsBoard Cloud หรือ Web

Application

5.3 Flow Chart การทำงานของระบบอัตโนมัติ

ผังงานของกระบวนการทำงานอัตโนมัติในตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ (ดัง Figure 4.) ซึ่งอธิบายลำดับการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นระบบไปจนถึงการทำงานสุดท้ายเสร็จสิ้น

5.4 Circuit Diagram การเชื่อมต่อวงจรของระบบ

แผนผังการเชื่อมต่อวงจร ของระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ (ดัง Figure 5.) โดยกำหนดการเชื่อมต่อหรือติดตั้งการเดินไฟระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R4 Wi-Fi กับ Sensor และ Devices

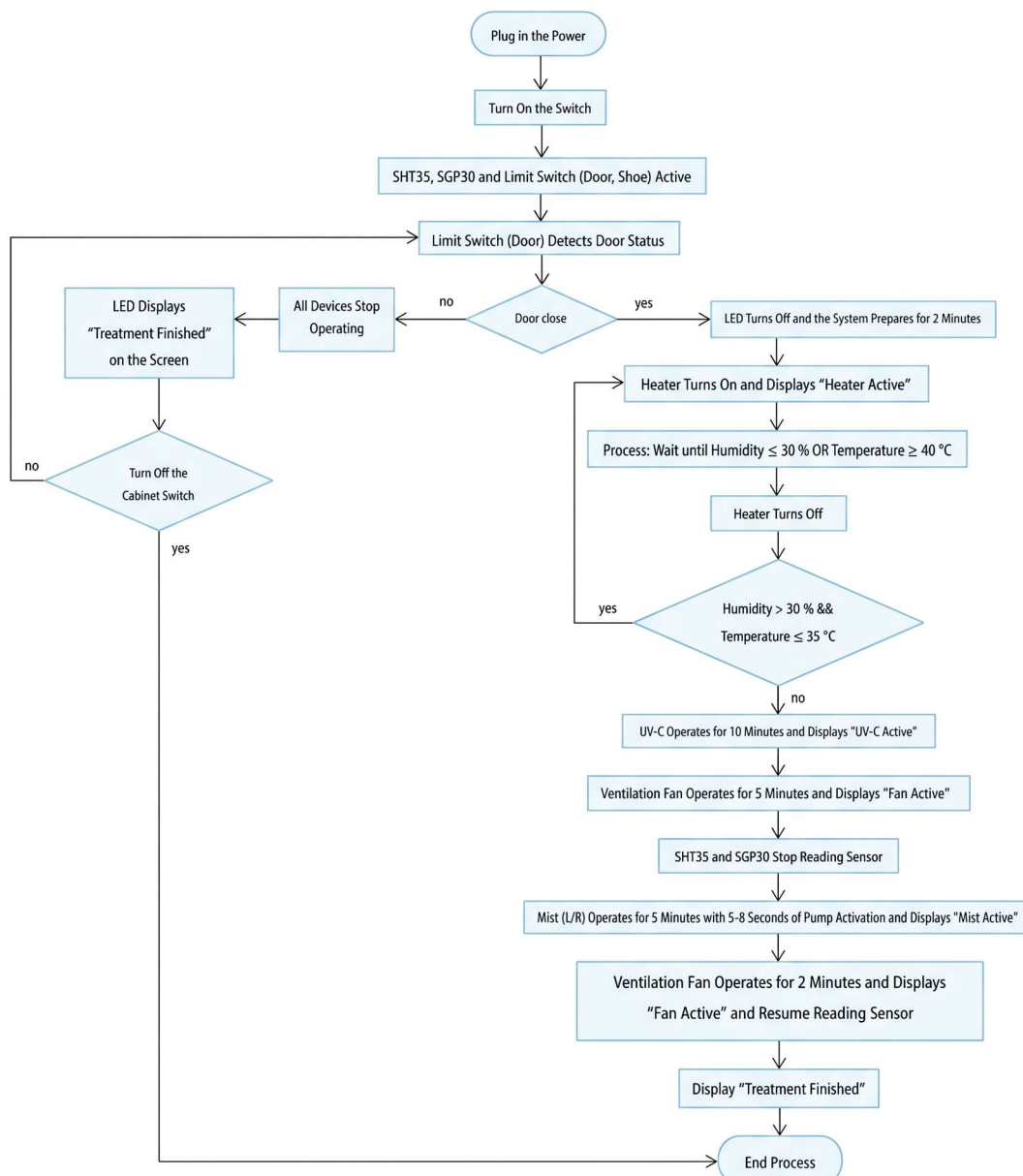


Figure 4. Flow Chart of the Internal Air-Quality Control System for Shoe Cabinets

