เครือข่ายตัวตรวจรู้แบบไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้นและความเข้มแสง

นายธนวิชญ์ มานิตย์โชติพิสิฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BLUETOOTH - WI-FI WIRELESS SENSOR NETWORK FOR MEASURING TEMPERATURE, HUMIDITY, AND LIGHT INTENSITY

Mr. Tanavit Manitchotpisit

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครือข่ายตัวตรวจรู้แบบไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้นและความเข้มแสง
โดย	นายธนวิชญ์ มานิตย์โชติพิสิฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธนวิชญ์ มานิตย์โชติพิสิฐ : เครือข่ายตัวตรวจรู้แบบไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้นและความเข้มแสง (BLUETOOTH - WI-FI WIRELESS SENSOR NETWORK FOR MEASURING TEMPERATURE, HUMIDITY, AND LIGHT INTENSITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วันเฉลิม โปรา, 45 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบเครือข่ายตัวตรวจรู้แบบไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสง และจัดเก็บข้อมูลดังกล่าวไปยังฐานข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยตัวตรวจรู้ขนาดเล็กที่ถูกออกแบบให้ใช้พลังงานน้อยและสามารถทำงานได้นานโดยใช้พลังงานจากถ่านเม็ดกระดุมจะส่งข้อมูลด้วยสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ ไปยังเกตเวย์ที่เชื่อมต่ออยู่กับสัญญาณไวไฟ และเกตเวย์ก็จะส่งข้อมูลโดยใช้มาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ไปเก็บยังฐานข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

5770190021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SENSOR NETWORK / BLUETOOTH LOW ENERGY / IEEE1888 STANDARD

TANAVIT MANITCHOTPISIT: BLUETOOTH - WI-FI WIRELESS SENSOR NETWORK FOR MEASURING TEMPERATURE, HUMIDITY, AND LIGHT INTENSITY. ADVISOR: ASST. PROF. WANCHALERM PORA, 45 pp.

This thesis presents development of Bluetooth - Wi-Fi wireless sensor network for measuring temperature, humidity, and light intensity and storing the recorded data to the IEEE1888 storage. The small sensor units, designed to consume low energy so the sensors may operate for a long time with a coin cell battery is used to send data to the gateway by using Bluetooth Low Energy (BLE). Then the gateway that also connected to Wi-Fi will sends the data using IEEE1888 standard protocol to the data storage.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา

ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรีย์ พุ่มรินทร์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี กรรมการวิทยานิพนธ์ที่ท่านได้กรุณาชี้แนะแนวทางและคำแนะนำ ตลอดจนข้อสังเกตต่าง ๆ ทำให้ผู้เขียนได้พัฒนาแนวความคิดและไตร่ตรองปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างรอบคอบมากยิ่งขึ้นจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในแลป ESID ทุกๆคน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพ่อบุญชู มานิตย์โชติพิสิฐ และคุณแม่กิรณา มานิตย์โชติพิสิฐ ที่ได้เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูป 1

บทที่ 1 บทนำ 3

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 3

1.2 ทบทวนวรรณกรรม 4

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 5

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 5

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth low energy: BLE) 6

2.2 ไวไฟ(WI-FI) 9

2.3 มาตรฐาน IEEE1888 11

บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาเครือข่ายตัวตรวจรู้ 14

3.1 โครงสร้างเครือข่ายตัวตรวจรู้ 14

3.2 ระบบฮาร์ดแวร์ของเครือข่ายตัวตรวจรู้ 15

3.3 ระบบซอฟต์แวร์ของเครือข่ายตัวตรวจรู้ 21

3.4 การประกอบและการใช้งานเครือข่ายตัวตรวจรู้ 27

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดสอบ 29

4.1 การทดสอบเครือข่ายสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ 29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2 ผลการทดลองเครือข่ายบลูทูธพลังงานต่ำ 30
4.3 การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 31
4.4 ผลการทดลองการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 31
4.5 การทดสอบการใช้พลังงาน 33
4.6 ผลการทดสอบการใช้พลังงาน 34
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้ 35
4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้ 36
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย 41
5.1 สรุป 41
5.2 ข้อเสนอแนะ 41
รายการอ้างอิง 42
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 1 การทำงานของ Generic Access Profile 7
รูปที่ 2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ขณะเชื่อมต่อในรูปแบบ Generic Attribute Profile 8
รูปที่ 3 การทำงานของ Generic Attribute Profile 8
รูปที่ 4 โครงสร้างของการสื่อสารในลักษณะ GATT 9
รูปที่ 5 โครงสร้างมาตรฐาน IEEE1888 12
รูปที่ 6 แผนภาพระบบของงานวิจัย 14
รูปที่ 7 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์ 15
รูปที่ 8 ไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 และ SmartRF06 Evaluation Board 16
รูปที่ 9 ไมโครคอนโทรเลอร์ NodeMCU ESP8266 17
รูปที่ 10 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า 18
รูปที่ 11 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของตัวตรวจรู้ 19
รูปที่ 12 วงจรโดยรวมของตัวตรวจรู้ 19
รูปที่ 13 แผ่นวงจรของตัวตรวจรู้ 20
รูปที่ 14 ตัวตรวจรู้ที่ทำการประกอบอุปกรณ์ต่างๆแล้ว 20
รูปที่ 15 การทำงานโดยรวมของทั้งระบบในงานวิจัย 21
รูปที่ 16 ผังงานของเกตเวย์ในส่วนของ CC2650 23
รูปที่ 17 แผนผังงานของเกตเวย์ในส่วนของ ESP8266 25
รูปที่ 18 แผนผังงานของตัวตรวจรู้ 26
รูปที่ 19 กล่องตัวตรวจรู้ 27
รูปที่ 20 หน้าเมนูของเกตเวย์ 28
รูปที่ 21 กราฟแสดงความแรงสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ 30
รูปที่ 22 เกตเวย์เชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้ 5 ตัว 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 23 ข้อมูลในฐานข้อมูล IEEE1888 31
รูปที่ 24 กราฟแสดงข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888 32
รูปที่ 25 กราฟแสดงข้อมูลความชื้นที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888 32
รูปที่ 26 กราฟแสดงข้อมูลความเข้มแสงที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888 33
รูปที่ 27 กราฟผลการวัดค่าการใช้พลังงานจาก Oscilloscope 34
รูปที่ 28 กราฟผลการวัดค่าความต่างศักย์เฉลี่ยจาก Oscilloscope 35
รูปที่ 29 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ 36
รูปที่ 30 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ 37
รูปที่ 31 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ 37
รูปที่ 32 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดความเข้มแสงของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ... 38
รูปที่ 33 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูล 39
รูปที่ 34 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลอุณหภูมิ 39
รูปที่ 35 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลความชื้น 39
รูปที่ 36 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลความเข้มแสง 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอนาคตอันใกล้ เทคโนโลยีการบริหารจัดการพลังงานภายในอาคารและบ้านอัตโนมัติ (Building /Home Energy Management System) จะเริ่มมีการนำมาใช้ในอาคารบ้านเรือนต่างๆ อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเทคโนโลยีนี้จะสามารถทำให้เกิดการใช้งานพลังงานภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถวางแผนควบคุมการใช้พลังงานได้ และช่วยลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานได้นั่นเอง ซึ่งของการทำงานเทคโนโลยีดังกล่าว จะเกิดจากการนำข้อมูลการใช้พลังงานและข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องทั้งข้อมูลในอดีตที่บันทึกรวบรวมไว้ ข้อมูลในปัจจุบันและอาจรวมถึงข้อมูลการทำนายสิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตไปทำการประมวลผลเพื่อปรับและบริหารการใช้พลังงานให้เหมาะสมนั่นเอง

เนื่องจากข้อมูลที่สามารถใช้ในการประมวลผลเพื่อบริหารจัดการพลังงานนั้น ไม่ได้จำกัดอยู่ที่ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่รวมถึงข้อมูลอื่นๆที่สามารถนำมาร่วมในการประมวลผลด้วย เช่น สภาพอากาศ เวลา ฤดู ข้อมูลต่างๆของผู้ใช้ระบบ เช่นตำแหน่งของผู้ใช้ ลักษณะนิสัยการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ตารางเวลาของผู้ใช้ หรือแม้กระทั่งข้อมูลสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสงก็สามารถนำมาใช้ประมวลผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการพลังงานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพื่อที่จะสามารถรับและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการบริหารพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจรู้ที่สามารถวัดข้อมูลต่างๆและส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังส่วนประมวลผล และเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบ มีมาตรฐาน เพื่อให้ข้อมูลที่รวมรวมไว้นั้นสามารถเรียกนำออกมาใช้ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

งานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอระบบตัวตรวจรู้เครือข่ายที่เชื่อมต่อกันผ่านสัญญาณไร้สายบลูทูธ และสามารถรวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งข้อมูลอุณหภูมิ แสงสว่าง ความชื้น และส่งข้อมูลไปยังส่วนเก็บข้อมูลกลางของระบบบริหารจัดการพลังงานภายในอาคารโดยการใช้มาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ผ่านสัญญาณไวไฟ ซึ่งจะทำให้ระบบบริหารจัดการพลังงานส่วนอื่นๆที่รองรับมาตรฐานเดียวกันนี้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่วัดและรวบรวมไว้ได้ผ่าน Internet

โครงสร้างของระบบตัวตรวจรู้เครือข่ายดังกล่าวจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือส่วนเกตเวย์ (Gateway) ที่จะเป็นแกนกลางในการติดต่อสื่อสารของตัวตรวจรู้ในเครือข่าย และเป็นส่วนที่

สามารถเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟและสื่อสารบนมาตรฐาน IEEE1888 ได้ ส่วนตัวตรวจรู้ ซึ่งจะเป็นเครือข่ายตัวตรวจรู้ที่สามารถวัดค่าความชื้น แสงและอุณหภูมิ เชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายสัญญาณบลูทูธไปยังส่วนเกตเวย์ และส่วนฐานข้อมูลซึ่งจะใช้ในการเก็บและเรียกดูข้อมูลที่ถูกส่งมาจากเกตเวย์ตามมาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888

ด้วยเครือข่ายตัวตรวจรู้เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมที่จะนำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะทำให้ระบบบริหารพลังงานภายในอาคารสามารถนำข้อมูลสภาพแวดล้อมต่างๆที่วัดและรวบรวมมาไปใช้ในการคำนวณ ควบคุมและบริหารพลังงานได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่อง “The Use of Bluetooth Low Energy Smart Sensor for Mobile Devices Yields an Efficient Level of Power Consumption” เป็นงานวิจัยที่ใช้สัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ (BLE) ซึ่งเป็นหนึ่งในรูปแบบของสัญญาณบลูทูธที่ถูกออกแบบมาให้ใช้พลังงานต่ำ ในการส่งข้อมูลสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และ ความชื้น ไปยังอุปกรณ์พกพาที่ทำงานด้วยระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ แต่ในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้ใช้รูปแบบการสื่อสารและเก็บข้อมูลที่เป็นมาตรฐาน ทำให้ระบบอื่นๆนำข้อมูลที่เก็บได้ไปใช้งานต่อได้ยาก [1]

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่อง “Zigbee Wireless Sensor Network with IEEE1888 Gateway for Building Energy Management System” ได้นำเสนอระบบเครือข่ายไร้สายที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความเข้มแสงและ Passive Infrared ที่ส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังเกตเวย์ผ่านสัญญาณ Zigbee และส่งข้อมูลนี้จากเกตเวย์ต่อไปยังฐานข้อมูล IEEE1888 อย่างไรก็ตามสัญญาณ Zigbee นั้นยังใช้พลังงานมากกว่าสัญญาณ BLE ในการทำงานอยู่เล็กน้อย และยังมีอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานของสัญญาณ Zigbee ไม่มาก [2]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่อง “Building Environment Analysis Based on Temperature and Humidity for Smart Energy Systems” ได้ใช้สัญญาณ Zigbee ในการส่งข้อมูลอุณหภูมิ และความชื้น ไปประมวลผลเพื่อเพิ่มความรู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัยในบริเวณห้องทดลอง โดยการใช้ข้อมูลอุณหภูมิ และความชื้นที่วัดได้ในแต่ละบริเวณของห้อง ประกอบกับข้อเสนอแนะจากผู้อยู่อาศัย มาประมวลผลด้วยวิธีแมชชีนเลินนิ่ง และอัลกอริทึมอื่นๆ เช่น K-means, Kohonen Self-Organizing Maps ในการปรับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในจุดต่างๆของห้องเพื่อให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบายที่สุดและในขณะเดียวกันก็เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอีกด้วย งานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงการใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และความชื้นที่วัดได้จากเครือข่ายตัวตรวจรู้

ไร้สายในการช่วยพัฒนาความสามารถของระบบบริหารจัดการพลังงานภายในอาคารให้มีศักยภาพและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้ [3]

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างตัวตรวจรู้เพื่อวัดข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงที่สามารถติดต่อสื่อสารกับเกตเวย์ด้วยสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำได้ มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานในการทำงานน้อย และสามารถทำงานได้นานด้วยพลังงานจากถ่านเม็ดกระดุม

2. สร้างเกตเวย์ที่สื่อสารกับเครือข่ายตัวตรวจรู้ผ่านสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ เพื่อเก็บข้อมูลและส่งข้อมูลด้วยมาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ผ่านสัญญาณไวไฟไปเก็บยังฐานข้อมูลกลาง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบระบบสมองกลฝังตัวเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตัวตรวจรู้เครือข่ายที่เชื่อมต่อกับเกตเวย์ด้วยสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ

2. ออกแบบระบบสมองกลฝังตัวเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เกตเวย์เพื่อเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายตัวตรวจรู้ด้วยสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำและเชื่อมต่อไปยังฐานข้อมูลกลางตามมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยสัญญาณไวไฟ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ผู้ใช้สามารถวัดและเก็บข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงได้

2. ผู้ใช้สามารถเรียกดูข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงปัจจุบันและย้อนหลังได้

3. ระบบอื่นๆที่ทำงานบนมาตาฐาน IEEE1888 สามารถนำข้อมูล อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงที่เก็บไว้ไปใช้ได้ทันที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการทำงานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัยด้วย เพื่อใช้เป็นฐานความรู้และมาตรฐานในการนำมาต่อยอดและพัฒนาต่อไป ซึ่งจะประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ สัญญาณไวไฟ และ มาตรฐาน IEEE1888

2.1 บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth low energy: BLE)

บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth low energy: BLE) เป็นคุณลักษณะที่ถูกเพิ่มเข้ามาในเทคโนโลยีบลูทูธ 4.0 โดยเมื่อนำมาเทียบกับบลูทูธแบบเดิมแล้ว บลูทูธพลังงานต่ำนั้นใช้พลังงานน้อยกว่าอย่างมาก โดยที่ระยะการเชื่อมต่อยังคงเท่าเดิม โดยบริษัท Nokia เป็นผู้ริเริ่มสร้างบลูทูธพลังงานต่ำและนำเสนอภายใต้ชื่อ Wibree ในปี 2006 ก่อนที่จะมีการรวมเข้ากับมาตรฐานบลูทูธอย่างเป็นทางการในปี 2010 [4]

