



การประยุกต์ใช้ระบบเครือข่าย LoRaWAN สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าและการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะ

ธเนศ คณະดี และ ศราวุธ ชัยมูล*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9692 5757 อีเมล: sarachai@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.005

รับเมื่อ 23 กันยายน 2564 แก้ไขเมื่อ 1 มกราคม 2565 ตอบรับเมื่อ 25 มกราคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 11 พฤษภาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งบนพื้นฐานเครือข่ายบริเวณกว้าง LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) ที่ใช้พลังงานต่ำเหมาะกับการใช้งานสำหรับเครื่องมือวัดและระบบการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจากมาตรวัดแบบดั้งเดิมพัฒนาไปเป็นมาตรวัดแบบอัจฉริยะสำหรับระบบการตรวจวัดพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โรงงานและอาคารอัจฉริยะ โดยเครือข่าย LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยี LPWAN ที่มีบทบาทสำคัญและเหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่าย IoT ในการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าอัจฉริยะเพราะสามารถสื่อสารได้ในระยะทางไกล ใช้ความถี่ที่ไม่มีใบอนุญาต และราคาต้นทุนต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบเครือข่าย LoRaWAN สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าและการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะ เพื่อตรวจสอบและจัดการการใช้พลังงานในอาคารอัจฉริยะ โดยใช้โนตเซนเซอร์ (มาตรไฟฟ้าแบบดิจิทัลรวมกับมอดูลสื่อสาร LoRa) วางไว้ในแต่ละชั้นของอาคารและใช้เกตเวย์ LoRaWAN แบบหลายช่องสัญญาณ โดยในการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอได้ทำการวัดและคำนวณตัวบ่งชี้ 3 ตัว คือ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (RSSI) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (PDR) โดยผลการวัดทดสอบพบว่า ค่า RSSI ในแต่ละชั้นจากชั้นที่ไกลที่สุดจนถึงชั้นเดียวกับเกตเวย์มีค่าเฉลี่ย -110 ถึง -33 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ขณะที่ SNR สูงสุดคือ 12.08 เดซิเบล และ SNR ต่ำสุดคือ -5.28 เดซิเบล ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เกตเวย์ 8 ช่องสัญญาณเพียงตัวเดียวสามารถครอบคลุมอาคาร 8 ชั้น โดยที่มีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพและสามารถครอบคลุมของสถานที่ทดสอบทั้งหมด จากการวิเคราะห์ผลผ่านพารามิเตอร์ RSSI SNR และ PDR ที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเครือข่าย LoRaWAN พบว่า การประยุกต์ใช้เครือข่าย LoRaWAN สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้า และการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะสามารถเพิ่มความเชื่อมั่นและความน่าเชื่อถือของระบบการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าอัจฉริยะ

คำสำคัญ: LPWAN อาคารอัจฉริยะ IoT อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า การสื่อสารภายในอาคาร



Application of LoRaWAN-based System for Electric Energy Monitoring and Data Acquisition in a Smart Building

Thanat Kanadee and Sarawut Chaimool*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9692 5757, E-mail: sarachai@kku.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.005

Received 23 September 2021; Revised 1 January 2022; Accepted 25 January 2022; Published online: 11 May 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The Internet of Things (IoT) sensors based on low-power wide-area network technologies have been emerged suitable for the implementation of instruments and measurement systems on a conventional electric meter to develop additional smart meters for distribution transformers, smart factories, and smart buildings. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) can be one of the key promising LPWAN technology as a suitable IoT network connectivity for smart electric metering that offer long-range connectivity, unlicensed frequency, and low cost of deployment. This work presents a smart energy meter based on LoRaWAN to monitor and manage the energy consumption in a smart building. It was conducted by using several LoRa sensor nodes (Energy meter with LoRa module) placed in different floors with a single multichannel LoRaWAN gateway. To evaluate the performance of the proposed system, received signal strength indicator (RSSI), signal-to-noise ratio (SNR) and packet delivery ratio (PDR) were measured and calculated. An average RSSI levels of -110 to -33 decibel-milliwatts were obtained from the same floor and the farthest floor of the sensor node with respect to the gateway, meanwhile the highest SNR is 12.08 decibel and the lowest SNR is -5.28 decibel. The measured results show that a single 8-Ch gateway can cover the 8-floor building with more 80% packet delivery ratio. Actual performance and network coverage using LoRaWAN exceeds expectation for all test locations. It is through the analysis of the RSSI, SNR and PDR for LoRaWAN network performance metrics, therefore, applying monitors and manages that increase the robustness and reliability of the smart energy monitoring system.

Keywords: LPWAN, Smart Building, IoT, Smart Energy Meter, Indoor Communication

Please cite this article as: T. Kanadee and S. Chaimool, "Application of LoRaWAN-based system for electric energy monitoring and data acquisition in a smart building," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1-13, ID. 243-015490, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยี โดยแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้ามีทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะการใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร ตึก หรือที่พักอาศัยที่มีจำนวนชั้นและจำนวนห้องจำนวนมาก เจ้าของหรือผู้รับผิดชอบอาคารจึงต้องทราบถึงปริมาณของการใช้ไฟฟ้าหรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวางแผนจัดการบริหารหรือควบคุมอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าปัจจุบัน จะใช้มาตรวัดหรือมิเตอร์ตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า (Electric Energy Meter) โดยเฉพาะแบบดิจิทัล ซึ่งสามารถวัดและแสดงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า กำลังงาน กระแส แรงดัน ความถี่ ซึ่งมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าดิจิทัลทั่วไปข้อมูลดังกล่าวจะแสดง และถูกเก็บไว้ที่ตัวอุปกรณ์เหล่านั้นในปริมาณและเวลาที่จำกัด ดังนั้นเพื่อให้ข้อมูลในมาตรวัดถูกนำมาบันทึกและนำไปใช้เพื่อการจัดการพลังงาน จึงจำเป็นต้องส่งข้อมูลต่างๆ มายังระบบจัดเก็บข้อมูลซึ่งปัจจุบันแนวโน้มที่จะทำการส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยอาจจะใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) [1] ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ทั้งแบบใช้สายและไร้สาย แต่อย่างไรก็ตาม การส่งข้อมูลแบบไร้สายจะมีความสะดวกมากกว่าการใช้สาย และมีหลากหลายเทคโนโลยีให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้ [2]

ปัจจุบันเครือข่ายไร้สายที่ได้รับความนิยม และเป็นที่นิยมคือเครือข่ายสื่อสารบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ LPWAN (Low Power Wide Area Network) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบหลัก คือ แบบที่ต้องมีใบอนุญาตซึ่งจะใช้ความถี่ในช่วงความถี่โทรศัพท์มือถือ โดยเทคโนโลยี NB-IoT และ CAT-M1 ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีบนเครือข่ายโทรศัพท์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงมาก แต่อย่างไรก็ตาม การใช้กำลังงานที่ใช้ของอุปกรณ์ค่อนข้างสูงและต้องมีค่าบริการจากเครือข่าย [3], [4] ขณะที่แบบไม่มีใบอนุญาตความถี่

ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับความถี่ WiFi คือ ไม่ต้องขอใบอนุญาตในการใช้ แต่จะมีข้อกำหนดอื่นๆ ประกอบ เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมโดยเฉพาะในประเทศไทย คือ LoRaWAN ซึ่งเป็นไปตามประกาศของ กสทช. ที่ช่วงความถี่ 920 ถึง 925 เมกะเฮิรตซ์ [5] โดยในปัจจุบันทางบริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติ-NT [6] (เดิมคือ กสท. โทรคมนาคม) ได้สร้างเครือข่าย LoRaWAN ให้บริการในหลายจังหวัดโดยผู้ใช้บริการสามารถใช้เครือข่ายได้โดยการจ่ายค่าบริการรายเดือน ซึ่งการใช้บริการนี้เหมาะกับผู้ใช้ในกรณีที่มีเครือข่ายการใช้งานขนาดใหญ่หลายจังหวัดหรือ Maker ที่ต้องการทดสอบเฉพาะส่วนการใช้งานของเซนเซอร์ซึ่งไม่จำเป็นต้องสร้างเครือข่ายโดยส่งผ่านเกตเวย์และเซิร์ฟเวอร์ของบริษัท NT อย่างไรก็ตาม ตามประกาศของ กสทช. การสร้างและใช้งาน LoRaWAN สามารถทำเป็นแบบเครือข่ายส่วนบุคคลได้ (Private Network) โดยตัวเกตเวย์และโนดต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดอย่างเคร่งครัดโดยเฉพาะเรื่องของความถี่ กำลังงานที่ส่งออกและเวลาในการส่ง ซึ่งข้อดีของการทำเครือข่ายส่วนบุคคลคือ เหมาะกับการใช้งานเครือข่ายที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก สามารถที่จะออกแบบและสร้างได้ตั้งแต่อุปกรณ์ปลายทางจนถึงเซิร์ฟเวอร์พร้อมๆ กันสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบให้มีความยืดหยุ่นกับสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างอิสระรวมถึงไม่ต้องจ่ายค่าบริการรายเดือนหรือซื้ออุปกรณ์จากผู้ให้บริการ และนอกจากนี้ผลการทดลองเปรียบเทียบความเข้มของสัญญาณต่อระยะทางการส่งสัญญาณและการใช้พลังงานของการสื่อสารไร้สาย 4 แบบ คือ WiFi BLE Zigbee และ LoRaWAN พบว่า LoRaWAN เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำเหมาะสำหรับโครงข่ายสื่อสารบริเวณกว้างโดยเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับงาน IoT [7] นอกจากจะใช้พลังงานที่ต่ำครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างแล้วยังสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเครือข่ายให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8]–[10] รวมถึงการพัฒนาและนำเทคโนโลยี LoRaWAN ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลายอย่างต่อเนื่อง เช่น งานวิจัยทางด้านสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรอัจฉริยะที่ใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณแสง และ

สภาพอากาศ เพื่อรายงานสภาพแวดล้อมผ่านโครงข่าย LoRaWAN [11] โดยพบว่า ระบบสามารถที่จะตรวจสอบสภาพแวดล้อมในพื้นที่ทางไกลได้โดยไม่ต้องอาศัยอินเทอร์เน็ต รวมถึงสามารถจัดเก็บข้อมูลและแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่งานวิจัยที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ LoRaWAN [12] ที่ถูกนำไปใช้ในบริเวณกลางแจ้งและภายในอาคาร เพื่อทดสอบปริมาณพื้นที่ครอบคลุม โดยพบว่า การส่งข้อมูลสามารถครอบคลุมพื้นที่กลางแจ้งในรัศมี 1,850 เมตร มีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จที่ถือว่าน้อยคือ 69 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสภาพแวดล้อมในการทดลองอยู่ในย่านกลางเมืองทำให้การแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะไม่เป็น LOS (Line-of-sight) อย่างไรก็ตาม สำหรับการภายในอาคารพบว่าสามารถครอบคลุมได้ทุกชั้น (อาคาร 9 ชั้น) และในงานวิจัย [13] ได้นำเสนอการใช้ LoRaWAN สำหรับระบบการวัดปริมาณไฟฟ้าในอาคารสาธารณะและหม้อแปลงไฟฟ้าในมหาวิทยาลัย ซึ่งผลการทดลองพบว่า อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จภายในอาคารทดลองมีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวในข้างต้นและความต้องการที่จะจัดเก็บและบันทึกข้อมูลเพื่อการจัดการพลังงานไฟฟ้า ร่วมกับการใช้งานเทคโนโลยี LoRaWAN งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบ LoRaWAN สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าและการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะ เพื่อพัฒนาไปสู่อาคารอัจฉริยะที่สามารถมีระบบเฝ้าดูแลจัดการกับพลังงานไฟฟ้าภายในตัวอาคาร โดยได้ทำการสร้างระบบขึ้นทั้งหมดตั้งแต่โนดเกตเวย์ และเซิร์ฟเวอร์ โดยเฉพาะโนดเนื่องจากมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัลส่วนใหญ่จะมีการวัดและเก็บข้อมูลได้เล็กน้อยในตัวเครื่อง แต่ยั้งขาดในส่วนของการส่งข้อมูล เพื่อที่จะนำไปจัดเก็บและแสดงผลเพื่อการเฝ้าสังเกต หรือนำข้อมูลย้อนหลังมาวิเคราะห์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องออกแบบ และสร้างมาตรวัดใหม่จากมาตรวัดดิจิทัลทั่วไปให้สามารถติดต่อสื่อสาร ส่งข้อมูล และแสดงผลโดยการอินเทอร์เนต ส่วนของการอินเทอร์เฟซระหว่างมาตรวัดกับการสื่อสารตามมาตรฐาน LoRaWAN โดยในการทดลองจะใช้เครือข่ายแบบ Private LoRaWAN เพื่อแสดงให้เห็น

