

Received: 5 พ.ค. 2568

Revised: 20 ต.ค. 2568

Accepted: 24 ต.ค. 2568

ผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์
เซนเซอร์ไร้สาย

The Impact of Free Space Path Loss on the Data Transmission Performance of
Wireless Sensor Devices

นิติพงษ์ แสงหล้า¹ และ วุฒิชัย ปวงมณี^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

Nitipong Saengla¹ and Wutthichai Puangmanee^{1*}

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Technology
North-Chiang Mai University

*Corresponding author: wutichai@northcm.ac.th

Abstract

The design of wireless sensor devices for data transmission via wireless networks often faces the challenge of Free Space Path Loss (FSPL), which is a major factor in the degradation of communication efficiency, especially in open outdoor areas without obstacles. This directly affects signal quality. This study aims to analyze the impact of Free Space Path Loss on data transmission efficiency using an ESP32 board connected to a temperature sensor via a wireless network. The Received Signal Strength Indicator (RSSI), packet loss, and throughput were evaluated at various distances. The experimental results when placing the device in a vertical orientation using an omni-directional antenna show that temperature and humidity vary over time. In the morning, when the temperature is between 23–25 °C and the humidity is between 80–90%, the successful transmission rate is high and packet loss is low. During the daytime, when the temperature rises to 31–35 °C and the humidity drops to 50–60%, using the onboard (internal) antenna led to an average signal strength reduction of approximately 25.0% between 30–60 meters, 17.5% between 60–90 meters, and 11.9% between 90–120 meters. In comparison, using the external antenna resulted in greater reductions of 29.2%, 16.6%, and 8.6%, respectively. Two-way ANOVA analysis revealed that antenna type and distance had a statistically

significant effect on signal strength (Sig. < 0.05), while their interaction was not significant (Sig. = 0.065). Shorter distances consistently yielded stronger signals for both antenna types. These results indicate that selecting the appropriate antenna and managing transmission distance are key factors for optimizing wireless signal performance, particularly in outdoor environments where high temperatures and low humidity increase wave energy loss in the air. This study aligns with the research objectives and provides guidance for designing more efficient and stable wireless sensor devices by evaluating the Received Signal Strength Indicator (RSSI) and calculating the Signal-to-Noise Ratio (SNR) in open outdoor environments.

Keywords: Free Space Path Loss; Wireless Sensor; Received Signal Strength Indicator

บทคัดย่อ

การออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายจะพบกับปัญหาการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ (Free Space Path Loss: FSPL) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนประสิทธิภาพของการรับและส่งข้อมูล โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมพื้นที่โล่งภายนอกอาคารไม่มีสิ่งกีดขวางซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูล โดยใช้บอร์ด ESP32 ต่อกับเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิ เชื่อมต่อผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยประเมินค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) การสูญเสียแพ็กเก็ตและอัตราการส่งผ่านข้อมูลที่สำเร็จในระยะทางที่แตกต่างกัน ผลการทดลองเมื่อวางอุปกรณ์ในแนวตั้งซึ่งใช้เสาอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ในช่วงเช้าซึ่งมีอุณหภูมิต่ำระหว่าง 23–25 องศาเซลเซียส และความชื้นสูงระหว่าง 80–90% อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จอยู่ในระดับสูงและการสูญเสียแพ็กเก็ตอยู่ในระดับต่ำ ขณะที่ในช่วงกลางวันอุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 31–35 องศาเซลเซียส และความชื้นลดลงระหว่าง 50–60% พบว่าความแรงของสัญญาณลดลงและการสูญเสียแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น การใช้เสาอากาศภายในบอร์ดมีการลดลงของความแรงสัญญาณเฉลี่ยระหว่างระยะทาง 30–60 เมตร ประมาณร้อยละ 25.0 ระยะทาง 60–90 เมตร ร้อยละ 17.5 และระยะทาง 90–120 เมตร ร้อยละ 11.9 ขณะที่การใช้เสาภายนอกลดลงมากกว่า คือ ร้อยละ 29.2, 16.6 และ 8.6 ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) พบว่า ชนิดเสาอากาศ และระยะทางมีผลต่อความแรงสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) แต่ไม่มีผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน (Sig. = 0.065) โดยระยะทางที่สั้นกว่าจะรับสัญญาณ

ที่แรงกว่าทั้งสองรูปแบบ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเลือกเสาอากาศที่เหมาะสมและระยะทางเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณไร้สาย โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมภายนอกที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำซึ่งส่งผลให้การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศมากขึ้น การศึกษานี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและเป็นแนวทางการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพผ่านการประเมินความแรงของสัญญาณและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อให้มีความเสถียรมากขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบพื้นที่โล่งภายนอกอาคาร

คำสำคัญ: การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ; เซนเซอร์ไร้สาย; ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายมากขึ้น เช่น การตรวจวัดสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง และคุณภาพอากาศ สำหรับจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะในภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และระบบสมาร์ทซิตี (Smart city) ซึ่งการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ไร้สายถือเป็นหัวใจสำคัญในการทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Gubbi, et al., 2013) หนึ่งในอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายคือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งรองรับการเชื่อมต่อแบบไร้สาย (Wireless) และเทคโนโลยีไร้สายส่วนบุคคล (Bluetooth) ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้สามารถเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ (Server) หรือระบบคลาวด์ (Cloud) ได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เสริม อย่างไรก็ตามความท้าทายสำคัญของการใช้งานอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ (Free Space Path Loss: FSPL) ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความแรงของสัญญาณที่อุปกรณ์ตัวรับที่จะได้รับ (Friis, 1946) การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศเมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับเพิ่มขึ้น หรือเมื่อความถี่ของสัญญาณสูงขึ้นพลังงานของคลื่นที่เดินทางผ่านอากาศจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแพ็คเกจ (Packet Loss) และความล่าช้าในการสื่อสารข้อมูล (Rappaport, 2010) โดยงานวิจัยของ Evgeny Khorov, et al. (2015) ได้แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดด้านระยะทางในการส่งข้อมูลของเครือข่ายไร้สายโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางหรือเกิดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่น เช่น ผนังคอนกรีตหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใกล้เคียง ทำให้การคำนวณทางด้านทฤษฎีไม่สามารถใช้อ้างอิงได้อย่างแม่นยำในสภาพแวดล้อมจริง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังสนับสนุนประเด็นเรื่องผลกระทบของสภาพแวดล้อม (Phruksahiran, N., 2024) และคุณสมบัติทางกายภาพต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณและการรับส่งข้อมูลไร้สาย งานวิจัยของ

