

ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัจฉริยะ: การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยี IoT แบบต้นทุนต่ำ

Intelligent Real-Time Hospital Wastewater Quality Monitoring System: Design and Performance Assessment of Cost-Effective IoT Technology

ชานน พิงพรม¹ ส่องแสง แซ่ม้า¹ สุทธิพันธุ์ สายทองอินทร์¹ เอกลักษณ์ สุนนพันธ์¹ ธาณินทร์ สุเชียง¹ และ สมคิด สุขสวัสดิ์^{1*}

¹หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก somkit_tak@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการตรวจวัดคุณภาพน้ำในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลต้องทำการตักน้ำตัวอย่างขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์ด้วยมือ ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงจากการสัมผัสกับน้ำเสียที่อาจมีเชื้อโรคอันตรายและสารเคมีอันตรายปนเปื้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัจฉริยะแบบเรียลไทม์โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ต้นทุนต่ำ เพื่อลดความเสี่ยงต่อบุคลากรและเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ ระบบพัฒนาขึ้นโดยใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 ร่วมกับ NodeMCU ESP8266 และเซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ 5 ชนิด ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ความขุ่น (Turbidity) และคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ระดับน้ำ (Ultrasonic) ระบบได้รับการออกแบบให้ตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากสถานพยาบาล โดยค่า pH ต้องอยู่ระหว่าง 5-9 ปริมาณออกซิเจนละลายไม่น้อยกว่า 2 มก./ล. ความขุ่นไม่เกิน 30 NTU และคลอรีนอิสระ 0.5-1.0 มก./ล. จากการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องมือวิเคราะห์มาตรฐานจำนวน 10 ครั้ง หลังการปรับปรุงการสอบเทียบและประยุกต์ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Filter) พบว่าระบบมีความแม่นยำโดยรวม 93.82% โดยเซนเซอร์คลอรีนมีความแม่นยำสูงสุด 96.67% ความขุ่น 94.70% (เพิ่มขึ้น 99.52% เมื่อใช้ 5-point Moving Average) pH 92.65% และออกซิเจนละลาย 91.25% ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังฐานข้อมูลคลาวด์แบบเรียลไทม์ พร้อมระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ ช่วยลดความเสี่ยงต่อบุคลากร เพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวัง และสนับสนุนการพัฒนาสู่โรงพยาบาลอัจฉริยะด้วยต้นทุนที่เหมาะสม

คำสำคัญ: ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสีย, โรงพยาบาลอัจฉริยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เซนเซอร์ต้นทุนต่ำ, การเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์

Abstract

Currently, hospital wastewater quality monitoring in treatment ponds requires manual water sampling and analysis, which poses risks from exposure to antimicrobial-resistant pathogens and hazardous chemicals. This research aimed to develop an intelligent real-time hospital wastewater quality

monitoring system using cost-effective Internet of Things (IoT) technology to reduce personnel health risks and enhance monitoring efficiency. The system was developed using an Arduino Mega 2560 microcontroller integrated with a NodeMCU ESP8266 wireless module and five water quality sensors measuring pH, dissolved oxygen (DO), turbidity, free chlorine and ultrasonic. The system was designed to monitor and store data according to medical facilities' effluent standards: pH 5-9, DO ≥ 2 mg/L, turbidity ≤ 30 NTU, and free chlorine 0.5-1.0 mg/L. Performance testing against standard analytical instruments over 10 trials, following calibration improvements and implementation of a Moving Average Filter, demonstrated an overall system accuracy of 93.82%. The chlorine sensor achieved the highest accuracy at 96.67%, followed by turbidity at 94.70% (improved to 99.52% with a 5-point Moving Average), pH at 92.65%, and DO at 91.25%. The developed system transmits data via a wireless network to a cloud database in real-time with automatic alert functionality. This system reduces personnel exposure risks, enhances monitoring efficiency, and supports smart hospital development cost-effectively.