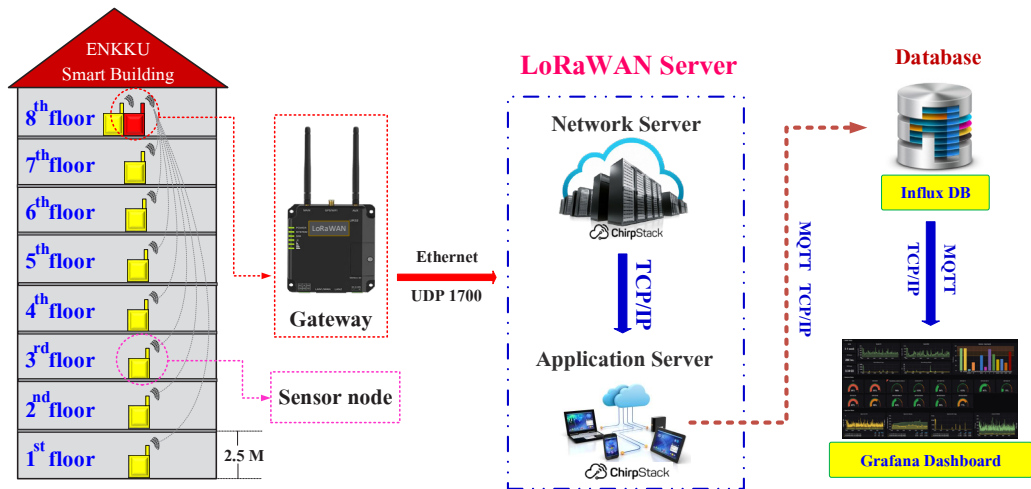
เห็นประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอทั้งความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และเสถียรภาพ ซึ่งบทความนี้ได้แสดงผลในรูปแบบของค่าความเข้มของสัญญาณ (RSSI) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (PDR) จากผลการวัดทดสอบภายในอาคาร 8 ชั้น พบว่า มีค่าความเข้มของสัญญาณรับส่งและอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สามารถใช้งานได้ ขณะที่อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆ ชั้น รายละเอียดของบทความ ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงสถาปัตยกรรมโครงสร้าง LoRaWAN รวมถึงวิธีการทดสอบระบบ และผลการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อที่ 3 และสรุปในหัวข้อที่ 4

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 สถาปัตยกรรมและพารามิเตอร์ที่สำคัญ LoRaWAN

สถาปัตยกรรมและโครงสร้าง LoRaWAN ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 1 [14] ซึ่งเป็นเครือข่ายไร้สายแบบรวมศูนย์ (Centralization) ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) โหนดเซนเซอร์ (Sensor Nodes; SN) 2) เกตเวย์ (Gateway; GW) และ 3) LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ (LoRaWAN Server; LS) โดย SN จะทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพแปลงเป็นข้อมูลทางไฟฟ้าและจัดเรียงข้อมูลตามรูปแบบที่กำหนด เพื่อส่งต่อไปยังเกตเวย์ผ่านมาตรฐานการสื่อสารแบบ LoRa (LoRa เป็นวิธีการมอดูเลชันแบบ CSS-Chirp Spread Spectrum) ขณะที่เกตเวย์จะทำการส่งต่อแพ็กเก็ตข้อมูลไปยัง LS ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งทำได้ทั้งแบบใช้สายอินเทอร์เน็ตหรือแบบไร้สายผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ 3G/4G/5G หรือ WiFi ส่วน LS ทำหน้าที่เป็นเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ โดยเมื่อรับข้อมูลจากเกตเวย์หลายๆ ตัว จะจัดการกับแพ็กเก็ตข้อมูลว่ามีซ้ำกันหรือไม่ ถ้าซ้ำก็จะตัดทิ้งและส่งข้อมูลไปจัดเก็บและแสดงผล หรือสามารถส่งไปยังแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์

โดยพารามิเตอร์หลักที่มีความสำคัญ และใช้สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าและการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะ ประกอบไปด้วย 3 พารามิเตอร์หลัก คือ



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN ประกอบด้วยโนดเซนเซอร์ เกตเวย์ LoRaWAN และแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์

- 1) ค่าความเข้มของสัญญาณ (Receive Signal Strength Indicator; RSSI)
- 2) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio; SNR)
- 3) อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (Packet Delivery Ratio; PDR)

ค่า RSSI เป็นค่าที่ใช้บอกความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ ในเทอมของพลังงานมีหน่วยเป็นเดซิเบลมิลลิวัตต์ ค่า RSSI โดยทั่วไปจะมีค่าเป็นลบ โดยถ้าสัญญาณมีค่า RSSI ลบน้อย แสดงว่าสัญญาณที่รับได้มีความเข้มสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้า RSSI มีค่าลบมากแสดงว่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ มีระดับที่ต่ำซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่ง สัญญาณ โดยสามารถหาค่า RSSI ได้จากสมการที่ (1) [15]

$$RSSI = -10n \log_{10} d + C \quad (1)$$

เมื่อ n เป็นเลขชี้การสูญเสียกำลังระหว่างเส้นทางตาม สภาพแวดล้อม d คือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับ-ส่ง มี หน่วยเป็นเมตร และ C คือ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ ในระยะทาง 1 เมตร มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ [16], [17]

SNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณ รบกวนมีหน่วยเป็นเดซิเบล ซึ่งหาก SNR มีค่ามากกว่าศูนย์

แสดงว่าสัญญาณที่ต้องการมีค่าสูงกว่าระดับสัญญาณรบกวน และหาก SNR มีค่าน้อยกว่าศูนย์ สัญญาณที่ต้องการอยู่ ต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวน แต่อย่างไรก็ตาม LoRa สามารถที่จะมอดูเลตสัญญาณที่อยู่ต่ำกว่าสัญญาณรบกวน ได้ต่ำสุดถึง -20 เดซิเบล ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ กระจายที่กำหนด โดย SNR ของ LoRa สามารถหาค่าได้ จากสมการที่ (2) [18]

$$SNR = RSSI - P_{tx} + 174 - 10 \log_{10} BW - NF \quad (2)$$

เมื่อ P_{tx} คือ กำลังส่งของตัวส่งสัญญาณมีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ BW คือ ความกว้างความถี่ที่ใช้งานหรือ ความกว้างของช่องทางในการรับส่งข้อมูลมีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ และ NF คือ ตัวเลขที่ใช้ระบุค่าของสัญญาณรบกวน ของเครื่องรับ โดยถ้าค่าของสัญญาณรบกวนมีค่าที่ต่ำ ประสิทธิภาพก็จะยิ่งดี

PDR อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ หมายถึงการที่ตัว โนดเซนเซอร์ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังเกตเวย์ โดยที่ตัวเกตเวย์ สามารถรับแพ็กเก็ตข้อมูลทีโนดเซนเซอร์ส่งมาได้ถูกต้อง สมบูรณ์ และไม่เกิดการสูญหายหรือจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูล ไม่ครบระหว่างการรับส่ง โดยค่า PDR คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ร้อยละของจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับต่อจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูล

ที่ถูกส่งทั้งหมด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3)

$$PDR = \frac{N_r}{N_t} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ N_r คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับ และ N_t คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกส่งทั้งหมด

อย่างไรก็ตาม ในระบบ LoRaWAN ยังมีส่วนที่สำคัญในการรับส่งข้อมูลคือ อัตราบิต (Bit Rate) ซึ่งหมายถึงจำนวนบิตของข้อมูลสูงสุด หรือความเร็วในการส่งข้อมูลที่สามารถส่งผ่านได้ในหนึ่งวินาที โดยตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการส่งข้อมูลของ LoRaWAN คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Spreading Factor; SF) เนื่องจาก LoRaWAN ใช้การมอดูเลชัน (การเข้ารหัสสัญญาณ) แบบ LoRa ที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการส่งข้อมูลได้จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแต่ละสัญญาณ chirp (Chirp) จาก SF7 ถึง SF12 โดยสามารถหาค่าความเร็วการรับส่งสัญญาณได้จากสมการที่ (4) [19]