Hossain, et al. (2018) พบว่าในสภาพอากาศที่มีความชื้นสูง ความแรงของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการดูดซับคลื่นของไอน้ำในอากาศในขณะที่ Shashikumar, et al. (2023) ได้นำอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้กับงานด้านเกษตรกรรมอัจฉริยะ ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ ซึ่งได้ออกแบบระบบตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำ โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจสอบคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงาน และเหมาะสมกับพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ขณะเดียวกันการศึกษาของ Amir Guidara, et al. (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อค่าความแรงของสัญญาณในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาด 9×9 เมตร ผลการทดลองพบว่าความแปรปรวนของอุณหภูมิและความชื้น แม้จะมีขนาดเล็ก ก็ส่งผลต่อค่าความแรงของสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายสำหรับใช้งานภายในอาคารจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมด้วย ยังมีการประยุกต์ใช้ค่าความแรงของสัญญาณในด้านการดูแลสุขภาพ (Suryadip Chakraborty, et al. 2013) สำหรับการตรวจจับการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยโรคพาร์กินสันภายในบ้าน โดยใช้เซนเซอร์ไร้สายติดตั้งในพื้นที่ต่าง ๆ ของบ้าน เพื่อติดตามพฤติกรรมเคลื่อนไหว โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์สวมใส่ นอกจากนี้ ชาญวิทย์ สุวรรณพงศ์ (2560) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโปรโตคอลอาร์พีแอลเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย พบว่าจำนวนโหนดและสภาพแวดล้อมมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าการสูญเสียแพ็กเก็ตและอัตราการส่งผ่านข้อมูล นอกจากนี้ยังมีงานของ เอกบุตต์ เทพนรัตน์ และคณะ (2556) ที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคสำหรับปรับกำลังส่งของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับระยะทางของเซนเซอร์ไร้สาย เพื่อปรับระดับกำลังส่งแบบอัตโนมัติ สำหรับลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร ชนิกานต์ รอดมรณ์ และคณะ (2563) เสนอการนำเซนเซอร์ไร้สายไปประยุกต์ใช้ในระบบฟาร์มอัจฉริยะ พบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งที่เหมาะสมร่วมกับการใช้โปรโตคอล MQTT ช่วยให้การส่งข้อมูลมีความเสถียร และสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องภายใต้สภาพแวดล้อมจริง ทั้งนี้ปัจจัยทางเทคนิค เช่น ความถี่ ช่องสัญญาณ และประสิทธิภาพของเสาอากาศ รวมถึงปัจจัยทางสภาพแวดล้อมและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ควรพิจารณาในการประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายตามความเหมาะสมในการใช้งาน

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาโดยตรงถึงผลของการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดกับภายนอก ต่อค่าความแรงของสัญญาณและประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ในระยะทางที่แตกต่างกันภายใต้สภาพแวดล้อมจริง โดยคณะผู้วิจัยได้ใช้บอร์ด ESP32 ในการทดลอง ร่วมกับการออกแบบชุดคำสั่งในการควบคุมการทำงานสำหรับการส่งข้อมูล พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยเสริมอื่น ๆ เช่น ผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้นต่อคุณภาพค่าความแรงของสัญญาณและอัตราการสูญเสียแพ็กเก็ต

เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายให้มีความเสถียรและแม่นยำยิ่งขึ้นในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเมื่อนำไปใช้งาน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย

3. วิธีดำเนินการ

การศึกษาและประเมินผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ ต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศมีความแตกต่างกันเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายภายในอาคาร (indoor) และพื้นที่โล่ง (outdoor) โดยการศึกษาครั้งนี้คณะผู้วิจัยศึกษาสำหรับกรณีการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศสำหรับพื้นที่โล่ง (outdoor path loss) เท่านั้น เพราะการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้ในปัจจุบันมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคเกษตรกรรม เพราะคลื่นสามารถแพร่กระจายได้อย่างอิสระมากกว่าภายในอาคาร แต่ยังคงมีปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แสดงภาพพื้นที่สำหรับการทดลองและทดสอบดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2



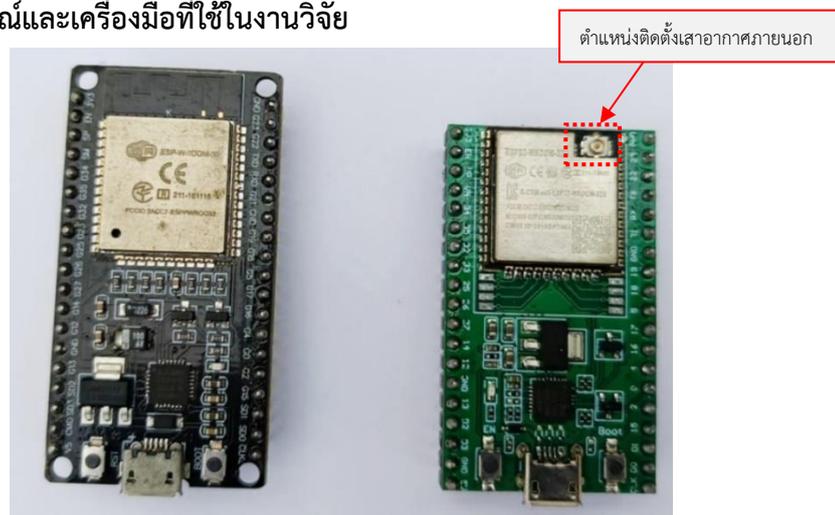
ภาพที่ 1 บริเวณพื้นที่ในการทดลองและทดสอบ



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายทางอากาศบริเวณพื้นที่ในการทดลองและทดสอบ

จากภาพที่ 1 และภาพที่ 2 บริเวณพื้นที่ในการทดลองและทดสอบการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศโดยการศึกษาครั้งนี้พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณ เช่น ระยะทาง อุปสรรคของสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้เกิดการลดทอนสัญญาณและปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียพลังงานที่มีความแตกต่างกัน สำหรับการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายสำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งเป็นบอร์ดที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ใช้ร่วมกับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ส่งข้อมูล ตัวอย่างบอร์ดที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

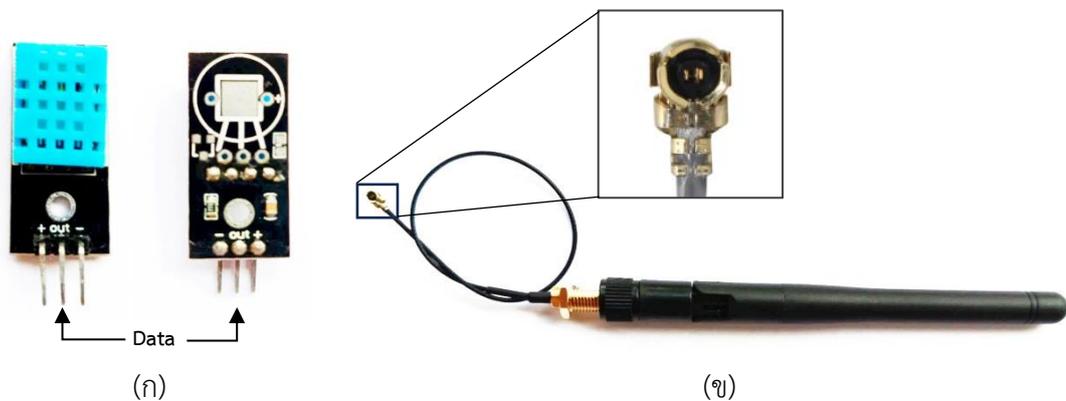


(ก) ESP-WROOM-32

(ข) ESP32-WROOM-32U

ภาพที่ 3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (ก) ประเภทมีเสาอากาศภายในบอร์ด (ข) ประเภทติดตั้งเสาอากาศภายนอก

ภาพที่ 3 (ก) บอร์ด ESP-WROOM-32 ภายในบอร์ดจะมีโมดูลแบบไร้สาย และเทคโนโลยีไร้สายส่วนบุคคลแบบ dual-core ที่ใช้ชิป ESP32 ของ Espressif โดยมีหน่วยความจำแฟลชขนาด 4 MB รองรับ Wi-Fi 802.11 b/g/n และเทคโนโลยีไร้สายส่วนบุคคล v4.2 (ทั้ง Classic และ BLE) โดยมีเสาอากาศในตัว ภาพที่ 3 (ข) บอร์ด ESP32-WROOM-32U เป็นบอร์ดที่มีโมดูลแบบไร้สาย และเทคโนโลยีไร้สายส่วนบุคคล ที่ใช้ชิป ESP32 เช่นเดียวกับรุ่น WROOM-32 แต่มีความแตกต่างหลักคือใช้คอนเนกเตอร์ U.FL Antenna สำหรับต่อเสาอากาศภายนอก ทำให้สามารถเลือกเสาอากาศให้เหมาะกับการใช้งานสำหรับการเพิ่มระยะในการรับและส่งข้อมูล



