

การประยุกต์ใช้โครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee สำหรับระบบการจัดการ  
พลังงานภายในอาคารตามโพรโทคอล IEEE1888

นายธนากร อินทสุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

APPLICATION OF ZIGBEE WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR  
NETWORK FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH  
IEEE1888 PROTOCOL

Mr.Tanakorn Inthasut

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2013  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้โครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee  
สำหรับระบบการจัดการพลังงานภายในอาคารตามโพรโทคอล  
IEEE1888

โดย

นายธนากร อินทสุทธิ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัครกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัครกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

ธนากร อินทสุทธิ : การประยุกต์ใช้โครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee สำหรับระบบการจัดการพลังงานภายในอาคารตามโพรโทคอล IEEE1888. (APPLICATION OF ZIGBEE WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR NETWORK FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH IEEE1888 PROTOCOL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.เชาว์นิต อัสวกุล, 58 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างเกตเวย์ ZigBee ในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับระบบการจัดการพลังงานภายในอาคารบนพื้นฐานของมาตรฐาน IEEE1888 ในกรอบการริเริ่มโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเพื่อบริหารจัดการการใช้พลังงานของอาคาร (CU-BEMS) ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในระบบนี้ได้ใช้งานฟังก์ชันของ ZigBee สำหรับการวัดและส่งข้อมูลของตัวรับรู้และสื่อสารไปยังหน่วยเก็บข้อมูลหรือระบบฐานข้อมูล และโปรแกรมประยุกต์ผ่านโพรโทคอล FETCH, WRITE และ TRAP ในมาตรฐาน IEEE1888 ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสร้าง ติดตั้ง และทดสอบเกตเวย์จำนวน 2 ตัว, โหนดตัวรับรู้ CU-BEMS จำนวน 50 โหนด ซึ่งแต่ละตัวทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และสถานะการเคลื่อนไหวของคน ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยและห้องบุคลากรของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการให้ใกล้เคียงที่สุดกับสถานการณ์การใช้งานที่เกิดขึ้นจริงของโครงการ CU-BEMS ซึ่งทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของตัวรับรู้ CU-BEMS ได้ พบว่าเมื่อติดตั้งโหนดตัวรับรู้ CU-BEMS จำนวน 28 โหนด เพื่อเชื่อมต่อกับเกตเวย์ในสถานที่จริงภายในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นสูงสุดของจำนวนโหนดตัวรับรู้ต่อเกตเวย์ที่ติดตั้งในโครงการ CU-BEMS ผลทดสอบพบว่าถ้าหากตัวรับรู้มีคาบเวลาการส่งข้อมูลมากกว่า 30 วินาทีแล้ว อัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสำเร็จจะมีค่ามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลผิดพลาดและข้อมูลสูญหายจะมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนคาบเวลาการส่งของตัวรับรู้เท่ากับ 60 วินาทีนั้น จากการวัดเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าค่าสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์มีค่าสูงกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และได้ค่าเวลาเฉลี่ยของการรีเซตเกตเวย์ต่อครั้งน้อยกว่า 11 วินาที นอกจากนี้สำหรับโหนดตัวรับรู้ ZigBee จากบริษัทจิ อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล ชนิดใช้งานไฟเลี้ยงวงจรโดยแบตเตอรี่ติดตั้งภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ถ้าเลือกใช้ค่าความจุแบตเตอรี่ 2000 มิลลิแอมป์ชั่วโมง จะมีอายุการใช้งานของ แบตเตอรี่ประมาณ 1.5 ปี ถ้าตัวรับรู้มีคาบเวลาการส่งข้อมูลถูกตั้งไว้เท่ากับ 10 นาที สำหรับงานที่กำลังดำเนินงานในอนาคตนั้นโหนดตัวรับรู้ CU-BEMS จำนวน 95 โหนด, ตัวรับรู้จากบริษัทจิ อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำนวน 66 โหนด, เกตเวย์จำนวน 10 ตัว, และการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบจากงานวิจัยนี้จะถูกนำมาติดตั้ง, สอบเทียบ และใช้งานจริงสำหรับการขยายผลโครงการ CU-BEMS เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่อาคารทั้งหมด 2 อาคารและมีจำนวน 8 ชั้นของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โครงการดังกล่าวจะแล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2557

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
ปีการศึกษา ..... 2556 .....

ลายมือชื่อ.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

# # 5470555221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ZIGBEE/ WIRELESS SENSOR NETWORK/ WIRELESS ACTUATOR NETWORK/ IEEE1888/ BEMS.

TANAKORN INTHASUT : APPLICATION OF ZIGBEE WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR NETWORK FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH IEEE1888 PROTOCOL. ADVISOR: ASST. PROF. CHAODIT ASWAKUL, Ph.D., 58 pp.

This thesis presents a laboratory-scale implementation of ZigBee gateway for a building energy management system (BEMS) based on IEEE1888 in the framework of departmental CU-BEMS project initiative. ZigBee functions for sensor data measurement method and data transmission technique are used for the system, and sensors communicate to the storage or database as well as applications via IEEE1888 protocol FETCH, WRITE and TRAP primitives. In this thesis, two gateways and 50 CU-BEMS sensor nodes, each with sensors of temperature, humidity, illuminance and passive infrared person movement detection, have been designed, built, installed and tested at the laboratory and staff offices of Communication Division at floor 13 Building 4, the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. All experiments have been carried out in as close to actual deployment scenarios of CU-BEMS as possible. Consequently, important CU-BEMS sensor configuration parameters have been determined. It has been found that, at the highest sensor density of 28 CU-BEMS sensor nodes connected to one gateway in the actual installation within the Communication Division laboratory, if the sensor update time is greater than 30 seconds, then the system can achieve the packet success ratio of greater than 99 percents and both packet error/loss ratio of less than 1 percent. With the sensor update time at 60 seconds, the gateway availability from 3-week measurement is found to be higher than 99 percents and mean time to repair of less than 11 seconds. In addition, for the battery-running ZigBee sensor nodes acquired from Digi International Company and installed at the Electrical Engineering Department Building, the current consumption test estimates the 2000 mAh battery lifetime to be 1.5 years if the sensor update time is set to 10 minutes. As ongoing future work, a total of 95 CU-BEMS sensor nodes, 66 Digi sensor nodes, 10 IEEE1888 gateways, and system parameter configurations from this research will be installed, calibrated and deployed for the final CU-BEMS project implementation in the whole departmental area of 2 buildings and 8 floors. The project is due for completion by the end of 2014.

**Department :** ..... Electrical Engineering  
**Field of Study :** ..... Electrical Engineering  
**Academic Year :** ..... 2013 .....

**Student's Signature** .....  
**Advisor's Signature** .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจาก ผศ. ดร.เชาว์ดิศ อัครกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้แนะนำทั้งความรู้ทางด้านวิศวกรรม และงานเขียนทางด้านวิชาการที่มีคุณค่าต่อผู้วิจัย พร้อมทั้งตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.แนบบุญ ทุนเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร และ รศ. ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาสำหรับตรวจสอบพร้อมทั้งให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในส่วนทางด้านข้อมูลจากมาตรฐาน IEEE1888 ได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่งทั้ง Prof. Hiroshi Esaki และ Prof. Hideya Ochiai จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ "ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน" จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 เพื่อได้ประดิษฐ์ชิ้นงานเป็นต้นแบบก่อนการนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้สำหรับการสร้างระบบโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายภายในอาคารของภาควิศวกรรมไฟฟ้า ได้รับเงินอุดหนุนจากโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเพื่อบริหารจัดการการใช้พลังงานของอาคาร (CU-BEMS) "ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน" จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร และเพื่อนในกลุ่มวิจัยโครงข่าย (network research group, NRG) ดูแลโดย ผศ. ดร.เชาว์ดิศ อัครกุล และ ผศ. ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ที่มีกิจกรรมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการทำงานของผู้วิจัยให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสะดวกราบรื่น

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย . . . . .	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ . . . . .	จ
กิตติกรรมประกาศ . . . . .	ฉ
สารบัญ . . . . .	ช
สารบัญตาราง . . . . .	ฌ
สารบัญรูป . . . . .	ญ
บทที่	
1 บทนำ . . . . .	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา . . . . .	1
1.1.1 มาตรฐานการสื่อสารไร้สาย ZigBee ในระบบการจัดการพลังงาน . . . . .	2
1.1.2 มาตรฐาน IEEE1888 . . . . .	4
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ . . . . .	9
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ . . . . .	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ . . . . .	10
1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์ . . . . .	10
2 การทดสอบระบบเบื้องต้นระหว่างโครงข่ายไร้สาย ZigBee กับมาตรฐาน IEEE1888 . . . . .	11
2.1 ภาพรวมของระบบ . . . . .	11
2.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ . . . . .	12
2.3 การทดสอบการใช้งานโปรแกรมการเฝ้าสังเกตสภาพอากาศ . . . . .	14
2.4 การตรวจสอบระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 ในระบบการเฝ้าสังเกตสภาพอากาศโดยใช้โปรแกรม Wireshark . . . . .	17
2.5 สรุป . . . . .	17
3 การพัฒนาโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee ตามมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อการใช้งานจริงในโครงการ CU-BEMS . . . . .	21
3.1 ภาพรวมของระบบ . . . . .	21
3.2 ตัวรับรู้ไร้สาย . . . . .	22
3.2.1 ตัวรับรู้ไร้สาย CU-BEMS ที่พัฒนาขึ้น . . . . .	22
3.2.2 ตัวรับรู้ ZigBee ของบริษัทดิจิตอลอินเทอร์เน็ต . . . . .	26
3.2.3 กลุ่มข้อมูลของ ZigBee แบบ API . . . . .	27
3.3 เกตเวย์สำหรับโครงข่ายรับรู้ไร้สาย . . . . .	29
3.3.1 โครงสร้าง PointSet ของตัวรับรู้ไร้สาย . . . . .	30
3.3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ของเกตเวย์ . . . . .	31
3.4 ตัวกระตุ้นไร้สาย . . . . .	34
3.5 เกตเวย์สำหรับตัวกระตุ้นไร้สาย . . . . .	34
4 ผลการทดสอบระบบ . . . . .	37
4.1 การทดสอบการทำงานของโครงข่ายไร้สาย ZigBee . . . . .	37

4.1.1 การทดสอบผลกระทบของคลื่นความถี่ในย่าน 2.4 GHz . . . . .	37
4.1.2 การทดสอบแหล่งจ่ายพลังงานของ ZigBee . . . . .	39
4.2 การทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์ . . . . .	45
4.3 การทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ . . . . .	47
4.3.1 แนวโน้มสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดคาบเวลาการส่งข้อมูลของโนด ตัวรับรู้เท่ากับ 20, 40 และ 60 วินาที . . . . .	48
4.3.2 การทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ในการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง . . . . .	51
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ . . . . .	53
5.1 บทสรุป . . . . .	53
5.2 ข้อเสนอแนะ . . . . .	54
รายการอ้างอิง . . . . .	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ . . . . .	58



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างกลุ่มข้อมูลของ ZigBee . . . . .	28
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าการทำงานของเกตเวย์ . . . . .	31

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ZigBee ในรูปแบบของทอพอโลยีต่าง ๆ . . . . . 3
รูปที่ 1.2	รูปแบบกลุ่มข้อมูลของ ZigBee แบบ API . . . . . 3
รูปที่ 1.3	สถาปัตยกรรมตามมาตรฐาน IEEE1888 . . . . . 4
รูปที่ 1.4	ลำดับการสื่อสารในมาตรฐาน IEEE1888 ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ . . . . . 5
รูปที่ 1.5	การสื่อสารของโพรโทคอล FETCH . . . . . 6
รูปที่ 1.6	การสื่อสารของโพรโทคอล WRITE . . . . . 7
รูปที่ 1.7	การสื่อสารของโพรโทคอล TRAP แบบทั่วไป . . . . . 8
รูปที่ 1.8	การสื่อสารของโพรโทคอล TRAP ในทางปฏิบัติ . . . . . 8
รูปที่ 1.9	โครงสร้างชั้นขนส่งข้อมูล . . . . . 9
รูปที่ 2.1	แผนผังการติดตั้งโนดตัวรับรู้วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ . . . . . 12
รูปที่ 2.2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบไร้สายที่ติดตั้งตามบริเวณต่าง ๆ . . . . . 12
รูปที่ 2.3	เกตเวย์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ . . . . . 13
รูปที่ 2.4	ผังการเชื่อมต่อวงจรระหว่างเกตเวย์กับ ZigBee . . . . . 13
รูปที่ 2.5	ทอพอโลยีการสื่อสารของโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย . . . . . 14
รูปที่ 2.6	รูปแบบกลุ่มข้อมูลของผังส่งข้อมูลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ไร้สาย . . . . . 14
รูปที่ 2.7	ผังเวลาการสื่อสารระหว่างโครงข่าย ZigBee กับมาตรฐาน IEEE1888 . . . . . 14
รูปที่ 2.8	โครงสร้าง PointSet สำหรับโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ . . . . . 15
รูปที่ 2.9	การจัดเก็บชุดข้อมูลในหน่วยเก็บข้อมูล . . . . . 15
รูปที่ 2.10	การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิก่อน - หลังซ่อมเครื่องปรับอากาศที่วัดได้จากการทดสอบ . . . . . 16
รูปที่ 2.11	การเปรียบเทียบค่าความชื้นก่อน - หลังซ่อมเครื่องปรับอากาศที่วัดได้จากการทดสอบ . . . . . 16
รูปที่ 2.12	การส่งข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลโดยใช้โพรโทคอล WRITE . . . . . 18
รูปที่ 2.13	การตอบกลับจากหน่วยเก็บข้อมูลของโพรโทคอล WRITE . . . . . 18
รูปที่ 2.14	การร้องขอข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลโดยใช้โพรโทคอล FETCH . . . . . 19
รูปที่ 2.15	การตอบกลับพร้อมทั้งข้อมูลของการสื่อสารตามโพรโทคอล FETCH . . . . . 19
รูปที่ 2.16	การตอบกลับพร้อมทั้งข้อมูลชุดสุดท้ายของการสื่อสารตามโพรโทคอล FETCH . . . . . 20
รูปที่ 3.1	สถาปัตยกรรมระบบงานวิทยานิพนธ์ . . . . . 21
รูปที่ 3.2	ลักษณะการตรวจจับคลื่นรังสีอินฟราเรดกับการเคลื่อนไหว [11] . . . . . 23
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกของตัวรับรู้กับความชื้นสัมพัทธ์ [14] . . . . . 24
รูปที่ 3.4	วงจรตัวรับรู้ไร้สาย . . . . . 24
รูปที่ 3.5	ตัวรับรู้วัดสภาพแวดล้อมแบบไร้สายที่พัฒนา . . . . . 25
รูปที่ 3.6	ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ภายในอาคารเจริญวิศวกรรม . . . . . 25
รูปที่ 3.7	ตัวรับรู้วัดสภาพแวดล้อมไร้สายของบริษัทดิจิทัล . . . . . 27
รูปที่ 3.8	การติดตั้งโนดตัวรับรู้ชนิดแบตเตอรี่ภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า . . . . . 27
รูปที่ 3.9	กลุ่มข้อมูลของ ZigBee . . . . . 28
รูปที่ 3.10	เกตเวย์ที่ใช้งานวิทยานิพนธ์ . . . . . 29
รูปที่ 3.11	แผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์สำหรับเกตเวย์ . . . . . 29

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างโครงสร้าง PointSet ของตัวรับรู้ในงานวิทยานิพนธ์ . . . . .	30
รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของเกตเวย์สำหรับการสื่อสารข้อมูลกับโครงข่ายรับรู้ไร้สายกับมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้โปรโตคอล WRITE . . . . .	32
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างผังเวลาการสื่อสารระหว่างโครงข่าย ZigBee กับโครงข่ายสื่อสารในระบบ การจัดการพลังงานในมาตรฐาน IEEE1888 . . . . .	33
รูปที่ 3.15 แผนผังการเชื่อมต่อโมดูล ZigBee เข้ากับบอร์ดวงจรรีเลย์ . . . . .	34
รูปที่ 3.16 การควบคุมหลอดไฟโดยใช้ ZigBee กับองค์ประกอบการสื่อสารตามโปรโตคอล TRAP	35
รูปที่ 3.17 ผังเวลาการทำงานของโปรโตคอล TRAP . . . . .	36
รูปที่ 3.18 ผังการทำงานของเกตเวย์ Callback . . . . .	36
รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบสำหรับการรับส่งข้อมูล . . . . .	37
รูปที่ 4.2 ระดับค่าความเข้มสัญญาณของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายทั้งหมดที่สามารถวัดได้ในจุดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย . . . . .	38
รูปที่ 4.3 ระดับค่าความเข้มสัญญาณของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายที่ไม่สามารถปิดการใช้งานได้ระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย . . . . .	38
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลกระทบของระดับความเข้มของสัญญาณไร้สาย ZigBee กับ อุปกรณ์เข้าถึงอินเทอร์เน็ตไร้สาย . . . . .	39
รูปที่ 4.5 การต่อวงจรสำหรับวัดแรงดันสถานะของแบตเตอรี่ที่ต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ . . . . .	40
รูปที่ 4.6 การแสดงสถานะของแบตเตอรี่ทั้งแบบแอนะล็อกและดิจิทัล . . . . .	41
รูปที่ 4.7 การทดสอบการกินกระแสของตัวรับรู้ ZigBee . . . . .	42
รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ในการทำงานแบบโหมดการหลับแบบวนรอบ . . . . .	42
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของแบตเตอรี่กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ ZigBee . . . . .	44
รูปที่ 4.10 แผนผังการติดตั้งตัวรับรู้ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยจำนวน 28 โหนด . . . . .	45
รูปที่ 4.11 ผังเวลาการส่งข้อมูลระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายกับมาตรฐาน IEEE1888 สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์ . . . . .	46
รูปที่ 4.12 สมรรถนะการสื่อสารระหว่าง ZigBee กับเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ในการทำงานจริงในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร . . . . .	47
รูปที่ 4.13 ช่วงเวลาเฉลี่ยสำหรับการทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งาน . . . . .	48
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาโนดตัวรับรู้ ZigBee เท่ากับ 20 วินาที . . . . .	49
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาโนดตัวรับรู้ ZigBee เท่ากับ 40 วินาที . . . . .	49
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาโนดตัวรับรู้ ZigBee เท่ากับ 60 วินาที . . . . .	50
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ . . . . .	50
รูปที่ 4.18 ผังการติดตั้งโนดรับรู้ไร้สาย ZigBee ครอบคลุมพื้นที่ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม .	51
รูปที่ 4.19 ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ใช้เวลาการทดสอบ 3 สัปดาห์ . . . . .	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะมีแนวโน้มที่แพร่หลายมากขึ้น โดยมีหลากหลายสาเหตุ บั้จจัยไม่ว่าจะเป็นสภาวะของอากาศที่แปรปรวน ภาวะโลกร้อนมลภาวะต่าง ๆ จนกระทั่งพลังงานที่มี อยู่อย่างจำกัด โครงข่ายไฟฟ้าเดิมอาจยังไม่ตอบโจทย์สำหรับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงเกิด เทคโนโลยีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านพลังงานหมุนเวียน รถไฟฟ้า บ้าน/อาคารอัตโนมัติ ฯลฯ [1] เพื่อ ตอบโจทย์ข้างต้น ดังนั้นเทคโนโลยีโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจึงมีหลากหลายองค์ประกอบสำหรับการ ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะนี้ประกอบด้วยโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง และโครงข่ายสารสนเทศและการสื่อสาร จึงทำให้ระบบสื่อสารนั้นต้องสื่อสารกันแบบเวลาจริง (real time) และสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้หลากหลายโพรโทคอล (protocol) ดังนั้นมาตรฐานของ ระบบสื่อสารนั้นจำเป็นต้องมีรูปแบบการสื่อสารระหว่างกันที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน [2]

เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (information and communication technology) ใน ระบบการจัดการพลังงาน (energy management system) ได้ประยุกต์ใช้งานสำหรับผู้บริโภคไฟฟ้า ทราบถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าว่าอยู่ระดับใด จากนั้นผู้บริโภคไฟฟ้าก็สามารถกำหนดทิศทางการ ใช้พลังงานไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด ไม่ว่าจะเป็นประยุกต์ใช้งานภายในบ้าน ที่พักอาศัย อาคาร หรือ โรงงานอุตสาหกรรมภายในชุมชน ระบบการจัดการพลังงานต่าง ๆ เหล่านี้ประกอบด้วยระบบการวัด ในการใช้พลังงานไฟฟ้าและข้อมูลของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง การเคลื่อนไหวของคน เป็นต้น โดยมีตัวรับรู้สำหรับการวัดข้อมูลและใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายสำหรับ การรับ - ส่งจะสะดวกสำหรับการติดตั้ง จากนั้นประมวลผลและส่งข้อมูลเข้าสู่โลกของอินเทอร์เน็ต (internet) เพื่อไปสู่ระบบฐานข้อมูลสำหรับบันทึกข้อมูลในเวลาจริงและระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถ ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ โดยระบบการสื่อสารแบบนี้จะสื่อสารข้อมูลแบบสอง ทิศทาง (two way communication) ระหว่างโน้ตตัวรับรู้ไร้สายกับแม่ข่าย (server) โดยให้โต้ตอบกัน ทั้งสองฝั่งเพื่อให้การรับรู้ข้อมูลข่าวสาร สามารถบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และชาญฉลาด [3] [4]

ในปี ค.ศ. 2011 สถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of electrical and electronics engineers, IEEE) ได้ออกมาตรฐานใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารสำหรับระบบการจัดการ พลังงาน โดยใช้ชื่อว่าโพรโทคอลโครงข่ายการควบคุมชุมชนสีเขียวอย่างแพร่หลาย (ubiquitous green community control network protocol, UGCCNet) หรือ IEEE1888 [5] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ การเฝ้าสังเกตการใช้พลังงานไฟฟ้าและข้อมูลสภาพแวดล้อมภายใต้สถานที่ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังสามารถ ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าระยะไกล (remote) ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้ เพื่อความสะดวกต่อการเข้าถึง การใช้งานในระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ มากขึ้น ซึ่งมาตรฐานนี้ได้นำไปใช้ในระบบการจัดการพลังงานในโครงการมหาวิทยาลัยโตเกียวสีเขียว (green university of tokyo project, GUTP) [6] พบว่ามีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นผลที่พอใจ โดยระบบการจัดการพลังงานจะมีระบบการเฝ้าสังเกตการใช้พลังงานไฟฟ้าแยกเป็นรายคน ห้อง อาคาร เพื่อให้เกิดความร่วมมือสำหรับการตั้งเป้าหมายในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า จึงส่งผลให้มีการปรับ

เปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อ  
 โต้ตอบการควบคุมแบบระยะไกล อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจึงเห็นว่าถ้านำระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้า  
 มาประยุกต์ใช้จริงในบริบทของประเทศไทยจะสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมได้หรือไม่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ  
 ความร่วมมือกันในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของคนเช่นเดียวกัน

### 1.1.1 มาตรฐานการสื่อสารไร้สาย ZigBee ในระบบการจัดการพลังงาน

โครงข่ายไร้สายในระบบการจัดการพลังงานนั้นมีหลากหลาย ได้แก่ ZigBee [7], BacNet [8]  
 หรือ 6LowPan [9] เป็นต้น โดยการทำงานนั้นจะเป็นโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สายเพื่อจะ  
 อำนวยความสะดวกสำหรับการจัดการพลังงานแบบอัตโนมัติ พร้อมทั้งสามารถวัดและรายงานผล  
 ข้อมูลสำหรับการเฝ้าสังเกตและควบคุมระยะไกลได้โดยอาศัยโครงข่ายเหล่านี้ การประยุกต์ใช้โครงข่าย  
 ไร้สายในระบบการจัดการพลังงานนี้ประกอบด้วย การควบคุมระบบแสงสว่าง การควบคุมแบบระยะ  
 ไกล การจัดการพลังงานอัจฉริยะและในด้านความปลอดภัย นอกจากนี้ข้อดีอีกประการหนึ่ง การใช้  
 งานโครงข่ายไร้สายนั้นยืดหยุ่นสำหรับการติดตั้งของอุปกรณ์

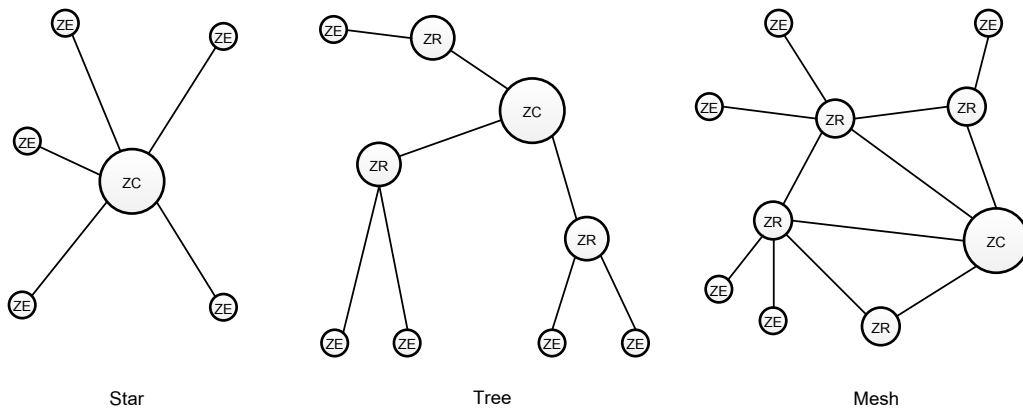
ZigBee เป็นโครงข่ายไร้สายแบบเมช (wireless mesh network) สำหรับประยุกต์ใช้ใ  
 การเฝ้าสังเกตและในงานระบบควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ระบบอัตโนมัติในบ้าน การควบคุมระบบ  
 ปรับอากาศ การเกษตร หรือทางทหาร เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ไร้สายโดย ZigBee Alliance [7] จะมี  
 การสื่อสารระยะสั้น ใช้อัตราการส่งข้อมูลต่ำ และพลังงานต่ำ โดยการสื่อสารของโพรโทคอล ZigBee  
 นี้มีชั้นของการสื่อสารหลักอยู่ 4 ชั้น ดังนี้ [7]