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times \frac{4}{4 + CR} \quad (4)$$

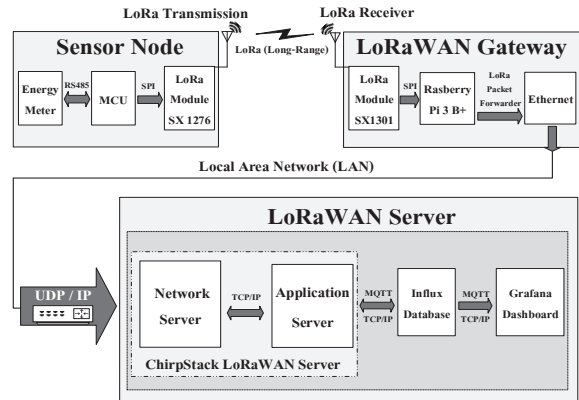
เมื่อ R_b คือ อัตราบิต (บิตต่อวินาที)

SF คือ Spreading Factor มีค่าระหว่าง 7-12

โดยที่ BW คือ ความกว้างของคลื่นความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ และ CR คือ อัตราการเข้ารหัสของข้อมูลเพื่อตรวจสอบ และจัดการความผิดพลาดของข้อมูลในขณะที่กำลังส่งสัญญาณ

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้และวิธีการทดสอบระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบจากสถาปัตยกรรม LoRaWAN รูปที่ 1 โครงสร้าง อุปกรณ์ และโพรโทคอล การเชื่อมต่อระหว่างส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2 โดยโนตเซนเซอร์ประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328PU ที่ใช้ในการประมวลผลจากการอ่านค่าพารามิเตอร์จากมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าผ่านการสื่อสาร RS485 แบบ Modbus RTU [20] และทำการจัดรูปแบบของแพ็กเก็ตตามมาตรฐาน



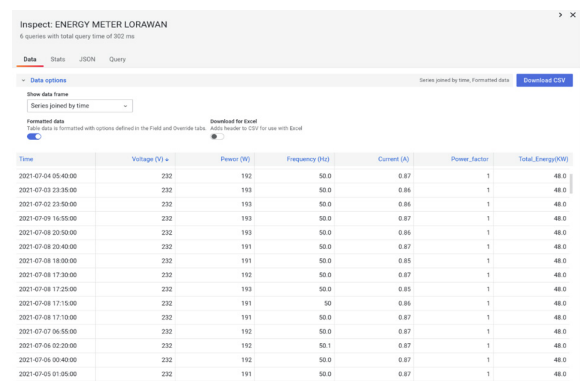
รูปที่ 2 โครงสร้าง อุปกรณ์ และโพรโทคอลการเชื่อมต่อมาตรวัดไฟฟ้า เกตเวย์ และ LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์

LoRaWAN รวมถึงโปรแกรมกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ LoRa เช่น SF ความถี่หรือช่องสัญญาณ ขนาดข้อมูล (Payload) ซึ่งแพ็กเก็ตเหล่านี้จะถูกทำการมอดูเลชันผ่านมอดูล LoRa เบอร์ SX1276 [21] ที่มีย่านความถี่แบบกว้าง (Wideband) สามารถกำหนดใช้ความถี่ได้ตั้งแต่ 137 ถึง 1,020 เมกะเฮิรตซ์ กำลังส่งสูงสุด 20 เดซิเบลมิลลิวัตต์ (งานวิจัยนี้ใช้ย่านความถี่ 923 ถึง 924 เมกะเฮิรตซ์ และกำหนดกำลังส่ง 14 เดซิเบลมิลลิวัตต์ตลอดการทดสอบ) สื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมแบบซิงโครนัส (Serial Peripheral Interface; SPI) โดยมอดูล LoRa ก็จะทำหน้าที่สื่อสารแบบไร้สายกับเกตเวย์ตามระยะทางและพารามิเตอร์ที่กำหนด ตัวเกตเวย์ในที่นี้จะใช้เกตเวย์ 8 ช่องสัญญาณ ซึ่งกำหนดตามมาตรฐานของ AS923 ซึ่งตัวเกตเวย์ใช้มินิคอมพิวเตอร์ RPI (Raspberry Pi) ทำงานร่วมกับชิป LoRa-SX1301 [22] ที่เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจากคลื่นวิทยุ (Digital Baseband Chip) ย่านความถี่สาธารณะ (Industrial Sciences Medicine; ISM) ถูกออกแบบมาให้ใช้เฉพาะสำหรับเป็นเกตเวย์ที่สามารถรับ และมอดูเลตได้หลายคลื่นความถี่ในเวลาเดียวกันของเครือข่าย LoRaWAN โดยเชื่อมต่อเข้ายังเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านสาย Ethernet ไปยัง LoRaWAN Server (LS) โดยเกตเวย์ทำการจัดเรียง และส่งต่อแพ็กเก็ตข้อมูลที่ได้รับจากโนตเซนเซอร์ไปยัง LS ซึ่งเป็นหัวใจหลักของเครือข่าย LoRaWAN โดยใช้เครื่องเซิร์ฟเวอร์

ขนาดเล็กทำงานบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ - Ubuntu ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ LS แบบโอเพนซอร์สที่ชื่อว่า Chirpstack LoRa Server [23] โดยส่วนประกอบภายในจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ (Network Server; NS) และแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server; AS) โดย NS จะทำหน้าที่ในการบริหารจัดการเกี่ยวกับโปรโตคอลและข้อมูลเกี่ยวกับ LoRaWAN และจะจัดการแพ็กเก็ตข้อมูลที่ได้รับมาจากเกตเวย์ซึ่งจะทำการกำจัดแพ็กเก็ตที่ซ้ำกันที่เข้ามาจากเกตเวย์หลายตัว และทำการส่งต่อข้อมูลไปยัง AS เพื่อทำการถอดรหัสข้อมูลรวมถึงส่งต่อข้อมูลที่ได้ทำการถอดรหัสแล้วไปจัดเก็บบันทึกยังฐานข้อมูล และแสดงผลโดยที่ NS มีวิธีการส่งต่อข้อมูลไปยัง AS ในหลายรูปแบบโดยเฉพาะโปรโตคอล MQTT [24] อย่างไรก็ตาม Chirpstack ได้ทำการอินทิเกรตส่วนของการแสดงผลโดยใช้ Grafana Dashboard [25] และส่วนของการเก็บข้อมูลใน Influx DB [26] ตัวอย่างการแสดงผลบน Grafana และเก็บข้อมูลบน Influx DB แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ นำเข้าข้อมูลมาจาก Influx DB โดยโครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลที่ถูกส่งจะอยู่ในรูปแบบการจัดเรียงตามมาตรฐานของ CayenneLPP (Cayenne Low Power Payload) [29] ซึ่งเป็นรูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลทำให้ขนาดของข้อมูลที่ส่งมีขนาดเล็กกลง โดยข้อกำหนดขนาดข้อมูลของ CayenneLPP ประกอบไปด้วยส่วนหัวที่มีขนาด 11 ไบต์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือลำดับพารามิเตอร์แต่ละตัวในอุปกรณ์ ประเภทของข้อมูล และรหัสคีย์ที่ใช้ในการยืนยันตัวตนกับ LS ซึ่งในงานวิจัยนี้จะส่งข้อมูลพารามิเตอร์และปริมาณไฟฟ้าที่มีขนาดรวมทั้งหมด 24 ไบต์ และปิดท้ายด้วยตัวตรวจจับข้อผิดพลาดที่แพ็กเก็ต (CRC) จำนวน 2 ไบต์ รวมเป็น 37 ไบต์ ทั้งนี้ เนื่องจากมีข้อกำหนดตามมาตรฐานของ กสทช. เรื่องกำลังงานที่ส่งรวมกับอัตราขยายสายอากาศ EIRP ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 50 มิลลิวัตต์ (กำลังส่ง 14 เดซิเบล มิลลิวัตต์ + อัตราขยายสายอากาศ 3 เดซิเบลไอโซโทรปิก) ที่ไม่ต้องขออนุญาตทดสอบ ซึ่งตัวโมดูลเซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ SX1276 และเกตเวย์ที่ใช้ SX1301 ที่สามารถกำหนดกำลังงานส่งให้ไม่เกิน 14 เดซิเบลมิลลิวัตต์ โดยพารามิเตอร์และข้อกำหนดในการ



