

ระบบการส่งข้อมูลสถานะของเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อน จากการเกิดไฟป่าผ่านโครงข่าย LoRa-Based Mesh Network

The status data sending system of the sensor metering the heat from wild fire through LoRa-Based Mesh Network

จรรย์ คนแรง¹ มิ่งขวัญ สมพฤกษ์^{1*} ไพโรจน์ ด้วงนคร¹ อธิคม ศิริ² และกมล บุญล้อม³
Jarun khonrang¹, Mingkwan Somphruek^{1*}, Pairoj Duangnakhorn¹, Atikhom Siri²
and Kamol Boonlom³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

²สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์กายภาพ มหาวิทยาลัยอีสต์ สหราชอาณาจักร

¹Department of Energy Engineering, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

²Department of Computer Engineering, Faculty of Computer and Information Technology, Chiang Rai Rajabhat University

³School of Electronic and Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Leeds,
United of Kingdom.

*Email: Mingkwan.som@crru.ac.th

Received: December 27, 2022; Revised: March 21, 2023; Accepted: April 07, 2023

บทคัดย่อ

ไฟป่านั้นเป็นปัญหาใหญ่ในหลายพื้นที่ของโลกที่ยากต่อการจัดการอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีการแจ้งเตือนและระยะทางที่ไกลยากแก่การเข้าถึง ปัจจุบันมีเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่เข้ามามีบทบาทและทำหน้าที่ส่งข้อมูลการแจ้งเตือนในงานหลายๆ ด้านทำให้สะดวกต่อการเก็บรวบรวมและติดตามข้อมูล อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งยังมีข้อจำกัดด้านระยะทางที่ไม่สามารถส่งข้อมูลกันได้ไกล ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งในรูปแบบการสื่อสารที่สามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะทางที่ไกล นั่นคือ LoRa ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตระยะไกล ใช้พลังงานต่ำและราคาต้นทุนที่ต่ำ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปการใช้งาน LoRa นั้นจะมีการใช้งานในแบบทั่วๆไปคือ การติดต่อสื่อสารกันแบบ Star-to-Star และใช้กันอย่างแพร่หลายดังตัวอย่างที่ใช้งานกันคือ LoRaWAN แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสำหรับงานในบางประเภทที่ต้องการเพิ่มระยะทางให้ไกลมากยิ่งขึ้นในขณะที่มีการใช้กำลังงานปริมาณเท่าเดิม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ขอเสนอการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการใช้งานเครือข่ายแบบเมชที่ใช้ LoRa โดยไม่ต้องพึ่งพาการเชื่อมต่อ LoRaWAN ที่ทำการส่งข้อมูลการติดต่อสื่อสารกันแบบ Star-to-Star โดยอาศัยการส่งข้อมูลของโหนดเซ็นเซอร์ที่ทำการส่งข้อมูลกันแบบ Peer to Peer โดยไม่อาศัยเกตเวย์เหมือนกับ LoRaWAN และในกรณีที่ต้องการเพิ่มระยะทางให้ไกลขึ้นระบบจะทำการเชื่อมต่อกันแบบ Multi-Hop โดยเป็นการนำเสนอต้นแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำในโดยจะทำการทดสอบแบบ Point to Point และทำการวัดค่าของสัญญาณที่รับได้ด้วยเครื่องมือวัดและทำการเทียบกับโมเดลตามหลักทฤษฎี จากนั้นก็จะทำการทดลองหาค่าระยะทางสูงสุดและค่าระยะเวลาในการส่งข้อมูลระหว่างการส่งแบบ Single-Hop และแบบ Two-hop ซึ่งผลจากการวิจัยโดยใช้เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้งานด้านการส่งข้อมูลในระยะทางไกลโดยใช้กำลังงานที่ต่ำได้ในภาคอุตสาหกรรมหรือด้านอื่นๆ ได้ในอนาคต

คำสำคัญ : เซนเซอร์โครงข่าย LoRa, เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งแบบไร้สาย, เซนเซอร์ตรวจวัดไฟป่า

Abstract

Wildfire is a big problem in several areas across the world which is difficult to manage due to the limitation of warning technology and the distant locations is difficult to access. Today, Internet of things plays an important role and functions sending warning data of many jobs which is convenient to send and follow the data. However, Internet of things still has the limitation in sending the data in a long distance. Thus, the application of Internet of things which is enable to receive and send the data in a long distance, known as LoRa, a distant internet technology which has low cost and low energy consumption. Thus, in general, LoRa communicates in the form of Star-to-Star which is widely used, known as LoRaWAN. However, there are limitations of some jobs requiring a longer distance while the amount of power used is the same as before.

Thus, this study proposes the LoRa-Based Mesh Network without relying on LoRaWAN connection sending the communication data in the form of Star-to-Star. It sends the data in the form of peer-to-peer without the gateway as LoRaWAN does. In the case that a longer distance is needed, the system is connected by a means of multi-hop presenting the hardware and software model through the use of low voltage power. Then, the testing is done using point to point and the received signal is measured by a gauge and compared with the model in accordance with the theoretical principle. Finally, the testing on the maximum distance value and the delivery time during sending the data both single-hop and two-hop features. The result gained from the use of this technique can be applied in sending data in a long distance by consuming low power in industrial section or the others in the future.

Keywords : LoRa-Based Mesh Sensor, Wireless Internet of Things Technology (WIoT), Wildfire Sensor

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้าน Wireless Internet of Things (WIoT) ได้กลายเป็นส่วนสำคัญที่จำเป็นและแพร่หลายในสังคม มากไปกว่านั้นยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการค้าและบริการลูกค้ามากขึ้นเรื่อยๆ โดยทำการรวบรวมข้อมูลที่มาจากอุปกรณ์ต่างๆ มากมายที่ตั้งอยู่บริเวณในหลายตำแหน่งของเครือข่าย ดังนั้นในการส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกลมากๆ เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่อุปกรณ์บางชนิดมีขอบเขตของการใช้พลังงานที่มีจำกัดและข้อกำหนดทางกฎหมาย และในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยีบางประเภทนั้นไม่สามารถตอบโจทย์ของการทำงานในระยะทางที่ไกลดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยี Wireless Internet of Things (WIoT) ที่สามารถส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกลได้ หลากกิโลเมตรในขณะที่มีการใช้กำลังงานที่ต่ำเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยี LoRa, LoRaWAN, SigFox และ

(NB-IoT) เป็นต้น เทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักกันดีและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและได้รับความนิยม คือ LoRa เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลได้ระยะทางไกล ใช้กำลังงานต่ำ และที่สำคัญคือ เป็นเทคโนโลยีที่เป็นแบบไม่ต้องขออนุญาตซึ่งไม่เสียค่าบริการในการใช้งานส่งผลให้เกิดความนิยมของผู้ใช้บริการและผู้พัฒนาด้านงานวิจัย เทคโนโลยี LoRa เป็นการใช้เลเซอร์ทางกายภาพที่รวมการปรับคลื่นวิทยุแบบ Chirp Spread Spectrum (CSS) ดังนั้น LoRa กลายเป็นอุปกรณ์ทางกายภาพที่ได้มีการยอมรับอย่างกว้างขวาง

เครือข่าย LoRaWAN ประกอบด้วยองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมสามส่วนคือ อุปกรณ์ปลายทางเกตเวย์และเซิร์ฟเวอร์เครือข่ายระยะไกล ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อข้อมูลกันในรูปแบบการเชื่อมโยง ชนิด Star to Star ซึ่งอุปกรณ์ปลายทางสื่อสารกับเกตเวย์ตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป โดยใช้ LoRa เป็น ชั้นกายภาพ (Physical Layer) และในแต่

ละเกตเวย์สามารถส่งเฟรมของ LoRaWAN ไปยังเครือข่าย เซิร์ฟเวอร์ที่ใช้อินเทอร์เน็ตเพชชนิด backhaul ที่มี Higher-Throughput ตัวอย่างเช่น WiFi หรือ โครงข่าย 5G จากนั้น แอปพลิเคชันการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์สามารถใช้ประโยชน์ จากข้อมูลที่รวบรวมได้ดีที่สุด

หนึ่งในข้อจำกัดที่แข็งแกร่งที่สุดของ LoRaWAN คือ รูปแบบการเชื่อมโยงที่นำมาใช้ซึ่งอนุญาตให้เฉพาะมีการ สื่อสารแบบ Single-Hop โดยตรงระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง และเกตเวย์ แม้ว่าการกำหนดค่านี้อาจเหมาะสำหรับการใช้ งานจำนวนมาก ในบางกรณี เช่นเมื่อต้องรวบรวมหรือ แลกเปลี่ยนข้อมูลจากในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงในพื้นที่ ระยะทางที่ไกลซึ่งจะเหมาะกับการรับส่งข้อมูลรูปแบบนี้ที่สุด [1]

จากการสืบค้นในผลงานจำนวนมากได้มีการเปิดใช้งาน แบบเครือข่ายเมชและการสื่อสารแบบมัลติฮอป(Multi-Hop) บนสถาปัตยกรรมแบบ LoRa ซึ่งอุปกรณ์ปลายทาง สามารถทำหน้าที่เป็นโหนดรีเลย์เพื่อขยายความครอบคลุม ของเครือข่ายและปรับปรุงการใช้พลังงานของอุปกรณ์แม้ว่า งานเหล่านี้จะมีการพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญ แต่เชื่อว่ายังคง เป็นเพียงขั้นกลางที่สามารถพัฒนาต่อยอดขึ้นไปได้อีกและ สามารถนำประโยชน์จากการสื่อสารแบบมัลติฮอปบน สถาปัตยกรรมแบบ LoRa ไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบ การแจ้งเตือนหรือการส่งข้อมูลระยะทางไกลได้เป็นอย่างดี [2]

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบการส่งข้อมูลสถานะ ของเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้าโดยการ นำโครงข่าย LoRa มาประยุกต์ใช้งานในการส่งข้อมูล เนื่องจากในการใช้งานจริงของระบบเซ็นเซอร์การวัดการเกิด จุดความร้อนของไฟฟ้านั้นมีระยะทางที่ไกลเป็นอย่างมากซึ่ง ห่างจากพื้นที่เกิดเวียอาจจะไกลเกินกว่า 10 กิโลเมตร ซึ่งจะ ส่งผลให้อุปกรณ์เซ็นเซอร์นั้นไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังเกต เวย์ได้และทำให้ไม่ครอบคลุมพื้นที่การใช้งาน หากมีการใช้ งานโครงข่ายการเชื่อมโยงข้อมูลที่เป็นแบบ Star to Stars ดังนั้นในการเลือกใช้งานดังกล่าวจึงอาจจะไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถที่จะถูกกำจัดออกไป เมื่อมีการปรับเปลี่ยนการใช้งานในรูปแบบการเชื่อมโยงการ สื่อสารแบบมัลติฮอปบนสถาปัตยกรรมแบบ LoRa หรือที่ เรียกกันว่าการเชื่อมโยงข้อมูล แบบเมช ซึ่งสามารถส่งข้อมูล

กันในระยะทางที่ไกลได้มากขึ้นโดยการส่งผ่านข้อมูลกันเป็น แบบมัลติฮอปแต่จะมีข้อเสียในเรื่องของการประวิงเวลาของ ข้อมูลที่มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็น การนำเสนอรูปแบบที่ประกอบไปด้วย ฮาร์ดแวร์และ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ LoRa โดยทำการติดตั้งจำนวนโหนด เช่นเซอร์จำนวน 3 ตัวซึ่งสามารถสื่อสารแบบ Peer to Peer ระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง LoRa ในขณะที่ยังรักษาฟังก์ชัน ของเครือข่ายแบบมัลติฮอปและแบบเมชตามที่ได้กล่าวไว้ใน ข้างต้น และส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ที่ประกอบด้วยโมดูล LoRa ที่ทำการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตด้วยเทคโนโลยี WiFi

2. การออกแบบและวิธีการทดลอง

ชั้นกายภาพ (Physical Layer) ของ LoRa มี พารามิเตอร์ที่กำหนดค่าได้มากมายรวมถึง SF, อัตราการ เข้ารหัสข้อผิดพลาด, Header Types, Preamble Length และแบนด์วิธ และอย่างที่ทราบ LoRa Radios สามารถใช้ สำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด(Point-to-Point) และยังสามารถใช้ในเครือข่าย LoRaWAN ซึ่งเกี่ยวข้องกับการ สื่อสารกับสถานีฐานแบบรวมศูนย์ ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะ กล่าวถึงแนวทางที่แตกต่างเรื่องของการสร้างเครือข่ายแบบ เมช (Mesh) ของโหนด LoRa เครือข่ายแบบเมชเป็น โครงสร้างเครือข่ายที่โหนดสื่อสารระหว่างกันโดยตรง (หาก อยู่ในระยะ) หรือโดยอ้อมผ่านโหนดระดับกลาง ยกตัวอย่าง เช่น หากโหนด 1 ต้องการส่งข้อความไปยังโหนด 2 แต่อยู่ ห่างจากโหนด 2 มากเกินไป ข้อความจะถูกกำหนดเส้นทาง โดยอัตโนมัติผ่านโหนดกลางที่อยู่ในช่วง สมมติว่าโหนด 3 เป็นต้น