Keywords: wastewater quality monitoring system, smart hospital, Internet of Things, low-cost sensors, real-time monitoring

1. บทนำ

การจัดการน้ำเสียจากสถานพยาบาลเป็นประเด็นสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากน้ำเสียจากโรงพยาบาลประกอบด้วยสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นใหม่ (Emerging Contaminants) ได้แก่ สารปฏิชีวนะ สารเคมีทางการแพทย์ เชื้อโรค สารกัมมันตรังสี และสารรบกวนต่อมไร้ท่อ [2] โรงพยาบาลมีปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ยระหว่าง 200-1,200 ลิตรต่อเตียงต่อวัน พร้อมการปล่อยน้ำเสียในปริมาณเท่ากัน [3] ปัญหาสำคัญคือการแพร่กระจายของยาปฏิชีวนะและเชื้อดื้อยาซึ่งเป็นภัยคุกคามสุขภาพอันดับต้น ๆ ที่เป็นสาเหตุการตายโดยตรง 1.27 ล้านคนต่อปีทั่วโลก การตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบ

ดั้งเดิมมีข้อจำกัดในเรื่องความล่าช้า การสัมผัสสารอันตราย และไม่สามารถติดตามอย่างต่อเนื่อง

เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และระบบเซนเซอร์อัจฉริยะได้รับการพัฒนาเป็นทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์หลายตัวแบบเรียลไทม์ เช่น pH ความขุ่น อุณหภูมิ และส่งข้อมูลผ่านระบบคลาวด์ [4] ระบบ IoT มีข้อดีคือการติดตามแบบเรียลไทม์ การตรวจจับการปนเปื้อนในระยะเริ่มต้น การแจ้งเตือนทันที และการลดต้นทุนระยะยาว [5] ระบบสมัยใหม่ใช้ PLC-based control ที่ยืดหยุ่นและมีอัตราข้อผิดพลาดต่ำเพียง 0.1-0.2% แต่การประยุกต์ใช้ในโรงพยาบาลยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาที่ขาดการบังคับใช้กฎหมายเข้มงวด

2. หลักการและทฤษฎีเกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยเกี่ยวข้อง

สำรวจเทคโนโลยีการตรวจสอบโรงงานบำบัดน้ำเสีย [6] พบว่าเซนเซอร์สามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการทางชีวภาพ โดยจำแนกเซนเซอร์เป็น 2 ประเภท คือ เซนเซอร์เรียบง่ายสำหรับการตรวจสอบประจำวัน และเซนเซอร์ขั้นสูงสำหรับการตรวจสอบและปรับปรุง

ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล พบว่าโรงพยาบาลปล่อยสารเคมีจำนวนมาก [7] ได้แก่ ยาปฏิชีวนะ สารที่บ่งชี้เอกซเรย์ น้ำยาฆ่าเชื้อ และเภสัชภัณฑ์ที่ต้านทานการบำบัดน้ำเสียทั่วไป ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและสร้างความต้านทานยาปฏิชีวนะ

นำเสนอระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัจฉริยะใช้ IoT [8] วัดพารามิเตอร์ pH ความขุ่น ระดับน้ำ อุณหภูมิ และความชื้น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และส่งข้อมูลไปยังคลาวด์เน้นความสำคัญของ IoT ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วยเทคโนโลยี Industry 4.0

บทวนการใช้เซนเซอร์ชีวภาพในการตรวจวัดน้ำเสีย พบว่าเซนเซอร์ชีวภาพมีข้อดีในการตรวจหาสารปนเปื้อนระดับต่ำในเมทริกซ์ซับซ้อน มีความไว ความจำเพาะ ความเชื่อถือได้ ต้นทุนต่ำ และตอบสนองแบบเรียลไทม์ การใช้ในวัสดุช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดขนาดอุปกรณ์

จากการบทวนวรรณกรรม พบว่าแม้จะมีการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ IoT อย่างแพร่หลาย แต่งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นการประยุกต์ใช้กับน้ำทั่วไปหรือน้ำดื่ม โดยมีงานวิจัยจำนวนจำกัดที่เจาะจงน้ำเสียโรงพยาบาลโดยเฉพาะ ซึ่งมีความซับซ้อนของสารประกอบและความแปรปรวนของสารปนเปื้อนที่แตกต่างจากน้ำเสียทั่วไป นอกจากนี้ ระบบที่มีอยู่ส่วนใหญ่ยังมีต้นทุนสูงและซับซ้อนในการติดตั้งและบำรุงรักษา