(ก)



(ข)

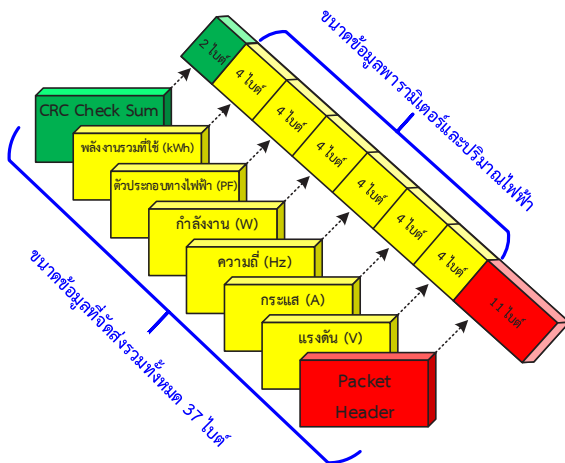
รูปที่ 3 ตัวอย่างการแสดงผลและเก็บข้อมูลการใช้พลังงาน

(ก) Grafana Dashboard และ (ข) ฐานข้อมูล Influx DB

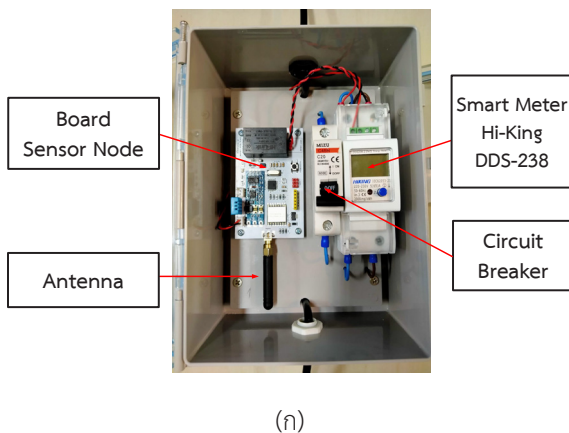
ทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 และรายละเอียดขนาดของข้อมูลพารามิเตอร์และปริมาณไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และข้อกำหนดในการทดสอบระบบ

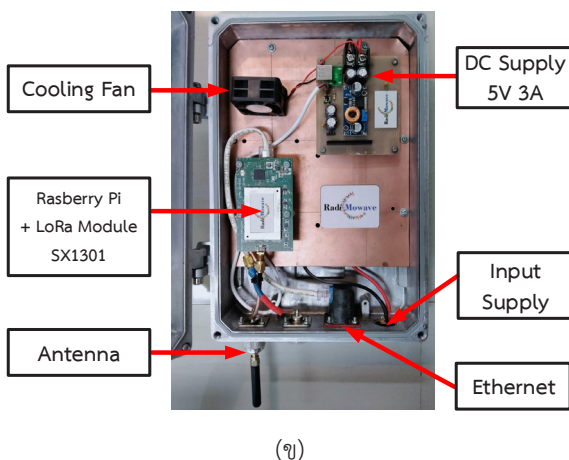
พารามิเตอร์ในการทดสอบ	ข้อกำหนด
Spreading Factor (SF)	7-12
แบนด์วิดท์ (Bandwidth; BW)	125 kHz
อัตราเข้ารหัส (Code Rate; CR)	4
กำลังงานส่งของมอดูล LoRa	14 dBm
ช่องความถี่ (MHz)	923.2, 923.4, 923.6, 924.0
อัตราขยายสายอากาศโมโนโพล	3 dBi
ไลบรารี LoRaWAN ที่ใช้	lmic v5.0 [27]
LoRa Server Version	3.10.0 [28]
ขนาดข้อมูล (Payload; PL)	37 ไบต์
ความถี่ในการส่งแพ็กเก็ต	ทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ขนาดของแพ็กเก็ตการวัดและปริมาณไฟฟ้า



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) เกตเวย์ที่ใช้งาน และ (ข) โหนดเซนเซอร์

