การพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายอย่างง่ายสำหรับการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์: กรณีศึกษาการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์

Developing a simple distributed sensor system for automated online monitoring and alerting : case study of TVOC sensor network system prototype development for real-time monitoring and alerting of air quality in operations

6

ชนก ท่วมจร[1]

Chanok Thuamjorn[1]

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 8 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 23 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC (Total Volatile Organic Compound) สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์ เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายสำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์ ต้นแบบระบบที่พัฒนาขึ้นใช้วัสดุไฟฟ้า ประกอบด้วยเซนเซอร์แก๊ส TVOC ชนิด MOS แผ่นวงจรปรับระดับแรงดันลอจิก เป็นวัสดุหลักรวมไปถึงซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซด้านเทคโนโลยีสารสนเทศที่เกี่ยวข้องเช่น Virtual Private Server (VPS) ซอฟท์แวร์ IoT Broker และ ซอฟท์แวร์ IoT Gateway ซอฟท์แวร์ IoT Dashboard รวมไปถึง MQTT API เพื่อการพัฒนาต้นแบบตามแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาระบบไซเบอร์-กายภาพ (CPS) ในอนาคต ผลผลิตของการพัฒนานี้ได้ต้นแบบระบบสมาร์ทเซนเซอร์ TVOC ที่สามารถบันทึกข้อมูลความเข้มข้นได้แบบเรียลไทม์ สามารถแสดงผลข้อมูลย้อนหลังได้บน IoT Dashboard ในรูปแบบของกราฟ และสามารถแจ้งเตือนได้ผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ ทำให้สามารถวางแผนการจัดการมลพิษทางอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานได้สะดวกขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีของระบบสมาร์ทเซนเซอร์แบบโครงข่ายเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่ทำงานแบบโดดเดี่ยว อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบข้อมูลดิบจากต้นแบบที่ประกอบจากเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัว ในระบบ พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ภายในกลุ่มมีความเป็นเชิงเส้นน้อย (R^2<0.9) เมื่อใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่มเซนเซอร์ ทั้งนี้ ประเด็นดังกล่าวเป็นเรื่องปกติของคุณสมบัติของระบบที่ใช้เซนเซอร์แบบกระจาย ซึ่งจำเป็นต้องใช้การปรับแก้ค่า หรือการทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐานก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งสามารถดำเนินการได้ในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด สมาร์ทเซนเซอร์ ระบบเฝ้าติดตามแบบเรียลไทม์ คุณภาพอากาศ ระบบแจ้งเตือนแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ

Keywords: TVOC, Smart-sensor,Real-time monitoring, Air quality, Mobile messenger application

Abstract

This work demonstrates the development of a smart TVOC sensor network. A smart TVOC sensor system is designed using MOS type TVOC sensors, a logic level converter circuit, VPS and IoT-related open-source software including IoT broker, IoT gateway and MQTT API. The system is used as a prototype for smart sensors which plays a crucial role in the development of the cyber-physical system. The final spin-off of the development is capable to create near real-time TVOC concentration data records, online TVOC concentration reports on IoT dashboard, and online TVOC concentration reports on mobile messenger applications, making it more advantageous than traditional standalone TVOC detectors. By taking advantage of the development, a TVOC smart sensor could help control air pollution in the workspace becomes more efficient. Data from the system composed of 3 TVOC sensors, in this work, is collected and analyzed to replicate the measurement uncertainty model and covariance analysis within groups.The result shows that the system exhibits a weak correlation (R^2< 0.9) which is commonly due to a tradeoff between the standalone sensor and distributed sensor. Consequently, data pre-processing and normalization are necessarily required for the further development of a smart TVOC sensor network.

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* Corresponding author e-mail address: chanok@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

การแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานภายในอาคาร มีความสำคัญอย่างมากต่อผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน [1] ยิ่งไปกว่านั้นการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์จะทำให้ทราบถึงอันตรายของมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงทีเพื่อป้องกันความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่จะเกิดขึ้นได้ปัญหามลพิษอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานมักมาพร้อมกับปัญหากลิ่นรบกวน ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในพื้นที่ปฏิบัติงานโดยเฉพาะพื้นที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับสารเคมี อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป รวมไปถึงการทำเกษตรกรรมและปศุสัตว์พื้นที่ปฏิบัติงานมักมีการปนเปื้อนของไอระเหยที่เป็นสารเคมีซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOC) เมื่อความเข้มข้นของ VOC ในอากาศมีค่ามากก่อให้เกิดเป็นมลพิษทางอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงาน และหากการทำงานของระบบระบายอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงานไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอมลพิษอากาศยังสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้อีกด้วย การจำกัดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารเคมีและกลิ่นรบกวนในอากาศ นอกเหนือจากการออกแบบระบบการจัดการทางลมภายในพื้นที่ปฏิบัติงานและระบบบำบัดอากาศที่ดีแล้ว ยังต้องมีระบบตรวจสอบที่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการปนเปื้อนของสารเคมีในอากาศได้อย่างต่อเนื่องทันการณ์เพื่อใช้ทวนสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และระบบที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดและกำจัดมลพิษทางอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงาน

เซนเซอร์ TVOC (Total volatile organic compound) เป็นเซนเซอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับเติมเต็มการวัดค่าคุณภาพอากาศภายในอาคารหรือพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยนำมาใช้เติมเต็มวิธีการวัดค่าความเข้มข้น VOC ในอากาศที่เป็นมาตรฐาน [2-3] ทั้งนี้วิธีมาตรฐานดังกล่าวเหมาะกับการใช้สำรวจคุณภาพอากาศเฉพาะช่วงเวลาที่ทำการสำรวจ และเป็นวิธีการวัดค่า VOC ที่มีความยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้านเคมีชั้นสูง ไม่เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเฝ้าระวังการรั่วไหลหรือการสะสม VOC หรือเหตุการณ์อื่นที่เป็นเหตุเฉพาะกาลได้

