

ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนคุณภาพน้ำทิ้งโดยใช้เครือข่ายเซนเซอร์หลายชนิด

Multi-Sensor Based Wastewater Quality Monitoring and Early Warning System

ภคจิรา อินทวงศ์ วรรณกร ปิงประวัติ ศุจินธร หล่อฤทัย พรชัย ชัยนaylor สุพรรณ ทิพย์ทิพากร และ ก่อพร พันธุ์ชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล korporn.pan@mahidol.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบเครือข่ายเซนเซอร์หลายตัว (multi-sensor network) เพื่อประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม การวิจัยดำเนินการผ่านกรณีศึกษาจากโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ อัตราการไหล (Flow rate), ค่าความเป็นกรด-เบส (pH), อุณหภูมิ (temperature) และปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen; DO) ระบบเครือข่ายเซนเซอร์นี้เชื่อมโยงกับหน่วยบำบัดที่ประกอบด้วยเครื่องเป่าลม (blower) สำหรับการเติมออกซิเจน ระบบปั๊มและมอเตอร์สำหรับการจ่ายสารบัฟเฟอร์เพื่อปรับค่า pH และระบบปั๊มและมอเตอร์สำหรับการควบคุมอัตราการไหล นอกจากนี้ยังพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการแสดงผลและตรวจสอบสถานะระบบผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาสามารถลดการพึ่งพาแรงงานวิศวกรปฏิบัติการ ลดระยะเวลาในกระบวนการควบคุมคุณภาพน้ำเสีย

คำสำคัญ: เครือข่ายเซนเซอร์หลายชนิด ระบบบำบัดน้ำเสีย การตรวจวัดแบบเรียลไทม์ ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม

Abstract

This study presents the development of an automated multi-sensor network system for enhancing industrial wastewater treatment processes. A case study was conducted at a manufacturing facility within an industrial estate to validate system performance. The system incorporates real-time monitoring of critical parameters including flow rate, pH levels, temperature, and dissolved oxygen (DO) concentrations. The sensor network is integrated with automated treatment units comprising a blower for oxygenation, a pump-motor assembly for buffer solution dosing to maintain optimal pH, and an additional pump-motor system for flow rate regulation. Additionally, an application was developed for real-time data visualization and system monitoring. Implementation results demonstrated significant operational improvements, including reduced manual supervision requirements, and accelerated wastewater quality control processes.

Keywords: Multi-sensor, wastewater treatment process, real-time monitoring, industrial automation.

1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน ภาคอุตสาหกรรมยังขาดระบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องพึ่งพาวิศวกรและบุคลากรปฏิบัติการในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องตรวจวัดประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ (temperature) อัตราการไหลของน้ำ (flow rate) และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO) การตรวจสอบเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการบำบัดก่อนการปล่อยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

กระบวนการตรวจสอบและแก้ไขในปัจจุบันดำเนินการด้วยวิธีการทางห้องปฏิบัติการ (laboratory method) ซึ่งต้องอาศัยวิศวกรปฏิบัติการในการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสีย บันทึกข้อมูลลงในแบบฟอร์มปฏิบัติการรายวัน (operation daily log sheet) และส่งรายงานต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรมเป็นรายเดือนเพื่อการควบคุมต่อไป ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ลงวันที่ 7 มิถุนายน 2560 กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ได้แก่ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids; TSS) ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ระหว่าง 5.5-9.0 และอุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส [1] หากพบค่าเกินมาตรฐาน วิศวกรปฏิบัติการต้องทำการเติมสารบัฟเฟอร์ เช่น FeCl_3 และ NaOH หรือเติมออกซิเจนเพื่อปรับสมดุลออกซิเจนในน้ำ [2, 3] ซึ่งระบบควบคุมปัจจุบันสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งที่ปลายทางของสายการผลิตใช้เวลานานในแต่ละรอบของการปรับแต่งสมดุลของน้ำเสียในระบบ