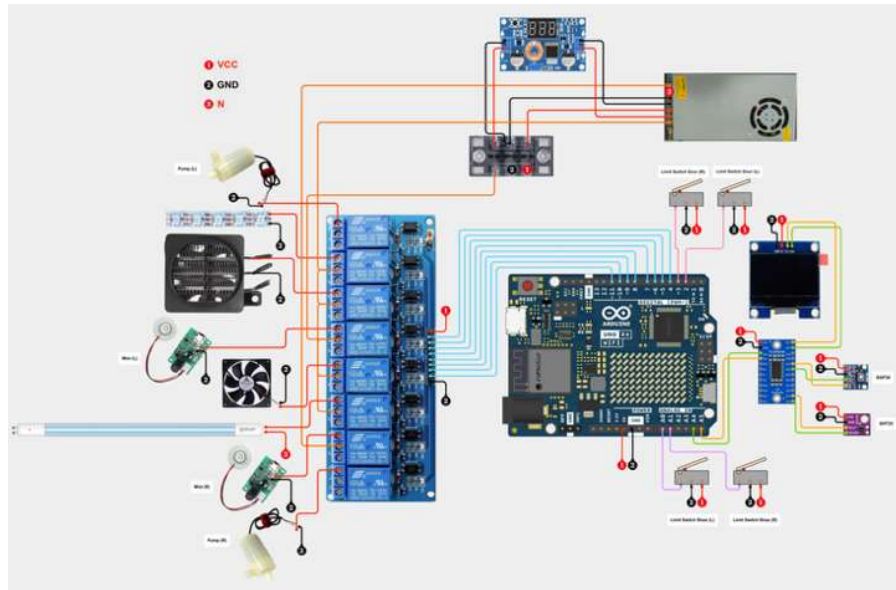


Figure 5. System Circuit Diagram of the Internal Air-Quality Control System for Shoe Cabinets

6. ผลการวิจัย (Results)

6.1 ผลการพัฒนาตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะที่สามารถควบคุมความชื้น ฆ่าเชื้อโรค และกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์

6.1.1 ตู้และการติดตั้งระบบ

ตู้สามารถดูแลรองเท้าบรรจุรองเท้าได้ทั้งหมด 2 คู่ โดยแบ่งเป็นทางฝั่งซ้ายและขวา สามารถรองรับรองเท้าได้ทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นรองเท้ากีฬา รองเท้าผ้าใบ รองเท้าผ้า รองเท้าแตะ รองเท้าหนัง หรือวัสดุอื่น ๆ โดยสภาวะแวดล้อมภายในตู้ถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการดูแลรักษารองเท้า ด้วยเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมคล้ายคลึงกัน ทำให้ไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของรองเท้า



Figure 6. External and Internal Views of the Smart Shoe Treatment Cabinet

6.1.2 ส่วน Hardware

1. เซนเซอร์

1) SHT35 ทำหน้าที่ วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สะสมภายในตู้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในด้านบนตรงกลางตู้

2) SGP30 ทำหน้าที่ วัดสารระเหยอินทรีย์รวม (TVOC) ที่สะสมภายในตู้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในด้านบนตรงกลางตู้

3) Limit Switch สำหรับตรวจจับรองเท้า ทำหน้าที่ ตรวจจับวัตถุ หรือ รองเท้าภายในตู้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ใน ถังผนังด้านหลัง ซ้าย-ขวา

4) Limit Switch สำหรับตรวจจับการเปิด-ปิดประตู ทำหน้าที่ ตรวจจับการเปิด-ปิดของประตู โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในด้านบนตรงกลางซ้าย-ขวา ขีดกับประตูตู้