1. ชั้นกายภาพ (physical layer) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่ทำงานอยู่ในย่านความถี่  
 868 MHz 915 MHz และ 2.4 GHz ซึ่งใช้ในยุโรป อเมริกาและทั่วโลกตามลำดับ อัตรา  
 ข้อมูลนั้นเป็น 20 kb/s, 40kb/s และ 250 kb/s
2. ชั้นการควบคุมการเข้าถึง (medium access control)
3. ชั้นโครงข่าย (network layer)
4. ชั้นประยุกต์การใช้งาน (application layer)

#### 1.1.1.1 ชนิดการทำงานของโครงข่ายไร้สาย ZigBee

อุปกรณ์ไร้สาย ZigBee สามารถเชื่อมต่อได้หลายรูปแบบ ได้แก่ แบบดาว แบบต้นไม้ และ  
 แบบเมช แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 โดยฟังก์ชันการทำงานแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ [7]

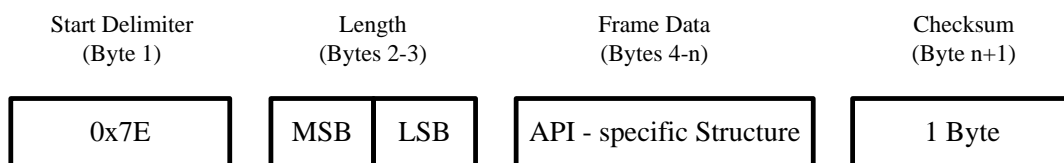
1. อุปกรณ์ประสาน (coordinator) เป็นแกนหลักของระบบสื่อสารโครงข่าย โดยใน 1 โครงข่ายจะ  
 มีอุปกรณ์ประสานเพียง 1 โหนด
2. อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลในเส้นทางต่าง ๆ เพื่อให้โครงข่ายที่มีขนาด  
 ใหญ่กว่าระยะการรับส่งข้อมูลสื่อสารกันได้
3. อุปกรณ์ปลายทาง (end device) เป็นโหนดสุดท้ายของโครงข่ายและสามารถปรับการทำงานเป็น  
 รูปแบบการประหยัดพลังงานได้



รูปที่ 1.1: โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ZigBee ในรูปแบบของทอพอโลยีต่าง ๆ

### 1.1.1.2 รูปแบบกลุ่มข้อมูล (data packet) ของ ZigBee API

ส่วนต่อประสานการเขียนโปรแกรมประยุกต์ (application programming interface, API) เป็นรูปแบบการสื่อสาร ZigBee ที่ใช้งานร่วมกับการประยุกต์ใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้ อ่านและแปลความหมายได้ โดยรูปแบบของกลุ่มข้อมูลดังรูปที่ 1.2



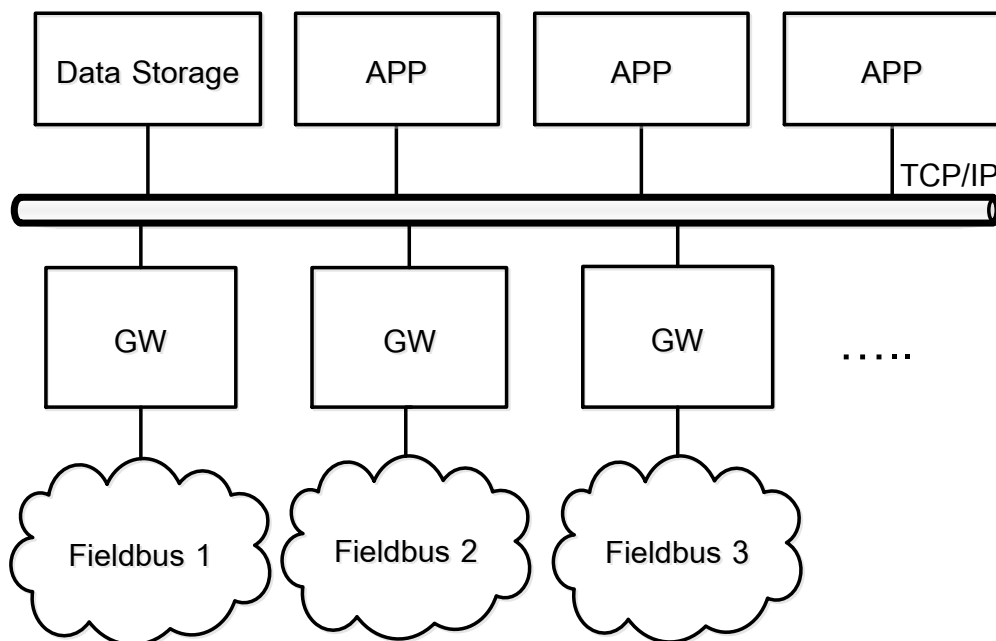
รูปที่ 1.2: รูปแบบกลุ่มข้อมูลของ ZigBee แบบ API

1. ไบท์ตัวคั่นเริ่มต้น (start delimiter) คือ ส่วนเริ่มต้นของเฟรม API จะใช้ 0x7E เพื่อระบุจุดเริ่มต้นของ API มีขนาด 1 ไบท์
2. ไบท์ความยาว (length) คือ จำนวนความยาวของเฟรมข้อมูล (frame data) มีขนาด 2-3 ไบท์
3. เฟรมข้อมูล (frame data) คือ คำสั่งและชุดข้อมูลที่ต้องการสื่อสาร
4. ไบท์การตรวจสอบข้อมูล (checksum) สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล มีขนาด 1 ไบท์

## 1.1.2 มาตรฐาน IEEE1888

### 1.1.2.1 สถาปัตยกรรม IEEE1888

สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888 [5] มี 3 องค์ประกอบการสื่อสารหลัก ได้แก่ เกตเวย์ (gateway, GW) หน่วยเก็บข้อมูล (data storage) และโปรแกรมประยุกต์ (application, APP) จะสื่อสารในโครงข่าย TCP/IP (transmission control protocol/internet protocol) โดยสถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888 แสดงได้ดังรูปที่ 1.3

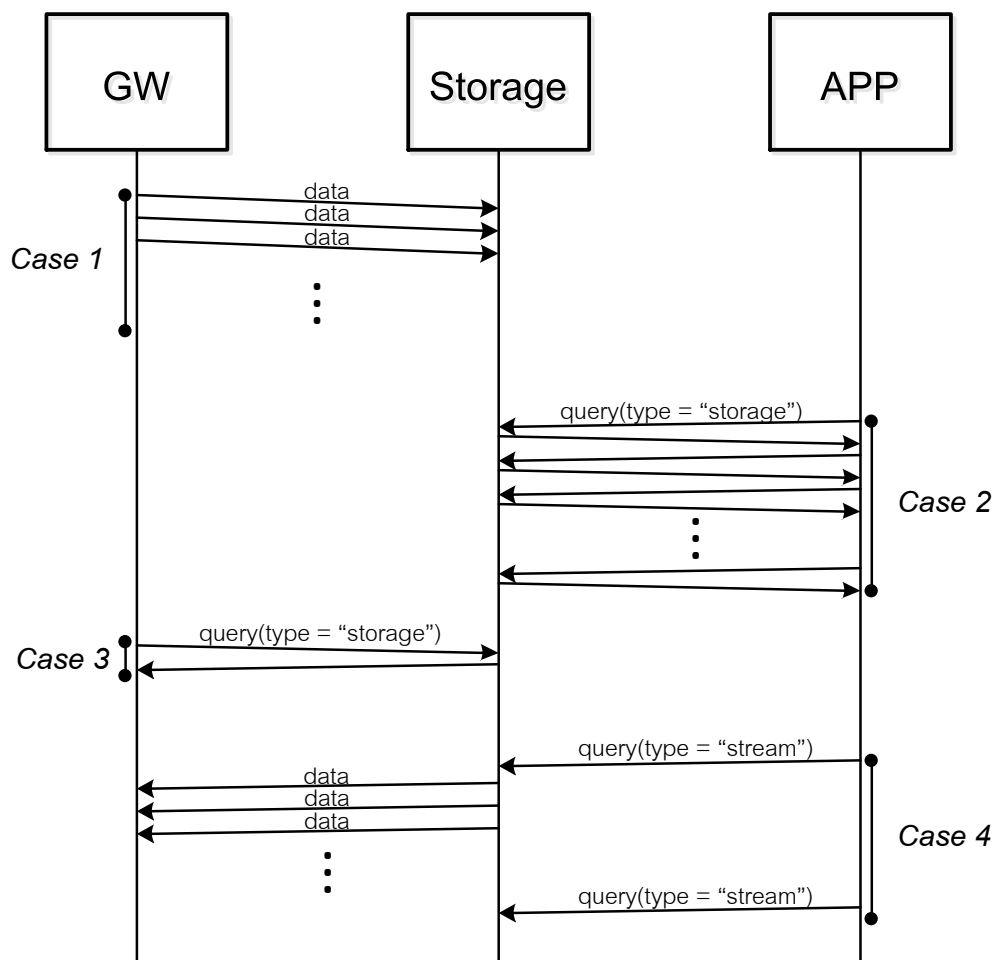


รูปที่ 1.3: สถาปัตยกรรมตามมาตรฐาน IEEE1888

- เกตเวย์ทำหน้าที่แปลงรูปแบบชุดข้อมูลที่มีชนิดอุปกรณ์ ตัวรับรู้ ตัวกระตุ้น หรือโพรโทคอลสื่อสารที่หลากหลายในระบบการจัดการพลังงานให้มีความสามารถสื่อสารร่วมกับองค์ประกอบในมาตรฐาน IEEE1888 ที่เป็นมาตรฐานกลาง ตัวอย่างการทำงานของเกตเวย์ ได้แก่ เกตเวย์อ่านข้อมูลของตัวรับรู้สำหรับวัดพลังงาน สภาพแวดล้อม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โพรโทคอล ZigBee ที่เป็นโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายได้แก่ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง การเคลื่อนไหวของคน และในส่วนของตัวกระตุ้นที่ทำหน้าที่ควบคุมระบบแสงสว่าง เป็นต้น ดังนั้นเกตเวย์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในมาตรฐาน IEEE1888 นี้ เพื่อให้โพรโทคอลการสื่อสารที่ชนิด ผู้ผลิต และรูปแบบภาษาการสื่อสาร เชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นกับโครงข่าย TCP/IP เพื่อให้การสื่อสารเป็นไปตามรูปแบบของมาตรฐาน IEEE1888
- หน่วยเก็บข้อมูลทำหน้าที่บันทึกข้อมูลในระบบการจัดการพลังงาน ได้แก่ ข้อมูลสภาพแวดล้อมระดับพลังงานภายในสถานที่ และในเวลาต่าง ๆ

- โปรแกรมประยุกต์ทำหน้าที่สำหรับการเฝ้าสังเกตสถานะของตัวรับรู้ที่บันทึกในหน่วยเก็บข้อมูลเกี่ยวกับระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่สามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ โดยแสดงเป็นรูปภาพหรือตาราง เพื่อเฝ้าสังเกตและวิเคราะห์แนวโน้มข้อมูลในรายชั่วโมง รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน หรือรายปี เพื่อวางแผนการใช้งานของเครื่องใช้ไฟฟ้าได้

### 1.1.2.2 ลำดับการสื่อสารของมาตรฐาน IEEE1888



รูปที่ 1.4: ลำดับการสื่อสารในมาตรฐาน IEEE1888 ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ

การสื่อสารระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถอธิบายตามแผนผังตัวอย่างการสื่อสารแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 [5] โดยมีรายละเอียดเป็น 4 กรณีดังนี้ [5]

- เกิดเว็ส่งข้อมูลจากโครงข่ายตัวรับรู้ไปยังหน่วยเก็บข้อมูล

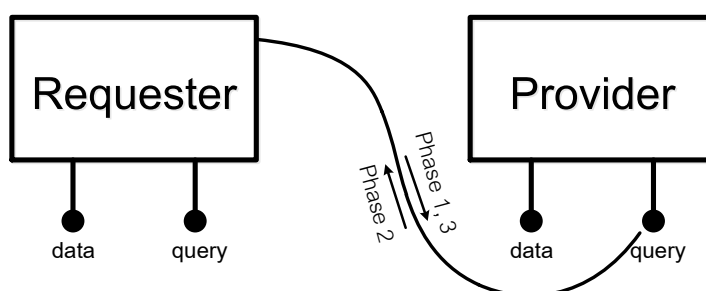


2. โปรแกรมประยุกต์ร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูลโดยเริ่มดึงข้อมูลจากเวลาเริ่มต้นการร้องขอ จนกระทั่งเวลาสุดท้ายของการร้องขอ
3. เกตเวย์ร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูลเพื่ออัปเดตข้อมูลล่าสุด
4. โปรแกรมประยุกต์ส่งข้อมูลเพื่อระบุชื่อ Point ID ของอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมจากนั้น หน่วยเก็บข้อมูลรอรับค่าจากโนดตัวรับรู้เมื่อมีข้อมูลที่เปลี่ยนแปลง หน่วยเก็บข้อมูลจะส่งข้อมูลล่าสุดไปยังเกตเวย์ที่ต้องการรับทราบข้อมูลหรือควบคุมอุปกรณ์ในเวลาจริง

### 1.1.2.3 โพรโทคอลการสื่อสารหลักในมาตรฐาน IEEE1888

กระบวนการหลักที่ใช้สื่อสารกันระหว่างองค์ประกอบ (component) ต่าง ๆ ได้แก่ FETCH, WRITE และ TRAP โดยอธิบายรายละเอียดการทำงานได้ดังนี้

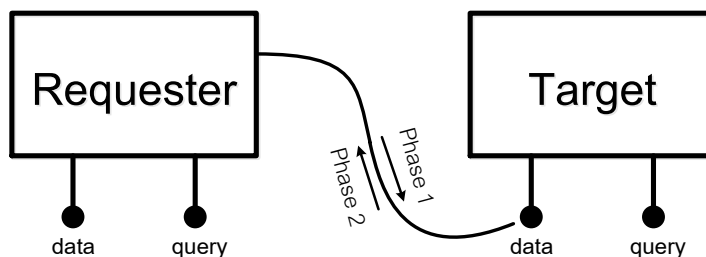
1. โพรโทคอล FETCH ทำหน้าที่ร้องขอเพื่ออ่านข้อมูลจากองค์ประกอบที่เรียกดูข้อมูลจากระยะไกล ซึ่งในรูปที่ 1.5 เป็นแผนผังการสื่อสารข้อมูล ได้แก่ ผู้ร้องขอข้อมูล (requester) และผู้ให้บริการข้อมูล (provider)



รูปที่ 1.5: การสื่อสารของโพรโทคอล FETCH

- ช่วงที่ 1 ผู้ร้องขอข้อมูลส่งคำสั่งร้องขอข้อมูลไปยังผู้ให้บริการข้อมูล โดยการส่งช่วงเวลาของข้อมูลที่ต้องการไปยังผู้ให้ข้อมูล และระบุขนาดสูงสุดของข้อมูล (acceptable size) ที่สามารถรับไปด้วย
- ช่วงที่ 2 ผู้ให้บริการข้อมูลส่งข้อมูลที่แบ่งออกเป็นชุดย่อย ๆ กลับมายังผู้ร้องขอข้อมูล ถ้าหากข้อมูลที่ร้องขอนั้นมีขนาดใหญ่กว่าปริมาณข้อมูลที่ร้องขอ จะมีชุดข้อมูลที่มาพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่งของข้อมูล (cursor) ถ้าหากผู้ร้องขอข้อมูลไม่ได้รับตัวชี้ตำแหน่งข้อมูล แสดงว่าข้อมูลที่ได้รับมาเป็นข้อมูลชุดสุดท้าย ดังนั้นจึงสิ้นสุดการทำงานของโพรโทคอล FETCH (ไม่มีการทำงานช่วงที่ 3)
- ช่วงที่ 3 ถ้าหากผู้ร้องขอข้อมูลได้รับตัวชี้ตำแหน่งของข้อมูลจาก ช่วงที่ 2 แสดงว่าข้อมูลยังไม่สิ้นสุด ผู้ร้องขอข้อมูลจะต้องร้องขอข้อมูลพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่งของข้อมูลไปยังผู้ให้ข้อมูลอีกครั้ง และกลับไปทำงานใน ช่วงที่ 2

2. โพรโทคอล WRITE ทำหน้าที่สำหรับถ่ายโอนข้อมูลไปยังองค์ประกอบเป้าหมาย (target) ที่ต้องการส่งข้อมูล ซึ่งในรูปที่ 1.6 แสดงการสื่อสารระหว่างผู้ร้องขอส่งข้อมูล (requester) กับองค์ประกอบเป้าหมาย



รูปที่ 1.6: การสื่อสารของโพรโทคอล WRITE

ช่วงที่ 1 ผู้ร้องขอส่งข้อมูลทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ต้องการจะเขียนไปยังผู้รับข้อมูล

ช่วงที่ 2 ผู้รับข้อมูลตอบกลับไปยังผู้เขียนข้อมูลว่าข้อมูลที่ได้รับมาถูกต้องหรือเกิดข้อผิดพลาดขึ้น

3. โพรโทคอล TRAP ทำหน้าที่บันทึกหรือวางกับดักการเกิดของเหตุการณ์ล่วงหน้าที่ต้องการควบคุมหรือต้องการแจ้งเตือน (notification) จากนั้นจะส่งข้อมูลเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ตรงกับเงื่อนไขที่บันทึกล่วงหน้าไว้ โดยอธิบายรายละเอียดขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ร้องขอข้อมูล (requester) คือ องค์ประกอบที่ตั้งค่าเงื่อนไขและรายละเอียดที่ต้องการควบคุมอุปกรณ์โดยส่งข้อมูลไปยังผู้ให้บริการข้อมูล

ผู้ให้บริการข้อมูล (provider) คือ องค์ประกอบที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลเมื่อตรงกับเงื่อนไขที่ผู้ร้องขอข้อมูลได้บันทึกไว้

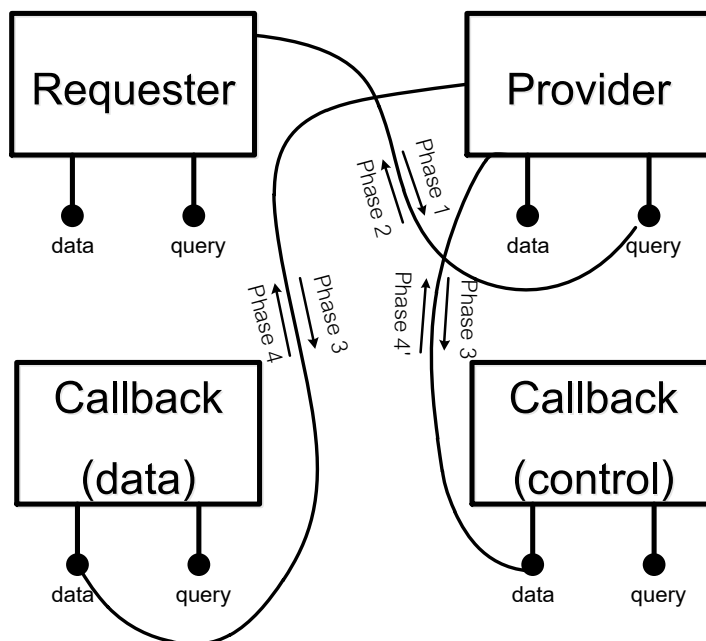
ผู้เรียกกลับของข้อมูล (callback data) คือ องค์ประกอบที่รับข้อมูลจากผู้ให้บริการข้อมูล

ผู้เรียกกลับของการควบคุม (callback control) คือ องค์ประกอบที่รับสัญญาณควบคุมจากผู้ให้บริการข้อมูล

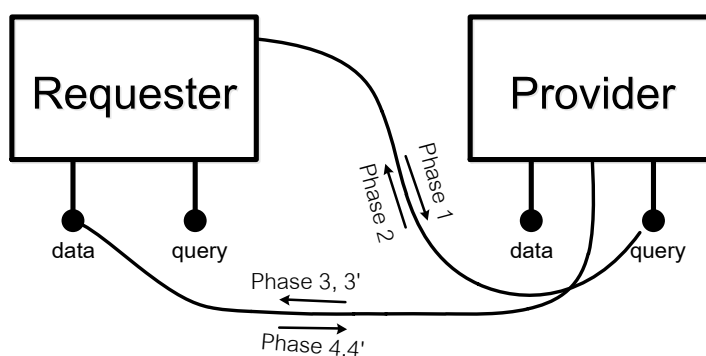
จากรูปที่ 1.7 แสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติเพื่อให้เห็นถึงการแบ่งหมวดหมู่อย่างชัดเจนองค์ประกอบโดย ผู้ร้องขอข้อมูล ผู้เรียกกลับของข้อมูล และควบคุม เป็นองค์ประกอบเดียวกันแสดงในรูปที่ 1.8

ช่วงที่ 1 ผู้ร้องขอข้อมูลส่งข้อมูลล่วงหน้าที่ต้องการควบคุมไปยังผู้ให้บริการข้อมูลโดยต้องระบุรายละเอียดของการวางกับดักข้อมูล และระบุ URI สำหรับการตอบกลับของ ผู้เรียกกลับ (ข้อมูล) และ ผู้เรียกกลับ (ควบคุม)

ช่วงที่ 2 ผู้ให้บริการจะตอบกลับไปยังผู้ร้องขอข้อมูลเพื่อแสดงสถานะการรับส่งข้อมูลในการสื่อสารโครงข่าย



รูปที่ 1.7: การสื่อสารของโปรโตคอล TRAP แบบทั่วไป

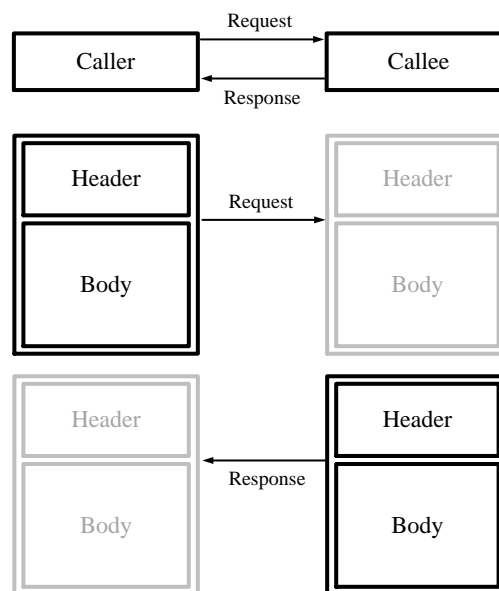


รูปที่ 1.8: การสื่อสารของโปรโตคอล TRAP ในทางปฏิบัติ

- ช่วงที่ 3 ผู้ให้บริการตอบกลับไปยัง URI ของ ผู้เรียกกลับ (ข้อมูล) เมื่อเกิดเงื่อนไขที่ตรงกับผู้ร้องขอได้บันทึกไว้
- ช่วงที่ 4 ผู้เรียกกลับ (ข้อมูล) ตอบกลับไปยังผู้ให้บริการข้อมูลเพื่อแสดงสถานะการรับส่งข้อมูลในการสื่อสารโครงข่าย
- ช่วงที่ 3' ถ้าหากใน ช่วงที่ 3 เกิดความผิดพลาดขึ้น ผู้ให้บริการข้อมูลจะตอบกลับไปยัง URI ของผู้เรียกกลับ (ควบคุม) ว่าเกิดการสื่อสารผิดพลาดขึ้นใน ช่วงที่ 3
- ช่วงที่ 4' ผู้เรียกกลับ (ควบคุม) ตอบกลับไปยังผู้ให้บริการข้อมูลเพื่อแสดงสถานะการรับส่งข้อมูลในการสื่อสารโครงข่าย

### 1.1.2.4 โครงสร้างข้อมูลของระบบสื่อสารระหว่างผู้ส่งและผู้รับ

การสื่อสารระหว่างองค์ประกอบในมาตรฐาน IEEE1888 ได้ประยุกต์ใช้งานโพรโทคอล RPC (remote procedure call) ดังรูปที่ 1.9 โดยผู้ส่งข้อมูล หรือผู้เรียก (caller) จะส่งข้อมูลไปยังผู้รับข้อมูล หรือผู้ถูกเรียก (callee) จากนั้นผู้รับข้อมูลจะตอบกลับไปยังผู้ส่ง โดยมีโครงสร้างข้อมูลการรับส่งที่เหมือนกัน ซึ่งข้อมูลของ RPC แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อความเฮดเดอร์ (header) และเนื้อหา (body) โดยส่วนเฮดเดอร์เป็นรายละเอียดข้อมูลที่ต้องการควบคุมในระบบสื่อสาร เช่น สถานะการตอบกลับที่ส่งข้อมูลสำเร็จ หรือสถานะการส่งความผิดพลาดจากผู้รับไปยังผู้ส่งข้อมูล เป็นต้น ส่วนเนื้อหาประกอบไปด้วย Point หรือ PointSet ที่มีค่าข้อมูลที่อ่านมาจากตัวรับรู้พร้อมกับค่าเวลาที่บันทึกไว้ เป็นต้น



รูปที่ 1.9: โครงสร้างชั้นขนส่งข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาโครงข่ายไร้สาย ZigBee ที่สามารถสื่อสารกับมาตรฐาน IEEE1888 โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อพัฒนาเกตเวย์สำหรับทำหน้าที่ถ่ายโอนชุดข้อมูลของตัวรับรู้ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. สามารถพัฒนาตัวรับรู้สำหรับวัดข้อมูลสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ สถานะของการเคลื่อนไหวของคน ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยสื่อสารผ่านอุปกรณ์ไร้สาย ZigBee

ซึ่งเป็นภาคส่งสัญญาณ โดยส่งสัญญาณไร้สายไปยัง ZigBee ฝั่งรับข้อมูลที่เชื่อมต่อเกตเวย์ ตามมาตรฐาน IEEE1888 พร้อมทั้งออกแบบการทำงานของเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูลของโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ถัดจากนั้นเกตเวย์ได้ใช้ โพรโทคอล WRITE เพื่อถ่ายโอนข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลโดยบันทึกค่าต่าง ๆ ของตัวรับรู้ โดยใช้สถานที่ทดสอบภายใน ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม

2. สามารถพัฒนาระบบควบคุมของหลอดไฟตัวอย่างสำหรับการควบคุมแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้การควบคุมหลอดไฟจะใช้ชุดข้อมูลตัวรับรู้การเคลื่อนไหวของคน ที่ได้บันทึกไว้ในหน่วยเก็บข้อมูล จากนั้นเกตเวย์ฝั่งโครงข่ายตัวกระตุ้นจะใช้โพรโทคอล TRAP สำหรับดึงข้อมูลสำหรับส่งข้อมูลไปยังโครงข่ายตัวกระตุ้นไร้สาย เพื่อควบคุมชุดควบคุมหลอดไฟผ่านโครงข่ายไร้สาย ZigBee ได้
3. สามารถทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ในระบบสื่อสารของโครงข่ายไร้สาย ZigBee และทดสอบการทำงานของเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ได้แก่ อัตราส่วนกลุ่มข้อมูลสำเร็จ อัตราส่วนกลุ่มข้อมูลผิดพลาด อัตราส่วนกลุ่มข้อมูลสูญหาย และสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee สามารถเชื่อมต่อกับโครงข่าย TCP/IP ในระบบการจัดการพลังงานของอาคารตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยระบบสื่อสารสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ และสามารถนำชุดข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee มาประยุกต์ใช้งานในด้านการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ ได้

## 1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงความสำคัญของโครงข่ายไร้สาย ZigBee ในระบบการจัดการพลังงานและมาตรฐาน IEEE1888

บทที่ 2 การทดสอบระบบเบื้องต้นระหว่างโครงข่ายไร้สาย ZigBee กับมาตรฐาน IEEE1888: กล่าวถึงการประยุกต์ใช้โครงข่ายรับรู้ไร้สาย ZigBee ที่มีโครงข่ายขนาดเล็กและการทดสอบการสื่อสารข้อมูลด้วยมาตรฐาน IEEE1888

บทที่ 3 การพัฒนาโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee ตามมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อการใช้งานจริงในโครงการ CU-BEMS: กล่าวถึงการออกแบบโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee ที่สามารถสื่อสารกับเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 กับการใช้งานจริงในระบบการจัดการพลังงานภายในอาคารของโครงการ CU-BEMS

บทที่ 4 ผลการทดสอบ: กล่าวถึงการทดสอบการสื่อสารของโครงข่ายไร้สาย ZigBee จากนั้นทดสอบสมรรถนะและสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ที่ออกแบบที่สื่อสารกับโครงข่ายไร้สาย ZigBee

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: สรุปผลการทดสอบระบบ และข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## บทที่ 2

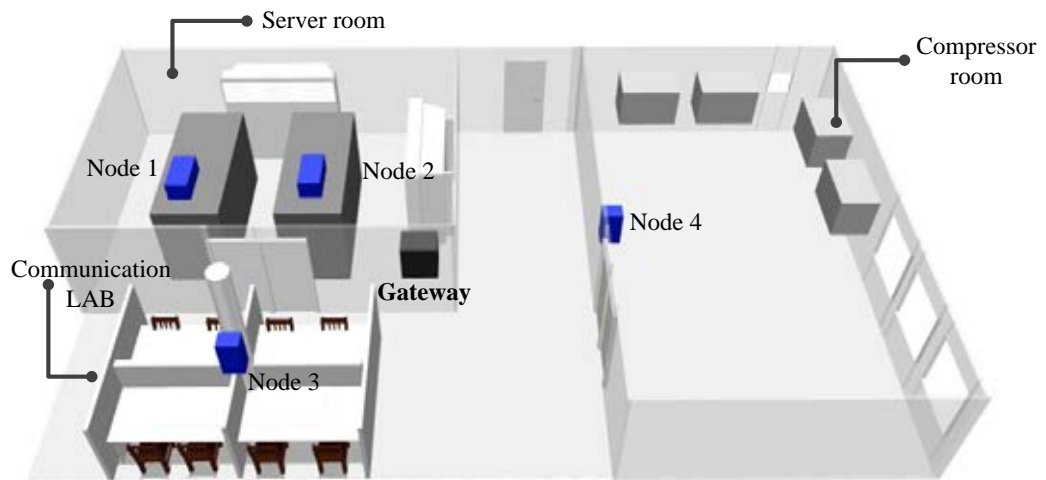
# การทดสอบระบบเบื้องต้นระหว่างโครงข่ายไร้สาย ZigBee กับ มาตรฐาน IEEE1888

ในบทนี้แนะนำเสนอการทดสอบระบบสื่อสารเบื้องต้นในมาตรฐาน IEEE1888 ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงข่ายรับรู้อากาศไร้สายจำนวน 4 โหนด สำหรับระบบการวัดและการเฝ้าสังเกตสภาพอากาศภายในห้องโครงข่ายท้องถิ่น หรือห้องแม่ข่าย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งภายในห้องนี้มีเครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ทำงานอยู่ แต่ในบางครั้งเครื่องปรับอากาศภายในห้องได้มีอาการชำรุด ดังนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบและติดตั้งระบบการเฝ้าสังเกตอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องแม่ข่ายและบริเวณข้างเคียงห้องนี้ เพื่อให้เป็นประโยชน์สำหรับการเฝ้าระวังและการกำหนดค่าอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศให้เหมาะสมในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ การเฝ้าสังเกตสภาพอากาศนี้ใช้ระบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 ซึ่งเป็นมาตรฐานเปิดและสื่อสารบนพื้นฐานของ TCP/IP ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลที่เฝ้าระวังได้อย่างสะดวกผ่านอินเทอร์เน็ต

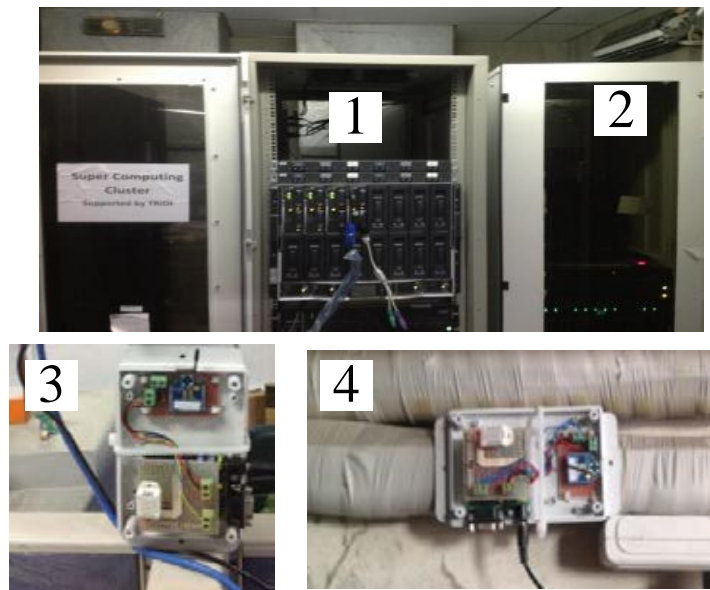
### 2.1 ภาพรวมของระบบ

โครงข่ายตัวรับรู้อากาศไร้สายประกอบด้วยโหนดตัวรับรู้อากาศที่ติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ โดยแต่ละโหนดทำหน้าที่วัดสถานะสภาพอากาศภายในห้อง เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบระบบเฝ้าสังเกตสภาพอากาศภายในห้องแม่ข่ายโดยมีเครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ที่ติดตั้ง และใช้งานภายในห้องนี้โดยใช้ระบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยภายในห้องทดสอบระบบประกอบด้วยโหนดของการวัดสถานะและค่าต่าง ๆ โดยรับส่งข้อมูลด้วยอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ZigBee จากนั้นมีโหนด ZigBee ปลายทางที่ทำหน้าที่รับข้อมูลดังกล่าวโดยเชื่อมต่อกับเกตเวย์ จากนั้นเกตเวย์ทำหน้าที่ส่งข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายอินเทอร์เน็ตและบันทึกค่าการตรวจวัดที่หน่วยเก็บข้อมูล โดยที่โปรแกรมประยุกต์สามารถตรวจสอบข้อมูลสภาพอากาศภายในห้อง

จากรูปที่ 2.1 แสดงการติดตั้งโหนดตัวรับรู้อากาศภายในและภายนอกห้องแม่ข่ายโดยมีทั้งสิ้น 4 โหนด โดยโหนดที่ 1 และ 2 จะติดตั้งภายในห้องแม่ข่าย โหนดที่ 3 ติดตั้งในห้องปฏิบัติการ และโหนดที่ 4 ติดตั้งที่ห้องที่ติดตั้งเครื่องคอมเพรสเซอร์ (compressor) ของเครื่องปรับอากาศ โดยทั้ง 4 บริเวณที่จะมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ผ่านโปรแกรมประยุกต์ที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรับรู้อากาศ DTH22 เป็นตัวรับรู้อากาศที่สามารถวัดได้ทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในวงจรรวมตัวเดียวกัน จากนั้นเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ arduino [10] ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ZigBee โดยสื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz ในส่วนการตั้งค่าของ ZigBee นั้นสามารถใช้โปรแกรม X-CTU เพื่อกำหนดการทำงานของ ZigBee ได้หลายรูปแบบการใช้งานโดยแบ่งการทำงาน ได้แก่ อุปกรณ์ประสาน, อุปกรณ์จัดเส้นทาง และอุปกรณ์ปลายทาง



รูปที่ 2.1: แผนผังการติดตั้งโหนดตัวรับรู้วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 2.2: อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบไร้สายที่ติดตั้งตามบริเวณต่าง ๆ

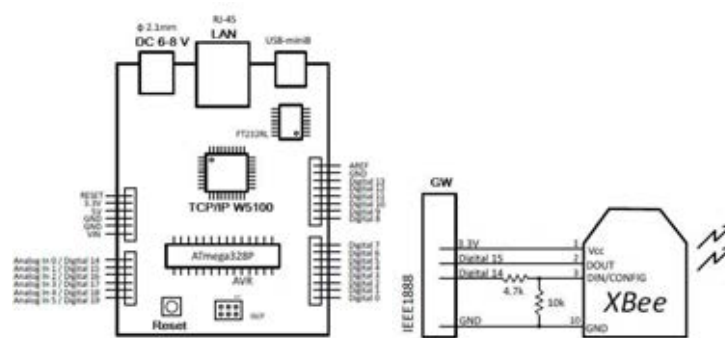
## 2.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างโหนดตัวรับรู้ที่ติดตั้งในสถานที่ทดสอบจริง ตัวรับรู้ไร้สายภายในห้องนี้ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ZigBee และจากรูปที่ 2.3 เป็นเกตเวย์ตามฐาน IEEE1888

รูปที่ 2.5 เป็นทอพอโลยีที่ใช้งานและสื่อสารตามผังเวลาดังรูปที่ 2.7 เริ่มจาก ZigBee ที่



รูปที่ 2.3: เกตเวย์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ

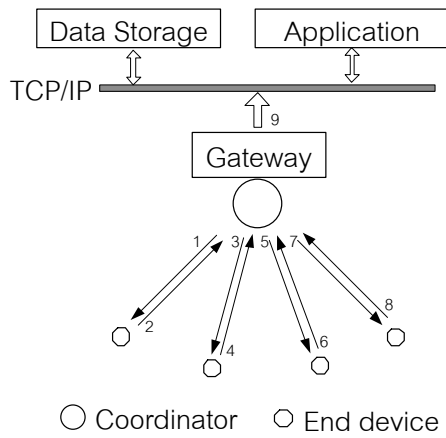


รูปที่ 2.4: ผังการเชื่อมต่อวงจรระหว่างเกตเวย์กับ ZigBee

เชื่อมต่อกับเกตเวย์ทำหน้าที่เป็นส่วนประสาน (coordinator) ในการรับส่งข้อมูล ในส่วนของตัวรับรู้แต่ละโหนดนั้นทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ปลายทางในการทำงานแต่ละโหนดเริ่มโดย ZigBee ตัวประสานทำหน้าที่ส่งข้อมูลแบบกระจายสัญญาณหมายเลขประจำของโหนดที่ 1 คือ "N1" ถัดจากนั้นโหนดที่ 1 ทำหน้าที่วัดค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เมื่อวัดครบแล้วโหนดนี้จะส่งข้อมูลที่วัดได้ไปสู่เกตเวย์ในรูปแบบของกลุ่มข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นที่มีขนาดต่ออย่างละไม่เกิน 5 ไบต์พร้อมด้วยคั่นกลุ่มข้อมูลด้วยหมายเลขประจำโหนดจำนวน 2 ไบต์ดังรูปที่ 2.6 เมื่อเกตเวย์ร้องขอข้อมูลตัวรับรู้ทุกโหนดครบแล้ว เกตเวย์จะพิจารณาเฉพาะข้อมูลเฉพาะที่เป็นค่าตัวรับที่อ่านได้ (value) ให้เชื่อมโยงกับ Point ID ของตัวรับรู้แต่ละโหนด จากนั้นเกตเวย์จึงส่งข้อมูลที่รับมาได้ทั้งหมดเข้าไปสู่โครงข่ายไปสู่โครงข่าย TCP/IP ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นภาษา XML ตามมาตรฐาน IEEE1888 ที่เป็นโพรโทคอล WRITE

การจัดการข้อมูลสำหรับโปรแกรมประยุกต์นี้ตามมาตรฐาน IEEE1888 ใช้โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลเป็นแบบต้นไม้ (tree) และในแต่ละ PointID จะมีการเชื่อมโยงระหว่าง ID กับค่าตัวรับรู้ (value) ที่อ่านได้โดยแสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

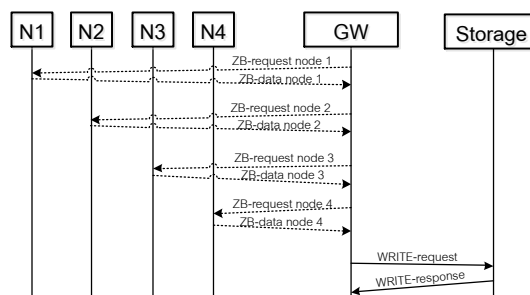




รูปที่ 2.5: ทอพอโลยีการสื่อสารของโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย

	<= 5 bytes	2 bytes	<= 5 bytes	2 bytes
Node 1	Temperature value	N1	Humidity value	N1
Node 2	Temperature value	N2	Humidity value	N2
Node 3	Temperature value	N3	Humidity value	N3
Node 4	Temperature value	N4	Humidity value	N4

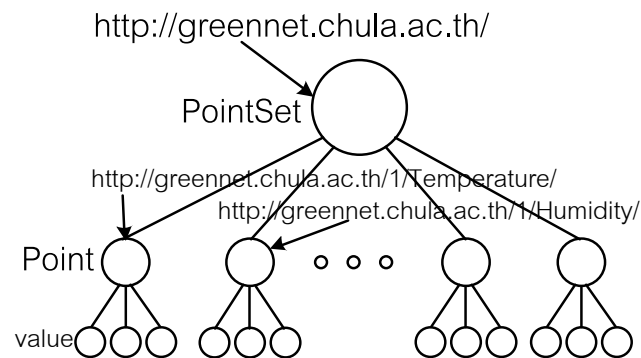
รูปที่ 2.6: รูปแบบกลุ่มข้อมูลของฝั่งส่งข้อมูลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ไร้สาย



รูปที่ 2.7: ฝั่งเวลาการสื่อสารระหว่างโครงข่าย ZigBee กับมาตรฐาน IEEE1888

### 2.3 การทดสอบการใช้งานโปรแกรมการเฝ้าสังเกตสภาพอากาศ

โปรแกรมประยุกต์ในหัวข้อนี้ทำหน้าที่เฝ้าสังเกตสถานะต่าง ๆ ของสภาพอากาศ โดยทดสอบการใช้งานโปรแกรมประยุกต์ที่สื่อสารตามโพรโทคอล FETCH ซึ่งทำหน้าที่ร้องขอข้อมูลที่เก็บไว้จาก



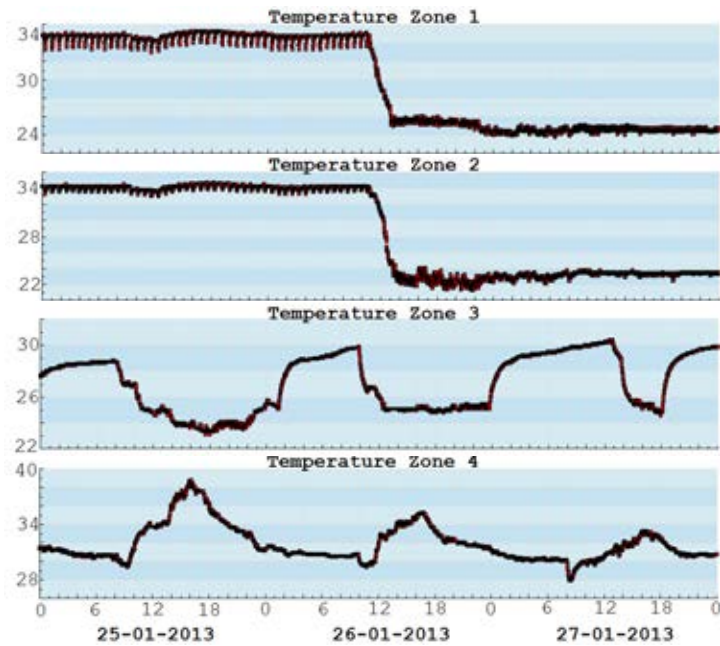
รูปที่ 2.8: โครงสร้าง PointSet สำหรับโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

URL	Timestamp	Temperature	Humidity
http://greennet.chula.ac.th/4/Temperature	2013-01-27 11:59:25+07	30.5	
http://greennet.chula.ac.th/4/Humidity	2013-01-27 11:59:25+07		67.4
http://greennet.chula.ac.th/1/Temperature	2013-01-27 12:00:24+07	24.6	
http://greennet.chula.ac.th/1/Humidity	2013-01-27 12:00:24+07		66.5
http://greennet.chula.ac.th/2/Temperature	2013-01-27 12:00:24+07	23.6	
http://greennet.chula.ac.th/2/Humidity	2013-01-27 12:00:24+07		66.4
http://greennet.chula.ac.th/3/Temperature	2013-01-27 12:00:24+07	30.2	
http://greennet.chula.ac.th/3/Humidity	2013-01-27 12:00:24+07		57.4
http://greennet.chula.ac.th/4/Temperature	2013-01-27 12:00:24+07	30.6	
http://greennet.chula.ac.th/4/Humidity	2013-01-27 12:00:24+07		67.2
http://greennet.chula.ac.th/1/Temperature	2013-01-27 12:01:24+07	24.8	
http://greennet.chula.ac.th/1/Humidity	2013-01-27 12:01:24+07		65.2
http://greennet.chula.ac.th/2/Temperature	2013-01-27 12:01:24+07	23.6	
http://greennet.chula.ac.th/2/Humidity	2013-01-27 12:01:24+07		70.2
http://greennet.chula.ac.th/3/Temperature	2013-01-27 12:01:24+07	30.3	
http://greennet.chula.ac.th/3/Humidity	2013-01-27 12:01:24+07		57.4
http://greennet.chula.ac.th/4/Temperature	2013-01-27 12:01:24+07	30.6	
http://greennet.chula.ac.th/4/Humidity	2013-01-27 12:01:24+07		67.4
http://greennet.chula.ac.th/1/Temperature	2013-01-27 12:02:25+07	24.6	
http://greennet.chula.ac.th/1/Humidity	2013-01-27 12:02:25+07		57.1
http://greennet.chula.ac.th/2/Temperature	2013-01-27 12:02:25+07	23.6	
http://greennet.chula.ac.th/2/Humidity	2013-01-27 12:02:25+07		58.4
http://greennet.chula.ac.th/3/Temperature	2013-01-27 12:02:25+07	30.2	
http://greennet.chula.ac.th/3/Humidity	2013-01-27 12:02:25+07		57.2
http://greennet.chula.ac.th/4/Temperature	2013-01-27 12:02:25+07	30.6	
http://greennet.chula.ac.th/4/Humidity	2013-01-27 12:02:25+07		66.7
http://greennet.chula.ac.th/1/Temperature	2013-01-27 12:03:24+07	24.5	
http://greennet.chula.ac.th/1/Humidity	2013-01-27 12:03:24+07		56.0
http://greennet.chula.ac.th/2/Temperature	2013-01-27 12:03:24+07	23.5	
http://greennet.chula.ac.th/2/Humidity	2013-01-27 12:03:24+07		55.5
http://greennet.chula.ac.th/3/Temperature	2013-01-27 12:03:24+07	30.3	
http://greennet.chula.ac.th/3/Humidity	2013-01-27 12:03:24+07		57.0
http://greennet.chula.ac.th/4/Temperature	2013-01-27 12:03:24+07	30.6	

รูปที่ 2.9: การจัดเก็บชุดข้อมูลในหน่วยเก็บข้อมูล

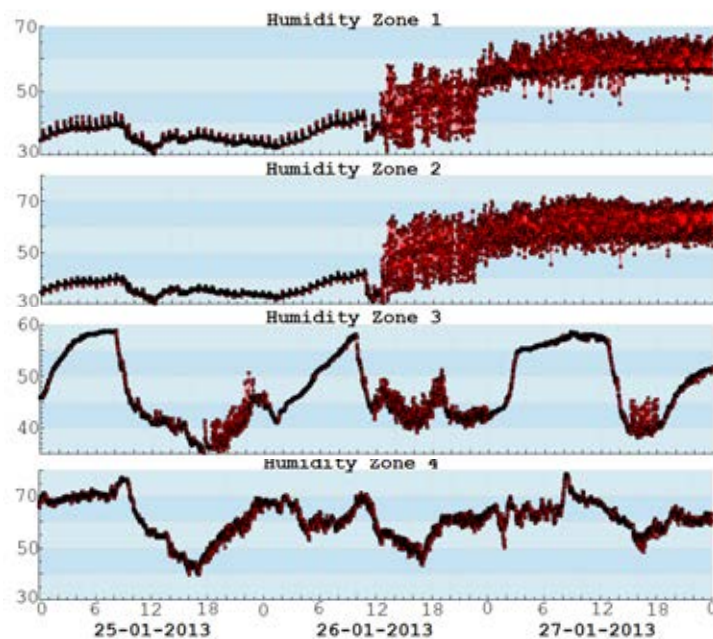
หน่วยเก็บข้อมูลเพื่อแสดงสถานะต่าง ๆ ในรายนาที รายชั่วโมง หรือ รายวันได้ โดยแสดงข้อมูลในรูปแบบแนวโน้มของกราฟตามค่าสภาพแวดล้อม ณ จุดต่าง ๆ โดยจะแสดงการแผ่รังสีเกิดของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในจุดต่าง ๆ ได้

จากรูปที่ 2.10 พบว่าในบริเวณที่ 1 และ 2 ในวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่าอุณหภูมิในช่วง 33-35 องศาเซลเซียส เนื่องจากเครื่องปรับอากาศชำรุด จากนั้นวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2556 ได้ซ่อมเครื่องปรับอากาศและปรับค่าอุณหภูมิให้เหมาะสมภายในห้องแม่ข่ายเพื่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ ทำงานได้ตามปกติและมีการแบ่งเวลาการทำงานของเครื่องปรับอากาศสลับการใช้งานให้เป็นไปตามตารางเวลา ส่วนในบริเวณที่ 3 เป็นการวัดอุณหภูมิโดยแผ่รังสีเกิดพฤติกรรมการใช้งานเครื่องปรับอากาศภายในห้องปฏิบัติการวิจัย โดยเวลาที่ใช้งานและไม่ใช้งานเครื่องปรับอากาศจะเห็น



รูปที่ 2.10: การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ ก่อน - หลังซ่อมเครื่องปรับอากาศที่วัดได้จากการทดสอบ

ความแตกต่างของรูปภาพได้ชัดเจน และในส่วนสุดท้ายกราฟในบริเวณที่ 4 พบว่าอุณหภูมิสูงในช่วงกลางวันและอุณหภูมิลดลงในช่วงกลางคืน มีสาเหตุจากการระบายความร้อนของเครื่องคอมเพรสเซอร์และอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามธรรมชาติ



รูปที่ 2.11: การเปรียบเทียบค่าความชื้นก่อน - หลังซ่อมเครื่องปรับอากาศที่วัดได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ 2.11 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ใน 4 บริเวณโดยบริเวณที่ 1 และ 2 ก่อนที่จะซ่อมเครื่องปรับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผกผันกับอุณหภูมิโดยมีความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่าต่ำในช่วง 30-40% เมื่อได้ซ่อมเครื่องปรับอากาศแล้วพบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นเป็นค่าประมาณ 50-70% และมีความแกว่งของข้อมูลมาก

การฝ้าสังเกตสภาพอากาศภายในห้องแม่ข่ายนี้ เป็นประโยชน์สำหรับการตรวจสอบข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยภายในห้องแม่ข่ายที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ทำงานอยู่ควรมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส ถ้าหากเครื่องปรับอากาศชำรุดส่งผลให้เครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ทำงานไม่มีประสิทธิภาพและมีการบริโภคพลังงานไฟฟ้ามากกว่าปกติ ในกรณีบริเวณที่ติดตั้งโนดตัวรับรู้ภายในห้องปฏิบัติการฯ สามารถแสดงพฤติกรรมผู้ใช้งานของเครื่องปรับอากาศ จึงส่งผลให้ผู้ใช้งานในห้องนี้มีส่วนร่วมในการตระหนักถึงการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ห้องที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์ติดตั้งอยู่ จะแสดงค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นอกห้อง ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องแม่ข่ายห้องอื่นและห้องปฏิบัติการฯ อย่างไรก็ตามเมื่อทราบสถานะบริเวณต่าง ๆ แล้วทำให้ผู้สังเกตการณ์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์มีความตระหนักรู้ในการวางแผน พร้อมทั้งการใช้งานเครื่องปรับอากาศให้มีความเหมาะสมกับในสถานที่ต่าง ๆ เพื่อส่งเสริมในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า

## 2.4 การตรวจสอบระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 ในระบบการฝ้าสังเกตสภาพอากาศโดยใช้โปรแกรม Wireshark

การร้องขอสำหรับการส่งข้อมูลโดยใช้วิธีข้อมูล (data method) เพื่อเป็นช่องทางการสื่อสารตามรูปแบบของโพรโทคอล WRITE โดยมี PointSet ID = "http://greennet.chula.ac.th/" ที่บรรจุภายใน 8 Point ID ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ แสดงดังรูปที่ 2.12 เมื่อส่งข้อมูลสำเร็จหน่วยเก็บข้อมูลจะตอบ OK กลับมาดังแสดงในรูปที่ 2.13