ผู้วิจัยเล็งเห็นว่ากระบวนการดังกล่าวต้องใช้บุคลากรเข้าปฏิบัติการและใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากต้องรอผลคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการในห้องปฏิบัติการทำให้ไม่สามารถหยุดการปล่อยน้ำเสียที่เกินมาตรฐานได้ในทันที การศึกษานี้จึงมุ่งเสนอแนวทางแก้ไขด้วยการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำเสียอัตโนมัติโดยใช้เครือข่ายเซนเซอร์หลายตัวที่สามารถแจ้งเตือน บันทึกข้อมูล และจัดการกระบวนการบำบัดโดยลดการพึ่งพาบุคลากร พร้อมทั้งลดระยะเวลาของกระบวนการต่างๆ โดยใช้กรณีศึกษาจากโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง

2. แนวทางในการออกแบบระบบ

เพื่อให้การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งด้วยเครือข่ายเซนเซอร์หลายตัวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมกับ

สภาพแวดล้อมและข้อกำหนดของสถานที่ติดตั้ง จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง ทั้งในมิติของฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และสถาปัตยกรรมเครือข่าย โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวทางการเลือกใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการสร้างระบบต้นแบบ

2.1 การเลือกใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุม (controllers)

ในการออกแบบระบบควบคุมสำหรับต้นแบบที่จะใช้ในอุตสาหกรรมจริง เลือกใช้ Programmable Logic Controller (PLC) เนื่องจากสามารถให้การควบคุมที่มีความแม่นยำ เชื่อถือได้ และเหมาะสมกับการใช้งานในระดับโรงงานอุตสาหกรรม [4] เกณฑ์การคัดเลือกพิจารณาจากจำนวนอุปกรณ์ตรวจวัด (sensors) และอุปกรณ์ควบคุม (controllers) ที่ต้องใช้ งาน รวมถึงความคุ้มค่าของต้นทุน เนื่องจากระบบที่ออกแบบไม่ได้มีความซับซ้อนสูงและใช้อุปกรณ์ตรวจวัดไม่มาก การเลือกใช้ Modular PLC [5] จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เพราะสามารถขยายหรือเพิ่มโมดูลเสริม เช่น เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ได้ตามความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (stakeholders) แตกต่างจาก Block-type PLC ที่มีข้อจำกัดในการเพิ่มอุปกรณ์และยืดหยุ่นน้อยกว่า

2.2 การเลือกใช้ตัวเชื่อมต่อสำหรับ PLC

เลือกใช้ Ethernet Module เป็นตัวเชื่อมต่อ (communication connector) เนื่องจากเป็นมาตรฐานเครือข่ายที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย และเหมาะสมกับการสื่อสารข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทาง [6] โมดูล Ethernet สามารถทำงานร่วมกับ PLC MELSEC-Q Series ที่มี CPU ในตัว และยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบ IoT เพื่อพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันได้ในอนาคต

2.3 การเลือกใช้ Protocol การสื่อสาร

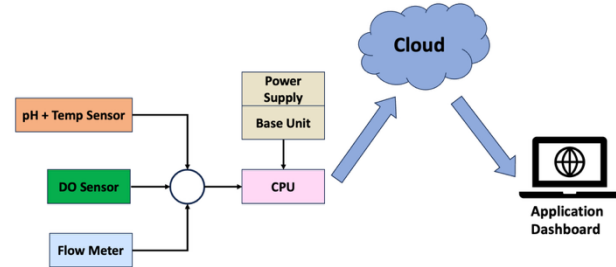
เลือกใช้ Transmission Control Protocol (TCP) เนื่องจาก TCP มีความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสำหรับการรับส่งข้อมูลขนาดใหญ่ที่ต้องการความถูกต้องและสมบูรณ์ของข้อมูล ในขณะที่ User Datagram Protocol (UDP) แม้จะมีความเร็วสูงกว่า แต่ไม่รับประกันความถูกต้องของข้อมูล จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในระบบเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำทั้งที่ต้องการความแม่นยำ