2. อุปกรณ์หลัก

1) ฮีตเตอร์ ทำหน้าที่ ใช้สำหรับลดความชื้นภายในตู้ ด้วยความร้อนเพื่อให้อากาศเกิดความแห้งลง ลดความชื้นสะสม โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในกึ่งกลางตู้

2) UV-C (253.7nm) ทำหน้าที่ ฆ่าเชื้อโรคบริเวณพื้นผิวภายในกรองเท้า โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในด้านบนตรงกลางตู้

3) ระบบฟั่นละออง Ultrasonic ทำหน้าที่ ฟั่นน้ำยาในรูปแบบละอองหมอก โดยแยก 2 ฟั่นซ้าย-ขวา โดยทำงานตามฝั่งที่มีรองเท้าภายในตู้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในด้านบนใกล้ตำแหน่งประตูโดยแบ่งเป็นฝั่งซ้ายและขวา

4) พัดลมระบายอากาศ ทำหน้าที่ ไล่ความชื้น/ช่วยหมุนเวียนอากาศ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้ด้านหลังบนเยื้องไปทางด้านซ้าย

6.1.3 ส่วน Software

1) Arduino IDE ใช้เป็นเครื่องมือหลักในการเขียนโปรแกรมควบคุมบอร์ด Arduino UNO R4 Wi-Fi โดยโค้ดที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่จัดการเงื่อนไขการทำงานและส่งขึ้น Cloud

2) MQTT Protocol ใช้เป็นโปรโตคอลหลักในการ รับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Arduino และ ThingsBoard Cloud โดยลักษณะการทำงานคือ Arduino ทำการ Publish ข้อมูลเซนเซอร์ ไปยัง Broker บน Cloud และ ThingsBoard Cloud จะ Subscribe เพื่อนำไปแสดงผล

3) ThingsBoard Cloud ทำหน้าที่เก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ (Telemetry Data) แสดงผลผ่าน Dashboard ทั้งบน Web และ Mobile App. ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะตู้แบบ Real-time และควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกลได้

4) Dashboard และ Mobile Application ThingsBoard Cloud ทำหน้าที่เป็น Dashboard สำหรับผู้ใช้ โดยรองรับทั้งในรูปแบบของ Web Application และ Mobile Application (iOS/Android) ผ่าน ThingsBoard Cloud Application ที่สามารถลงชื่อเข้าใช้จากบัญชีที่ผู้ดูแลระบบสร้างให้ เพื่อเข้าใช้งานได้ทันที โดยแบ่งการแสดงผลเป็น 2 ส่วน คือ การแสดงผล (Dashboard) ดัง Figure 7. และการควบคุมการทำงาน (Device Control) ดัง Figure 8.



Figure 7. Mobile Application Dashboard

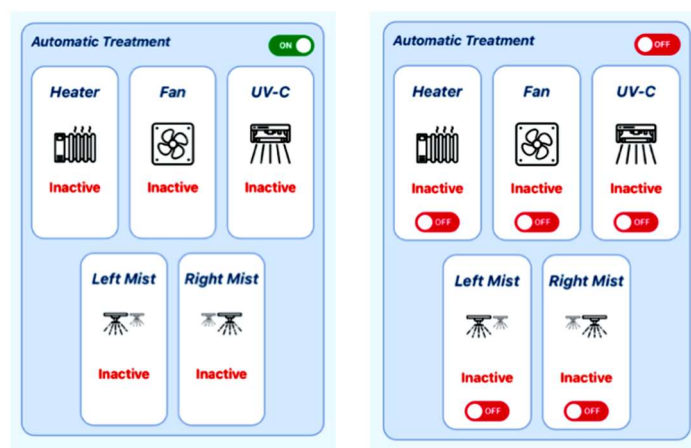


Figure 8. UI Treatment Mode

จาก Figure 7. และ Figure 8. อธิบาย ดังนี้

1. การแสดงผล (Dashboard) ประกอบด้วย การแสดงผลของ สถานะปัจจุบันของตู้รองเท้า จำนวนและตำแหน่งของรองเท้าภายในตู้ อุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ พร้อมทั้งค่ากลิ่นและระดับกลิ่นภายในตู้ และกราฟแสดงระยะเวลาการทำงานรายสัปดาห์ พร้อมสรุปค่าเฉลี่ยของความชื้น ค่ากลิ่นที่ลดลงได้

2. การควบคุมการทำงาน (Device Control) ดังนี้ 1) กรณีเลือก โหมดอัตโนมัติ หรือ เมื่อกดปุ่ม On คือ default ที่เป็นค่าเริ่มต้นใช้งาน ระบบจะเริ่มทำงานของกระบวนการแบบอัตโนมัติ ผู้ใช้จะไม่สามารถปรับการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ในขณะนี้ และ 2) กรณีเลือก โหมดปรับการทำงานเอง หรือ เมื่อกดปุ่ม Off การทำงานของระบบอัตโนมัติจะหยุดการทำงานอุปกรณ์ทั้งหมด ทันที แต่จะทำงานอยู่จนกว่าผู้ใช้จะปิดสวิตซ์ที่ตู้และสามารถสั่งการทำงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เองโดยในกรณีนี้

นอกจากนี้ยังมีการแจ้งเตือน (Notification and Push Notification) เพื่อให้ผู้ใช้ทราบถึงการทำงานของระบบ ในกรณีที่การทำงานเสร็จสิ้น ผู้ใช้จะได้รับการแจ้งเตือนทั้งในรูปแบบ Notification, Push Notification และในกรณีที่เกิดการทำงานที่ผิดพลาดจากระบบในรูปแบบ Notification

6.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ

6.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมความชื้นภายในตู้ดูแลรองเท้า

ระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะสามารถรับรู้วัตถุประสงค์ในการลดความชื้นภายในตู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยกระบวนการทำงานของฮีตเตอร์ร่วมกับการตรวจวัดและควบคุมค่าด้วยเซนเซอร์ SHT35 ซึ่งช่วยปรับสภาพแวดล้อมภายในตู้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการดูแลรองเท้า

การทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการภายใต้เงื่อนไขดังนี้ การทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ ทดสอบทั้งหมด 3 รอบ โดยตั้งค่าความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่มากกว่า 40%RH วัดผลทุก 5 นาที ในระยะเวลา 30 นาที ผลการทดสอบ ดัง Figure 9.

จาก Figure 9. การทำงานร่วมกันของฮีตเตอร์ และ SHT35 ก่อนเริ่มการทำงานของฮีตเตอร์ พบว่า SHT35 วัดอุณหภูมิเท่ากับ 29 °C และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 43%RH เมื่อฮีตเตอร์ทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที พบว่าวัดอุณหภูมิเป็น 39 °C และความชื้นสัมพัทธ์ลดลงเหลือ 30%RH ผลการเปรียบเทียบพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 °C และความชื้นสัมพัทธ์ลดลง 13%RH

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลของ Best Direction System (Qiu et al., 2022) ที่ระบุว่า การควบคุมความชื้นให้ต่ำกว่า 60%RH สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความชื้นที่ลดลงสู่ระดับ 30%RH ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บรองเท้าและการชะลอการเสื่อมสภาพของวัสดุตามที่กำหนดไว้ในกรอบแนวคิดงานวิจัย

