การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำด้วยเครื่องมือราคาประหยัด

Development of Low-Cost Community Technology for Water Quality Monitoring Using Affordable Instruments

เสกสรร ชะนะ[2] ญาณวุฒิ นิลทรัตน์[1] และ ลัญฉกร นิลทรัตน์[2*]

Sekesan Chana[2], Yanawut Nintarat[1], and Lanchakorn Nintarat[2*]

[1]โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ 73170

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและไอโอที คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 90000

[1]Mahidol Wittayanusorn School 73170

[2]Department of Information Technology and IoT, Faculty of Industrial Technology Songkhla Rajabhat University 90000

*Corresponding author: Tel.: 091-0489818. E-mail address: Lanchakorn.ni@skru.ac.th

Abstract

This research aims to develop and evaluate the performance of a low-cost water quality monitoring device for communities, using Arduino board with pH and dissolved oxygen (DO) sensors. Results show that the pH sensor has high accuracy, with an average error of 2.27% and a correlation coefficient of 0.9886 compared to standard instruments. The DO sensor provides reliable results within normal usage ranges, although it has limitations in measuring low concentrations. The automatic alert and control system operates efficiently. The device can operate continuously for up to 120 hours in power-saving mode. Real-environment testing confirms accuracy in various water sources, with average errors less than 2% for pH and 4% for DO measurements. Despite some limitations, this tool is overall highly efficient, cost-effective, and suitable for community use, promoting sustainable local water resource management.

Keywords: Water quality, Low-cost technology, pH measurement, Dissolved oxygen

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำสำหรับชุมชน โดยใช้บอร์ดอาดุยโน่ร่วมกับเซนเซอร์วัดค่า pH และออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์ pH มีความแม่นยำสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.27% และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9886 เมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน เซนเซอร์ DO ให้ผลลัพธ์น่าเชื่อถือในช่วงการใช้งานปกติ แม้จะมีข้อจำกัดในการวัดค่าระดับต่ำ ระบบแจ้งเตือนและควบคุมอัตโนมัติทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์สามารถทำงานต่อเนื่องได้นานถึง 120 ชั่วโมงในโหมดประหยัดพลังงาน

การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงยืนยันความแม่นยำในแหล่งน้ำที่หลากหลาย โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 2% สำหรับ pH และน้อยกว่า 4% สำหรับ DO แม้มีข้อจำกัดบางประการ แต่โดยรวมเครื่องมือนี้มีประสิทธิภาพสูง ราคาประหยัด และเหมาะสมสำหรับการใช้งานในชุมชน ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนในระดับท้องถิ่น

คำสำคัญ: คุณภาพน้ำ เทคโนโลยีต้นทุนต่ำ การตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง ออกซิเจนละลายในน้ำ

บทนำ

ในปัจจุบัน คุณภาพน้ำเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ระบบนิเวศ และการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน [1] การตรวจสอบและเฝ้าระวังคุณภาพน้ำอย่างสม่ำเสมอจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในชุมชนห่างไกลหรือพื้นที่ที่มีทรัพยากรจำกัด [2] อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพน้ำที่มีความแม่นยำสูงมักมีราคาแพงและต้องการผู้เชี่ยวชาญในการใช้งาน ทำให้การตรวจสอบคุณภาพน้ำอย่างทั่วถึงและต่อเนื่องเป็นไปได้ยาก [3] นอกจากนี้ การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นอีกประเด็นสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ [4] เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพน้ำที่ใช้พลังงานต่ำจะช่วยลดต้นทุนในการดำเนินงานและเอื้อต่อการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งพลังงาน [5] การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำด้วยเครื่องมือราคาประหยัดจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาดังกล่าว [6] โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี อาดุยโน่ ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มอิเล็กทรอนิกส์แบบเปิดที่มีราคาไม่แพง สามารถเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้ง่าย และมีการใช้พลังงานต่ำ [7] ร่วมกับการออกแบบระบบที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยให้สามารถพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพน้ำที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และประหยัดพลังงาน [8]