หนึ่งในผลงานชิ้นแรกๆ ที่ทำการใช้ความสามารถของ LoRa เพื่อสร้าง IoT mesh ทั่วไปและเครือข่ายแบบมัลติฮอปที่เป็นงานวิจัยอ้างอิงนั่นคือ Lora Blink ที่มีโปรโตคอล (Protocol) ที่รองรับการสื่อสารข้อมูลแบบมัลติฮอป [3] ซึ่งสถาปัตยกรรมที่นำมาใช้ประกอบด้วยโหนดที่ใช้ LoRa หลายตัวและทำการซิงค์กัน ซึ่งเป็นส่วนปลายทางสุดท้าย ของข้อความทั้งหมดโดยจะถูกสร้างขึ้นจากโหนด ซึ่งใน งานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าอัตราความสำเร็จในการส่ง ข้อมูล (Packet Delivery Ratio) นั้นสามารถที่จะปรับปรุง

ได้ด้วยการใช้เครือข่ายแบบเมช โดยต้องคำนึงถึงการเชื่อมโยงแบบ Star โดยเป็นพื้นฐาน

ในส่วนของสภาพแวดล้อมเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงเนื่องจากค่ากำลังสูญเสีย (The Path Loss) การถูกบดบัง (The Shadowing) และ เส้นทางการเดินของสัญญาณ (The Multipath Fading) เป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับคุณลักษณะของช่องสัญญาณของระบบสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นในสภาพแวดล้อมของชนบทที่มีลักษณะเป็นป่าไม้มักจะมีคุณลักษณะที่เป็น การถูกบดบัง และ เส้นทางการเดินของสัญญาณ อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสัญญาณการรับส่งข้อมูล ในการวิเคราะห์เบื้องต้นของประสิทธิภาพการกระจายสัญญาณในสภาพแวดล้อมชนบทที่มีป่าไม้จะมีผลกระทบในแง่ของระยะทางและระดับสัญญาณที่รับได้

โดยพารามิเตอร์บ่งชี้ PT นั้นคือกำลังส่งที่แพร่กระจายด้วยเครื่องส่งสัญญาณ ในส่วนของ GT และ GR คือ อัตราการขยายสัญญาณของสายอากาศทั้งฝั่งด้านรับและด้านฝั่งส่งตามลำดับ โดยที่ L_p คือ The Path Loss Attenuation ในส่วนของ PR คือ กำลังงานที่ได้จากตัวรับ โดยที่ค่าของ PR สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$P_R |_{dBm} = P_T |_{dBm} + G_T |_{dB} + G_R |_{dB} - L_P |_{dB} \quad (1)$$

โดยทั่วไปนั้น จะไม่มี Path Loss Models เฉพาะเจาะจงสำหรับเทคโนโลยี LoRa เพื่อใช้ในการประมาณการค่า อย่างไรก็ตามยังมีแบบจำลองการแพร่กระจายเชิงประจักษ์จำนวนมากที่ได้มาจากการวัดโดยใช้มาตรฐานที่แตกต่างกัน ความถี่ที่แตกต่างกันและในสภาวะการแพร่กระจายที่หลากหลาย โดยผู้คนบางส่วนใช้สำหรับย่านความถี่ที่ยอมรับสำหรับ LoRa ในยุโรป ตัวอย่างเช่น Erceg Model นั้นสามารถใช้กับผลลัพธ์ที่คาดหวังเพื่อเปรียบเทียบกับกรวัดทดลองในช่วงความแตกต่างของระยะทาง 100 เมตร อย่างไรก็ตามโมเดลของ Erceg มักจะประเมินระยะทางที่สูงเกินไปในสภาพแวดล้อมที่เป็นเมือง ในส่วนของการวิเคราะห์แบบจำลองของ Lee's การจำลองการแพร่กระจายโมเดล [4] สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งแบบ Area to Area, and Point to Point การบังคับใช้ Lee's การแพร่กระจายโมเดลนั้น มีประสิทธิภาพโดยจะเกิดขึ้นในพื้นที่

ที่มีการกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับเฉพาะในแต่ละเมือง แต่สำหรับประเทศไทยโดยเฉพาะเมืองที่อยู่ต่างจังหวัดออกไปนั้นจะมีความแตกต่างเป็นอย่างมากเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่างจากตัวอย่างของเมืองที่ Lee's การแพร่กระจายโมเดลนั้นทำการออกแบบจะไม่มีค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะสำหรับแบบจำลองของ Lee's การแพร่กระจายโมเดล

เมื่อจัดการกับการส่งสัญญาณระหว่าง 100 ถึง 1500 MHz ในเขตเมือง, ในรูปแบบเชิงประจักษ์ของ Okumura-Hata (O-H) Model, นั้น พัฒนาขึ้นมาเพื่อระบบไร้สาย โดยเฉพาะสามารถใช้การสื่อสารในสภาพแวดล้อมได้ [5-6] โดยที่ The Path Loss LP นั้นสามารถประเมินได้จากสมการที่ 2

$$L_p |_{dB} = 69.55 + 26.16 \log_{10} f + (-13.82 \log_{10} h_T - a(h_R)) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_T) \log_{10} d \quad (2)$$

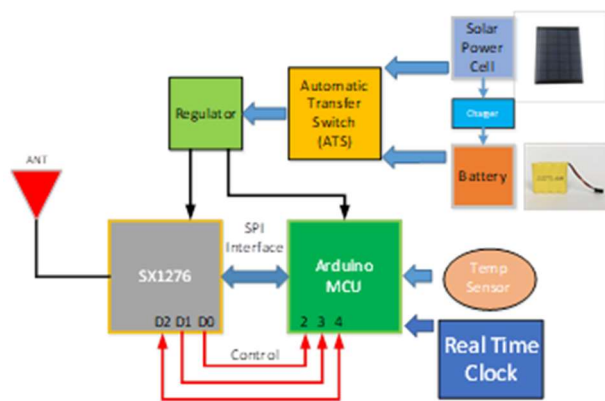
โดยที่ทราบค่า Operating Frequency (f) นั้นมีค่าเป็น MHz ความสูงของตัวส่งและตัวรับ คือ h_T และ h_R แสดงค่าในหน่วยเป็นเมตรและระยะห่าง d ระหว่างตัวส่งและตัวรับ แสดงเป็นหน่วยกิโลเมตร