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบสมาร์ทเซนเซอร์ตามกรอบการออกแบบและพัฒนาระบบไซเบอร์-กายภาพ [4] โดยเลือกการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากปัญหากลิ่นรบกวนจากกระบวนการทำงานและระบบระบายอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปฏิบัติงาน [4] ระบบอุปกรณ์ต้นแบบได้พัฒนาขึ้นตามแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีเซนเซอร์ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things:IoT) [5] กระบวนการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายสมาร์ทเซนเซอร์ TVOC นี้เริ่มต้นด้วย 1) การออกแบบโครงข่ายอุปกรณ์และการสื่อสารการรับและการส่งผ่านและการจัดการข้อมูล 2) การจัดทำต้นแบบ (Embodiment design) ระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น 3) การทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์ และ 4) การทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบหาแนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัยและ [6-7] ได้จัดทำแนวทางสำหรับการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) โดยกำหนดค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (Total volatile organic compound : TVOC) เป็นองค์ประกอบดัชนีชี้วัดคุณภาพอากาศภายในอาคาร ตรวจวัดโดย Real-time Photoionization Detector(PID) หรือวิธีเทียบเท่า มีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (8 ชั่วโมง) เท่ากับ 3,000 ppb เมื่อค่า TVOC > 3,000 ppb หรือพบว่ามีกลิ่นภายในอาคาร หรือมีการระบายอากาศ (Ventilation rates) น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอ้างอิง Singapore Standard SS 553: 2009 Code of practice for air-conditioning and mechanical ventilation in buildings ควรมีการวิเคราะห์ VOC รายชนิด (Species) ต่อไป ทั้งนี้การศึกษาผลกระทบของ VOC ต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่โดย Lars Mølhave พบว่าผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ดูเหมือนไม่รับรู้การเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีสาร VOC เจือปนที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเริ่มมีความรู้สึกไม่สะดวกในการปฏิบัติงานเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 3,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึง 25,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผู้ปฏิบัติงานจะรู้สึกปวดหัวร่วมกับอาการทางระบบประสาทอื่น ๆ [8]

นอกเหนือจากเซนเซอร์ชนิด PID ที่ระบุในแนวทางการตรวจวัด TVOC ในอาคารของสำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย และเซนเซอร์ TVOC ที่มักพบบ่อยในปัจจุบันมีอีก 2 ชนิด [9] ได้แก่ เซนเซอร์ชนิด Electrochemical และเซนเซอร์ชนิด Metal oxide semiconductor (MOS) สำหรับการพัฒนานี้เลือกใช้เซนเซอร์ชนิด MOS ซึ่งในปัจจุบันมีสินค้าอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ใช้เซนเซอร์ชนิดนี้

ในตลาดอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการวัดของเซนเซอร์ชนิดนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผู้ผลิตเป็นผู้กำหนด อีกทั้งยังไม่มีแก๊ส TVOC มาตรฐาน (Certified Reference Material: CRMs) สำหรับใช้ในการสอบเทียบเซนเซอร์ TVOC ทุกชนิด เนื่องจากยังไม่สามารถหาสัดส่วนที่ตายตัวสำหรับการผสมแก๊ส TVOC มาตรฐานที่สมมาตรกับส่วนผสมของแก๊ส VOC ที่เป็นองค์ประกอบได้ งานพัฒนานี้จึงนำเซนเซอร์ชนิด MOS มาใช้เพื่อศึกษาให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานที่เพียงพอในการพัฒนาระบบเซนเซอร์ในขั้นถัดไป

2.1 การออกแบบโครงข่ายอุปกรณ์และการสื่อสารการรับและการส่งผ่านและการจัดการข้อมูล

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนเป็นสำคัญ ได้แก่ 1) เซนเซอร์ TVOC แบบกระจายซึ่งติดตั้งแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ System on Module (SOM) เพื่อใช้ทำการดึงข้อมูลจากเซนเซอร์และเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย 2) เซิร์ฟเวอร์เสมือนภายในองค์กร (Local VPS) สำหรับใช้เป็นศูนย์รวมข้อมูลจากเซนเซอร์ TVOC ในโครงข่ายภายในองค์กร และ 3) ระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการส่งข้อมูลการแจ้งเตือนและการติดตามผ่านระบบออนไลน์การทำงานของระบบได้ถูกออกแบบให้มีการสื่อสาร การรับและการส่งผ่านข้อมูลอย่างเป็นขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การดึงข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อบันทึกเข้าสู่ฐานข้อมูล

1) แผ่นวงจร SOM เริ่มการทำงานเมื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่วงจร

2) แผ่นวงจร SOM ทำการดึงข้อมูล TVOC จากเซนเซอร์ทุก 10 วินาที

3) แผ่นวงจร SOM ทำการกรองข้อมูลที่ไม่ถูกต้องทางดิจิทัลออก

4) แผ่นวงจรนำข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกต้องมาผนวกกับข้อมูลการประทับเวลา

5) แผ่นข้อมูลนำข้อมูลที่ประทับเวลาแล้วส่งเข้าสู่ Local VPS

6) IoT Broker/Gateway ทำการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลในหน่วยความจำของ Local VPS

7) ระบบเริ่มทำซ้ำข้อ 2.1.1 ข้อ 2) เพื่อดึงข้อมูลจากเซนเซอร์เข้าสู่ฐานข้อมูลอัตโนมัติทุก 10 วินาที

8) ทำซ้ำข้อ 2.1.1 ข้อ 1) เมื่อต้องการเริ่มต้นการทำงานใหม่ทั้งระบบ

2.1.2 การแจ้งเตือนค่าความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์

1) โปรแกรมอัตโนมัติเริ่มทำงานเมื่อถึงเวลาที่ตั้งค่าไว้

2) โปรแกรมอันโนมัติส่งคำขอรหัสยืนยันตัวตนเพื่อเข้าถึงข้อมูลภายใน IoT Broker/Gateway