บลูทูธพลังงานต่ำนั้นมีเป้าหมายในการใช้งานสำหรับอุปกรณ์ไร้สายรุ่นใหม่ที่ใช้พลังงานต่ำและ latency ต่ำ ภายในระยะทางใกล้ๆ (ไม่เกิน 50 - 160 เมตร) ข้อกำหนดนี้ได้อำนวยความสะดวกให้กับการใช้งานที่หลากหลายและอุปกรณ์ขนาดเล็ก ที่ใช้ในงานดูแลสุขภาพ, การออกกำลังกาย, การรักษาความปลอดภัย และอุตสาหกรรมบันเทิงภายในบ้าน ที่เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้พลังงานอย่างจำกัด อีกทั้งในปัจจุบันโทรศัพท์ส่วนใหญ่ในทุกๆระบบปฏิบัติการ ทั้ง iOS, Android, Windows Phone และ BlackBerry ก็ได้มีการรองรับเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำนี้แล้วด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทำงานของอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำ นั้นจะถูกแบ่งเป็นสองช่วงที่สำคัญคือ ช่วงที่ทำงานในลักษณะของ Generic Access Profile (GAP) และ Generic Attribute Profile (GATT)

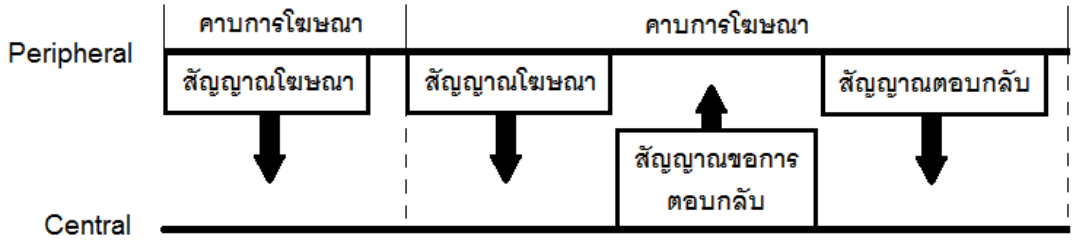
Generic Access Profile (GAP) นั้นเป็นลักษณะการทำงานที่ควบคุมการเชื่อมต่อและการโฆษณาของอุปกรณ์ เป็นขั้นตอนที่ทำให้อุปกรณ์นั้นสามารถมองเห็นได้จากอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อด้วย และควบคุมขั้นตอนและวิธีการในการเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์ โดยจะสามารถแบ่งบทบาทหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ได้เป็นสองบทบาทคือ Central และ Peripheral

Peripheral เป็นอุปกรณ์ที่จะคอยส่งสัญญาณโฆษณา เพื่อให้อุปกรณ์อื่นสามารถมองเห็นและเริ่มขบวนการเชื่อมต่อได้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็ก พลังงานต่ำ ที่มีพลังในการประมวลผลไม่มาก หรืออุปกรณ์ที่เป็นตัวตรวจรู้วัดค่าต่างๆดังที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

Central เป็นอุปกรณ์ที่จะตรวจหาอุปกรณ์ Peripheral และเริ่มขบวนการเชื่อมต่อ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นอุปกรณ์ที่มีพลังในการประมวลผลมากกว่าเช่น โทรศัพท์มือถือ หรืออุปกรณ์เกตเวย์ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นต้น

การส่งสัญญาณโฆษณาจะเกิดขึ้นในฝั่งของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ Peripheral โดยอุปกรณ์ Peripheral จะส่งสัญญาณโฆษณาออกมาเป็นรอบๆทุกๆช่วงเวลาหนึ่งตามการตั้งค่า โดยยิ่งตั้งช่วงเวลาหนึ่งรอบให้นานก็จะยิ่งทำให้อุปกรณ์มีความประหยัดพลังงานมากขึ้น แต่ก็จะส่งผลให้อุปกรณ์มีการตอบสนองที่ช้าลงไปด้วย

หากมีอุปกรณ์ Central ที่ตรวจพบสัญญาณโฆษณาดังกล่าวและต้องการที่จะทำการเชื่อมต่อด้วย อุปกรณ์ Central ก็จะส่งสัญญาณขอการเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ Peripheral นั้น ซึ่งอุปกรณ์ peripheral ก็จะทำการส่งสัญญาณตอบกลับดังรูปที่ 1

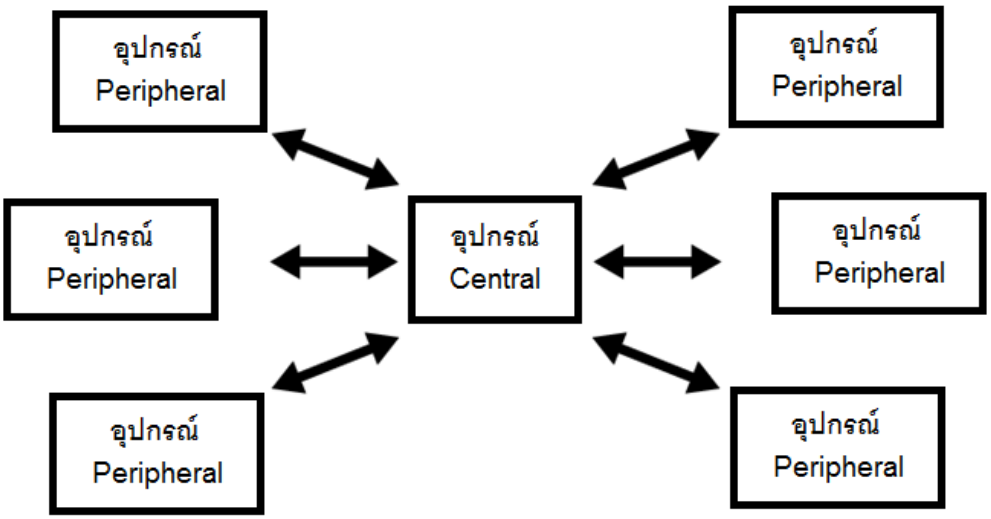


รูปที่ 1 การทำงานของ Generic Access Profile

หลังจากนั้นทั้งอุปกรณ์ Central และ Peripheral ก็จะทำการเชื่อมต่อและเข้าสู่การทำงานในรูปแบบ GATT ต่อไป

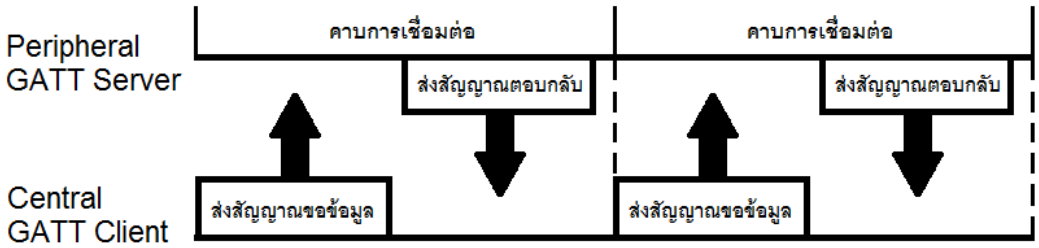
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Generic Attribute Profile (GATT) เป็นลักษณะการทำงานของอุปกรณ์บลูทูธที่เชื่อมต่อกันสองอุปกรณ์ ที่จะสามารถส่งข้อมูลไปมาระหว่างกันได้ โดยที่อุปกรณ์ peripheral จะสามารถเชื่อมต่อกับ Central ได้เพียงทีละ 1 อุปกรณ์เท่านั้น โดยในทันทีที่อุปกรณ์ Peripheral ทำการเชื่อมต่อกับ Central ก็จะหยุดกระจายสัญญาณโฆษณา และทำให้อุปกรณ์อื่นๆไม่สามารถมองเห็นได้อีก แต่ในขณะที่อุปกรณ์ Peripheral จะสามารถเชื่อมต่อกับ Central ได้เพียงทีละ 1 อุปกรณ์ เท่านั้น แต่อุปกรณ์ Central จะสามารถเชื่อมต่อกับ Peripheral ได้ทีละมากกว่า 1 อุปกรณ์ ดังรูปที่ 2



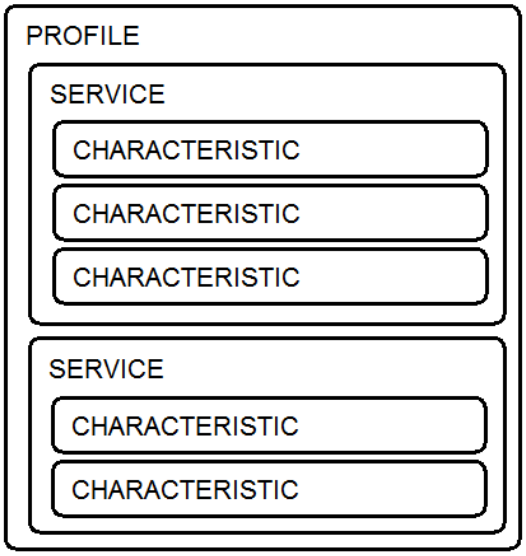
รูปที่ 2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ขณะเชื่อมต่อในรูปแบบ Generic Attribute Profile

ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ Peripheral และ Central นั้น อุปกรณ์ Peripheral และ Central จะตกลงช่วงเวลาในการเชื่อมต่อกันเป็นรอบๆ และการติดต่อสื่อสารระหว่าง Central และ Peripheral ทุกครั้งนั้นจะเริ่มโดย Central ก่อนเสมอ โดยอุปกรณ์ Central ก็จะพยายามติดต่อกับ Peripheral ทุกๆช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อรับข้อมูลใหม่ๆ และอุปกรณ์ Peripheral ก็จะตอบรับ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของ Generic Attribute Profile

การติดต่อสื่อสารในลักษณะ GATT นี้ จะยึดหลักพื้นฐานสำคัญสามอย่างคือ Profile service และ Characteristics โดย Profile จะเป็นการนิยามชุดของ Service และ Characteristics ทั้งหมด Service จะเป็นชุดของ Characteristics ที่ใช้ในการทำงานอย่างไดอย่างหนึ่ง และสุดท้าย Characteristics เป็นการสื่อสารระดับล่างสุดที่จะเป็นส่วนเก็บข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้นั่นเอง



รูปที่ 4 โครงสร้างของการสื่อสารในลักษณะ GATT

และในงานวิจัยนี้ก็จะนำเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำนี้มาใช้ในการสร้างเครือข่ายตัวตรวจรู้ไร้สาย เนื่องจากประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สามารถส่งได้ไกล และใช้พลังงานน้อย

2.2 ไวไฟ(WI-FI)

Wi-Fi ย่อมาจาก wireless fidelity หมายถึงชุดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สามารถใช้ได้กับมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย (WLAN) ซึ่งอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.11 [5]

เดิมทีสัญญาณไวไฟออกแบบมาใช้สำหรับอุปกรณ์พกพาต่างๆ และใช้เครือข่าย LAN เท่านั้น แต่ปัจจุบันนิยมใช้สัญญาณไวไฟเพื่อต่อกับอินเทอร์เน็ต โดยอุปกรณ์พกพาต่างๆ สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าสถานีแม่ข่าย (Access Point) และบริเวณที่ระยะทำการของสถานีแม่ข่าย ครอบคลุมเรียกว่า Hotspot

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แต่เดิมคำว่า Wi-Fi เป็นชื่อที่ตั้งแทนตัวเลข IEEE 802.11 ซึ่งง่ายกว่าในการจดจำ โดยนำมาจากเครื่องขยายเสียง Hi-Fi อย่างไรก็ตามในปัจจุบันใช้เป็นคำย่อของ Wireless-Fidelity โดยมีแสดงในเว็บไซต์ของ Wi-Fi Alliance โดยใช้ชื่อ Wi-Fi เป็นเครื่องหมายการค้า

Wi-Fi หรือ เทคโนโลยีเครือข่ายไร้มาตรฐาน IEEE 802.11 ถือกำเนิดขึ้นในปี พ.ศ. 2528 จัดตั้งโดยองค์การ IEEE (สถาบันวิศวกรรมทางด้านไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์) มีความเร็ว 1 Mbps ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of Service) และมาตรฐานความปลอดภัยต่ำ จากนั้นทาง IEEE จึงจัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาปรับปรุงหลายกลุ่มด้วยกัน จนได้มาเป็นมาตรฐาน IEEE 802.11b และ 802.11g ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

มาตรฐาน IEEE 802.11b เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี พ.ศ. 2542 ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผนวกกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz (เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น IEEE 802.11, Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย, และเตาไมโครเวฟ) มีระยะการส่งสัญญาณได้ไกลมาก ถึง 100 เมตร ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายภายใต้มาตรฐานนี้ถูกผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก และที่สำคัญแต่ละผลิตภัณฑ์มีความสามารถทำงานร่วมกันได้ อุปกรณ์ของผู้ผลิตทุกยี่ห้อต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต ปัจจุบันนี้นิยมนำอุปกรณ์ WLAN ที่มาตรฐาน 802.11b ไปใช้ในองค์กรธุรกิจ สถาบันการศึกษา สถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่เข้าสู่สถานที่พักอาศัยมากขึ้น มาตรฐานนี้มีระบบเข้ารหัสข้อมูลแบบ WEP ที่ 128 บิต

มาตรฐาน IEEE 802.11g เสร็จสมบูรณ์ในปี พ.ศ. 2546 ทางคณะทำงาน IEEE 802.11g ได้นำเอาเทคโนโลยี OFDM ของ 802.11a มาพัฒนาบนความถี่ 2.4 Ghz จึงทำให้ใช้ความเร็ว 36-54 Mbps ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b ซึ่ง 802.11g สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงเหลือ 2 Mbps ได้ตามสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ใช้งาน มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและกำลังจะเข้ามาแทนที่ 802.11b ในอนาคตอันใกล้

สัญญาณไวไฟได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายแลน ไว้ 2 ลักษณะ คือโหมด Infrastructure และโหมด Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer

ในโหมด Infrastructure โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ในเครือข่ายสัญญาณไวไฟ จะเชื่อมต่อกันในลักษณะของโหมด Infrastructure ซึ่งเป็นโหมดที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายใน LAN สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นได้ ในโหมด Infrastructure นี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีผู้ใช้ (Client Station) ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (Desktop, Laptop, หรือ PDA ต่างๆ) ที่มีอุปกรณ์ Client Adapter เพื่อใช้รับส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไวไฟ และสถานีแม่ข่าย (Access Point) ซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมสถานีผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายอื่น (ซึ่งโดยปกติจะเป็นเครือข่าย IEEE 802.3 Ethernet LAN) การทำงานในโหมด Infrastructure มีพื้นฐานมาจากระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ กล่าวคือสถานีผู้ใช้จะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ให้บริการ แก่สถานีผู้ใช้นั้นอยู่เท่านั้น ส่วนสถานีแม่ข่ายจะทำหน้าที่ส่งต่อ ข้อมูลที่ได้รับจากสถานีผู้ใช้ไปยังจุดหมายปลายทางหรือส่งต่อข้อมูลที่ได้ รับจากเครือข่ายอื่นมายังสถานีผู้ใช้

