

การพัฒนาระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี Internet of Things (IoT): กรณีศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน สถาบันบำราศนราดูร

ธรรมน ตาทอง ส.ม. (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม)*

จณิสตา พิชัยธณิก วท.บ.(สาธารณสุข)

งานอาชีวอนามัย ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม สถาบันบำราศนราดูร กรมควบคุมโรค

บทคัดย่อ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งของสถานพยาบาล แต่การติดตามคุณภาพน้ำด้วยการเก็บตัวอย่างและตรวจวิเคราะห์เป็นระยะมีข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องและการตรวจพบความผิดปกติอย่างทันท่วงที การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบำราศนราดูร 2) ประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น และ 3) ประเมินศักยภาพของระบบในการสนับสนุนการบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสีย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา ดำเนินการ 4 ระยะ ได้แก่ การวิเคราะห์ปัญหาและออกแบบระบบ การพัฒนาและติดตั้งอุปกรณ์ การทดสอบและสอบเทียบระบบ และการประเมินผลการใช้งานภาคสนาม ระบบที่พัฒนาประกอบด้วยสถาปัตยกรรม 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นตรวจวัด ชั้นสื่อสารข้อมูลผ่าน Modbus RS485 ชั้นประมวลผลด้วย Programmable Logic Controller (PLC) และชั้นแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลบน Cloud ผ่าน HMI และ Dashboard โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือนตุลาคม 2568 ถึงพฤษภาคม 2569 และเปรียบเทียบค่าจากระบบ IoT กับผลการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถรับส่งและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์โดยมีความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 และความพร้อมใช้งานของระบบร้อยละ 99.89 การเปรียบเทียบกับผลห้องปฏิบัติการพบว่า ค่า pH มีค่า MAE 0.10 หน่วย pH และ MAPE ร้อยละ 1.35 แต่ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r = 0.478, p = 0.231$) ขณะที่ค่า TDS มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก ($r = 0.968, p < 0.001$) และมีค่า MAPE ร้อยละ 2.88 ผลการใช้งานภาคสนามพบว่าระบบสามารถติดตามแนวโน้มคุณภาพน้ำและสถานะการทำงานของระบบได้อย่างต่อเนื่อง พร้อมสนับสนุนการแจ้งเตือนและการใช้ข้อมูลเพื่อการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบต่อเนื่อง สนับสนุนการบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสียของสถานพยาบาลและสนับสนุนการพัฒนาบบสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะต่อไป

คำสำคัญ: ระบบบำบัดน้ำเสีย, Internet of Things, การติดตามแบบเรียลไทม์

* ธรรมน ตาทอง ผู้รับผิดชอบบทความ

Development of a Real-Time Water Quality Monitoring System Using Internet of Things (IoT) Technology: A Case Study of the Oxidation Ditch Wastewater Treatment System at Bamrasnaradura Infectious Diseases Institute

Thatamon Tatong, M.P.H. (Industrial Environmental Management)*

Janista Pichaironaphak, B.Sc. (Public Health)

Occupational Health, Safety and Environment Section,

Bamrasnaradura Infectious Diseases Institute, Department of Disease Control

ABSTRACT

Oxidation Ditch wastewater treatment systems are biological treatment systems that play an important role in maintaining effluent quality in healthcare facilities. However, conventional water quality monitoring based on periodic sampling and laboratory analysis has limitations in providing continuous surveillance and timely detection of abnormal conditions. This study aimed to (1) develop a real-time water quality monitoring system using Internet of Things (IoT) technology for the Oxidation Ditch wastewater treatment system at Bamrasnaradura Infectious Diseases Institute, (2) evaluate the performance of the developed system, and (3) assess its potential to support wastewater treatment management.

This research and development study was conducted in four phases: problem analysis and system design; equipment development and installation; system testing and calibration; and field evaluation. The developed system consisted of four architectural layers: a sensing layer, a data communication layer using Modbus RS485, a processing layer using a Programmable Logic Controller (PLC), and a data storage and visualization layer using Cloud technology through a Human-Machine Interface (HMI) and dashboard. Data were continuously collected from October 2025 to May 2026 and compared with laboratory analytical results to evaluate the agreement and measurement errors of the IoT system. The developed system successfully transmitted and displayed water quality data in real time, with data completeness of 98.26% and system availability of 99.89%. Comparison with laboratory results showed that pH measurements had a mean absolute error (MAE) of 0.10 pH units and a mean absolute percentage error (MAPE) of 1.35%; however, the correlation was not statistically significant ($r = 0.478$, $p = 0.231$). In contrast, TDS measurements showed a very strong positive correlation with laboratory results ($r = 0.968$, $p < 0.001$) and a MAPE of 2.88%. Field evaluation demonstrated that the system enabled continuous monitoring of water quality trends and system operating status, while supporting real-time alerts and data-informed wastewater treatment control.

The developed IoT-based monitoring system demonstrated potential for continuous water quality surveillance and for supporting wastewater treatment management in healthcare facilities. The system may also serve as a technological foundation for the development of smart environmental monitoring systems in healthcare settings.