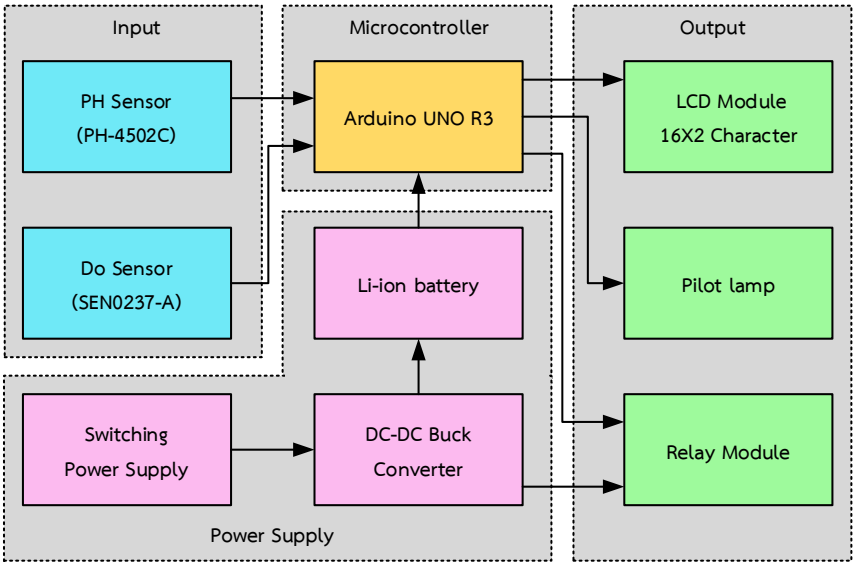
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยใช้ อาดุยโน่ ยูโน่ อาร์สาม ที่สามารถวัดค่า pH และปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการบ่งชี้คุณภาพน้ำ [9] โดยคำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งพลังงานได้ [10] ผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพ ราคาประหยัด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนในระดับชุมชนและท้องถิ่น

วิธีการวิจัย

การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำด้วยเครื่องมือราคาประหยัดนี้ได้ดำเนินการตามกระบวนการวิจัยและพัฒนาอย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นการสร้างนวัตกรรมที่มีประสิทธิภาพ ใช้งานง่าย และตอบสนองความต้องการของชุมชนอย่างแท้จริง วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1. การออกแบบฮาร์ดแวร์

ในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำสำหรับชุมชน การออกแบบฮาร์ดแวร์เป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และการประหยัดพลังงาน โดยมีองค์ประกอบหลักตามบล็อกไดอะแกรม ดังภาพที่ 1