ในโหมด Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer เครือข่ายสัญญาณไวไฟในโหมด Ad-Hoc หรือ Peer-to-Peer เป็นเครือข่ายระบบปิดคือไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่น บริเวณของเครือข่ายสัญญาณไวไฟในโหมด Ad-Hoc จะถูกเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่นๆในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่าย แต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับเครือข่ายอื่นๆได้

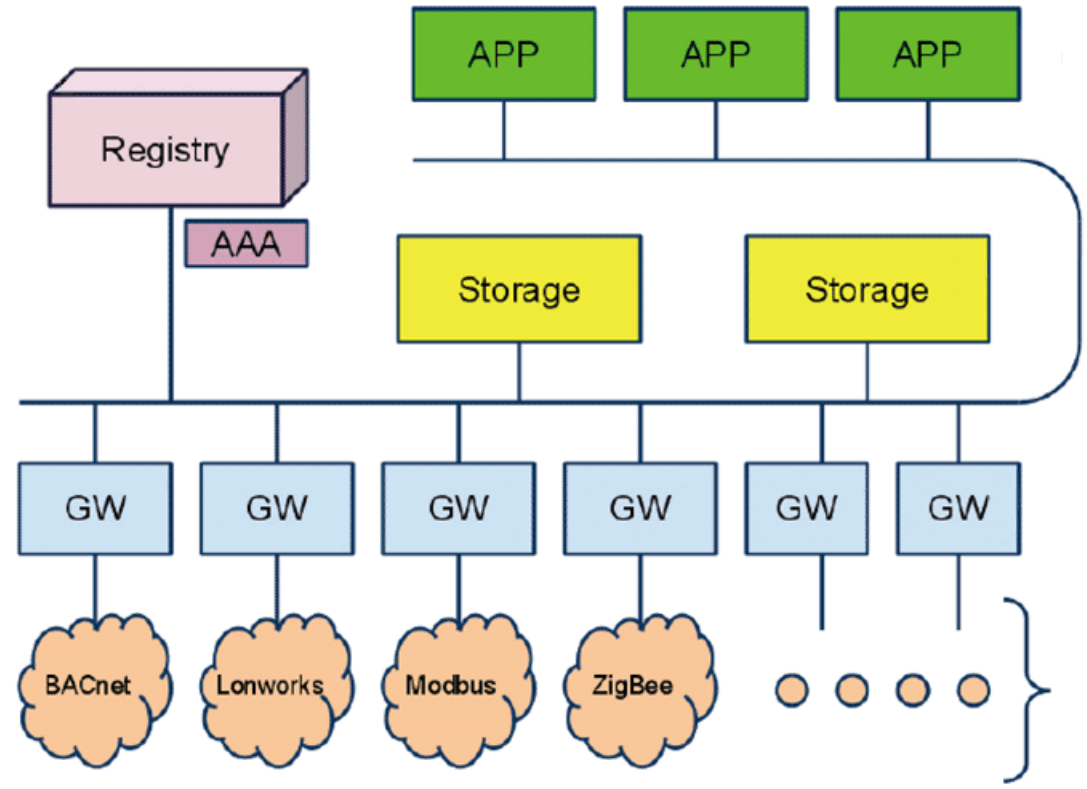
ปัจจุบันสัญญาณไวไฟถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์พกพา โทรศัพท์เคลื่อนที่ เครื่องเล่นวิดีโอเกม และอุปกรณ์อื่นๆก็สามารถเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟได้แล้ว และในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาระบบไวไฟ เข้ากับอุปกรณ์สมองกลฝังตัวมากขึ้นซึ่งทำให้อุปกรณ์ต่างๆสามารถเข้าถึงผ่าน Internet ได้ และในงานวิจัยนี้ก็ได้นำการเชื่อมต่อกับสัญญาณไวไฟมาใช้ เพื่อใช้เป็นเส้นทางการส่งข้อมูลจากเครือข่ายตัวตรวจรู้ไปยังฐานข้อมูลกลาง และเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่วัดได้นี้ผ่าน Internet ได้นั่นเอง

2.3 มาตรฐาน IEEE1888

มาตรฐาน IEEE1888 เป็นมาตรฐานของโพรโทคอลการสื่อสารและส่งข้อมูลบนระบบเครือข่าย เพื่อให้อุปกรณ์ต่างชนิดต่างยี่ห้อต่างระบบสามารถทำงานร่วมกันได้ และสามารถส่งข้อมูลสื่อสารกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6]

โดยมาตรฐาน IEEE1888 นี้จะทำงานในชั้นของโปรแกรมประยุกต์ (Application Layer) บนเครือข่าย TCP/IP โดยมีองค์ประกอบหลักอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน ได้แก่ เกตเวย์ (Gateway), ฐานเก็บข้อมูล (Storage), แอปพลิเคชั่น (Application) และรีจิสทรี (Registry) โดยส่วนต่างๆจะทำงานร่วมกันดังรูปที่ 5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 5 โครงสร้างมาตรฐาน IEEE1888

2.3.1. เกตเวย์ (Gateway)

เกตเวย์ (Gateway) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้โพรโทคอลหรือการสื่อสารรูปแบบอื่น เข้ากับระบบที่ใช้มาตรฐาน IEEE1888 โดยการแปลงรูปแบบของข้อมูลนั้นๆเป็นรูปแบบของมาตรฐาน IEEE1888 ก่อนส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ และทำงานในทางกลับกันคือแปลงข้อมูลในรูปแบบของมาตรฐาน IEEE1888 เป็นรูปแบบต่างๆด้วย เช่น เกตเวย์เชื่อมต่อระบบ IEEE1888 เข้ากับระบบที่สื่อสารแบบ MODBUS, Zigbee รวมถึงเกตเวย์เชื่อมต่อระบบ IEEE1888 เข้ากับระบบเครือข่ายบลูทูธ ที่จะนำเสนอเป็นส่วนหนึ่งในหัวข้อวิจัยนี้ด้วย

2.3.2. ฐานเก็บข้อมูล (Storage)

ฐานเก็บข้อมูล (Storage) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและบันทึกประวัติข้อมูลต่างๆ โดยมีโครงสร้างข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยข้อมูลดังกล่าวนี้จะมีทั้งข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆที่ได้มาจากการสื่อสารผ่านเกตเวย์ รวมถึงข้อมูลการใช้งานและการสั่งงานของผู้ใช้ผ่านส่วนแอพพลิเคชั่นด้วย เช่นข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ข้อมูลอุณหภูมิภายในห้อง ข้อมูลการเคลื่อนไหว ข้อมูลการสั่งงานเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆจากผู้ใช้เป็นต้น

2.3.3. แอพพลิเคชั่น (Application)

แอพพลิเคชั่น (Application) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้งาน โดยการแสดงข้อมูลต่างๆแก่ผู้ใช้หรือรับคำสั่งจากผู้ใช้ผ่านยูสเซอร์อินเตอร์เฟส (User Interface) โดยสามารถเรียกแสดงข้อมูลจากอุปกรณ์โดยตรงหรือเรียกแสดงข้อมูลย้อนหลังที่เก็บไว้ในฐานเก็บข้อมูลได้ และแอพพลิเคชั่นยังสามารถทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลข้อมูลเพื่อแสดงออกมาในรูปแบบต่างๆแก่ผู้ใช้ เช่น กราฟแสดงประวัติการใช้งาน แผนผังแสดงตำแหน่งอุปกรณ์ ตารางการจัดการต่างๆ รวมถึงการประมวลผลหรือวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเป้าหมายอื่นๆด้วย

2.3.4. รีจิสทรี (Registry)

รีจิสทรี (Registry) ทำหน้าที่นายทะเบียน เพื่อเชื่อมต่อการทำงานของทุกส่วนในระบบเข้าด้วยกัน โดยรีจิสทรีจะคอยตรวจดูว่ามีอุปกรณ์ชนิดใดอยู่ในระบบบ้าง และตอบสนองต่อร้องขอข้อมูลจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เกตเวย์ ฐานเก็บข้อมูล หรือ แอพพลิเคชั่น เมื่อร้องขอข้อมูลของอุปกรณ์ตามคุณสมบัติ เช่น ชนิด หรือ ที่ตั้ง ของอุปกรณ์ เป็นต้น

อุปกรณ์แต่ละตัวในระบบ IEEE1888 จะถูกเรียกว่า Point และ Point แต่ละตัวจะมี URI ที่แตกต่างกัน ในแต่ละ Point สามารถเก็บข้อมูลได้หลายประเภท ตัวอย่างเช่น Point ชนิดที่เป็นเตารีดอาจมีข้อมูลสถานะการเปิด/ปิด และข้อมูลอุณหภูมิ เป็นต้น ข้อมูลของ Point เหล่านี้จะมี URI เช่นกัน และถูกเรียกว่า PointSet ของระบบอย่างมีลำดับ ข้อมูลที่เก็บนั้นจะมีโครงสร้างของข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 ข้อมูลที่เก็บอาจได้มาจาก เกตเวย์ หรือ แอพพลิเคชั่น ตัวอย่างเช่น ข้อมูลอุณหภูมิของห้องประชุม, ข้อมูลของการเคลื่อนไหว (motion detection), ข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ ข้อมูลการสั่งปิด/เปิด หรือหรี่หลอดไฟฟ้า เป็นต้น

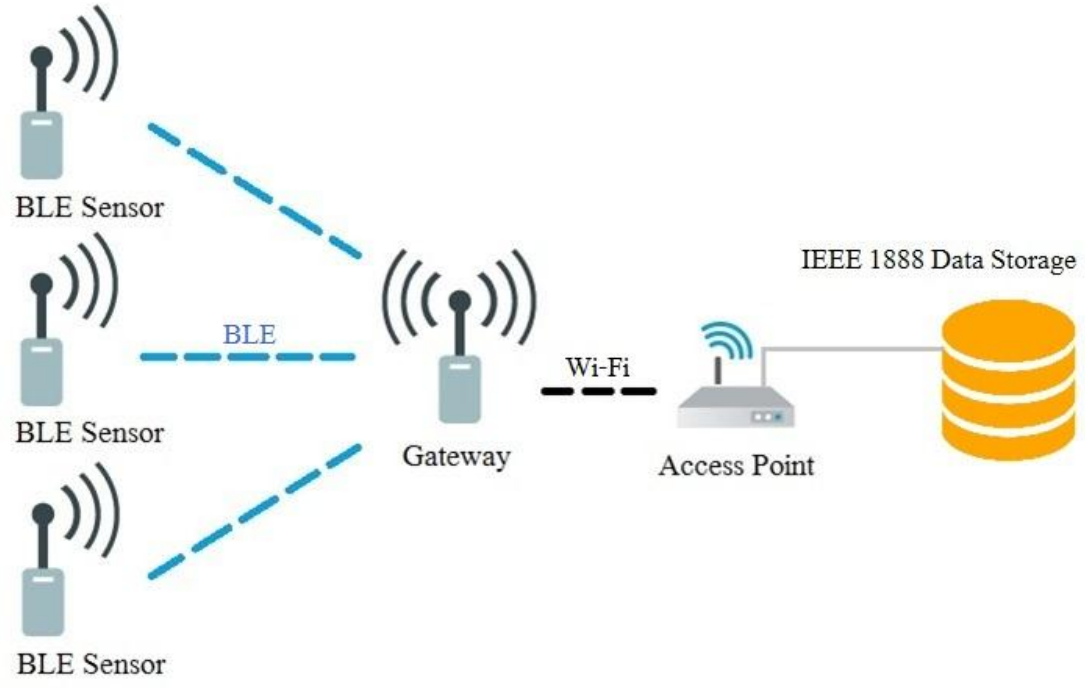
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในงานวิจัยนี้ก็จะนำเอา มาตรฐาน IEEE1888 มาใช้ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่รวบรวมมาส่งเข้าไปยังฐานข้อมูลหรืออุปกรณ์อื่นๆบนมาตรฐาน IEEE1888 ได้ในทันทีเช่นระบบ Building /Home Energy Management System (BEMS/HEMS)

บทที่ 3
การออกแบบและพัฒนาเครือข่ายตัวตรวจรู้

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการระบบที่ใช้เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสง และส่งข้อมูลไปเก็บยังฐานข้อมูล IEEE1888 ได้ และตัวตรวจรู้จะต้องสามารถทำงานโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้เป็นเวลานาน ในงานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบตัวตรวจรู้ที่ส่งข้อมูลผ่านสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำที่ใช้พลังงานน้อย และออกแบบเกตเวย์เพื่อเชื่อมต่อและส่งข้อมูลจากเครือข่ายบลูทูธพลังงานต่ำไปยังฐานข้อมูล IEEE1888

3.1 โครงสร้างเครือข่ายตัวตรวจรู้



รูปที่ 6 แผนภาพระบบของงานวิจัย

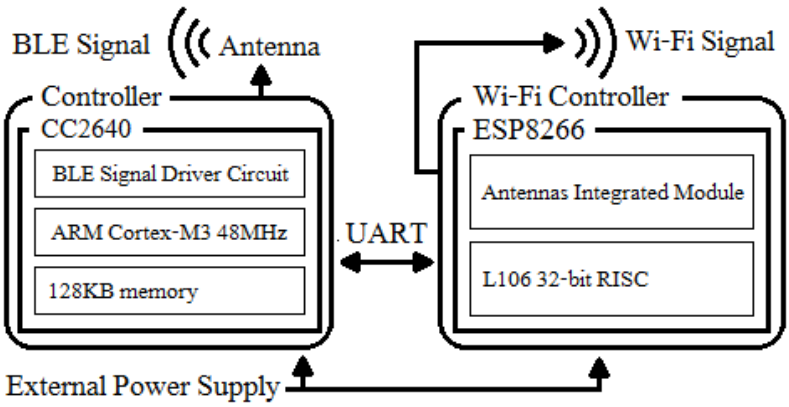
ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้จะสามารถแบ่งระบบทั้งหมดออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนตัวตรวจรู้ ส่วนเกตเวย์ และส่วนฐานเก็บข้อมูล โดยในส่วนตัวตรวจรู้จะมีหน้าที่วัดข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสง และส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังเกตเวย์ผ่านการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ โดยส่วนเกตเวย์จะสามารถเชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้ได้หลายตัวพร้อมกัน มีหน้าที่เรียบเรียงข้อมูลจากตัวตรวจรู้ทั้งหมดที่เชื่อมต่ออยู่ และส่งข้อมูลที่รวบรวมได้นี้ไปยังฐานเก็บข้อมูลกลางผ่านสัญญาณไวไฟโดยใช้มาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ส่วนฐานเก็บข้อมูลนั้นจะใช้ฐานเก็บข้อมูลกลางของระบบมาตรฐาน IEEE1888 ซึ่งจะเป็นฐานเก็บข้อมูลที่สามารถใช้ร่วมกับระบบอื่นในระบบบริหาร