2.4 การเลือกใช้ Internet of Things (IoT) Platform

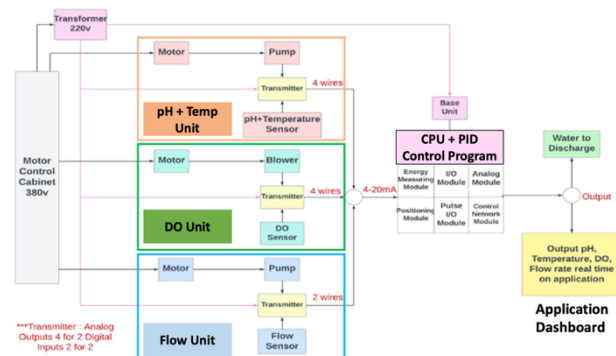
เลือกใช้ Blynk Platform สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชัน เนื่องจากสามารถรองรับการสร้างระบบแจ้งเตือนบนอุปกรณ์พกพา (mobile devices) และเหมาะสำหรับการทำงานด้าน IoT ที่ต้องการเชื่อมต่อกับ PLC บนระบบ Cloud ทำให้สามารถเข้าถึงและจัดการข้อมูลจากระยะไกลได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ [7]

3. การออกแบบสถาปัตยกรรมและการทำงานของระบบ

รูปที่ 1 และ 2 แสดงภาพรวมส่วนประกอบและสถาปัตยกรรมของระบบ ซึ่งประกอบด้วย pH และ temperature sensor [8, 9, 10] ที่ทำงานควบคู่กับปั๊มสูบน้ำแบบเฟืองคานา ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยสามารถดูสูตร



รูปที่ 1 แสดงภาพรวมส่วนประกอบของระบบ

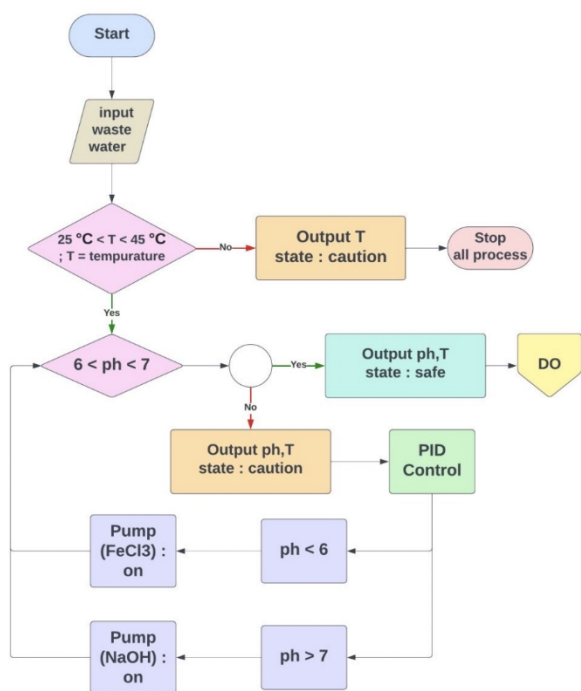


รูปที่ 2 แผนผังสถาปัตยกรรมของระบบ

กรด FeCl_3 หรือสารเบส NaOH จากบ่อเก็บสารเคมีที่โรงงานเตรียมไว้ ระบบได้ติดตั้ง DO sensor คู่กับ blower เดิมอากาศ และติดตั้ง flow sensor ทำงานคู่กับปั๊มควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบ [11, 12] มีการทำงานดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 4 และ 5 โดยน้ำจากหน่วยการผลิตของโรงงานจะไหลตามกระบวนการพักน้ำและกระบวนการบำบัดไปยังจุดปล่อยทิ้ง (discharge point) เพื่อเตรียมปล่อยสู่แหล่งน้ำ ผู้วิจัยเลือกจุดติดตั้งเซนเซอร์คู่กับปั๊มและ blower ตามความเหมาะสมของพื้นที่ปฏิบัติการ โดยเลือกบริเวณบ่อพักน้ำซึ่งเป็นน้ำที่ไม่มีตะกอน (sludge) และไม่มี noise รบกวนการตรวจวัด เพื่อให้สามารถเตรียมการบำบัดได้อย่างเหมาะสม

ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวจะถูกส่งมารวมกันภายใน PLC ซึ่งประกอบด้วย CPU และ internet module จากนั้นจะส่งข้อมูลสู่ระบบ cloud เพื่อเชื่อมต่อกับระบบแสดงผลแอปพลิเคชันแดชบอร์ด

การทำงานของปั๊ม blower และมอเตอร์จะทำงานร่วมกันเป็นคู่ โดยมอเตอร์คู่แรกจะทำงานเพื่อให้ปั๊มสูบน้ำจากบ่อเคมีเพื่อปรับค่า pH ของน้ำให้เป็นกลาง มอเตอร์คู่ที่สองจะทำงานควบคู่กับ blower ซึ่งเป็นตัวเติมอากาศในการบำบัด และมอเตอร์คู่ที่สามทำงานร่วมกับปั๊มอีกหนึ่งตัวเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (รูปที่ 2) ผู้วิจัยเลือกใช้ปั๊มแบบ one duty one standby ในการทำงานปั๊มน้ำทั้งสองตัวจะสลับกันทำงานเป็นปั๊มหลัก (duty pump) และปั๊มสำรอง (standby pump) โดยอัตโนมัติเมื่อการทำงานครบรอบ ในกรณีที่ปั๊มตัวใดตัวหนึ่งไม่สามารถ



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของ pH และ Temperature Sensor

ทำงานได้ สามารถเลือกปั๊มตัวที่สองทำงานแทนได้ทันทีโดยไม่ต้องหยุดการทำงาน จากการสำรวจพื้นที่ปฏิบัติการ ผู้วิจัยจึงเลือกติดตั้งปั๊มแบบ negative suction type เนื่องจากสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดที่ปั๊มต้องดูดอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าปั๊ม การคำนวณแรงดันปั๊มที่ต้องใช้ร่วมกับกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อให้ปั๊มสามารถดูดสารเคมีในการบำบัดน้ำและควบคุมอัตราการไหลของน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

$$\begin{aligned} \text{Total dynamic head (TDH)} \\ = \text{Total static head} + \text{Friction head (Major loss)} \\ + \text{Minor loss} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Total static head} = \text{Suction head} + \text{Discharge head} \quad (2)$$

โดยที่ Friction head (Major loss) คำนวณจากสมการ Darcy-Weisbach ดังแสดงใน (1)

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

โดยที่:

h_f คือ การสูญเสียหัวเนื่องจากแรงเสียดทาน (Head Loss)

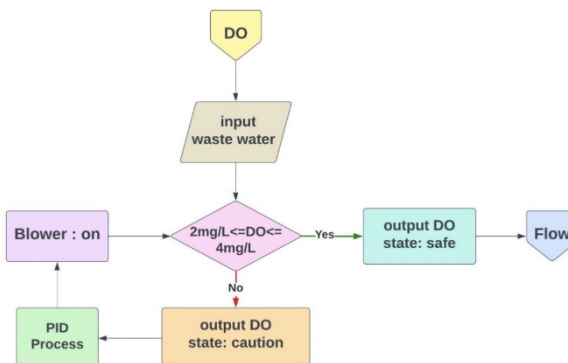
f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Factor)