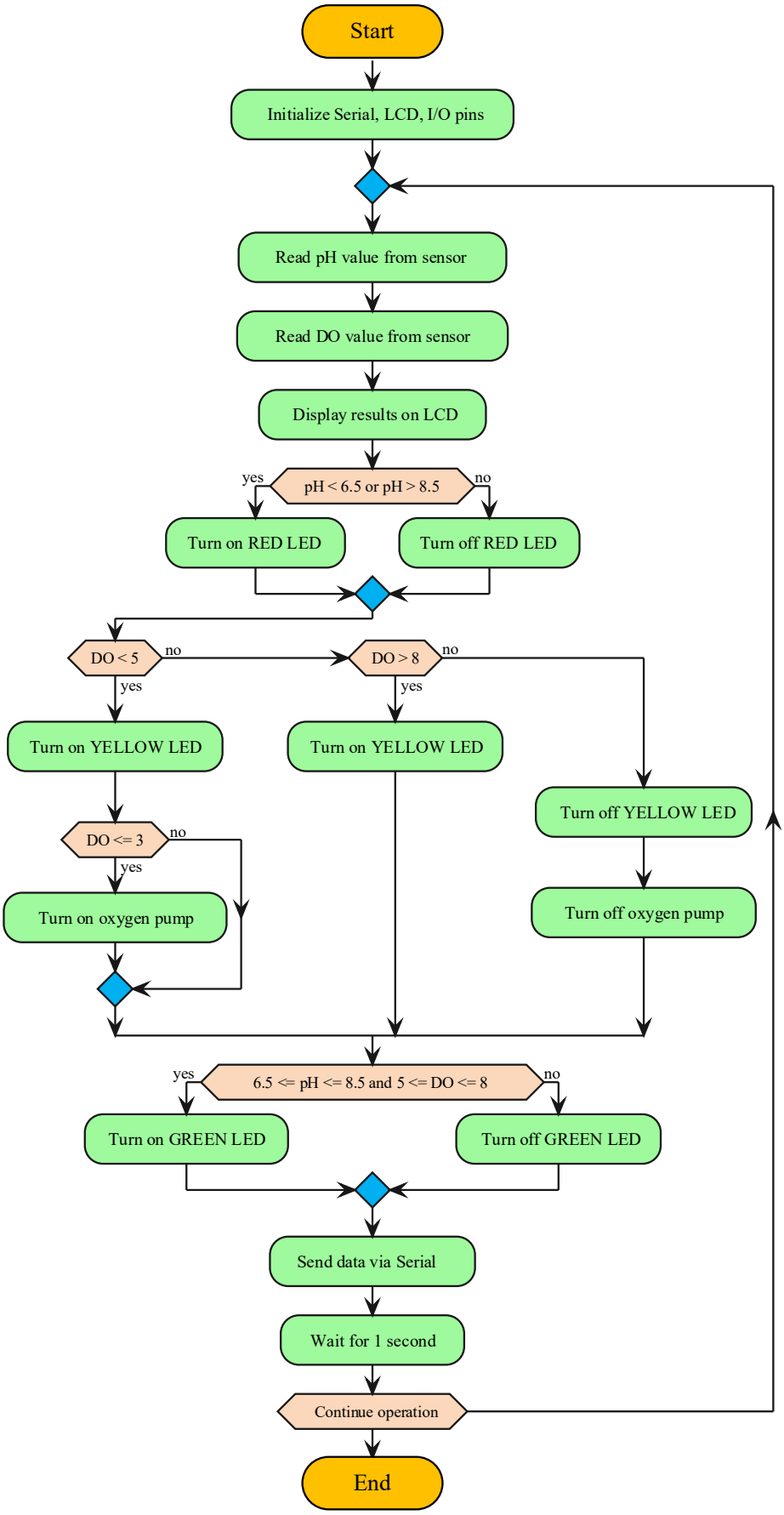


ภาพที่ 1 บล็อกไดอะแกรมระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำที่พัฒนาขึ้น

หัวใจสำคัญของระบบคือบอร์ดอาดุยโน่ ยูโน่ อาร์สาม ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ราคาไม่แพง และมีชุมชนนักพัฒนาขนาดใหญ่สนับสนุน ทำให้เหมาะสมกับการพัฒนาโครงการต้นแบบ บอร์ดนี้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ และควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด สำหรับการตรวจวัดค่า pH เราเลือกใช้เซนเซอร์รุ่น PH-4502C ซึ่งมีความแม่นยำสูงและราคาไม่แพง เซนเซอร์นี้สามารถวัดค่า pH ได้ในช่วง 0-14 ซึ่งครอบคลุมช่วงการใช้งานทั่วไป ในส่วนของการวัดปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) เราใช้เซนเซอร์รุ่น SEN0237-A ซึ่งมีความไวสูงและสามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เซนเซอร์ทั้งสองชนิดนี้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดอาดุยโน่ผ่านพอร์ตแอนะล็อก เพื่อให้สามารถอ่านค่าได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ การแสดงผลข้อมูลใช้จอแอลซีดีขนาด 16x2 ตัวอักษร ซึ่งมีขนาดกะทัดรัด ประหยัดพลังงาน และสามารถแสดงข้อมูลได้ชัดเจน จอแอลซีดี นี้เชื่อมต่อกับอาดุยโน่ผ่าน I^2C interface เพื่อประหยัดจำนวนขาที่ใช้และลดความซับซ้อนในการเดินสายไฟ ระบบแจ้งเตือนใช้ไฟ แอลอีดี สามสี ได้แก่ สีแดง เขียว และเหลือง เพื่อแสดงสถานะคุณภาพน้ำแบบง่ายและรวดเร็ว โดยสีเขียวหมายถึงคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ปกติ สีเหลืองหมายถึงต้องเฝ้าระวัง และสีแดงหมายถึงคุณภาพน้ำอยู่ในระดับที่เป็นอันตราย ไฟแอลอีดี เหล่านี้ถูกควบคุมโดยตรงจากขาดิจิตอลของ อาดุยโน่ นอกจากนี้ เรายังได้ติดตั้งระบบควบคุมเครื่องเติมออกซิเจนอัตโนมัติ โดยใช้รีเลย์ขนาด 5V เชื่อมต่อกับขาดิจิตอลของ อาดุยโน่ ระบบนี้จะทำงานเมื่อค่า DO ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ช่วยรักษาระดับออกซิเจนในน้ำให้เหมาะสมสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำ การออกแบบระบบพลังงานเป็นอีกส่วนสำคัญ เราใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 3.7V 2000mAh ร่วมกับวงจร DC-DC Buck Converter เพื่อแปลงแรงดันให้เหมาะสมกับการทำงานของอาดุยโน่และอุปกรณ์ต่าง ๆ การออกแบบนี้ช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟภายนอก เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล ทั้งหมดนี้ถูกประกอบเข้าด้วยกันในกล่องพลาสติกกันน้ำ เพื่อป้องกันความเสียหายจากความชื้นและแสงแดด ทำให้เครื่องมือมีความทนทานและเหมาะสมกับการใช้งานภาคสนาม การออกแบบฮาร์ดแวร์นี้คำนึงถึงการใช้งานจริงในชุมชน โดยเน้นความง่ายในการใช้งาน ความทนทาน และการบำรุงรักษาที่ไม่ซับซ้อน ขณะเดียวกันก็ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพและความแม่นยำในการตรวจวัดคุณภาพน้ำ การออกแบบนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่จะช่วยให้ชุมชนสามารถติดตามและจัดการคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยต้นทุนที่เหมาะสมและเทคโนโลยีที่เข้าถึงได้