จัดการพลังงานได้ และเนื่องจากการใช้ฐานข้อมูลร่วมกันนี้จะทำให้ระบบอื่นๆสามารถดึงข้อมูลออกไปใช้ได้ทันที และสะดวกต่อการออกแบบระบบบริหารจัดการพลังงานอื่นด้วย

3.2 ระบบฮาร์ดแวร์ของเครือข่ายตัวตรวจรู้

3.2.1 ระบบฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์

ระบบฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์นั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ และส่วนควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟ โดยทั้งสองส่วนจะสื่อสารส่งข้อมูลระหว่างกันโดยใช้วิธีการสื่อสารแบบ UART



รูปที่ 7 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของเกตเวย์

ส่วนควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ ได้ใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรเลอร์สำหรับเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำโดยเฉพาะ ผลิตโดยบริษัท Texas Instrument มีคุณสมบัติดังนี้ [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ตัวประมวลผล ARM Cortex-M3
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกาสูงสุด 48-MHz
- หน่วยความจำภายในขนาด 128KB
- มี antennas บนแผ่นวงจร
- สามารถใช้งาน TI-RTOS ได้
- มีความสามารถในการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ

การใช้งานไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 ของเกตเวย์ในงานวิจัยจะใช้งานร่วมกับ SmartRF06 Evaluation Board ซึ่งเป็นแผ่นวงจรสำหรับทดลองใช้งานไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 ซึ่งมาคุณสมบัติดังนี้ [8]

- มีวงจรแปลงแรงดันไฟทำให้สามารถรับไฟ 5V จากสาย USB ได้โดยตรง
- มี XDS100v3 USB debugger ในตัว
- มีหน้าจอ LCD สำหรับแสดงผล
- มีปุ่มรับคำสั่งบนบอร์ด

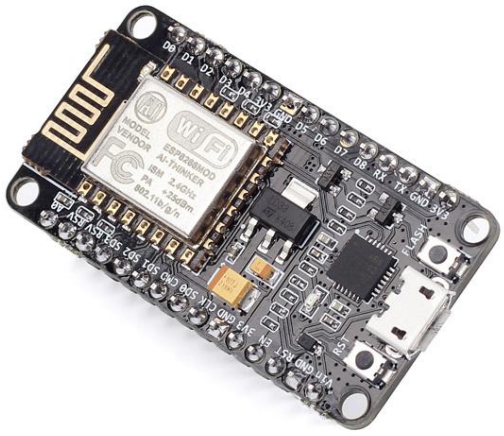
รูปที่ 8 ไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 และ SmartRF06 Evaluation Board

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ SmartRF06 Evaluation Board สะดวกต่อการใช้งานทดลองในงานวิจัยนี้และทำให้ยังไม่จำเป็นต้องออกแบบแผ่นวงจรเพื่อใช้เป็นเกตเวย์โดยเฉพาะ แต่เนื่องจากเป็นบอร์ดสำหรับทดลองใช้งานไมโครคอนโทรเลอร์ จึงทำให้ยังมีขนาดใหญ่กว่าที่จำเป็น และจะสามารถออกแบบแผ่นวงจรเพื่อใช้เป็นเกตเวย์โดยเฉพาะเพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงในภายหน้าได้

ส่วนควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟ ใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ NodeMCU ESP8266 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรเลอร์สำหรับเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟ โดยเฉพาะ มีคุณสมบัติดังนี้ [9]

- หน่วยประมวลผล: L106 32-bit RISC microprocessor core ความเร็ว 80 MHz

- มี instruction RAM ขนาด 64 kB และ data RAM ขนาด 96 kB
- มีหน่วยความจำแบบ flash ขนาด 4 MB
- IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi WEP, WPA/WPA2 authentication
- มี GPIO 16 pins
- สามารถใช้งานการสื่อสารแบบ SPI ได้
- สามารถใช้งานการสื่อสารแบบ UART ได้
- มี ADC ความละเอียด 10-bit
- มี USB to serial interface
- มีวงจรแปลงแรงดันไฟทำให้สามารถรับไฟ 5V จากสาย USB ได้โดยตรง



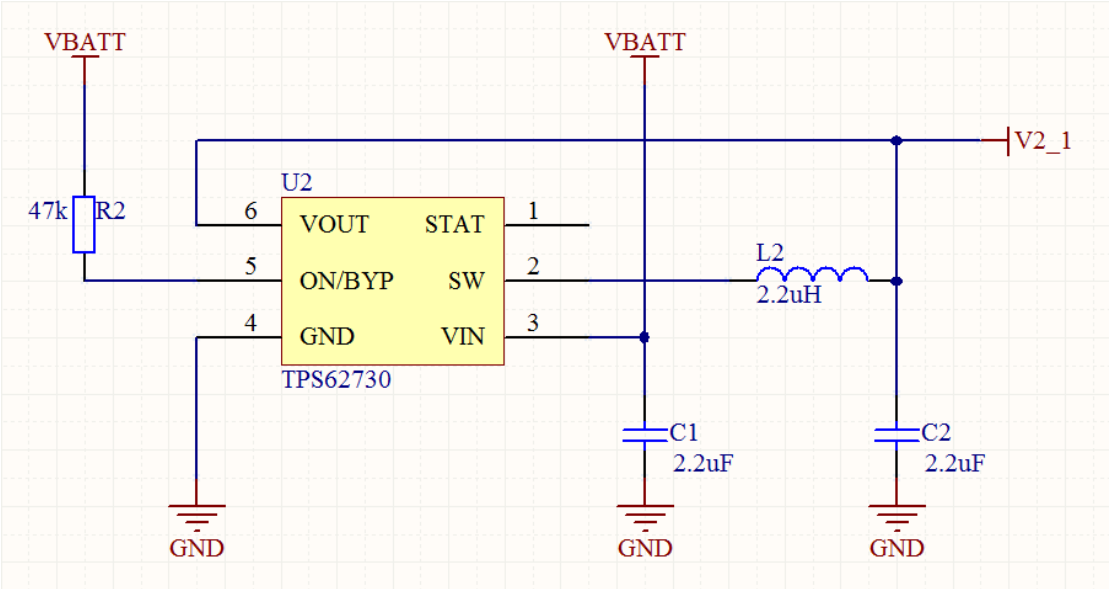
รูปที่ 9 ไมโครคอนโทรเลอร์ NodeMCU ESP8266

ทั้งสองส่วนสามารถใช้พลังงานจากไฟแรงดัน 5V โดยการต่อสาย USB ได้ และสื่อสารส่งข้อมูลระหว่างกันโดยใช้วิธีการสื่อสารแบบ UART

3.2.2 ระบบฮาร์ดแวร์ของตัวตรวจรู้

ระบบฮาร์ดแวร์ของตัวตรวจรู้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้า ส่วนคอนโทรเลอร์ และส่วนวัดข้อมูล

ส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้า จะมีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากถ่านกระดุมที่มีแรงดัน 3V เป็นแรงดันขนาด 2.1V เพื่อใช้ในส่วนอื่นโดยใช้ IC TPS62730 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำงาน 95% [10] และให้กระแสสูงสุด 100mA มีวงจรดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า

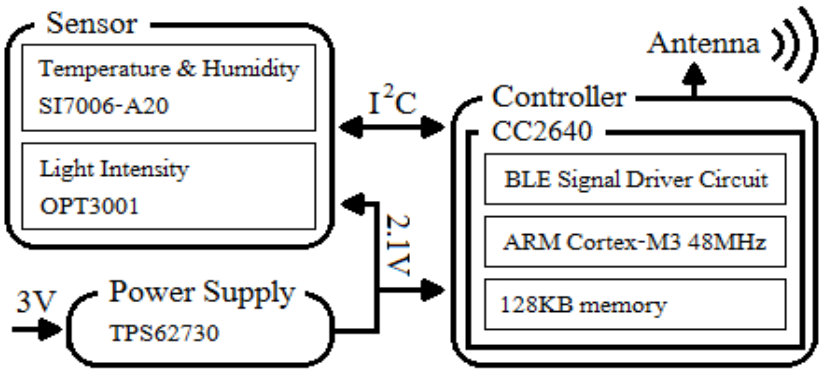
ส่วนควบคุมใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ CC2640 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรเลอร์ที่ออกแบบเพื่อใช้งานบลูทูธพลังงานต่ำเช่นเดียวกับที่ใช้ในเกตเวย์ ใช้พลังงานขณะทำงาน 5.9mA และขณะหลับ 1μA และส่วนวัดข้อมูลประกอบไปด้วย IC SI7006-A20 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ [11]

- สามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นได้ในตัวเดียว
- มีความละเอียดในการวัด 16bits
- ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิ ±1°C และ ±5% สำหรับค่าความชื้น
- สื่อสารผ่านการสื่อสารแบบ I2C
- ใช้พลังงานในการทำงาน 150μA

ใช้ IC OPT3001 เพื่อวัดความเข้มแสง ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ [12]

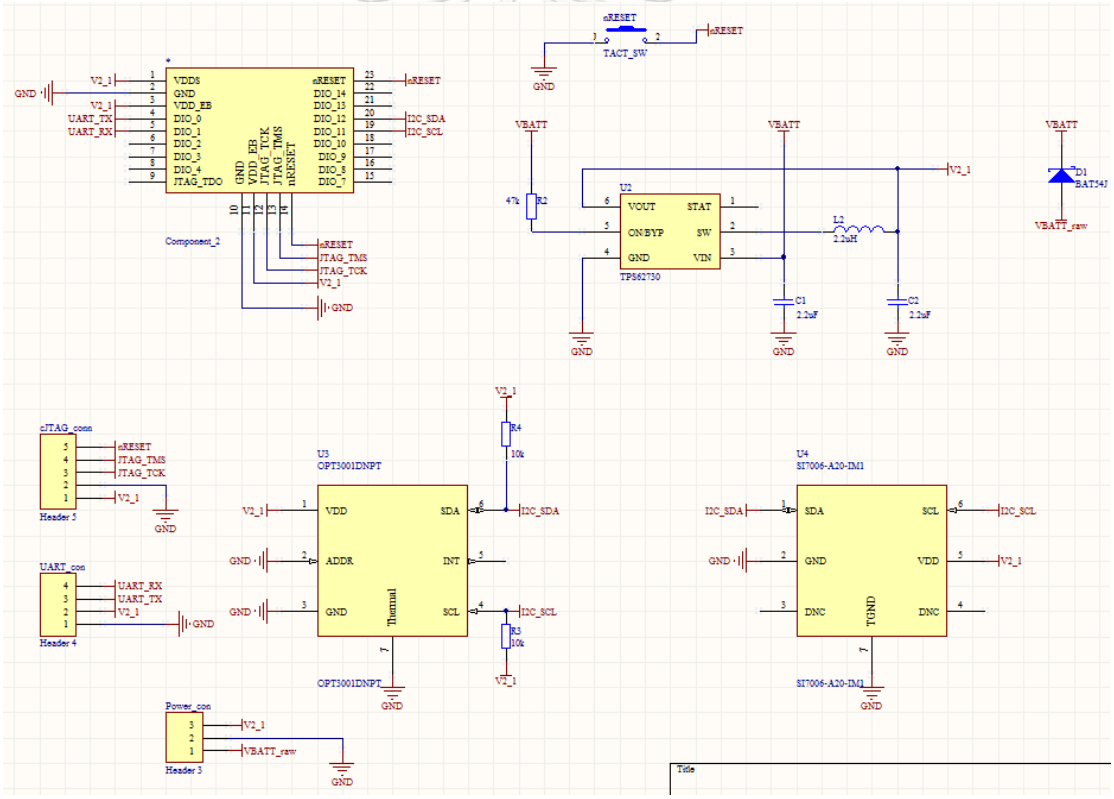
- สื่อสารโดยใช้ I2C
- ความละเอียดในการวัด 16bits
- ใช้พลังงาน 1.8 μA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

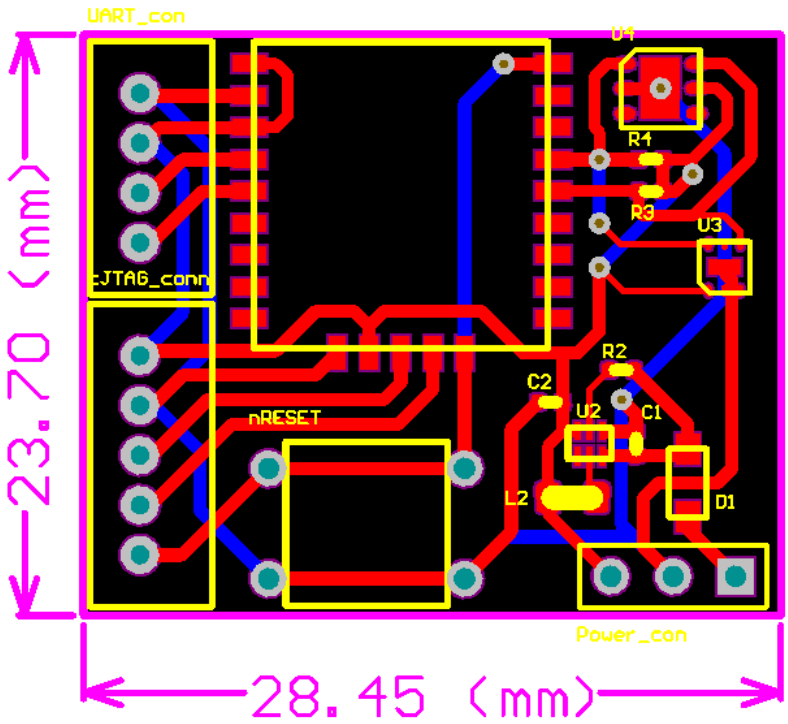


รูปที่ 11 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของตัวตรวจรู้

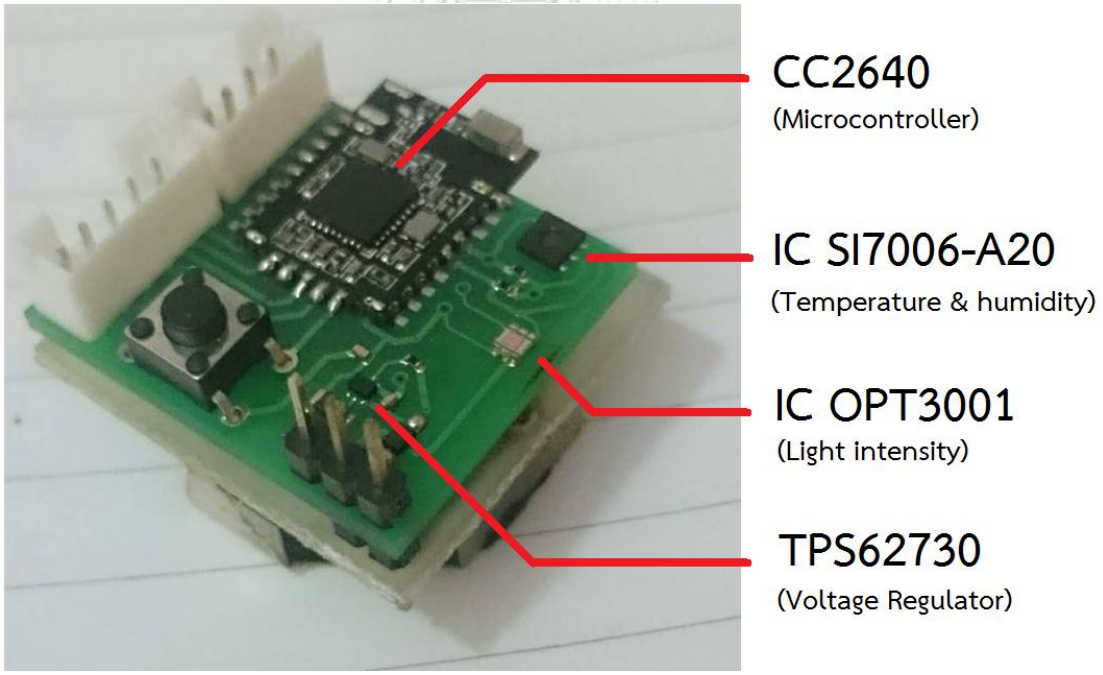
แผ่นวงจรของตัวตรวจรู้ได้ถูกออกแบบเพื่อให้มีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายตัวตรวจรู้ได้ง่าย