ภาพที่ 4 (ก) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT11 (ข) เสาอากาศภายนอกความถี่ 2.4 GHz กำลังขยาย 5dBi

ภาพที่ 4 (ก) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT11 แบบดิจิทัลสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง 0–50°C (ความแม่นยำ $\pm 2^{\circ}\text{C}$) และความชื้นในช่วง 20–90% RH (ความแม่นยำ $\pm 5\%$) โดยสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลผ่านขาเดียว (single-wire) ทำให้ประหยัดพอร์ตและง่ายต่อการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์และภาพที่ 4 (ข) เสาอากาศแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) ความถี่ 2.4GHz กำลังขยาย 5dBi ที่มีขั้วต่อแบบ IPX (หรือ IPEX/U.FL) เป็นเสาอากาศรอบทิศทางที่สามารถกระจายสัญญาณได้ ช่วยเพิ่มระยะสัญญาณและความเสถียรในการสื่อสาร โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางหรือสัญญาณรบกวน

3.2 การสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ (Free Space Path Loss: FSPL)

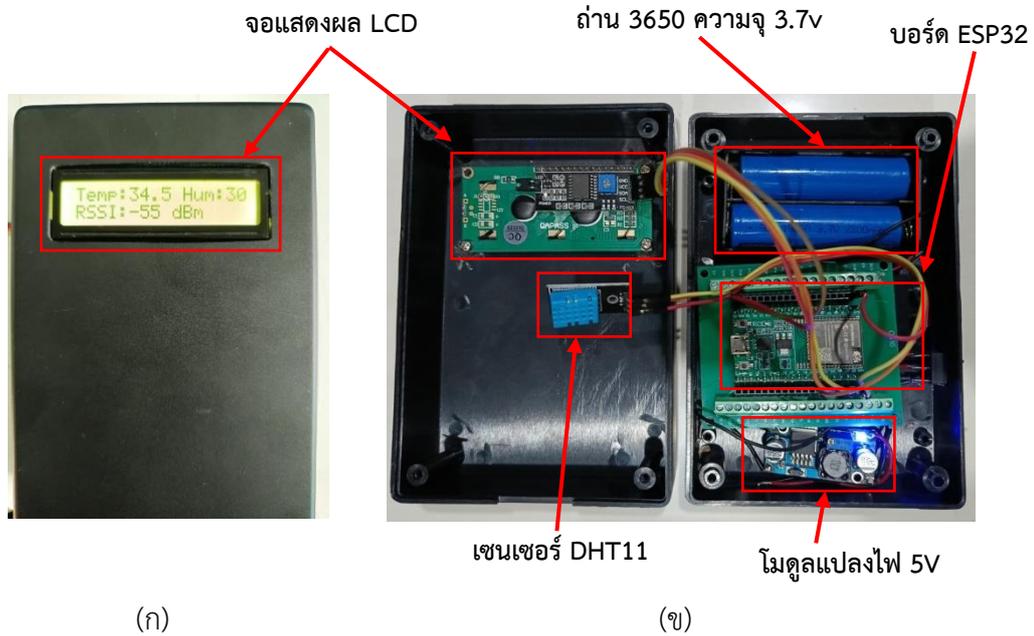
คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ ที่เกิดขึ้นระหว่างการแพร่กระจายในอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหรือคุณภาพของระบบที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะระบบที่ต้องใช้คลื่นในการสื่อสาร เช่น ระบบเซนเซอร์ไร้สาย โทรคมนาคม และเรดาร์ โดยปัจจัยที่อยู่ในการศึกษาผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศ ได้แก่

- 3.2.1 การลดทอนของสัญญาณ (Signal Attenuation) ที่มาจากระยะทางในการรับและส่งข้อมูล การดูดกลืนโดยอากาศ ความชื้น ฝุ่น หรืออนุภาคในอากาศ และการสูญเสียจากการกระเจิง หรือการหักเหของคลื่น
- 3.2.2 ด้านสภาพแวดล้อมทางกายภาพ ที่มีสาเหตุจาก อุณหภูมิ ความชื้น ความดันอากาศ สิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ อาคาร ผนัง หรือภูมิประเทศ เป็นต้น
- 3.2.3 ปรากฏการณ์ทางอากาศ เช่น ฝน หมอก หรือหมอกควัน
- 3.2.4 ความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน เช่น คลื่นความถี่สูงมักสูญเสียพลังงานมากกว่าในอากาศ และยิ่งความถี่สูง การลดทอนจะมากขึ้น
- 3.2.5 ลักษณะของแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวรับ เช่น กำลังส่งของอุปกรณ์ ชนิดและคุณภาพของเสาอากาศ
- 3.2.6 ความไวของตัวรับสัญญาณ เช่น การสะท้อนและสัญญาณรบกวน (Multipath & Interference) การสะท้อนจากพื้นหรือสิ่งกีดขวางและสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่น ๆ ในย่านความถี่เดียวกัน
- 3.2.7 ผลกระทบต่อระบบปลายทางที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการรับส่งข้อมูล อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และการสูญเสียแพ็กเก็ตหรือการหน่วงเวลา

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

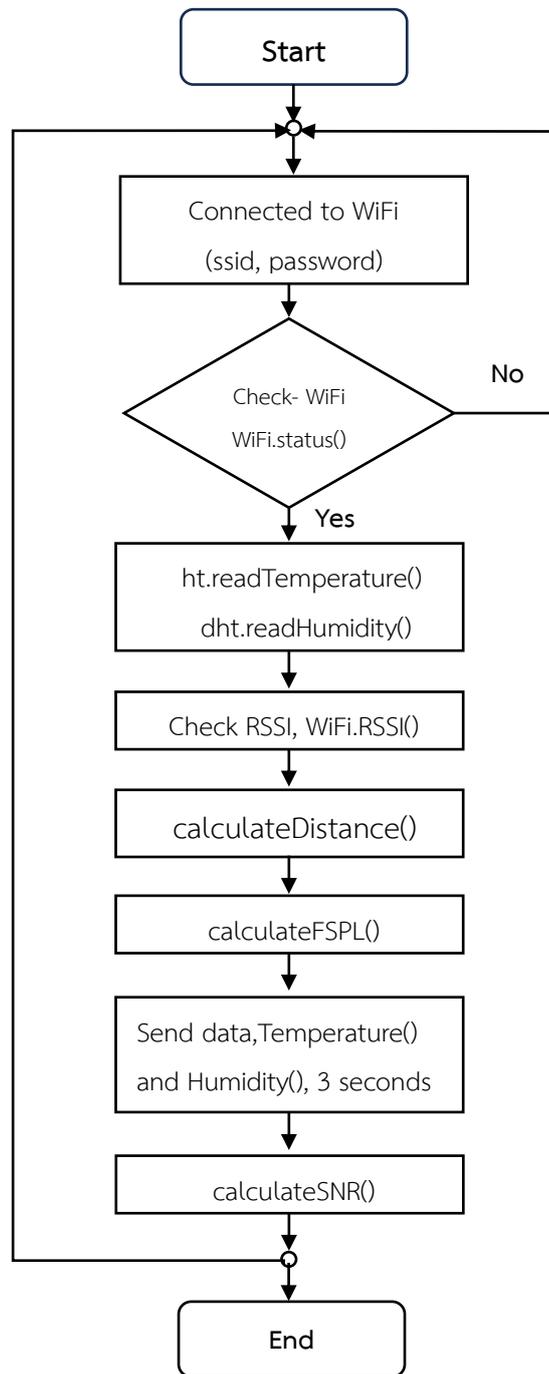
1. ทำการส่งข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นจากอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย ไปยังอุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์เน็ตบุ๊กสำหรับรับข้อมูลในรูปแบบเว็บเซิร์ฟเวอร์ (HTTP web server)
2. เขียนโปรแกรมโดยส่งข้อมูลทุก 3 วินาที พร้อมวัดค่าความแรงของสัญญาณทุกครั้งที่มีการส่งข้อมูล
3. ทดสอบในระยะที่กำหนด 30, 60, 90 และ 120 เมตร ระยะละ 4 จุด
4. สำหรับแต่ละระยะทางทำการส่งข้อมูล และบันทึกค่าประกอบด้วย ค่าความแรงของสัญญาณ จำนวนแพ็กเก็ตที่รับได้สำเร็จและเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล
5. ศึกษาค่าความแรงของสัญญาณ ระยะทางในการส่ง อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จและการสูญเสียแพ็กเก็ต

โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ได้ทำการออกแบบสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ มีการออกแบบร่วมกับอุปกรณ์และวงจรต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กล่องอุปกรณ์เซนเซอร์ (ก) ด้านหน้าและจอแสดงผล (ข) ภายนอกกล่องและตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 5 ประกอบด้วยเซนเซอร์ DHT11 สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น บอร์ด ESP32 แบบมีเสาอากาศภายในบอร์ดและสามารถต่อกับเสาอากาศภายนอก 2.4GHz แบบ Omni กำลังขยาย 5dBi สำหรับประมวลผลและส่งข้อมูลแบบไร้สายต่อกับจอ LCD สำหรับแสดงผลกรณีสำหรับตรวจสอบข้อมูลที่วัดได้ และใช้โมดูลแปลงไฟ 5V เพื่อจ่ายไฟให้บอร์ด โดยใช้ถ่าน 18650 จำนวน 2 ก้อนเป็นแหล่งพลังงานสำหรับรองรับการเพิ่มระยะและความเสถียรของสัญญาณ การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากเชื่อมต่อกับเครือข่ายไร้สายและตรวจสอบการเชื่อมต่อไปยังเครื่องรับสัญญาณและการวัดค่าจากเซนเซอร์ DHT11 สำหรับวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้น ก่อนนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อประมาณการระยะทาง และส่งข้อมูลไปยังเครื่องรับสัญญาณแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรกดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

สำหรับการประมาณการระยะทางของอุปกรณ์จากตัวส่งสัญญาณ โดยใช้ค่าความแรงของสัญญาณสามารถใช้สูตรคำนวณ ดังสมการที่ (1)

$$d = 10^{\frac{(A-RSSI)}{10 \times n}} \quad (1)$$

โดยที่

d คือ ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ส่งและรับ (เมตร)

$RSSI$ คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้ (หน่วย dBm)

A คือ ค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) ปกติอยู่ระหว่าง -35 ถึง -50 dBm

n คือ ค่าสัมประสิทธิ์สภาพแวดล้อม (Path Loss Exponent)

ค่าระยะ d ที่คำนวณได้นั้นเป็นเพียงค่าประมาณการเพราะสัญญาณซึ่งอาจเกิดการสะท้อนหักเห หรือถูกดูดกลืนจากสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น โดยค่า A มีการทดสอบโดยการวัดจากระยะที่ใช้สำหรับการทดลองและทดสอบจากสถานที่จริง จากนั้นนำค่าระยะ d มาแทนในสมการ $FSPL$

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \quad (2)$$

โดยที่

d คือ ระยะทางที่คำนวณได้

f คือ ความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน (2.4 GHz)



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการวัดแต่ละจุด ทั้ง 4 ระยะทาง

การคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) เป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับระดับกำลังส่งสัญญาณ (Transmission Power) ให้เหมาะสมกับระยะทาง ซึ่งต้องการทั้งคุณภาพของการสื่อสารและการประหยัดพลังงานสูงสุด ดังสมการที่ (3)

$$SNR(dB) = Pr - Pn \quad (3)$$

โดย Pr คือ กำลังของสัญญาณที่ได้รับ (Received Power) และ Pn คือ ค่ากำลังสัญญาณรบกวน (Noise Power)

การคำนวณอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (Data Success Rate) คือ ร้อยละของข้อมูลหรือแพ็กเก็ตที่ส่งจากอุปกรณ์ต้นทางไปยังปลายทางแล้วได้รับโดยไม่สูญหายหรือผิดพลาด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย หากมีค่าสูงแสดงว่ามีความเสถียรภาพในการส่งข้อมูล ในทางกลับกันหากมีค่าต่ำอาจเกิดจากระดับคุณภาพของสัญญาณหรือระยะทางในการส่งข้อมูลไกลเกินไป มีสัญญาณรบกวนที่เป็นอุปสรรคทำให้เกิดการสูญเสียแพ็กเก็ตระหว่างทาง ดังสมการที่ (4)

$$Data\ Success\ Rate(\%) = \left(\frac{\text{Number of successfully sent packets}}{\text{Total number of packets sent}} \right) \times 100 \quad (4)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าการสูญเสียแพ็กเก็ต (Packet Loss) คือ การที่ข้อมูลบางส่วนหรือทั้งหมดที่ส่งจากต้นทางไม่สามารถเดินทางไปถึงปลายทางได้สำเร็จหรือไม่สามารถรับข้อมูลได้ครบ ซึ่งอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความแรงของสัญญาณที่ลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น สัญญาณถูกรบกวนจากคลื่นอื่นในบริเวณเดียวกัน หรืออุปสรรคทางสภาพแวดล้อม เช่น ผนังหรือต้นไม้ รวมถึงข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ในระบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งการสูญเสียแพ็กเก็ตส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง เช่น ระบบเซนเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดสภาพแวดล้อมหรือควบคุมอุปกรณ์แบบเรียลไทม์ ดังสมการที่ (5)

$$Packet\ Loss\ Rate(\%) = 100 - Data\ Success\ Rate(\%) \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) ใช้ในการวัดอัตราส่วนของแพ็กเก็ตข้อมูลที่สูญหายระหว่างการส่งผ่านเครือข่ายไร้สายเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ต้องการส่ง โดยแสดงเป็นค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หรือแสดงเป็นร้อยละหากคูณด้วย 100

3.4 การประเมินและการทดสอบทางสถิติ

ในบทความนี้ผู้วิจัยเลือกการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) โดยการประเมินความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่ม เปรียบเทียบการใช้เสอากาศภายในกับเสอากาศภายนอก เพื่อพิจารณาโดยรวมสำหรับระยะทางที่แตกต่างกันและมีผลต่อประสิทธิภาพการรับและส่งข้อมูล ระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ดังสมการที่ (6)

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \delta_{ij} \quad (6)$$

เมื่อ Y_{ij} คือ ค่าที่สังเกตของตัวอย่าง i ในกลุ่ม j และ μ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของทุกกลุ่มตัวอย่าง ซึ่ง τ_i คือ ผลลัพธ์ที่ได้ของกลุ่ม i โดยที่ δ_{ij} เท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Y_{ij} เมื่อทำการวิเคราะห์พร้อมกันกับระยะทาง และการใช้เสอากาศมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างไร ซึ่งมีสองตัวแปรที่เป็นปัจจัยต้น (Factor) จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) สำหรับคำนวณผลหลัก และผลการทำงานร่วมกัน (Interaction) ดังสมการที่ (7)