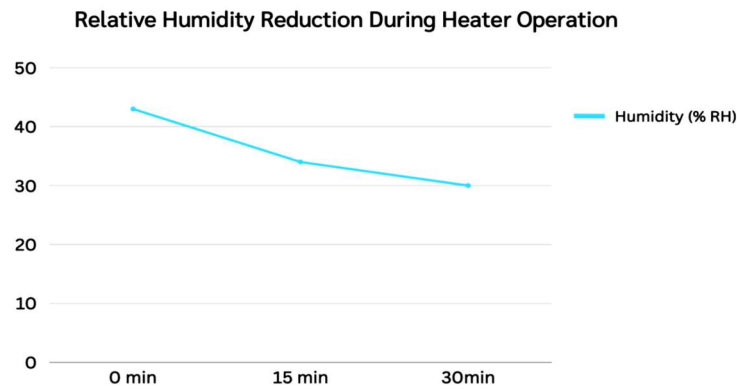


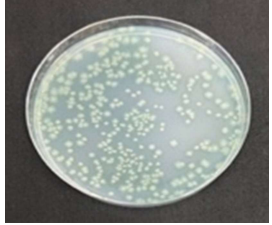
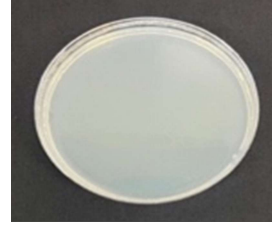
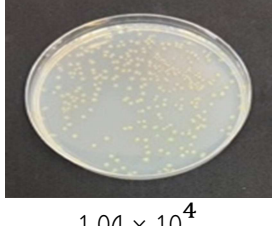
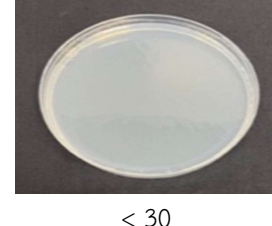
Figure 9. Relative Humidity Reduction During Heater Operation

6.2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคภายนอกรองเท้า

ระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการกำจัดเชื้อโรคบนพื้นผิวภายนอกรองเท้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยกระบวนการทำงานของรังสี UV-C (253.7 nm) ที่ออกแบบให้เหมาะสมกับการลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่สะสมบนรองเท้า

การทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการภายใต้เงื่อนไขดังนี้ : การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อด้วยรังสี UV-C ดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างจากพื้นผิวทั้งภายนอกและภายในรองเท้าด้วยวิธี Swab Technique แบ่งการเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เก็บตัวอย่างจากรองเท้าที่ผ่านการใช้งานทันทีก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงเริ่มต้น (Baseline) และช่วงที่ 2 เก็บตัวอย่างจากรองเท้าภายหลังผ่านการฆ่าเชื้อด้วยรังสี UV-C ที่ความยาวคลื่น 253.7 nm เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดส่งตรวจวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานการทดสอบทางจุลชีววิทยา

Table 1. Results of Microbial Inactivation Using UV-C (253.7 nm)

Scenario	Before UV-C	After UV-C 10 min	Remarks
Front Surface of Shoes (After 1-Day Incubation)			Colony counts were determined from culture plates with a suitable number of colonies, generally in the range of 30–300 colonies.
Bacteria	 6.80×10^3	 < 30	
Fungi and Yeast	 1.04×10^4	 < 30	

สรุปผลการทดลอง : ก่อนการฉายรังสี UV-C ตรวจพบเชื้อแบคทีเรีย จำนวน 6.80×10^3 CFU/ml และตรวจพบเชื้อราและยีสต์ จำนวน 1.04×10^4 CFU/ml หลังการฉายรังสี UV-C เป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่าจำนวนแบคทีเรียรวมถึงเชื้อราและยีสต์ ลดลงจนต่ำกว่า 30 CFU/ml แสดงให้เห็นว่า UV-C (253.7 nm) สามารถฆ่าเชื้อโรคนอกกรองเท้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อัตราการลดจำนวนจุลินทรีย์ดังกล่าวเกินกว่า 99.5% ทั้งในส่วนของแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sottani et al. (2023) ที่พิสูจน์ว่ารังสี UV-C มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสายพันธุ์กรรมของจุลินทรีย์ และสามารถลดการปนเปื้อนได้อย่างมีนัยสำคัญในพื้นที่ปิด

6.2.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ภายในตู้ดูแลรองเท้า

กระบวนการระบายอากาศภายในตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ ทำให้ระบบสามารถบรรลุนิ่วประสงค์ในการลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ภายในตู้ได้ตามที่กำหนดไว้ โดยอาศัยการทำงานของพัดลมเพื่อควบคุมระดับ TVOC การทดสอบประสิทธิภาพดำเนินการภายใต้เงื่อนไขดังนี้ : การทดสอบ TVOC หรือระดับกลิ่น วัดค่าคุณภาพอากาศภายในตู้ก่อนและหลังพัดลมทำงาน 5 นาที จำนวน 3 รอบ