รูปที่ 12 วงจรโดยรวมของตัวตรวจรู้



รูปที่ 13 แผ่นวงจรของตัวตรวจรู้



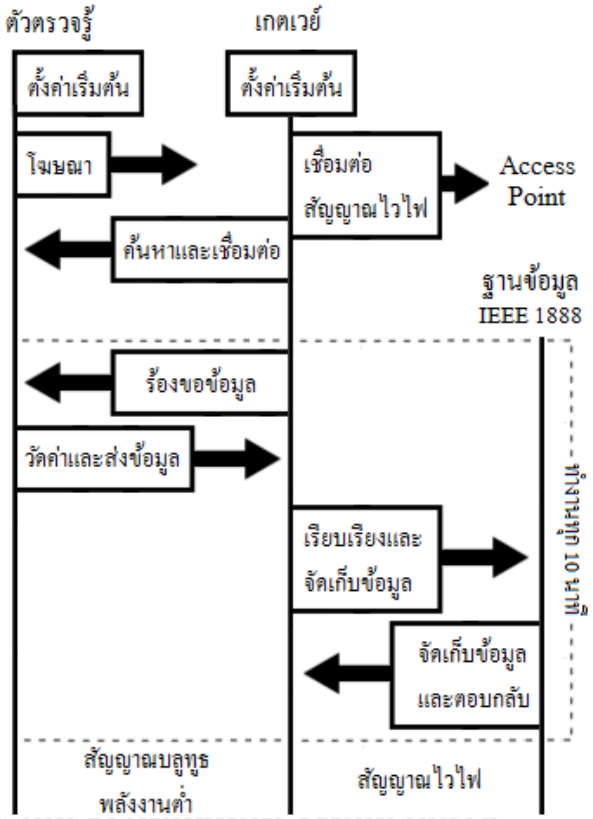
รูปที่ 14 ตัวตรวจรู้ที่ทำการประกอบอุปกรณ์ต่างๆแล้ว

เมื่อรวมทุกส่วนแล้วจะทำให้ตัวตรวจรู้นี้ใช้กระแสน้อยกว่า 100μA ในการทำงาน และสามารถทำงานด้วยพลังงานจากถ่านกระดุมขนาด 2477 ได้นานกว่า 12 เดือน เมื่อทำการวัดค่าทุก 10 นาที และถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กซึ่งแผ่นวงจรนั้นมีขนาดเพียง 23.7x28.45mm เท่านั้น และ

ขนาดเมื่อประกอบอุปกรณ์ก็มีขนาดเพียง 32x32x25mm ทำให้สะดวกในการติดตั้งเคลื่อนย้าย และไม่ต้องการการบำรุงรักษาระบบมาก

3.3 ระบบซอฟต์แวร์ของเครือข่ายตัวตรวจรู้

ระบบซอฟต์แวร์ของงานวิจัยนี้ใช้ภาษา C ในการพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบสมองกลฝังตัวทั้งบนเกตเวย์และบนตัวตรวจรู้การทำงานโดยรวมของทั้งระบบสามารถแสดงได้ดังรูป



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 15 การทำงานโดยรวมของทั้งระบบในงานวิจัย

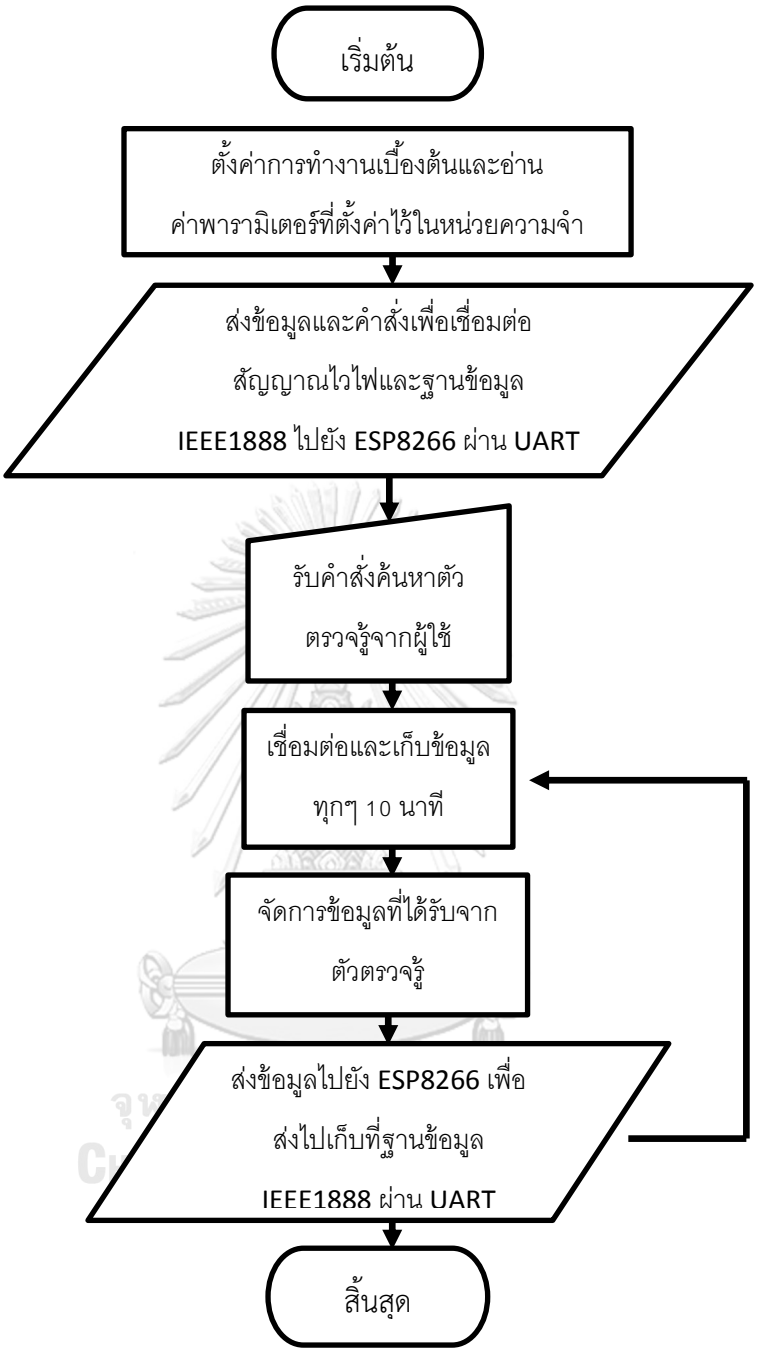
การทำงานของระบบจะเริ่มจากการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟของเกตเวย์และเข้าสู่การเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ โดยตัวตรวจรู้จะส่งสัญญาณโฆษณา และเกตเวย์จะเริ่มค้นหาสัญญาณดังกล่าวจากการสั่งงานของผู้ใช้และทำการเชื่อมต่อ จากนั้นทุกๆ 10 นาทีเกตเวย์จะส่งข้อมูลเพื่อขอข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงจากตัวตรวจรู้ และเมื่อได้รับข้อมูลดังกล่าวกลับมาแล้วก็จะประมวลผลและเรียบเรียงส่งไปเก็บยังฐานข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 1888 ต่อไป

3.3.1 ระบบซอฟต์แวร์ของเกตเวย์

ซอฟแวร์ในส่วนของเกตเวย์นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ฝั่งคือฝั่งที่ควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำโดยใช้ CC2650 และฝั่งที่ควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟโดยใช้ NodeMCU ESP8266

ในฝั่ง CC2650 ซอฟแวร์ได้ถูกพัฒนาจากพื้นฐานของซอฟแวร์บลูทูธพลังงานต่ำที่ Texas Instrument ผู้ผลิตไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 ออกแบบมาเพื่อใช้กับไมโครคอนโทรเลอร์ตัวนี้ และใช้โปรแกรม Code Composer Studio ในการพัฒนาแก้ไขโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรเลอร์ ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะให้เกตเวย์ทำงานเป็นอุปกรณ์ Central และสามารถแสดงการทำงานได้ตามแผนผังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 16 ผังงานของเกตเวย์ในส่วนของ CC2650

การทำงานจะเริ่มจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการทำงาน จากนั้นก็จะอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อไวไฟและฐานข้อมูล IEEE1888 ที่ผู้ใช้ตั้งค่าเก็บไว้ และส่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปยัง NodeMCU ESP8266 และสั่งให้เริ่มการเชื่อมต่อ หลังจากนั้นก็จะรอคำสั่งจากผู้ใช้โดยการกดปุ่มเพื่อค้นหาสัญญาณจากตัวตรวจรู้ เมื่อพบก็จะทำการเชื่อมต่อและเข้าสู่กระบวนการการอ่านข้อมูล โดยสามารถเชื่อมต่อตัวตรวจรู้หลายตัวพร้อมกันได้ และทุกๆ 10 นาทีก็จะทำการส่งสัญญาณเพื่ออ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้ที่ทำการเชื่อมต่ออยู่ทีละตัวจนครบ โดยข้อมูล

อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงที่อยู่ในรูปแบบ 16bit นั้นจะถูกแปลงเป็นข้อมูลที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้โดยข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงจะถูกแปลงให้อยู่ในหน่วยองศาเซลเซียส (°C) ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) และ lux ตามลำดับ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Temperature(°C) = \frac{175.72 \times B[0:15]}{65536} - 46.85$$

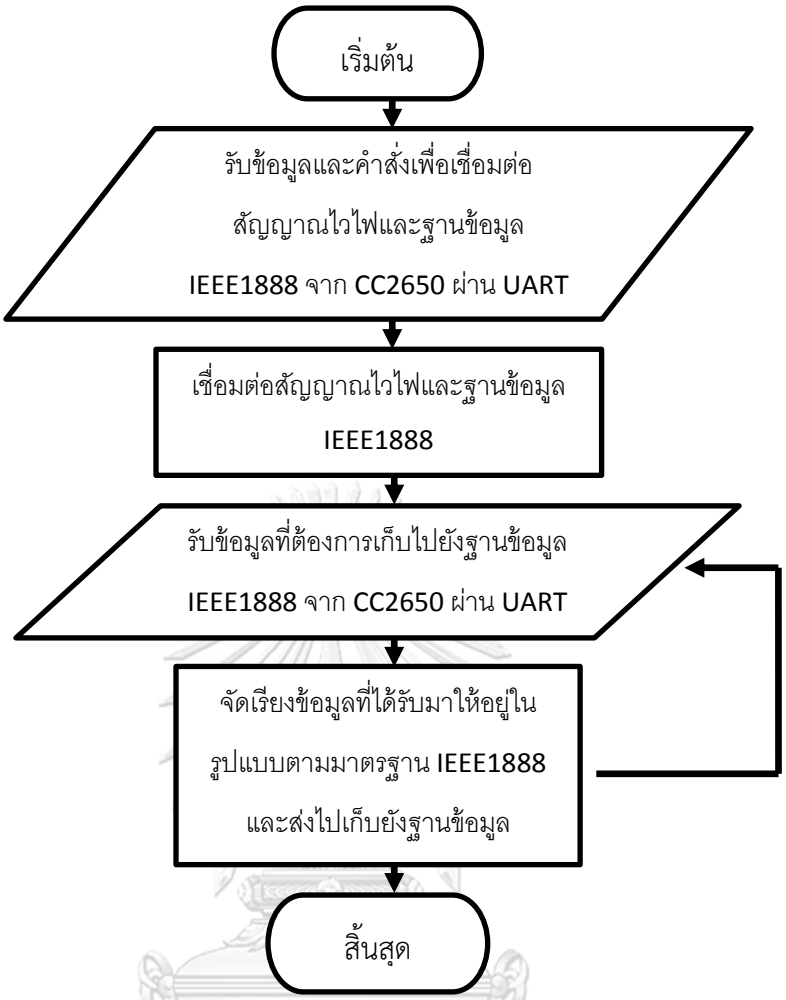
$$\%RH = \frac{125 \times B[0:15]}{65536} - 6$$

$$Lux = 0.01 \times 2^{B[0:3]} \times B[4:15]$$

ข้อมูลที่ได้ทำการเรียบเรียงแล้วดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยัง NodeMCU ESP8266 เพื่อทำการประมวลผลและจัดเก็บต่อไป

ในฝั่งของ NodeMCU ESP8266 นั้นจะใช้ Arduino IDE เป็นโปรแกรมในการพัฒนาแก้ไขโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรเลอร์ โดยการทำงานของโปรแกรมจะสามารถแสดงได้ดังแผนผังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