L คือ ความยาวของท่อ

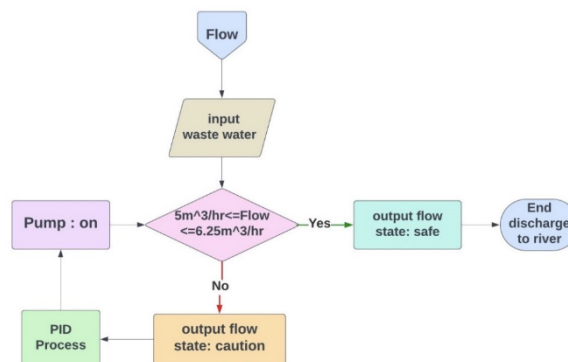
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

v คือ ความเร็วของของไหล

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของ DO Sensor

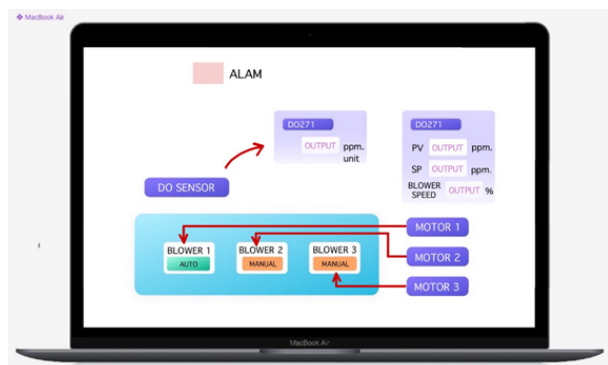
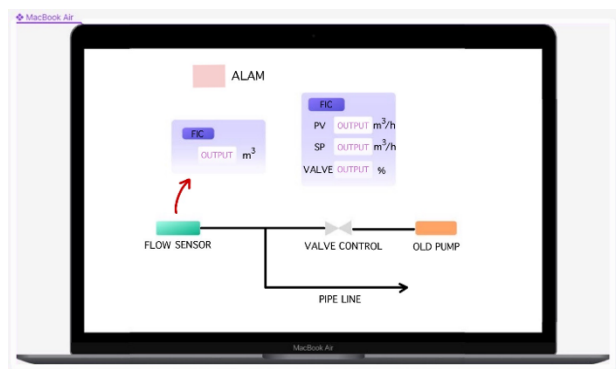


รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของ Flow Sensor

4. การออกแบบระบบแอปพลิเคชันการแสดงผล

การออกแบบแอปพลิเคชันแดชบอร์ดส่วนติดต่อผู้ใช้ ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Figma [13] เพื่อสร้างต้นแบบการแสดงผลที่เหมาะสมและเข้าใจง่ายต่อการใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 6

จากแผนภาพการทำงานแสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์ทั้งสามชุด ทำงานร่วมกับ ปั๊ม, มอเตอร์ และ Blower เป็นคู่ โดยเมื่อเซนเซอร์ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสีย ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์จะถูกส่งไปยัง Controller กลาง ซึ่งเป็นระบบ Supervisory Control Based on PLC ที่ประกอบด้วย Central Processing Unit (CPU), Network Module และโมดูลประกอบอื่น ๆ สำหรับการประมวลผล ในหน่วยประมวลผลกลาง มีการติดตั้ง Proportional-Integral-Derivative (PID) Control Algorithm ร่วมกับชุดคำสั่ง (program code) ที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบค่าคุณภาพน้ำที่เกินกว่าค่ามาตรฐาน โปรแกรมจะสั่งการให้ มอเตอร์, ปั๊ม และ Blower ทำงานเพื่อดำเนินการบำบัด



รูปที่ 6 การแสดงสถานะของ Sensors แต่ละชนิดรวมทั้งสถานะของ Blower และ Pump จากแอปพลิเคชันแดชบอร์ด

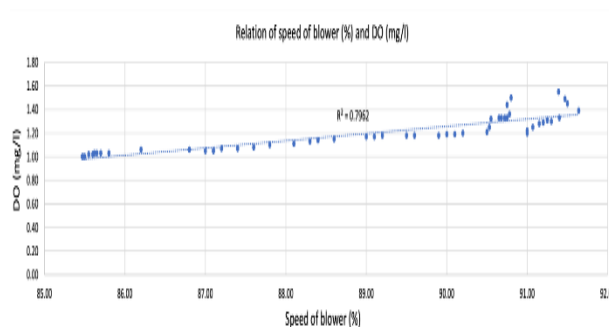
จนกว่าค่าที่ตรวจวัดจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ผลการทำงานจะแสดงผลเป็นค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแบบ Real-time ซึ่งแสดงค่าทุก 1 วินาที รวมถึงการแจ้งเตือนหากพบค่าที่ผิดปกติ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสถานะการทำงานของปั๊มและ Blower ในกระบวนการบำบัดได้ด้วย

สำหรับการออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบ จัดหา และคำนวณการติดตั้งเอง ส่วน Power Supply สำหรับ Control Cabinet ที่ใช้ไฟฟ้า 380 V และ Transformer 220 V ได้รับการสนับสนุนและติดตั้งโดยบริษัทผู้ให้บริการ

5. การวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบควบคุม

ในการทดสอบการทำงานของระบบ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบของ Blower และค่า Dissolved Oxygen (DO) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง (รูปที่ 7) พบว่า เมื่อค่า Process Value (PV) ของ DO มีค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้หรือสูงกว่าค่า Set Point ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติจะปรับลด เพอร์เซ็นต์ความเร็วรอบของ Blower ลงทันที เพื่อรักษาสมดุลของค่า DO ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำ การประเมินความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่าง DO และ Blower Speed ใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) [14] ซึ่งมีค่าระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 โดยมีความหมายดังนี้:

- ค่า r ใกล้ -1.0 หมายถึงความสัมพันธ์เชิงตรงข้ามอย่างชัดเจน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed of blower และ DO Sensor

- ค่า r ใกล้ +1.0 หมายถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างตัวแปรทั้งสอง
- ค่า r ใกล้ 0 หมายถึงไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ค่า DO มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเร็วรอบของ Blower กล่าวคือ เมื่อ Blower ทำงานด้วยความเร็วสูง ค่า DO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม และในทางกลับกันเมื่อระบบควบคุมลดความเร็วรอบของ Blower ค่า DO ก็ปรับลดลงสู่ค่าที่ใกล้เคียง Set Point ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินระบบเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำที่อัตโนมัติ โดยใช้เครือข่ายเซนเซอร์หลายชนิดเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), อุณหภูมิ (Temperature), อัตราการไหล (Flow rate) และ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen: DO) ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ผลการดำเนินงานแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจวัด ติดตาม และประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์หลายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสั่งการอุปกรณ์บำบัดโดยอัตโนมัติเมื่อค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานที่กำหนด นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแสดงผลและการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ตลอด 24 ชั่วโมง ผ่านแอปพลิเคชันแดชบอร์ดที่ออกแบบให้ใช้งานได้สะดวกและเชื่อถือได้ การพัฒนาระบบดังกล่าวช่วยยกระดับการจัดการคุณภาพน้ำทั้งจากรูปแบบดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานคนและการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ไปสู่ ระบบจัดการอัตโนมัติเต็มรูปแบบ ซึ่งมีศักยภาพในการลดภาระงานบุคลากร ลดระยะเวลาในการตรวจสอบ และช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อม [15, 16]

สำหรับแนวทางการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคตที่เป็นไปได้ อาจรวมถึง 1) การทดสอบระบบต้นแบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย มีการประเมินระบบกับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดของบำบัด ปริมาณ หรือชนิดของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 2) การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการลดต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงจากการนำระบบต้นแบบมาปรับใช้ เพื่อศึกษาความคุ้มค่าของระบบ ข้อมูลที่ได้อาจเป็นประโยชน์ในการพิจารณาในการต่อยอดไปใช้ในเชิงพาณิชย์ [17] และ 3) การศึกษา

ความเป็นไปได้ในการบูรณาการระบบต้นแบบเข้ากับระบบ SCADA [18]
หรือระบบมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14001 [19]