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \delta_{ijk} \quad (7)$$

เมื่อ α_i คือ ผลลัพธ์ที่ได้ของปัจจัย A (ชนิดเสอากาศ) และ β_j คือ ผลลัพธ์ที่ได้ของปัจจัย B (ระยะทาง) โดยที่ $(\alpha\beta)_{ij}$ คือ ค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น (Interaction effect) ระหว่างปัจจัย A และ B โดย δ_{ijk} คือ ค่าความคลาดเคลื่อน เริ่มจากการคำนวณค่าเฉลี่ยรวม \bar{Y} จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัย \bar{Y}_i และ \bar{Y}_j โดยการคำนวณหาค่าผลรวมกำลังสองความเบี่ยงเบน (Sum of Squares: SS) ของแต่ละปัจจัย ดังสมการที่ (8) ตัวอย่างสำหรับปัจจัย A

$$SS_A = NB \sum_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 \quad (8)$$

$$SS_E = \sum_i \sum_j \sum_k (Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij})^2 \quad (9)$$

สมการที่ (9) การคำนวณสำหรับแสดงผลแต่ละระดับของปัจจัย A และ B ที่ส่งผลต่อค่า Y โดย NB คือ จำนวนระดับของปัจจัย B และค่าความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Error Sum of Squares) หรือความแตกต่างของค่าจริงกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มคำนวณได้

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาที่มุ่งเน้นการทดลองผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูล โดยใช้บอร์ด ESP32 ที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และทำการบันทึกค่าระหว่างการใส่เสาอากาศภายในบอร์ดและการใส่เสาอากาศภายนอก โดยการเก็บข้อมูลในระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 30, 60, 90 และ 120 เมตร ซึ่งแต่ละระยะทางจะทำการทดลองทั้งหมด 4 จุด ในช่วงเช้า กลางวัน และเย็น โดยเก็บข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณ อัตราการสูญเสียแพ็กเก็ต และอัตราการส่งผ่านข้อมูลสำเร็จ สำหรับประเมินการส่งข้อมูลภายใต้สภาพแวดล้อมจริง และใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการออกอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายให้มีประสิทธิภาพต่อไป

ตารางที่ 1 ใช้เสาอากาศภายในบอร์ด

ระยะ (เมตร)	จุดวัด	เวลา	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าการสูญเสียแพ็กเก็ต (%)	อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (%)
30	A	เช้า	24	85	-45	0	100
	B	กลางวัน	31	60	-48	2	98
	C	เย็น	26	70	-46	0	100
	D	เช้า	25	82	-44	0	100
60	A	เช้า	23	88	-58	4	96
	B	กลางวัน	32	57	-60	7	93
	C	เย็น	27	72	-56	3	97
	D	เช้า	26	74	-55	2	98
90	A	เช้า	24	80	-67	10	90
	B	กลางวัน	34	55	-71	18	82
	C	เย็น	28	65	-66	12	88
	D	เช้า	27	69	-65	10	90
120	A	เช้า	23	90	-75	28	72
	B	กลางวัน	35	50	-79	36	64
	C	เย็น	29	60	-74	30	70
	D	เช้า	28	65	-73	27	73

จากข้อมูลตารางที่ 1 โดยการทดลองใช้เสาอากาศภายในบอร์ดทดสอบในช่วงเช้าเวลา 8.00 – 8.15 น. ช่วงกลางวันเวลา 12.00-12.15 น. และช่วงเย็น 18.00-18.15 น. กำหนดจุดวัด A, B, C และ D ในระยะ 30, 60, 90 และ 120 เมตร วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสำหรับวัดค่าความแรงของสัญญาณ โดยสุ่มค่าที่วัดได้แต่ละช่วงมา 3 จำนวนและหาค่าเฉลี่ยไม่คิดทศนิยม พบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าความแรงของสัญญาณมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในระยะ 90-120 เมตร ค่าความแรงของสัญญาณต่ำกว่า -65 dBm และมีการสูญเสียแพ็กเก็ตสูงขึ้น ทำให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลที่สามารถลดลงจากร้อยละ 100 เหลือประมาณร้อยละ 64-73 ในบางจุดวัด สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำในช่วงกลางวันยังส่งผลให้ค่าความแรงของสัญญาณลดลงและเกิดการสูญเสียข้อมูลเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เสาอากาศภายในบอร์ด มีข้อจำกัดในการส่งข้อมูลระยะไกล โดยเฉพาะในสภาพอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงและมีสิ่งกีดขวาง เช่น รถยนต์ ต้นไม้ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่โล่งที่มีระยะทางไกลเกินกว่า 90 เมตร

ตารางที่ 2 ค่าทางสถิติของแต่ละระยะใช้เสาอากาศภายในบอร์ด

ระยะ (เมตร)	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ความแปรปรวน (Variance)
30	อุณหภูมิ (°C)	26.5	8.25
	ความชื้น (%)	74.25	102.25
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-45.75	2.19
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	0.5	1.00
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	99.5	1.00
60	อุณหภูมิ (°C)	27.0	12.50
	ความชื้น (%)	72.75	144.19
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-57.25	3.69
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	4.0	4.25
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	96.0	4.25
90	อุณหภูมิ (°C)	28.25	15.69
	ความชื้น (%)	67.25	92.25
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-67.25	3.69
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	12.5	11.25
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	87.5	11.25

ตารางที่ 2 ค่าทางสถิติของแต่ละระยะใช้เสาอากาศภายในบอร์ด (ต่อ)

ระยะ (เมตร)	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ความแปรปรวน (Variance)
120	อุณหภูมิ (°C)	28.75	22.19
	ความชื้น (%)	66.25	235.19
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-75.25	4.69
	สูญเสียแพ็กเกต (%)	30.25	15.69
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	69.75	15.69

จากข้อมูลตารางที่ 2 หาค่าเฉลี่ย (Mean) และความแปรปรวน (Variance) ของตัวแปรหลักในแต่ละระยะ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นเล็กน้อยและมีความแปรปรวนมากขึ้น ขณะที่ค่าความชื้นลดลงจากประมาณ 74% เหลือ 66% และมีความแปรปรวนสูงโดยเฉพาะที่ระยะ 120 เมตร ค่าความแรงสัญญาณลดลงต่อเนื่องจาก -45.75 dBm เป็น -75.25 dBm แม้มีความแปรปรวนต่ำโดยการสูญเสียแพ็กเกตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5% เป็นร้อยละ 30.25% และอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จลดลงจากร้อยละ 99.5% เหลือร้อยละ 69.75% โดยแนวโน้มทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าระยะทางที่ไกลขึ้นส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณ โดยมีปัจจัยสภาพแวดล้อมอย่างค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นที่มีความผันผวนมากขึ้นเป็นตัวเสริมให้คุณภาพสัญญาณลดลง



ภาพที่ 8 จุด B ระยะ 120 เมตร

จากภาพที่ 8 แสดงตำแหน่งจุด B ที่ระยะ 120 เมตรโดยประมาณ ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณมีค่า -79 dBm และมีค่าการสูญเสียแพ็กเกตมากที่สุด ซึ่งทำให้อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จน้อยที่สุดที่ร้อยละ 64 ดังข้อมูลตารางที่ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสภาพแวดล้อมปะจจัยอื่น ๆ พบว่ามีโรงจอดรถและมีรถยนต์จอดอยู่หลายคันซึ่งทำให้เกิดการกีดขวางทิศทางในการส่งข้อมูลในเวลานั้น