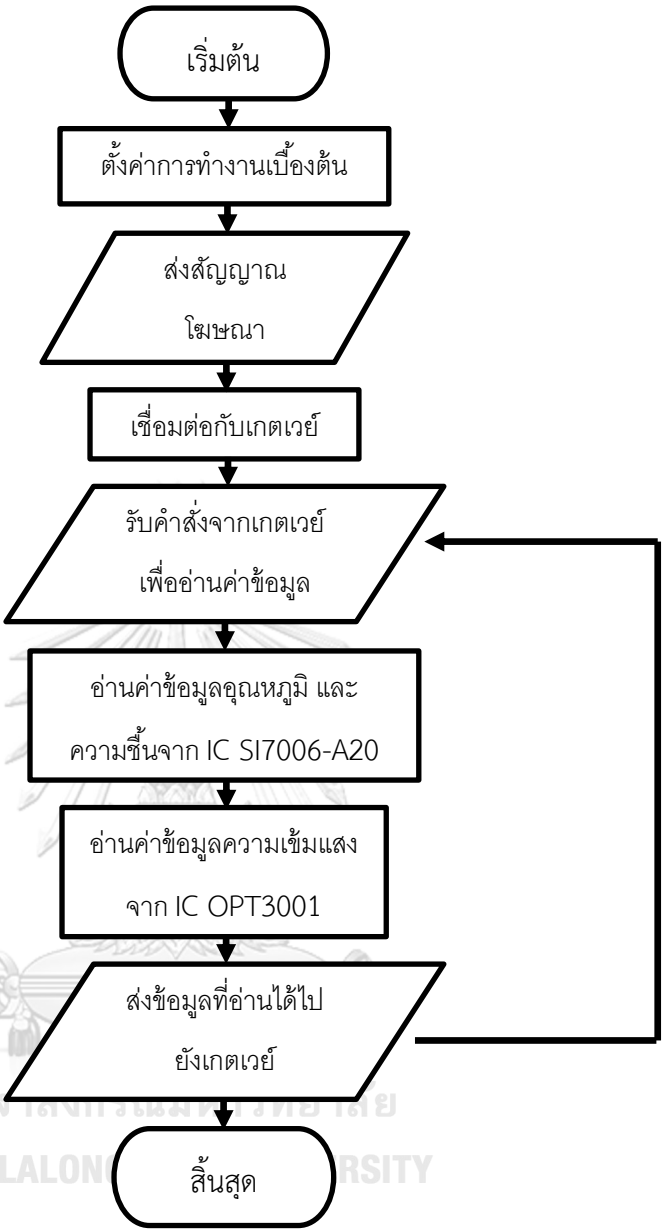


รูปที่ 17 แผนผังงานของเกตเวย์ในส่วนของ ESP8266

การทำงานจะเริ่มจากการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟตามที่ได้รับค่ามา และรอรับข้อมูลสภาพแวดล้อมจากฝั่ง CC2650 เมื่อได้รับข้อมูลแล้วก็จะทำการแปลงข้อมูลต่างๆให้อยู่ในรูปแบบตามมาตรฐาน IEEE1888 และจะทำการส่งข้อมูลดังกล่าวในชั้นการทำงานของ HTTP โดยข้อมูลทั้งหมดนี้จะถูกส่งไปเก็บพร้อมข้อมูลเวลาที่ได้รับข้อมูลและข้อมูลของเกตเวย์และตัวตรวจรู้ด้วย

3.3.1 ระบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจรู้

ซอฟแวร์ของตัวตรวจรู้นั้นพัฒนาจากพื้นฐานของซอฟต์แวร์บลูทูธพลังงานต่ำที่ Texas Instrument ผู้ผลิตไมโครคอนโทรเลอร์ CC2640 ออกแบบมาเพื่อใช้กับไมโครคอนโทรเลอร์ตัวนี้ ตัวตรวจรู้จะทำงานเป็น Peripheral ในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายบลูทูธพลังงานต่ำ โดยสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังนี้



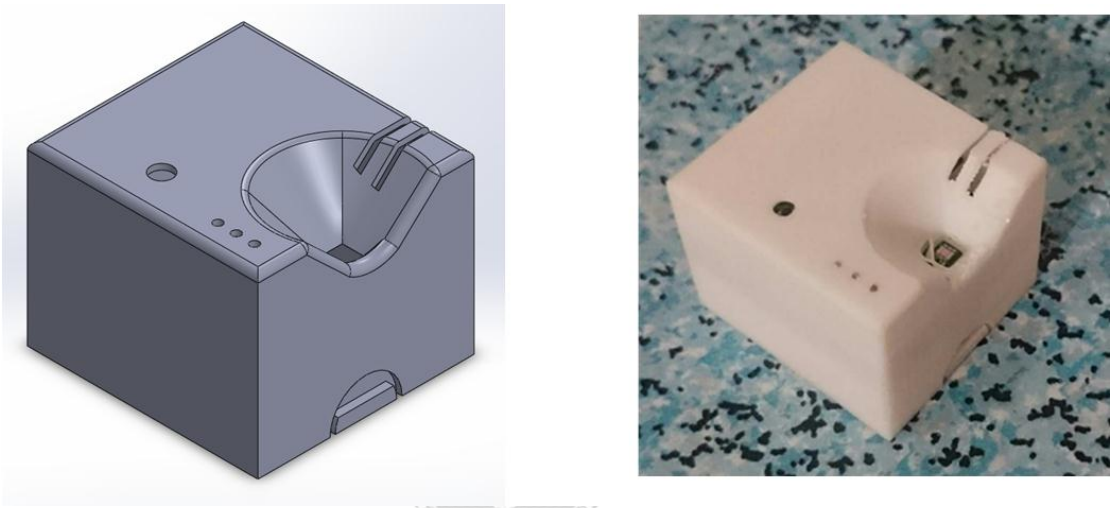
รูปที่ 18 แผนผังงานของตัวตรวจรู้

การทำงานจะเริ่มจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ และทำการนิยามชุดข้อมูล Profile Service และ Characteristic ของข้อมูลที่จะทำการส่งโดย Service และ Characteristic แต่ละตัวนั้นจะถูกนิยามหมายเลข UUID เฉพาะของแต่ละข้อมูลไว้ เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง หลังจากที่ได้ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ตัวตรวจรู้ก็จะเริ่มส่งสัญญาณโฆษณา เพื่อให้เกตเวย์สามารถค้นหาและเชื่อมต่อได้ เมื่อได้ทำการเชื่อมต่อกับเกตเวย์แล้วก็จะรอสัญญาณการอ่านข้อมูลจากเกตเวย์ เมื่อได้รับแล้วก็จะทำการวัดข้อมูลโดยส่งคำสั่งผ่านการสื่อสารแบบ I2C ไปยัง IC SI7006-A20 เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ และความชื้น และส่งคำสั่งไปยัง IC OPT3001 เพื่อวัดค่าความเข้มแสงตามลำดับ โดยจะได้ค่าผลการวัดข้อมูลแต่ละตัวกลับมาในรูปแบบ

ของข้อมูล 16 bit ซึ่งก็จะทำการส่งข้อมูลนี้กลับไปยังเกตเวย์เป็นการเสร็จสิ้นการทำงานและกลับไปรอสัญญาณการอ่านข้อมูลจากเกตเวย์ในรอบถัดไป

3.4 การประกอบและการใช้งานเครือข่ายตัวตรวจรู้

เพื่อให้สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายระบบเครือข่ายตัวตรวจรู้ได้โดยง่ายจึงได้ทำการออกแบบกล่องเพื่อใช้ใส่เกตเวย์และตัวตรวจรู้ขึ้น โดยใช้โปรแกรม Solidwork ในการออกแบบ และผลิตชิ้นงานจริงโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

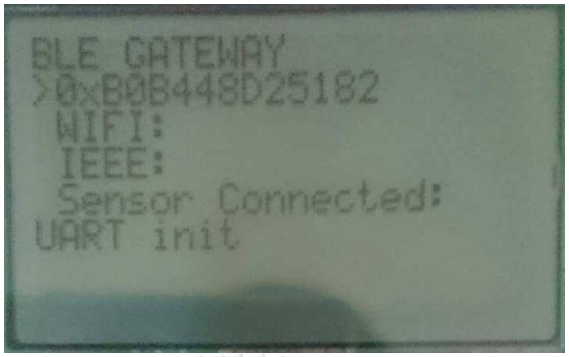


รูปที่ 19 กล่องตัวตรวจรู้

การใช้งานเครือข่ายตัวตรวจรู้จะเริ่มจากการตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟและฐานข้อมูล IEEE1888 บนเกตเวย์ในครั้งแรกของการใช้งาน เมื่อเปิดใช้งานเกตเวย์ เกตเวย์จะแสดงหน้าจอหลักเป็นข้อความ 8 บรรทัด ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อการทำงาน 4 หัวข้อ ในบรรทัดที่ 2-5 คือหัวข้อเกตเวย์ ซึ่งโดยพื้นฐานจะแสดงเลข Device Address ของเกตเวย์ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของอุปกรณ์บลูทูธแต่ละตัว หัวข้อ WIFI หัวข้อ IEEE และหัวข้อ Sensor Connected ซึ่งในแต่ละหัวข้อก็จะสามารถเข้าไปเพื่อแก้ไขค่าการทำงานในแต่ละหัวข้อได้ และอีก 3 บรรทัดจะแสดงสถานการณ์ทำงานในปัจจุบัน โดยเมื่อทำการเปิดใช้งานเกตเวย์เป็นครั้งแรกจะต้องทำการตั้งค่า Pointset ของเกตเวย์ที่จะใช้เพื่อเก็บค่าเข้าไปยังฐานข้อมูล IEEE1888 ในหัวข้อเกตเวย์ในบรรทัดที่ 2 จากนั้นตั้งค่า SSID และ Password ที่จะใช้เชื่อมต่อสัญญาณไวไฟในหัวข้อ WIFI บนหน้าจอ และตั้งค่า IP Address ของฐานข้อมูล IEEE1888 ในหัวข้อ IEEE เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วให้ทำการปิดแล้วเปิดเกตเวย์ใหม่อีกครั้ง เกตเวย์จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟและฐานข้อมูล IEEE1888 ตามที่ได้ตั้งค่าไว้เองโดยอัตโนมัติ และเมื่อทำการเชื่อมต่อเสร็จสิ้นก็จะสามารถไปค้นหาและเชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้ได้ในหัวข้อ Sensor Connected และเมื่อเชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้แล้วก็จะสามารถสั่งให้เริ่มการวัดและอ่านค่าจากตัวตรวจรู้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ได้ที่หัวข้อเกตเวย์ และเมื่อเริ่มทำการอ่านค่าแล้วเกตเวย์จะทำการอ่านและส่งค่าไปยังฐานข้อมูล IEEE1888 ทุกๆ 10 นาทีโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 20 หน้าเมนูของเกตเวย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดสอบ

การทดสอบเครือข่ายตัวตรวจรู้แบบไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้นและความเข้มแสงในงานวิจัยนี้นั้นทำเพื่อทดสอบความสามารถของเครือข่ายในด้านต่างๆ และเนื่องจากเครือข่ายดังกล่าวต้องใช้ความสามารถในการทำงานหลายด้าน การทดสอบจึงทำการทดสอบในแต่ละด้าน ซึ่งจะแบ่งเป็นการทดสอบเครือข่ายสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 การทดสอบการใช้พลังงานของตัวตรวจรู้ และการทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้

4.1 การทดสอบเครือข่ายสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ

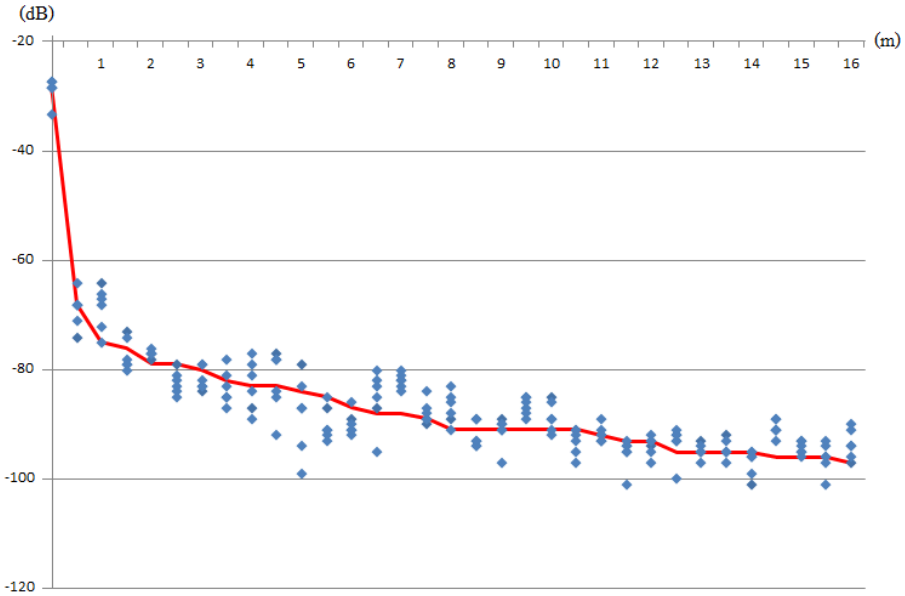
การทดสอบเครือข่ายสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ จะทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ และความแรงของสัญญาณ โดยการวัดค่า received signal strength indicator (RSSI) ของการเชื่อมต่อระหว่างตัวตรวจรู้และเกตเวย์ทุกระยะ 0.5 เมตรจนกว่าจะการเชื่อมต่อจะถูกตัด

และนอกจากนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านหน่วยความจำของไมโครคอนโทรเลอร์ CC2650 ที่ใช้เป็นตัวควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ ทำให้เกตเวย์สามารถเชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้ได้จำนวนจำกัดและทำให้จำเป็นต้องทดสอบจำนวนตัวตรวจรู้ที่สามารถเชื่อมต่อได้สูงสุดด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ผลการทดลองเครือข่ายบลูทูธพลังงานต่ำ

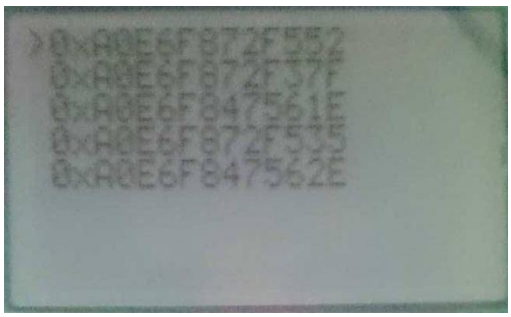
การทดสอบค่า RSSI ของการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำได้ผลการทดสอบดังกราฟ



รูปที่ 21 กราฟแสดงความแรงสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะใกล้และค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะไกลจนกระทั่งการเชื่อมต่อถูกตัดขาดในระยะ 16.5 เมตร ซึ่งระยะดังกล่าวถือว่าเป็นระยะที่เพียงพอต่อการใช้งานในห้องทั่วไปได้

การทดสอบจำนวนตัวตรวจรู้สูงสุดที่เกตเวย์สามารถเชื่อมต่อได้ ได้ผลการทดสอบว่าเกตเวย์สามารถเชื่อมต่อได้สูงสุด 5 ตัวตรวจรู้พร้อมกันเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านหน่วยความจำของ CC2650 ซึ่งจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำเป็นจำนวนหนึ่งในการเชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้หนึ่งตัว