Key words: Wastewater Treatment , Internet of Things (IoT), Real-time Monitoring

*Corresponding Author: Thatamon Tatong

บทนำ

ปัจจุบันการจัดการน้ำเสียในสถานพยาบาลถือเป็นประเด็นสำคัญด้านสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมเนื่องจากน้ำเสียจากโรงพยาบาลมีลักษณะแตกต่างจากน้ำเสียชุมชนทั่วไป เพราะเกิดจากกิจกรรมการรักษาพยาบาล ห้องปฏิบัติการ การซักล้าง และกิจกรรมสนับสนุนอื่น ๆ จึงอาจมีสารอินทรีย์ สารเคมี สารฆ่าเชื้อ ยา และจุลินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำเสีย การควบคุมและติดตามคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการควบคุมให้การระบายน้ำทิ้งเป็นไปตามมาตรฐาน โดยเฉพาะพารามิเตอร์ที่สะท้อนภาวะการทำงานของระบบบำบัด เช่น pH ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO) อุณหภูมิ ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids; TDS) ความขุ่น (Turbidity) และสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถใช้ประกอบการเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการบำบัดได้

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch)¹ เป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ สามารถรองรับน้ำเสียที่มีความแปรปรวนสูง มีความเสถียรในการทำงาน และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพอาศัยการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะสมดุลของค่า pH และ DO ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมทางชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ ขณะที่อุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี ความขุ่นสามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของสารแขวนลอยและประสิทธิภาพการแยกตะกอน ส่วน TDS และ COD ใช้ประกอบการติดตามลักษณะและภาวะมลพิษของน้ำเสีย ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังกล่าวอย่างรวดเร็ว หรือผิดปกติ อาจเป็นสัญญาณเริ่มต้นของความผิดปกติในการเดินระบบ การมีข้อมูลอย่างต่อเนื่องจึงมีความสำคัญต่อการตรวจพบความผิดปกติก่อนที่จะลุกลามส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

สถาบันบำราศนราดูรเป็นสถานพยาบาลเฉพาะทางด้านโรคติดต่อ ซึ่งมีน้ำเสียจากกิจกรรมการรักษาพยาบาลและกิจกรรมสนับสนุนหลายแหล่ง ใช้ระบบบำบัด

น้ำเสียแบบคลองวนเวียนในการบำบัดน้ำเสีย จากการศึกษาสภาพการดำเนินงานในพื้นที่ก่อนการพัฒนาระบบ IoT สถาบันบำราศนราดูรดำเนินการตรวจติดตามคุณภาพน้ำวันละ 1 ครั้ง โดยตรวจวัดพารามิเตอร์ ได้แก่ pH ค่าคลอรีน และค่า SV30 บันทึกลงในตาราง และผลตรวจวัด 10 พารามิเตอร์โดยห้องปฏิบัติการของกรมอนามัย เดือนละ 1 ครั้ง และบันทึกผลใน ตาราง Excel ทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการกำกับกับการเดินระบบเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง และผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระหว่างช่วงเวลาการตรวจได้อย่างทันที เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระน้ำเสียหรือสภาวะการทำงานของระบบ การตรวจพบความผิดปกติและการดำเนินการแก้ไขจึงอาจล่าช้า ปัญหาดังกล่าวเป็นช่องว่างสำคัญระหว่างการตรวจติดตามเป็นครั้งคราว (periodic monitoring) กับความจำเป็นในการเฝ้าระวังระบบบำบัดที่ทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาจึงกำหนดพารามิเตอร์ที่เชื่อมโยงกับสภาวะการทำงานของระบบ ได้แก่ pH, DO, อุณหภูมิ ความขุ่น TDS, COD และอัตราการไหลของน้ำเสีย เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งสำคัญของกระบวนการบำบัด ระบบที่พัฒนาขึ้นได้รับการติดตั้งจริงจำนวน 4 จุด ได้แก่ ท่อน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด บ่อบำบัดที่ 1 บ่อบำบัดที่ 2 และบ่อตกตะกอน โดยเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ผ่านระบบสื่อสาร Modbus RS485 ไปยัง Programmable Logic Controller (PLC) เพื่อรวบรวมและประมวลผลข้อมูลก่อนส่งต่อไปยังระบบ Haiwell Cloud และแสดงผลผ่าน Human-Machine Interface (HMI), Dashboard และอุปกรณ์เคลื่อนที่ การออกแบบดังกล่าวทำให้ข้อมูลจากจุดตรวจวัดสามารถนำมาแสดงเป็นข้อมูลต่อเนื่องและใช้ติดตามแนวโน้มของระบบได้ แทนการพิจารณาเฉพาะค่าที่ตรวจได้ในแต่ละครั้ง

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ในการติดตามคุณภาพน้ำช่วยเชื่อมโยงกระบวนการตรวจวัด การรับส่งข้อมูล การประมวลผล และการแสดงผลข้อมูลเข้าด้วยกัน² แม้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจะมีการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในการติดตามคุณภาพน้ำและ

ระบบสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบประปา ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม ขณะที่การประยุกต์ใช้ IoT กับระบบบำบัดน้ำเสียในโรงพยาบาล โดยเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน ยังมีจำนวนจำกัด

การศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ IoT สามารถสนับสนุนการติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ ช่วยให้ข้อมูลอย่างต่อเนื่อง เพิ่มความรวดเร็วในการรับรู้ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ลดข้อจำกัดของการเก็บตัวอย่างแบบเป็นช่วง และช่วยลดภาระด้านแรงงานในการติดตามตรวจสอบระบบ³ นอกจากนี้ การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับระบบติดตามคุณภาพน้ำด้วย IoT รายงานว่า ระบบดังกล่าวสามารถสนับสนุนการรวบรวม ส่ง และแสดงผลข้อมูลแบบใกล้เคียงเวลาจริง รวมทั้งส่งเสริมการแจ้งเตือนความผิดปกติและการใช้ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการระบบ⁴ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ IoT กับระบบบำบัดน้ำเสียในบริบทของสถานพยาบาล โดยเฉพาะระบบคลองวนเวียน ยังมีข้อจำกัดด้านหลักฐานจากการใช้งานจริงภายใต้สภาพน้ำเสียที่มีความซับซ้อนและความแปรปรวน จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบและประเมินสมรรถนะภาคสนาม รวมถึงตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างค่าที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์กับผลการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ดังนั้น งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาแบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี Internet of Things (IoT): กรณีศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน สถาบันบาราศนราดรุ” เป็นการศึกษาเพื่อนำไปสู่การพัฒนาแบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี IoT สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดรุ และประเมินประสิทธิภาพของระบบจากการตรวจวัดในพื้นที่จริง โดยเปรียบเทียบค่าจากระบบ IoT กับผลการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งประเมินศักยภาพของข้อมูลแบบเรียลไทม์ในการสนับสนุนการเฝ้าระวังและการบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสีย ผลการศึกษาคงจะช่วยให้ข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับ

ความเหมาะสมของระบบ IoT² ในฐานะเครื่องมือเฝ้าระวังภาคสนามและสนับสนุนการตรวจพบความผิดปกติของระบบในระยะเริ่มต้น สนับสนุนการพัฒนาแบบสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ และยกระดับมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อมของสถานพยาบาลอย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี IoT สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดรุ
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นในการตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ
3. เพื่อประเมินศักยภาพของระบบในการสนับสนุนการบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดรุ

ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ศึกษาครอบคลุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดรุ ตั้งแต่จุดน้ำเสียเข้าระบบ จุดในกระบวนการบำบัดและจุดน้ำทิ้งก่อนระบายออกจากระบบ

วิธีการศึกษา

1. การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT⁵ กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน⁶ สถาบันบาราศนราดรุ ประกอบด้วย 4 ระยะ ได้แก่ 1) วิเคราะห์ปัญหาและออกแบบระบบ 2) พัฒนาและติดตั้งอุปกรณ์ 3) ทดสอบและสอบเทียบระบบ และ 4) ประเมินผลการใช้งานภาคสนาม
2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง
 - 1) ข้อมูลตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ manual ของสถาบันบาราศนราดรุ
 - 2) กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยจุดตรวจวัดน้ำและข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์^{7,8} ระหว่างเดือนตุลาคม 2568 - พฤษภาคม 2569
 - 3) ผลตรวจทางห้องปฏิบัติการ กรมอนามัย

ระหว่างเดือนตุลาคม 2568-พฤษภาคม 2569

3. เครื่องมือวิจัย

1) ประกอบด้วยชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลสื่อสารอินเทอร์เน็ต ระบบคลาวด์ แดชบอร์ด

2) คุณสมบัติของระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์^{9,10}

เซนเซอร์	บทบาทในการเฝ้าระวัง	ความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสีย
pH	ตรวจวัดค่ากรด-ด่างของน้ำในระบบบำบัด	มีผลต่อความอยู่รอดและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด
Dissolved Oxygen (DO)	ใช้ประเมินปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	เป็นตัวชี้วัดสำคัญของประสิทธิภาพการเติมอากาศและการย่อยสลายทางชีวภาพ
อุณหภูมิ	ใช้ติดตามสภาพแวดล้อมของน้ำที่มีผลต่อการบำบัด	ส่งผลกระทบต่ออัตราการทำงานของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางชีวเคมี
ความขุ่น	ใช้ประเมินปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ	สะท้อนคุณภาพน้ำและประสิทธิภาพการแยกตะกอน

4. การพิจารณาด้านจริยธรรม

โครงการวิจัยนี้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาโครงการวิจัย สถาบันบำราศนราดูร รหัสโครงการ S013b/69/_Exempt ลงวันที่ 29 กุมภาพันธ์ 2569

ผลการศึกษา

ระยะที่ 1 วิเคราะห์ปัญหาและออกแบบระบบ

ผลการพัฒนาระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี IoT จากการวิเคราะห์ความต้องการของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบำราศนราดูร พบว่าการติดตามคุณภาพน้ำในระบบเดิมอาศัยการเก็บตัวอย่างและการตรวจวิเคราะห์

เป็นระยะ ส่งผลให้ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ใช้ในการติดตามการทำงานของระบบไม่ต่อเนื่อง และไม่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในช่วงเวลาระหว่างการตรวจวัดได้อย่างทันทั่วทั้ง

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จึงได้พัฒนาระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ที่มีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ ระบบรับส่งข้อมูล ระบบประมวลผลและควบคุม และระบบแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล โดยออกแบบเป็นสถาปัตยกรรม 4 ชั้น ประกอบด้วย (1) ชั้นตรวจวัด (Sensing Layer) (2) ชั้นสื่อสารข้อมูล (Communication Layer) โดยใช้มาตรฐาน Modbus RS485 (3) ชั้นประมวลผล (Processing Layer) โดยใช้ Programmable Logic Controller: PLC เป็นศูนย์กลางในการรวบรวมและประมวลผลข้อมูล และ (4) ชั้นแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล (Application Layer) ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบ Cloud เพื่อแสดงผลผ่าน HMI, Dashboard และอุปกรณ์เคลื่อนที่

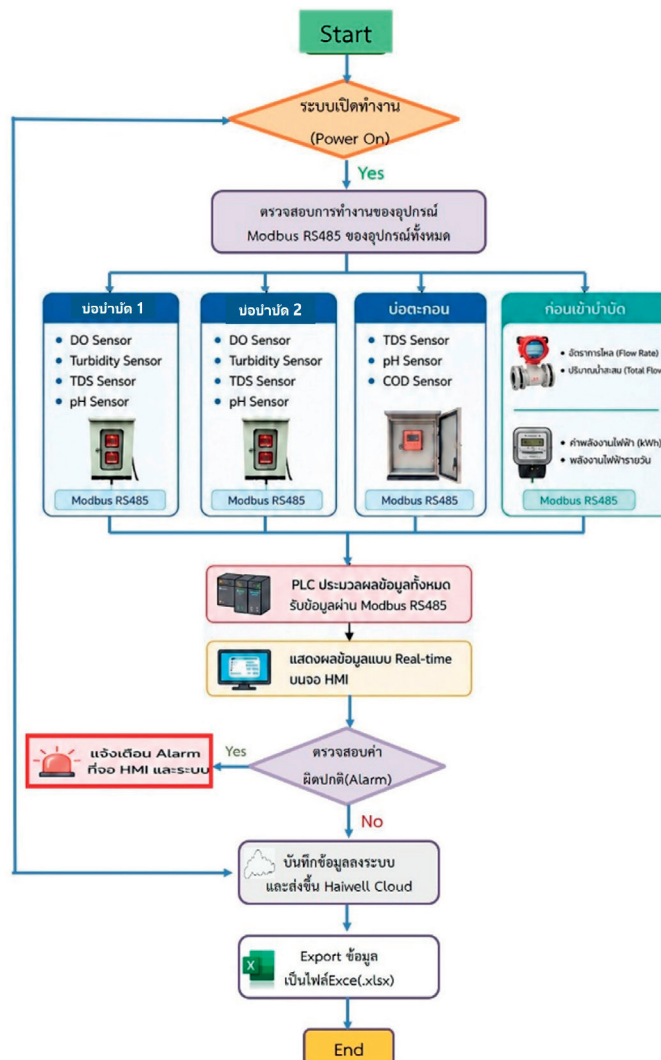
ระบบที่พัฒนาขึ้นได้รับการติดตั้งในตำแหน่งสำคัญของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจำนวน 4 จุด ได้แก่ ท่อน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด บ่อบำบัดที่ 1 บ่อบำบัดที่ 2 และบ่อดักตะกอน อุปกรณ์ที่ติดตั้งประกอบด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่า DO, pH, Turbidity, TDS และ COD รวมทั้ง Flow Meter สำหรับตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเสีย โดยเซ็นเซอร์เชื่อมต่อกับตู้ควบคุมผ่าน Modbus RS485 และส่งข้อมูลเข้าสู่ PLC ก่อนส่งต่อไปยังระบบ Cloud เพื่อการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล ดังรูปภาพที่ 1

ระยะที่ 2 พัฒนาและติดตั้งอุปกรณ์

2.1 ผลการทดสอบการสื่อสารและการรับส่งข้อมูล ภายหลังการติดตั้งได้ทดสอบการทำงานของระบบครอบคลุมการเชื่อมต่อระหว่างเซ็นเซอร์กับ PLC ผ่านเครือข่าย Modbus RS485 การรับส่งข้อมูลจาก PLC ไปยังระบบ Cloud การแสดงผลข้อมูลผ่าน Human-Machine Interface (HMI) และ Dashboard รวมถึงการทำงานของระบบแจ้งเตือน ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า อุปกรณ์ตรวจวัดสามารถสื่อสารกับ PLC และส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ Cloud ได้ โดยข้อมูลที่ตรวจวัดสามารถแสดงผลผ่านระบบ

ติดตามได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบที่ประกอบด้วยชั้นตรวจวัด ชั้นสื่อสารข้อมูล ชั้นประมวลผล และชั้นแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล เมื่อประเมินความต่อเนื่องและความครบถ้วนของการรับส่งข้อมูลระหว่างเดือน ตุลาคม 2568 ถึง เดือนพฤษภาคม 2569 (ดังตารางที่ 1) ซึ่งครอบคลุมระยะเวลา 243 วันพบว่าระบบถูกกำหนดให้รับข้อมูลทุก 120 วินาทีต่อรอบจากการตรวจสอบข้อมูลในระบบ Log พบว่ารอบการรับข้อมูลจริงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 122 วินาทีต่อรอบ ซึ่งสูงกว่า

ค่าที่กำหนดไว้เล็กน้อย จากความถี่การรับข้อมูลที่กำหนดไว้ระบบควรได้รับข้อมูล 174,960 รายการ และได้รับจริง 171,916 รายการ คิดเป็นความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 โดยมีส่วนต่างประมาณ 3,044 รายการ และพบเหตุการณ์ข้อมูลขาดหายต่อเนื่อง 46 ครั้ง รวมระยะเวลา 6 ชั่วโมง 1 นาที เมื่อประเมินความพร้อมใช้งานของระบบ พบว่าระบบมีความพร้อมใช้งานร้อยละ 99.89 จากระยะเวลาทดสอบทั้งหมด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรับส่งและจัดเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง



รูปภาพที่ 1 แผนภาพการพัฒนาและสถาปัตยกรรมระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน สถาบันบาราศนราดรุ

ในภาพรวม และรองรับการติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนตลอดช่วงการทดสอบ

ระยะที่ 3 การสอบเทียบและเปรียบเทียบค่าจากระบบ IoT กับห้องปฏิบัติการ

ระบบได้รับการสอบเทียบสำหรับเซ็นเซอร์ DO, pH, Turbidity และ TDS ก่อนการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยมีการเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากระบบ IoT กับผลการตรวจวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการในช่วงเดือนตุลาคม 2568 ถึงเดือนพฤษภาคม 2569 ได้แก่ ค่า pH และ TDS

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความต่อเนื่องและความครบถ้วนของการรับส่งข้อมูลระหว่างเดือน ต.ค. 68–พ.ค. 69

รายการประเมิน	ผลที่ควรรายงานจากข้อมูลจริง
ระยะเวลาทดสอบการสื่อสาร	มีการทดสอบก่อนใช้งานภาคสนาม
ความถี่การรับข้อมูล	ทุก 120 วินาที (2 นาที/รอบ) ค่าที่ตั้งในระบบ-เฉลี่ยจริงจาก Log= 122 วินาที/รอบ
จำนวนข้อมูลที่ควรได้รับ	$N_{\text{expected}} \approx 174,960$ ข้อมูล = 243 วัน 5,832 ชม. ÷ 120 วินาที
จำนวนข้อมูลที่ได้รับจริง	$N_{\text{received}} = 171,916$ ข้อมูล นับจาก Log จริงทั้งหมด
จำนวนข้อมูลสูญหาย $N_{\text{expected}} - N_{\text{received}}$	$\approx 3,044$ ส่วนใหญ่จากรอบบันทึกที่ล่าช้ากว่า 120 วินาที เล็กน้อย (เฉลี่ย 122 วินาที/รอบ) รวมกับช่วงขาดข้อมูล 46 ครั้ง (-6 ชม. 01 นาที)
ความครบถ้วนของข้อมูล (%) $\frac{N_{\text{received}}}{N_{\text{expected}}} \times 100$	98.26 %
ความพร้อมใช้งานของระบบ (%)	$\approx 99.89 \%$ Downtime รวม 6 ชม. 01 นาที จาก 46 เหตุการณ์ที่ข้อมูลขาดหายต่อเนื่องเกิน 3 นาที จากช่วงทดสอบทั้งหมด

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากระบบ IoT กับผลการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	จำนวนคู่ข้อมูล (n)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	p-value	MAE	RMSE	MAPE (%)
pH	8	0.478	0.231	0.1	0.12	1.35
TDS (mg/L)	8	0.968	< 0.001	13.13	15.25	2.88

หมายเหตุ: ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คำนวณด้วย Pearson's correlation coefficient; MAE = Mean Absolute Error; RMSE = Root Mean Square Error; MAPE = Mean Absolute Percentage Error

ระยะที่4 ประเมินผลการใช้งานการติดตาม คุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์และการใช้งานระบบภาคสนาม

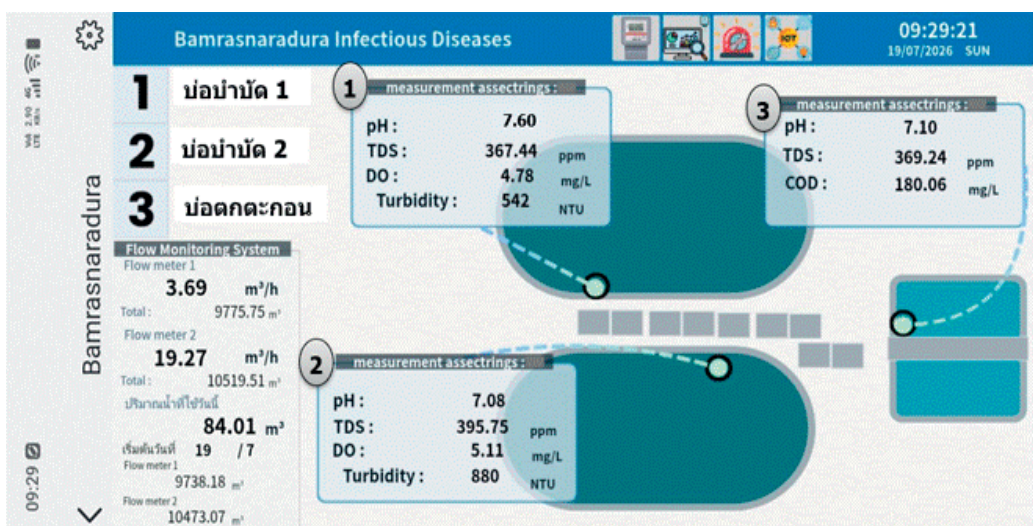
ระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้งานจริงในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดูล โดยเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติระหว่างเดือนตุลาคม 2568 ถึงเดือนพฤษภาคม 2569 ครอบคลุมพารามิเตอร์ ได้แก่ pH, Dissolved Oxygen (DO), Temperature, Turbidity, Total Dissolved Solids (TDS), Chemical Oxygen Demand (COD), อัตราการไหลของน้ำเสีย และการใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบสามารถตรวจวัดบันทึก และส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ Cloud เพื่อแสดงผลผ่าน HMI และ Dashboard ได้อย่างต่อเนื่อง (ดังรูปภาพที่ 2) ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถติดตามแนวโน้มของพารามิเตอร์และสถานะการทำงานของระบบได้แบบเรียลไทม์