Point ID = "http:// greennet.chula.ac.th/1/Temperature" เป็น URI ที่ผู้ใช้งานสามารถร้องขอข้อมูลค่าอุณหภูมิในบริเวณที่ 1 โดยใช้วิธีการร้องขอ (query method) และมีชนิดการร้องเป็น type = "storage" ซึ่งอาศัยโพรโทคอล FETCH ตามมาตรฐาน IEEE1888 แสดงดังรูปที่ 2.14 และหน่วยเก็บข้อมูลจะตอบกลับว่า OK จากรูปที่ 2.15 พร้อมกับข้อมูลชุดแรกที่ร้องขอไปและจะระบุตัวชี้ตำแหน่งของข้อมูลด้วย เนื่องจากข้อมูลที่ร้องขอมีขนาดเกินกว่าที่กำหนดให้สามารถส่งได้สำหรับการสื่อสารแต่ละครั้ง ดังนั้นการสื่อสารจะถูกดำเนินการเพื่อร้องขออย่างต่อเนื่องจนกระทั่งข้อมูลที่ร้องขอนั้นเป็นข้อมูลชุดสุดท้ายแล้ว จากนั้น หน่วยเก็บข้อมูลจะตอบกลับว่า OK โดยไม่มีตัวชี้ตำแหน่งมาอีก กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.16

## 2.5 สรุป

บทนี้ได้ออกแบบและทดสอบการทำงานระบบสื่อสารระหว่าง ZigBee และ IEEE1888 โดยใช้เกตเวย์เป็นตัวแปลงโพรโทคอลและทำหน้าที่เป็นตัวประสานโนดรับรู้ไร้สาย ZigBee ในโนดต่าง ๆ ซึ่ง ZigBee ตัวประสานจะใช้การสื่อสารแบบการสอบถามข้อมูล (data polling) ของ ZigBee เพื่อให้ทุกโนดส่งข้อมูลแบบแบ่งเวลายันเพื่อลดอัตราการชนกันของกลุ่มข้อมูลในแต่ละโนด อย่างไรก็ตาม

```

<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://greennet.chula.ac.th/"
            >
            <point
              id="http://greennet.chula.ac.th/1/Temperature">
              <value
                time="2013-05-06T21:14:19+07:00">
                22.9
              </value>
            </point>
            <point
              id="http://greennet.chula.ac.th/1/Humidity">
              <value
                time="2013-05-06T21:14:19+07:00">
                51.5
              </value>
            </point>
            <point>
            <point>
            <point>
            <point>
            <point>
            <point>
            </pointSet>
          </body>
        </transport>
      </ns2:dataRQ>
    </soapenv:Body>
  </soapenv:Envelope>

```

รูปที่ 2.12: การส่งข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลโดยใช้โปรโตคอล WRITE

```

<soapenv:Envelope
  xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  >
  <soapenv:Body>
    <ns2:dataRS
      xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/"
      >
      <transport
        xmlns="http://gutp.jp/fiap/2009/11/"
        >
        <header>
          <OK/>
        </header>
      </transport>
    </ns2:dataRS>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>

```

รูปที่ 2.13: การตอบกลับจากหน่วยเก็บข้อมูลของโปรโตคอล WRITE

```

❑ <SOAP-ENV:Envelope
  xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  xmlns:ns1="http://gutp.jp/fiap/2009/11/"
  xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/"
❑ <SOAP-ENV:Body>
  ❑ <ns2:queryRQ>
    ❑ <ns1:transport>
      ❑ <ns1:header>
        ❑ <ns1:query
          id="e1a047ff-77e7-48f8-823b-6ae8597da64d"
          type="storage"
          acceptableSize="1000">
        ❑ <ns1:key
          id="http://greenet.chula.ac.th/1/Temperature"
          attrName="time"
          ltEq="2013-01-27T23:59:59+07:00"
          gtEq="2013-01-25T00:00:00+07:00"/>
        </ns1:query>
      </ns1:header>
    </ns1:transport>
  </ns2:queryRQ>
</SOAP-ENV:Body>
</SOAP-ENV:Envelope>

```

รูปที่ 2.14: การร้องขอข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลโดยใช้โพรโทคอล FETCH

```

❑ <soapenv:Envelope
  xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
❑ <soapenv:Body>
  ❑ <ns2:queryRS
    xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/"
  ❑ <transport
    xmlns="http://gutp.jp/fiap/2009/11/"
  ❑ <header>
    <OK/>
  ❑ <query
    id="e1a047ff-77e7-48f8-823b-6ae8597da64d"
    type="storage"
    cursor="a5ddb8b-eb8b-4cd2-9122-9ed13d324e01"
    acceptableSize="1000">
  ❑ <key
    id="http://greenet.chula.ac.th/1/Temperature"
    attrName="time"
    ltEq="2013-01-27T23:59:59+07:00"
    gtEq="2013-01-25T00:00:00+07:00"/>
    </query>
  </header>
❑ <body>
  ❑ <point
    id="http://greenet.chula.ac.th/1/Temperature">
  ❑ <value
    time="2013-01-25T00:00:11.000+07:00">
    34.8
  </value>
  ❑ <value
    time="2013-01-25T00:01:11.000+07:00">
    34.8
  </value>

```

รูปที่ 2.15: การตอบกลับพร้อมทั้งข้อมูลของการสื่อสารตามโพรโทคอล FETCH



```

<soapenv:Envelope
  xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <soapenv:Body>
    <ns2:queryRS
      xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/">
      <transport
        xmlns="http://gutp.jp/soap/2009/11/">
        <header>
          <OK/>
          <query
            id="a4ac137e-d9fb-4d16-8760-141e583b0c6e"
            type="storage"
            acceptableSize="1000">
            <key
              id="http://greenet.chula.ac.th/1/Temperature"
              attrName="time"
              lteq="2013-01-27T23:59:59+07:00"
              gteq="2013-01-25T00:00:00+07:00"/>
            </key>
          </query>
        </header>
        <body>
          <point
            id="http://greenet.chula.ac.th/1/Temperature">
            <value
              time="2013-01-27T18:44:11.000+07:00">
              24.4
            </value>
            :
            <value
              time="2013-01-27T23:59:12.000+07:00">
              24.8
            </value>
          </point>
        </body>
      </transport>
    </ns2:queryRS>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>

```

**รูปที่ 2.16:** การตอบกลับพร้อมทั้งข้อมูลชุดสุดท้ายของการสื่อสารตามโพรโทคอล FETCH

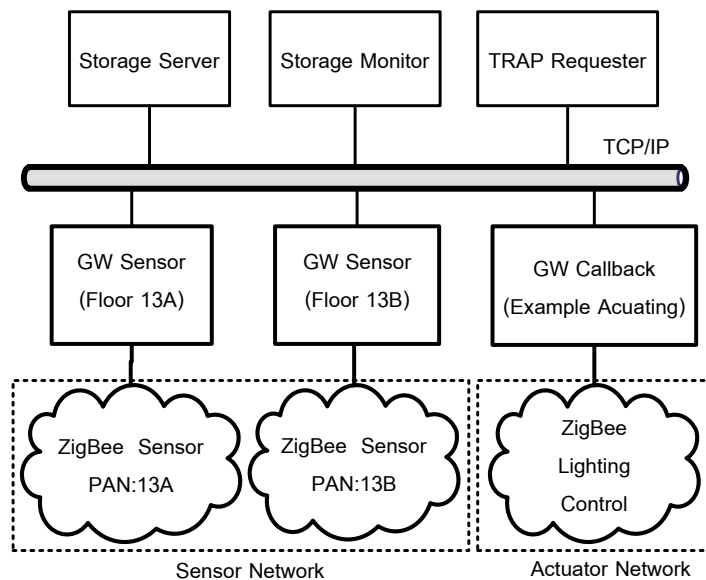
ในโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายที่จะใช้งาน จะครอบคลุมพื้นที่บริเวณอาคารจะมีโนดจำนวนมากกว่าในระบบทดสอบในบตนี้จึงทำให้การสื่อสารของโครงข่ายรับรู้ไร้สายเป็นแบบสอบถามข้อมูล ถ้ามีโนดบางตัวไม่ทำงานการสื่อสารแบบการสอบถามใช้เวลามากกว่าแบบการสื่อสารแบบผลักข้อมูล (data pushing) ดังนั้นในบตที่ 3 จะได้นำเสนอการออกแบบระบบสำหรับโครงข่ายรับรู้ไร้สายที่มีการใช้งานจริงภายในโครงการ CU-BEMS ซึ่งจะมีโนดตัวรับรู้มากที่สุด 28 ต่อ 1 โครงข่าย และจะสื่อสารแบบผลักข้อมูลซึ่งเหมาะในระบบที่มีตัวรับรู้เป็นจำนวนมาก

## บทที่ 3

# การพัฒนาโครงข่ายตัวรับรู้และตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee ตาม มาตรฐาน IEEE1888 เพื่อการใช้งานจริงในโครงการ CU-BEMS

### 3.1 ภาพรวมของระบบ

ในระบบการจัดการพลังงานของอาคารโดยแสดงดังรูปที่ 3.1 โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee เพื่อวัดค่าสภาพแวดล้อมทำหน้าที่แปลงค่าทางกายภาพของตัวรับรู้วัดสภาพแวดล้อมจากสถานที่ต่าง ๆ ภายในอาคารให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้าแบบแอนะล็อกหรือดิจิทัล จากนั้นโนดรับรู้ไร้สาย ทุก ๆ โหนดจะส่งข้อมูลแบบไร้สายไปยังภาครับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 นอกจากนี้ยังมีโครงข่ายตัวกระตุ้นไร้สาย ZigBee สำหรับการควบคุมหลอดไฟทำหน้าที่รับข้อมูลสถานะการเคลื่อนไหวของคนและค่าความสว่างจากหน่วยเก็บข้อมูล โดยผ่านเกตเวย์เป็นตัวกลางสำหรับการสื่อสาร เพื่อควบคุมหลอดเป็นแบบอัตโนมัติโดยใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ZigBee



รูปที่ 3.1: สถาปัตยกรรมระบบงานวิทยานិพนธ์

โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ทำหน้าที่ส่งข้อมูลสถานะของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวของคน ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยสื่อสารตามโพรโทคอลสื่อสารไร้สาย ZigBee ไปยังเกตเวย์สำหรับการส่งข้อมูลต่อไปยังผู้ให้หน่วยเก็บข้อมูล (storage server) ตามมาตรฐาน IEEE1888



เพื่อบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมภายในอาคาร จากนั้นการเฝ้าสังเกตสถานะตัวรับรู้โดยผ่านโปรแกรมประยุกต์เฝ้าสังเกตข้อมูลที่บันทึกภายในหน่วยเก็บข้อมูล (storage monitor) เมื่อต้องการควบคุมหลอดไฟจะใช้โปรแกรมประยุกต์การร้องขอโทคอลล TRAP (TRAP requester) ทำหน้าที่ร้องขอข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลเพื่อบันทึก URI ของอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม จากนั้นเมื่อค่าของตัวรับรู้ส่งมาถึงหน่วยเก็บข้อมูลมีสถานะเปลี่ยนแปลง หน่วยเก็บข้อมูลจะส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ที่ต้องการให้ตอบกลับ (gateway callback) เพื่อควบคุมหลอดไฟตามสถานะที่เปลี่ยนไป

## 3.2 ตัวรับรู้ไร้สาย

ตัวรับรู้ไร้สายที่ใช้ในโครงการ CU-BEMS แบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้ ชนิดแรกเป็นตัวรับรู้ไร้สาย CU-BEMS ที่พัฒนาขึ้นเองสำหรับวัดข้อมูลสภาพแวดล้อมสำหรับติดตั้งภายในชั้น 12-13 อาคารเจริญวิศวกรรม ได้แก่ การเคลื่อนไหวของคน ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ส่วนชนิดที่สองเป็นตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ของบริษัท ดิจิ อินเทอร์เนชันแนล (digi international) สำหรับตัวรับรู้วัดสภาพแวดล้อมภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าชั้น 1-6 ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ พร้อมกับสถานะของแบตเตอรี่

### 3.2.1 ตัวรับรู้ไร้สาย CU-BEMS ที่พัฒนาขึ้น

ตัวรับรู้ไร้สาย CU-BEMS สำหรับการวัดสถานะของสภาพแวดล้อมประกอบด้วยค่าสถานะการเคลื่อนไหว ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ได้ใช้ชนิดตัวรับรู้ดังนี้

1. ตัวรับรู้การเคลื่อนไหวของคน (motion sensor) ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรับรู้จากบริษัทพานาโซนิค (panasonic) เบอร์ AMN 34112 [11] โดยการทำงานของตัวรับรู้นี้จะเริ่มตรวจวัดเมื่อมีการเคลื่อนไหวของคนแบบตัดผ่านบริเวณของตำแหน่งบริเวณตรวจจับตั้งรูปที่ 3.2 จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรังสีอินฟราเรด ทำให้ตัวรับรู้มีสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (square wave) หากไม่มีการเคลื่อนไหวจะมีสัญญาณขาออกเป็นลอจิก 0 เท่านั้น ในการออกแบบวงจรสำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนไหวจะมีวงจรสำหรับนับเวลาเพื่อใช้ประวิงระดับสัญญาณขาออกของตัวรับรู้ในระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้สัญญาณที่สามารถตรวจจับคนได้จะมีลอจิก 1 คงที่ โดยใช้วงจรรวม CD74HC123 เป็นวงจรรนับเวลาชนิดโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) โดยสามารถคำนวณระยะเวลาในการประวิงระดับสัญญาณได้จาก

$$T = 0.4RC \quad (3.1)$$

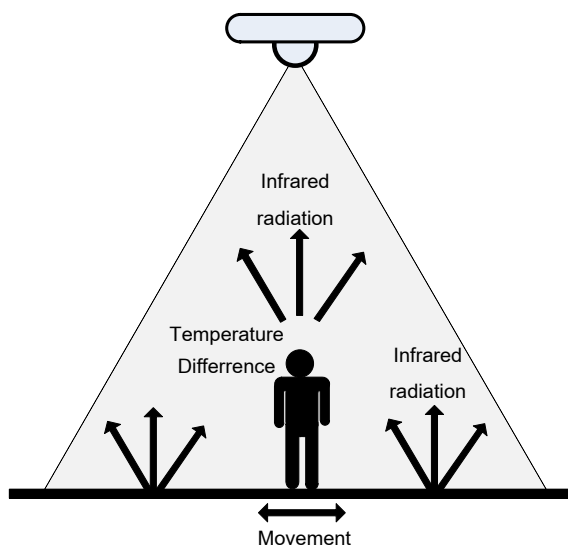
$T$  คือ เวลา (วินาที)

$R$  คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

$C$  คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

2. ตัวรับรู้แสงใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ (photo transistor) เบอร์ TEPT5700 [12] ทำหน้าที่แปลงค่าความเข้มแสงเป็นสัญญาณแอนะล็อกโดยค่าความเข้มแสงคำนวณได้จาก

$$Illuminance_{cubems} = \frac{I_i}{0.88} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2: ลักษณะการตรวจจับคลื่นรังสีอินฟราเรดกับการเคลื่อนไหว [11]

$$Illuminance_{cubems} = \frac{V_i}{R_i} \quad (3.3)$$

$V_i$  คือ แรงดันขาออกจากวงจรวัดแสง (โวลต์)

$R_i$  คือ ค่าความต้านทานโหลด (โอห์ม)

$I_i$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (แอมแปร์)

$Illuminance_{cubems}$  คือ ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)

- ตัวรับรู้อุณหภูมิใช้วงจรรวมเบอร์ LM 35DZ [13] มีสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีค่าคงที่สำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิ คือ 10 มิลลิโวลต์/องศาเซลเซียส โดยการคำนวณหาอุณหภูมิได้จาก

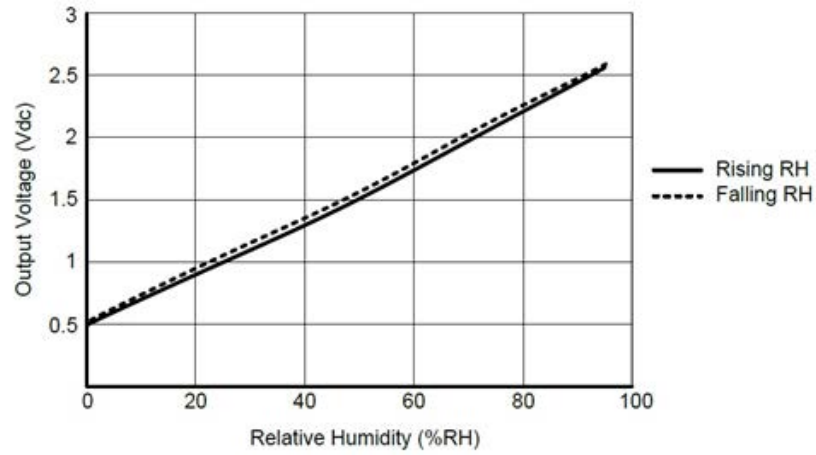
$$Temperature_{cubems} = 10V_t \quad (3.4)$$

$Temperature_{cubems}$  คือ ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

$V_t$  คือ แรงดันขาออกของวงจรวัดอุณหภูมิ (โวลต์)

- ตัวรับรู้วัดความชื้นสัมพัทธ์ใช้วงจรรวมเบอร์ HIH-5030 [14] มีสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.3 และคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์จาก

$$V_H = V_S(0.00636S_{RH} + 0.1515) \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.3: ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกของตัวรับรู้กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ [14]

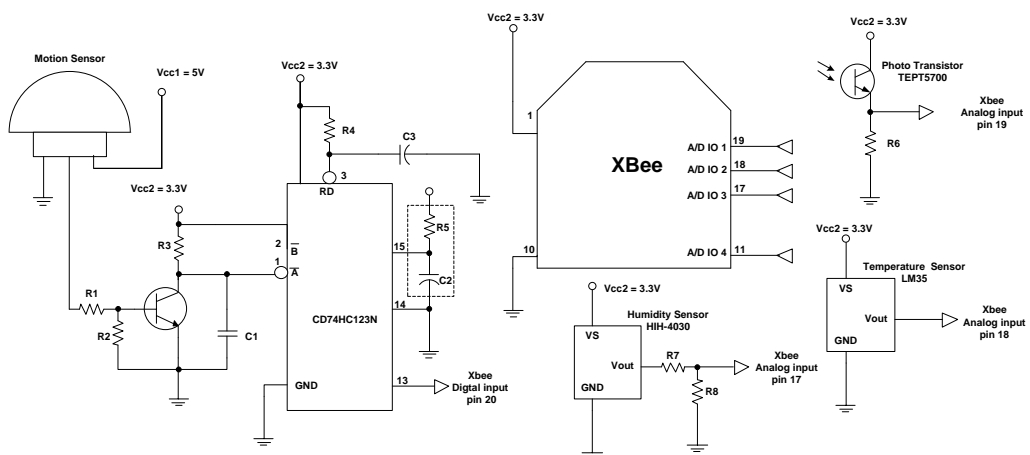
$$Humidity_{cubems} = \frac{S_{RH}}{1.0546 - 0.00216Temperature_{cubems}} \quad (3.6)$$

$V_H$  คือ ค่าแรงดันขาออกจากวงจรวัดความชื้น (โวลต์)

$V_S$  คือ ไฟเลี้ยงวงจร (โวลต์)

$S_{RH}$  คือ ค่าความชื้นที่คำนวณได้ที่สัมพันธ์กับแรงดัน (โวลต์)

$Humidity_{cubems}$  คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ตามอุณหภูมิที่แท้จริง (%)



รูปที่ 3.4: วงจรตัวรับรู้ไร้สาย

รูปที่ 3.4 แสดงการเชื่อมต่อวงจรระหว่างตัวรับรู้ต่าง ๆ กับ ZigBee การออกแบบนั้นวงจรตัวรับรู้ต้องคำนึงถึงสัญญาณแอนะล็อกขาเข้าซึ่งไม่เกิน 1.2 โวลต์ ดังนั้นตัวรับรู้บางตัวต้องมีวงจรแบ่งแรงดันให้ไม่เกิน 1.2 โวลต์ แต่ถ้าเป็นสัญญาณดิจิทัลขาเข้าจะต้องไม่เกิน 3.4 โวลต์ มิเช่นนั้นวงจรภายใน ZigBee เสียหายได้

จากรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยแผ่นวงจรที่ได้ออกแบบประกอบด้วยตัวรับรู้และอุปกรณ์ ZigBee การทำงานจะไฟเลี้ยง 5 โวลต์ พร้อมกับกล่องที่ติดตั้งฝ้าเพดานดังรูปที่ 3.6 ตัวรับรู้ไร้สายที่พัฒนานี้จะสื่อสารในโหมดการทำงานชนิดอุปกรณ์จัดเส้นทางของ ZigBee ที่มีความสามารถในการสื่อสารแบบโครงข่ายเมชจึงถือว่าเป็นรูปแบบโครงข่ายที่มีความเสถียรภาพสูง



รูปที่ 3.5: ตัวรับรู้วัดสภาพแวดล้อมแบบไร้สายที่พัฒนา



รูปที่ 3.6: ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ภายในอาคารเจริญวิศวกรรม

### 3.2.2 ตัวรับรู้ ZigBee ของบริษัทดิจิตอลอินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล

สถานะสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ จะแสดงข้อมูลผ่านโปรแกรมประยุกต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อรายงานสถานะที่สอดคล้องกับพฤติกรรม การใช้พลังงาน ทำให้ผู้ใช้งานตระหนักรู้ถึงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพ ค่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เหล่านี้เป็นชุดข้อมูลที่ไม่ต้องการสื่อสารในทันทีทันใด ซึ่งจะแตกต่างกับตัวรับรู้การเคลื่อนไหวดังในหัวข้อ 3.2.1 จึงไม่จำเป็นต้องสื่อสารเต็มรูปแบบของโพรโทคอล ZigBee หรือทำงานอยู่ในโหมดหลับ (sleep mode) เมื่อไม่ใช้งาน ดังนั้นตัวรับรู้ไร้สายชนิดที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่จะเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานประเภทนี้และอำนวยความสะดวกในการใช้งาน ติดตั้งใช้งานง่าย ราคาประหยัด ดูแลรักษาง่าย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ในการสื่อสารของตัวรับรู้แบบไร้สายจะต้องอาศัยอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อขยายขนาดโครงข่ายสื่อสารได้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น เนื่องจากระดับสัญญาณจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม การรับส่งข้อมูลอาจมีขีดจำกัดระหว่างตัวส่งและรับสัญญาณส่งผลให้มีการลดทอนของสัญญาณได้

ตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ของบริษัทดิจิตอลอินเทอร์เน็ตเนชั่นแนลทำหน้าที่สำหรับการวัดสถานะค่าความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ พร้อมกับสถานะแบตเตอรี่ สูตรการคำนวณวัดค่าสภาพแวดล้อมอ้างอิงจากคู่มือการใช้งานจาก [15]

#### 1. ตัวรับรู้วัดความเข้มแสง

$$Illuminance_{digi} = V_i \times 1000 \quad (3.7)$$

$Illuminance_{digi}$  คือ ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)

$V_i$  คือ แรงดันขาออก (โวลต์)

#### 2. ตัวรับรู้อุณหภูมิ

$$temperature_{digi} = \frac{V_{temperature} - 500}{10} \quad (3.8)$$

$temperature_{digi}$  คือ ค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

$V_{temperature}$  คือ แรงดันขาออกของตัวรับรู้อุณหภูมิ (โวลต์)

#### 3. ตัวรับรู้ความชื้น

$$Humidity_{digi} = \frac{\left( \frac{V_{humidity} \times \frac{108.2}{33.2}}{5000} \right) - 0.16}{0.0062} \quad (3.9)$$

$Humidity_{digi}$  คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

$V_{humidity}$  คือ แรงดันขาออกของตัวรับรู้ความชื้น (โวลต์)



รูปที่ 3.7: ตัวรับรูดค่าสภาพแวดล้อมไร้สายของบริษัทติจี้

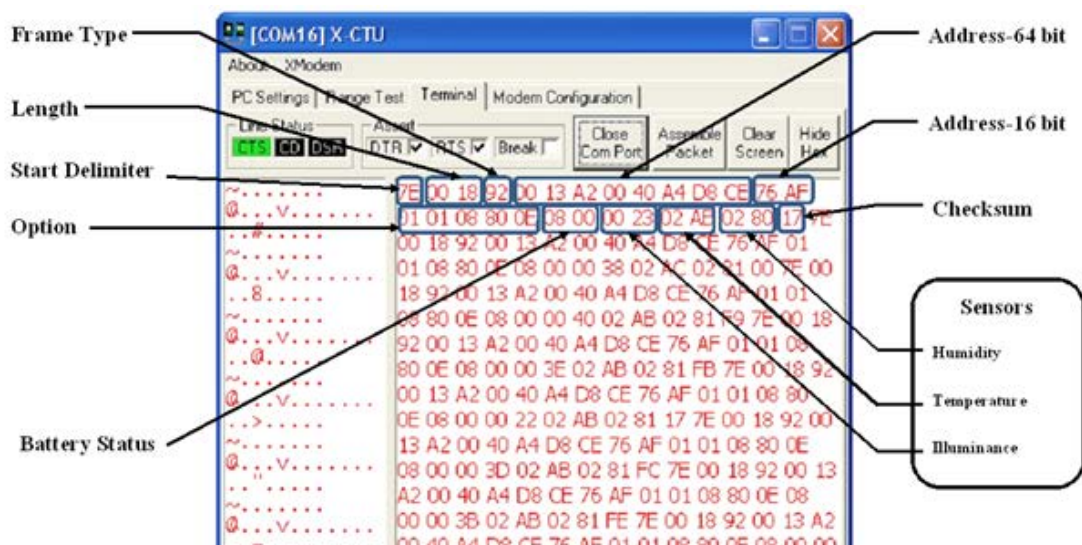


รูปที่ 3.8: การติดตั้งโนดตัวรับรูดชนิดแบตเตอรี่ภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยแผงวงจรภายในที่มีตัวรับรูดและอุปกรณ์ ZigBee แบตเตอรี่ขนาด AA จำนวน 3 ก้อนและจากรูปที่ 3.8 เป็นการติดตั้งใช้งานตัวรับรูดไร้สายชนิดแบตเตอรี่ซึ่งจะส่งข้อมูลไร้สายออกไปยังเกตเวย์ และในบางจุดจะมีอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อส่งต่อสัญญาณไปยังเกตเวย์กรณีที่อุปกรณ์ปลายทางไม่สามารถส่งถึงได้