2. การออกแบบซอฟต์แวร์

การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำนี้เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อน โดยมีเป้าหมายหลักในการสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และตอบสนองความต้องการของชุมชนได้อย่างแท้จริง การใช้ภาษา C++ บนแพลตฟอร์มอาดุยโน่ ไอดีอี ทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้รับการสนับสนุนจากชุมชนนักพัฒนาขนาดใหญ่ โครงสร้างของซอฟต์แวร์ได้รับการออกแบบอย่างเป็นระบบ แบ่งเป็นโมดูลต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่เฉพาะ ทำให้ง่ายต่อการพัฒนา ทดสอบ และปรับปรุงในอนาคต ความสำคัญได้ถูกให้กับการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณค่า pH และ DO ที่แม่นยำ รวมถึงการใช้เทคนิคการปรับเทียบและการชดเชยอุณหภูมิเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัด การประหยัดพลังงานเป็นอีกหนึ่งจุดเน้นสำคัญในการออกแบบ โดยใช้เทคนิคการจัดการพลังงานของ อาดุยโน่ เช่น การใช้โหมดสลีพ และการปรับความถี่ในการอ่านค่า นอกจากนี้ ระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติและระบบควบคุมเครื่องเติมออกซิเจนได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการคุณภาพน้ำ ความท้าทายในการสร้างระบบที่เสถียรและทนทานต่อสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงได้รับการจัดการผ่านการพัฒนาโค้ดที่สามารถจัดการกับข้อผิดพลาดและกลับมาทำงานได้อย่างถูกต้องหลังจากเกิดปัญหา ส่วนติดต่อผู้ใช้ได้รับการออกแบบให้เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถอ่านข้อมูลและดำเนินการต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก การทดสอบซอฟต์แวร์ได้ดำเนินการอย่างละเอียดและครอบคลุม ทั้งการทดสอบแยกโมดูลและการทดสอบระบบรวม เพื่อให้มั่นใจว่าซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสถานการณ์ สุดท้าย การออกแบบได้คำนึงถึงความยืดหยุ่นและความสามารถในการขยายระบบในอนาคต เตรียมพร้อมสำหรับการเพิ่มฟังก์ชันใหม่ ๆ หรือการเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ เช่น ไอโอที ซึ่งได้แสดงผังงานที่พัฒนาขึ้นดังภาพที่ 2