โดยที่ The correction parameter เกิดจากประเภทพื้นที่และทำการพิจารณาโดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$a(h_R) = 3.2 [\log_{10} (11.75 \cdot h_R)]^2 - 4.97 \quad (3)$$

สำหรับอุปกรณ์ตัวโหนดของเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟป่า นั้น จะ ประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ที่ทำการเชื่อมต่อผ่านอินเตอร์เฟซชนิด SPI กับโมดูล LoRa เบอร์ SX1276 [7] ซึ่งทำหน้าที่เป็นโมดูลรับและส่งข้อมูลระยะทางไกลแบบไร้สาย LoRa ที่ย่านความถี่ใช้งาน 920 - 925 MHz และอยู่ในย่านที่อนุญาตให้ใช้งานได้ในประเทศไทยตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) ที่มีกำลังส่งอยู่ที่ +14 dBm หรือกำลังส่งโดยประมาณ 25 มิลลิวัตต์ และอีกส่วนหนึ่งของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะทำการเชื่อมต่อกับ

เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อทำการวัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์ไฟฟ้าเกิดขึ้น และระบบจ่ายกำลังงานที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังงานแบบกระแสตรงจากเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 12 V กำลังงาน 5 วัตต์ ร่วมกับแบตเตอรี่รีไซเคิลขนาด 12 V ขนาดของกระแส 8 แอมแปร์และทำการเชื่อมต่อกับระบบไมโครกริดที่ทำการเลือกแหล่งจ่ายแบบอัตโนมัติ และทำการจ่ายกำลังงานให้แก่วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูล LoRa Sx1276 และมาพร้อมกับวงจรการจัดการแบตเตอรี่ที่ทำให้การใช้งานง่ายขึ้นเมื่อทำงานกับ LoRa ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) บล็อกไดอะแกรมของวงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้า (ข) วงจรที่สร้างจริงของเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้า

มากกว่านั้นบอร์ดที่ทำการออกแบบเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเครือข่ายแบบเมชเพราะมีความสามารถในการ

คำนวณที่ดีเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano นั้นสามารถรองรับการคำนวณที่มีขนาดเล็กเพียงพอในขณะที่ใช้กำลังงานต่ำมาก ซึ่งประสิทธิภาพของCPU จะมาพร้อมกับ RISC Architecture กับ 2 Kbytes internal SRAM และ 32 K bytes of In-System Self-Programmable Flash Program Memory [9-10] สำหรับโมดูล LoRa นั้นจะมีไลบรารี Radiohead รองรับการทำงานด้านการส่งสัญญาณหลายอย่างบนชิป SX1276 ที่แตกต่างกันในแง่ของ แบนด์วิธ (BW), Coding Rate (CR) and Spreading Factor (SF) ซึ่ง CR นั้นหมายถึงสัดส่วนของบิตที่ส่งข้อมูลจริง และค่า SF คือจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ ในขณะที่ BW หมายถึงความแตกต่างระหว่างบนและล่างความถี่ที่ถูกครอบครองโดย The Chirp ในส่วนเทคนิคของ Spread-Spectrum Modulation นั้น Chirp เป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป[8] [10]

ในการตั้งค่าการวัดถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องรับเดี่ยวและเครื่องส่งสัญญาณตั้งแต่หนึ่งเครื่องขึ้นไปตามการทดสอบที่แตกต่างกันแสดงได้ในรูปที่ 2 โหนดเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้านั้นประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่มีชนิดเดียวกัน รวมถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิตเบอร์เดียวกันคือ Arduino Nano และโมดูล LoRa เบอร์ SX1276 ที่ทำการต่อรวมอยู่กับสายอากาศชนิดโมโนโพลขนาดอัตราการขยายสัญญาณ Gain เท่ากับ (G=3.16dB) SATEL ISM Antenna 900 MHz Model และทำการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการทดสอบแต่ละครั้งโดยใช้ Arduino IDE

รูปที่ 2 การทดสอบเครื่องรับเดี่ยวและเครื่องส่งสัญญาณ

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการกำหนดพารามิเตอร์ทั่วไปในการส่งของโมดูล LoRa ที่สามารถสื่อสารกันได้ในระหว่าง Point to Point และย่านความถี่ที่เลือกใช้ในการทดลองในการส่งข้อมูลดังที่แสดงให้เห็นในตารางดังต่อไปนี้

LoRa Module	Transmitted power	14 dBm
SX1276	(Tx power, dBm)	
Configuration	spreading factor	10
	(SF)	
	Bandwidth (BW, kHz)	125 kHz
	Frequency (MHz)	923.2 MHz
	Antennas gain (dBi)	3.16 dBi
Spectrum Analyzer	Center frequency	923 MHz
	(CF,MHz)	
Configuration	Resolution bandwidth	10 kHz
	(RBW,kHz)	
	Video bandwidth	30 kHz
	(VBW,kHz)	
	Sweep time(ms)	5 ms
	Span(kHz)	500 kHz

ในการทดสอบเบื้องต้นจะดำเนินการติดตั้งชุดของการวัดแบบคงที่ด้วยตัวรับสัญญาณอยู่ในตำแหน่งคงที่และตัวรับตามในตำแหน่งต่างๆ ของโหนดเซ็นเซอร์จุดที่ 1, 2 และ จุดที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดง ตำแหน่งของตัวส่ง node ที่ 1, node ที่ 2 และ Node ที่ 3 ตามลำดับ และตัวรับ RX ด้วยระยะทางสัมพัทธ์

ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับคือ 381 เมตร สำหรับ Node ที่ 1 กับ 621 เมตรสำหรับ Node ที่ 2 และ 844 เมตร สำหรับ Node ที่ 3 ทางด้านตัวรับถูกวางไว้ที่ระยะความสูง 30 เมตร จากพื้นดิน และสำหรับตำแหน่งทั้งหมดเครื่องส่งอยู่ในระดับเดียวกับสายตากับเครื่องรับ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับคือเทียบได้กับระยะห่างสูงสุดระหว่างสองโหนดของเครือข่ายมากกว่าที่จะนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมในพื้นที่ชนบท