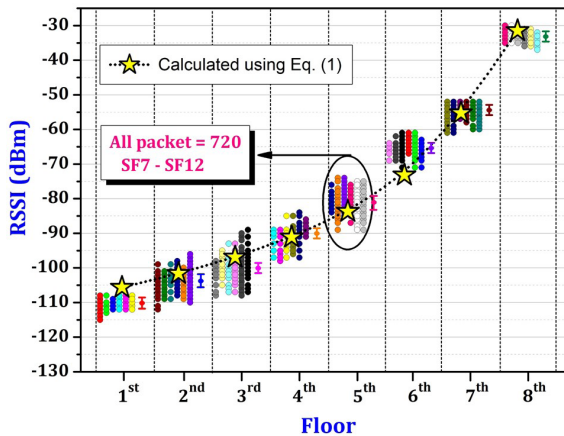


รูปที่ 6 ตำแหน่งติดตั้งโนดและเกตเวย์ที่ใช้ในการทดลอง

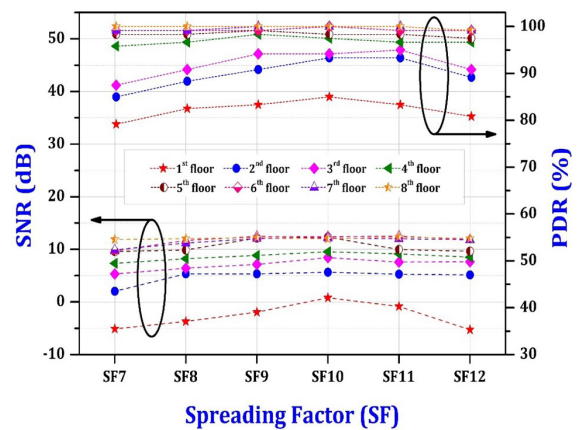
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบที่ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่มีขนาดความสูง 8 ชั้น แต่ละชั้นสูงประมาณ 2.5 เมตร โดยจะติดตั้งเกตเวย์ ที่ชั้น 8 จำนวน 1 ตัว [รูปที่ 5 (ก)] และเพื่อให้ได้ระยะในการทดสอบมากที่สุดจะทำการติดตั้งโนด ไร้ที่ชั้น 1 ถึงชั้น 8 ชั้นละ 1 โหนด [รูปที่ 5 (ข)] โดยจะวางโนดเซนเซอร์ทุกตัว และเกตเวย์ให้อยู่ตำแหน่งตามแนวตั้งให้ตรงกัน โดยให้สายอากาศวางขนานกับพื้น เพราะเป็นทิศทางอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้ ตำแหน่งการติดตั้งโนดเซนเซอร์และเกตเวย์แสดงดังรูปที่ 6

3. ผลการทดลอง

จากผลการวัดทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบตั้งแต่โนดเซนเซอร์ส่งข้อมูลผ่านเกตเวย์ไปจนถึง LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ โดยใช้พารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ตัวในการวัดและประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย RSSI SNR และ PDR โดยผลการทดสอบค่า RSSI ของแต่ละชั้นที่ SF ต่างกันแสดง ดังรูปที่ 7 ทั้งค่าคำนวณจากสมการที่ (1) และค่าวัดทดสอบที่ได้จากเกตเวย์ซึ่งจะ



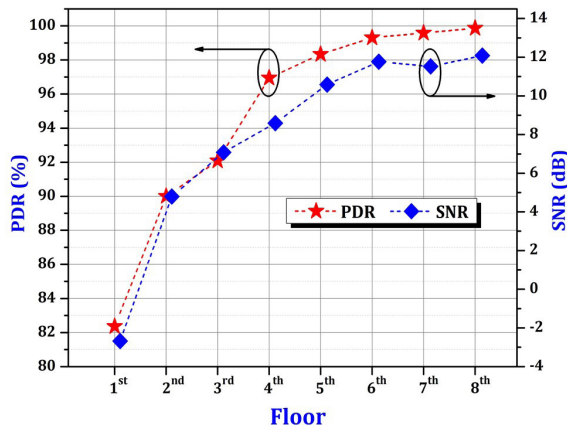
รูปที่ 7 ค่า RSSI จากการคำนวณตามสมการที่ (1) และจากการวัดทดสอบในแต่ละชั้นที่ SF ต่างกัน



รูปที่ 8 ค่า SNR เฉลี่ยและร้อยละของอัตราในการส่งข้อมูลสำเร็จ PDR ของแต่ละชั้นที่ SF ต่างกัน

สังเกตเห็นว่าค่าทั้งสองสอดคล้องกัน โดยเมื่อระยะของโนตเซนเซอร์กับเกตเวย์ห่างกันมากขึ้นก็จะทำให้ค่า RSSI มีค่าลดลงตามระยะทาง และจะสังเกตเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนค่า SF จาก SF7 ถึง SF12 ค่าเฉลี่ยของ RSSI ในแต่ละชั้นก็มีค่าใกล้เคียงกัน หรืออาจจะกล่าวได้ว่า SF จากการทดสอบส่งผลต่อค่า RSSI น้อย โดยค่า RSSI เฉลี่ยต่ำสุดมีค่าประมาณ -112 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เมื่อโนตเซนเซอร์ติดตั้งที่ชั้น 1 และเกตเวย์อยู่ชั้น 8 ซึ่งค่า RSSI นี้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่มอดูลสามารถรับได้ -136 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ที่ SF12 นอกจากนี้ค่า RSSI ขึ้นอยู่กับ SF ยังขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์โดยถ้าใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นค่า RSSI ก็จะมีค่ามากขึ้น เช่น ถ้า BW เพิ่มจาก 125 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ SF12 ค่า RSSI เพิ่มจาก -136 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เป็น -130 เดซิเบลมิลลิวัตต์ หรือจะกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่ม BW เพิ่มขึ้นแนวโน้มของระยะทางที่รับได้จะสั้นลง เนื่องจากการเพิ่ม BW จะทำให้ความไวในการรับสัญญาณ (Sensitivity) ต่ำลง ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จน้อยลง [30] อย่างไรก็ตาม อย่างที่ทราบกันระดับของสัญญาณ RSSI จากโนตเซนเซอร์หรือเกตเวย์อื่นๆ ซึ่งอาจจะทำให้ค่าที่รับได้สูงขึ้น แต่อาจจะไม่ใช่สัญญาณที่ต้องการ ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้ค่า SNR เป็นพารามิเตอร์ในการประเมินคุณภาพของสัญญาณ [31], [32] รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบ SNR และ PDR เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า

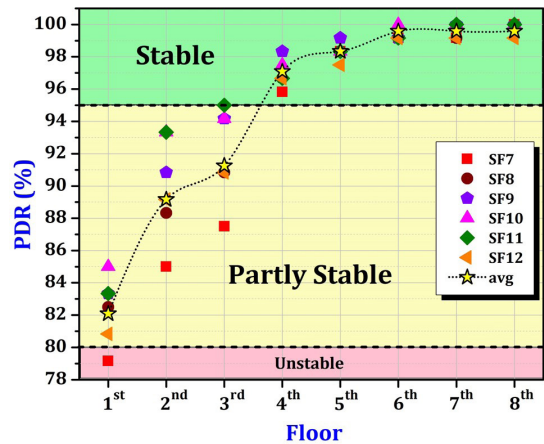
SF ของแต่ละชั้น จากรูปจะพบว่า ค่า SNR เฉลี่ยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่า SNR เป็นบวก และเป็นลบ (LoRa ยังสามารถสื่อสารได้แม้ SNR เป็นลบ) โดย SNR ที่เป็นลบจะเกิดขึ้นที่ชั้นที่ 1 มีค่าตั้งแต่ -5.28 ถึง -0.86 เดซิเบล ในขณะที่ชั้นอื่นๆ จะมีค่า SNR เป็นบวกโดยมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างจากโนตเซนเซอร์และเกตเวย์ลดลงโดยมีค่า SNR เฉลี่ยของชั้น 2 ประมาณ 4 เดซิเบล และสูงสุดที่ชั้น 8 ซึ่งเป็นชั้นเดียวกันกับเกตเวย์ที่ $SNR = 12.08$ เดซิเบล เมื่อทำการเปรียบเทียบ RSSI และ SNR จะพบว่า ถึงแม้ว่าค่า RSSI ในแต่ละชั้นจะแตกต่างกันและแยกชุดออกมาในแต่ละชั้นแต่ในกรณีของ SNR จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันค่อนข้างมากโดยเฉพาะชั้นที่ 6 ถึงชั้นที่ 8 ที่มีค่า SNR ในแต่ละ SF แทบจะไม่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อแยกความแตกต่างกันในแต่ละชั้นให้ชัดเจน และเพื่อให้ทราบจำนวนของข้อมูลที่ส่งไปแล้วสามารถรับได้ที่ LS ในที่นี้จะใช้ร้อยละของอัตราในการส่งข้อมูลสำเร็จ PDR (จำนวนที่ส่ง 120 แพ็กเก็ตต่อแต่ละ SF) แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งจะพบว่า อัตราการส่งข้อมูลทุกๆ ชั้น ทุกๆ SF มีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ถ้ามีการส่งข้อมูล 100 ครั้งจะสามารถรับได้มากกว่า 80 ครั้ง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า SNR และ PDR มีความสัมพันธ์และสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันโดยอาจจะสรุปว่า SNR เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพในการสื่อสาร และเป็นตัวทำนายค่า PDR เนื่องจาก SNR สามารถ