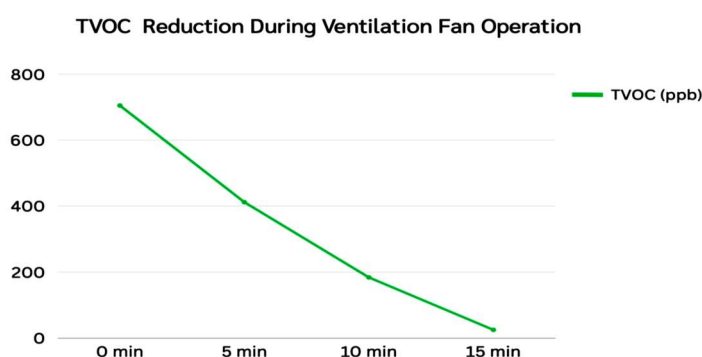


Figure 10. TVOC Reduction During Ventilation Fan Operation

จากการทำงานร่วมกันของเซนเซอร์ SGP30 และพัดลมระบายอากาศในการลดค่าก๊าซระเหยรวม (TVOC) ก่อนเริ่มการทำงานของพัดลมระบายอากาศ ตรวจวัดค่า TVOC ได้ 184 ppb ซึ่งอยู่ในระดับ Medium และเมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที พบว่าค่า TVOC ลดลงเหลือ 25 ppb และระดับคุณภาพอากาศอยู่ในระดับ Normal จากการเปรียบเทียบพบว่าค่า TVOC ลดลง 159 ppb

6.3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ

ผลการประเมินความพึงพอใจ โดยมุ่งเน้นการพิจารณาความเหมาะสมและความสอดคล้องของการทำงานในแต่ละส่วนของระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะ ใน 3 องค์ประกอบหลัก คือ ประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และ ความพึงพอใจ จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 คน ประเมินผลตามเกณฑ์ มาตรฐานการวัดของลิเคิร์ท 5 ระดับ ดังนี้ คะแนนเฉลี่ย 4.50 - 5.00 คือ มากที่สุด (Very High) คะแนนเฉลี่ย 3.50 - 4.49 คือ มาก (High) คะแนนเฉลี่ย 2.50 - 3.49 คือ ปานกลาง (Moderate) คะแนนเฉลี่ย 1.50 - 2.49 คือ พอใช้ (Fair) และ คะแนนเฉลี่ย 1.00 - 1.49 คือ ควรปรับปรุง (Needs Improvement) ผลการวิจัย ดัง Table 2.

Table 2. System Performance Evaluation Results

Evaluation Criteria	$\bar{x}$	S.D.	Level
1. Smart Shoe Treatment Cabinet (Hardware)	4.80	0.42	Very High
- The shoe treatment cabinet is easy to use and not complicated.	4.50	0.53	Very High
- The sensors and devices operate correctly as expected.	4.70	0.48	Very High
- The automatic treatment system operates efficiently.	4.60	0.52	Very High

Table 2. System Performance Evaluation Results (Cont.)

Evaluation Criteria	$\bar{x}$	S.D.	Level
- The manual treatment system operates efficiently for each device.	4.40	0.70	High
2. Mobile Application (Software)	4.50	0.53	Very High
- The dashboard display is clear, easy to understand, and not complicated.	4.70	0.48	Very High
- The device control section is easy to use and not complicated.	4.60	0.52	Very High
- The system responds quickly when commands are sent via the mobile application.	4.60	0.52	Very High
- System notifications, such as “Treatment Finished,” are accurate and clear.	4.60	0.52	Very High
3. Overall System Satisfaction	4.70	0.48	Very High
Overall Mean	4.65	0.50	Very High