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงอุตสาหกรรม, "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560," *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 134, ตอนพิเศษ 153 ง, หน้า 11-15, มิถุนายน 7, 2560. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.genco.co.th/Document/Inf_14.PDF
- [2] Ali, "New generation adsorbents for water treatment," Chemical Reviews, vol. 112, no. 10, pp. 5073–5091, 2012.
- [3] Thermo Fisher Scientific, "Measuring suspended solids in water/wastewater," n.d. [Online]. Available: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LPD/Product-Information/Measuring-Suspended-Solids-Water-Wastewater-AN-SSONLINE-EN.pdf>.
- [4] Sumipol, "Beginner's guide – พื้นฐาน PLC สำคัญอย่างไร สำหรับโรงงาน?," Sumipol, Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.sumipol.com/knowledge/beginner-guide-plc/>.
- [5] R. J. M. Rao, "Difference between compact PLC and modular PLC," Inst Tools, Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://instrumentationtools.com/difference-between-compact-plc-and-modular-plc/>.
- [6] Mitsubishi Electric, "1-Ethernet iQ-R (for THA)," Mitsubishi Electric Global Website, n.d. [Online]. Available: https://www.mitsubishielectric.com/fa/assist/e-learning/pdf/tha/1-Ethernet_iQ-R_fod_tha-A.pdf.
- [7] KMITL, "Distributed control system," n.d. [Online]. Available: http://instrumentation.kmitl.ac.th/narin/DCS_SCADA_1.pdf.
- [8] Tools.in.th, "เข้าใจ pH meter หลักการและชนิด," บริษัท นีโอนิคส์, Nov. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.tools.in.th/ph/ph-meter-principle/>.
- [9] Mahidol University, "Electrochemistry," n.d. [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammetry3.htm.
- [10] Water Quality Sensors, "Online turbidity sensor," Disen Sensor, Dec. 15, 2023. [Online]. Available: https://disen-sensor.com/product/turbidity-sensor/?gad_source=1&gbraid=0AAAAAosiGBWwdLP7m8BDaCZpmepon3Kmc.
- [11] Entech, "ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ magnetic flow meter," Entech, Mar. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.entech.co.th/ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ-magnetic-flow-meter/?lang=th#:~:text=หลักการวัด,โดยตรงกับความเร็วของของเหลว>.
- [12] Hach, "เซนเซอร์ Solitax SC," Hach, n.d. [Online]. Available: https://th.hach.com/-/solitax-sc/family?productCategoryId=55431077275&_bt=419865546875&_bk=&_bm=&_bn=g&utm_id=go_cmp-9425192770_adg-104058026628_ad-419865546875_dsa-878558735698_dev-m_ext-_prd-&utm_source=google.
- [13] Figma, Inc., "Figma (software) – Online collaborative vector graphics editor," Wikipedia, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Figma>.
- [14] Digital Government Development Agency (DGA), "Correlation coefficient," n.d. [Online]. Available: <https://digi.data.go.th/blog/what-is-correlation-coefficient/#:~:text=Correlation%20Coefficient%20ค่าสัมประสิทธิ์สห,ค่า%20r%20เข้าใกล้%20%2D1.0>.
- [15] SONIC AUTOMATION, "Home," SONIC AUTOMATION, n.d. [Online]. Available: <https://sonicautomation.co.th/>.
- [16] Siemens, "SIOS," Siemens Support Portal, n.d. [Online]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109816725/?lc=it-IT&dti=0>.
- [17] C. A. Quintero-Dávila, et al., "Economic and environmental assessment of advanced wastewater treatment technologies," Journal of Cleaner Production, vol. 236, p. 117585, 2019.
- [18] S. R. Khuntia, et al., "Supervisory control and data acquisition (SCADA) for wastewater treatment plants: A review," Water Practice and Technology, vol. 15, no. 4, pp. 970–981, 2020.
- [19] International Organization for Standardization (ISO), ISO 14001:2015 – Environmental management systems — Requirements with guidance for use, Geneva, Switzerland: ISO, 2015.