ตารางที่ 3 ใช้เสาอากาศภายนอก

ระยะ (เมตร)	จุดวัด	เวลา	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ค่าความแรงของสัญญาณ (dBm)	ค่าการสูญเสียแพ็กเกต (%)	อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (%)
30	A	เช้า	24	85	-38	0	100
	B	กลางวัน	32	58	-40	0	100
	C	เย็น	26	72	-39	0	100
	D	เช้า	25	80	-37	0	100
60	A	เช้า	23	88	-50	1	99
	B	กลางวัน	33	55	-52	2	98
	C	เย็น	27	70	-49	1	99
	D	เช้า	27	68	-48	0	100
90	A	เช้า	24	82	-58	3	97
	B	กลางวัน	34	52	-61	6	94
	C	เย็น	28	67	-57	3	97
	D	เช้า	28	70	-56	2	98
120	A	เช้า	23	90	-63	7	93
	B	กลางวัน	35	50	-66	10	90
	C	เย็น	29	60	-62	8	92
	D	เช้า	28	64	-61	6	94

จากข้อมูลตารางที่ 3 กำหนดจุดวัด A, B, C และ D ในระยะ 30, 60, 90 และ 120 เมตร วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสำหรับวัดค่าค่าความแรงของสัญญาณ ทำการทดลองเช่นเดียวกับตารางที่ 1 ในแต่ละช่วงเวลา แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่ดีกว่าข้อมูลตารางที่ 1 อย่างชัดเจน

ถ้าพิจารณาจากระยะทาง 120 เมตร ค่าความแรงของสัญญาณยังอยู่ในระดับที่ใช้งานได้ โดยมีค่าระหว่าง -61 ถึง -63 dBm และอัตราการสูญเสียแพ็กเก็ตอยู่ที่ร้อยละ 6-10 จึงส่งผลให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลที่สามารถยังคงสูงกว่าร้อยละ 90 ทั้ง 4 จุดวัด นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ ของวันมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณน้อยกว่าการใช้เสาอากาศภายในบอร์ด ข้อมูลตาราง ที่ 2 โดยหาค่าเฉลี่ย (Mean) และความแปรปรวน (Variance) ของตัวแปรหลักในแต่ละระยะ และสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าทางสถิติของแต่ละระยะใช้เสาอากาศภายนอก

ระยะ (เมตร)	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ความแปรปรวน (Variance)
30	อุณหภูมิ (°C)	26.75	9.69
	ความชื้น (%)	73.75	106.25
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-38.5	1.25
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	0	0.00
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	100	0.00
60	อุณหภูมิ (°C)	27.5	12.25
	ความชื้น (%)	70.25	137.69
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-49.75	2.19
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	1	0.50
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	99	0.50
90	อุณหภูมิ (°C)	28.5	15.00
	ความชื้น (%)	67.75	132.25
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-58	3.50
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	3.5	2.25
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	96.5	2.25
120	อุณหภูมิ (°C)	28.75	22.19
	ความชื้น (%)	66	272.00
	ความแรงสัญญาณ (dBm)	-63	3.50
	สูญเสียแพ็กเก็ต (%)	7.75	2.19
	ส่งข้อมูลสำเร็จ (%)	92.25	2.19

จากข้อมูลตารางที่ 4 พบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิเพิ่มจาก 26.75°C เป็น 28.75°C และค่าความแปรปรวนที่สูงขึ้น ขณะที่ค่าความชื้นลดจาก 73.75% เหลือ 66% และมีค่าความแปรปรวนสูงโดยเฉพาะที่ระยะ 120 เมตร ค่าความแรงสัญญาณลดลงจาก -38.5 dBm เป็น -63 dBm แต่ยังคงมีความเสถียรสูง โดยค่าการสูญเสียแพ็กเก็ตเพิ่มจากร้อยละ 0% เป็นร้อยละ 7.75% มีค่าความแปรปรวนต่ำเมื่อเทียบกับเสาอากาศภายใน อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จลดจากร้อยละ 100% เหลือร้อยละ 92.25% ซึ่งลดลงน้อยกว่าการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดอย่างมาก โดยที่ระยะ 120 เมตร การใช้เสาอากาศภายนอกมีการสูญเสียเพียงร้อยละ 7.75% และยังสามารถส่งข้อมูลได้ร้อยละ 92.25% ในขณะที่การใช้เสาอากาศภายในบอร์ดสูญเสียถึงร้อยละ 30.25% และส่งข้อมูลได้สำเร็จร้อยละ 69.75% ทั้งนี้ ค่าความแรงสัญญาณของการใช้เสาอากาศภายนอกดีกว่าการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดประมาณ +12 dB ที่ระยะทางไกล ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสำเร็จ

จากข้อมูลตารางที่ 2 และ 4 ในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยใช้วิธี Two-way ANOVA ตรวจสอบทั้งผลหลักของแต่ละตัวแปรและผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันที่มีต่อค่าความแรงของสัญญาณ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างหลายกลุ่มพร้อมกัน ลดความซ้ำซ้อนจากการทดสอบหลายครั้ง และทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ครอบคลุม โดยมีตัวแปรต้นที่ 1 คือ ชนิดเสาอากาศ (เสาอากาศภายในบอร์ด และเสาอากาศภายนอก) ตัวแปรต้นที่ 2 คือ ระยะทาง (30, 60, 90 และ 120 เมตร) และตัวแปรตาม ได้แก่ ความแรงสัญญาณ โดยกำหนด Sig = 0.05 ดังนี้

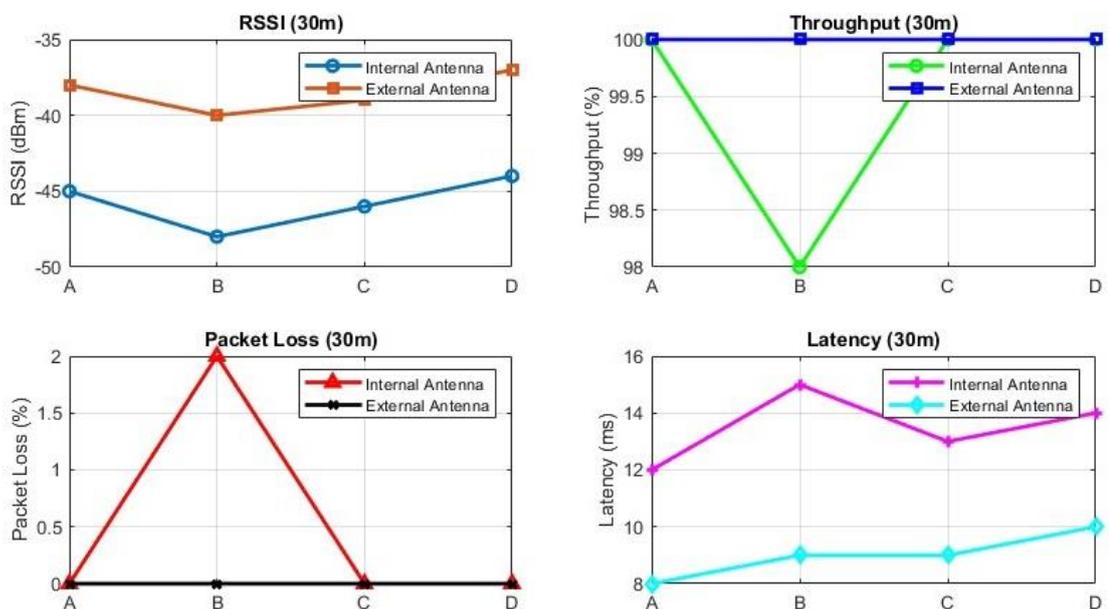
1. H0 คือ ชนิดเสาอากาศไม่มีผลต่อความแรงสัญญาณ
2. H1 คือ ระยะทางไม่มีผลต่อความแรงสัญญาณ
3. H2 คือ ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเสาอากาศกับระยะทาง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี Two-Way ANOVA