### 3.2.3 กลุ่มข้อมูลของ ZigBee แบบ API

จากหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เป็นอุปกรณ์ตัวรับรูดไร้สาย ZigBee ที่มีการส่งสถานะตัวรับรูดเป็นเฟรมข้อมูลแบบ API ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งตัวอย่างการรับข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมที่มี ZigBee ภาครับข้อมูลส่งต่อมายังคอมพิวเตอร์ทดสอบโดยใช้โปรแกรม XCTU สำหรับอ่านกลุ่มข้อมูลของโนดตัวรับรูดจากบริษัทติจี้สามารถอธิบายได้ในตารางที่ 3.1 และเมื่อทราบรูปแบบกลุ่มข้อมูลของ ZigBee ถัดจากนั้นสามารถออกแบบการเชื่อมต่อวงจร ZigBee และพัฒนาซอฟต์แวร์ของเกตเวย์ตามมาตรฐานได้



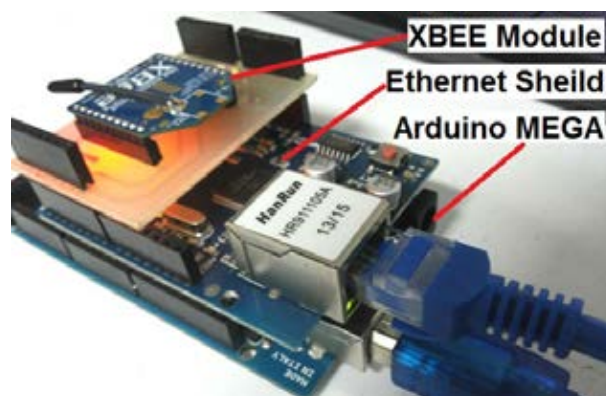
รูปที่ 3.9: กลุ่มข้อมูลของ ZigBee

ตารางที่ 3.1: ตัวอย่างกลุ่มข้อมูลของ ZigBee

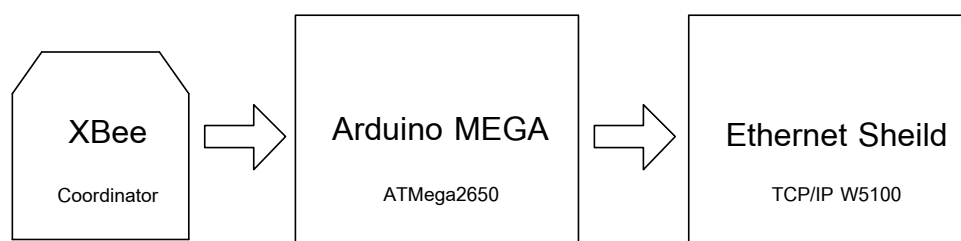
ตัวอย่างเฟรม API	คำอธิบาย
7E	ไบต์เริ่มต้นทำหน้าที่คั่นที่เป็นจุดเริ่มต้นของเฟรม
00 18	ไบต์ขนาดความยาวของข้อมูล
92	ชนิดของเฟรม ID
13 A2 00 40 4A D8 CE	แอดเดรส 64 บิต
76 AF	แอดเดรส 16 บิต
01 01 08 80 0E	การทำงานที่เป็นฟังก์ชันเสริม
00 10	การอ่านค่าของตัวรับรู้การตรวจจับการเคลื่อนไหว (กรณี CUBEMS)
80 00	การอ่านค่าของสถานะแบตเตอรี่ (กรณี Digi)
00 23	อ่านค่าความเข้มแสง
02 AB	ค่าอุณหภูมิ
02 80	ค่าความชื้นสัมพัทธ์
17	ไบต์ตรวจสอบผลรวม

### 3.3 เกตเวย์สำหรับโครงข่ายไร้สาย

เกตเวย์เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่แปลภาษาของโครงข่ายตัวรับรู้ Zigbee ให้เป็นภาษามาตรฐานเดียวกับมาตรฐานที่ใช้งานสำหรับระบบการจัดการพลังงาน คือ มาตรฐาน IEEE1888 เป็นมาตรฐานการสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต โดยเกตเวย์สำหรับโครงข่ายตัวรับรู้ในระบบการจัดการพลังงานของวิทยานิพนธ์นี้สามารถเขียนโปรแกรมให้สามารถสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อทำหน้าที่เชื่อมโยงโครงข่ายระบบตัวรับรู้ที่ใช้โพรโทคอล Zigbee ให้สามารถสื่อสารโดยใช้โพรโทคอล WRITE ตามมาตรฐาน IEEE1888 สำหรับการส่งข้อมูลได้โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่หน่วยประมวลผลและความจำขนาดเล็กภายในตัวเอง โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้ arduino [10] เป็นบอร์ดซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการพัฒนาแบบรหัสเปิด (open source) และการใช้งานของบอร์ด arduino สามารถเชื่อมต่อกับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติมต่าง ๆ โดยผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขาของบอร์ดได้ในหัวข้อนี้ได้เลือกใช้ arduino รุ่น MEGA ที่มีหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเท่ากับ 256 KB ซึ่งขนาดหน่วยความจำเพียงพอต่อการเขียนโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สาย ซึ่งการเชื่อมต่อวงจรทั้ง ZigBee และบอร์ดอินเทอร์เน็ตนั้นแสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



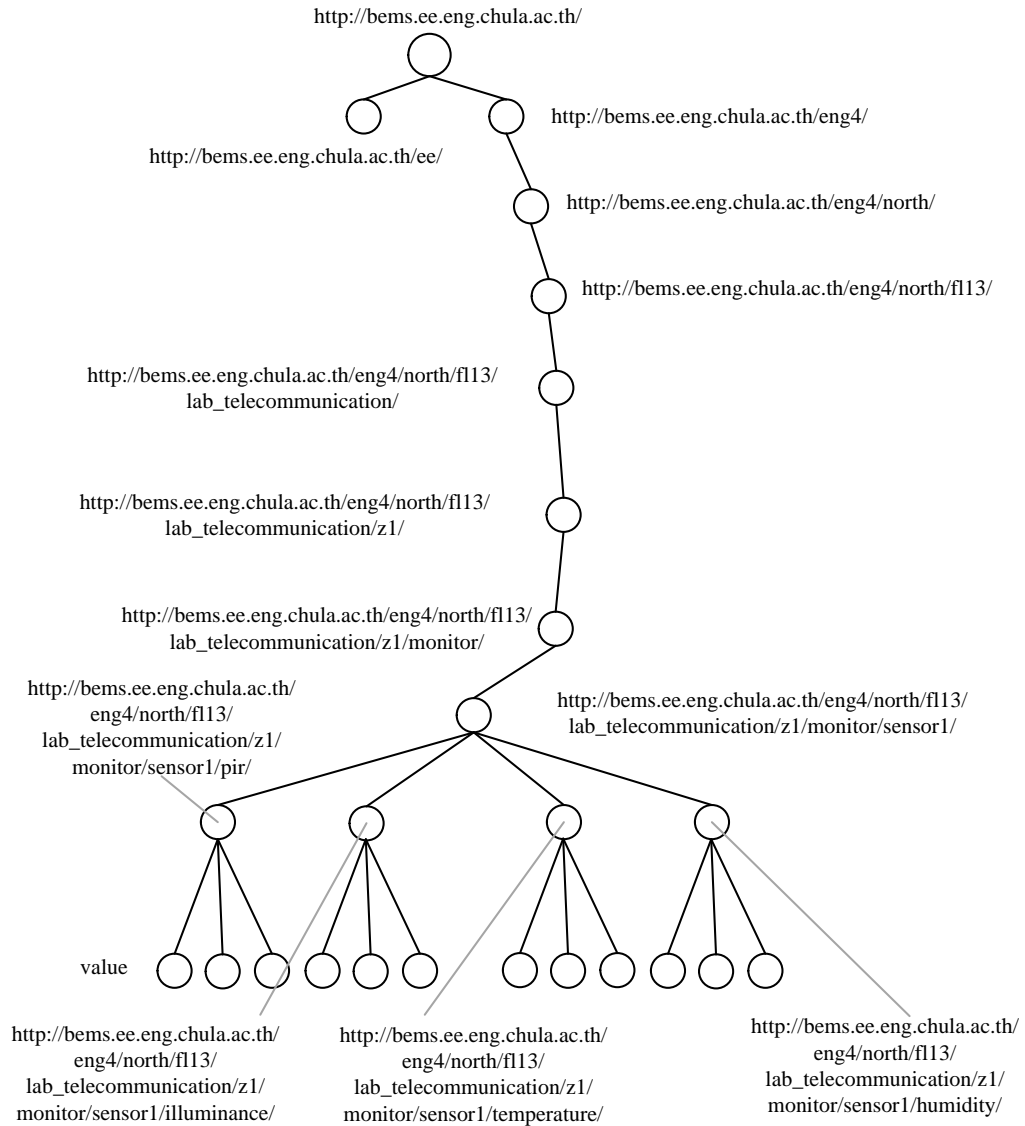
รูปที่ 3.10: เกตเวย์ที่ใช้งานวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.11: แผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์สำหรับเกตเวย์



### 3.3.1 โครงสร้าง PointSet ของตัวรับรู้ไร้สาย



รูปที่ 3.12: ตัวอย่างโครงสร้าง PointSet ของตัวรับรู้ในงานวิทยานิพนธ์

จากรูป 3.12 เป็นโครงสร้าง PointSet แสดงรูปแบบการตั้งชื่อของ URI ในมาตรฐาน IEEE1888 โดย URI จะสัมพันธ์กับ สถานที่ และอุปกรณ์ ยกตัวอย่างเช่น ภายในอาคารเจริญวิศวกรรม ชั้น 13 จะแบ่งออกเป็น ฝั่งเหนือ ฝั่งใต้ และบริเวณทางเดิน เป็นต้น เพื่อให้ง่ายต่อผู้ออกแบบโปรแกรมประยุกต์และใช้งานต่อได้อย่างง่าย โดยไม่ต้องคำนึงถึงการจับคู่ระหว่างชื่อ URI (แบบเป็นรหัส เช่น `http://bems.ee.eng.chula.ac.th/sensor-001`) กับสถานที่จริงลดขั้นตอนในส่วนนี้ได้

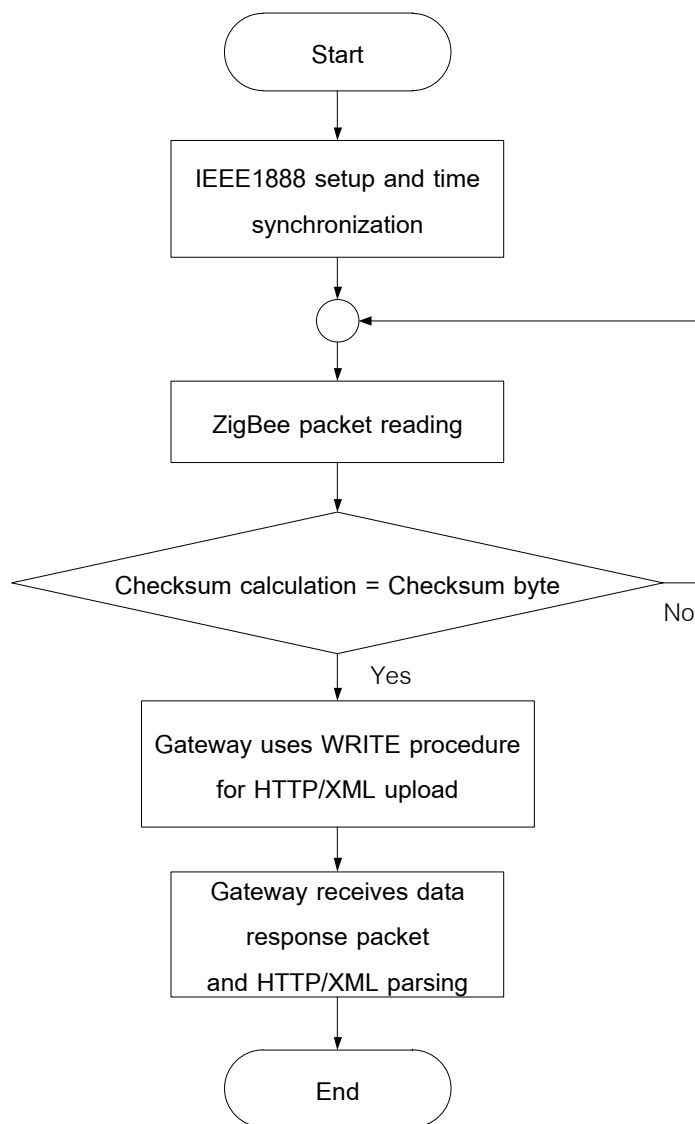
### 3.3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ของเกตเวย์

ในหัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบซอฟต์แวร์ของเกตเวย์ เพื่อประยุกต์กับโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ที่ติดตั้งจริงภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอาคารเจริญวิศวกรรม โดยมีโหนดตัวรับรู้ไร้สายทั้งสิ้น 161 โหนด แต่จะแบ่งออกเป็นโครงข่ายย่อยมากที่สุดพบว่ามี 28 โหนดต่อ 1 โครงข่ายในการสื่อสารระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายกับเกตเวย์ นอกจากนี้โหนดรับรู้ไร้สายสามารถวัดได้ทั้งสถานะการเคลื่อนไหวของคน ความสว่าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นผลให้การออกแบบการส่งข้อมูลของโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายเป็นแบบการผลักข้อมูล เนื่องจากมีจำนวนของโหนดตัวรับรู้เป็นจำนวนมาก หากประยุกต์ใช้การสื่อสารแบบการสอบถามข้อมูลที่เสนอไว้บทที่ 2 จะส่งผลให้เกิดการประวิงเวลาในการรับส่งข้อมูลออกไปยังหน่วยเก็บข้อมูล โดยเฉพาะในกรณีที่โหนดตัวรับรู้บางโหนด ไม่ต้องการส่งข้อมูล หรือโหนดตัวรับรู้นั้นเสียหาย เกตเวย์จะใช้เวลามากสำหรับการสอบถามเพื่ออ่านโหนดตัวรับรู้ทุกตัว และอีกประการหนึ่งเมื่อโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลของสถานะการเคลื่อนไหว เมื่อโหนดตัวรับรู้กำลังตรวจการเคลื่อนไหวได้ โหนดตัวรับรู้ไม่สามารถส่งข้อมูลให้กับเกตเวย์นั้นได้ทันที จึงส่งผลให้โหนดตัวรับรู้ที่ใช้แบบการสอบถามใช้เวลามากกว่าการสื่อสารแบบผลัก

ตารางที่ 3.2: การตั้งค่าการทำงานของเกตเวย์

ตัวแปร	ตัวอย่าง
PointSet ID	"http://bems.ee.eng.chula.ac.th/eng4/fl13/"
Point ID 1	PointSet + "north/lab_telecommunication/z1/monitor/sensor1/pir"
Point ID 2	PointSet + "north/lab_telecommunication/z1/monitor/sensor1/illuminance"
Point ID 3	PointSet + "north/lab_telecommunication/z1/monitor/sensor1/temperature"
Point ID 4	PointSet + "north/lab_telecommunication/z1/monitor/sensor1/humidity"
Local IP	192.168.1.196
Local MAC	0x98, 0x4F, 0xEE, 0x00, 0x15, 0xC6
Local Gateway	192.168.1.1
Local netmask	255.255.255.0
Server Host	192.168.1.6
Server IP	192.168.1.6
Server Part	"/axis2/services/FIAPStorage"
Server port	80
NTP Server IP	192.168.1.1

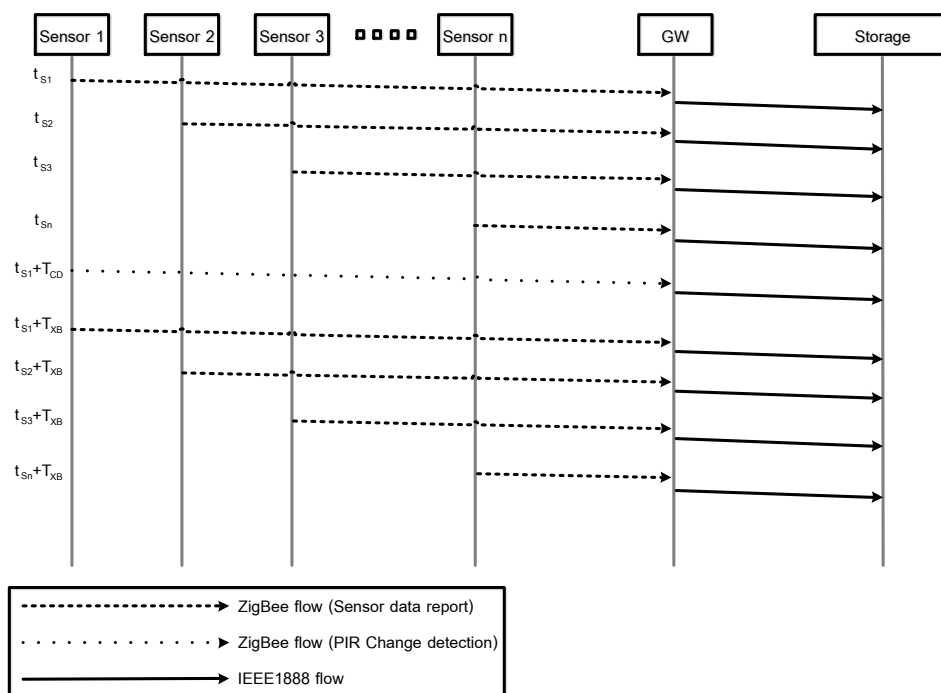
ตารางที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าตัวแปรหลักสำหรับการสื่อสารในมาตรฐาน IEEE1888 ได้แก่ ชื่อ PointSet ID ของเกตเวย์ที่ใช้ร่วมกับ ชื่อ Point ID ของตัวรับรู้ โดยหน่วยเก็บข้อมูลเป็นแม่ข่ายที่ให้ บริการการสื่อสารข้อมูลในมาตรฐาน IEEE1888 (192.168.1.6/axis2/services/FIAPStorage)



**รูปที่ 3.13:** ผังการทำงานของเกตเวย์สำหรับการสื่อสารข้อมูลกับโครงข่ายรับรู้ไร้สายกับมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้โปรโตคอล WRITE

รูปที่ 3.13 แสดงผังการทำงานของเกตเวย์โดยเริ่มการทำงานในโหมดตั้งค่า (setup) เกตเวย์จะประสานเวลากับแม่ข่ายของ NTP (network time protocol) เพื่อบันทึกเวลาขณะที่กำลังเริ่มต้นการทำงาน จากนั้นเกตเวย์จะเริ่มต้นทำงานในโหมดการทำงานของโปรแกรมหลัก (main program) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรออ่านชุดกลุ่มข้อมูลของ ZigBee (ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1) จากนั้นทำการพิจารณาไบนารีข้อมูล (date parsing) ที่ย่อยออกมาจากกลุ่มข้อมูล 1 ชุด โดยจะแบ่งโนดตัวรับรู้แต่ละโนดจากแมคแอดเดรส (MAC address) ของ ZigBee ถัดจากนั้นอ่านค่าข้อมูลของตัวรับรู้

แต่ละชนิดซึ่งมีการเรียงกันตามลำดับของตัวรับรู้ทั้ง 4 ตัว เมื่ออ่านไบนารีข้อมูลครบแล้ว โปรแกรมจะตรวจสอบไบนารีสุดท้ายเปรียบเทียบกับค่าจำนวนที่ได้มาจากทุก ๆ ไบนารี หากไม่ตรงกันโปรแกรมจะเริ่มไปรับกลุ่มข้อมูล ZigBee ครั้งใหม่ แต่หากค่าจำนวนแล้วตรงกันเกตเวย์จะเริ่มกระบวนการจัดส่งข้อมูลในรูปแบบมาตรฐาน IEEE1888 โดยเปิดพอร์ตการเชื่อมต่อสู่โครงข่าย TCP/IP และจัดรูปแบบให้ตรงกับโปรโตคอล WRITE จากนั้นจะส่งข้อมูลไปยังโครงข่ายสื่อสารด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ไปยังหน่วยเก็บข้อมูล เมื่อหน่วยเก็บข้อมูลได้รับข้อมูลของตัวรับรู้จากเกตเวย์แล้ว หน่วยเก็บข้อมูลจะตอบสถานะกลับไปยังเกตเวย์เพื่อรับรองการส่งข้อมูลที่สำเร็จ หากไม่สำเร็จสถานะที่เกตเวย์อ่านได้จะเป็นสถานะ error ต่าง ๆ เช่น 500 internal server error หรือ 304 not modified

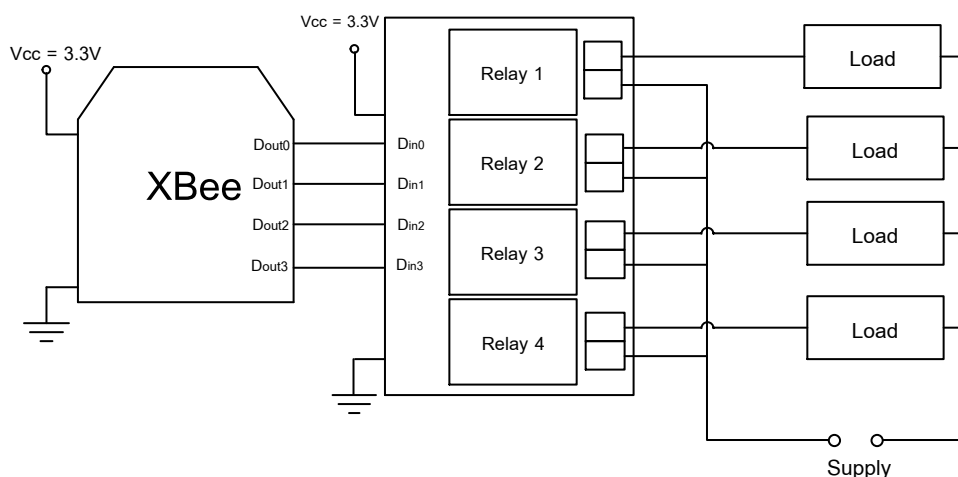


**รูปที่ 3.14:** ตัวอย่างผังเวลาการสื่อสารระหว่างโครงข่าย ZigBee กับโครงข่ายสื่อสารในระบบการจัดการพลังงานในมาตรฐาน IEEE1888

จากรูปที่ 3.14 เวลา  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$ , และ  $t_{sn}$  ของโน้ตตัวรับรู้ Zigbee จากโน้ตที่ 1 ถึงโน้ต n จะมีการส่งกลุ่มข้อมูลแบบคาบเวลาทุก ๆ นาทีแบบไม่ประสานเวลากัน (asynchronous) โดยจะส่งข้อมูลซึ่งมีค่าของตัวรับรู้ที่วัดได้ 4 ชนิดไปยัง Zigbee ภาครับที่เชื่อมต่อกับเกตเวย์ จากนั้นเกตเวย์ทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้เป็นรูปแบบข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 และส่งออกไปยังหน่วยเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูลไว้ ต่อมา ณ เวลา  $t_{s1} + t_{CD}$  โน้ต 1 จะส่งข้อมูลเมื่อมีเหตุการณ์เปลี่ยนแปลงลอจิกของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวเนื่องจากการเคลื่อนไหวของคน ดังนั้น โน้ต 1 จะส่งกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวเท่านั้น เช่น เมื่อมีคนเดินผ่านเข้ามาบริเวณของโน้ตตัวรับรู้นี้ โน้ตตัวรับรู้ตรวจจับการเคลื่อนไหวจะเปลี่ยนแปลงสถานะของลอจิก 0 เป็น 1 จากนั้น Zigbee โน้ตที่ 1 นี้จะส่งกลุ่มข้อมูลออกไปทันที

### 3.4 ตัวกระตุ้นไร้สาย

การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉพาะ การควบคุมอุปกรณ์ในเวลานั้นทันทีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ของตัวรับรู้การเคลื่อนไหว เช่น ตัวรับรู้ตรวจจับการเคลื่อนไหวว่าไม่มีคนภายในห้องจนกระทั่งมีคนเข้ามาภายในห้อง โหนดตัวรับรู้จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้และส่งข้อมูลนี้ไปยังเกตเวย์ จากนั้นเกตเวย์จะส่งข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงของสถานะตัวรับรู้ไปยังหน่วยเก็บข้อมูล เพื่อบันทึกค่าและส่งข้อมูลสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวกลับ ไปยังเกตเวย์ที่ให้บริการสื่อสารสำหรับอุปกรณ์ควบคุมหลอดไฟ ในหัวข้อนี้ได้ประยุกต์ใช้โหนดตัวกระตุ้นแบบไร้สายเพื่อเน้นการสื่อสารที่ติดต่อได้สะดวกโดยจะมี ZigBee ที่เชื่อมต่อกับวงจรรีเลย์ (relay) ทำหน้าที่รับคำสั่งสำหรับควบคุมหลอดไฟจากเกตเวย์ตามโพรโทคอล TRAP



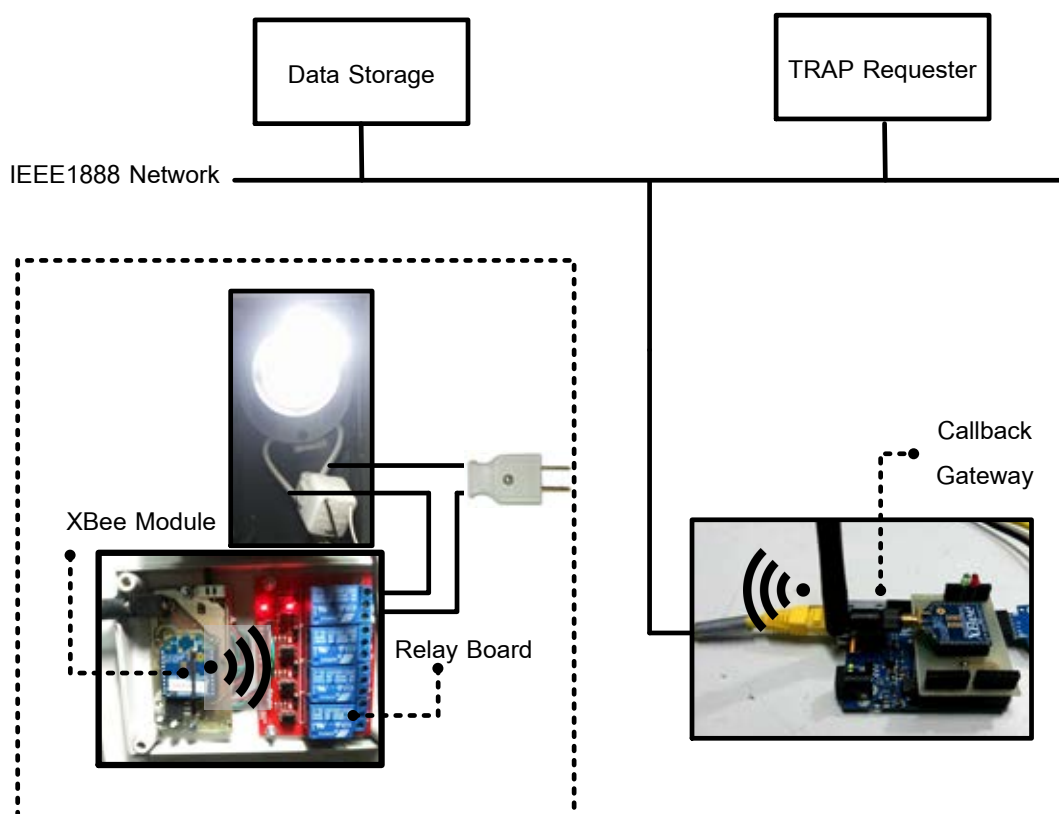
รูปที่ 3.15: แผนผังการเชื่อมต่อโมดูล ZigBee เข้ากับบอร์ดวงจรรีเลย์

จากรูปที่ 3.15 เป็นบอร์ดวงจรรีเลย์ที่ต่อกับโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยสั่งการผ่าน ZigBee ที่รับคำสั่งสถานะของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวมาจากเกตเวย์ที่ทำหน้าที่ควบคุมหลอดไฟ ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดวงจรรีเลย์กับ ZigBee นั้น สามารถต่อได้โดยตรงจากขาของดิจิทัลขาออกของ ZigBee ไปยังขาดิจิทัลขาเข้าของบอร์ดวงจรรีเลย์โดยสัญญาณที่ใช้จะเป็นลอจิก 0 หมายถึงสั่งปิดการใช้งานโหลด ส่วนลอจิก 1 สั่งเปิดการการใช้งานโหลด

### 3.5 เกตเวย์สำหรับตัวกระตุ้นไร้สาย

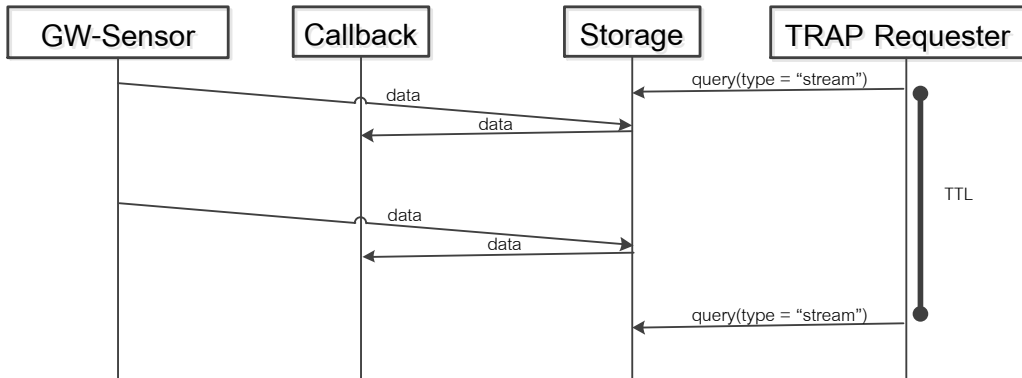
การควบคุมหลอดไฟแบบอัตโนมัติในอดีตนั้น สามารถต่อวงจรตัวรับรู้ตรวจจับการเคลื่อนไหวกับวงจรรีเลย์ได้โดยตรง ซึ่งจะทำให้การควบคุมสามารถเปิดปิดได้ทันที และในบางวงจรสามารถปรับเวลาประวิงให้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละสถานที่ แต่ในวิธีดังกล่าวนี้จะไม่มีการสื่อสารข้อมูลและไม่ตอบสนองการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ให้ทำงานที่ชาญฉลาดมากขึ้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้

มาตรฐาน IEEE1888 สำหรับการควบคุมหลอดไฟนั้นจะแตกต่างกับการต่อวงจรควบคุมอัตโนมัติโดยตรงจะมีการควบคุมหลอดไฟได้ในเวลารวดเร็วกว่าการใช้มาตรฐาน IEEE1888 เนื่องจากการควบคุมตามมาตรฐาน IEEE1888 มีความซับซ้อนเพิ่มเข้ามาในระบบโครงข่ายสื่อสารแต่จะมีข้อดีว่าการต่อวงจรควบคุมแบบตรง เนื่องจากมีชุดข้อมูลการเคลื่อนไหวเพื่อไปประยุกต์ใช้ต่อยอดกับเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ ทำให้ข้อมูลจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าให้ระบบมีการจัดการอย่างชาญฉลาด ดังนั้นโปรโตคอล TRAP ในมาตรฐาน IEEE1888 จึงเหมาะสมทั้งการควบคุมในทันทีหากสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวมีการเปลี่ยนแปลง ในรูปที่ 3.16 แสดงการประยุกต์ใช้งานโปรโตคอล TRAP สำหรับการควบคุมหลอดไฟแบบไร้สายโดยอาศัยข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูล

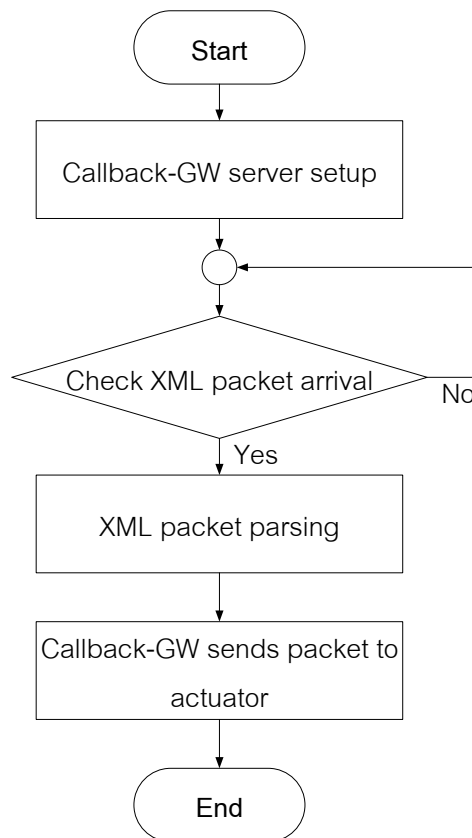


รูปที่ 3.16: การควบคุมหลอดไฟโดยใช้ ZigBee กับองค์ประกอบการสื่อสารตามโปรโตคอล TRAP

การทำงานของโปรโตคอล TRAP ดังรูปที่ 3.17 เริ่มจากโปรแกรมประยุกต์ร้องขอการวางกับดักข้อมูล (TRAP requester) ทำหน้าที่แจ้งข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลซึ่งเป็นแม่ข่ายให้บริการการสื่อสารแบบโปรโตคอล TRAP โดยโปรแกรมประยุกต์นี้กำหนดค่า URI ที่ต้องการให้หน่วยเก็บข้อมูลส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ Callback ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมหลอดไฟโดยอาศัยข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูลที่รับมาซึ่งจะมีสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวที่เปลี่ยนแปลง จากนั้นเกตเวย์นี้จะส่งสัญญาณไร้สายไปยังอุปกรณ์ควบคุมหลอดไฟแบบอัตโนมัติดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17: ผังเวลาการทำงานของโปรโตคอล TRAP



รูปที่ 3.18: ผังการทำงานของเกตเวย์ Callback

## บทที่ 4

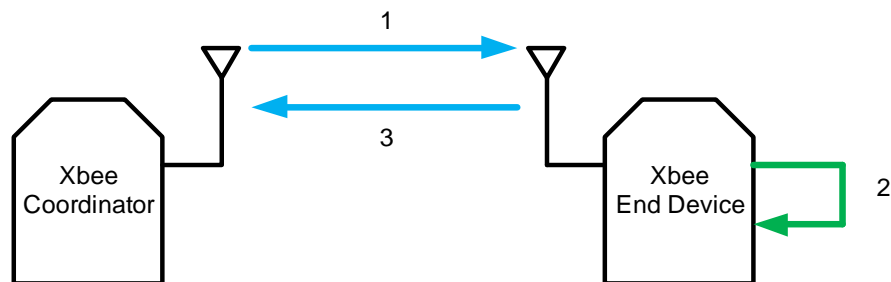
### ผลการทดสอบระบบ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบของการทำงานในระบบสื่อสารระหว่างโครงข่ายไร้สาย ZigBee กับการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 สำหรับชุดข้อมูลของตัวรับรู้ โดยในหัวข้อต่าง ๆ แสดงผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee ซึ่งเป็นภาคส่งสัญญาณ ในขณะที่เดียวกันภาครับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ใช้โปรโตคอล WRITE จัดส่งข้อมูลของตัวรับรู้ไร้สายไปยังหน่วยเก็บข้อมูล ซึ่งการทดสอบระบบทั้งหมดได้ดำเนินการให้ใกล้เคียงที่สุดกับสถานการณ์การใช้งานที่เกิดขึ้นจริงของโครงการ CU-BEMS ทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ได้ และในโครงการ CU-BEMS จะมีค่าความหนาแน่นของจำนวนโนดตัวรับรู้ไร้สายที่สูงสุดต่อ 1 เกตเวย์เป็นจำนวน 28 โนด ที่ติดตั้งจริงภายในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ดังนั้นจึงเลือกห้องนี้เป็นสถานที่ทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์เป็นหลัก

#### 4.1 การทดสอบการทำงานของโครงข่ายไร้สาย ZigBee

โปรโตคอล ZigBee เป็นการสื่อสารบนพื้นฐานตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 ที่มีการสื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย ดังนั้นการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 มีจุดประสงค์เพื่อแสดงผลกระทบของการรบกวนของคลื่นความถี่นอกจากนี้อุปกรณ์ไร้สาย ZigBee เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำและเหมาะกับการสื่อสารในงานที่ต้องการเฝ้าสังเกตข้อมูล และสามารถติดตั้งโนดตัวรับรู้ในตำแหน่งที่ไม่ต้องเดินสายไฟเลี้ยงอุปกรณ์ และในหัวข้อ 4.1.2 แสดงผลการทดสอบการตั้งค่าการทำงานของโนดตัวรับรู้ไร้สายในโหมดการสื่อสารในโหมดหลับแบบวนรอบ (cyclic sleep) เพื่อประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้กับตัวรับรู้ของบริษัท ดิจิ อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล

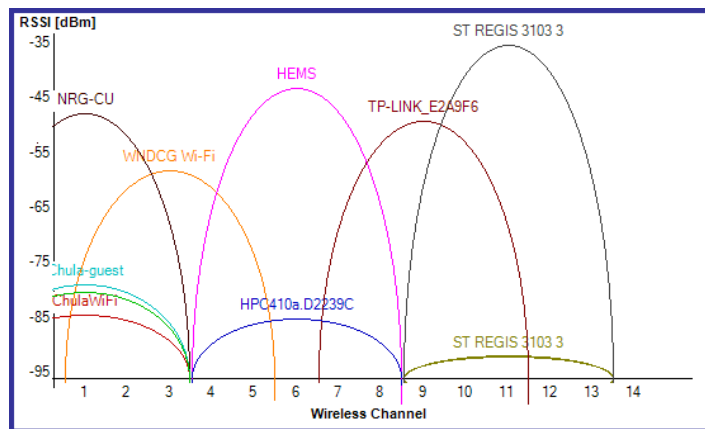
##### 4.1.1 การทดสอบผลกระทบของคลื่นความถี่ในย่าน 2.4 GHz



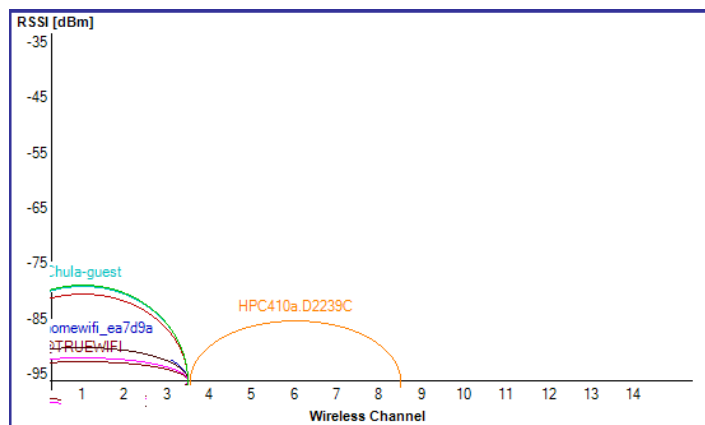
รูปที่ 4.1: แผนผังการทดสอบสำหรับการรับส่งข้อมูล



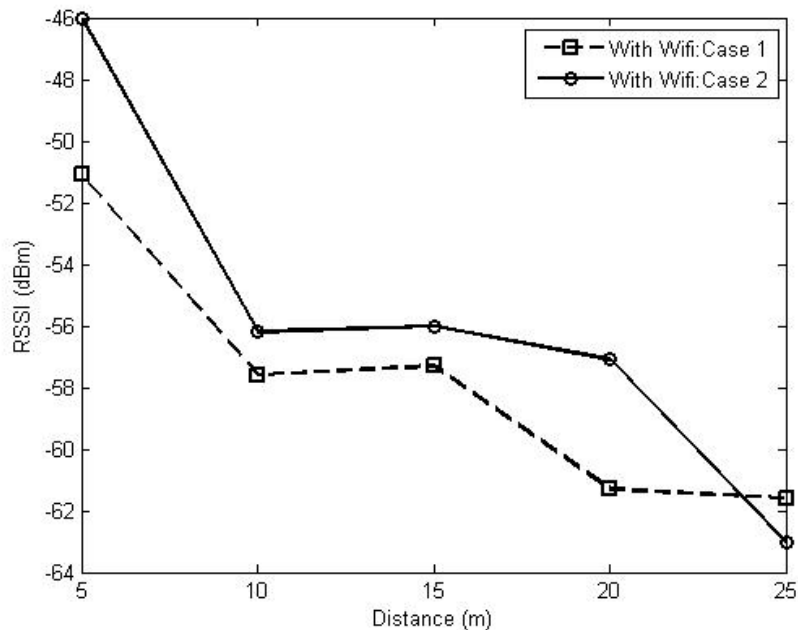
การทดสอบในหัวข้อนี้มีการสื่อสารระหว่างโหนดอุปกรณ์ประสานกับอุปกรณ์ปลายทาง แสดงดังรูปที่ 4.1 ที่รับส่งข้อมูลแบบไปกลับโดยการทดสอบโหนดอุปกรณ์ประสานเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่สื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (serial port) และใช้โปรแกรม XCTU [7] สำหรับบันทึกผลการทดสอบ จากนั้นจะเริ่มการทดสอบโดยส่งกลุ่มข้อมูลขนาด 28 ไบต์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับชุดข้อมูลของโหนดตัวรับรู้ในงานวิจัยนี้ภาครับ คือโหนดอุปกรณ์ปลายทางรับชุดข้อมูลที่ภาคส่งได้ส่งข้อมูลมา โดยที่โหนดอุปกรณ์ปลายทางจะส่งชุดข้อมูลที่รับมากลับไปยังโหนดอุปกรณ์ประสานอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้โหนดอุปกรณ์ประสานวัดค่าการส่งข้อมูลสำเร็จโดยมีอายุของการส่งกลุ่มข้อมูลในแต่ละครั้งเท่ากับ 1 วินาที หากการรับส่งแต่ละครั้งมีเวลาไม่เกิน 1 วินาที การส่งข้อมูลจะมีค่าบันทึกเป็นส่งข้อมูลสำเร็จ แต่หากเกินเวลาที่กำหนดไว้โหนดประสานจะเริ่มการส่งชุดข้อมูลครั้งต่อไปทันที และผลการส่งข้อมูลก่อนหน้าจะเป็นการส่งข้อมูลไม่สำเร็จ



รูปที่ 4.2: ระดับค่าความเข้มสัญญาณของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายทั้งหมดที่สามารถวัดได้ในจุดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย



รูปที่ 4.3: ระดับค่าความเข้มสัญญาณของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายที่ไม่สามารถปิดการใช้งานได้ระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิจัย



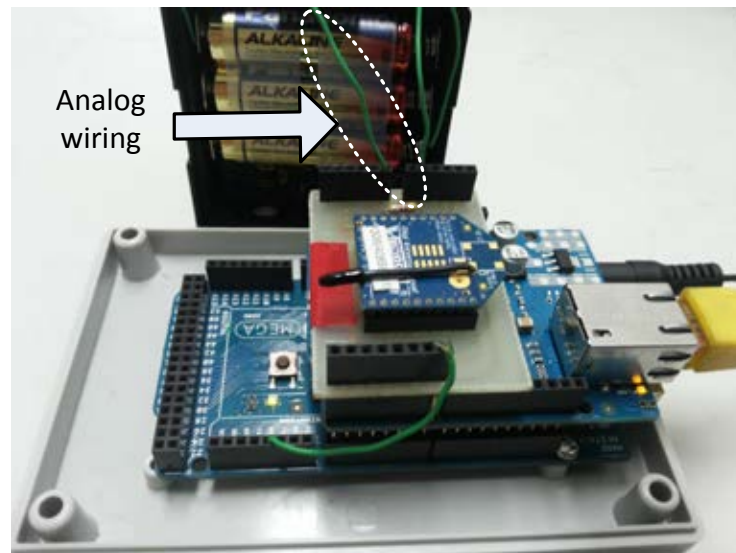
**รูปที่ 4.4:** การเปรียบเทียบผลกระทบของระดับความเข้มของสัญญาณไร้สาย ZigBee กับอุปกรณ์เข้าถึงอินเทอร์เน็ตไร้สาย

จากผลการทดสอบวัดค่า RSSI (receive signal strength indicator) ของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายภายในห้องทดสอบพบจำนวนอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายในบริเวณอื่นต่างห้อง หรือต่างชั้นของอาคาร จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมได้ โดยการทดสอบจะมีอุปกรณ์เหล่านี้ปรากฏอยู่และทำให้เกิดสัญญาณรบกวนตามปกติ ผลการวัดค่า RSSI แสดงดังรูปที่ 4.2 และผลการวัดสัญญาณ RSSI กรณีที่ปิดอุปกรณ์ชั่วคราวเพื่อวัดผลแสดงดังรูปที่ 4.3 ผลกระทบของระยะทางจาก 5 ถึง 25 เมตร และการรบกวนของสัญญาณ WiFi ของค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ พบว่าการส่งข้อมูลในกรณีปิดอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ต 4 จุดได้แก่ NRG-CU, HEMS, TP-LINK\_E2A\_F6 และ WNDCG Wi-Fi สังเกตว่ามีค่า RSSI ลดลงจากเดิม 2-5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ นอกจากนี้การทดสอบการรับส่งข้อมูลขนาด 28 ไบต์ จำนวน 1,000 กลุ่มข้อมูล พบว่าอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จเป็น 100% ดังนั้นจากการทดสอบไม่ว่าจะมีอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายหรือไม่ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยฯ ผลกระทบการรับส่งสัญญาณไร้สายจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จ ทั้งนี้ในระยะเวลาการส่งไม่เกิน 25 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางสูงสุดของการรับส่งจริง

#### 4.1.2 การทดสอบแหล่งจ่ายพลังงานของ ZigBee

โครงการ CU-BEMS ภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นตัวรับรู้ชนิดการวัดข้อมูลสภาพแวดล้อมเป็นการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสง ในที่นี้จะใช้ตัวรับรู้ที่ผลิตจากบริษัทดี อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนลสามารถใช้งานไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ได้ และในโครงการ CU-BEMS ได้เลือกใช้งานแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ เนื่องจากหาได้ง่ายตามท้องตลาดและมีความจุแบตเตอรี่มากกว่าชนิดอื่น โดยการตั้งค่าการทำงานของตัวรับรู้ให้อยู่ในโหมดการทำงานแบบหลับ (sleep mode)

เมื่อไม่มีการส่งข้อมูลสภาพแวดล้อมเพื่อลดการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ และเมื่อมีการส่งข้อมูลตัวรับจะดึงพลังงานมาใช้จากแหล่งจ่าย ดังนั้นจะต้องตั้งค่าให้ตัวรับอยู่ในโหมดตื่น ในหัวข้อนี้จึงเสนอวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความจุ และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับตัวรับ ZigBee ในการทำงานโหมดอุปกรณ์จัดเส้นทางซึ่งจะกินพลังงานคงที่ตลอดเวลา และสามารถส่งข้อมูลสถานะแบตเตอรี่ได้เช่นกัน



รูปที่ 4.5: การต่อวงจรสำหรับวัดแรงดันสถานะของแบตเตอรี่ที่ต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 4.5 ตัวรับ ZigBee ได้ใช้แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ และเชื่อมต่อสายไฟสำหรับวัดระดับแรงดันที่ป้อนมาจากแบตเตอรี่ เข้าสู่วงจรวัดสัญญาณแอนะล็อกของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และในขณะเดียวกันตัวรับ ZigBee จะส่งข้อมูลสถานะแบตเตอรี่ [1,0] แบบไร้สายไปยัง ZigBee ภาครับที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และสถานะแบตเตอรี่ที่วัดตรงจากแบตเตอรี่จะต่อตรงกับขาเข้าของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบสัญญาณแอนะล็อก

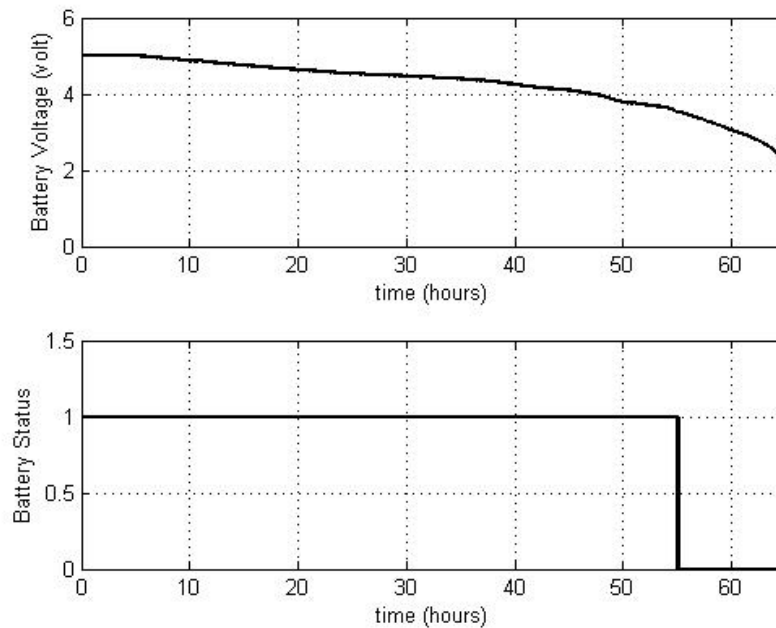
จากรูป 4.6 แสดงสถานะของแบตเตอรี่ที่ใช้ในตัวรับ ZigBee ที่ทำงานเป็นอุปกรณ์จัดเส้นทางจะกินกระแสคงที่ตลอดการใช้งานเป็น 42 มิลลิแอมป์ จนกระทั่งเมื่อมีแรงดันของแบตเตอรี่ต่ำกว่า 3.5 โวลต์ ตัวรับ ZigBee จะแสดงสถานะของแบตเตอรี่เป็นลอจิก 0 เมื่อแบตเตอรี่ต่ำกว่า 3.5 โวลต์ การทำงานของตัวรับ ZigBee ยังคงส่งข้อมูลได้แต่ค่าที่วัดมาได้นั้น จะมีค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่แบตเตอรี่ที่มีค่ามากกว่า 3.5 โวลต์ ค่าที่อ่านได้จะมีความเสถียรของข้อมูลตัวรับ ซึ่งผลการทดสอบนี้เพื่อหาความจุของแบตเตอรี่โดยคำนวณได้จาก

$$C = L_{test} \times I_{test} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$C$  คือค่าความจุของแบตเตอรี่ (battery capacity) (มิลลิแอมป์ชั่วโมง)

$L_{test}$  คืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความจุ (battery lifetime) (ชั่วโมง)



รูปที่ 4.6: การแสดงสถานะของแบตเตอรี่ทั้งแบบแอนะล็อกและดิจิทัล

$I_{test}$  คือค่ากระแสเฉลี่ยที่โนดตัวรับรู้ในโหมดอุปกรณ์จัดเส้นทาง (มิลลิแอมป์)

ดังนั้นค่าความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการ CU-BEMS ( $C = 55hr \times 42mA$ ) มีค่าเท่ากับ 2310 มิลลิแอมป์ชั่วโมง

สำหรับโนดตัวรับรู้ของบริษัทดิจิทัล อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล ที่จะติดตั้งที่อาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ชั้น 1-6 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทางทีมออกแบบกำหนดให้ไม่มีการเดินสายไฟฟ้ามาจ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัวรับรู้ แต่ให้ตัวรับรู้ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แทน ดังนั้น เพื่อให้สามารถยืดอายุการทำงานของตัวรับรู้ ต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่แต่ละครั้ง วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ตั้งโหมดการทำงานของตัวรับรู้นี้ โดยปรับเป็นโหมดการหลับแบบวนรอบ ซึ่งตัวรับรู้จะหลับเมื่อยังไม่ถึงคาบเวลาการส่งข้อมูล แต่จะตื่นเมื่อถึงคาบเวลาการส่งข้อมูล โดยจะทดสอบวัดกระแสที่ตัวรับรู้ใช้งาน แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พร้อมกับการประเมินในกรณีค่าความจุของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน และความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาการส่งข้อมูลกับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 4.9