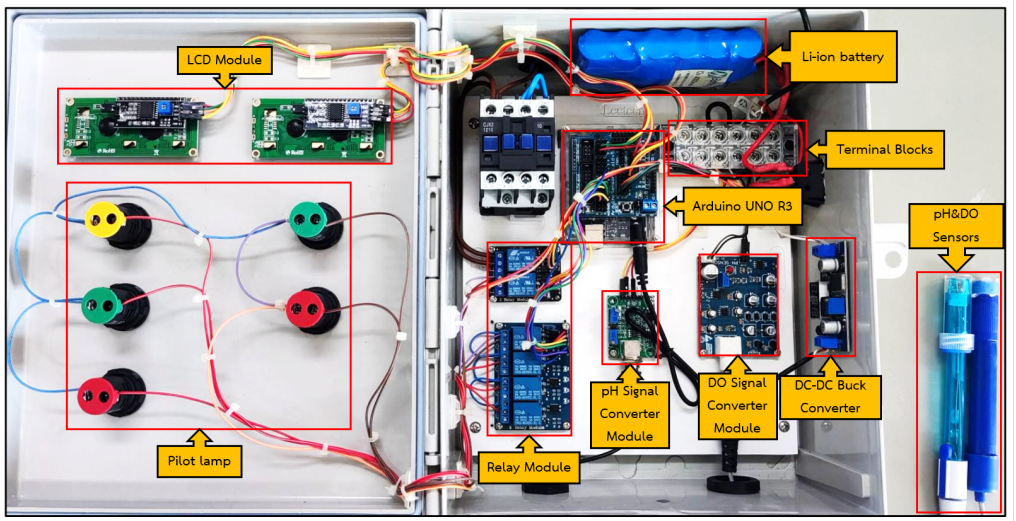
ภาพที่ 2 ผังงานของระบบที่พัฒนาขึ้น

3. การออกแบบระบบประหยัดพลังงาน

การออกแบบระบบประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งพลังงาน โดยมุ่งเน้นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่สุด หัวใจสำคัญของระบบประหยัดพลังงานคือการใช้โหมดสลีพของอาดุยโน่ เมื่อไม่มีการวัดค่า ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานลงอย่างมาก ในระหว่างที่อยู่ในโหมดสลีพนี้ ระบบจะปิดการทำงานของส่วนประกอบที่ไม่จำเป็น แต่ยังคงสามารถตื่นขึ้นมาทำการวัดค่าตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ การออกแบบวงจรจ่ายไฟที่มีประสิทธิภาพโดยใช้ DC-DC Buck Converter ช่วยให้สามารถแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานต่ำ เช่น แอลซีดี แบบ Low-power และแอลอีดีประสิทธิภาพสูง ก็เป็นอีกหนึ่งกลยุทธ์ในการประหยัดพลังงาน รวมถึงการออกแบบซอฟต์แวร์ให้มีการจัดการการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้อย่างชาญฉลาด เช่น การปิดไฟแอลอีดี หรือหน้าจอแอลซีดี เมื่อไม่จำเป็น การออกแบบระบบประหยัดพลังงานนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ยาวนานขึ้นด้วยพลังงานจากแบตเตอรี่ แต่ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาในระยะยาว ทำให้เครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำ จึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและยั่งยืนสำหรับชุมชนในการติดตามและจัดการคุณภาพน้ำ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำด้วยเครื่องมือราคาประหยัด ได้ดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นการสร้างนวัตกรรมที่ตอบสนองความต้องการของชุมชนในการติดตามและจัดการคุณภาพน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลที่จะนำเสนอต่อไปนี้ สะท้อนให้เห็นถึงความสำเร็จ ความท้าทาย และโอกาสในการพัฒนาการวิจัยอนาคต และในภาพที่ 3 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

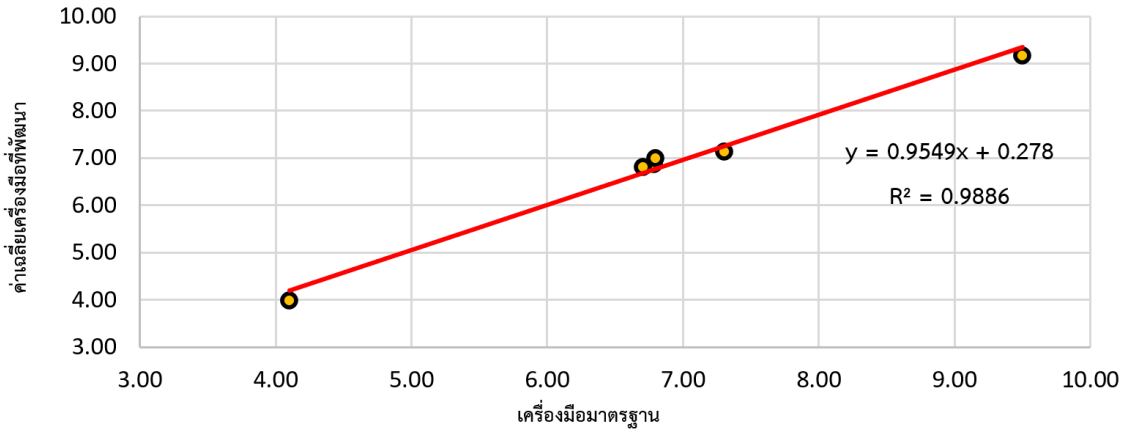
4. การทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์

การทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ pH และ DO เป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับชุมชน โดยมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ สำหรับเซนเซอร์ pH การทดสอบดำเนินการโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่ค่า pH 4.01, 6.86 และ 9.18 รวมถึงตัวอย่างน้ำจริงจากแหล่งต่าง ๆ เช่น

บ่อน้ำ คูน้ำ และสระน้ำ การวัดแต่ละครั้งเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ pH ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 2.27% และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9886 ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งระหว่างค่าที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 4

ตารางที่ 1 การทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ pH

สารละลายทดสอบ	ค่าเฉลี่ยเครื่องมือที่พัฒนา	ค่าเฉลี่ยเครื่องมือมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน (%)
สารละลาย 4.01	4.10	4.01	2.50
สารละลาย 6.86	6.78	6.86	1.17
สารละลาย 9.18	9.50	9.18	3.49
บ่อน้ำ	6.80	7.00	2.86
คูน้ำ	6.70	6.80	1.47
สระน้ำ	7.30	7.15	2.10



ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ความแม่นยำของเซนเซอร์ pH

ต่อไปเป็นการทดสอบเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen หรือ DO) เป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำ กระบวนการนี้ดำเนินการอย่างเป็นระบบเพื่อให้มั่นใจในความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีค่าออกซิเจนละลายที่ทราบแน่ชัด โดยเลือกใช้ค่ามาตรฐานสามระดับ ได้แก่ 2 mg/L, 6 mg/L และ 10 mg/L ซึ่งครอบคลุมช่วงการใช้งานทั่วไปในการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ระดับต่ำ (2 mg/L) จำลองสภาวะน้ำที่มีออกซิเจนต่ำซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ระดับกลาง (6 mg/L) แทนสภาวะปกติของแหล่งน้ำธรรมชาติ และระดับสูง (10 mg/L) สะท้อนถึงน้ำที่มีการเติมออกซิเจนสูง ในแต่ละระดับความเข้มข้น การทดสอบดำเนินการซ้ำ 10 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือทางสถิติ การทำซ้ำหลายครั้งนี้ช่วยลดผลกระทบจากความผันแปรที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละ การวัด และทำให้สามารถประเมินความเที่ยงตรง (Precision) ของเซนเซอร์ได้ดียิ่งขึ้น ในแต่ละการวัด เซนเซอร์ DO จะถูกจุ่มลงในสารละลายมาตรฐาน และบันทึกค่าที่อ่านได้ทั้งในรูปแบบของความเข้มข้นออกซิเจน (mg/L) และค่าแรงดันไฟฟ้า (mV) ที่เซนเซอร์ผลิตขึ้น การบันทึกทั้งสองค่านี้มีความสำคัญ เนื่องจากค่า mV เป็นสัญญาณดิบที่เซนเซอร์ผลิต ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าความเข้มข้นออกซิเจนผ่านการคำนวณทางอิเล็กทรอนิกส์ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ

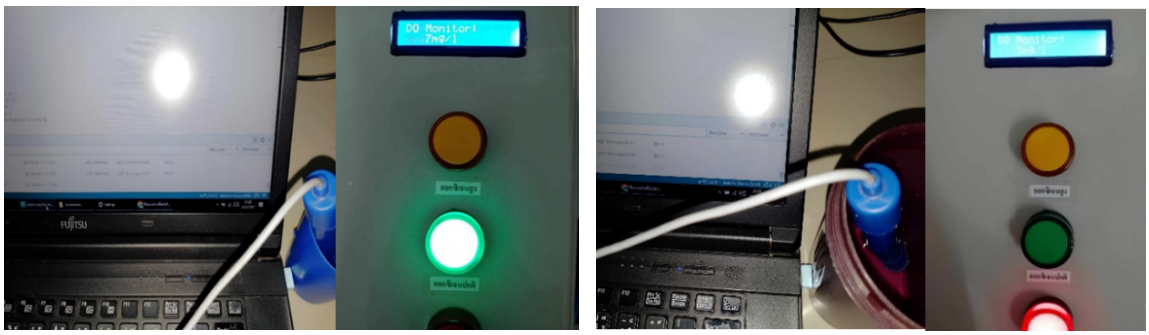
ครั้งที่	DO 2 mg/L		DO 6 mg/L		DO 10 mg/L	
	ค่าอ่าน	ค่าแรงดันไฟฟ้า	ค่าอ่าน	ค่าแรงดันไฟฟ้า	ค่าอ่าน	ค่าแรงดันไฟฟ้า
1	2.01	10.20	5.98	30.50	9.97	50.80
2	1.99	10.10	6.02	30.70	10.03	51.00
3	2.02	10.30	5.99	30.60	9.98	50.90
4	2.00	10.20	6.01	30.70	10.01	51.00
5	1.98	10.00	6.03	30.80	10.02	51.10
6	2.01	10.20	5.97	30.40	9.99	50.90
7	2.03	10.30	6.00	30.60	10.00	51.00
8	1.99	10.10	6.02	30.70	10.04	51.20
9	2.00	10.20	5.99	30.60	9.98	50.90
10	2.02	10.30	6.01	30.70	10.01	51.00
ค่าเฉลี่ย	**2.01**	**10.20**	**6.00**	**30.60**	**10.00**	**51.00**

5. การทดสอบระบบแจ้งเตือนและควบคุม

การทดสอบระบบแจ้งเตือนและควบคุมเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับชุมชน โดยมุ่งเน้นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของระบบอัตโนมัติที่ออกแบบมาเพื่อแจ้งเตือนและควบคุมคุณภาพน้ำ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานจริง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