3) โปรแกรมอัตโนมัติดึงค่าข้อมูลปัจจุบันจากเซนเซอร์ล่าสุดที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลของIoT Broker/Gateway

4) โปรแกรมอัตโนมัติส่งคำขอรหัสยืนยันตัวตนเพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ

5) โปรแกรมอัตโนมัติส่งข้อความที่บรรจุข้อมูลในข้อ 2.3 เข้าสู่แอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ

6) ระบบเริ่มทำซ้ำข้อ 2.1.2 ข้อ 1) ตามเวลาที่ตั้งค่าไว้

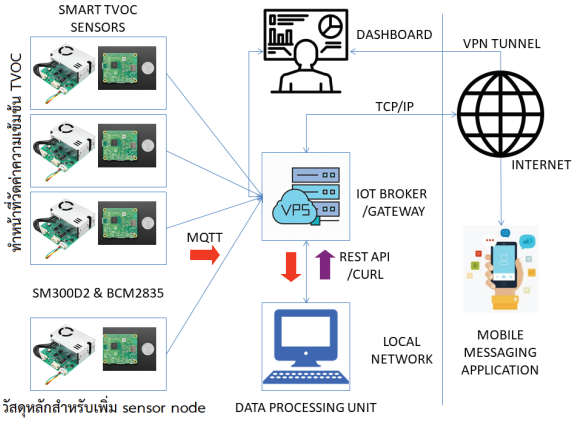
2.1.3 การเฝ้าติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard

1) ใช้ IoT Broker GUI เลือกช่วงเวลาล่าสุดของข้อมูลที่ต้องการเฝ้าติดตาม

2) เลือกการแสดงผลข้อมูลล่าสุดในรูปแบบของกราฟหรือตารางบน IoT Dashboard

3) ทำซ้ำข้อ 2.1.3 ข้อ 1) เมื่อต้องการเริ่มติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC ใหม่

2.2 การจัดทำต้นแบบ (Embodiment design) ระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น



รูปที่ 1 แสดงต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายสำหรับการพัฒนาเซนเซอร์ TVOC แบบกระจายอย่างง่ายเพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เลือกใช้เซนเซอร์ TVOC ชนิด MOS ยี่ห้อ Luziwen รุ่น SM3200D2 จำนวน 3 ตัวในการสร้างหน่วยตรวจวัด (Sensor node) มีคุณลักษณะวัดค่า TVOC ได้ในช่วงการวัด 0-2,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความละเอียด 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิในการทำงาน 0-50 องศาเซลเซียส วัดค่าได้ 1 ครั้งต่อวินาที ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ 60 มิลลิแอมป์แปร์ ค่าที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลส่งผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณแบบ Universal asynchronous

receiver and transmitter (UART) ระดับ Transistor-transistor logic (TTL) 5 โวลต์ ที่จำนวนหน่วยสัญญาณต่อวินาที (Baud rate) เท่ากับ 9600 บิทต่อวินาที (bps) สัญญาณจากเซนเซอร์แต่ละตัวถูกลดระดับ TTL ลงมาที่ 3.3 V ด้วยแผ่นวงจรปรับระดับแรงดันลอจิก โดยข้อมูลการวัด 1 ครั้ง ถูกส่งเป็นข้อมูลเลขฐาน 16 จำนวน 17 ไบต์ (Byte) โดยที่ 1 ไบต์ เท่ากับ 8 บิต (Bit) เท่ากับ 1 ออคเต็ต (Octet) แสดงโดย 2 อักขระของเลขฐาน 16 ส่งเข้าสู่แผ่นวงจรควบคุมแบบ SOM รุ่น BroadcomBCM2835 ผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณ UART ระดับ TTL 3.3 โวลต์

แผ่นวงจร SOM มีการติดตั้งระบบปฏิบัติการขนาดย่อมประเภทลีนุกซ์ (Linux) และติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN) เพื่อเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายภายในขององค์กร แผ่นวงจร SOM ติดตั้งเครื่องมือสร้างซอฟท์แวร์ด้วยภาษาไพธอน (Python) โปรแกรมอัตโนมัติสำหรับดึงค่าข้อมูลจากเซนเซอร์และแปลงค่าข้อมูลเซนเซอร์เป็นค่าความเข้มข้น TVOC ถูกสร้างขึ้นด้วยภาษาไพธอน เมื่อ SOM ได้รับข้อมูลเลขฐาน 16 โปรแกรมอัตโนมัติจะทำการกรองค่าที่ไม่ถูกต้องออก และแปลงข้อมูลที่ถูกต้องเป็นค่าความเข้มข้น TVOC ในเลขฐาน 10 หลังจากนั้นค่าความเข้มข้น TVOC จะถูกจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปแบบ JavaScript Object Notation (JSON) และส่งผ่านเข้าสู่ซอฟท์แวร์เซิร์ฟเวอร์รับส่งข้อความ (IoT Broker) ที่ติดตั้งอยู่บน Local VPS ด้วย Message Queuing Telemetry Transport Protocol (MQTT Protocol) โดยซอฟท์แวร์ Paho MQTT API