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	Sig
ชนิดเสาอากาศ	960.00	1	960.00	48.00	0.001*
ระยะทาง	1,680.00	2	840.00	42.00	0.001*
ชนิดเสาอากาศกับระยะทาง	120.00	2	60.00	3.00	0.065
Error	240.00	12	20.00		
Corrected Total	3,000.00	17			

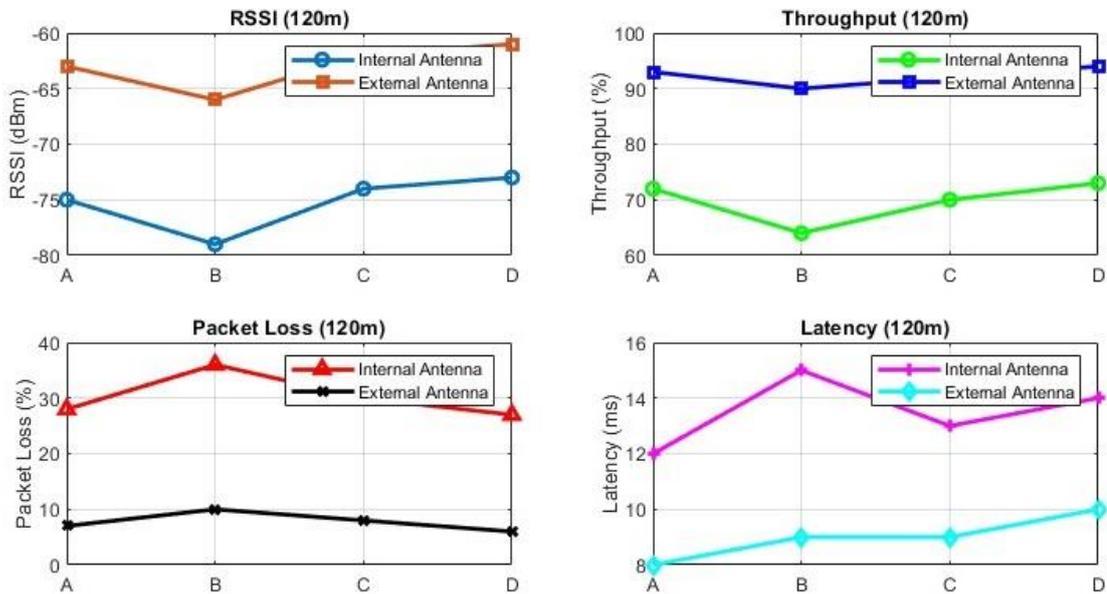
หมายเหตุ: *p < 0.05

จากข้อมูลตารางที่ 5 การทดสอบสมมติฐาน พบว่าชนิดเสาอากาศ และระยะทางที่แตกต่างกันมีผลต่อความแรงสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Sig < 0.05 โดยเสาภายนอกให้สัญญาณแรงกว่าเสาอากาศภายในบอร์ด และความแรงสัญญาณลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเสาอากาศกับระยะทางไม่มีนัยสำคัญ Sig = 0.065 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของความแรงสัญญาณตามระยะใกล้เคียงกันทั้งของเสาทั้งสองแบบ โดยทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความแรงสัญญาณโดยตรง และสามารถนำผลนี้ไปใช้ในการออกแบบเครือข่ายไร้สายเพื่อเลือกชนิดเสาและระยะทางให้เหมาะสมกับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



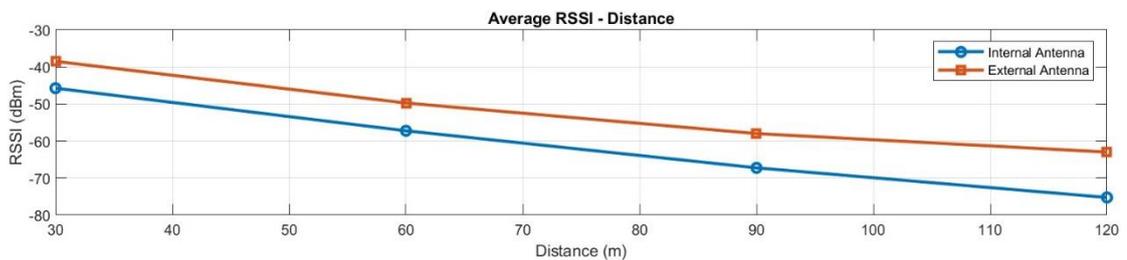
ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดและการใช้เสาอากาศภายนอก ที่ระยะ 30 เมตร

จากภาพที่ 9 ข้อมูลการทดลองที่ระยะทาง 30 เมตร ณ ตำแหน่ง A, B, C และ D แสดงให้เห็นว่าค่าความแรงของสัญญาณจากเสาอากาศภายนอก อยู่ในช่วง -37 ถึง -40 dBm ซึ่งดีกว่าเสาอากาศภายในบอร์ดที่มีค่าความแรงของสัญญาณระหว่าง -44 ถึง -48 dBm นอกจากนี้อัตราการส่งข้อมูลที่สำเร็จสำหรับการใช้เสาอากาศภายนอกอยู่ที่ร้อยละ 100 ทุกจุดทดสอบ ในขณะที่ใช้เสาอากาศภายในบอร์ดมีการลดลงเล็กน้อยในบางจุด เช่น จุด B ที่ได้เพียงร้อยละ 98 ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแพ็กเก็ตเล็กน้อย

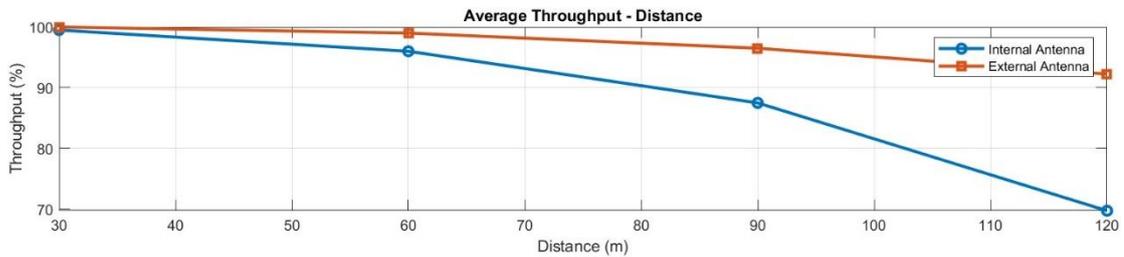


ภาพที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดและการใช้เสาอากาศภายนอก ที่ระยะ 120 เมตร

จากข้อมูลกราฟภาพที่ 10 การทดลองที่ระยะ 120 เมตร ณ จุดทดสอบ A, B, C และ D การใช้เสาอากาศภายนอกกำลังขยาย 5 dBi ให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าเสาอากาศภายในบอร์ด ค่าความแรงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ -61 ถึง -66 dBm ซึ่งดีกว่าเสาอากาศภายในบอร์ดที่มีค่าอยู่ระหว่าง -73 ถึง -79 dBm สะท้อนถึงการรับสัญญาณที่ดีกว่าและเสถียรกว่า อีกทั้งอัตราการส่งผ่านข้อมูลการใช้เสาอากาศทำได้สูงถึงร้อยละ 90-94 ขณะที่เสาอากาศภายในบอร์ดมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 64-73



(ก) เปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณ ระยะ 30, 60, 90 และ 120 เมตร



(ข) เปรียบเทียบค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ ระยะ 30, 60, 90 และ 120 เมตร