จาก Table 2. ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จะได้ว่าระดับความพึงพอใจโดยรวมของระบบอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.65, S.D. = 0.50) โดยเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า ในส่วนของ ตัวเครื่องเก่า (Hardware) “การทำงานของเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปอย่างถูกต้องตามที่คาดหวัง (The sensors and devices operate correctly as expected.)” ได้รับความพึงพอใจในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.70, S.D.= 0.48) และ ส่วนของ Mobile Application (Software) “หน้าการแสดงผล (Dashboard) มีความชัดเจน เข้าใจง่าย และไม่ซับซ้อน (The dashboard display is clear, easy to understand, and not complicated.)” ได้รับความพึงพอใจในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.70, S.D. = 0.48) เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ในแต่ละหัวข้อประเมินพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.42 – 0.70 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มตัวอย่างมีความเห็นสอดคล้องกันในระดับสูง และผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือ

6. สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

จากการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของตัวเครื่องเก่าอัจฉริยะเพื่อควบคุมสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ พบว่าระบบที่ออกแบบขึ้นสามารถทำงานได้ครบถ้วนตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ทั้งในด้านการควบคุมความชื้น การกำจัดเชื้อโรค และการลดกลิ่นสะสมภายในโรงเก่า โดยระบบสามารถตัดสินใจการทำงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับการใช้งานจริง คำนึงถึงสุขอนามัยของผู้สวมใส่ ความสะดวกสบายในการใช้งาน และไม่ส่งผลเสียต่อสภาพของโรงเก่า

ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานโดยภาพรวมพบว่า ผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบอยู่ในระดับมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.65 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.50 แสดงให้เห็นว่าตัวเครื่องเก่าอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี

7. อภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

จากผลการทดลองพบว่า การทำงานร่วมกันของระบบควบคุมความชื้น รังสี UV-C ระบบฟ่นละอองน้ำยา และพัดลมระบายอากาศ มีส่วนช่วยลดปัจจัยที่ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ภายในโรงเก่าได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับหลักการด้านสุขอนามัยและการควบคุมสภาพแวดล้อมที่ชี้ให้เห็นว่าความชื้นและการสะสมของจุลชีพเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ และสอดคล้องกับ Sottani et al. (2023) ที่พิสูจน์ว่ารังสี UV-C มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสายพันธุ์กรรมของจุลชีพ และสามารถลดการปนเปื้อนได้อย่างมีนัยสำคัญในพื้นที่ปิด

นอกจากนี้ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติที่ตัดสินใจการทำงานโดยอิงจากค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ช่วยให้อุปกรณ์แต่ละส่วนทำงานได้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมภายในตู้ ผลการใช้งานพบว่าทั้งระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบ

ควบคุมด้วยตนเองสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของระบบได้ แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นและความเหมาะสมของการออกแบบระบบในการนำไปใช้งานจริง

8. ข้อเสนอแนะงานวิจัย (Recommendation)

ระบบตู้ดูแลรองเท้าอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นมีจุดประสงค์หลักสำหรับการใช้งานภายในครัวเรือน โดยเหมาะสำหรับการติดตั้งในพื้นที่ภายในอาคาร เช่น บริเวณหน้าบ้านภายในอาคาร หรือพื้นที่ที่มีการป้องกันแสงแดดและความชื้นจากภายนอก เนื่องจากระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เหมาะสมต่อการสัมผัสน้ำหรือการใช้งานกลางแจ้งโดยตรง การติดตั้งในพื้นที่ภายในจึงช่วยเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของระบบ

แนวทางการต่อยอดการใช้งานในอนาคต ระบบสามารถพัฒนาให้รองรับจำนวนรองเท้าที่มากขึ้นได้ พร้อมการแบ่งพื้นที่จัดเก็บรองเท้าแต่ละคู่ด้วยผนังกัน เพื่อเพิ่มความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน แนวคิดดังกล่าวเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่สาธารณะ เช่น ฟิตเนส, หอพัก หรือสถานที่ที่มีผู้ใช้งานร่วมกันจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยขยายขอบเขตการใช้งานของระบบจากระดับครัวเรือนไปสู่การใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