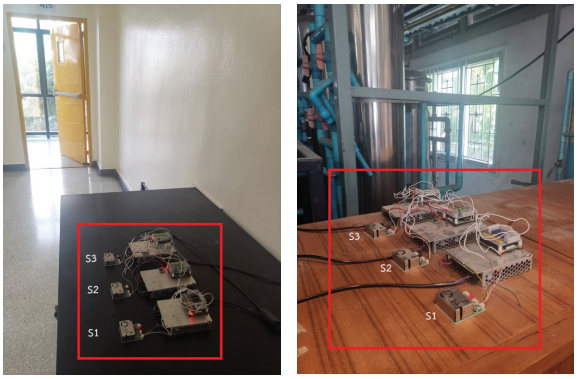
Local VPS สร้างขึ้นด้วยการสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์เสมือน (Virtual machine) บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายขององค์กรโดยใช้ทรัพยากร 2 VCORE 1 GB RAM 10 GB HDD โดยกำหนดหมายเลขไอพีภายในองค์กร (Private IP address)แบบจำเพาะเจาะจง (Fix IP) มีการติดตั้งระบบปฏิบัติการเดเบียน (Debian) รุ่นที่ 9 ไม่มีการกำหนดหมายเลขไอพีสาธารณะ(External/Public IPAddress) ด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ทำให้ไม่สามารถเข้าถึง Local VPS จากอินเทอร์เน็ตภายนอกองค์กรได้โดยตรง ในทางตรงกันข้าม Local VPS มีความสามารถเข้าถึงระบบอินเทอร์เน็ตภายนอกองค์กรได้ Local VPS นี้มีการติดตั้ง IoT Broker/Gateway ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์โอเพ่นซอร์ส

IoT Broker/Gateway ที่ทำการติดตั้งนี้มีโปรแกรมแสดงผลข้อมูล (IoT Dashboard) พร้อมใช้ติดตั้งมาให้ด้วย รองรับการรับข้อมูลผ่าน MQTT Protocol และการส่งข้อมูลคำสั่งแบบ RPC ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์จะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล PostgreSQL การเข้าถึงข้อมูลที่ส่งไปบันทึกไว้ใน PostgreSQL ไม่สามารถเข้าถึงได้โดยตรงเนื่องจากเป็น IoT Broker/Gateway ที่ใช้เป็นรุ่นฟรีแวร์ ดังนั้นเมื่อต้องการเข้าถึงข้อมูลที่บันทึกไว้ใน PostgreSQL จำเป็นต้องสร้างโปรแกรมอัตโนมัติสำหรับเรียกใช้ Representational state transfer application programming interface(REST API) หรือ Client for URLs (CURL) แบบอินเตอร์เฟสบรรทัดคำสั่ง (Command line tool) ที่ IoT Broker/Gateway มีการรองรับ

เนื่องจาก Local VPS ที่สร้างขึ้นเป็นการจำลอง VM ขนาดเล็กเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับรับค่าข้อมูลจากเซนเซอร์ TVOC แบบกระจายและทำการจัดเก็บข้อมูลสำหรับ IoT Broker เท่านั้น ดังนั้น ความสามารถในการประมวลผลข้อมูลจึงมีขีดจำกัดไม่สามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมากได้ในคราวเดียว สำหรับการติดตามเพื่อเฝ้าระวังความเข้มข้น TVOC อัตโนมัติจำเป็นต้องมีหน่วยประมวลผลเพิ่มเติมสำหรับการทำการวิเคราะห์ข้อมูล (Data analytic) หรือการสร้างโปรแกรมอัตโนมัติจำพวกปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำการติดตั้งคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่มีพลังประมวลผลสูงขึ้นโดยมีคุณลักษณะประกอบด้วย 8 VCORE 16GB RAM 120 SSD เพิ่มเติมสำหรับงานที่กล่าวถึงข้างต้น

สำหรับผู้ใช้งานระบบที่ใช้การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจากภายนอกองค์กร ผู้ใช้งานดังกล่าวสามารถรับข้อความแจ้งเตือนอย่างปกติได้ เนื่องจากเป็นการส่งข้อความผ่านช่องทางข้อมูลขาออกซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต แต่ผู้ใช้เหล่านี้จะไม่สามารถเข้าถึง IoT Broker/Gateway รวมไปถึง IoT Dashboard ที่สร้างขึ้นได้โดยตรง เนื่องจาก Local VPS ไม่มี External/Public IP ดังที่กล่าวไว้แล้ว ทำให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องไม่สามารถเข้าถึงระบบเฝ้าติดตามผ่าน Dashboard ได้โดยตรง แต่สามารถเข้าถึงได้ผ่านช่องทาง VPN Tunnel ซึ่งสามารถแจกจ่ายให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องเข้าถึงได้ ทั้งนี้ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

2.3 การทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและการเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์



รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งระบบเซนเซอร์เพื่อการทดสอบระบบ (ก) การติดตั้งที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข) การติดตั้งที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2

2.3.1 การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 บริเวณทางออกบันไดหนีไฟชั้น 3 อาคารสถานศึกษาเคมีปฏิบัติกรมวิทยาศาสตร์บริการ

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัวถูกวางไว้ใกล้กันที่ระยะห่างกัน 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า TVOC ที่ระบบบันทึกได้ว่ามีลักษณะข้อมูลเป็นอย่างไร เซนเซอร์ชุดนี้ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 31 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2564 ระหว่างนั้นทำการบันทึกปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเพื่อทดสอบลักษณะการทำงานแบบการเฝ้าติดตามแบบต่อเนื่อง ทดสอบการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ โดยกำหนดให้ระบบทำการแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความโดยการส่งข้อมูลล่าสุดทุก 20 นาที และทดสอบการเฝ้าติดตามข้อมูลผ่าน IoT Dashboard แบบเรียลไทม์

2.3.2 การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 บริเวณชั้น 1 อาคารโรงงานเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัวถูกติดตั้งและทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะข้อมูลเมื่อทำการติดตั้งต่างพื้นที่ โดยการทดสอบที่ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ทำการศึกษาเป็นเวลา 1 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 31 เดือนมกราคม พ.ศ. 2565 โดยกำหนดให้ระบบทำการแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความโดยการส่งข้อมูลล่าสุดทุก 30 นาทีและทดสอบการเฝ้าติดตามข้อมูลผ่าน IoT Dashboard แบบเรียลไทม์