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ย SNR เทียบกับ PDR ของแต่ละชั้น

แยกระดับสัญญาณเป้าหมายที่ต้องการออกจากสัญญาณอื่นๆ ซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพสัญญาณที่แท้จริง รวมถึงความแรงสัมพันธ์ของสัญญาณเหนือระดับสัญญาณรบกวน ความสัมพันธ์ของ SNR และ PDR แสดงดังรูปที่ 9

นอกจากนี้เพื่อบอกระดับความมีเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูลภายในอาคารของระบบ [33] ผู้วิจัย [34] ได้นำเสนอการแบ่งระดับความเสถียรของสัญญาณออกเป็น 3 ระดับ โดยใช้ PDR ที่เป็นค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ กล่าวคือ เป็นจำนวนของข้อมูลที่ส่งไปแล้วสามารถรับได้ที่ LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ และใช้การวิเคราะห์จากร้อยละของอัตราในการส่งข้อมูลสำเร็จ PDR ที่มีจำนวนส่ง 120 แพ็กเก็ตต่อแต่ละ SF โดยพิจารณาจากแพ็กเก็ตที่โน้ตเซนเซอร์ส่งไปแล้ว LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ได้รับ โดยที่แพ็กเก็ตข้อมูลสมบูรณ์สามารถถอดรหัสได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ สัญญาณเสถียร ($PDR \geq 95\%$) ค่อนข้างเสถียร ($80\% \leq PDR < 95\%$) และไม่เสถียร ($PDR < 80\%$) จากการทดสอบสามารถแสดงระดับความเสถียรของสัญญาณเทียบกับค่าเฉลี่ย PDR ของแต่ละชั้นที่ SF ต่างกันดังรูปที่ 10 ซึ่งจะพบว่า สัญญาณที่ทดสอบมีความเสถียรและค่อนข้างเสถียรเกือบทั้งหมด ยกเว้นที่ SF7 ของชั้นที่ 1 ที่มีค่าในระดับไม่เสถียรที่ PDR เท่ากับ 79 เปอร์เซ็นต์ และถ้ามองตามแต่ละชั้นในทุกๆ SF จะพบว่าชั้น 1 ถึงชั้น 3 จะมีสัญญาณที่ค่อนข้างเสถียรขณะที่ชั้น 4 ถึงชั้น 8 สัญญาณจะอยู่ในระดับเสถียรหรือค่า PDR มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 10 ระดับความเสถียรของสัญญาณเทียบกับค่าเฉลี่ย PDR ของแต่ละชั้นที่ SF ต่างกัน

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่โน้ตเซนเซอร์อ่านจากมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าแล้วส่งผ่านเกตเวย์ไปยัง LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 นั้น มีการส่งข้อมูลไปจัดเก็บบันทึกและแสดงผลได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือ สามารถที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมาบันทึกในฐานข้อมูลรวมถึงแสดงผลทางหน้าจอแผงควบคุมได้ทุกชั้นจากชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 8 ภายในอาคาร โดยในส่วนของตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า เมื่อโน้ตเซนเซอร์มีระยะห่างจากเกตเวย์มากขึ้น ค่า RSSI SNR และ PDR ก็จะมีค่าต่ำลงขณะเดียวกันยังพบว่า PDR นั้น มีความสัมพันธ์กับค่า SNR โดยตรง และการจำแนกความเสถียรของสัญญาณตามค่าของ PDR ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า สัญญาณที่ทดสอบมีความเสถียรและค่อนข้างเสถียรเกือบทั้งหมดในทุกชั้นและทุก SF อย่างไรก็ตาม ถ้าจะนำระบบ LoRaWAN ไปใช้ในอาคารจะต้องคำนึงถึง SF เป็นสำคัญ โดยเฉพาะถ้าทราบขนาดข้อมูล (Payload) ในการรับส่ง โดยแต่ละ SF จะมีค่าขนาดของข้อมูลสูงสุดที่จำกัด โดยที่ SF7 จะสามารถส่งข้อมูลได้ขนาดใหญ่ที่สุด และ SF12 จะส่งข้อมูลได้ขนาดเล็กที่สุด ตัวอย่างขนาดของข้อมูลสูงสุดในแต่ละ SF แสดงดังตารางที่ 2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ

การใช้เทคโนโลยีสื่อสารแบบไร้สาย เช่น WiFi ซึ่งจะพบว่า LoRaWAN สามารถใช้งานภายในอาคารได้ไกลและทะลุทะลวงได้ดีกว่าโดยใช้เทคโนโลยีเพียงตัวเดียว นอกจากนี้ถึงแม้ว่าในการทดสอบจะทำการทดสอบกับอาคารเพียง 8 ชั้น แต่การนำระบบเครือข่าย LoRaWAN สำหรับการตรวจสอบพลังงานไฟฟ้า และการจัดเก็บข้อมูลในอาคารอัจฉริยะไปใช้ในอาคารที่มีจำนวนชั้นมากกว่า 8 ชั้น และโครงสร้างที่แตกต่างออกไปน่าจะสมารถนำไปใช้งานได้ไม่แตกต่างมากนักเพราะข้อจำกัดของ SNR ของ SF12 ที่ต่ำสุดที่จะใช้งานได้คือ -20 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ดังตารางที่ 2 ซึ่งจากผลการวัดทดสอบค่า SNR ที่ต่ำสุดที่วัดได้ในกรณี 8 ชั้น คือ -5.28 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ดังนั้น ระบบคาดว่าจะยังสามารถใช้งานเพิ่มได้อีกหลายชั้น

ตารางที่ 2 ขนาดของข้อมูลสูงสุดและข้อจำกัดของ SNR ในแต่ละ SF ที่แบนด์วิธ 125 กิโลเฮิร์ตซ์

SF	Physical Bit Rate (bps)	Max. Frame Payload Size (Byte)	RSSI Sensitivity (dBm)	SNR Limit (dB)
7	5470	222	-123	-7.5
8	3125	222	-126	-10
9	1760	115	-129	-12.5
10	980	51	-132	-15
11	440	51	-134.5	-17.5
12	250	51	-137	-20