ผลการประเมินการใช้งานภาคสนามพบว่าระบบสามารถรวบรวมและส่งข้อมูลจากจุดตรวจวัดเข้าสู่ระบบประมวลผลและ Cloud ได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 และความพร้อมใช้งานของระบบร้อยละ 99.89 นอกจากนี้ระบบสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าพารามิเตอร์ถึงหรือเกินเกณฑ์ที่กำหนด และสนับสนุนให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าถึงข้อมูลเพื่อติดตามแนวโน้มและตรวจสอบสถานะของระบบได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการประเมินศักยภาพของระบบในด้านความต่อเนื่องของข้อมูล ความรวดเร็วในการรับรู้เหตุผิดปกติ การงานบุคลากร ความสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ และการสนับสนุนการบริหารจัดการ พบว่าระบบสามารถสนับสนุนการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำและการเข้าถึงข้อมูลเพื่อประกอบการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียได้ โดยข้อมูลจากเซนเซอร์สามารถนำมาใช้ติดตามแนวโน้มของพารามิเตอร์และประกอบการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงานในภาคสนาม (ดังตารางที่ 3)

สรุปผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาพบว่าสามารถพัฒนาและติดตั้งระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนของสถาบันบาราศนราดูลได้ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในจุดสำคัญของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจำนวน 4 จุด ประกอบด้วยท่อน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ บ่อบำบัดที่ 1 บ่อบำบัดที่ 2 และบ่อตกตะกอน ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ DO, pH, Turbidity, TDS และ COD รวมทั้ง Flow Meter สำหรับตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเสีย ข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดถูกส่งผ่านระบบ Modbus RS485 ไปยัง PLC เพื่อรวบรวมและประมวลผล



รูปภาพที่ 2 ตัวอย่างการแสดงผลข้อมูลแบบ Real Time บนจอ HMI

ตารางที่ 3 ผลการประเมินการใช้งานระบบติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์ภาคสนาม

ประเด็นประเมิน	ผลการศึกษา
ความต่อเนื่องของข้อมูล	ระบบสามารถตรวจวัด บันทึกลง และส่งข้อมูลเข้าสู่ Cloud ได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 และความพร้อมใช้งานร้อยละ 99.89
การรับรู้เหตุผิดปกติ	ระบบสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าพารามิเตอร์ถึงหรือเกินเกณฑ์ที่กำหนด และแสดงผลผ่าน Dashboard
การปฏิบัติงานของบุคลากร	ระบบลดขั้นตอนการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลด้วยตนเอง และสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลจากระบบแสดงผล
ความสอดคล้องกับห้องปฏิบัติการ	ค่า pH และ TDS จากระบบ IoT มีผลการเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการตามตัวชี้วัดทางสถิติที่รายงานโดย TDS มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก
การสนับสนุนการบริหารจัดการ	ข้อมูลแบบเรียลไทม์สามารถใช้ติดตามแนวโน้มคุณภาพน้ำและสถานะการทำงานของระบบ เพื่อประกอบ
	การควบคุมและติดตามระบบบำบัดน้ำเสีย

ก่อนส่งต่อไปยังระบบ Cloud และแสดงผลผ่าน HMI, Dashboard และอุปกรณ์เคลื่อนที่ โดยระบบรองรับการแสดงผลข้อมูลแบบต่อเนื่องและการแจ้งเตือนเมื่อค่าที่ตรวจวัดเกินเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นระบบที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นไปตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 โดยสามารถเชื่อมโยงกระบวนการตั้งแต่การตรวจวัด การรับส่งข้อมูล การประมวลผล การจัดเก็บข้อมูล และการแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ครบถ้วน

2. ผลการประเมินเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากระบบ IoT กับผลการตรวจวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการพบว่า ค่า pH มีความคลาดเคลื่อนต่ำมาก โดยมี MAE เท่ากับ 0.10 หน่วย pH และ MAPE ร้อยละ 1.35 แสดงว่าค่าที่วัดจาก IoT ใกล้เคียงกับห้องปฏิบัติการแต่ค่าสหสัมพันธ์ $r = 0.478$ และ $p = 0.231$ ยังไม่แสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ขณะที่ค่า TDS มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมากกับผลห้องปฏิบัติการ ($r = 0.968, p < 0.001$) และมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำ (MAPE = 2.88%) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าที่ตรวจวัดจากระบบ IoT สำหรับพารามิเตอร์ pH และ TDS มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะค่า TDS ซึ่งมีความสัมพันธ์ในระดับสูงมาก อย่างไรก็ตาม การประเมินประสิทธิภาพเชิงสถิติในครั้งนี้มีข้อมูลเปรียบเทียบที่สมบูรณ์สำหรับ pH และ TDS เป็นหลัก ส่วน DO และความขุ่นมีการสอบเทียบก่อนการใช้งาน แต่ยังไม่มียังข้อมูลผลการเปรียบเทียบกับ