2.4 การทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไป

เนื่องจากเซนเซอร์ TVOC ยังไม่มีแก๊สมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ จึงไม่สามารถหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบได้การทดสอบนี้ จึงใช้วิธีการหาค่าสหสัมพันธ์โดยการทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่มเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการวัดของระบบ โดยการใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของผลการวัด [10] ของเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวในระบบเป็นตัวแปรอิสระ การทดสอบใช้ข้อมูลจากระบบในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2564 และข้อมูลระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565 โดยข้อมูลแต่ละจุดใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงของค่าความเข้มข้น TVOC ที่ระบบบันทึกไว้เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบเบื้องต้น

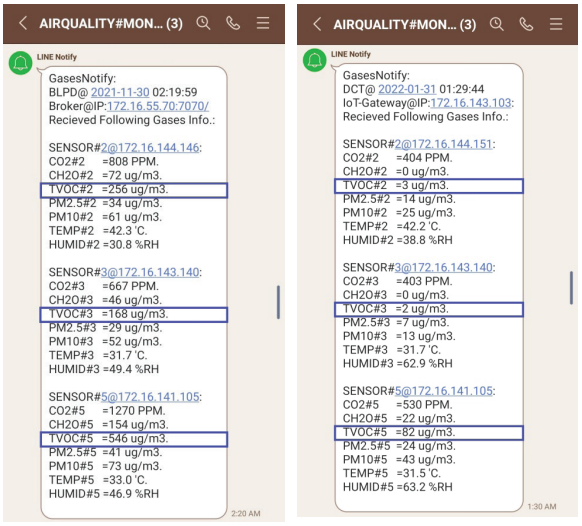
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและการเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์

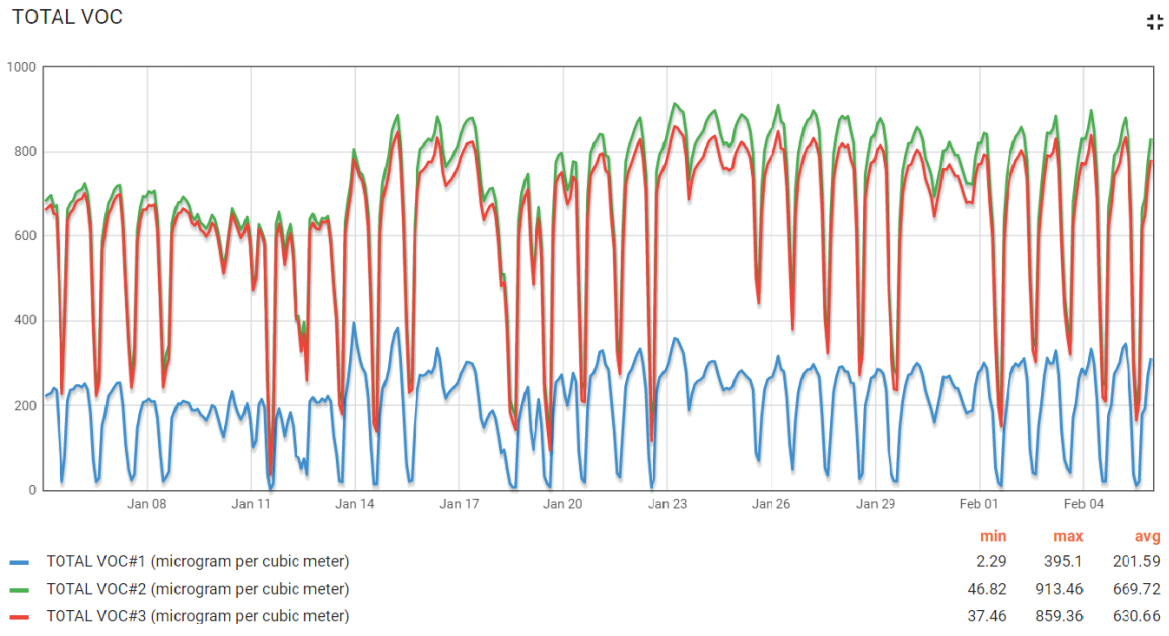
การทำงานของต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่มีเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวในระบบสามารถส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ขึ้นไปเก็บไว้ใน IoT Broker/Gateway ผ่าน MQTT Protocol ได้ทุก 10 วินาที ข้อมูลที่จัดเก็บไว้ใน PostgreSQL สามารถเข้าถึงและเรียกดูข้อมูลได้ผ่าน REST API และชุดคำสั่ง CURLcommand line tool ที่ IoT Broker/Gateway รองรับ

อย่างไรก็ตาม ยังพบปัญหาทั่วไปของระบบอุปกรณ์สมาร์ท [11] ซึ่งทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหายไป เช่น ปัญหาไฟดับทำให้เซนเซอร์ไม่ทำงาน ปัญหาการเชื่อมต่อสัญญาณผ่าน WLAN ขาดหายทำให้เซนเซอร์ไม่สามารถติดต่อ Local VPS ได้ อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบนี้ไม่พบปัญหาข้อจำกัดแบนด์วิดท์ของระบบ เนื่องจากการออกแบบได้คำนวนไว้ให้เพียงพอต่อการทำงานของเซนเซอร์จำนวน 3 ตัว (ที่การส่งข้อมูล 1 ครั้งใน 10 วินาที)