โมดูลทางตัวรับถูกตั้งโปรแกรมเพื่อให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับคุณภาพของสัญญาณประกอบไปด้วย รับสัญญาณตัวบ่งชี้ความแรง (RSSI) ของแพ็คเก็ต, อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และค่าเฉลี่ยของตัวบ่งชี้ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ โดยชุดของข้อมูลที่วิเคราะห์ประกอบด้วยบล็อกละ 1,000 แพ็คเก็ต และสำหรับตำแหน่งเครื่องส่งสัญญาณ การตั้งค่าและการกำหนดค่าที่ใช้สำหรับตัวส่งและตัวรับมีการแสดงในตารางที่ 1

ผลจากการวัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีที่ได้รับกับ Okumura-Hata model นั้นแสดงให้เห็นได้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีที่ได้รับกับ Okumura-Hata Model

Transmitter Position	Node1	Node2	Node3
Distance (m)	381	621	844
Signal to Noise Ratio (SNR) (dB)	1	-1	-6
Received Signal Strength Indicator (RSSI) (dB)	-92	-112	-120
Receiver Power (dBm)	-93	-103	-116
Okamuru-Hata Rx power (dBm)	-88	-97	-103

จากการทดสอบการวัดสามารถสังเกตความเป็นไปได้ในการวัดค่าของ SNR เมื่อระดับกำลังสัญญาณต่ำกว่าระดับเสียงรบกวน ตามข้อกำหนดของ LoRa โดยที่ค่าสำหรับ

SNR ระบุความสามารถในการรับสัญญาณพลังงานต่ำกว่า The Receiver Noise Floor สิ่งนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อช่วงของระยะทางในการสื่อสารนั้นไกลกันมากหรือมีสัญญาณรบกวนที่สูงอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมจากภายนอกเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดลักษณะนี้ ในส่วนของ RSSI ของแพ็คเก็ต เป็นไปตามที่คาดไว้ซึ่งจะมีค่าที่ลดลงไปเมื่อระยะทางนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นอย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่ของแพ็คเก็ตที่รับได้นั้นยังคงมีความถูกต้อง ในความเป็นจริงจากระยะทางโหนด ที่ 1 และ โหนดที่ 2 นั้นมีค่า RSSI ที่อยู่ในระดับที่มากกว่าข้อกำหนดของ โมดูล SX1276 จึงสามารถรับข้อมูลแพ็คเก็ตได้อย่างถูกต้องในขณะที่โหนดที่ 3 นั้นมีระยะทางที่มากกว่า 800 เมตร ซึ่งจะทำให้แพ็คเก็ตมีอัตราการสูญเสียมากกว่าโหนดอื่นๆ เนื่องจากค่า RSSI ที่ได้รับนั้นมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของบางครั้งของการรับข้อมูลนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าข้อกำหนดของโมดูล SX1276

ค่าพลังงานที่ได้รับทั้งหมดจากตัวรับเมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณด้วย O-H Model ซึ่งอยู่ด้านล่างสุดของตารางที่ 2 ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าค่าพลังงานที่ได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าทั้งหมดที่วัดได้เนื่องจากแบบจำลองนั้นยังไม่ได้รับการพัฒนาโดยคำนึงถึงลักษณะของ CSS Modulation ที่ใช้สำหรับ LoRa มากกว่านั้นในการศึกษาการเชื่อมต่อแบบ Point to Point นั้นใน O-H Model ไม่ได้คำนึงถึงผลของการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม

ในการทดลองลำดับต่อไปคือระยะเวลาการส่งข้อมูล การประเมินระยะเวลาการส่งข้อมูลโดยที่ประเมินในห้องปฏิบัติการ ในส่วนของระยะเวลาการส่งข้อมูลในกรณีของการสื่อสารแบบ Single หรือ Two-Hop ของ LoRa-Based Mesh Network ซึ่งในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงการตั้งค่าของพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้โดยจะทำการ Bandwidth ของความถี่ และค่าของ SF (Spreading Factor) ที่มีค่าแตกต่างกันออกไปและในทุกกรณีค่าของ CR จะถูกตั้งค่าไว้ที่ 4/5 ในขณะที่ BW และ SF แตกต่างกันไป ในบรรดาการตั้งค่าการส่งสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมดซึ่งอาจจะเลือกโดย BW และ SF ที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่ทำให้มันมีความเป็นไปได้ที่ดีที่สุด ดังที่แสดงให้เห็นในตารางดังต่อไปนี้

3. ผลการวิจัย

ตารางที่ 3 การตั้งค่าการส่งและระยะเวลาการส่งข้อมูล สำหรับการสื่อสารแบบ Single-Hop ระหว่าง โหนด เซ็นเซอร์จุดที่ 1 และ จุดที่ 2 ตามรูปที่ 4 และการสื่อสารแบบ Two-Hop ระหว่างโหนดเซ็นเซอร์จุดที่ 1 และ จุดที่ 3 ตามรูปที่ 5

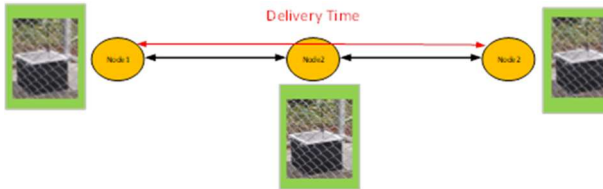
Transmitting Configuration	BW (kHz)	SF	Delivery Time (ms)	
			Single-Hop	Two-Hop
Maximum Band	250	7	495 ± 87	835 ± 103
Medium_LSF	125	7	649 ± 196	1,334 ± 424
Medium_HSF	125	10	5,329 ± 51	10,746 ± 85
Minimum Band	56	10	6,692 ± 85	13,410 ± 223