ห้องปฏิบัติการในรูปแบบที่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความคลาดเคลื่อนได้ในลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัด บันทึกลง และส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ Cloud เพื่อแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งครอบคลุมพารามิเตอร์สำคัญของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ pH, DO, Temperature, Turbidity, TDS, COD, อัตราการไหลของน้ำเสีย และการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่า ผลการศึกษามุ่งบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ในด้านการพัฒนาและทดสอบระบบสำหรับการเฝ้าระวังภาคสนาม โดยมีผลเชิงปริมาณสนับสนุนความสอดคล้องของระบบกับผลการตรวจวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการสำหรับ pH และ TDS

3. ผลการใช้งานภาคสนามพบว่าระบบสามารถรวบรวมและแสดงข้อมูลคุณภาพน้ำจากจุดตรวจวัดต่างๆ ผ่านระบบ HMI และ Dashboard ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถดำเนินการรับส่งข้อมูลจากจุดตรวจวัดเข้าสู่ระบบประมวลผลและระบบ Cloud ได้อย่างต่อเนื่องในภาพรวม โดยมีความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 และความพร้อมใช้งานของระบบประมาณร้อยละ 99.89 ผลดังกล่าวแสดงถึง

ความสามารถของระบบในการรองรับการรับส่งและจัดเก็บข้อมูลสำหรับการติดตามคุณภาพน้ำแบบต่อเนื่องและการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ ระบบยังรองรับการแจ้งเตือนเมื่อค่าพารามิเตอร์ผิดปกติหรือเกินเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งช่วยให้ข้อมูลจากการตรวจวัดสามารถนำมาใช้ประกอบการตรวจสอบและควบคุมการทำงานของระบบบำบัดได้รวดเร็วขึ้น

ดังนั้น ระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการในด้านการเข้าถึงข้อมูล การติดตามแนวโน้ม และการเฝ้าระวังความผิดปกติของระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการนำข้อมูลดิจิทัลมาใช้ในการกำกับและปรับปรุงการดำเนินงานของระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอนามัยสิ่งแวดล้อมและการสุขภาพสถานพยาบาล โดยเฉพาะในบริบทของ Smart Hospital

อภิปรายผล

ผลการทดสอบพบว่าระบบ IoT ที่พัฒนามีความต่อเนื่องและมีความพร้อมสำหรับการใช้งานติดตามคุณภาพน้ำในภาคสนามในระดับสูง มีความครบถ้วนของข้อมูลร้อยละ 98.26 และความพร้อมใช้งานร้อยละ 99.89 อย่างไรก็ตาม การพบข้อมูลขาดหายจำนวน 3,044 รายการ และเหตุการณ์ข้อมูลขาดหายต่อเนื่อง 46 ครั้งแสดงให้เห็นว่ายังมีโอกาสเกิดความไม่ต่อเนื่องของการรับส่งข้อมูล โดยเฉพาะกรณีที่รอบการรับข้อมูลจริงเฉลี่ย 122 วินาที ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ 120 วินาทีเล็กน้อย ดังนั้น ในการใช้งานระยะยาวควรให้ความสำคัญกับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบสื่อสาร การจัดการข้อมูลเมื่อเกิดการขัดข้อง และกลไกป้องกันหรือกู้คืนข้อมูลที่ขาดหาย เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความต่อเนื่องของระบบในระยะยาว¹¹

ผลการเปรียบเทียบค่า pH จากระบบ IoT กับห้องปฏิบัติการ แม้ค่าความคลาดเคลื่อนจะต่ำมาก แต่ค่าสหสัมพันธ์ $r = 0.478$ และ $p = 0.231$ ยังไม่แสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่ง

อาจเกิดจากจำนวนข้อมูลที่น้อยและช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่แคบมาก

การศึกษาครั้งนี้ไม่มีข้อมูลการประเมินความสอดคล้องเชิงสถิติแบบเรียลไทม์กับผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการของพารามิเตอร์ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) และความขุ่น (Turbidity) เนื่องจากไม่มีชุดข้อมูลจับคู่เพียงพอในการศึกษาครั้งนี้ แต่การตรวจวัดแบบเรียลไทม์ยังมีความจำเป็นในเชิงการควบคุมกระบวนการ โดยค่า DO ใช้เฝ้าระวังสถานะการเติมอากาศและกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ส่วนค่าความขุ่นใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคและพฤติกรรมของตะกอน เนื่องจากวัตถุประสงค์ของระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นไม่ได้มุ่งหมายเพียงการทดแทนการตรวจวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการ แต่มีเป้าหมายสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการติดตามสถานะของระบบอย่างต่อเนื่อง (continuous monitoring) และ ตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในระยะเริ่มต้น (early detection)¹²

ดังนั้น การเลือกติดตามพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชนิดร่วมกันจึงช่วยให้สามารถมองเห็นสถานะของระบบจากหลายมิติ มากกว่าการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเพียงอย่างเดียว ข้อมูลแบบเรียลไทม์สามารถใช้เป็น ชุดข้อมูลเฝ้าระวัง (monitoring data) ที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสังเกตความสัมพันธ์และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงภายในระบบได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ประโยชน์