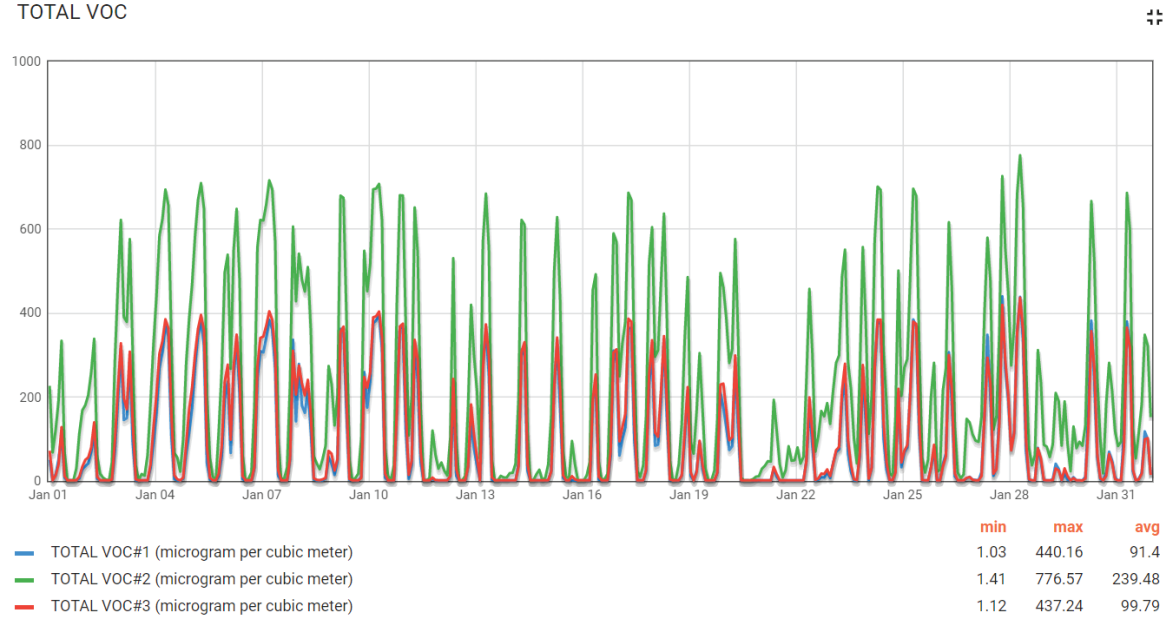
รูปที่ 3แสดงผลการแจ้งเตือนข้อมูลความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์ผ่านแอพพลิเคชันสื่อสารซึ่งส่งข้อความได้ตามที่กำหนดไว้รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงการติดตามความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard



รูปที่ 3 แสดงผลการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความ (ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2



รูปที่ 4 แสดงการเฝ้าติดตามความเข้มข้น TVOCแบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard ระหว่างวันที่ 1-31 มกราคม 2564 โดยใช้ต้นแบบระบบเซนเซอร์ TVOC แบบโครงข่ายติดตั้งบริเวณทางออกบันไดหนีไฟชั้น 3 อาคารสถานศึกษาเคมีปฏิบัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ



รูปที่ 5 แสดงการเฝ้าระวังความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard ระหว่างวันที่ 1-31 มกราคม 2565 โดยใช้ต้นแบบระบบเซนเซอร์ TVOC แบบโครงข่ายติดตั้งบริเวณชั้น 1 อาคารโรงงานเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

3.2 ผลการทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไป

	Covariance		
	TVOC_S1	*TVOC_S2*	*TVOC_S3*
TVOC_S1	8269.693	16475.29	17338.67
TVOC_S2	16475.29	36223.09	38223.3
TVOC_S3	17338.67	38223.3	40534.49

(ก)

	Covariance		
	TVOC_S1	*TVOC_S2*	*TVOC_S3*
TVOC_S1	14988.29	15570.96	27020.98
TVOC_S2	15570.96	16393.62	28479.17
TVOC_S3	27020.98	28479.17	51733.12

(ข)

รูปที่ 6 แสดงผลการคำนวนค่าความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) ของ ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 และ ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ด้วยเครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel

ความสัมพันธ์ของค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) หาได้จากค่าความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance) ดังสมการที่ 1 หรือสามารถใช้เครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel หาค่าได้เช่นเดียวกัน

$$r = \frac{covariance(x,y)}{\sqrt{variance(x) \times variance(y)}} \quad \text{(สมการที่ 1)}$$

	Correlation		
	TVOC_S1	*TVOC_S2*	*TVOC_S3*
TVOC_S1	1	0.951909	0.947019
TVOC_S2	0.951909	1	0.997523
TVOC_S3	0.947019	0.997523	1

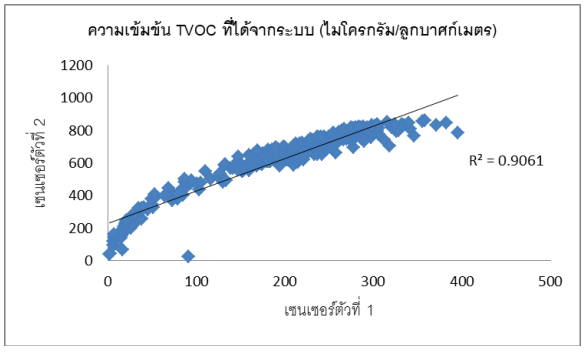
(ก)

	Correlation		
	TVOC_S1	*TVOC_S2*	*TVOC_S3*
TVOC_S1	1	0.993349	0.970378
TVOC_S2	0.993349	1	0.977925
TVOC_S3	0.970378	0.977925	1

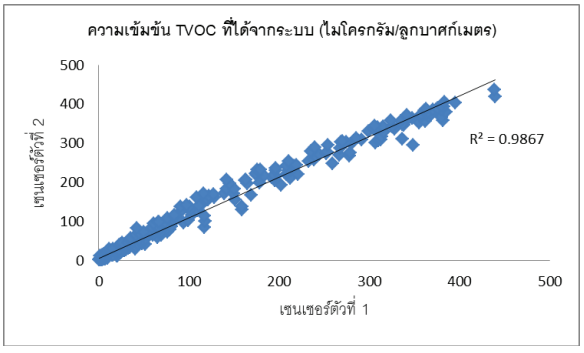
(ข)