ปัจจุบันยังขาดระบบตรวจวัดที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลที่มีราคาไม่แพง ใช้งานง่าย และสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์หลักที่สำคัญได้อย่างครบถ้วน รวมทั้งการรายงานผลแบบเรียลไทม์ที่สามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศกำลังพัฒนาที่มีทรัพยากรและเทคโนโลยีจำกัด

2.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำเสียแบบเรียลไทม์สำหรับบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยใช้เทคโนโลยี IoT และแพลตฟอร์ม Arduino เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำระบบไปใช้งานจริงในโรงพยาบาล

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะให้ประโยชน์ดังนี้ ลดความเสี่ยงต่อบุคลากรโรงพยาบาลจากการสัมผัสสารอันตรายในน้ำเสีย เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง ลดต้นทุนในการตรวจวัดคุณภาพน้ำระยะยาว เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบเฝ้าระวังคุณภาพสิ่งแวดล้อมในสถานพยาบาลอื่น ๆ และสนับสนุนการพัฒนาโรงพยาบาลอัจฉริยะ (Smart Hospital) ในอนาคต

2.4 หลักการทำงานของระบบ

ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัจฉริยะพัฒนาขึ้นโดยใช้สถาปัตยกรรมแบบ 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนของการตรวจวัด ส่วนของการประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล และส่วนของการแสดงผลและแจ้งเตือนในส่วนการตรวจวัด ระบบใช้เซนเซอร์ 5 ชนิดติดตั้งในบ่อบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ เซนเซอร์ pH สำหรับวัดความเป็นกรด-ด่าง เซนเซอร์ DO วัดปริมาณออกซิเจนละลาย เซนเซอร์ Turbidity วัดความขุ่น เซนเซอร์ Free Chlorine วัดปริมาณคลอรีนอิสระ และเซนเซอร์ Ultrasonic วัดระดับน้ำ เซนเซอร์แต่ละตัวส่งสัญญาณแอนะล็อกหรือดิจิทัลไปยังบอร์ด Arduino ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลัก

บอร์ด Arduino อ่านค่าจากเซนเซอร์ทุก 5 นาที ประมวลผลแปลงสัญญาณเป็นค่าดิจิทัลและคำนวณเป็นค่าจริงตามสูตรการแปลงของเซนเซอร์แต่ละชนิด ข้อมูลที่ประมวลผลแล้วถูกจัดรูปแบบเป็น JSON และส่งไปยัง NodeMCU (ESP8266) ผ่าน Serial Communication ด้วย baud rate 115,200 bps NodeMCU ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต รับข้อมูลจาก Arduino และส่งต่อไปยัง Cloud Server ผ่าน Wi-Fi โดยใช้โปรโตคอล MQTT หรือ HTTP POST พร้อม timestamp สำหรับการวิเคราะห์แนวโน้ม การแปลงสัญญาณและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ การแปลงสัญญาณจากเซนเซอร์เป็นค่าจริงของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำดำเนินการโดยบอร์ด Arduino Mega 2560 ที่มี ADC ความละเอียด 10 บิต (0-1023) สำหรับการแปลงสัญญาณแอนะล็อก 0-5 V เป็นค่าดิจิทัล การคำนวณค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิดใช้สมการการแปลงเฉพาะตามคุณลักษณะของเซนเซอร์ ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (5)

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) : ใช้หลักการ Glass Electrode วัดค่า pH ตามสมการ

$$pH = 3.5 \times V + pH_{offset} \quad (1)$$

โดย V คือแรงดันไฟฟ้า (0-5 V) และ pH_{offset} คือค่าชดเชยจากการสอบเทียบ

การวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) : ใช้หลักการ Galvanic Cell พร้อมชุดเซนเซอร์ตามสมการ

$$DO = 4.0 \times V \times [1 + 0.02(T - 25)] \quad (2)$$

โดย DO มีหน่วย mg/L, T คืออุณหภูมิ (°C)

การวัดความขุ่น (Turbidity) : ใช้หลักการ Infrared Scattering ที่ 90° ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและค่า NTU เป็นแบบ Polynomial ตามสมการ

$$NTU = -1120.4V^2 + 5742.3V - 4353.8 \quad (3)$$

สมการนี้ใช้ได้เมื่อ $V > 2.5$ V สำหรับกรณี $V \leq 2.5$ V กำหนดให้ $NTU = 3000$ (ค่าสูงสุดของเซนเซอร์)

การวัดปริมาณคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) : ใช้หลักการ Amperometric Detection ค่าที่วัดได้ต้องชดเชยด้วยค่า pH ตามสมการ

$$Cl_2 = 2.0 \times V \times [1 + \beta(7.5 - pH)] \quad (4)$$

โดยที่ Cl_2 มีหน่วยเป็น mg/L และ β คือสัมประสิทธิ์การชดเชยค่า pH (0.1)

การวัดระดับน้ำ (Water Level) : วัดระยะทางโดยใช้คลื่นเสียงความถี่ 40 kHz คำนวณจากเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไป-กลับ ตามสมการ

$$h = H - (t \times 343)/2 \quad (5.1)$$

$$L = (h/H) \times 100\% \quad (5.2)$$

โดย h คือระดับน้ำ (cm), H คือความสูงถัง (cm), t คือเวลา (s), L คือระดับน้ำ (%)

สมการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) : เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) และความผันผวนของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ในแต่ละครั้ง ตามสมการ

$$\bar{x}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{t-i} \quad (6)$$

โดยที่ $\bar{x}_t$ = ค่าที่ทำให้เรียบ (Smoothed value) ที่เวลา t x_{t-i} = ค่าดิบ (Raw data) ที่จุดข้อมูล $t - i$ และ N = ขนาดหน้าต่างของการคำนวณค่าเฉลี่ย (Window size) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า $N=5$ หมายความว่าค่าที่เวลา t คำนวณจากค่าเฉลี่ยของข้อมูล 3 จุดล่าสุด

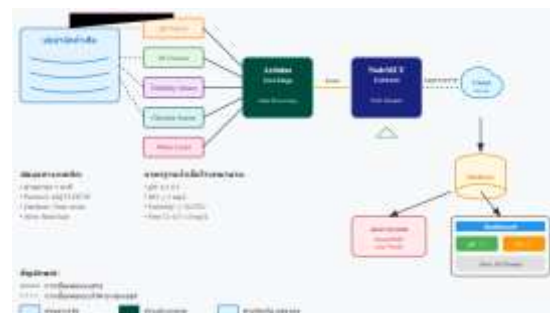
เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการวัด ระบบใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Filter) กับค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ทุกตัวเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) และความผันผวนของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ในแต่ละครั้ง สมการที่ (6) โดยเฉลี่ยจากค่า 10 ครั้งล่าสุด นอกจากนี้ เซนเซอร์ทุกตัวผ่านการสอบเทียบ (Calibration) ด้วยสารละลายมาตรฐานก่อนการใช้งานจริง

การสอบเทียบและตรวจสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ เซนเซอร์สอบเทียบด้วยสารละลายมาตรฐาน บัฟเฟอร์ pH (4.00, 7.00, 10.00), มาตรฐานออกซิเจนละลาย (0-100%), มาตรฐานความขุ่นฟอร์มซิน (0.1-800 NTU) และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (0.5-2.0 mg/L) ที่ 25°C

โดยวิธีหลายจุด (5 จุด ซ้ำ 3 ครั้ง) ตรวจสอบความแม่นยำเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน APHA ใช้ตัวอย่าง น้ำกลั่น น้ำประปา น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียโรงพยาบาลจริง

ผลทดสอบ: เซนเซอร์ pH ($R^2 = 0.948$), DO ($R^2 = 0.962$), ความขุ่น ($R^2 = 0.987$) และคลอรีน ($R^2 = 0.973$) มีความแม่นยำตามเกณฑ์การทดสอบ 30 วันพบค่าเบี่ยงเบน < 2% และเวลาตอบสนอง < 5 นาที ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพิ่มความแม่นยำความขุ่นเป็น 99.52% และลดความแปรปรวน pH ลง 44% ($p < 0.05$)

ในส่วนการประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล Cloud Server รับข้อมูลและบันทึกลงในฐานข้อมูลแบบ Time-series ระบบตรวจสอบค่าที่ได้รับกับค่ามาตรฐานน้ำเสียโรงพยาบาล เพื่อแสดงผลด้วย Web Dashboard แสดงข้อมูลแบบ Real-time ผู้ใช้เข้าถึงผ่านเว็บเบราว์เซอร์เพื่อดูค่าปัจจุบัน กราฟแนวโน้มรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันข้อมูลย้อนหลัง เปรียบเทียบข้อมูล และส่งออกเป็น pdf หรือ Excel ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้อุปกรณ์ต้นทุนต่ำที่หาได้ง่าย ติดตั้งและบำรุงรักษาได้โดยเจ้าหน้าที่โรงพยาบาล ช่วยลดความเสี่ยงจากการสัมผัสน้ำเสียโดยตรง สอดคล้องกับแนวคิด Smart Hospital ที่ใช้เทคโนโลยี IoT เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำเสียของโรงพยาบาล ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมต่อระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัจฉริยะ

เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียแบบอัจฉริยะในโรงพยาบาล งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์การประเมินคุณภาพน้ำเสียโดยใช้ระบบสี่ 3 ระดับ ได้แก่ สีเขียว (ปลอดภัย), สีส้ม (เฝ้าระวัง), และสีแดง (อันตราย) โดยอิงจากค่ามาตรฐานที่ระบุใน ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ลงวันที่ 7 พฤศจิกายน 2548 [1] โดยระบบจะประมวลผลค่าที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์และจำแนกสถานะของน้ำเสียตามช่วงสีดังกล่าว ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจำแนกคุณภาพน้ำเสียด้วยระบบสี

พารามิเตอร์	สีเขียว (ปลอดภัย)	สีส้ม (เฝ้าระวัง)	สีแดง (อันตราย)
ความเป็นกรด-ด่าง	5.0-9.0	5.0-5.9 หรือ 9.1-10.0	< 5.0 หรือ > 10.0
ออกซิเจนละลายน้ำ	≥ 1.5 มล./ล.	1.0-1.4 มล./ล.	< 1.0 มล./ล.

คลอรีนอิสระ	0.5–1.0 มล./ล.	0.2–0.4 มล./ล.	< 0.2 หรือ > 1.0 มล./ล.
การวัดความขุ่น	≤ 50 มล./ล.	51-100 มล./ล.	> 100 มล./ล.

2.5 โครงสร้างกล่องควบคุมและการติดตั้ง

กล่องอุปกรณ์ของระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียในบ่อบำบัดได้รับการออกแบบให้สามารถตรวจวัดและส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านเทคโนโลยี IoT ประกอบด้วย Arduino Mega 2560 R3 ทำหน้าที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักในการควบคุมการทำงานของเซนเซอร์ทั้งหมดร่วมกับบอร์ด ESP8266 สำหรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายและส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูลออนไลน์ โดยระบบได้รับพลังงานจาก Switching Power Supply ที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ภายใน ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์วัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO sensor), เซนเซอร์วัดการวัดความขุ่น (Turbidity sensor), เซนเซอร์วัดปริมาณคลอรีนอิสระ (Chlorine sensor), เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH sensor) และเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับตรวจวัดระดับน้ำ โดยเซนเซอร์ทั้งหมดทำงานร่วมกันเพื่อเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำในแต่ละค่าตามช่วงเวลาที่กำหนด และส่งข้อมูลไปยังระบบแสดงผลหน้าเว็บ ซึ่งช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงข้อมูลในการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม

การติดตั้งระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำอัตรียะในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล ดำเนินการโดยติดตั้งกล่องควบคุมหลักภายในตู้ควบคุมที่ป้องกันน้ำและฝุ่น โดยทำการติดตั้งบนแท่นยึดเฉพาะภายในบ่อ โดยให้หัวเซนเซอร์จมอยู่ที่ความลึกประมาณ 20–30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ และอยู่ห่างจากตำแหน่งน้ำเข้าและน้ำออกเพื่อให้ค่าที่วัดได้นั้นครอบคลุมน้ำทั้งบ่อ นอกจากนี้ ได้ติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับวัดระดับน้ำเหนือผิวน้ำในระยะ 30–50 เซนติเมตร ระบบทั้งหมดได้รับพลังงานจากสวิตช์ชิงเพาเวอร์ซีฟฟลายที่มีการป้องกันไฟกระชาก ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จุดติดตั้งของกล่องควบคุม บริเวณบ่อบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล



3. ผลการดำเนินงานและอภิปราย

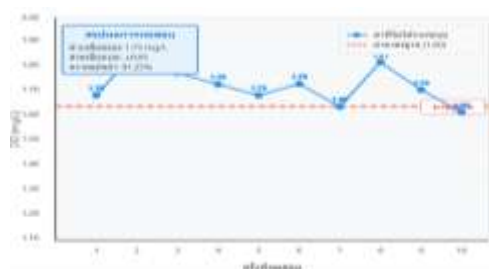
3.1 การทดสอบประสิทธิภาพของกล่องควบคุม

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัตรียะดำเนินการโดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากระบบกับค่าที่วัดจากเครื่องมือมาตรฐาน โดยทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ในสภาวะการทำงานจริงที่บ่อบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลข้อมูลที่ได้ถูกส่งไปจัดเก็บที่ Firebase Realtime Database ผ่าน NodeMCU ESP8266 เพื่อการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวนี้ได้นำค่าจากการทดสอบ ตามตารางที่ 2

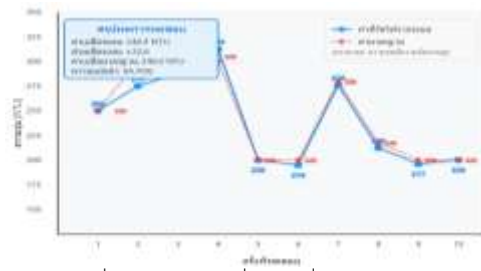
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบระหว่างระบบตรวจวัดกับเครื่องมือมาตรฐาน

ครั้งที่	DO (mg/L)		ความขุ่น (NTU)		คลอรีน (mg/L)		pH	
	ระบบ	เทียบ	ระบบ	เทียบ	ระบบ	เทียบ	ระบบ	เทียบ
1	1.70	1.60	260	250	0.62	0.60	6.00	6.80
2	1.85	1.60	275	300	0.63	0.60	6.20	6.80
3	1.78	1.60	285	290	0.59	0.60	6.90	6.80
4	1.75	1.60	295	300	0.61	0.60	6.30	6.80
5	1.73	1.60	220	200	0.62	0.60	6.60	6.80
6	1.76	1.60	216	220	0.60	0.60	7.00	6.80
7	1.69	1.60	276	280	0.61	0.60	6.40	6.80
8	1.81	1.60	225	230	0.63	0.60	6.50	6.80
9	1.74	1.60	217	200	0.62	0.60	6.40	6.80
10	1.67	1.60	220	220	0.61	0.60	6.10	6.80

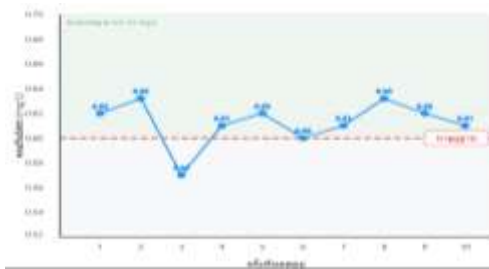
ผลการทดสอบระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียแบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน พบว่าระบบมีความแม่นยำรวม 93.82% โดยเซนเซอร์คลอรีนอิสระมีความแม่นยำสูงสุด 96.67% แสดงถึงความเสถียรของการวัด ขณะที่เซนเซอร์ความขุ่นแม้มีความแม่นยำ 94.70% แต่มีความแปรปรวนสูงกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของน้ำเสีย เซนเซอร์ pH มีความแม่นยำ 92.65% โดยมี systematic bias ประมาณ -0.50 หน่วย pH และเซนเซอร์ออกซิเจนละลายมีความแม่นยำ 91.25% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดลองชี้ว่าระบบนี้สามารถใช้เฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบต่อเนื่องและสนับสนุนการจัดการน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ความแม่นยำสามารถยกระดับได้ด้วยการปรับเทียบเซนเซอร์และปรับปรุงการประมวลผลข้อมูลเพิ่มเติม ดังรูปที่ (4-7) และสรุปประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาล ตามตารางที่ 3