ในการทดลองสำหรับการตั้งค่าการส่งแต่ละครั้งสามารถประเมินค่าระยะเวลาการส่งข้อมูลเมื่อทำการส่งข้อมูลที่มี Payload ขนาด 240 ไบต์ และค่า Payload สูงสุดที่โมดูลตัวส่งและรับ SX1276 สามารถดำเนินการได้คือ 255 ไบต์ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ไบต์ Radiohead Header นั้นหมายความว่าสุทธิต่อ Payload ที่สามารถส่งได้คือ 251 ไบต์ โดยสามารถเลือกข้อความที่มีขนาดเล็กลงได้คือ 240 ไบต์และเมื่อรวมส่วน Radiohead Header แล้วจะมีขนาดรวมเท่ากับ 244 ไบต์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถตรวจสอบให้แน่ใจว่าในส่วน Radiohead Header นั้นสามารถเพิ่มสูงสุดได้ถึง 11 ไบต์ในกรณีที่ต้องการเข้ารหัส Payload ซึ่งในส่วนนี้จะไม่ได้ใช้ในการทดลองในกรณีนี้จะมิไว้ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในเรื่องขนาดของข้อความ ในการทดลองเหล่านี้จะทำการส่งสัญญาณทางเดียว รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 แสดงการตั้งค่าเครือข่ายซึ่งมีจำนวนโหนดสูงสุดสามโหนดนั้นคือ โหนด 1 โหนด 2 และโหนด 3 ตามลำดับเป็นของ LoRa-Based Mesh ซึ่งจะพิจารณาในรูปแบบการสื่อสาร Single-Hop และ Two-Hop ดังแสดงในรูป ในกรณีของการสื่อสารแบบ Two-Hop โหนด 2 สามารถกำหนดเส้นทางการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนด 1 และ 3 ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งคำนวณระยะเวลาการส่งข้อมูลนั้นหมายถึง ความ

แตกต่างระหว่างเวลาที่ไต่สุดท้ายของข้อความถูกต้องอธิบายโดยละเอียดคือ โหนด 2 หรือ โหนด 3 (โดยขึ้นอยู่กับ การทดสอบ) ที่ในระดับแอปพลิเคชันและเวลาเมื่อขึ้น แอปพลิเคชันที่โหนด 1 ส่งข้อความออกมา โดยต้องมั่นใจ แน่ใจว่าเวลานาฬิกาของโหนดถูกซิงโครไนซ์ ส่วน ระยะเวลาการกระจายสัญญาณนั้นจัดได้ว่าไม่สำคัญ



รูปที่ 4 Single-Hop Delivery Time



รูปที่ 5 Two-hop Delivery Time

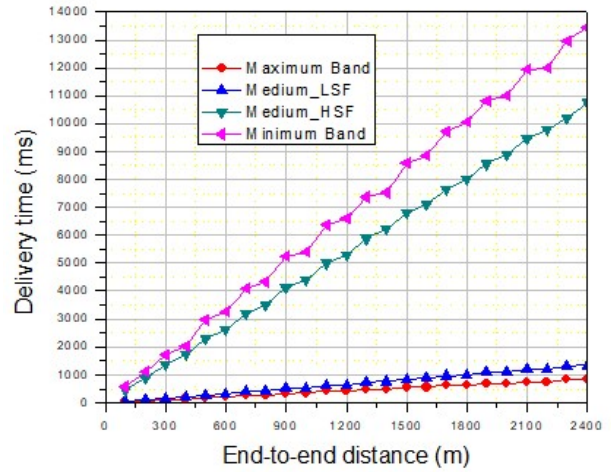
จากผลการทดลองในตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินนี้ สำหรับค่าของระยะเวลาการส่งข้อมูลจะได้ค่าเฉลี่ยพร้อม กับ ช่วงความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% มันแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าค่า ของ SF มีบทบาทสำคัญ เมื่อมีค่า SF ที่มีค่าสูงมากขึ้น เท่าไหร่ จะทำให้ค่าของระยะเวลาการส่งข้อมูลนั้นมีค่ามาก ขึ้นตาม การพิจารณาที่สำคัญอย่างอื่นคือค่าของระยะเวลา การส่งข้อมูลสำหรับการสื่อสารแบบ Two-Hop จะมีค่าอยู่ที่ ประมาณเป็นสองเท่าของการสื่อสารแบบ Single-Hop ใน ทุกกรณี ซึ่งหมายความว่าโดยรวมแล้วค่าของระยะเวลาการ ส่งข้อมูลถูกรอบครองโดยค่าที่ต้องการส่งและรับข้อความ ผ่านโมดูลรับและส่งแบบ LoRa จึงคาดการณ์ว่าระยะเวลา การส่งข้อมูลในกรณีการสื่อสารของ m-hop กับ $m > 2$ จะ อยู่ที่ประมาณ m เท่ากับการสื่อสารแบบ Single-Hop

ในการทดลองเพื่อทำการหาค่าระยะเวลาการส่งข้อมูล สำหรับการสื่อสารแบบ Single-Hop และการสื่อสารแบบ Two-Hop และเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดในระยะทางที่ กำหนดในช่วงระยะทางตั้งแต่ 200 เมตร ไปจนถึง 1,200