รูปที่ 7 แสดงผลการคำนวนค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของ ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 และ ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ด้วยเครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel

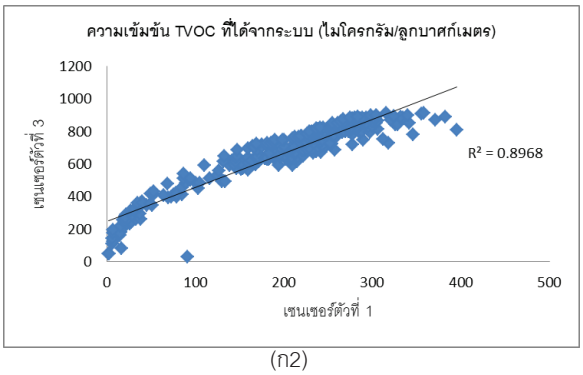
เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าสหสัมพันธ์พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลจากเซนเซอร์แต่ละคู่มีความสัมพันธ์สูง มีค่า r ใกล้เคียง 1 โดยใช้สมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ในการคำนวน แต่เมื่อทำการสร้างแผนภูมิแสดงค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์แต่ละคู่ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยค่า R^2 มีค่าเท่ากับค่าสหสัมพันธ์ยกกำลังสองจะพบว่า การทำงานของระบบเซนเซอร์ที่ใช้เซนเซอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปไม่สามาถบ่งชี้ประสิทธิภาพการวัดได้โดยการใช้การวิเคราะห์เฉพาะค่าสหสัมพันธ์โดยตรงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์บางคู่ไม่ได้เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ และเส้นสมการถดถอยของเซนเซอร์บางคู่ไม่ตัดจุดกำเนิดของแผนภูมิ เป็นต้น



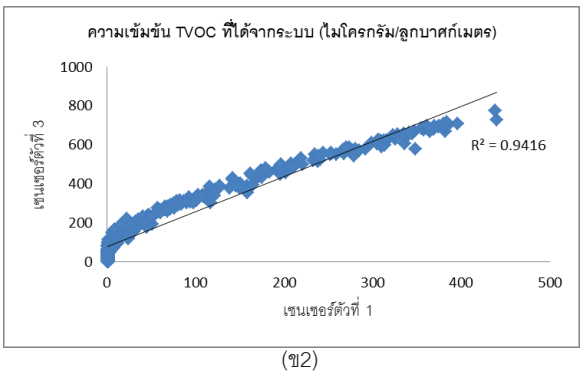
(ก1)



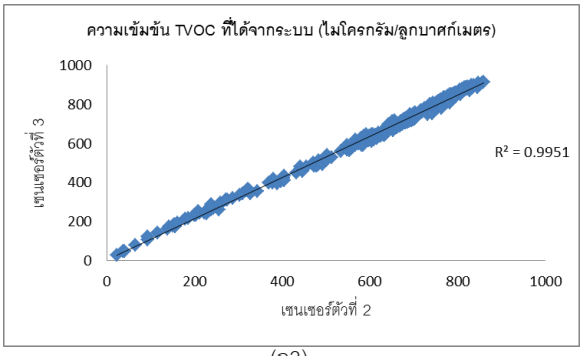
(ข1)



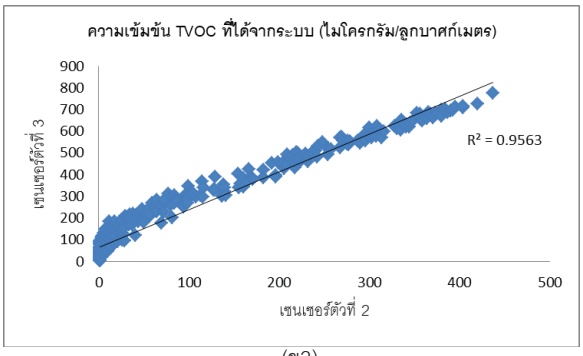
(ก2)



(ข2)



(ก3)



(ข3)

รูปที่ 8 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์แต่ละคู่และค่าสหสัมพันธ์ในรูป R^2 (ก1-ก3) แสดงการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข1-ข3) แสดงการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2

เนื่องจากการพัฒนานี้เป็นการพัฒนาสร้างต้นแบบเพื่อใช้ทดสอบและสร้างแนวทางในการพัฒนาต่อยอดจึงได้ประเมินประสิทธิภาพการวัดของระบบด้วยการกำหนดค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของระบบให้มีค่าเท่ากับผลคูณของค่าสหสัมพันธ์ของเซนเซอร์แต่ละคู่ โดยใช้กฎการคูณความน่าจะเป็นของค่าสหสัมพันธ์ในรูป R^2 เพื่อความสะดวกในการทดสอบ ดังนั้น ประสิทธิภาพการวัดของระบบที่จุดติดตั้งที่ 1 มีค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมเท่ากับ 0.81 และประสิทธิภาพการวัดของระบบที่จุดติดตั้งที่ 2 มีค่า 0.88 แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำการวัดของระบบยังไม่เพียงพอสำหรับการเป็นระบบการวัดที่แม่นยำ แต่ทิศทางของข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงข้อมูลสามารถนำมาใช้ในการแจ้งเตือนและเฝ้าติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC ในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ ทั้งนี้ หากพิจารณากราฟในรูปที่ 8 โดยละเอียดพบว่าต้นแบบระบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีแนวโน้มที่จะพบปัญหาการเลื่อนของค่าต่ำสุดที่เซนเซอร์วัดได้ (Sensor baseline drift) และปัญหาการเสื่อมถอยของความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น TVOC (Sensor sensitivity degradation) ของเซนเซอร์ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในระบบเซนเซอร์แบบกระจาย [12-13]

4. สรุป (Conclusion)