ภาพที่ 11 เปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณและค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ ระยะ 30, 60, 90 และ 120 เมตร

ภาพที่ 11 ข้อมูลการทดลองที่ระยะทาง 30, 60, 90 และ 120 เมตร พบว่าการใช้เสาอากาศภายนอกให้ผลการรับส่งข้อมูลที่ดีกว่าทุกระยะ โดยมีค่าความแรงของสัญญาณสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 6-12 dBm ซึ่งแสดงถึงคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้ค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จของการใช้เสาอากาศภายนอกยังคงอยู่ในระดับสูงแม้ในระยะไกลถึง 120 เมตร ขณะที่การใช้เสาอากาศภายในบอร์ดลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่ระยะทาง 120 เมตร เหลือเฉลี่ยประมาณร้อยละ 69.75

5. สรุปผล และอภิปรายผล

จากผลการทดลองผลกระทบของการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย โดยใช้บอร์ด ESP32 ต่อกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ทั้งแบบใช้เสาอากาศภายในบอร์ดและเสาอากาศภายนอกในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งภายนอกอาคาร พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยขณะที่ความชื้นลดลงและมีความผันผวนสูง โดยเฉพาะที่ระยะ 120 เมตร ส่งผลให้คุณภาพสัญญาณลดลงชัดเจน เสาอากาศภายในบอร์ดมีการสูญเสียแพ็กเก็ตสูงถึงร้อยละ 30.25 และอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จลดลงมาร้อยละ 69.75 ในทางกลับกัน เสาอากาศภายนอกให้ค่าความแรงสัญญาณดีกว่าประมาณ 12 dB และมีความเสถียรมากกว่า โดยที่ระยะ 120 เมตร ยังคงส่งข้อมูลได้สำเร็จถึงร้อยละ 92.25% และจากผลการวิเคราะห์ด้วย Two-way ANOVA พบว่าความแรงสัญญาณแตกต่างกันมีนัยสำคัญตามระยะทาง โดยเมื่อพิจารณารายคู่ พบว่าระยะทางที่น้อยกว่าให้ความแรงสัญญาณสูงกว่า เช่น การใช้เสาอากาศภายในบอร์ด ความแรงสัญญาณที่ระยะ 30 เมตรสูงกว่าระยะ 60, 90 และ 120 เมตร อย่างชัดเจน และระยะ 60 เมตรยังสูงกว่าระยะ 90 และ 120 เมตร ส่วนเสาอากาศภายนอกก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ ระยะ 30 เมตร มากกว่าระยะ 60 เมตร 90 เมตร และ 120 เมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ไม่มีปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างใช้เสาอากาศภายในบอร์ดกับเสาอากาศภายนอกและระยะทาง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าทุกระยะที่สั้นกว่าจะรักษาความแรงสัญญาณได้ดีกว่าระยะทางที่ไกลทั้งสองแบบ โดยการสูญเสียแพ็กเก็ตและอัตราการส่งผ่านข้อมูล

สำเร็จ สำหรับการใช้เสาอากาศภายในบอร์ดค่าความแรงของสัญญาณต่ำกว่า -70 dBm ที่ระยะ 120 เมตร และอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลลดลงต่ำกว่าร้อยละ 70 ในบางช่วงเวลา ขณะที่การใช้เสาอากาศภายนอกให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในระยะไกล โดยอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 90 แม้ว่าในระยะ 120 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Friis (1946) ที่แสดงให้เห็นว่ากำลังขยายของเสาอากาศมีผลโดยตรงต่อการลดการสูญเสียพลังงานของคลื่นในอากาศในระยะไกล ผลการทดลองยังสะท้อนแนวคิดของ Hossain et al. (2018) ที่ได้อธิบายว่าสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และช่วงเวลาของวัน ส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณไร้สาย และงานวิจัยของ มงคล รอดจันทร์ และคณะ (2568) ให้ความสำคัญของการวางตำแหน่งและจำนวนอุปกรณ์เซนเซอร์ในพื้นที่จริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าการใช้เสาอากาศที่มีประสิทธิภาพสามารถเพิ่มระยะทางในการส่งข้อมูลของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายได้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนอุปกรณ์สำหรับเพิ่มระยะทางในการส่งข้อมูลมากเกินไป

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ คือ การทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ไม่ครอบคลุมสถานการณ์ที่มีสิ่งกีดขวางหรือสภาพอากาศแปรปรวนมากนัก โดยแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่รองรับการปรับพลังงานในการส่งข้อมูลที่สามารถตั้งค่ากำลังส่งได้ และเลือกใช้ชนิดเสาอากาศที่มีกำลังขยายเหมาะกับระยะทางและสภาพแวดล้อม โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) ในการประเมินสภาพแวดล้อมแบบทันทีทันใด (Realtime) สำหรับการคาดการณ์คุณภาพของสัญญาณ นอกจากนี้การพัฒนา ร่วมกับการเลือกใช้โหมดประหยัดพลังงานซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานแบตเตอรี่ เปรียบเทียบการใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เพื่อให้ได้แนวทางในการทำงานของอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้ที่มีความแม่นยำสูงในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้

6. เอกสารอ้างอิง

- ชนิกานต์ รอดมรรณ มธุรส ผ่านเมือง และวีรศักดิ์ จงเลขา. (2564). การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*. 13(2): 315-329.
- ชาญวิช สุวรรณพงศ์. (2560). การประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโปรโตคอลอาร์พีแอลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายภายใต้สภาพแวดล้อมจริง. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 11(1): 151-164.
- มงคล รอดจันทร์ ภาณยา ปาลวิสุทธิ อภินันท์ จุณกรณ์ และศัลยพงศ์ วิชัยดิษฐ์. (2568). การหาจำนวนที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งตัวตรวจวัดความชื้นในดินด้วยแบบจำลองเชิงพื้นที่โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย. *วารสารแม่โจ้เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม*. 11(2): 23-40.

- เอกบุตต์ เทพนรรัตน์ พงษ์ศักดิ์ กীরติวินทกร และ เวช วิเวก. (2556). การปรับกำลังส่งอัตโนมัติของอุปกรณ์สื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแบบเหมาะสมกับระยะทางสำหรับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 9(3): 28–46.
- Amir Guidara, Ghofrane Fersi, Faouzi Derbel & Maher Ben Jemaa. (2018). **Impacts of Temperature and Humidity variations on RSSI in indoor Wireless Sensor Networks**. *Procedia Computer Science*, 126, 1072-1081.
- Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Alexander Krotov & Andrey Guschin (2015). **A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities**. *Computer Communications*, 58, 53-69.
- Friis, H. T. (1946). A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). **Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions**. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- Hossain, M. S., Fotouhi, M., & Hasan, R. (2018). **Towards an analysis of weather impact on Wi-Fi signal strength in IoT applications**. *IEEE World Congress on Services*, 21-28.
- Phruksahiran, N. (2024). **A Hybrid Model for Path Loss Estimation in Avenue Environment**. *Nkrafa journal of science and technology*, 20(2), 11–22.
- Rappaport, T. S. (2010). **Wireless Communications: Principles and Practice**. Prentice Hall.
- Shashikumar, R., Ramesh, M. V., & Sujatha, B. (2023). **Design of Embedded Web Monitoring System to Measure pH of Water Using Wireless Sensor Network for Hydroponics Applications**. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 14(2), 121–127.
- Suryadip Chakraborty, Saibal K. Ghosh, Anagha Jamthe & Dharma P. Agrawal (2013). **Detecting Mobility for Monitoring Patients with Parkinson’s Disease at Home using RSSI in a Wireless Sensor Network**. *Procedia Computer Science*, 19, 956-961.