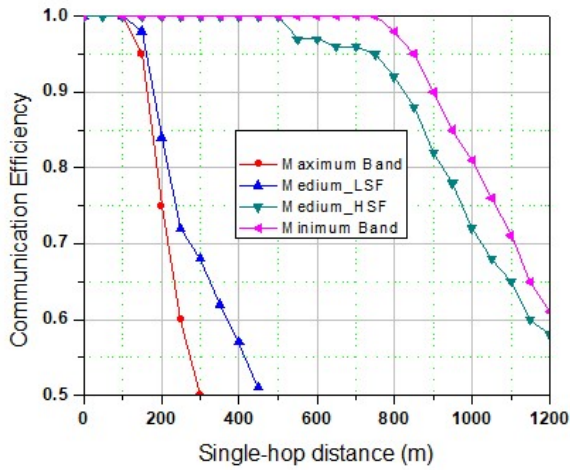
เมตร แสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 6 แสดงภาพสภาพแวดล้อม ผ่านดาวเทียมของ Google Maps ที่ใช้ในการทดสอบการตั้ง ค่าการส่งทั้งหมดจากผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงให้เห็น ว่าการตั้งค่าการส่งสัญญาณต่างๆนำไปสู่การทดสอบ ประสิทธิภาพในการสื่อสารแบบ Single Hop ที่แตกต่าง การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของการสื่อสารและ ระยะเวลาการส่งข้อมูล ดูได้จากตารางที่ 3 ยกตัวอย่างเช่น Maximum Band สำหรับระยะเวลาการส่งข้อมูล นั้นมี ระยะเวลาที่สั้นเท่ากับประมาณ 500 ms แต่ประสิทธิภาพใน การสื่อสารลดลงอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 0.5 หลังจาก 300 เมตร) การทดสอบประสิทธิภาพที่ดูเหมือนว่าจะดีที่สุดนั้น คือ Medium HSF มีประสิทธิภาพมากกว่า 0.9 ที่ 800 เมตร และมีค่าของ ระยะเวลาการส่งข้อมูลประมาณ 5.3 วินาที แต่สิ่งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของแอปพลิเคชัน ดังนั้น สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแบนด์วิธ ให้มากขึ้นเมื่อเทียบกับ SF (Spreading Factor) ที่เท่ากัน ผลที่ได้คือจะมีค่าระยะเวลาการส่งข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูล น้อยลงในขณะที่ระยะทางของการส่งนั้นจะมีค่าที่มากขึ้น และเมื่อทำการลดแบนด์วิธให้แคบลงดูได้จากกรณีตัวอย่าง ของ Minimum Band ที่มีขนาดแบนด์วิธ 56 kHz และมี SF (Spreading Factor) เท่ากับ 10 จะได้ระยะทางที่สูงสุด คือ 1.2 กิโลเมตร ในขณะที่ค่าของระยะเวลาการส่งข้อมูลมีค่า มากกว่า 80 วินาที ซึ่งมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดใน รูปที่ 8 แสดงค่าประวิงเวลาที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนค่า กำหนดการส่งในทั้งหมด 4 รูปแบบ ของการส่งแบบ Single-Hop ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าค่าประวิงเวลาของการส่งข้อมูลนั้นมี จำนวนที่มากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มขนาดแบนด์วิธของการส่ง ข้อมูลให้มากขึ้นและเมื่อใช้ค่าของ SF ที่มีค่าที่สูงสุดคือ 10 ในขณะที่เดียวกันค่าประวิงเวลามีค่าในช่วงที่ต่ำกว่า 500ms เมื่อทำการส่งข้อมูลด้วยขนาดแบนด์วิธที่สูงและค่าของ SF ที่มีค่าต่ำสุดที่ 7 ในรูปที่ 9 เมื่อทำการเพิ่มจำนวนโนดเข้าไป เป็นการส่งแบบ Two-hop จะส่งผลให้ค่าของการประวิง เวลาที่มีจำนวนที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบ Single-Hop รูปที่ 10 แสดงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้า ที่ติดตั้งใช้ในการทดสอบในงานวิจัยและการติดตั้งเซ็นเซอร์ ในสถานที่ใช้งานจริง



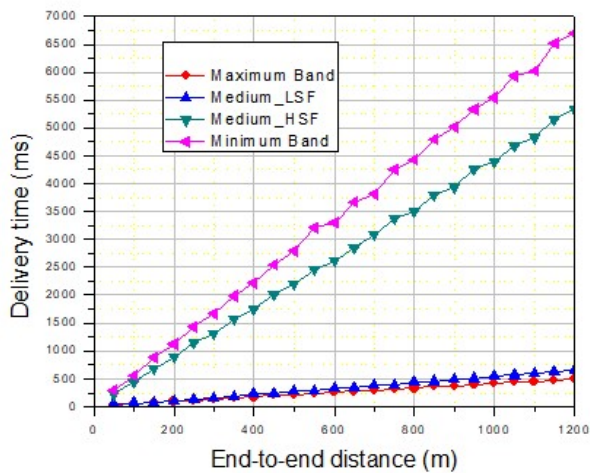
รูปที่ 6 สถานที่ทำการทดสอบในการการหาค่าระยะเวลาการส่งข้อมูล



รูปที่ 9 แสดงค่าระยะเวลาการส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบ Two-Hop ในระยะทางที่ต่างกัน



รูปที่ 7 แสดงประสิทธิภาพการสื่อสารแบบ Single-Hop ในระยะทางที่ต่างกัน



รูปที่ 8 แสดงค่าระยะเวลาการส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบ Single-Hop ในระยะทางที่ต่างกัน



รูปที่ 10 แสดงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟป่าที่ติดตั้งใช้ในการทดสอบในงานวิจัย

เทคโนโลยี LoRa เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีความสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะไกลและการใช้พลังงานต่ำ แม้ว่าจะส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายการทดสอบ Propagation ที่เป็นแบบ Point to Point และความสามารถของระบบรับข้อมูลทั้งด้านกำลังรับและอัตราความผิดพลาดของแพ็คเก็ต ในช่วงระยะทางประมาณ 800 เมตร แสดงให้เห็นว่า LoRa สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนต่อสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่เป็นชนบทหรือในบริเวณป่าได้ ในขณะที่เดียวกันได้ทำการ

ทดลองการส่งข้อมูลของ LoRa ในรูปแบบ Single-Hop เพื่อทำการหาค่าประสิทธิภาพการสื่อสารของระบบโดยทำการปรับเปลี่ยนค่าแบนด์วิธของความถี่ และค่าของ SF (Spreading Factor) ซึ่งได้ข้อสรุปว่าเมื่อทำการเพิ่มแบนด์วิธของข้อมูลมากขึ้นในขณะที่ค่าของ SF (Spreading Factor) ที่ต่ำจะได้ระยะทางที่สั้นซึ่งจากการทดลองจะอยู่ในระยะทาง 300 เมตรโดยประมาณในขณะที่ระยะเวลาการส่งข้อมูลจะมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ประมาณ 500 ms ในขณะที่ทำการลดแบนด์วิธให้มีขนาดที่แคบลงและทำการเพิ่มค่า SF (Spreading Factor) ให้สูงขึ้นจะได้ระยะทางที่ไกลขึ้นจากการทดลองพบว่าได้ระยะทางสูงสุดที่ 1,200 เมตรในขณะที่ระยะเวลาการส่งข้อมูลจะมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ประมาณ 6,692 ms และเมื่อทำการทดลองการสื่อสารแบบ Two-Hop ในระยะทางที่ต่างกันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพนั้นจะได้ระยะเวลาการส่งข้อมูลเท่ากับ 835 ms เมื่อกำหนดความถี่แบนด์วิธที่ 250 kHz และเมื่อมีการกำหนดความถี่แบนด์วิธที่ต่ำสุดที่ 56 kHz ซึ่งจะมีค่า ระยะเวลาการส่งข้อมูลเท่ากับ 13,410 ms