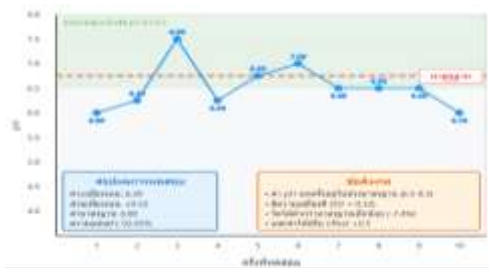
รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO)



รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความขุ่น (Turbidity)



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าคลอรีนอิสระ (Free Chlorine)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ตารางที่ 3 สรุปประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาล

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย ระบบ	ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน	ความคลาด เคลื่อน	ความ แม่นยำ (%)	การ ประเมิน
DO (mg/L)	1.75 ± 0.05	1.60 ± 0.00	+0.15 (+9.4%)	91.25%	ดีมาก
ความขุ่น (NTU)	248.9 ± 32.6	249.0 ± 39.9	-0.1 (- 0.04%)	94.70%	ดีมาก
คลอรีน (mg/L)	0.614 ± 0.013	0.60 ± 0.00	+0.014 (+2.3%)	96.67%	ดีเยี่ยม
pH	6.30 ± 0.32	6.80 ± 0.00	-0.50 (- 7.4%)	92.65%	ดีมาก

3.2 ประสิทธิภาพการแสดงผลของเว็บแอปพลิเคชัน

ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียที่พัฒนาขึ้นได้ออกแบบเว็บแอปพลิเคชันเพื่อใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ในการแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดยมีการจัดโครงสร้างเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนการแสดงผลค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ (Monitoring Dashboard)

ส่วนนี้จะแสดงค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำสำคัญที่ตรวจวัดได้ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ความขุ่น (Turbidity/NTU) ปริมาณของคลอรีนอิสระ (Free Chlorine) และอัตรา

การไหล (Flow rate) โดยมีการกำหนด รหัสสี (Color coding) เพื่อสื่อสารสถานะของคุณภาพน้ำอย่างชัดเจน และแสดงถึงปริมาณระดับของน้ำภายในบ่อบำบัด

นอกจากนี้ยังมี กราฟแนวโน้ม (Time-series graph) สำหรับแต่ละพารามิเตอร์ ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเสียในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่อง และช่วยให้สามารถวิเคราะห์เหตุการณ์ผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 8 (ก)

ส่วนจัดการข้อมูลและส่งออกผลการวิเคราะห์ (Data Export and Reporting Module)

ระบบสามารถจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดลงในฐานข้อมูล และให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดข้อมูลในรูปแบบ PDF และ Excel เพื่อใช้ในการทำรายงาน วิเคราะห์เชิงสถิติ หรือเก็บบันทึกเป็นหลักฐานทางวิชาการและการตรวจสอบย้อนหลัง ทั้งนี้การออกแบบฟังก์ชันนี้มุ่งเน้นให้ผู้ใช้งานสามารถสรุปผลการทำงานของระบบได้ง่ายขึ้นและนำข้อมูลไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจเชิงบริหารจัดการได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 8 (ข)

การแสดงผลทั้งสองส่วนนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความสะดวกในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำเสียแบบเรียลไทม์ ลดความเสี่ยงในการตรวจวัดด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยมือ และสนับสนุนการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงพยาบาลตามแนวทางดิจิทัล



ก. Monitoring Dashboard

ข. Data Export and Reporting

Module

รูปที่ 8 การทดสอบประสิทธิภาพของการแสดงผลของเว็บแอปพลิเคชัน

4. สรุปผลการทดลอง

ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโรงพยาบาลอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ร่วมกับโมดูลสื่อสารไร้สาย NodeMCU ESP8266 และเซนเซอร์ตรวจวัด 5 ชนิด แสดงประสิทธิภาพโดยรวมที่ร้อยละ 93.82 เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์มาตรฐาน โดยเซนเซอร์คลอรีนอิสระมีความแม่นยำสูงสุดที่ร้อยละ 96.67 เซนเซอร์ความขุ่นมีความแม่นยำร้อยละ 94.70 ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 99.52 หลังประยุกต์ใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบ 5 จุด เซนเซอร์ความเป็นกรด-ด่างและออกซิเจนละลายมีความแม่นยำร้อยละ