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ในการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร ซึ่งการทราบถึงปริมาณของการใช้ไฟฟ้าก็จะสามารถเข้าใจพฤติกรรมการใช้พลังงานได้มากขึ้น รวมถึงสามารถระบุแนวทางหรือศักยภาพในการปรับเปลี่ยนการใช้พลังงานให้เหมาะสมและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยข้อมูลการใช้พลังงานที่อ่านได้จากมาตรวัดพลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งจาก LoRaWAN เซิร์ฟเวอร์ ไปยังระบบคลาวด์หรืออินเทอร์เน็ตผ่านโครงข่าย LoRaWAN ทำให้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อใช้ในการจัดการพลังงานได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งเกตเวย์ไว้บนชั้นที่ 8

ของอาคารโดยที่โนดเซนเซอร์ในทุกชั้นสามารถที่จะส่งข้อมูลได้ ดังนั้นในการนำระบบไปใช้งานจริงควรจะติดตั้งเกตเวย์ไว้ในชั้นกึ่งกลางของอาคาร (กรณีที่มีโนดเซนเซอร์ติดตั้งภายนอกห้อง) เพื่อให้สามารถครอบคลุมโนดเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในชั้นที่ห่างออกไปภายในอาคารได้หลายชั้นมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Xu and A. Helal, "Scalable cloud-sensor architecture for the Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 285–298, 2016.
- [2] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT," in *Proceedings IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2018, pp. 197–202.
- [3] R. Sinha, Y. Wei, and S. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2017.
- [4] P. Masek, M. Stusek, K. Zeman, R. Drapela, A. Ometov, and J. Hosek, "Implementation of 3GPP LTE Cat-M1 technology in NS-3: System simulation and performance," in *Proceedings 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Dublin, Ireland, 2019, pp. 1–7.
- [5] NBTC. (2017, November). *Technical standards*



- of telecommunication equipment and for radiocommunication equipment Non-RFID, which uses the frequency band 920-925 MHz NBTC TS 1033-2560. [Online]. Available: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/289/51.PDF>
- [6] CAT Telecom PCL. (2019, May). *Internet of things long range IoT*. [Online]. Available: <https://loraiot.cattelcom.com/site/home>
- [7] S. Sadowski and P. Spachos, "RSSI-based indoor localization with the internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149–30161, 2018.
- [8] S. Chaimool and K. Boonlom, "Evaluation of IoT LoRaWAN for smart cities: Environment monitoring use-case," in *Proceedings 41th Electrical Engineering Conference*, 2018 (in Thai).
- [9] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [10] F. Adelantado, X. Vilajosana, P.T. Peiro, B. Martinez, J.M. Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017.
- [11] P. Boonyopakom and T. Thongna, "Environment monitoring system through LoRaWAN for smart agriculture," in *Proceedings 5th International Conference on Information Technology (InCIT)*, Chon Buri, Thailand, 2020, pp. 12–16 (in Thai).
- [12] M. M. Erbatl, G. Schiele, and G. Batke, "Analysis of LoRaWAN technology in an outdoor and an indoor scenario in Duisburg-Germany," in *Proceedings 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Nagoya, Japan, 2018, pp. 273–277.
- [13] L. Maziero, T.B. Marchesan, C.H. Barriquello, D.P. Bernardon, F. G. Carloto, F. G. Reck, W. D. Vizzotto, and F. V. Garcia, "Monitoring of electric parameters in the federal university of Santa Maria using LoRaWAN technology," in *Proceedings IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Gramado, Brazil, 2019, pp. 1–6.
- [14] M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükkakşar, and H. A. Evirgen, "Survey on LoRaWAN architecture, protocol and technologies," *Future Internet*, vol. 11, no. 10, 2019.
- [15] P. Gotthard and T. Jankech, "Low-cost car park localization using RSSI in supervised lora mesh networks," in *Proceedings 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, Bremen, Germany, 2018, pp. 1–6.
- [16] S. Hosseinzadeh, H. Larijani, K. Curtis, A. Wixted, and A. Amini, "Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment," in *Proceedings IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Emden, Germany, 2017, pp. 26–31.
- [17] B. Islam, M. T. Islam, J. Kaur, and S. Nirjon, "LoRaIn: Making a case for LoRa in indoor localization," in *Proceedings IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Kyoto, Japan, 2019, pp. 423–426.
- [18] M. J. Faber, K. M. van der Zwaag, W. G. V. dos Santos, H. R. d. O. Rocha, M. E. V. Segatto, and J. A. L. Silva, "A theoretical and experimental evaluation on the performance of LoRa

- technology,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 16, pp. 9480–9489, 2020.
- [19] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Mona-Cruz, and G. Rouyer, “Analytical and simulation study for LoRa modulation,” in *Proceedings 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Saint Malo, France, 2018, pp. 655–659.
- [20] Nectec. (2020, May). *Industrial communication with modbus protocol*. [Online]. Available: <https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/modbus-protocol.html>
- [21] Semtech. (2017, December). *Semtech SX1276 LoRa core*. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>
- [22] Semtech. (2019, January). *Semtech SX1301 LoRa core*. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1301>
- [23] O. Brocaar. (2015, January). *The chirpStack open-source LoRaWAN network server*. [Online]. Available: <https://www.chirpstack.io>
- [24] B. Mishra and A. Kertesz, “The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020.
- [25] Grafana Labs. (2014, August). *Grafana the open observability platform*. [Online]. Available: <https://grafana.com/oss/grafana>
- [26] Influxdata. (2015, February). *Build on influxDB*. [Online]. Available: <https://www.influxdata.com/products/influxdb>
- [27] M. Skoijman. (2016, February). *Arduino LMIC library LoRaWAN*. [Online]. Available: <https://github.com/matthijskooijman/lmic>
- [28] O. Brocaar. (2020, July). *ChirpStack network server*. [Online]. Available: <https://github.com/brocaar/chirpstack-network-server>
- [29] Cayenne Docs. (2016, February). *Cayenne low power payload*. [Online]. Available: <https://mydevices.com/cayenne/docs/lora>
- [30] M. Bor and U. Roedig, “LoRa transmission parameter selection,” in *Proceedings 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Ottawa, Canada, 2017, pp. 27–34.
- [31] K. Lin and T. Hao, “Experimental link quality analysis for LoRa-based wireless underground sensor networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 8, pp. 6565–6577, 2021.
- [32] N. Jovalekic, V. Drndarevic, I. Darby, M. Zennaro, E. Pietrosemoli, and F. Ricciato, “LoRa transceiver with improved characteristics,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 6, pp. 1058–1061, 2018.
- [33] W. Xu, J. Y. Kim, W. Huang, S. S. Kanhere, S. K. Jha, and W. Hu, “Measurement, characterization, and modeling of LoRa technology in multifloor buildings,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 298–310, 2020.
- [34] I. Bobkov, A. Rolich, M. Denisova, and L. Voskov, “Study of LoRa performance at 433 MHz and 868 MHz bands inside a multistory building,” in *Proceedings Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1–6.