รูปที่ 22 เกตเวย์เชื่อมต่อกับตัวตรวจรู้ 5 ตัว

4.3 การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888

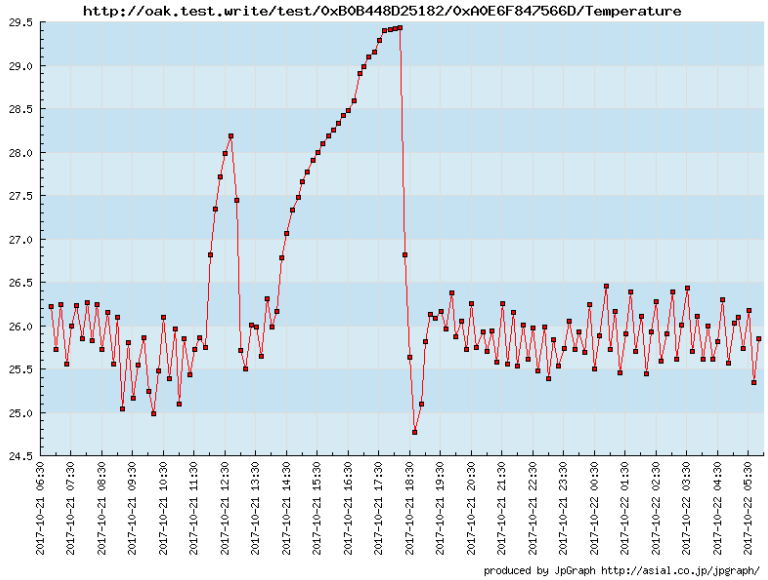
การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 เป็นการทดสอบการทำงานของทั้งระบบ จะทำการทดสอบโดยการติดตั้งตัวตรวจรู้ให้ทำงานวัดข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสง และส่งข้อมูลทุกๆ 10 นาที โดยข้อมูลที่ส่งไปยังเกตเวย์จะถูกเรียบเรียงให้เป็นรูปแบบตามมาตรฐาน IEEE1888 และถูกส่งต่อไปเก็บที่ฐานข้อมูล IEEE1888 ที่จำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม VMware เพื่อการทดสอบการทำงานของเครือข่ายนี้โดยเฉพาะ

4.4 ผลการทดลองการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888

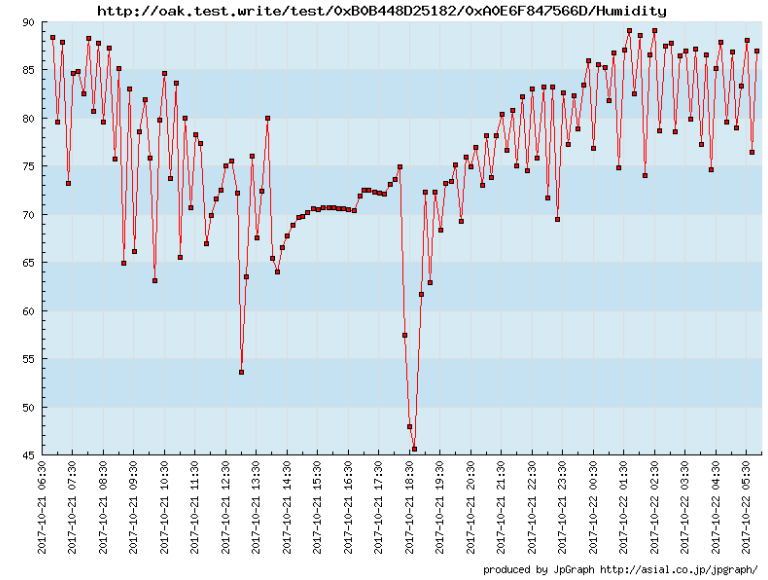
รูปข้างล่างเป็นรูปตัวอย่างผลการทดลองการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยทำการวัดและบันทึกข้อมูลจากตัวตรวจรู้ 5 ตัวพร้อมๆกันลงบนฐานข้อมูล IEEE1888 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถวัดและบันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง

http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F847566D/Humidity	2017-10-21T06:35:48.000+07:00	76.31
http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F847566D/Illuminance	2017-10-21T06:35:48.000+07:00	52.04
http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F847566D/Temperature	2017-10-21T06:35:48.000+07:00	25.74
http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F872F53F/Humidity	2017-11-07T19:30:59.000+07:00	56.86
http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F872F53F/Illuminance	2017-11-07T19:30:59.000+07:00	18.32
http://oak.test.write/test/0xB0B448CA6104/0xA0E6F872F53F/Temperature	2017-11-07T19:30:59.000+07:00	26.19
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0x000000000001/Humidity	2017-09-19T23:11:32.000+07:00	50.00
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0x000000000001/Illuminance	2017-09-19T23:11:32.000+07:00	10.00
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0x000000000001/Temperature	2017-09-19T23:11:32.000+07:00	25.00
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F847566D/Humidity	2017-11-08T15:39:02.000+07:00	62.79
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F847566D/Illuminance	2017-11-08T15:39:02.000+07:00	22.00
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F847566D/Temperature	2017-11-08T15:39:02.000+07:00	26.94
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F37F/Humidity	2017-10-25T21:34:43.000+07:00	66.04
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F37F/Illuminance	2017-10-25T21:34:43.000+07:00	49.16
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F37F/Temperature	2017-10-25T21:34:43.000+07:00	24.38
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F521/Humidity	2017-11-03T22:00:30.000+07:00	45.34
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F521/Illuminance	2017-11-03T22:00:30.000+07:00	8.51
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F521/Temperature	2017-11-03T22:00:30.000+07:00	28.32
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F531/Humidity	2017-11-03T22:00:27.000+07:00	46.66
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F531/Illuminance	2017-11-03T22:00:27.000+07:00	9.95
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F531/Temperature	2017-11-03T22:00:27.000+07:00	27.94
http://oak.test.write/test/0xB0B448D25182/0xA0E6F872F535/Humidity	2017-11-03T22:00:32.000+07:00	46.98

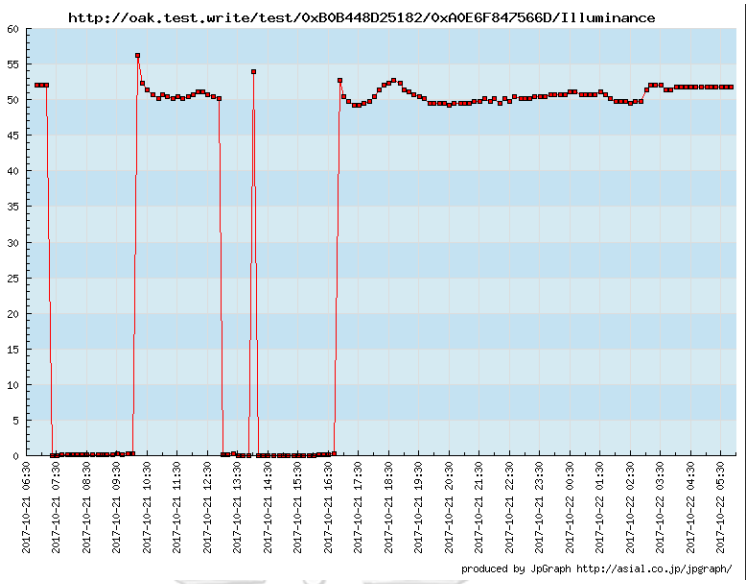
รูปที่ 23 ข้อมูลในฐานข้อมูล IEEE1888



รูปที่ 24 กราฟแสดงข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888



รูปที่ 25 กราฟแสดงข้อมูลความชื้นที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888



รูปที่ 26 กราฟแสดงข้อมูลความเข้มแสงที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล IEEE1888

ภาพข้างต้นเป็นภาพกราฟข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงที่บันทึกได้จากหนึ่งในตัวตรวจรู้ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการบันทึกค่าอย่างต่อเนื่องและค่าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงตามการใช้งาน เช่น ในกราฟอุณหภูมิจะเห็นถึงช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแสดงถึงการปิดการใช้งานเครื่องปรับอากาศในห้อง และเมื่อมีการเปิดเครื่องปรับอากาศก็จะเห็นถึงอุณหภูมิและค่าความชื้นที่ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเป็นต้น

4.5 การทดสอบการใช้พลังงาน

การทดสอบการใช้พลังงานเป็นการทดสอบปริมาณการใช้พลังงานของตัวตรวจรู้ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณเวลาการใช้งานของตัวตรวจรู้ด้วยพลังงานจากถ่านเม็ดกระดุมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทดสอบจะทำโดยใช้วิธีวัดค่าความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับวงจรไว้หรือที่เรียกว่า shunt resistor และนำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้และค่าความต้านทานมาหาค่ากระแสที่ไหลผ่านตามสมการ

$$I = \frac{V}{R}$$

และสามารถประมาณเวลาการใช้งานของตัวตรวจรู้ด้วยพลังงานจากถ่านเม็ดกระดุมได้จากสมการ

$$T = \frac{Ah}{I}$$

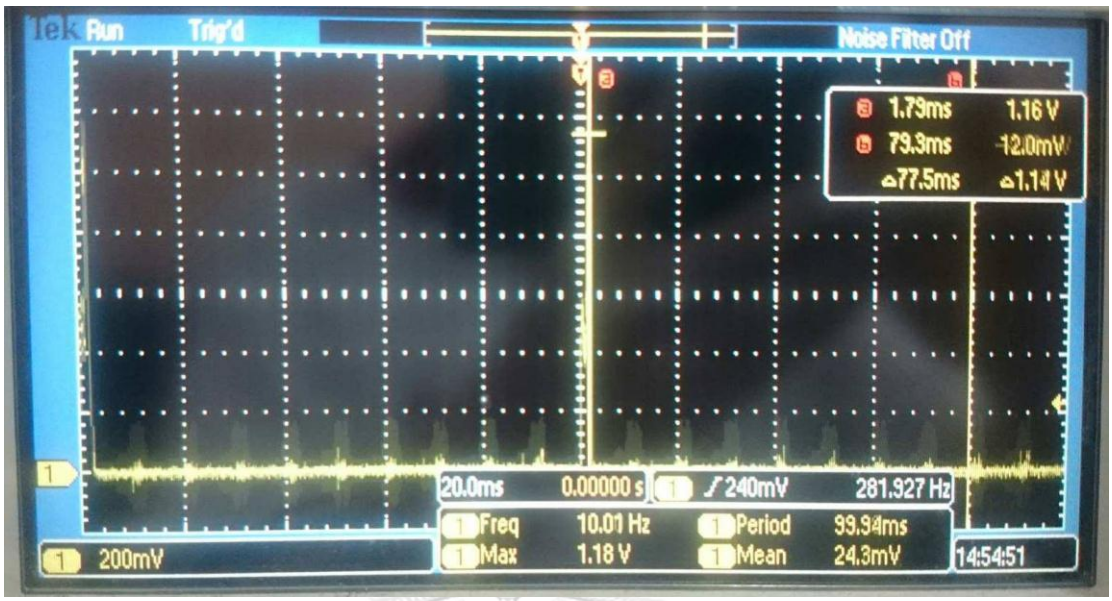
4.6 ผลการทดสอบการใช้พลังงาน

ในการทดสอบการใช้พลังงานของตัวตรวจรู้นี้ได้ทำการต่อตัวต้านทานขนาด 200ohms แบบอนุกรมเข้ากับวงจรและทำการวัดค่าความต่างศักย์คร่อมโดยใช้ Oscilloscope เป็นเครื่องมือในการวัด และได้ผลการทดลองดังรูป

รูปที่ 27 กราฟผลการวัดค่าการใช้พลังงานจาก Oscilloscope

จากรูปภาพจะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้มีการใช้พลังงานสูงทุกๆช่วงประมาณ 100ms ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวตรวจรู้ทำการติดต่อกับเกตเวย์เพื่อคงสถานะการเชื่อมต่อกับเกตเวย์ไว้ โดยเมื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์เฉลี่ยจะได้ผลดังภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 28 กราฟผลการวัดค่าความต่างศักย์เฉลี่ยจาก Oscilloscope

จากรูปภาพจะเห็นได้ว่าค่าความต่างศักย์เฉลี่ยที่วัดได้มีค่า 24.3mV ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่ากระแสได้ 0.1215mA และด้วยพลังงานจากถ่านเม็ดกระดุมขนาด 2477 ที่สามารถให้พลังงานได้ประมาณ 1000mAh จะสามารถนำมาคำนวณต่อได้ว่าตัวตรวจรู้จะสามารถทำงานโดยใช้พลังงานจากถ่านเม็ดกระดุมดังเกล่าได้เป็นเวลาประมาณ 8230 ชั่วโมง หรือประมาณ 11.4 เดือนนั่นเอง

4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้

การทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพในด้านต่างๆของตัวตรวจรู้ซึ่งจะทำการทดสอบด้วยกัน 3 ด้าน คือ การทดสอบความแม่นยำของตัวตรวจรู้เทียบกับตัวตรวจรู้ด้วยกัน การทดสอบผลกระทบของกล่องบรรจุตัวตรวจรู้ และการทดสอบความแม่นยำของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดค่าอื่นๆ

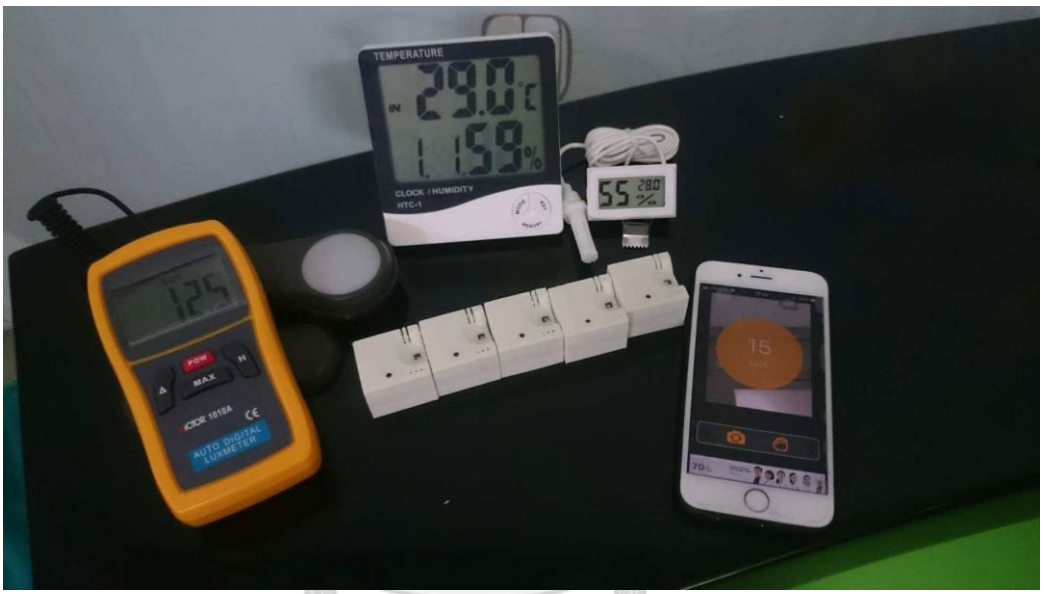
การทดสอบความแม่นยำของตัวตรวจรู้เทียบกับตัวตรวจรู้ด้วยกันจะทำโดยการติดตั้งตัวตรวจรู้ 5 ตัว ไว้ในบริเวณเดียวกันและทำการวัดเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากตัวตรวจรู้แต่ละตัว เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวัดจากตัวตรวจรู้แต่ละตัว

การทดสอบผลกระทบของกล่องบรรจุตัวตรวจรู้ทำโดยการเปรียบเทียบผลการวัดของตัวตรวจรู้สองตัวที่ทำการทดสอบแล้วว่าวัดข้อมูลได้ใกล้เคียงกัน โดยตัวหนึ่งจะทำการวัดโดยใส่กล่องและอีกตัวไม่ใส่กล่อง เพื่อหาว่ากล่องบรรจุตัวตรวจรู้ที่ออกแบบนั้นมีผลกระทบต่อข้อมูลที่วัดได้มากน้อยเพียงใด