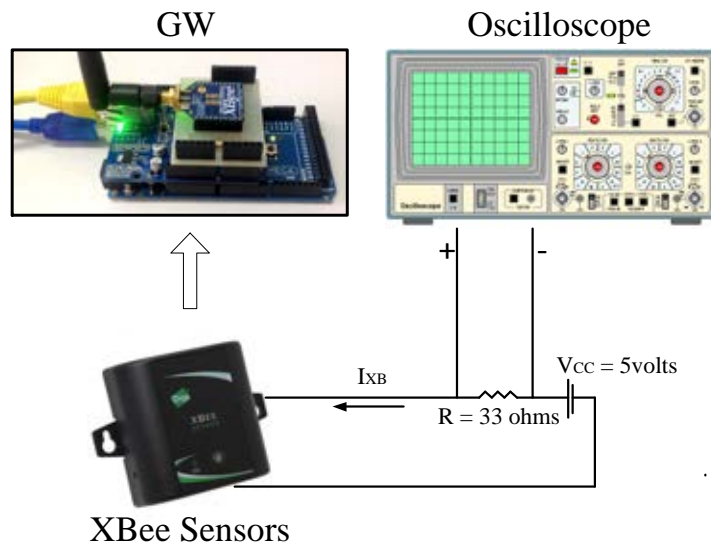
จากรูปที่ 4.8 ตัวรับรู้จะใช้กระแสสำหรับการส่งข้อมูลแต่ละครั้งโดยสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{trans} = \frac{V_{trans}}{R} \quad (4.2)$$

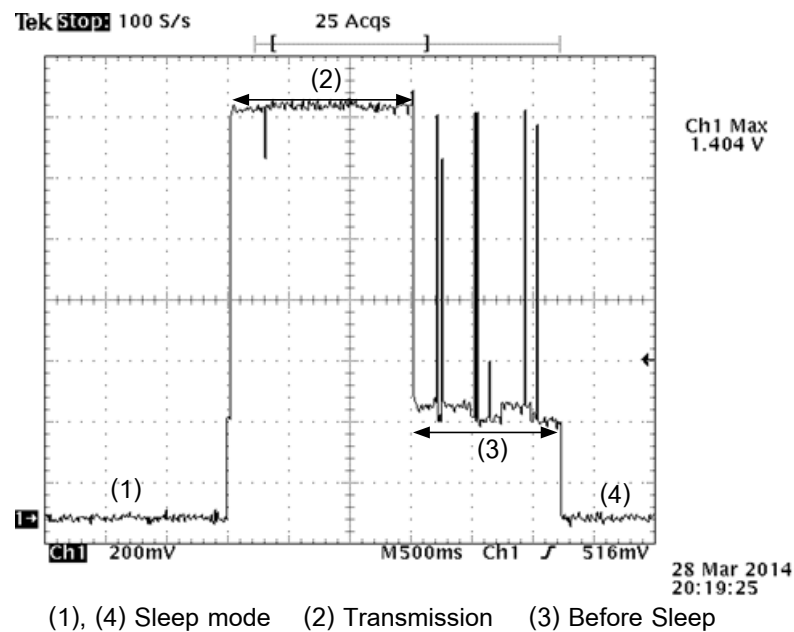
เมื่อ

$I_{trans}$  คือค่ากระแสที่ตัวรับรู้ใช้งานเมื่อส่งข้อมูล (มิลลิแอมป์)

$V_{trans}$  คือค่าแรงดันที่วัดได้ในช่วงที่ส่งข้อมูล (ช่วงที่ 2) (โวลต์)



รูปที่ 4.7: การทดสอบการกินกระแสของตัวรับ ZigBee



รูปที่ 4.8: สัญญาณแรงดันไฟฟ้าการส่งข้อมูลของตัวรับในการทำงานแบบโหมดการหลับแบบวนรอบ

$R$  คือค่าความต้านทานที่ใช้สำหรับการวัดกระแส (โอห์ม)

ดังนั้นค่ากระแสสำหรับการส่งข้อมูลเท่ากับ ( $I_{trans} = 1.404/33$ ) 42.5 มิลลิแอมป์

ค่ากระแสในช่วงเวลาก่อนอยู่ในโหมดหลับ (ช่วงที่ 3) คำนวณได้จาก

$$I_{before} = \frac{V_{before}}{R} \quad (4.3)$$

เมื่อ

$I_{before}$  คือค่ากระแสที่ตัวรับรู้ใช้งานในช่วงก่อนเข้าสู่โหมดหลับ (ช่วงที่ 3) (โวลต์)  
 $V_{before}$  คือค่าแรงดันที่วัดได้ช่วงก่อนเข้าสู่โหมดหลับ (ช่วงที่ 3) (โวลต์)

ดังนั้นค่ากระแสในช่วงเวลาก่อนอยู่ในโหมดหลับเท่ากับ ( $I_{before} = 0.4/33$ ) 12.12 มิลลิแอมป์

ค่ากระแสในโหมดหลับคำนวณได้จาก

$$I_{sleep} = \frac{V_{sleep}}{R} \quad (4.4)$$

เมื่อ

$I_{sleep}$  คือค่ากระแสที่ตัวรับรู้ใช้งานในช่วงโหมดหลับ (ช่วงที่ 1 และ 4) (โวลต์)  
 $V_{sleep}$  คือค่าแรงดันที่วัดได้ในช่วงโหมดหลับ (ช่วงที่ 1 และ 4) (โวลต์)

ดังนั้นค่ากระแสที่ใช้ในช่วงโหมดหลับเท่ากับ ( $I_{sleep} = 0.055/33$ ) 1.7 มิลลิแอมป์

ในการส่งข้อมูลไร้สายของ ZigBee จะใช้กระแส  $I_{drain}$  เฉลี่ยในระยะเวลา 1 คาบเวลา  $T_{XB}$  คำนวณรวมทั้งเวลาที่ ZigBee ใช้ในการส่งข้อมูลและเวลาที่ ZigBee อยู่ในโหมดการหลับแบบวนรอบคำนวณได้จาก

$$I_{drain} = \frac{I_{trans}t_{trans} + I_{before}t_{before} + I_{sleep}t_{sleep}}{T_{XB}} \quad (4.5)$$

เมื่อ

$I_{drain}$  คือค่ากระแสเฉลี่ยที่ตัวรับรู้ใช้ใน 1 คาบเวลาการส่งข้อมูล (มิลลิแอมป์)

โดยที่ระยะเวลาระหว่าง ZigBee อยู่ในโหมดหลับ  $t_{sleep}$  คำนวณได้จาก

$$t_{sleep} = T_{XB} - (t_{trans} + t_{before}) \quad (4.6)$$

ดังนั้นค่ากระแส  $I_{drain}$  ที่ ZigBee ใช้คำนวณได้จาก

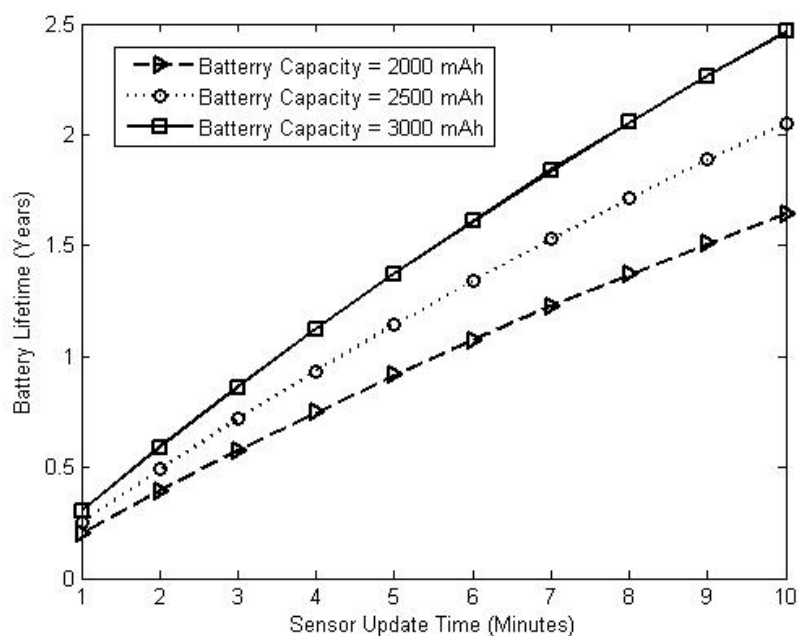
$$I_{drain} = \frac{t_{trans}}{T_{XB}} I_{trans} + \frac{t_{before}}{T_{XB}} I_{before} + \left(1 - \frac{t_{trans} + t_{before}}{T_{XB}}\right) I_{sleep} \quad (4.7)$$

ดังนั้นอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (battery lifetime,  $L$ ) ในหน่วยปี คำนวณได้จาก

$$365 \times 24 \times 60 \times L = 3600 \times \frac{C}{I_{drain}} \quad (4.8)$$

$$L = \frac{60}{365 \times 24} \left( \frac{C}{I_{drain}} \right) \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.9) เมื่อนำมาวาดเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของแบตเตอรี่กับการประเมินอายุการใช้งานจะได้ดังรูปที่ 4.9 การเลือกคาบเวลาการส่งข้อมูลจะขึ้นกับผู้ใช้งานหากมีการเลือกใช้งานสำหรับการเฝ้าสังเกตเพื่อดูแลแนวโน้มการเพิ่มลดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสง จะสามารถเลือกได้ในการใช้งานเป็นปีควรเลือกคาบเวลาการส่งข้อมูลเป็น 5 นาทีขึ้นไป จึงเหมาะสมกับแต่ละการประยุกต์ใช้งานสำหรับที่เลือกใช้งานชนิดแบตเตอรี่

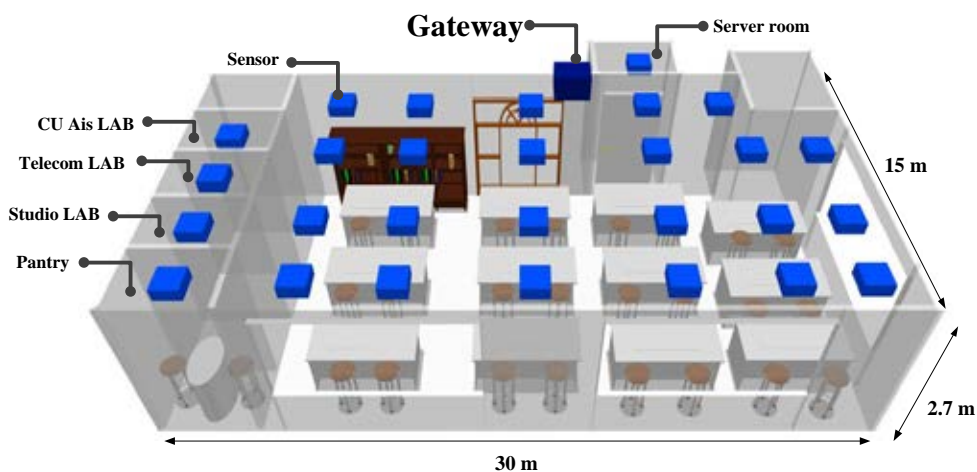


รูปที่ 4.9: ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของแบตเตอรี่กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ ZigBee

ดังนั้นหากในโครงการ CU-BEMS จะกำหนดให้โนดตัวรับรู้จากบริษัทดิจิทัล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล ที่ติดตั้ง และใช้งานด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่อัลคาไลน์ที่มีค่าความจุของแบตเตอรี่เป็น 2310 มิลลิแอมป์ชั่วโมง ต้องส่งข้อมูล ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง มายังเกตเวย์ ด้วยคาบเวลาเท่ากับ 1 นาที เราจะสามารถใช้งานตัวรับรู้ได้เพียง 3 เดือน ก็จะต้องมีการบำรุงรักษา โดยเปลี่ยนแบตเตอรี่ทั้งหมดซึ่งอาจจะเป็ค่าใช้จ่ายที่สูงและไม่สะดวก แต่หากจะตั้งค่าคาบเวลาเท่ากับ 5 นาที แล้วเราจะได้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นเป็น 1 ปี และถ้าค่าคาบเวลาเท่ากับ 10 นาที อายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นเป็น 1 ปี 10 เดือน ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้มีการตั้งค่าคาบเวลาการส่งข้อมูลของตัวรับรู้มากกว่า 10 นาที ซึ่งหากตั้งค่าเป็น 15 นาที เพื่อให้สอดคล้องกับจังหวะเวลาความละเอียดของการแสดงสถานะของระบบในโครงการ CU-BEMS ผ่านเว็บ แล้วเราจะสามารถให้ตัวรับรู้ได้อายุการใช้งานนานถึง 2 ปี 6 เดือน

## 4.2 การทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์

สมรรถนะของเกตเวย์ที่วัดความสามารถรองรับปริมาณกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอวิธีการทดสอบ และผลการทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์ที่ติดต่อสื่อสารระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายกับระบบการบริหารจัดการพลังงานในมาตรฐาน IEEE1888 โดยการทดสอบมีโหนดตัวรับรู้ทั้งสิ้น 28 โหนด ซึ่งเป็นจุดการติดตั้ง และทดสอบจริงภายในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม แสดงดังรูปที่ 4.10 การทำงานในทุก ๆ โหนดจะไม่ได้ทำงานโหมดหลักสำหรับการประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่ เนื่องจากมีชนิดตัวรับรู้การเคลื่อนไหวของคนอยู่ด้วย เพราะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวจะต้องส่งข้อมูลเพื่ออัปเดตการเปลี่ยนแปลงของสถานะตัวรับรู้ได้ในทุก ๆ เวลา ดังนั้นการตั้งค่าการทำงานของตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee จะทำงานในโหมดอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อให้ตัวรับรู้พร้อมส่งข้อมูลหรือทำงานในโหมดตื่นได้ตลอดเวลา และตัวรับรู้ไร้สายสามารถรองรับการสื่อสารแบบเมชได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของโครงข่ายสื่อสารไร้สายที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งภายในห้องทดสอบนี้ในแต่ละโหนดจะมีระยะห่างกับโหนดข้างเคียงไม่เกิน 5 เมตร จากผลการทดสอบให้หัวข้อ 4.1.1 พบว่าในระยะทาง 25 เมตรที่สามารถส่งข้อมูลได้มีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ 100% แต่การทดสอบในหัวข้อ 4.1.1 เป็นการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (point to point) ยังไม่ได้พิจารณาจำนวนโหนดตัวรับรู้ที่ติดตั้งจริงภายในห้องทดสอบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทดสอบความสามารถการทำงานของเกตเวย์โดยการวัดผลสมรรถนะของเกตเวย์ ได้แก่ อัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสำเร็จ (packet success ratio) อัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลผิดพลาด (packet error ratio) และอัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสูญหาย (packet loss ratio)



รูปที่ 4.10: แผนผังการติดตั้งตัวรับรู้ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยจำนวน 28 โหนด

การวัดสมรรถนะของเกตเวย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และนิยามความหมายได้ดังนี้

อัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสำเร็จ คือ อัตราส่วนจำนวนกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้ที่ถูกส่งมายังเกตเวย์ และเกตเวย์คำนวณค่าไบท์ตรวจสอบของ ZigBee ได้ถูกต้อง และสามารถส่งข้อมูลที่ถูกส่งไปยังหน่วย



เก็บข้อมูลผ่านการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 ได้สำเร็จ ค่าอัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสำเร็จ  
คำนวณได้จาก

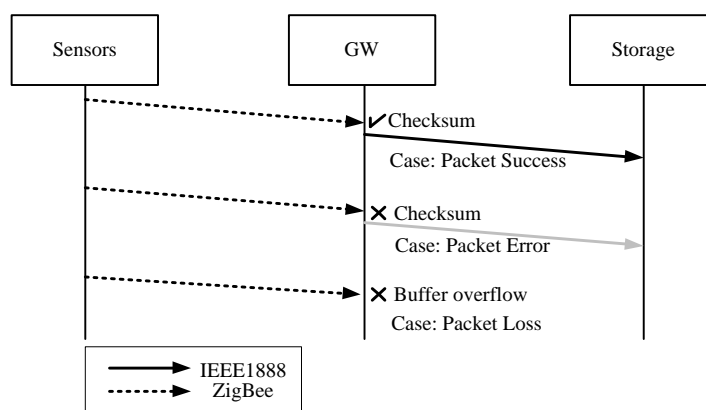
$$\text{packet success ratio} = \frac{\text{จำนวนครั้งของเหตุการณ์ packet success}}{\text{จำนวนกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการส่งออกจากตัวรับรู้}} \times 100\% \quad (4.10)$$

อัตราส่วนของการส่งของกลุ่มข้อมูลผิดพลาด คือ อัตราส่วนจำนวนกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้ที่ถูกส่งมายังเกตเวย์แต่เกตเวย์คำนวณไปที่ตรวจสอบของ ZigBee ผิดพลาด เกตเวย์จะส่งข้อมูลสถานะการส่งข้อมูลผิดพลาดไปยังโครงข่ายในมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อบันทึกผลการทดสอบ ค่าอัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลผิดพลาดคำนวณได้จาก

$$\text{packet error ratio} = \frac{\text{จำนวนครั้งของเหตุการณ์ packet error}}{\text{จำนวนกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการส่งออกจากตัวรับรู้}} \times 100\% \quad (4.11)$$

อัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลสูญหาย คือ อัตราส่วนจำนวนกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้ที่ถูกส่งมายังเกตเวย์แต่เกตเวย์ไม่สามารถตรวจพบข้อมูลที่ตัวรับรู้ส่งมาได้ ค่าอัตราส่วนจำนวนกลุ่มข้อมูลสูญหายคำนวณได้จาก

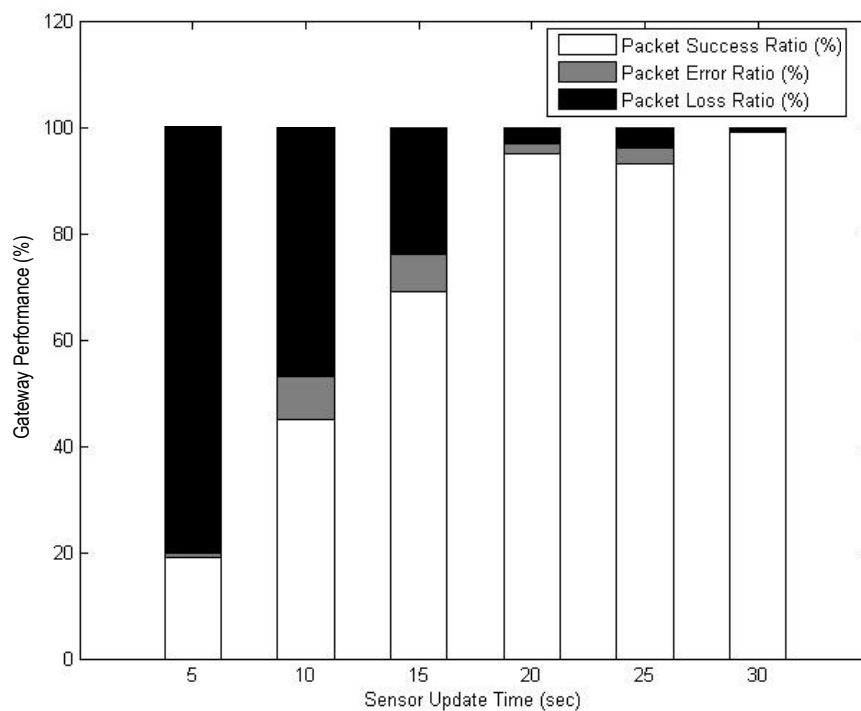
$$\text{packet loss ratio} = \frac{\text{จำนวนครั้งของเหตุการณ์ packet loss}}{\text{จำนวนกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการส่งออกจากตัวรับรู้}} \times 100\% \quad (4.12)$$



**รูปที่ 4.11:** ผังเวลาการส่งข้อมูลระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายกับมาตรฐาน IEEE1888 สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์

ทั้งนี้จำนวนกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการส่งออกจากตัวรับรู้ ในที่นี้จะประมาณจากคาบเวลาของการส่งข้อมูลซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง คู่กับระยะเวลาทั้งหมดที่ทำการทดลอง

ดังนั้นไม่มีการพิจารณาข้อมูลที่มาจากตัวรับรู้การเคลื่อนไหวของคน ซึ่งอาจทำให้เกิดการส่งข้อมูลที่ไม่เป็นรายคาบเพิ่มเติมเข้ามาในระบบ ผลการทดลองใช้ระยะเวลา 30 นาทีต่อกรณี แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าถ้าหากตัวรับรู้มีคาบเวลาการส่งข้อมูลมากกว่า 30 วินาทีแล้วอัตราส่วนของข้อมูลสำเร็จจะมีค่ามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนของกลุ่มข้อมูลผิดพลาดและข้อมูลสูญหายจะมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

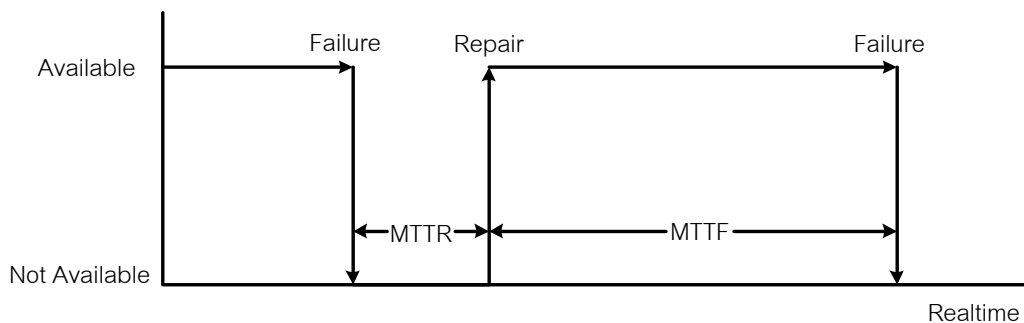


รูปที่ 4.12: สมรรถนะการสื่อสารระหว่าง ZigBee กับเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ในการใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

### 4.3 การทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์

ค่าสภาพพร้อมใช้งาน (availability, A) ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวัดรอบความถี่การรีเซตของเกตเวย์หากเกตเวย์มีการทำงานผิดปกติซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการสร้างระบบก่อนนำไปใช้งานจริงในระบบการจัดการพลังงานภายในอาคาร เพราะหากตัวรับรู้และเกตเวย์มีระบบสื่อสารเป็นอุปสรรคต่อการทำงานจะส่งผลให้ข้อมูลที่สูญหายไปได้ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยแสดงช่วงเวลาสามารถใช้งานและช่วงเวลาที่กำลังรีเซตโดยแสดงดังรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.13 ค่าเวลาเฉลี่ยจนถึงระบบเสียหาย (mean time to failure, MTTF) คือค่าเวลาที่เกตเวย์ทำงานโดยทำหน้าที่สื่อสารระหว่างโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee กับโครงข่ายสื่อสาร



รูปที่ 4.13: ช่วงเวลาเฉลี่ยสำหรับการทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งาน

ในมาตรฐาน IEEE1888 หรือเกตเวย์ยังสามารถคงสถานะการทำงานได้อย่างปกติจนกระทั่งเกตเวย์มีความขัดข้องจากการอ่านกลุ่มข้อมูล ZigBee เกตเวย์จะเริ่มทำงานใหม่พร้อมกับล้างสถานะเดิมทิ้งไปโดยค่าเวลานี้คือ ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างเวลาการทำงานของเกตเวย์เริ่มขัดข้องจนกระทั่งเกตเวย์ซ่อมบำรุงสำเร็จ (การรีเซตแบบซอร์ฟแวร์) (mean time to repair, MTTR) โดยที่ MTTF รวมกับ MTTR คือ เวลาเฉลี่ยระหว่างเหตุการณ์ที่เกตเวย์ขัดข้องครั้งก่อนหน้ากับครั้งถัดมา (mean time between failure, MTBF) เมื่อทราบเวลาเฉลี่ยทั้งหมดแล้วสามารถคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานได้จาก

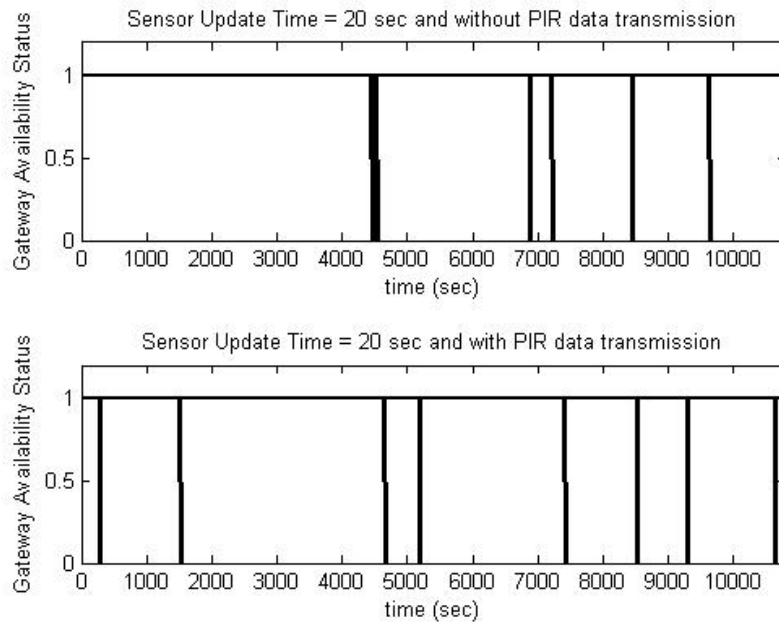
$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \times 100\% \quad (4.13)$$

การทำงานของเกตเวย์จะมีปัญหาการหยุดทำงาน ได้แก่ การขาดการเชื่อมต่อของอินเทอร์เน็ต หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์เต็ม หรือปัญหาอื่น ๆ ภายในการทำงานของซอร์ฟแวร์ ดังนั้นในการการออกแบบให้เกตเวย์มีการเฝ้าสังเกตความผิดปกติได้ใช้ไลบรารี (library) ที่สนับสนุนการทำงานของโปรแกรม Watchdog หากไมโครคอนโทรลเลอร์มีการหยุดการทำงาน โปรแกรม Watchdog ทำหน้าที่ให้เกตเวย์รีเซตเพื่อกู้การทำงานให้กลับสู่สถานะปกติ โดยค่า MTTR ในกรณีนี้จะมีค่าไม่เกิน 11 วินาที จากผลการทดลองทั้งหมดซึ่งจะได้นำเสนอค่าสภาพพร้อมใช้งานต่อไปในหัวข้อ 4.3.1 - 4.3.2