92.65 และ 91.25 ตามลำดับ และเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับตรวจวัดระดับน้ำ การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ช่วยลดความผันผวนของสัญญาณได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ร้อยละ 44 ระบบสามารถส่งข้อมูลแบบทันทีผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังฐานข้อมูลบนระบบคลาวด์ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของบุคลากรและสนับสนุนการพัฒนาสู่โรงพยาบาลอัจฉริยะ

4.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อยอด

ควรพิจารณาใช้เซนเซอร์ระดับอุตสาหกรรมสำหรับการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างเพื่อลดการรบกวนจากไอออนในน้ำเสียที่มีองค์ประกอบซับซ้อน พัฒนาขั้นตอนวิธีการกรองแบบปรับตัวที่สามารถเปลี่ยนจำนวนจุดข้อมูลได้อัตโนมัติตามระดับความผันผวนของสัญญาณ เพิ่มความสามารถในการตรวจวัดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี ความต้องการออกซิเจนทางเคมี และโลหะหนักเพื่อให้ครอบคลุมเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงพยาบาล ประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการวิเคราะห์เชิงพยากรณ์ เชื่อมโยงกับระบบสารสนเทศโรงพยาบาล และดำเนินการทดสอบความเสถียรระยะยาวอย่างน้อย 6 เดือนพร้อมวิเคราะห์ต้นทุน-ประโยชน์เพื่อยืนยันความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนและนโยบายประเทศไทย 4.0

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณโรงพยาบาลสมเด็จพระเจ้าตากสินมหาราช จังหวัดตาก ที่อนุเคราะห์สถานที่ บุคลากร และเครื่องมือมาตรฐานในการติดตั้งและทดสอบระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำเสีย โรงพยาบาลอัจฉริยะ ทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ, “ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด,” ราชกิจจานุเบกษา, 2548
- [2] M. T. Khan, I. A. Shah, I. Ihsanullah, M. Naushad, S. H. A. Shah, A. W. Mohammad, “Hospital wastewater as a source of environmental contamination: An overview of management practices, environmental risks, and treatment processes.” Journal of Water Process Engineering, vol. 41, 2021.
- [3] B. Pauwels and W. Verstraete, “The treatment of hospital wastewater: an appraisal.” Journal of Water and Health, vol. 4(4), 2006, pp. 405-416.
- [4] J. H. Wong, N. Shamsuddin, E. Abas, R. A. Apong, Z. Masri, H. Suhaimi, S. H. Gödeke, and M. N. A. Noh, “Water quality monitoring with Arduino based sensors.” Environments, vol. 8, 2021, pp. 51.

- [5] H. M. Forhad, M. R. Uddin, R.S. Chakrovorty, A. M. Ruhul, H. M. Faruk, S. Kamruzzaman, N. Sharmin, A. S. I. M. Jamal, M. M.-U. Haque, and A. K. M. M. Morshed, “IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs).” Heliyon, vol. 10, 2024, e40746.
- [6] P. A. Vanrolleghem and D. S. Lee, “On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art.” Water Science and Technology, vol. 47, 2003, pp.1-34.
- [7] B. Pauwels and W. Verstraete, “The treatment of hospital wastewater: an appraisal.” Journal of Water and Health, vol. 4(4), 2006, pp. 405-416.
- [8] S. Pasika and S. T. Gandla, “Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT.” Heliyon, vol. 6, 2020, e04096.



สุทธิพันธุ์ สายทองอินทร์ อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มทร.ล้านนา ตาก สนใจด้านการประยุกต์ใช้งานด้านเครือข่ายคอมพิวเตอร์



ผศ.เอกลักษณ์ สุมพันธ์ อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มทร.ล้านนา ตาก สนใจด้านการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม



รณินทร์ สุเชียง อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มทร.ล้านนา ตาก สนใจด้านการประยุกต์ใช้งานด้านระบบอัตโนมัติ



สมคิด สุขสวัสดิ์ อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มทร.ล้านนา ตาก สนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้หลักวิศวกรรมกับงานด้านการเกษตร และการประยุกต์