การทดสอบระบบแจ้งเตือน

สำหรับระบบแจ้งเตือน การทดสอบดำเนินการโดยการปรับค่า pH และ DO ให้อยู่ในระดับต่าง ๆ ทั้งในช่วงปกติและช่วงวิกฤต เพื่อตรวจสอบการทำงานของไฟแอลอีดีแจ้งเตือน โดยกำหนดให้ ไฟสีเขียวแสดงสถานะปกติ (pH 6.5-8.5, DO 5-8 mg/L) ไฟสีเหลืองแสดงสถานะเฝ้าระวัง (pH 6.0-6.5 หรือ 8.5-9.0, DO 4-5 หรือ 8-9 mg/L) ไฟสีแดงแสดงสถานะวิกฤต (pH < 6.0 หรือ > 9.0, DO < 4 หรือ > 9 mg/L) การทดสอบนี้ทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าระบบแจ้งเตือนทำงานได้อย่างถูกต้องและสม่ำเสมอในทุกสถานการณ์ แสดงดังภาพที่ 5



(ก) แสดงสถานะปกติ (ข) แสดงสถานะวิกฤต

ภาพที่ 5 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือน

การทดสอบระบบควบคุม

ส่วนการทดสอบระบบควบคุม มุ่งเน้นที่การทำงานของเครื่องเติมออกซิเจนอัตโนมัติ โดยจำลองสถานการณ์ที่ระดับออกซิเจนในน้ำต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (< 4 mg/L) เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถเปิดเครื่องเติมออกซิเจนได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว นอกจากนี้ ยังทดสอบการปิดระบบเมื่อระดับออกซิเจนกลับสู่ค่าปกติ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบแจ้งเตือนสามารถแสดงสถานะได้อย่างถูกต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีความแม่นยำในการเปลี่ยนสีไฟแจ้งเตือนตามระดับคุณภาพน้ำ ส่วนระบบควบคุมเครื่องเติมออกซิเจนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเปิดและปิดระบบได้อย่างเหมาะสมตามระดับออกซิเจนในน้ำ

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำที่พัฒนาขึ้นเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในชุมชน โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือมีข้อจำกัดด้านแหล่งพลังงาน การทดสอบดำเนินการโดยวัดการใช้พลังงานของระบบในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ โหมดปกติ โหมดประหยัดพลังงาน และขณะทำการวัดและประมวลผล ผลการทดสอบพบว่าในโหมดปกติ เครื่องใช้พลังงานเฉลี่ย 120 mW ขณะที่ในโหมดประหยัดพลังงาน การใช้พลังงานลดลงเหลือเพียง 20 mW ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบจัดการพลังงานที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ ยังทำการทดสอบระยะเวลาการทำงานเมื่อใช้แบตเตอรี่ขนาด 2000mAh พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้ต่อเนื่องนานถึง 72 ชั่วโมงในโหมดปกติ และยาวนานถึง 120 ชั่วโมงเมื่อใช้โหมดประหยัดพลังงาน ซึ่งถือว่าเพียงพอสำหรับการใช้งานในภาคสนามหลายวันโดยไม่ต้องชาร์จแบตเตอรี่ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในแต่ละสภาวะการทำงาน

สภาวะการทำงาน	การใช้พลังงาน (mW)	ระยะเวลาทำงาน (ชั่วโมง)
โหมดปกติ	120	72
โหมดประหยัดพลังงาน	20	120
ขณะวัดและประมวลผล	150	60
สแตนด์บาย	10	240

การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง

การทดสอบเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำในสภาพแวดล้อมจริงเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ ซึ่งจะสรุปผลการทดสอบในรูปแบบตารางเปรียบเทียบดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง

แหล่งน้ำ	พารามิเตอร์	เครื่องที่พัฒนา	เครื่องมาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
แม่น้ำ	pH	7.2	7.3	1.37
	DO (mg/L)	6.8	7.0	2.86
สระน้ำ	pH	6.9	7.0	1.43
	DO (mg/L)	5.5	5.7	3.51
น้ำบาดาล	pH	6.7	6.8	1.47
	DO (mg/L)	3.2	3.3	3.03
น้ำทิ้งชุมชน	pH	8.1	8.2	1.22
	DO (mg/L)	2.8	2.9	3.45

โดยรวม ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงแสดงให้เห็นว่าเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้งานได้จริงในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และให้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนในการตรวจสอบคุณภาพน้ำ

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชุมชนสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำต้นทุนต่ำด้วยเครื่องมือราคาประหยัดเป็นก้าวสำคัญในการแก้ปัญหาการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือชุมชนที่มีทรัพยากรจำกัด [1] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยใช้เทคโนโลยีอาดุยโน่ [7] ร่วมกับเซนเซอร์วัดค่า pH และออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการบ่งชี้คุณภาพน้ำ [9] ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานจริงในชุมชน จากการทดสอบ พบว่าเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tuna et al. [5] ที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องมือวัดแบบพกพาและต้นทุนต่ำสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ระบบแจ้งเตือนและควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำได้อย่างทันท่วงที