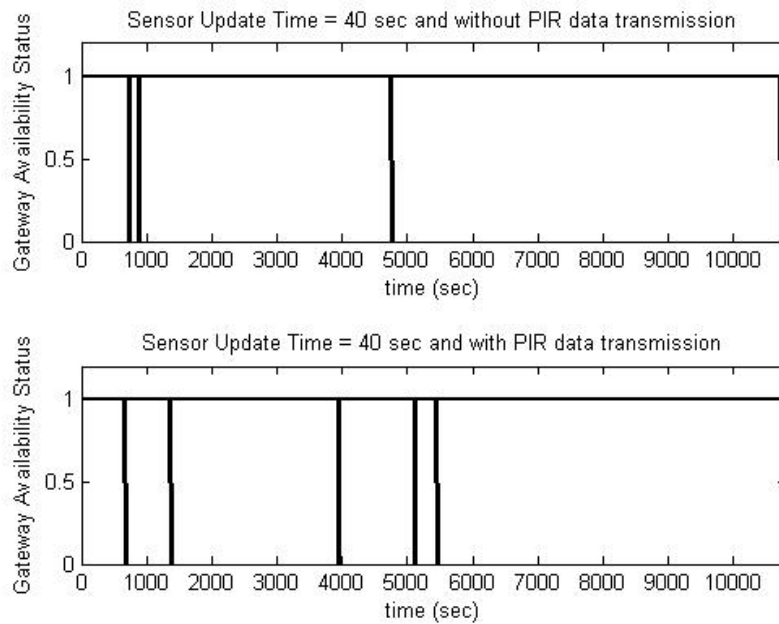
#### 4.3.1 แนวโน้มสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดคาบเวลาการส่งข้อมูลของโนดตัวรับรู้เท่ากับ 20, 40 และ 60 วินาที

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทดสอบสภาพการใช้งานของเกตเวย์เพื่อยืนยันผลก่อนนำไปใช้งานจริง การทดสอบนี้จะมี 2 กรณี ในกรณีแรกโนดตัวรับรู้จะมีคาบเวลาการส่งเท่ากับ 20, 40 และ 60 วินาทีตามลำดับ และกรณีที่สองจะมีการส่งข้อมูลของสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหว ผลการทดสอบค่าสภาพพร้อมใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 โดยสถานะ 1 หมายถึงเกตเวย์ทำงานได้ปกติและสถานะ 0 หมายถึงเกตเวย์หยุดทำงาน

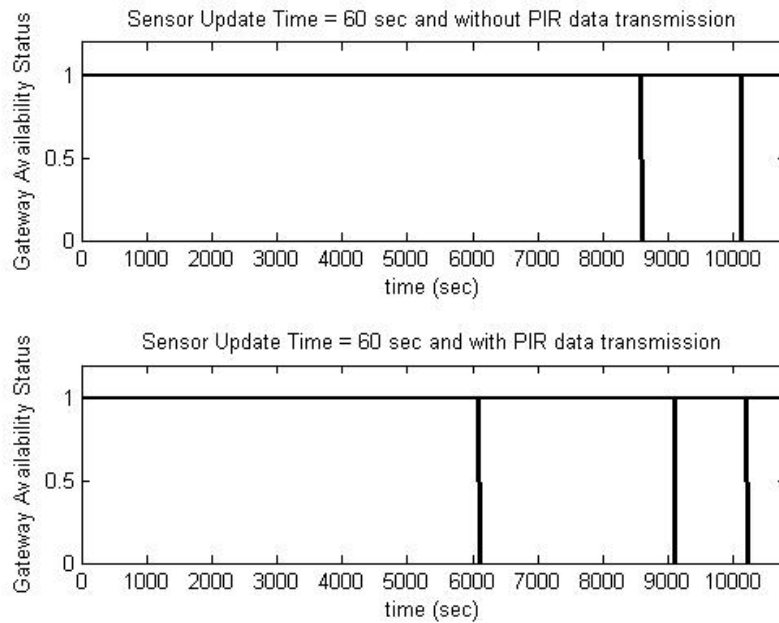
รูปที่ 4.17 ผลค่าสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ในกรณีต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราเร็วการส่งข้อมูลเมื่อมีจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เพิ่มเข้ามากขึ้นทำให้อัตราการรีเซตเพิ่มมากขึ้น ส่ง



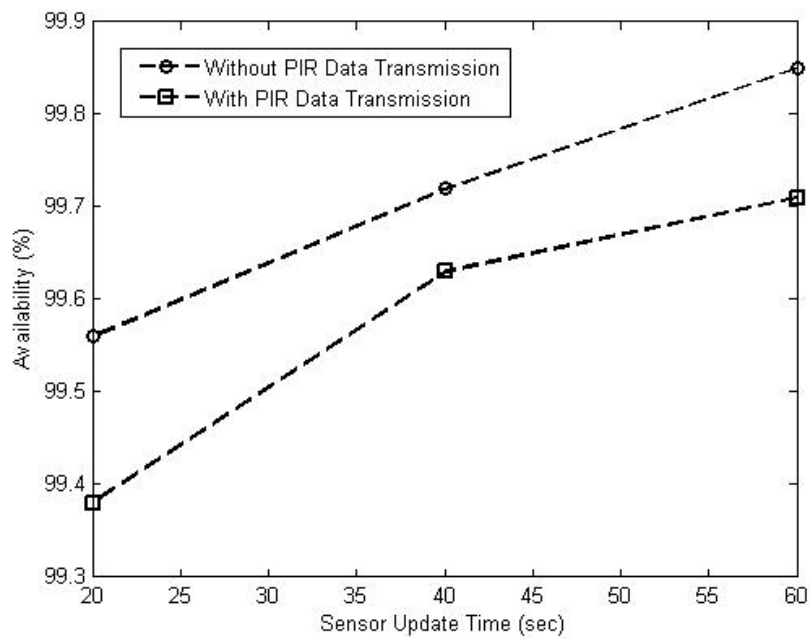
**รูปที่ 4.14:** ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาโนดตัวรับรู้ ZigBee เท่ากับ 20 วินาที



**รูปที่ 4.15:** ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาโนดตัวรับรู้ ZigBee เท่ากับ 40 วินาที



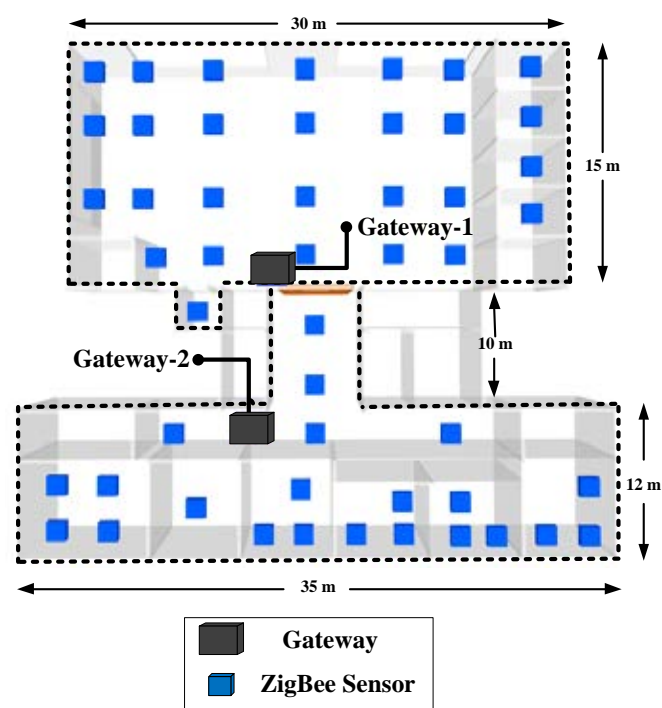
**รูปที่ 4.16:** ผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์เมื่อกำหนดการส่งข้อมูลตามค่าคาบเวลาเน็ตเวิร์ก ZigBee เท่ากับ 60 วินาที



**รูปที่ 4.17:** การเปรียบเทียบผลการทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์

ผลให้สภาพพร้อมใช้งานลดลง การทดสอบนี้ได้ทดสอบการอัปเดตข้อมูลตัวรับรู้ทุก ๆ คาบเวลาและ การทดสอบผลกระทบของการอัปเดตข้อมูลของสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวเพิ่มเติมเข้ามา พบว่าเพิ่ม การอัปเดตข้อมูลของตัวรับรู้ที่เพิ่มเข้ามามีผลกระทบต่อจำนวนการรีเซตของเกตเวย์ ผลการทดสอบ ค่าสภาพพร้อมใช้งานกรณีที่มีมากที่สุดเมื่อค่าคาบเวลาของการส่งข้อมูลของตัวรับรู้เท่ากับ 60 วินาที พร้อมกับเพิ่มการอัปเดตของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวหากมีการเปลี่ยนแปลงสถานะข้อมูล ค่าสภาพ พร้อมใช้งานที่ได้จากการทดสอบมีเท่ากับ 99.71 %

#### 4.3.2 การทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ในการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง

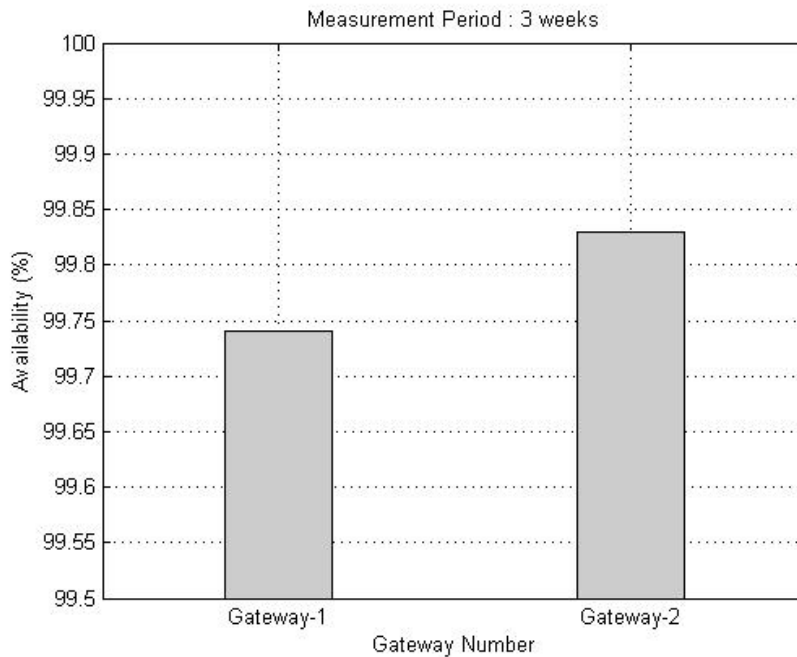


รูปที่ 4.18: แผนผังติดตั้งโน้ตรับรู้ไร้สาย ZigBee ครอบคลุมพื้นที่ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรม

การทดสอบในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ภายใน ชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรมที่ติดตั้งใช้งานจริงและครอบคลุมพื้นที่ทั้งชั้น ได้แก่ ฝั่งเหนือ ฝั่งใต้ และบริเวณ ทางเดินรวมตัวรับรู้ทั้งสิ้น 50 โหนด แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยเกตเวย์จะทำงานต่อเนื่อง โดยใช้เวลาดำเนินการ ผลการทดสอบเป็น 3 สัปดาห์ ตั้งแต่วันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2557 เวลา 00:00:00 น.จนถึงวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 เวลา 23:59:59 น.

การทดสอบหาสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ในระยะเวลาการทำงานรวม 3 สัปดาห์ของเกตเวย์ฝั่งเหนือของอาคาร หรือ GW1 มีโน้ตตัวรับรู้เท่ากับ 28 โหนด จากผลการทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งานมีค่าเท่ากับ 99.74% ในส่วนของเกตเวย์ฝั่งใต้ หรือ GW2 มีโน้ตตัวรับรู้เท่ากับ 22 โหนด จากผลการทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งานมีค่าเท่ากับ 99.83% แต่จะมีข้อจำกัด

ในการทำงานของเกตเวย์เมื่อมีการหยุดการทำงานชั่วคราว 11 วินาทีจะส่งผลให้ไม่สามารถรับกลุ่มข้อมูลจากตัวรับรู้ในเวลาขณะนั้นได้หรือกลุ่มสูญหายไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการนำข้อมูลไปใช้กับการควบคุมหลอดไฟพบว่าการควบคุมจะไม่สามารถทำงานได้ทันทีในเวลาจริง อย่างไรก็ตามตัวรับรู้การเคลื่อนไหวจะมีค่าคาบเวลาการส่งทุก ๆ นาทีอยู่แล้ว ดังนั้นการควบคุมหลอดไฟจะมีผลกระทบกับค่าเวลาประวิงที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 60 วินาทีหลังจากที่ตัวรับรู้ส่งข้อมูลชุดใหม่มายังเกตเวย์ จึงส่งผลให้ในส่วนควบคุมหลอดไฟสามารถเปิดหรือปิดได้จากค่าล่าสุดที่ได้รับค่าเข้ามาจากตัวรับรู้



รูปที่ 4.19: ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ใช้เวลาการทดสอบ 3 สัปดาห์

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาตัวรับรู้ไร้สายโดยใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย XBee ของบริษัทดิ อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล ที่ทำงานตามมาตรฐาน ZigBee/IEEE802.15.4 ในย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อทำหน้าที่วัดข้อมูลสภาพแวดล้อม ได้แก่ สถานะการเคลื่อนไหวของคน ค่าความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยจะแปลงค่าทางกายภาพให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นตัวรับรู้ไร้สาย ZigBee นี้ทำหน้าที่ส่งข้อมูลแบบไร้สายไปยังภาครับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ arduino ที่มีความเร็วของสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 16 MHz สำหรับประมวลผลสัญญาณเพื่ออ่านกลุ่มข้อมูลของตัวรับรู้ การใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ได้ใช้ซอร์ฟแวร์จากไลบรารี (library) ชื่อ FIAP UploadAgent เพื่อทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ตามโพรโทคอล WRITE มาตรฐาน IEEE1888-2011 เพื่อบรรจุชุดข้อมูล 4 ชนิดข้างต้นของตัวรับรู้ ไปสู่รูปแบบของภาษา XML ตามโครงสร้างของโพรโทคอล SOAP และเกตเวย์จัดส่งชุดข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลที่ทำหน้าที่เป็นแม่ข่ายสำหรับให้บริการการสื่อสารข้อมูลในระบบการจัดการพลังงาน

ในการประยุกต์ใช้งานของโครงข่ายตัวรับรู้ไร้สาย ต้องเลือกโหมดการทำงานเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานจริงไม่ว่าจะเป็น โหมดการสอบถามข้อมูล (polling mode) และโหมดการผลักข้อมูล (pushing mode) จากการทดสอบระบบเบื้องต้นในบทที่ 2 ได้ใช้งาน ZigBee ในโหมดสอบถามข้อมูลสำหรับระบบการเฝ้าสังเกต อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องแม่ข่าย และบริเวณข้างเคียงมีโนดวัดข้อมูลสภาพอากาศเพียง 4 โนด ซึ่งง่ายต่อการออกแบบระบบสำหรับการจัดการส่งข้อมูลกรณีที่ป้องกันการชนกันของกลุ่มข้อมูลโดยแบ่งเวลาการส่งไม่ตรงกัน อย่างไรก็ตามในระบบการจัดการพลังงานภายในอาคารที่มีจำนวนโนดตัวรับรู้มากขึ้น และการประยุกต์ใช้งานกับตัวรับรู้การเคลื่อนไหว ต้องใช้การอัปเดตข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลเพื่อส่งข้อมูลสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวไปยังอุปกรณ์ควบคุมหลอดไฟในทันที ดังนั้นการติดตั้งตัวรับรู้ที่ครอบคลุมทั้งชั้น 13 อาคารเจริญวิศวกรรมทั้งสิ้น 50 โนด แบ่งออกเป็นฝั่งเหนือของอาคารจำนวน 28 โนด และฝั่งใต้จำนวน 22 โนด โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายในแต่ละฝั่งของอาคารจะสื่อสารกับเกตเวย์ 1 ตัว ทำให้โหมดการสื่อสารแบบผลักจึงเหมาะสมกว่าในด้านการอัปเดตข้อมูลในเวลาจริง (real time) โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายนี้ได้ใช้ทอพอโลยีการสื่อสารแบบเมชเพื่อให้ขนาดของโครงข่ายสื่อสารมีการครอบคลุมพื้นที่ในบริเวณที่ติดตั้งทั้งหมด อย่างไรก็ตามการสื่อสารของระบบจะต้องมีการทดสอบเพื่อทราบความสามารถของการทำงานในระบบ ได้แก่ การส่งข้อมูลของ ZigBee สมรรถนะการทำงานของเกตเวย์ และสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ เพื่อให้โครงข่ายตัวรับรู้ไร้สายและเกตเวย์ที่ออกแบบนั้นสามารถใช้งานได้ในพื้นที่จริงของระบบการจัดการพลังงาน ผลทดสอบระบบในงานวิทยานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทำงานอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ZigBee ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบการรับส่งข้อมูลเพื่อหาผลกระทบของระยะทางจาก 5 ถึง 25 เมตร และการรบกวนของสัญญาณ WiFi ของค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 พบว่าการส่งข้อมูลในกรณีปิดอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ต (access point) 4 จุดได้แก่



NRG-CU, HEMS, TP-LINK\_E2A\_F6 และ WNDCG Wi-Fi สังเกตว่ามีค่า RSSI ลดลงจากเดิม 2-5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ นอกจากนี้พบว่าไม่ว่าจะมีการเปิดหรือปิดอุปกรณ์เข้าถึง สัญญาณอินเทอร์เน็ตที่ปรากฏอยู่ ณ สถานที่ติดตั้งจริง คือภายในห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารนั้น จากการทดสอบการรับส่งข้อมูลขนาด 28 ไบท์ จำนวน 1,000 กลุ่มข้อมูล พบว่าอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จเป็น 100% ดังนั้นจากผลการทดสอบไม่ว่าจะ มีอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายหรือไม่ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยฯ ผลกระทบการ รับส่งสัญญาณไร้สายจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนการรับส่งข้อมูลสำเร็จ ทั้งนี้ในระยะการส่ง ไม่เกิน 25 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางสูงสุดของการรับส่งจริง

2. การทดสอบสมรรถนะของเกตเวย์มีตัวรับรู้ 28 โหนดต่อเกตเวย์ที่ติดตั้งจริงภายในห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ซึ่งมีจำนวนโหนดมากที่สุดที่ใช้การใช้ในโครงการ CU-BEMS พบว่าคาบเวลาการส่งข้อมูลได้เร็วที่สุดเท่ากับ 30 วินาทีจะให้อัตราส่วนกลุ่มข้อมูลสำเร็จเท่ากับ 99% อัตราส่วนกลุ่มข้อมูลผิดพลาด 0% และอัตราส่วนกลุ่มข้อมูลสูญหาย 1% จึงเหมาะสม กับการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบการจัดการพลังงาน
3. การทดสอบสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหา แนวน้อยเบื้องต้นของค่าสภาพพร้อมใช้งาน และการทดสอบสภาพพร้อมใช้งาน
  - การทดสอบหาแนวโน้มของสภาพพร้อมใช้งานเบื้องต้น ได้กำหนดระยะเวลาการทดสอบ เท่ากับ 3 ชั่วโมงต่อการทดสอบโดยปรับค่าคาบเวลาการส่งของตัวรับรู้เท่ากับ 20, 40 และ 60 วินาที การทดสอบนี้ได้ทดสอบการอัปเดตข้อมูลของตัวรับรู้ทุก ๆ คาบเวลา และการทดสอบจากผลกระทบของการอัปเดตข้อมูลของสถานะตัวรับรู้การเคลื่อนไหวที่ เพิ่มเข้ามา พบว่าการส่งข้อมูลของตัวรับรู้ที่เพิ่มเข้ามามีผลกระทบต่อจำนวนการรีเซตของ เกตเวย์ ผลการทดสอบค่าสภาพพร้อมใช้งานกรณีที่มีมากที่สุดเมื่อค่าคาบเวลาของการส่ง ข้อมูลของตัวรับรู้เท่ากับ 60 วินาทีพร้อมกับเพิ่มการอัปเดตของตัวรับรู้การเคลื่อนไหวมี การเปลี่ยนแปลงสถานะ ค่าสภาพพร้อมใช้งานที่ได้จากการทดสอบมีเท่ากับ 99.71 % โดยมีค่าระยะเวลาที่เกตเวย์ต้องใช้เพื่อรีเซตการทำงานให้กลับมาทำงานปกติ สูงสุดวัดได้ ไม่เกิน 11 วินาที ทั้งนี้ภายในเงื่อนไขว่าระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อเกตเวย์กับ หน่วยเก็บข้อมูลนั้นทำงานได้ปกติ
  - การทดสอบหาสภาพพร้อมใช้งานของเกตเวย์ภายหลังการติดตั้ง และเริ่มต้นใช้งานจริง ตามโครงการ CU-BEMS ในระยะเวลาการทำงานรวม 3 สัปดาห์ของเกตเวย์ฝั่งเหนือ หรือ GW1 มีโหนดตัวรับรู้เท่ากับ 28 โหนด ผลการทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งานมีค่าเท่า กับ 99.74% ส่วนของเกตเวย์ฝั่งใต้ หรือ GW2 มีโหนดตัวรับรู้เท่ากับ 22 โหนด จากผลการ ทดสอบหาค่าสภาพพร้อมใช้งานมีค่าเท่ากับ 99.83%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาระบบในงานในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ดีขึ้น ได้แก่

1. การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ที่มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาเพิ่ม ขึ้นเพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลในการส่งข้อมูลแต่ละครั้ง จะทำให้ประสิทธิภาพของการส่ง ข้อมูลมีอัตราส่วนของข้อมูลผิดพลาดและสูญหายน้อยลง

2. การเพิ่มความสามารถของเกตเวย์ให้รองรับการใช้งานในด้านความปลอดภัยของข้อมูล ได้โดย  
การประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEEE1888.3 [16]
3. การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติโดยอาศัย ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์  
มาวิเคราะห์เพื่อควบคุมระบบปรับอากาศให้เหมาะสมกับสภาพอากาศและระดับพลังงานไฟฟ้า
4. การพัฒนาระบบการเชื่อมต่อของมาตรฐาน IEEE1888 ไปยังมาตรฐาน ETSI M2M [17]  
เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกันโดยอาศัยข้อได้เปรียบแต่ละมาตรฐานเพื่อให้สามารถออกแบบระบบ  
ได้กว้างมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Gomez, C. and Paradells, J. Wireless Home Automation Network: A survey of Architectures and Technology. IEEE Communication Magazine 48 (June 2010): 92-101.
- [2] Ninagawa, C., Yoshida, H., Kondo, S. and Otake, H. Data Transmission of IEEE1888 Communication for Wide-area Real-time Smart Grid Application. In Proceeding of Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 509-514. Ouarzazate, Morocco, 2013.
- [3] Takabe, Y., Matsumoto, K., Yamagiwa, M. and Uehara, M. Proposed Sensor Network for Living Environments using Cloud Computing. In Proceeding of International Conference on Network-Based Information Systems, pp. 838 - 843. 26-28 September 2012. Melbourne, VIC, 2012.
- [4] Ochiai, H. ,Ishiyama, M., Momose, T., Fujiwara, N., Ito, K., Inagaki, H., Nakagawa, A., and Esaki, H. FIAP: Facility Information Access Protocol for Data-Centric Building Automation Systems. In Proceeding of IEEE INFOCOM M2MCN workshop, 2011.
- [5] IEEE1888-2011: IEEE Standard for Ubiquitous Green Community Control Network, 2011.
- [6] Esaki, H. and Ochiai, H. GUTP and IEEE1888 for Smart Facility System using Internet Architecture Framework. In Proceeding of IEEE Workshop on Holistic Building Intelligence through Sensing Systems (HOBSENSE), 2011.
- [7] ZigBee Alliance ZigBee Specifications, version 1.0, April 2005.
- [8] ISO 16484-5, Building automation and control systems-part 5 Data communication protocol. ISO, 2003.
- [9] Kushalnagar, N., G. Motenegro, and C. Schumache, IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals RFC 4919 2007.
- [10] Arduino Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from: <http://www.arduino.cc>
- [11] MP Motion Sensor Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from: <http://th.mouser.com/new/panasonic/panasonicnapiion/>
- [12] TEPT5700 Ambient Light Sensor Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from: <http://www.vishay.com/docs/81321/tept5700.pdf>

- [13] LM35DZ Temperature Sensor Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from:  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [14] HIH-5030 Humidity Sensor Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from:  
<http://datasheet.octopart.com/HIH-5030-001-Honeywell-datasheet-9651169.pdf>
- [15] XBee Sensors Product Information. [cited 2014 07/02]; Available from:  
[http://www.digi.com/wiki/developer/index.php/XBee\\_Sensors](http://www.digi.com/wiki/developer/index.php/XBee_Sensors)
- [16] IEEE1888.3-2013: IEEE Standard for Ubiquitous Green Community Control Network: Security, 2013.
- [17] ETSI TS 102 690 v1.1.1: Machine-to-Machine Communications(M2M) Part Functional Architecture, 2011.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ธนกร อินทสุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2554 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในกลุ่มวิจัยโครงข่ายโทรคมนาคมและสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2557

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

[1] ธนกร อินทสุทธิ และ เซวาน์ดิศ อัสวกุล. การทดสอบระบบเฝ้าสังเกตสภาพอากาศตามมาตรฐาน IEEE1888 สำหรับระบบการจัดการพลังงานของอาคาร. ในการประชุมวิชาการ งานวิจัย และการพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI-CARD), นครราชสีมา : 2556. (บทความดีเด่นสำหรับบทความประเภทความยาว 4 - 6 หน้า)

[2] Tanakorn Inthasut and Chaodit Aswakul. ZigBee Wireless Sensor Network with IEEE1888 Gateway for Building Energy Management System. Proceedings of the 13th International Conference on Electronics Information and Communication, Kota Kinabalu, Malaysia : 2014.