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างการทำการเชื่อมต่อการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี LoRa ที่ทำการเชื่อมต่อแบบ Mesh Network เพื่อทำการประยุกต์นำมาใช้งานกับเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 10 เพื่อทำการเพิ่มระยะทางในการส่งข้อมูลเนื่องจากระยะทางที่อยู่ในพื้นที่ป่านั้นมีระยะทางไกลเกินระยะทางของการที่จะสามารถเชื่อมต่อแบบ Star to Star ได้ ดังนั้นเทคนิคการส่งข้อมูลแบบ Two-Hop นี้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับงานด้านสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

4. อภิปรายและสรุปผล

จากงานวิจัยที่ทำการออกแบบและทดลองการส่งข้อมูลสถานะของเซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อนจากการเกิดไฟฟ้าผ่านโครงข่าย LoRa-Based Mesh Network นั้นแม้จะมีประโยชน์ในด้านการใช้งานในการเพิ่มระยะทางการส่งข้อมูลให้ได้ไกลออกไปเมื่อเทียบกับการติดต่อสื่อสารในรูปแบบ Star to Star แต่ทางผู้วิจัยยังเห็นจุดที่จะต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งข้อมูลผ่าน

โครงข่าย LoRa-Based Mesh Network ให้ดีขึ้นโดยแบ่งเป็นสองประเด็นดังนี้

1. เมื่อต้องการระยะทางไกลที่มากขึ้นจากเดิมระบบจำเป็นจะต้องทำการเพิ่มกำลังส่งในการส่งข้อมูลซึ่งในตัวโมดูล LoRa เองนั้นมีข้อจำกัดด้านกำลังส่งที่ไม่เกิน+20 dBm [11] ดังนั้นสามารถที่จะเพิ่มอัตราการขยายของกำลังงานส่งด้วยการเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศให้มีค่าที่สูงขึ้นจะสามารถทำให้โหนดเซ็นเซอร์นั้นส่งข้อมูลและรับข้อมูลกันได้ดียิ่งขึ้นตัวอย่างเช่นในงานวิจัยเลือกใช้สายอากาศแบบ Monopole ที่มีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 3dBi เมื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศให้มีขนาด 6 dBi จะทำให้กำลังงานที่ได้มีค่ามากเป็นเท่าตัวในเชิงทฤษฎีเป็นต้น

2. ตำแหน่งของการวางโหนดเซ็นเซอร์ก็เป็นส่วนสำคัญต่อระยะทางในการส่งข้อมูล หากทำการติดตั้งในสถานที่ที่มีการบดบังคลื่น เช่นมีกลุ่มต้นไม้ที่บดบังเป็นจำนวนมากจะส่งผลกระทบต่อลดทอนของสัญญาณและจะทำให้ระยะทางที่ได้มีค่าที่ลดลงดังนั้นในการติดตั้งที่ดีจึงมีตำแหน่งที่เหมาะสมเช่นในที่โล่งจากการบดบัง และอีกประการหนึ่งคือการเลือกใช้ขั้วความถี่แบนด์วิธที่เหมาะสมเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ระยะของการส่งข้อมูลส่งได้ไกลขึ้นหากต้องการระยะทางที่ไกลควรทำการเลือกแบนด์วิธให้แคบลงแต่อาจจะส่งผลให้ระยะเวลาการส่งข้อมูลนั้นมีค่าที่สูงขึ้นอย่างไรก็ตามระยะเวลาการส่งข้อมูลนั้นอาจจะเป็นส่วนที่ไม่สำคัญมาก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. L. Albuerno, M. C. Fernández, G. A. L. Castillo, L. A. C. Alava, "General Information about the Design of Smart Grids in Universities," *International Research Journal of Engineering IT & Scientific Research (IRJEIS)*, vol. 2, no. 9, pp. 46-52, Sep. 2016.
- [2] S. Dave, M. Sooriyabandara, M. Yearworth, "A Systems Approach to the Smart Grid," in *First International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware*

- Technologies (ENERGY 2011), Venice, Italy, May 22-27, 2011, pp. 130 - 134.
- [3] A. Ghasempour, T. K. Moon, "Optimizing the Number of Collectors in Machine-to-Machine Advanced Metering Infrastructure Architecture for Internet of Things-Based Smart Grid," *2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Kansas City, USA, 02 May 2016*, pp.51-55.
- [4] X. Bin, C. Qing, M. Jun, Y. Yan, Z. Zhixia, "Research on a Kind of Ubiquitous Power Internet of Things System for Strong Smart Power Grid," *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, October, 24, 2019*, pp.2805-2808
- [5] J.Khonrang, K.Boonlom, A.Siri, J.Klinhnu, "The Design and Development of Micro Grid Electrical Power Supply for Seismo Sensor with An Artificial Perceptron Neural Network," *Review of International Geographical Education Online*. 2021, vol. 11 no. 9, pp.2711-2721.
- [6] K.Boonlom, S.Winyangkul, "A Control System of Velocity for Rice Sowing Robot in Mud Rice Field," *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, January, 20, 2019*. (In Thai)
- [7] L.Maziero, T.B.Marchesan, C. H. Barriuello, D. Pinheiro, Bernardon, F. G. Carloto, F. G. Reck, W.D. Vizzotto, F. V. Garcia. "Monitoring of Electric Parameters in the Federal University of Santa Maria Using LoRaWAN Technology," *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, November, 11, 2019*, pp.1-6.
- [8] P. Chaudhari, A. K. Tiwari, S. Pattewar, S. N. Shelke, "Smart Infrastructure Monitoring using LoRaWAN Technology," *2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), Puducherry, India, September,06, 2021*, pp. 1-6.
- [9] K. Boonlorm, S. Winyangkul, A. Siri, "Design and Analysis of Appropriate Drug Order Quantity Using Estimation Static Economical Order Quantity with RFID Technology", *2018 Global Wireless Summit (GWS), Chiang Rai, Thailand, April, 11 2019*, pp.47-50. (In Thai)
- [10] R. Viratikul, K. Boonlom, E. Mancinelli, T. Amsdon, N. Chudpooti, U.W.Hartley, I. Robertson, V.Pensabene, J. Oberhammer, N. Somjit, "Electromagnetic Property Characterization and Sensing of Endothelial Cells Growth Medium and Dulbecco's Phosphate Buffered Saline Solution for in vitro Cell Culture," *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, June, 16, 2022*, pp.1-4. (In Thai)
- [11] M.J. Jeffin, G.M. Madhu, Akshayat Rao, Gurpreet Singh, C. Vyjayanthi, "Internet of Things Enabled Power Theft Detection and Smart Meter Monitoring System", *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, September, 01, 2020*, pp.0262-0267.
-