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้คือใช้เป็นระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอพพลิเคชั่นสื่อสารและส่งข้อความและเฝ้าติดตามคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์ได้ โดยมีค่าสหสัมพันธ์ที่จุดติดตั้งที่ 1 ดังนี้คือ 1) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 2 มีค่า 0.951909 2) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.947909 3) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 2 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.997523 และมีค่าสหสัมพันธ์ที่จุดติดตั้งที่ 2 ดังนี้คือ 1) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 2 มีค่า 0.993349 2) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.970378 3) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 2 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.977925 และค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของเซนเซอร์ 3 ตัวที่จุดติดตั้งที่ 1 มีค่า 0.81 ในขณะที่ค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของเซนเซอร์ 3 ตัวที่จุดติดตั้งที่ 2 มีค่า 0.88

แนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเด็นหลัก ประเด็นแรกคือการใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากเพื่อรองรับจำนวนเซนเซอร์ที่ต่อเข้าระบบมากขึ้น และเนื่องจากระบบได้

ออกแบบให้เซนเซอร์ส่งข้อมูล 1 ครั้งภายใน 10 วินาทีเพื่อวัตถุประสงค์ในการแจ้งเตือนและเฝ้าติดตามแบบเรียลไทม์ ดังนั้นเซนเซอร์แต่ละตัวจะสร้างข้อมูลจำนวน 3,153,600 ชุด เมื่อใช้เซนเซอร์จำนวน 3 ตัวจะมีข้อมูลถูกสร้างขึ้น 9,460,800 ชุดภายใน 1 ปี การใช้ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับการวิเคราะห์เหมืองข้อมูล จะทำให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ได้รวดเร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเด็นที่สองคือประเด็นการเพิ่มประสิทธิภาพการวัด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มค่าสหสัมพันธ์ของเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในระบบซึ่งมีหลายวิธี เช่น ทำข้อมูลดิบให้ได้มาตรฐาน (Data normalization) การปรับเทียบด้วยตนเองของระบบเซนเซอร์แบบกระจาย (Distributed sensor self-calibration) การเพิ่มค่าแก้ (Data correction) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลประวัติการวัดของเซนเซอร์ซึ่งมีเก็บไว้ในระบบอยู่แล้ว การเพิ่มค่าชดเชย (Data compensation) จากสภาพแวดล้อมการวัดเช่นอุณหภูมิ ความชื้น รวมไปถึงการชดเชยความผิดพลาดภายในเซนเซอร์เอง เช่น การปรับแก้ Sensor baseline drift หรือการปรับแก้ Sensor sensitivity degradation เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณนางอาภาพร สินธุสาร ผู้อำนวยการกองเทคโนโลยีชุมชน นางสาวปัทมาน พรัตน์ ผู้อำนวยการกองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เล็งเห็นความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านระบบไซเบอร์-กายภาพ และเทคโนโลยีด้านเซนเซอร์ ขอบคุณ ดร.ณัฏฐกานต์ เกตุคุ้ม วีว็องโกส หัวหน้าโครงการยกระดับการจัดการสารเคมีและห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเข้าสู่ระดับมาตรฐานสากล ประจำปีงบประมาณ 2563 ที่เล็งเห็นประโยชน์ของกิจกรรมการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อลดความเสี่ยงผลกระทบของมลพิษในพื้นที่ปฏิบัติงานต่อผู้ปฏิบัติงาน ขอบคุณฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดทำเซิร์ฟเวอร์เสมือนภายในองค์กร (Local VPS)สำหรับใช้ในการพัฒนาต้นแบบ ขอบคุณบุคลากรกลุ่มวิจัยและพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ชุมชน กองเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่สนับสนุนให้เขียนบทความฉบับนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] ณัฏฐกานต์ เกตุคุ้ม. การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย. *Bulletin of Applied Sciences.2019*, **8**(8), 78-87.

[2] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Method TO-14A. *Determination of volatile organiccompounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography.*

[3] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Method TO-15. *Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially prepared canisters and analyzed by gas chromatography–mass spectrometry* (GC-MS).

[4] กุลชาติ มีทรัพย์หลาก. *ระบบไซเบอร์-กายภาพพื้นฐานสำคัญในการยกระดับเทคโนโลยี* [online]. [viewed 2022-01-01]. Available from: https://www.nectec.or.th/research/research-project/nectec-cps.html.

[5] Mr. Digital.เทคโนโลยีเซนเซอร์ (*Sensor Technology*) [online]. Available from: https://ops.go.th/main/index.php/knowledge-base/article-pr/1520-sensor [viewed 2022-01-01].

[6] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. *คู่มือการปฏิบัติงานเพื่อการตรวจประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับเจ้าหน้าที่*. นนทบุรี: สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2559.

[7] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อมกรมอนามัย. *คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ*. กรุงเทพฯ: องค์การสงเคราะห์ ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์, 2555. ISBN 978-616-11-1333-9.

[8] MOLHAVE, L. Volatile organic compounds, indoor air quality and health. *Indoor Air*. 1991, **1**(4), 357-376.

[9] LAWSON, Jon. *How do you choose a VOC sensor* [online]. Available from: https://www.engineerlive.com/content/how-do-you-choose-voc-sensor [viewed 2022-01-01].

[10] อุมาพร สุขม่วง.การใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นในการประเมินวิธีทดสอบ.*วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* [online]. 2555, **60**(188), 12-15. เข้าถึงจาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2555_60_188_p12-15.pdf [อ้างถึงวันที่ 1 มกราคม 2565].

[11] RAJESH, G. and A. CHATURVEDI. Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks. *Computer Network*. 2019, **164**, 106902.

[12] GROVER, A. and B. LALL. A Novel method for removing baseline drifts in multivariate chemical sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020, **69**(9), 7306-7316.

[13] ROWE, E. G. and T. A. WETTERGREN. Coverage and reliability of randomly distributed sensor systems with heterogeneous detection range. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2009, **5**(4), 303-320.