1. การใช้ประโยชน์ในระดับหน่วยปฏิบัติการระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการเฝ้าระวังการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน โดยใช้ข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อติดตามแนวโน้มของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำและสถานะของระบบ ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้ข้อมูลจาก HMI และ Dashboard ประกอบการตรวจสอบระบบในแต่ละวัน และใช้ข้อมูลย้อนหลังเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของระบบ

2. การใช้ประโยชน์ด้านการบำรุงรักษาและ

การจัดการความเสี่ยง โดยข้อมูลที่จัดเก็บอย่างต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางตรวจสอบและบำรุงรักษาเซ็นเซอร์ อุปกรณ์ตรวจวัด และระบบบำบัดตามแนวโน้มของข้อมูลจริง รวมทั้งใช้กำหนดเกณฑ์การแจ้งเตือนที่เหมาะสมกับบริบทของระบบบำบัดน้ำเสียของสถาบัน

3. การใช้ประโยชน์ด้านการบริหารจัดการ ข้อมูลดิจิทัลจากระบบสามารถใช้ประกอบการติดตามสถานะของระบบบำบัดน้ำเสีย การจัดทำรายงาน และการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้รับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อมและผู้บริหารของโรงพยาบาล

4. การใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนา Smart Hospital ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบ Smart Environmental Monitoring ในสถานพยาบาล โดยเชื่อมโยงข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ระบบควบคุม และฐานข้อมูลกลาง เพื่อสนับสนุนการจัดการสิ่งแวดล้อมบนพื้นฐานของข้อมูล

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไป

1. ศึกษาความเสถียรและความถูกต้องของเซ็นเซอร์ในระยะยาว โดยประเมินผลของการสะสมคราบการเสื่อมสภาพ และความถี่ที่เหมาะสมของการสอบเทียบ

2. ศึกษาเหตุการณ์ผิดปกติจริงหรือการทดสอบสถานการณ์จำลอง เพื่อประเมิน Lead Time ตั้งแต่เริ่มเกิดความผิดปกติ การแจ้งเตือน การรับรู้ จนถึงการตอบสนองของผู้ปฏิบัติงาน

3. เพิ่มการเปรียบเทียบค่า DO และ Turbidity กับเครื่องมือหรือวิธีมาตรฐาน เพื่อประเมินความถูกต้องของทุกพารามิเตอร์อย่างครบถ้วน

4. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบเรียลไทม์กับ BOD, COD, TSS และอัตราการไหล เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบบำบัด

5. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ รวมถึงต้นทุนการติดตั้ง ค่าบำรุงรักษา และผลที่เกิดจากการลดภาระด้านแรงงานหรือการใช้พลังงาน

6. พัฒนาระบบวิเคราะห์ความผิดปกติอัตโนมัติ โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูงหรือปัญญาประดิษฐ์กับฐานข้อมูลระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

1. Medical Engineering Division. Manual for maintenance of wastewater treatment systems in hospitals. Nonthaburi: Department of Health Service Support, Ministry of Public Health; 2016. (in Thai)
2. Thai MOOC. Basic Internet of Things (IoTs) [Internet]. 2023 [cited 2026 Jul 20]. Available from: <https://thaimooc.ac.th/courses/HU00193>. (in Thai)
3. Forhad HM, Uddin MR, Chakrovorty RS, Ruhul AM, Faruk HM, Kamruzzaman S, et al. IoT-based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). Heliyon 2024; 10: e40746. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40746.
4. Ansari SA, Vidyarthi VK. Use of Internet of Things in water resources applications: challenges and future directions: a critical review. Discov Internet Things 2025; 5: 96. doi: 10.1007/s43926-025-00193-7.
5. Li R, Yang X, Lu Z, Chen C. Research on water quality monitoring system based on IoT technology. In: 2019 4th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC); 2019 Sep 27–29; Tokyo, Japan. Piscataway (NJ): IEEE; 2019. p.321–324.
6. Almetwally SA, Hassan MK, Mourad MH. Real time internet of things (IoT) based water quality management system. Procedia CIRP 2020; 91: 478–485. doi: 10.1016/j.procir.2020.03.107.
7. Ramadan MN, Ali MA, Khoo SY, Alkhdher M, Alherbawi M. Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. Ecotoxicol Environ Saf

- 2024; 283: 116856.
8. Zulkifli CZ, Garfan S, Talal M, Alamoodi AH, Alamleh A, Ahmaro IY, et al. IoT-based water monitoring systems: a systematic review. *Water* 2022; 14(22): 3621. doi: 10.3390/w14223621.
 9. Kamyab H, Khademi T, Chelliapan S, Saberika-marposhti M, Rezaia S, Yusuf M, et al. The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management. *Res Eng* 2023; 20: 101566. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101566.
 10. El-Shafeiy E, Alsabaan M, Ibrahim MI, Elwahsh H. Real-time anomaly detection for water quality sensor monitoring based on multivariate deep learning technique. *Sensors* 2023; 23(20): 8613. doi: 10.3390/s23208613.
 11. Ministry of Natural Resources and Environment. Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment on designation of buildings as pollution sources subject to control under Section 80 of the Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act B.E. 2535 (1992), B.E. 2567 (2024). Royal Thai Government Gazette. 2024; 141(Special Part 233 Ngor): 1-6. (in Thai)
 12. Ministry of Natural Resources and Environment. Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment on effluent discharge standards for certain types and sizes of buildings, B.E. 2567 (2024). Royal Thai Government Gazette. 2024; 141(Special Part 233 Ngor): 7-15. (in Thai)