นอกจากนี้ ระบบสามารถต่อยอดโดยการนำข้อมูลการทำงานย้อนหลัง เช่น ระยะเวลาการทำงานและค่าจากเซนเซอร์ในแต่ละรอบ มาใช้ฝึกโมเดล Machine Learning เพื่อคาดการณ์เวลาที่กระบวนการดูแลรองเท้าจะเสร็จสิ้นและทำนายเวลาที่เหลือได้อย่างเหมาะสมในแต่ละกรณี

9. การเปิดเผยการใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Declaration of Generative AI)

งานวิจัยนี้มีเนื้อหาที่สร้างขึ้นหรือได้รับการสนับสนุนจากเครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (AI) ได้แก่ ChatGPT และ Gemini นำมาช่วยในการดำเนินงาน เช่น การวิเคราะห์ข้อมูล การปรับปรุงภาษา เรียบเรียงข้อความ โดยผู้เขียนได้ตรวจสอบและรับรองเนื้อหาทั้งหมด เพื่อให้มั่นใจว่ามีความถูกต้อง เป็นต้นฉบับ และสอดคล้องกับหลักจริยธรรมทางวิชาการ

10. การแสดงบทบาทผู้เขียน (CRediT Author Statement)

Pimlada Saiviat: Conceptualization, Methodology, System Design, Software, Hardware Development, Investigation, Data Curation, Formal Analysis, Validation, Visualization, Writing – Original Draft, Project Administration

Apisake Hongwitayakorn: Supervision, Methodology Review, Validation, Writing – Review & Editing

11. เอกสารอ้างอิง (References)

- Aero Rubber Company. (2020). *Safe Storage of Rubber Products and Maximizing Their Life*.
<https://aerorubber.com/2020/10/08/safe-storage-of-rubber-products>
- EVA Foam. (2016). *Safety Data Sheet*. https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/wc-prod-pim/Asset_Documents/EVA%20FOAM-%20MSDS.pdf
- Nexa. (n.d.). *Germicidal Radiation UVC 253.7 NM*. <https://www.nexa.eu/en/technical-support/germicidne-ziarenie-uvc-253-7-nm>
- Qi, Y., Kim, K., & Lu, X. (2024). Optimizing the Design of an Intelligent Shoe Cabinet: AHP-QFD Integration for Enhanced Functionality. *Asia-Pacific Journal of Convergent Research Interchange*, 10(4), 493–506. <https://doi.org/10.47116/apjcri.2024.04.38>
- Qiu, Y., Zhou, Y., Chang, Y., Liang, X., Zhang, H., Lin, X., Qing, K., Zhou, X., & Luo, Z. (2022). The Effects of Ventilation, Humidity, and Temperature on Bacterial Growth and Bacterial Genera Distribution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15345. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215345>

- Rutkowski, P., Kwiecień, K., Berezicka, A., Sułowska, J., Kwiecień, A., Śliwa-Wieczorek, K., Azinovic, B., Schwarzkopf, M., Pondelak, A., Pečnik, J. G., & Szumera, M. (2024). Thermal Stability and Heat Transfer of Polyurethanes for Joints Applications of Wooden Structures. *Molecules*, 29(14), 3337. <https://doi.org/10.3390/molecules29143337>
- Sánchez-Navarro, M. M., Pérez-Limiñana, M. A., Cuesta-Garrote, N., Maestre-López, M. I., Bertazzo, M., Martínez-Sánchez, M. A., Orgilés-Barceló, C., & Arán-Aís, F. (2013). Latest Developments in Antimicrobial Functional Materials for Footwear. In Méndez-Vilas, A. (Ed), *Microbial Pathogens and Strategies for Combating Them: Science, Technology and Education* (1, 102–113). Formatex Research Center.
- Sottani, C., Favorido Barraza, G., Frigerio, F., Corica, G., Robustelli Della Cuna, F. S., Cottica, D., & Grignani, E. (2023). Effectiveness of a Combined UV-C and Ozone Treatment in Reducing Healthcare-Associated Infections in Hospital Facilities. *Journal of Hospital Infection*, 139, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2023.06.029>
- Summer Neal. (2025). *Preventing Mold and Fungus in Commercial Textile Storage*. <https://www.dehumidifiers.com/post/preventing-mold-and-fungus-in-commercial-textile-storage>