การทดสอบความแม่นยำของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดค่าอื่นๆจะทำโดยการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ กับอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงที่มีขายตามท้องตลาดเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและความน่าเชื่อถือของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ

4.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้

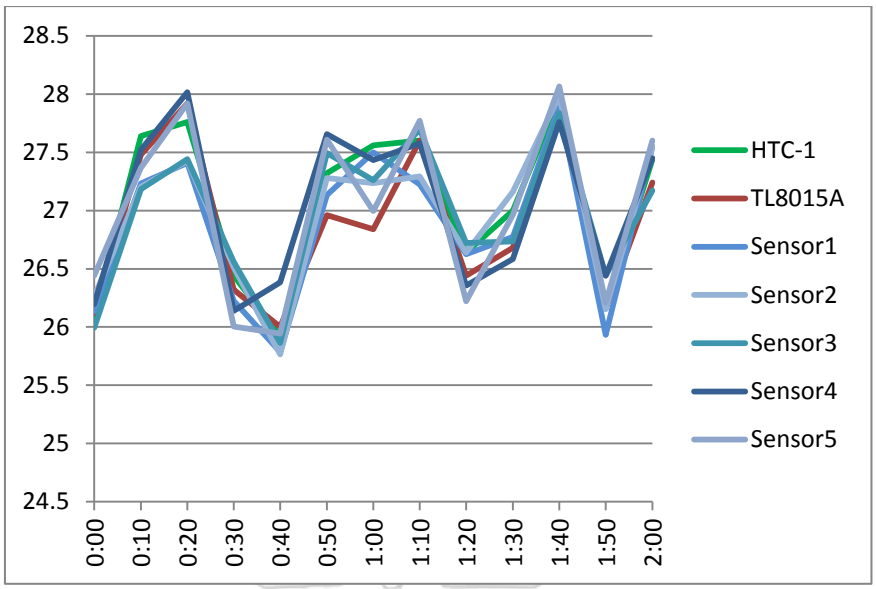
ผลการทดสอบความแม่นยำของตัวตรวจรู้เทียบกับตัวตรวจรู้ด้วยกันและอุปกรณ์วัดค่าอื่นๆ ได้ทำการติดตั้งตัวตรวจรู้ 5 ตัว และอุปกรณ์วัดค่าอื่นๆไว้ในบริเวณเดียวกันดังภาพและทำการวัดค่าทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 29 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดข้อมูลของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

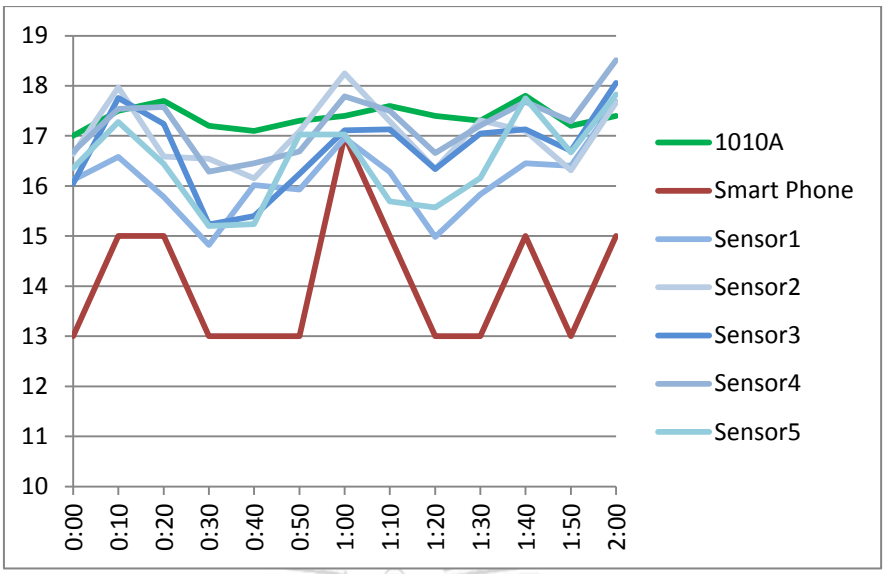
อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบนั้นสำหรับค่าอุณหภูมิและความชื้นได้ใช้อุปกรณ์วัด HTC-1 และ TL8015A ที่มีขายตามท้องตลาดมาเปรียบเทียบ โดยทั้งสองอุปกรณ์นั้นระบุค่าความคลาดเคลื่อนตามเอกสารไว้ที่ ±1°C สำหรับค่าอุณหภูมิและ ±5% สำหรับค่าความชื้น [13] ในส่วนของค่าความเข้มแสงได้ใช้แอพพลิเคชั่นวัดค่าความเข้มแสงบนโทรศัพท์สมาร์ทโฟน และอุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง VICTOR 1010A ที่ระบุค่าความคลาดเคลื่อนตามเอกสารอยู่ที่ ±3% ในช่วง 0.1-20000 Lux [14] เป็นตัวเปรียบเทียบ ผลการทดลองสามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังภาพ



รูปที่ 30 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดอุณหภูมิของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 31 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ

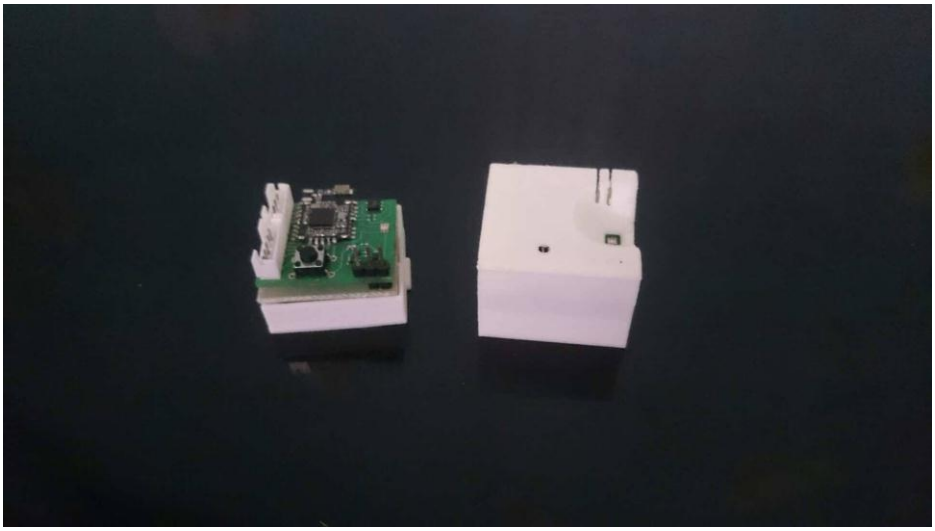


รูปที่ 32 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดความเข้มแสงของตัวตรวจรู้เทียบกับอุปกรณ์วัดอื่นๆ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้ทุกตัวนั้นมีความสามารถในการวัดค่าได้ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงเทียบกับตัวตรวจรู้ด้วยกันอยู่ที่ประมาณ ±0.62℃, ±2.24% และ ±1.81Lux ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสงอยู่ที่ประมาณ ±0.72℃, ±3.2% และ ±4.4Lux ตามลำดับ

ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจรู้นั้นมีความสามารถในการวัดค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาดและสามารถใช้งานได้จริง

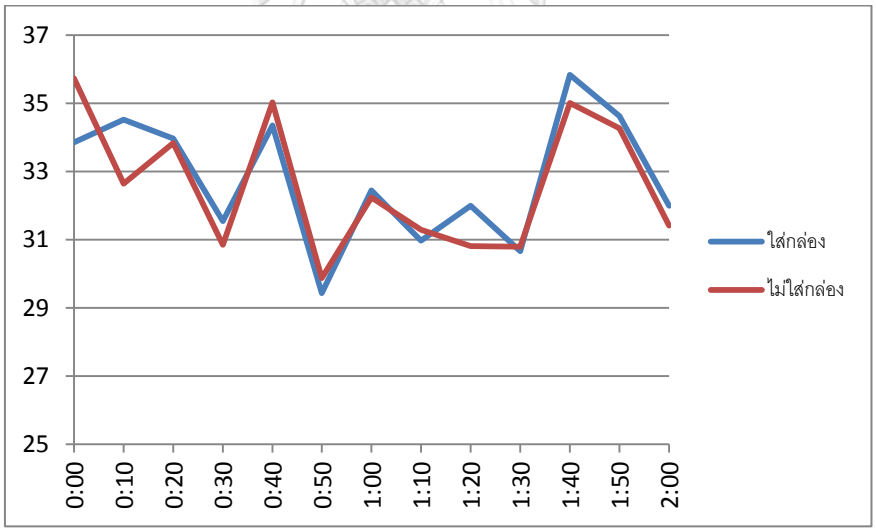
จากนั้นได้นำตัวตรวจรู้ 2 ตัวที่มีผลการวัดใกล้เคียงกันมาทำการวัดค่าอีกครั้งโดยให้ตัวตรวจรู้ตัวหนึ่งไม่ใส่กล่องดังภาพ และทำการวัดค่าทุก 10 นาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



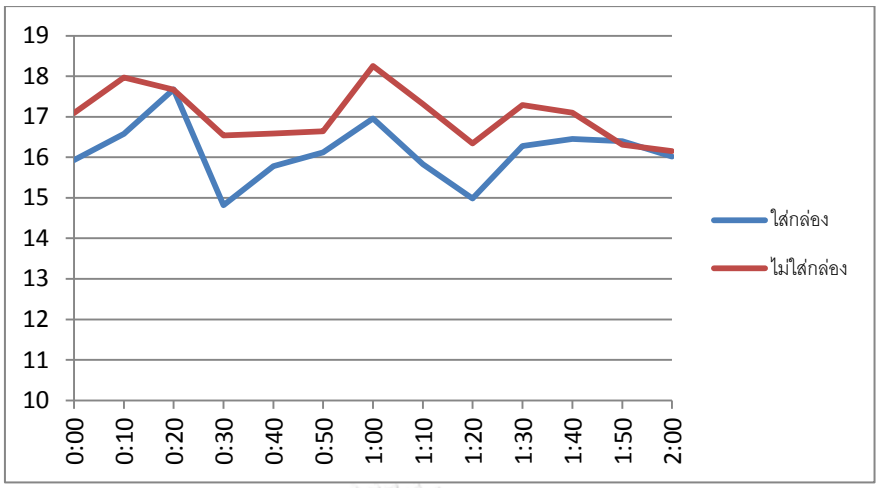
รูปที่ 33 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูล

ผลการทดลองสามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังภาพ

รูปที่ 34 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลอุณหภูมิ



รูปที่ 35 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลความชื้น



รูปที่ 36 การทดสอบผลกระทบของกล่องใส่ตัวตรวจรู้กับการวัดข้อมูลความเข้มแสง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากโดยค่าความแตกต่างในการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความเข้มแสงของตัวตรวจรู้ทั้ง 2 ตัวในขณะที่ทำการทดลองโดยไม่ใส่กล่องหนึ่งตัวมีค่า ±0.39°C, ±1.88% และ ±1.72Lux ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากล่องที่ออกแบบนั้นไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้และสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอระบบเครือข่ายตัวตรวจรู้ไร้สายบลูทูธ – ไวไฟเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสง และจัดเก็บข้อมูลดังกล่าวไปยังฐานข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยตัวตรวจรู้ได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยสามารถทำงานได้นานโดยใช้พลังงานจากถ่านเม็ดกระดุม และเกตเวย์ที่เชื่อมต่ออยู่กับตัวตรวจรู้สามารถส่งข้อมูลที่ได้รับจากตัวตรวจรู้ไปยังฐานข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 ได้ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสัญญาณไวไฟ ซึ่งทำให้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบอื่นที่ทำงานบนมาตรฐาน IEEE1888 นี้ได้ทันที

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถลดขนาดของเกตเวย์โดยออกแบบแผ่นวงจรเฉพาะของเกตเวย์ได้

2. สามารถเพิ่มอุปกรณ์วัดข้อมูลเพื่อให้สามารถวัดข้อมูลได้หลากหลายมากขึ้น เช่น ระดับมลภาวะในอากาศ ความดันอากาศ ข้อมูลการเคลื่อนไหวเป็นต้น

3. สามารถลดขนาดของตัวตรวจรู้ได้อีกโดยตัดช่องการสื่อสารภายนอกออกจากแผ่นวงจร

4. สามารถนำข้อมูลที่วัดและเก็บได้มาวิเคราะห์เพื่อช่วยในการบริหารจัดกรพลังงานได้

5. สามารถสร้าง application เพื่อให้สะดวกต่อการเรียกดูข้อมูลและการใช้งานอื่นๆของผู้ใช้มากกว่านี้ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. Khurshid Aliev, Francesco Rugiano, and E. Pasero, *The Use of Bluetooth Low Energy Smart Sensor for Mobile Devices Yields an Efficient Level of Power Consumption*, in *ALLSENSORS 2016*. 2016: Venice, Italy.
2. Tanakorn Inthasut and C. Aswakul, *ZigBee Wireless Sensor Network with IEEE1888 Gateway for Building Energy Management System*, in *ICEIC 2014*. 2014: Kota Kinabalu, Malaysia.
3. Yun, J. and K.H. Won, *Building environment analysis based on temperature and humidity for smart energy systems.* Sensors (Basel), 2012. **12**(10): p. 13458-70.
4. Townsend, K. *Introduction to Bluetooth Low Energy*. 2015-05-04; Available from: https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/introduction.
5. contributors, W. *Wi-Fi*. 15 April 2018; Available from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wi-Fi&oldid=841087070.
6. คุณาวุฒิ, ค., ภาพรวมและสถาปัตยกรรมของมาตรฐาน *IEEE 1888* สำหรับโพรโทคอลเครือข่ายควบคุมชุมชมสีเขียว. Information Technology Journal, 2557. **10**(1): p. 8.
7. *CC2650 SimpleLink™ Multistandard Wireless MCU*. Texas Instruments Incorporated.
8. *SmartRF06 Evaluation Board User's Guide (Rev. B)*. Texas Instruments Incorporated.
9. *ESP8266EX Datasheet*. Espressif Systems.
10. *Step Down Converter with Bypass Mode for Ultra Low Power Wireless Applications*. Texas Instruments Incorporated.
11. *Si7006-A20 I2C HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR*. Silicon Laboratories.
12. *OPT3001 Ambient Light Sensor (ALS)*. Texas Instruments Incorporated.
13. *HTC-1 Thermo Hygrometer User Manual*. Available from: http://www.china-tasi.com/uploads/soft/%E8%8B%B1%E6%96%87%E8%AF%B4%E6%98%8E%E4%B9%A6/HTC-1%E8%AF%B4%E6%98%8E%E4%B9%A6%20en.pdf.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

14. Victor. *VICTOR 1010A Intelligent Auto Digital Light Meter User's Manual*. Available from: https://www.globalmediapro.com/att/a/2/h/3/a2h3g1/1010amanual.pdf.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนวิชญ์ มานิตย์โชติพิสิฐ เกิดวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาตร์ วิทยาเขต บางเขน ในปีการศึกษา 2556 และศึกษาต่อในระดับหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY