

การทดสอบสมรรถนะระหว่างโครงข่าย ZigBee LoRa และ IEEE1888 สำหรับ การประยุกต์ใช้ในระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชน

ธนากร อินทสุทธิ^{1*} กฤษณะ สุริยะ²

^{1,2}หลักสูตรวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, จังหวัดสงขลา, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : tanakorn.i@rmutsv.ac.th

รับต้นฉบับ: 28 ตุลาคม 2563; รับประทานฉบับแก้ไข: 2 ธันวาคม 2563; ตอรับบทความ: 8 ธันวาคม 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

ระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชนตามมาตรฐาน IEEE1888 ประกอบด้วยอาคารต่าง ๆ ที่มีระบบวัดและเกตเวย์ (Gateway, GW) โดยเชื่อมโยงกับระบบเพื่อบริหารข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีระบบไร้สายในสถานที่ต่าง ๆ โดยส่วนมากใช้งาน ZigBee ซึ่งมีข้อจำกัดในการสื่อสารระยะสั้นเท่านั้น ดังนั้นบทความนี้จะพัฒนาการขยายระบบระหว่าง ZigBee ไปยัง LoRa ผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (Aggregator, AG) และส่งต่อไปยังระบบในมาตรฐาน IEEE1888 ได้ โดยผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ (1) การวัดดัชนีความแรงสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ในกรณี ZigBee มีค่า RSSI เพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่มเติมภายในอาคารตั้งแต่ 5 ถึง 20 เมตร และกรณี LoRa มีสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ทดสอบสูงสุดที่ระยะ 573 เมตรด้วยค่า RSSI เท่ากับ -95.1 dBm (2) การทดสอบอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลพบว่ากรณีส่งข้อมูลแบบสม่ำเสมอด้วยคาบเวลา 700 มิลลิวินาทีขึ้นไป จะมีอัตราส่งสำเร็จ 100% แต่กรณีแบบสุ่มมีอัตราส่งสำเร็จเพียง 60 % และ (3) การทดสอบเกตเวย์โดยเปรียบเทียบระยะช่วงเชื่อมต่อ (hop) ระหว่างเกตเวย์กับเครื่องบริการ (Server) ในระยะห่าง 1 ช่วง ค่าเวลาไปกลับ (Round Trip Time, RTT) ไม่เกิน 100 มิลลิวินาที แต่กรณี 18 ช่วง พบว่าค่า RTT เพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เท่า ดังนั้นผลทดสอบนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาเพื่อให้มีความเหมาะสมในการขยายระบบต่อไปในอนาคตได้

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบบริหารจัดการพลังงาน อัตราส่วนการจัดส่งกลุ่มข้อมูล IEEE1888

Performance Testing between ZigBee, LoRa and IEEE1888 Networks in Community Energy Management System

Tanakorn Inthasuth^{1*} Kritsana Sureeya²

^{1*,2}*Telecommunication Engineering Program, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: tanakorn.i@rmutsv.ac.th

Received: 28 October 2020; Revised: 2 December 2020; Accepted: 8 December 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

The Community Energy Management System (CEMS) with IEEE1888 standard comprises buildings with metering systems and gateways (GW), which are linked to the system for efficient data management, and wireless systems installed in various places, which ZigBee is mostly used with the limitation only on short-range communication. Therefore, this paper presents the system development that extends the transmission from within ZigBee range to LoRa through aggregator (AG) and enables the transmission to be forwarded to the system with IEEE 1888 standard. The test results can be divided into 3 parts as follows: (1) Received Signal Strength Indicator (RSSI). For ZigBee, RSSI value increases from 5 to 20 meters upon an additional repeater is installed within the building. For LoRa, the maximum coverage in the test area reaches 573 meters with RSSI value equal to -95.1 dBm. (2) AG test. The result finds that in the case of data transmission is consistent with the period of 700 milliseconds and higher, the success rate is 100%. However, in the case of random transmission, the success rate is only 60%. (3) GW test, which is conducted by comparing the hop between GW and server. For the distance of 1 hop, the Round Trip Time (RTT) value does not exceed 100 milliseconds. Nevertheless, for the distance of 18 hops, the RTT value increase more than 4 times. Consequently, the tests in this research can be used as a guideline for design and development to optimize the future system extension.

Keywords: Internet of Things, Energy Management System, Packet Delivery Ratio, IEEE1888.

1) บทนำ

ระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชน (Community Energy Management System, CEMS) สามารถตอบโจทย์ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ โดยอาศัยเทคโนโลยีสารสนเทศมาผนวกกับระบบไฟฟ้าเดิม เพื่อให้มีการโต้ตอบของข้อมูลระหว่างระบบผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ไปจนถึงผู้ใช้หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างทันทั่วถึงและมีการทำงานร่วมกันได้ในมาตรฐานสื่อสารเดียวกัน ได้แก่ มาตรฐาน IEEE1888 หรือ ETSI M2M [1] ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าหรืออุปกรณ์รับรู้ผ่านโครงข่ายสื่อสาร แต่ในบางพื้นที่อาจจะมีจุดข้อของสัญญาณ ดังนั้นในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถใช้โครงข่ายสื่อสารเฉพาะกิจ (ad-hoc) ได้แก่ ZigBee [2], 6LoWPAN [3] ฯลฯ แต่เทคโนโลยีดังกล่าวนี้มีการสื่อสารระยะสั้น (short-range) หรือส่งข้อมูลต่อ ๆ กันระหว่างห้องในระยะทางที่จำกัดเท่านั้น โดย แต่ถ้าต้องการส่งข้อมูลในระยะไกล (long-range) จำเป็นต้องใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารโครงข่ายบริเวณกว้างกำลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network, LPWAN) จึงเหมาะสมกว่า ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีราคาต้นทุนต่ำ ประหยัดพลังงาน และสื่อสารได้บริเวณที่ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น [4] รวมถึงนำมาขยายโครงข่ายสื่อสารจากระยะสั้นภายในอาคารไปเชื่อมต่อกับจุดต่าง ๆ แบบระยะไกลได้ เพื่อขยายระบบวัดได้กว้างมากขึ้น [5] ดังนั้นการพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารไร้สายในระบบบริหารจัดการพลังงานจำเป็นต้องใช้งานเทคโนโลยีที่เหมาะสม

การเลือกใช้งานระบบสื่อสารแบบไร้สายแบบระยะสั้นนั้น ขึ้นกับในแต่ละระบบว่ามีความต้องการแบบใด โดยในงานวิจัย [6] ได้พัฒนาระบบโครงข่ายรับรู้ไร้สายโดยใช้งาน 6LoWPAN ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ แต่จำเป็นต้องใช้งานหมายเลข IP ทั้ง IPV4 หรือ IPV6 ในการใช้งาน แต่ขณะที่งานวิจัยที่ได้ใช้งาน ZigBee [7] สามารถเชื่อมโยงโครงข่ายโดยใช้งานหมายเลขระบุตัวตนประจำโครงข่ายส่วนบุคคล (personal area network identification, PAN ID) ซึ่งไม่ต้องใช้หมายเลข IP นอกจากนี้ ZigBee ยังเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับมากกว่าสำหรับของผู้ผลิตหลักในหลายอุตสาหกรรม [8]

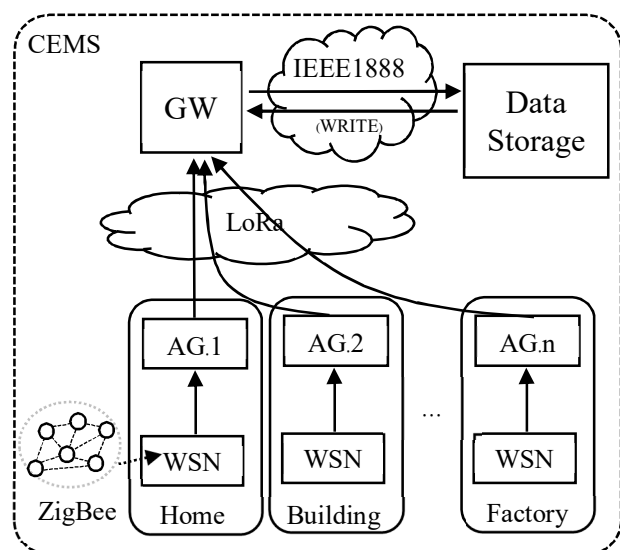
ในการสื่อสารแบบระยะไกลด้วย LPWAN ในประเทศไทยมีผู้ให้บริการด้านโทรคมนาคมหลัก ได้แก่ บริษัท เอไอเอส (มหาชน) จำกัด และ บริษัท กสท. โทรคมนาคม (มหาชน) จำกัด ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้เริ่มใช้งานอุปกรณ์ NB-IoT [9] และ LoRa [10]

ของผู้ให้บริการทั้งสองตามลำดับ แต่อุปกรณ์นี้ยังต้องอาศัยโครงข่ายโทรคมนาคมเช่นเดิม ดังนั้นในโจทย์ที่สัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้ ณ จุดวัดข้อมูล การออกแบบระบบสื่อสารจึงต้องเลือกใช้งานระบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง ซึ่งพบว่า มีเทคโนโลยี LoRa ที่รองรับคลื่นในย่านความถี่ 433 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ร่วมสาธารณะจึงสามารถใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย [11]

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารแบบระยะสั้นด้วย ZigBee กับระยะไกลด้วย LoRa พร้อมทำงานร่วมกับระบบบริหารจัดการพลังงานตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยมีการทดสอบสมรรถนะระบบ ได้แก่ ค่าดัชนีความเข้มสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ของ ZigBee และ LoRa การวัดอัตราส่วนความสำเร็จ ความผิดพลาด และสูญเสียของกลุ่มข้อมูลในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางการประเมินสมรรถนะการรับ-ส่งข้อมูลของระบบต่อไปได้

2) การประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEEE1888 ภายในชุมชน

รูปแบบการสื่อสารสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชนนั้นจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบบริหารจัดการพลังงานในบ้าน อาคาร และโรงงาน (HEMS, BEMS, FEMS) [1] จำเป็นต้องมีมาตรฐานสื่อสารกลางเพื่อรองรับการทำงานที่มีอุปกรณ์ต่างชนิดให้ทำงานร่วมกันได้ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ซึ่งเป็นมาตรฐานเปิด [12]



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของ CEMS โดยใช้มาตรฐาน IEEE1888 ร่วมกับโครงข่ายสื่อสาร ZigBee และ LoRa

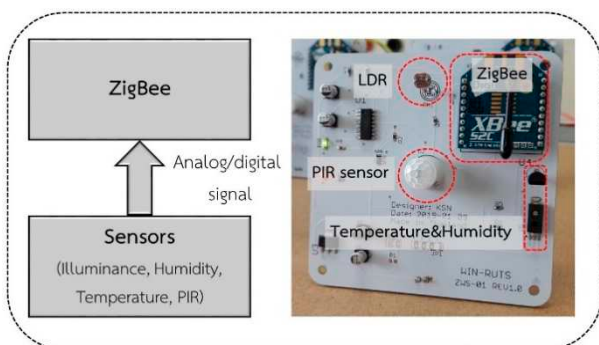
จากรูปที่ 1 เป็นการออกแบบระบบบริหารจัดการพลังงานเพื่อพิสูจน์แนวคิด CEMS โดยระบบนี้ประกอบด้วยโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network, WSN) เพื่อวัดค่าสถานะและรายงานผลที่เกี่ยวข้องกับด้านบริหารจัดการพลังงาน ได้แก่ ค่าการวัดพลังงานไฟฟ้า ค่าการวัดสภาพแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ดังกล่าวในระบบบริหารจัดการพลังงานภายในพื้นที่ต่าง ๆ โดยสามารถเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารแบบไร้สายระหว่างเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะสั้นและระยะไกลได้ โดยใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (Aggregator, AG) การสื่อสารทั้งสองแบบนี้มีเงื่อนไขการนำมาใช้งานต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะสั้นจะเหมาะสมกับการใช้งานที่สื่อสารระหว่างห้องต่าง ๆ ภายในอาคารเดียวกันในระยะทางการรับส่งข้อมูลในระดับเมตรภายในอาคาร [13] แต่ในกรณีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะไกลจะสามารถส่งข้อมูลได้ไกลขึ้นระหว่างอาคารต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีระยะทางการรับส่งข้อมูลในระดับกิโลเมตร [11] ถัดจากนั้นเมื่อรวบรวมข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งมายังเกตเวย์ (Gateway, GW) และส่งต่อไปยังส่วนกลางของระบบบริหารจัดการพลังงานภายในชุมชนตามมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยโปรโตคอล WRITE (WRITE protocol) และบันทึกค่าลงในหน่วยเก็บข้อมูล (Data storage) ตามลำดับต่อไป

3) วิธีดำเนินการวิจัย

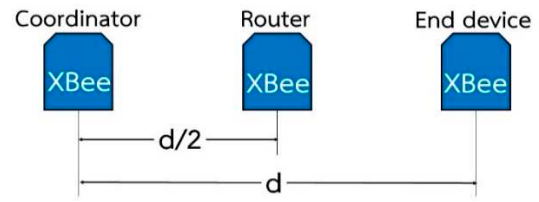
3.1) การพัฒนาระบบในงานวิจัย

3.1.1) การวัดข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรู้แบบไร้สาย

ในส่วนการวัดนี้ข้อมูลสภาพแวดล้อมนี้ คณะวิจัยได้นำอุปกรณ์จากงานวิจัย [14] มาใช้สำหรับทดสอบระบบโดยสามารถวัดค่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ค่าแสงสว่าง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และการเคลื่อนไหวของบุคคลโดยอุปกรณ์ที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังการเชื่อมต่อและอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อมด้วย ZigBee [14]



รูปที่ 3 ผังการทดสอบวัดค่า RSSI ของการสื่อสารไร้สาย ZigBee

โดยอุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมที่นำมาใช้ในงานนี้สามารถสื่อสารแบบไร้สายด้วย ZigBee ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารในรูปแบบเมช (mesh) ได้ และเพื่อยืนยันการใช้งานภายในอาคารของอุปกรณ์ดังกล่าว คณะวิจัยจึงได้ทดสอบการวัดค่า RSSI ของอุปกรณ์ ZigBee โดยใช้ผังการทดสอบการวัดค่า RSSI แสดงดังรูปที่ 3 โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ประสาน (coordinator) อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) และอุปกรณ์ปลายทาง (end device) ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ นี้ต้องตั้งค่าการเชื่อมโยงให้เป็นโครงข่ายเดียวกัน

ในการทดสอบการวัดค่า RSSI นี้ได้ทดสอบบริเวณทางเดิน โดยไม่มีสิ่งกีดขวางแบบแนวสายตา (line of sight) ณ ชั้น 10 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม อาคารศรีวิศวรวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีศรีวิชัย โดยบริเวณทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งได้ทดสอบการวัดค่า RSSI โดยใช้โครงข่าย 2 รูปแบบ คือ แบบจุดต่อจุด (point to point) และแบบเมช เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระดับสัญญาณ ด้วยกำลังส่ง 2 มิลลิวัตต์ โดยผลการทดสอบพบว่า RSSI มีค่าลดลงเมื่อระยะทางออกห่างขึ้น แต่เมื่อนำอุปกรณ์จัดเส้นทางมาใช้งานทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับทวนสัญญาณ ค่าผลการวัด RSSI มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4 บริเวณที่ทดสอบวัด RSSI ของการสื่อสารไร้สาย ZigBee

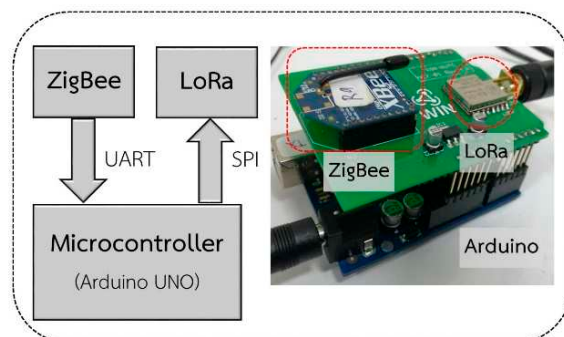
ตารางที่ 1 ผลการวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกรณีโครงข่ายแบบจุดต่อจุด และแบบเมช

ระยะห่าง d (หน่วย: m)	RSSI (หน่วย: dBm)		ส่วนต่าง ของค่า RSSI
	แบบจุดต่อจุด	แบบเมช	
5	-67	-53	14
10	-76	-62	14
15	-81	-72	9
20	-86	-81	5

จากตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบวัดค่า RSSI ภายในอาคาร บริเวณทางเดิน โดยผลการทดสอบได้เปรียบเทียบการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ZigBee ทั้งแบบจุดต่อจุด และแบบเมช โดยแบบเมชในการทดสอบนี้จะเพิ่มการใช้งานอุปกรณ์จัดเส้นทางจำนวน 1 ตัวโดยวางตำแหน่งระหว่างจุดส่งกับจุดรับสัญญาณเพื่อสามารถขยายโครงข่ายได้ โดยผลการทดสอบพบว่าการเชื่อมโยงแบบเมชมีค่าระดับสัญญาณที่รับได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจุดต่อจุด ดังนั้นในผลการทดสอบนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าการสื่อสารด้วย ZigBee ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบระยะสั้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานภายในอาคารได้ดี นอกจากนี้การใช้งานภายในอาคารสำหรับกรณีทั่วไป มักจะติดตั้งอุปกรณ์ตามห้องต่าง ๆ กันเป็นโครงข่าย และส่งผลให้การเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สายนี้สามารถขยายได้ครอบคลุมภายในอาคารมากขึ้นอีกเช่นกัน

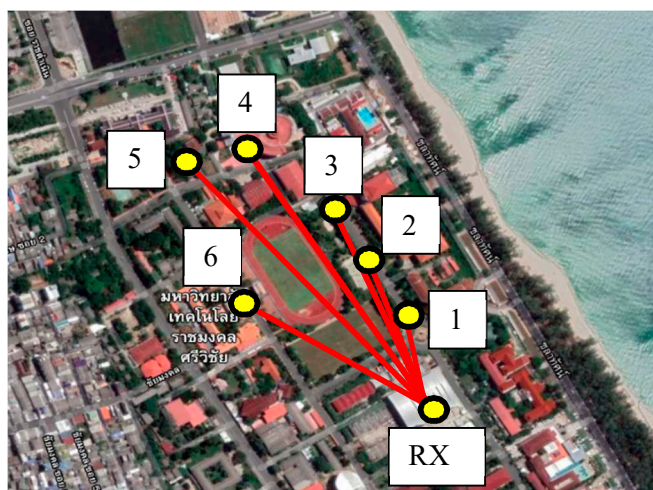
3.1.2) อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการวัดด้านพลังงานจากโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแบบระยะสั้นด้วย ZigBee ภายในบ้าน อาคาร หรือโรงงานได้ และอุปกรณ์นี้สามารถขยายระยะทางของโครงข่ายสื่อสารระยะทางไกลมากขึ้นด้วยเทคโนโลยี LoRa เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกรวบรวมส่งต่อไปยังศูนย์รวมข้อมูลภายในชุมชนได้ ซึ่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ได้ใช้งาน Arduino สำหรับประมวลผลเพื่อเชื่อมโยงโครงข่าย ZigBee กับ LoRa ได้โดยแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลรองรับการเชื่อมโยง ZigBee – LoRa

นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าโครงข่าย LoRa นี้สามารถใช้งานได้ คณะวิจัยจึงได้ทดสอบวัดค่า RSSI ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา เพื่อเป็นแนวทางการใช้งาน โดยแผนผังการทดสอบประกอบด้วยภาคส่งสัญญาณ 6 จุดต่าง ๆ จะอยู่ชั้นล่างสุด และภาครับสัญญาณจะอยู่บริเวณชั้น 10 อาคารศรีวิศวิทยาดูแสดงแผนผังการทดสอบได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังการทดสอบวัดค่า RSSI ของการสื่อสารไร้สาย LoRa

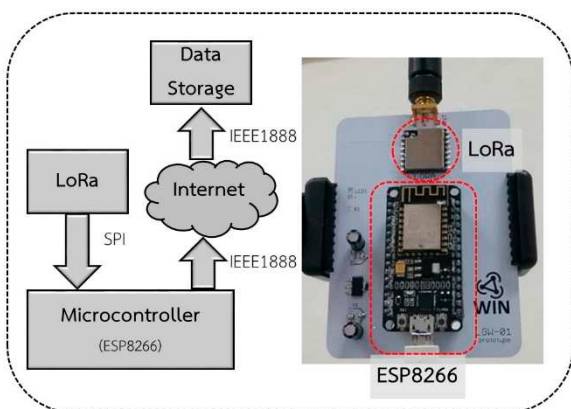
ตารางที่ 2 ผลการวัดค่า RSSI ของการสื่อสารผ่าน LoRa ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา ระหว่างภาคส่งสัญญาณ (บริเวณหน้าอาคารต่าง ๆ) และภาครับสัญญาณ (อาคารศรีวิศาฯ ชั้น 10)

จุดที่	สถานที่ทดสอบวัด RSSI	ระยะทาง (หน่วย: m)	RSSI (หน่วย: dBm)	
			หน้าอาคาร	ภายในอาคาร
1	อาคาร 58 อาคารศูนย์วิทยบริการ คณะศิลปศาสตร์	183	-79.7	-95.9
2	อาคาร 55 อาคารเรียนรวมฯ คณะศิลปศาสตร์	275	-92.6	-105.3
3	อาคาร 62 อาคารเรียนรวมฯ คณะศิลปศาสตร์	385	-96.2	-97
4	อาคาร 06 อาคารสำนักงานคณะบริหารธุรกิจ	508	-91.6	-105.9
5	อาคาร 63 อาคารเรียนรวมฯ คณะบริหารธุรกิจ	573	-95.1	-103
6	อาคาร 08 สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	373	-92.4	-106.7

จากตารางที่ 2 เป็นผลการวัดค่า RSSI ระหว่างจุดส่งและรับสัญญาณของของอาคารต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดสอบได้เปรียบเทียบค่า RSSI ระหว่างการส่งสัญญาณบริเวณด้านหน้าอาคารกับบริเวณชั้นที่ 1 ภายในอาคารต่าง ๆ โดยผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่าระยะทางการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์ LoRa นี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยระยะทางไกลที่สุดการรับส่งข้อมูลยังครบถ้วนและระดับสัญญาณยังอยู่ในเกณฑ์ที่ส่งข้อมูลได้

3.1.3) เกตเวย์

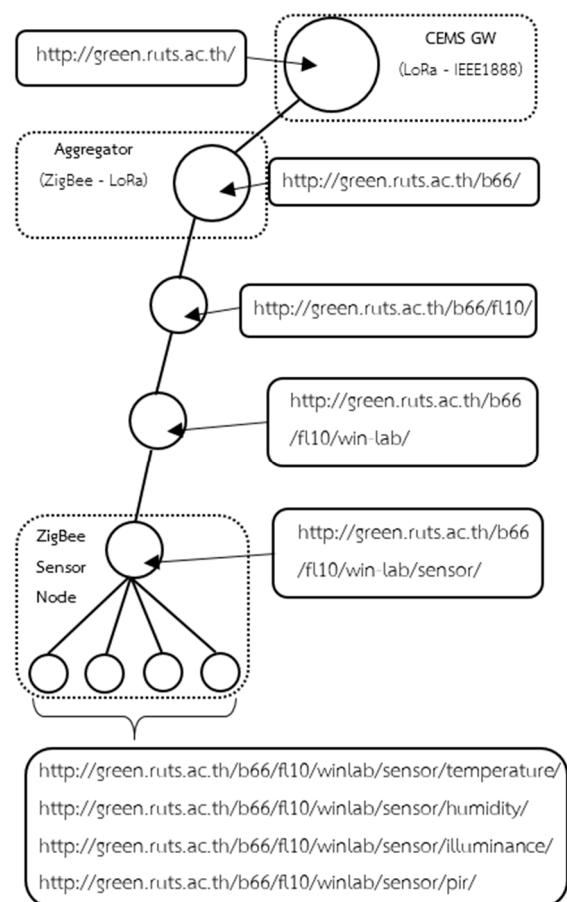
เกตเวย์ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลแต่ละอาคารต่าง ๆ ด้วยรูปแบบการสื่อสาร LoRa ได้ไกล โดยเกตเวย์นี้ได้ใช้งาน ESP8266 เป็นอุปกรณ์ประมวลผลหลักและการใช้งานอุปกรณ์นี้สามารถเชื่อมโยงผ่านอินเทอร์เน็ตได้ พร้อมกับใช้งานตามมาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ซึ่งได้ถูกออกแบบเป็นมาตรฐานด้านการบริหารจัดการพลังงานโดยเฉพาะและเป็นมาตรฐานเปิด โดยเกตเวย์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เกตเวย์สำหรับการเชื่อมโยง LoRa – IEEE1888

3.1.4) โครงสร้างข้อมูลสำหรับหน่วยเก็บข้อมูล

หน่วยเก็บข้อมูลทำหน้าที่บันทึกข้อมูลมาจากเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยโปรโตคอล WRITE โดยรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลมีโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูล (Point Set ID structure) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูล

โครงสร้างชุดรหัสข้อมูลประกอบด้วยภาพรวมของชุมชน หรือในบทความนี้คือมหาวิทยาลัย โดยตั้งชื่อชุดรหัสข้อมูลเป็น http://green.ruts.ac.th/ ถัดจากนั้นจะมีระดับย่อยลงไป

ระดับอาคาร โดยจะเพิ่มในส่วนชื่อหมายเลขอาคารหมายเลข 66 ด้วยรหัสข้อมูล <http://green.ruts.ac.th/b66/> จนกระทั่งระดับห้องของอาคาร และชนิดประเภทของอุปกรณ์รับรู้ตามลำดับ

โดยชื่อรหัสข้อมูลของการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงสว่าง และการเคลื่อนไหวของบุคคล ภายในห้อง Win-Lab จะใช้รหัสตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การออกแบบชื่อรหัสข้อมูลกับการวัด

ประเภทการวัด	ชื่อรหัสข้อมูล
อุณหภูมิ	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/temperature/
ความชื้นสัมพัทธ์	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/humidity/
แสงสว่าง	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/illuminance/
การเคลื่อนไหวของบุคคล	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/pir/

จากการออกแบบโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูลในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แนวทางเดียวกันในการออกแบบจากโครงการระบบบริหารการจัดการพลังงานภายในอาคารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chulalongkorn University Building Energy Management System, CU-BEMS) [15] ทั้งนี้สำหรับการออกแบบโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูลนี้สามารถกำหนดได้อย่างอิสระเพื่อให้เหมาะสมในแต่ละการพัฒนาาระบบต่อไป

3.2) การตั้งค่าอุปกรณ์และพัฒนาเฟิร์มแวร์

ในหัวข้อนี้อธิบายเกี่ยวกับการตั้งค่าและพัฒนาาระบบ ได้แก่ การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม การพัฒนาเฟิร์มแวร์อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล และเกตเวย์

3.2.1) การตั้งค่าอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม

การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม ZigBee สามารถใช้งานโปรแกรม X-CTU โดยกำหนดให้อุปกรณ์ ZigBee ทำงานเป็นโหมดอุปกรณ์ปลายทางหรืออุปกรณ์จัดเส้นทางพร้อมกับตั้งค่าให้มี PAN ID ให้เป็นหมายเลขเดียวกับอุปกรณ์ประธานที่ติดตั้งกับฝั่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลโดยระยะเวลาการส่งข้อมูลไปยังฝั่งรับสัญญาณ หรืออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลได้ นอกจากนี้ในส่วนของการวัดข้อมูลนั้นสามารถตั้งค่าได้โดยกำหนดได้ทั้งแบบแอนะล็อก (analog) และดิจิทัล (digital) รวมถึงสามารถตั้งค่าความเร็วของคาบเวลาเป็นค่าต่าง ๆ ได้

Start	Length	Address: ZigBee	Data	CS
-------	--------	--------------------	------	----

รูปที่ 9 กลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee [14]

จากรูปที่ 9 แสดงรูปแบบกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee โดยมีรูปแบบของข้อมูลเป็นการเชื่อมต่อโปรแกรม (Application Programming Interface, API) ที่ได้กำหนดโดยผู้ผลิต โดยกลุ่มข้อมูลประกอบด้วยส่วนเริ่มต้น (start) ส่วนแสดงความยาวข้อมูล (length) ส่วนแอดเดรส (address) ของอุปกรณ์ ZigBee ส่วนข้อมูล (data) และส่วนผลรวมการตรวจสอบ (checksum, CS) ตามลำดับ

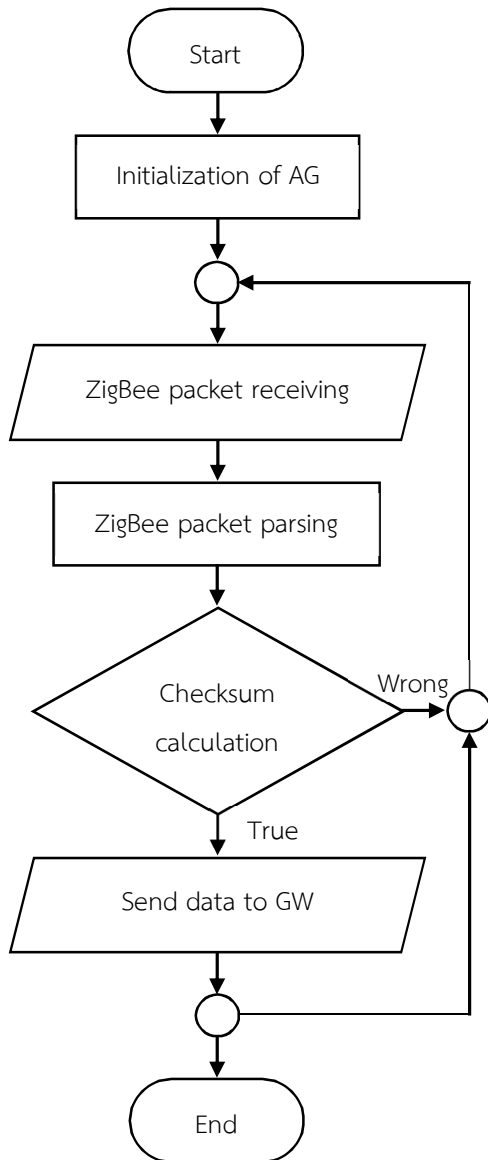
3.2.2) การพัฒนาเฟิร์มแวร์ของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

รูปแบบกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลนี้ ได้ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่เพื่อรองรับการบรรจุข้อมูลของแอดเดรสทั้ง ZigBee และ LoRa เพื่อระบุการเชื่อมโยงโครงข่ายได้อย่างเป็นหมวดหมู่ เพื่อให้สามารถแยกแยะอาคารต่าง ๆ ได้โดยแอดเดรส AG

โดยกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลนี้ ประกอบด้วยส่วนเริ่มต้น ส่วนแอดเดรสของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ส่วนของแอดเดรสของอุปกรณ์ ZigBee ส่วนของข้อมูล และส่วนของผลรวมการตรวจสอบตามลำดับ โดยกลุ่มข้อมูลนี้แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10

Start	Address: AG	Address: ZigBee	Data	CS
-------	----------------	--------------------	------	----

รูปที่ 10 กลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

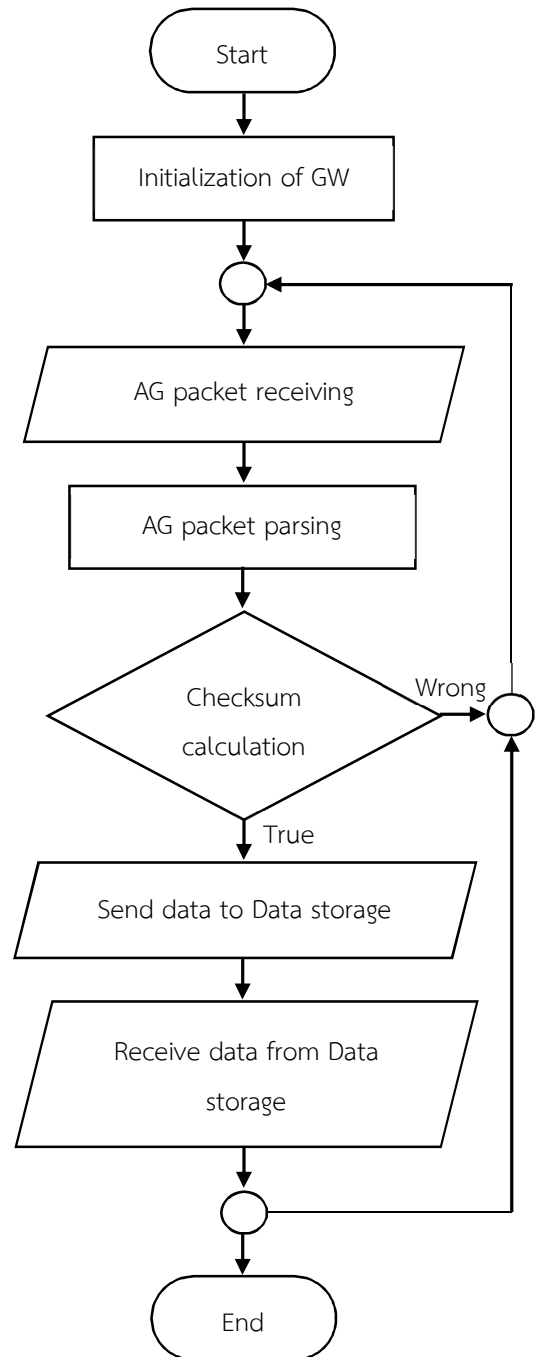


รูปที่ 11 ผังการทำงานของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

จากรูปที่ 11 แสดงผังงานซอฟต์แวร์ของการพัฒนาระบบ เชื่อมโยงโครงข่ายระหว่าง ZigBee กับ LoRa โดยเฟิร์มแวร์ที่ได้ พัฒนานี้จะการทำงานเริ่มจากอุปกรณ์รวบรวมได้รับกลุ่มข้อมูล จากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee ครั้งละหนึ่งชุดข้อมูล จากนั้น กรองข้อมูลในรูปแบบ ZigBee ไปเป็นรูปแบบ LoRa โดยอุปกรณ์ รวบรวมข้อมูลดำเนินการส่งต่อไปยังเกตเวย์ต่อไป

3.2.3) การพัฒนาเฟิร์มแวร์ของเกตเวย์

เกตเวย์ในงานวิจัยนี้ได้แปลงข้อมูลรูปแบบ LoRa ให้เป็นตาม มาตรฐาน IEEE1888 บนพื้นฐานของ HTTP (Hypertext transfer protocol) และ ภาษา XML (Extensible Markup Language)



รูปที่ 12 ผังการทำงานของเกตเวย์

โดยลำดับการทำงานของเกตเวย์แสดงได้ดังรูปที่ 12 โดยเริ่ม จากอุปกรณ์รวบรวมได้รับกลุ่มข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee ครั้งละหนึ่งชุดข้อมูล จากนั้นกรองข้อมูลในรูปแบบ ZigBee ไปเป็นรูปแบบ LoRa โดยอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ดำเนินการส่งต่อไปยังเกตเวย์ โดยส่งข้อมูลและการตอบกลับตาม โพรโทคอล WRITE เพื่อบันทึกข้อมูลพร้อมระบุเวลาจริงลงใน หน่วยเก็บข้อมูล โดยรูปแบบการส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 13 และ การตอบกลับข้อมูลแสดงดังรูปที่ 14

```
POST /axis2/services/FIAPStorage HTTP/1.1
Content-Type: text/xml charset=UTF-8
User-Agent: FIAPUploadAgent (Arduino HCU)
Host: 192.168.1.10
SOAPAction: "http://soap.fiap.org/data"
Content-Length: 867

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <soapenv:Body>
    <ns2:dataRQ xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/">
      <transport xmlns="http://gutp.jp/fiap/2009/11/">
        <body>
          <pointSet id="http://green.ruts.ac.th">
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/temperature">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">25</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/humidity">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">50</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/illuminance">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">100</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/pir">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">1</value>
            </point>
          </pointSet>
        </body>
      </transport>
    </ns2:dataRQ>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

รูปที่ 13 รูปแบบการส่งข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งานโปรโตคอล WRITE

```

HTTP/1.1 200 OK
Content-Type: text/xml charset=UTF-8
User-Agent: FIAPUploadAgent (Arduino HCU)
Host: 192.168.1.10
SOAPAction: "http://soap.fiap.org/data"
Content-Length: 308

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <soapenv:Body>
    <ns2:dataRS xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/">
      <transport xmlns="http://gntp.jp/fiap/2009/11/">
        <header>
          <OK/>
        </header>
      </transport>
    </ns2:dataRS>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>

```

รูปที่ 14 รูปแบบการตอบกลับข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูลไปยังเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งานโพรโทคอล WRITE

3.3) การออกแบบระบบทดสอบสมรรถนะระบบ

การทำงานของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและเกตเวย์จะมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ในด้านลำดับการรับส่งข้อมูล โดยที่กรณีที่กลุ่มข้อมูลเข้ามามีอัตราเร็วกว่าอัตราการส่งข้อมูลออกส่งผลให้มีความผิดพลาดการอ่านข้อมูลของหน่วยประมวลผล รวมถึงมีกลุ่มข้อมูลที่สูญหายไป ส่งผลให้การออกแบบระบบต้องคำนึงถึงส่วนของการประเมินสมรรถนะด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการประเมินสมรรถนะระบบจากงานวิจัย [15] ที่มีรูปแบบการประเมินสมรรถนะของระบบด้วยการคำนวณค่าอัตราการรับ-ส่งข้อมูล โดยในงานวิจัยนี้ได้วัดสมรรถนะของอุปกรณ์ทั้งสองส่วน ได้แก่ อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและเกตเวย์

โดยการคำนวณค่าอัตราการส่งข้อมูลมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 - 4

$$PSR = \frac{n_{success}}{n_{total}} \times 100\% \quad (1)$$

$$PER = \frac{n_{error}}{n_{total}} \times 100\% \quad (2)$$

$$PLR = \frac{n_{loss}}{n_{total}} \times 100\% \quad (3)$$

$$n_{total} = n_{success} + n_{error} + n_{loss} \quad (4)$$

เมื่อ

PSR คือ อัตราส่วนความสำเร็จของกลุ่มข้อมูล (Packet success ratio)

PER คือ อัตราส่วนความผิดพลาดของกลุ่มข้อมูล (Packet error ratio)

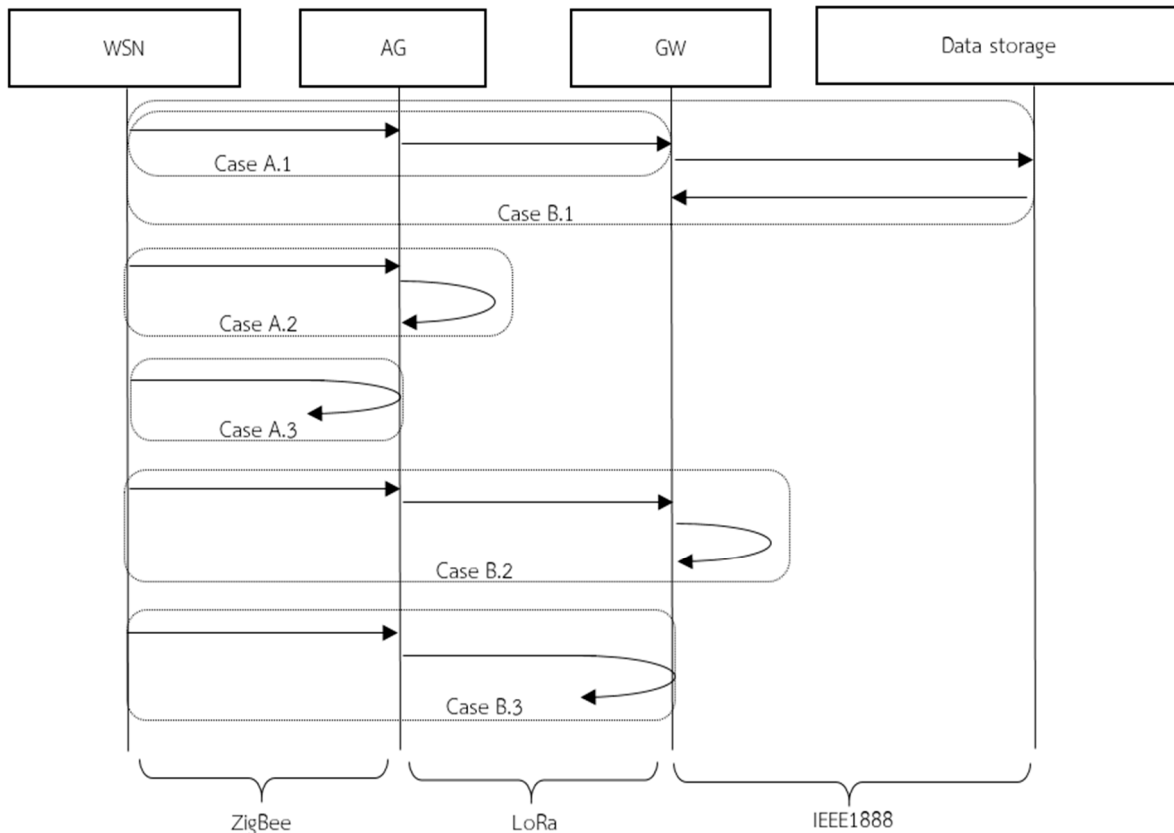
PLR คือ อัตราส่วนการสูญหายของกลุ่มข้อมูล (Packet loss ratio)

$n_{success}$ คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ส่งสำเร็จ

n_{error} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลผิดพลาด

n_{loss} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลสูญหาย

และ n_{total} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ส่งทั้งหมด



รูปที่ 15 เหตุการณ์ของการส่งข้อมูลที่พิจารณาในงานวิจัย

จากรูปที่ 15 แสดงกรณีต่าง ๆ (Cases) ของเหตุการณ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะระบบ

กรณี A.1 : โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลสำเร็จ

กรณี A.2 : โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลไปถึงอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแต่การคำนวณค่าผลรวมการตรวจสอบผิดพลาด

กรณี A.3: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลออกไปแล้วแต่อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไม่สามารถรับข้อมูลได้ เนื่องจากเกิดการล้นของกลุ่มข้อมูล (Packet overflow)

กรณี B.1: การสื่อสารระหว่างโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังหน่วยเก็บข้อมูลสำเร็จ

กรณี B.2: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์ แต่เกตเวย์คำนวณค่าผลรวมการตรวจสอบผิดพลาด

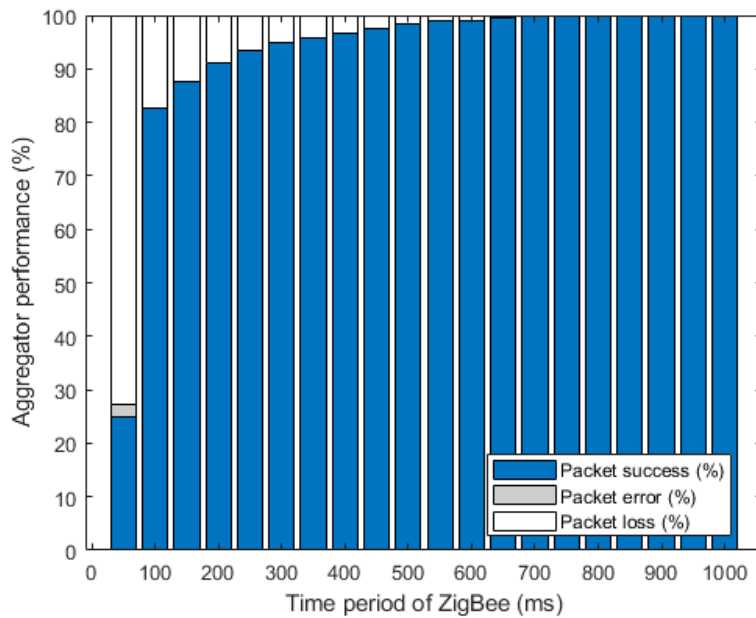
กรณี B.3: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์ แต่เกตเวย์ไม่สามารถรับข้อมูลได้ เนื่องจากเกิดการล้นของกลุ่มข้อมูล

4) การทดสอบระบบและผลการวิจัย

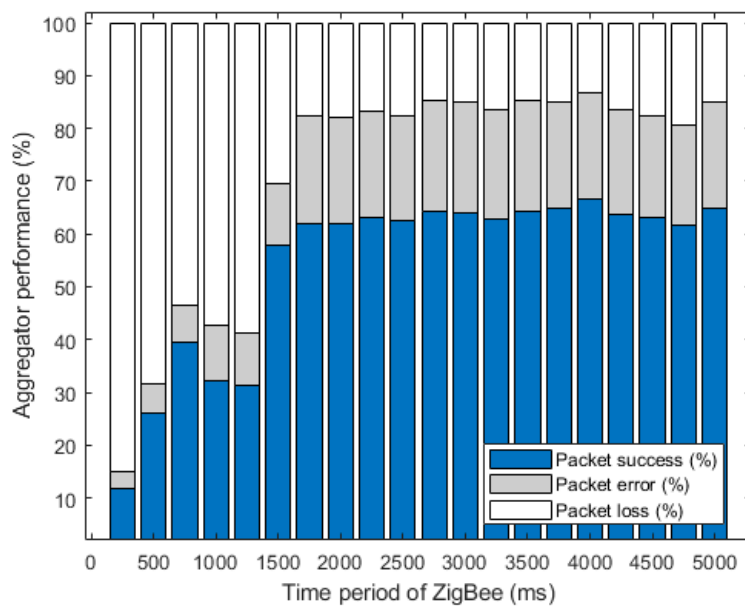
การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ ผิดพลาดและสูญหาย โดยกำหนดอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของ ZigBee ในคาบเวลาต่าง ๆ (Time period, T) จนพบค่าสถานะคงตัวของอัตราการส่งข้อมูลที่เหมาะสม โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ได้แก่

4.1) การวัดสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายกับเกตเวย์ ใช้การวิเคราะห์สมรรถนะโดยใช้ 3 กรณีในการวัดสมรรถนะ คือ กรณี A.1, A.2 และ A.3 นอกจากนี้ในการทดสอบได้เปรียบเทียบระหว่างการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัวและ 5 ตัวเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการส่งข้อมูลของ ZigBee แบบกำหนดได้และแบบสุ่ม



รูปที่ 16 สมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัว)



รูปที่ 17 สมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 5 ตัว)

ผลการทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 16 ซึ่งใช้งานอุปกรณ์รับรู้เพียง 1 ตัว เพื่อต้องการให้ลำดับการส่งข้อมูลมีคาบเวลาที่กำหนดได้ (deterministic) และสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งข้อมูลที่มีช่วงวินคาบเวลาเท่ากัน ซึ่งพบว่าสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเริ่มมีค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ 100% ที่มีคาบเวลาของอุปกรณ์รับรู้ตั้งแต่ 700 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป ซึ่งในสถานการณ์ทั่วไปอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัวจะส่งทุก ๆ 60 วินาทีเท่านั้น ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงสามารถประมาณจำนวนรองรับของอุปกรณ์

รวบรวมข้อมูล 1 ตัวต่อจำนวนอุปกรณ์รับรู้ได้เท่ากับ 60/0.7 หรือ 85 อุปกรณ์ ด้วยเงื่อนไขการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้เข้าจังหวะกัน (synchronous)

การทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 17 เป็นกรณีทั่วไปที่มีการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้มากกว่า 1 ตัว ส่งผลให้มีการส่งข้อมูลแบบสุ่ม (random) ซึ่งเงื่อนไขการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไม่เข้าจังหวะกัน (asynchronous) โดยผลการทดสอบจะขึ้นกับจังหวะการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้และการประมวลผลของอุปกรณ์รวบรวม

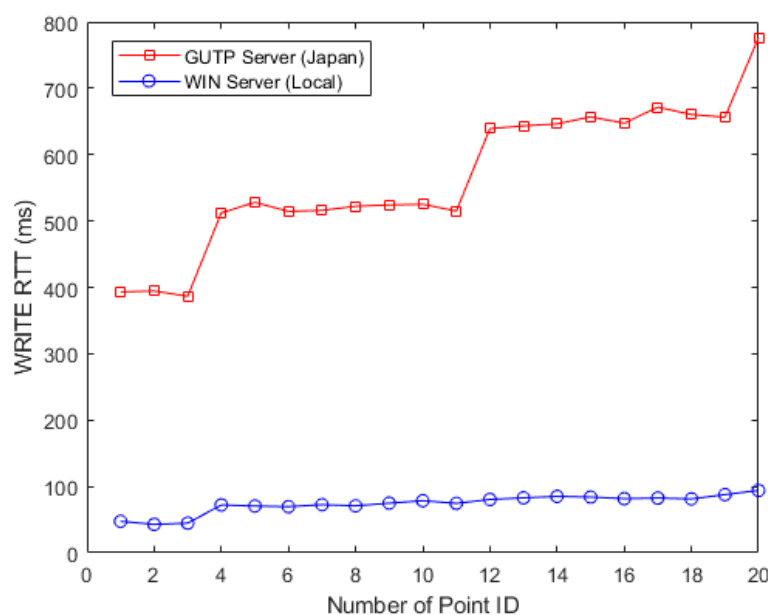
ข้อมูล โดยวิธีการทดสอบนั้นจะเหมือนกับการทดลองที่ 1 แต่จะแตกต่างกันที่จำนวนของอุปกรณ์รับรู้มีจำนวน 5 ตัว ซึ่งจะทดสอบจนกระทั่งหาผลที่คงที่ และผลการทดสอบสมรรถนะกรณีนี้พบว่าตั้งแต่คาบเวลาของอุปกรณ์รับรู้เท่ากับ 1500 มิลลิวินาทีเป็นต้นไปเริ่มคงที่ จึงสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่า ถ้ากรณีคาบเวลาการส่งเข้าจังหวะกันดังการทดลองที่ 1 โดยมีอุปกรณ์รับรู้จำนวน 5 ตัว ที่ค่าคาบเวลา 700 มิลลิวินาทีสามารถคำนวณค่าของคาบเวลาของอุปกรณ์ที่เหมาะสมต้องมีค่าคาบเวลาเป็น 700×5 หรือเท่ากับ 3500 มิลลิวินาที แต่ในผลการทดลองที่ 2 นี้ค่าสมรรถนะยังคงเป็น 60 % เท่านั้น

ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งสองกรณีสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ถ้ากรณีการส่งข้อมูลที่คาบเวลาที่กำหนดได้สามารถประเมินจำนวนการรองรับของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำกว่าการส่งข้อมูลแบบสุ่ม เนื่องจากการส่งแบบสุ่มทำให้มีโอกาสของกลุ่มข้อมูลเข้ามายังอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลมาพร้อมกันส่งผลให้เส้นของกลุ่มข้อมูลได้โดยพิจารณาจากผลการทดลองที่ 1 เมื่อเวลาเว้นช่วงน้อยกว่า 700 มิลลิวินาทีทำให้อุปกรณ์ประมวลผลไม่ทัน

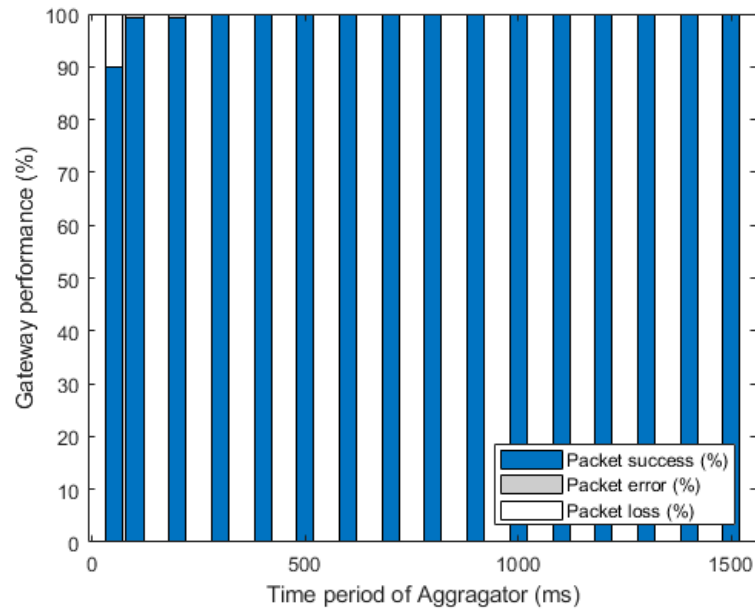
4.2) การวัดสมรรถนะของเกตเวย์

การวัดสมรรถนะของเกตเวย์ ซึ่งเกตเวย์เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลกับหน่วยเก็บข้อมูล โดยการทดสอบประกอบด้วย 3 กรณี ได้แก่ กรณี B.1, B.2 และ B.3

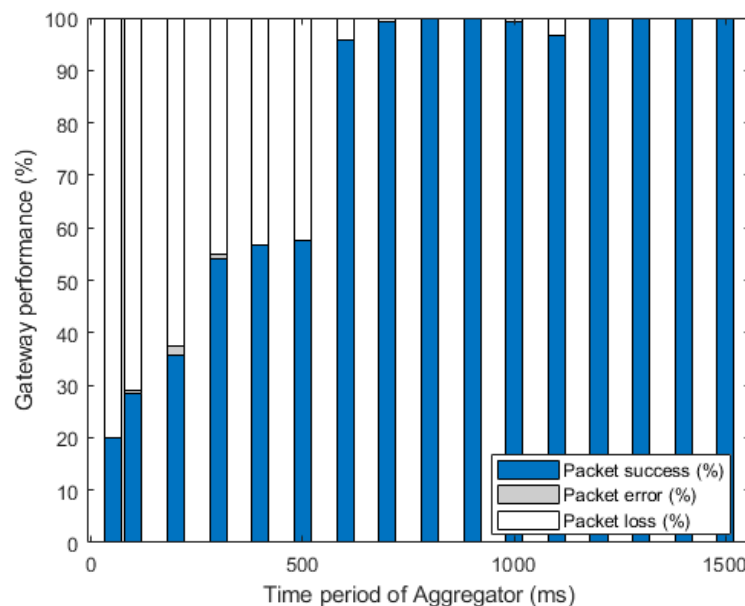
โดยที่ในงานวิจัย [16] พบว่าระยะห่างของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตมีผลต่อเวลาไปกลับ (round trip time, RTT) โดยการทดสอบหัวข้อนี้จึงวัดค่า RTT เช่นกัน ด้วยการส่งข้อมูลตามโพรโทคอล WRITE โดยการทดสอบนี้จะเพิ่มจำนวนรหัสชุดข้อมูลจาก 1 ถึง 20 รวมถึงได้เปรียบเทียบจำนวนของช่วงเชื่อมต่อระหว่างเครื่องบริการ (server) ที่ติดตั้งในโครงข่ายเฉพาะที่ (local area network) ซึ่งติดตั้งในห้องเดียวกัน โดยมี 1 ช่วงเชื่อมต่อ และกรณีใช้งานเครื่องบริการจากโครงการมหาวิทยาลัยโตเกียวสีเขียว (Green University of Tokyo Project, GUTP) ซึ่งติดตั้งอยู่ประเทศญี่ปุ่นและมีระยะห่างเป็นจำนวน 18 ช่วงเชื่อมต่อ โดยผลการวัดค่า RTT พบว่ากรณีอยู่ในโครงข่ายเฉพาะที่จำนวนรหัสของจุดข้อมูลเพิ่มขึ้นแต่ค่า RTT เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 มิลลิวินาทีและค่อนข้างคงที่ แต่ในกรณีที่ใช้งานเครื่องบริการ GUTP ในการทดสอบ ผลการวัด RTT มีค่ามากกว่า 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเฉพาะที่ในห้องทดสอบเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การวัดค่าเวลาไปกลับในการส่งข้อมูลโดยใช้โพรโทคอล WRITE



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของเกตเวย์กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (กรณีใช้งานเครื่องบริการ WIN)



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของเกตเวย์กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (กรณีใช้งานเครื่องบริการ GUTP)

เมื่อทราบผลการทดสอบวัด RTT แล้ว จึงดำเนินการทดสอบวัดค่าสมรรถนะของเกตเวย์ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีแรกใช้งานเครื่องบริการ WIN และ GUTP โดยขั้นตอนการทดลองนั้นจะใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเป็นตัวส่งอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับรู้ ซึ่งผลการทดสอบของอัตราการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์กรณีใช้งานเครื่องบริการ WIN พบว่าสมรรถนะของเกตเวย์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพโดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 19

และในกรณีใช้งานเครื่องบริการ GUTP พบว่าสมรรถนะของเกตเวย์สามารถทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพในช่วงคาบเวลาการส่งข้อมูลต่ำกว่า 700 มิลลิวินาที โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 20

5) สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สายทั้งการสื่อสารแบบระยะสั้นและการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งานเทคโนโลยี ZigBee และ LoRa ตามลำดับ ซึ่งการเชื่อมโยงทั้งสองระบบนี้ได้ใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลทำหน้าที่แปลงข้อมูลระหว่างเทคโนโลยีทั้งสองให้ทำงานร่วมกันได้ รวมถึงโครงข่ายสื่อสารนี้ได้เชื่อมโยงกับมาตรฐาน IEEE1888 ผ่านเกตเวย์เพื่อส่งข้อมูลต่อไปยังระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชนได้ โดยในส่วนผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการทดสอบได้วัดค่า RSSI ของอุปกรณ์ ZigBee ภายในอาคารศรีวิศวิทยา พบว่าค่า RSSI ลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แต่สามารถขยายโครงข่ายได้ โดยใช้อุปกรณ์จัดเส้นทาง ซึ่งผลการทดสอบสามารถบ่งชี้ได้ว่าภายในอาคารนั้นสามารถใช้งาน ZigBee สำหรับการวัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องด้านพลังงานได้ รวมถึงการวัด RSSI ของอุปกรณ์ LoRa ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา พบว่าการสื่อสาร LoRa สามารถรับส่งข้อมูลได้ครอบคลุมเพียงพอภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งระยะทางสูงสุดในได้ระยะ 573 เมตร ส่วนที่สองเป็นการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลโดยใช้งาน Arduino (ATMEGA328PU) เป็นหน่วยประมวลผลหลักพบว่าการส่งข้อมูลตามลำดับการส่งข้อมูลมีคาบเวลาที่กำหนดได้และสม่ำเสมอ อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ 100% ที่มีช่วงเว้นข้อมูลตั้ง 700 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป แต่กรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบสุ่มโดยใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 5 ตัว โดยผลการทดสอบมีอัตรารับข้อมูลสำเร็จเพียง 60 % เมื่อ คาบเวลาแต่ละตัวเป็น 5 วินาทีแล้วก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากได้เปิดการทำงานของอุปกรณ์รับรู้พร้อมกันทำให้การไหลของข้อมูลมาพร้อมกันจึงทำให้ส่งผลให้อุปกรณ์รวบรวมนี้ไม่สามารถประมวลผลได้ทันเวลา ส่วนสุดท้ายการทดสอบสมรรถนะเกตเวย์โดยเปรียบเทียบความแตกต่างการใช้งานเครื่องบริการที่มีสถานที่แตกต่างกัน ซึ่งจำนวนช่วงเชื่อมต่อมีผลต่อ RTT และส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จลดลงเมื่อระยะห่างของโครงข่ายมีค่าเป็น 18 ช่วง จึงส่งผลให้การส่งข้อมูลสำเร็จที่มีค่ามากกว่า 95% จะต้องมีความถี่ในการส่งข้อมูลของเกตเวย์ตั้งแต่ 600 มิลลิวินาทีเป็นต้นไปจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6) ข้อเสนอแนะ

ระบบการทดสอบนี้ได้เป็นประโยชน์ให้กับผู้ออกแบบระบบบริหารจัดการพลังงานสำหรับบ้าน อาคาร โรงงาน จนกระทั่งการขยายระบบภายในชุมชนที่เน้นการสื่อสารไร้สาย โดยผลการทดสอบระบบในงานวิจัยนี้ได้เป็นแนวทางการพัฒนาระบบต่อไปในอนาคต โดยเลือกหน่วยประมวลผลเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานและรองรับจำนวนอุปกรณ์ได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ โดยใช้งานเครื่องบริการและการพัฒนาต่อยอดเฟิร์มแวร์จาก รศ. ดร.ธิดา โอชีโอ ในโครงการ GUTP มหาวิทยาลัยโตเกียว รวมถึง รศ. ดร.เชาวนิต อัครกุล จากโครงการ CU-BEMS จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำหรับช่วยเหลือในทดสอบวัดสัญญาณ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับสถานที่การทดสอบ จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

REFERENCE

- [1] N. Hoonchareon, *Development of smart grid system: Mae Hong Son case study*. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2016.
- [2] S. G. Varghese, C. P. Kurian, V. I. George, A. John, V. Nayak and A. Upadhyay, "Comparative study of zigBee topologies for IoT-based lighting automation," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 201-207, 2019.
- [3] V. Q. Son and N. T. A. Khoa, "Evaluation of full-mesh networks for smart home applications," in *Proc. of (IEEE) International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*, Ho Chi Minh, Vietnam, Oct. 2019, pp. 73-78.
- [4] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, Oct.. 2016.
- [5] W. San-Um, P. Lekbunyasir, M. Kodyoo, W. Wongsuwan, J. Makfak and J. Kedsri, "A long-range low-power wireless sensor network based on U-LoRa technology for tactical troops tracking systems," in *Proc. of (ACDT) Third Asian Conference on Defense Technology*, Phuket, Thailand, Jan. 2017, pp. 32-35.

- [6] M. Lamkimel, N. Naja, A. Jamali, and A. Yahyaoui, "The Internet of Things: Overview of the essential elements and the new enabling technology 6LoWPAN," in *Proc 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)*, Marrakech, Morocco, Nov. 2018, pp. 142-147.
- [7] T. Inthasut and C. Aswakul, "Development and reliability testing of IEEE1888 gateway for ZigBee wireless sensor network in Chulalongkorn University's building energy management system," in *Proc. of (ISIPS) 8th International Collaboration Symposium on Information, Production and Systems*, Fukuoka, Japan, Nov. 2014, pp. 1-4.
- [8] Laird Connect, "Zigbee Vs 6Lowpan for sensor networks," LAIRDCONNECT.com. <https://www.Lairdconnect.com/resources/white-papers/zigbee-vs-6lowpan-for-sensor-networks> (accessed Nov. 28, 2020)
- [9] K. Kaewwongsri and K. Silanon, "Design and implement of a weather monitoring station using CoAP on NB-IoT network," in *Proc. of (ECTI-CON) 17th International Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phuket, Thailand, Jun. 2020, pp. 230-233.
- [10] K. Lappanitchayakul, "Anti-theft device for car: Alert system using radio wave," in *Proc. of (ICIIBMS) International Conf. on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences*, Shanghai, China, Nov. 2019, pp. 351-355.
- [11] N. Vatcharatiansakul, P. Tuwanut, and C. Pornavalai, "Experimental performance evaluation of LoRaWAN: A case study in Bangkok," in *Proc. of (JCSSE) 14th International Joint Conf. on Computer Science and Software Engineering*, Nakhon Si Thammarat, Thailand, Jul. 2017, pp. 1-4.
- [12] P. Saatwong and S. Suwankawin, "An Interoperable building energy management system with IEEE1888 open protocol for peak-load shaving," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 11-22, Jan. 2020.
- [13] C. Suwannapruk, K. Juntula, and T. Inthasuth, "Development of ZigBee wireless energy instrument for building energy management system with IEEE1888 standard," in *Proc. of (RMUTCON) 11th Rajamangala University of Technology National Conference*, Chaing Mai, Thailand, Jul. 2019, pp. 285-297.
- [14] K. Sureeya and T. Inthasuth, "Packet traffic measurement of IEEE1888 write procedure between ZigBee gateway and storage for building energy management system," in *Proc. of (ITC-CSCC) 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, JeJu, South Korea, Jun. 2019, pp. 1-4.
- [15] T. Inthasut, "Application of ZigBee wireless sensor and actuator network for building energy management system with IEEE1888 protocol," M. Eng. thesis, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [16] K. Sureeya and T. Inthasuth, "Round trip time measurement of embedded proxy gateway communication between IEEE1888 smart energy and IoT cloud smart city platforms," in *Proc. of (ITC-CSCC) 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, Nagoya, Japan, Jul. 2020, pp. 202-206.