ด้านการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล [4] ระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงประสิทธิภาพที่น่าพอใจ สามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานานในโหมดประหยัดพลังงาน ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานในภาคสนามหลายวันโดยไม่ต้องชาร์จแบตเตอรี่ การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงยืนยันความแม่นยำและความทนทานของอุปกรณ์ โดยแสดงผลการวัดที่น่าเชื่อถือในแหล่งน้ำที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไปในอนาคต เช่น การปรับปรุงความแม่นยำของเซนเซอร์ในสภาวะที่ท้าทาย และการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองของระบบควบคุมให้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การพัฒนาระบบการสอบเทียบอัตโนมัติเพื่อรักษาความแม่นยำในระยะยาวก็เป็นอีกประเด็นที่ควรพิจารณา จากการทบทวนวรรณกรรมล่าสุด [2, 6, 8, 10] พบว่าแนวโน้มการใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและ IoT (Internet of Things) ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำกำลังเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การบูรณาการเทคโนโลยีเหล่านี้เข้ากับระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเป็นทิศทางที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาในอนาคต การเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์จะช่วยให้สามารถติดตามคุณภาพน้ำแบบเรียลไทม์และจากระยะไกลได้ ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมาก [8] นอกจากนี้ การพัฒนาแอปพลิเคชันมือถือที่ใช้งานง่ายสำหรับชุมชนเพื่อแสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำ จะช่วยให้ประชาชนทั่วไปสามารถเข้าถึงและเข้าใจข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การมีส่วนร่วมในการดูแลรักษาแหล่งน้ำในชุมชนอย่างยั่งยืน สอดคล้องกับแนวทางของ WHO ในการส่งเสริมการเข้าถึงน้ำสะอาดและสุขอนามัยที่ดี [1] ในระยะยาว การศึกษาผลกระทบของการใช้เทคโนโลยีนี้ต่อการจัดการทรัพยากรน้ำในชุมชนจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงและพัฒนานโยบายด้านสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ นอกจากนี้ การพัฒนาโมเดลการทำนายคุณภาพน้ำโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์บนพื้นฐานของข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากระบบนี้ จะช่วยในการคาดการณ์และป้องกันปัญหาคุณภาพน้ำในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

โดยสรุป การวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีต้นทุนต่ำในการแก้ปัญหาการตรวจสอบคุณภาพน้ำในชุมชน ซึ่งเป็นก้าวสำคัญในการส่งเสริมการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน การพัฒนาต่อยอดและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในวงกว้าง โดยเฉพาะการบูรณาการกับเทคโนโลยี IoT และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายจะช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนและส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในระยะยาว ทั้งนี้ ความร่วมมือระหว่างนักวิจัย ชุมชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะเป็นกุญแจสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาเทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้าถึงได้และยั่งยืนสำหรับทุกคนในสังคม สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การอนามัยโลก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนองานวิจัย ซึ่งเป็นโอกาสอันมีค่าในการเผยแพร่ผลงานและแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization. (2021). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. https://www.who.int/publications/i/item/9789240023642

[2] Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., & Abdulai, J. D. (2017). Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions. ACM Transactions on Sensor Networks, 13(1), 1-41.

[3] Mukhopadhyay, S. C., & Mason, A. (2015). Smart sensors for real-time water quality monitoring. Springer International Publishing.

[4] International Energy Agency. (2022). Energy efficiency 2022. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022

[5] Tuna, G., Arkoc, O., & Gulez, K. (2013). Continuous monitoring of water quality using portable and low-cost measuring instruments. Environmental Monitoring and Assessment, 185(11), 9385-9395.

[6] Pule, M., Yahya, A., & Chuma, J. (2017). Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. Journal of Applied Research and Technology, 15(6), 562-570.

[7] Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). Getting started with Arduino: The open source electronics prototyping platform (4th ed.). Maker Media, Inc.

[8] Geetha, S., & Gouthami, S. (2017). Internet of things enabled real time water quality monitoring system. Smart Water, 2(1), 1-19.

[9] United States Environmental Protection Agency. (2023). National recommended water quality criteria. https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria

[10] Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., Ahmaro, I. Y. Y., Sulaiman, S., Ibrahim, A. B., Zaidan, B. B., Ismail, A. R., Alshalawi, T., Saad, N. H., Muhammad, M. R., & Zaidan, A. A. (2022). IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. Water, 14(22), 3621.