

การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT
และ LoRa



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Test Kit for Automatic Street Light Control System based on NB-IoT
and LoRa Platform



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ
	บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa
โดย	นายเกียรติศักดิ์ บุญประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชชัย เตชสุนันต์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)	

เกียรติศักดิ์ บุญประเสริฐ : การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa. (Development of Test Kit for Automatic Street Light Control System based on NB-IoT and LoRa Platform) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.วาทีต เบญจพลกุล

งานวิจัยนี้เสนอการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa เพื่อพัฒนาระบบควบคุมไฟถนนระยะไกล และเปรียบเทียบการทำงานของระบบสื่อสารแบบ NB-IoT กับ LoRa ดำเนินงานวิจัยโดยศึกษารูปแบบของระบบควบคุมไฟถนนจากการไฟฟ้านครหลวงปัจจุบัน พัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ และทดสอบการวัดค่าความแรงสัญญาณต่ำสุดของสัญญาณของระบบสื่อสารแต่ละชนิดที่สามารถเชื่อมต่อได้ และส่งควบคุมการหรี่ไฟโดยผ่านระบบสื่อสารแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa และ NB-IoT (ทั้งของ AIS และ True) ผลที่ได้จากงานวิจัย (1) ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนนที่ใช้อุปกรณ์บอร์ด Arduino ที่ใช้อุปกรณ์สื่อสาร NB-IoT AIS: DEVIO NB-SHIELD, NB-IoT Ture: True NB-IoT Developer Board และ LoRa : Heltec WIFI Lora Kit 32 สำหรับควบคุมและมอนิเตอร์ผ่านระบบคลาวด์เว็บไซต์ (2) การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบสื่อสาร NB-IoT ของ Ais, ระบบสื่อสาร NB-IoT ของ true และ LoRa ระบบทั้ง 3 สามารถตอบสนองการทำงานได้ตามโหมดต่างๆได้อย่างถูกต้อง และค่าความแรงสัญญาณต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้คือ -93 dBm, -95 dBm และ -111 dBm ตามลำดับ ในส่วนของราคาของอุปกรณ์ของ NB-IoT ของ AIS และ True อยู่ที่ 3,845 บาท และ 3,805 บาท ส่วนของ LoRa อยู่ที่ 4,455 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070420021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: street light control system, NB-IoT, LoRa

Keatisak Bonprasert : Development of Test Kit for Automatic Street Light Control System based on NB-IoT and LoRa Platform. Advisor: Prof. Watit Benjapolakul, Ph.D.

This research proposes to develop a test kit for an automatic street light control system on the NB-IoT and LoRa technology platforms. This was done to develop a remote street light control system and compare the operation of NB-IoT to LoRa communication systems. Conduct research by studying the pattern of the street light control system from the current Metropolitan Electricity Authority. Developing test kits for automatic street lighting control systems. And test the measurement of the minimum signal strength of the contract of each type of communication system that can be connected. And control the dimmer via wireless communication with LoRa technology and NB-IoT (both AIS and True). The results of this research are (1) Street Light Control System Test Kit using Arduino board devices that use communication devices NB-IoT AIS: DEVIO NB-SHIELD, NB-IoT True: True NB-IoT Developer Board and LoRa: Heltec WIFI Lora Kit 32 For controlling and monitoring via the cloud website (2) Comparison of the performance of AIS NB-IoT communication system, true NB-IoT communication system and LoRa. All 3 systems, the minimum RSSI that can be connected to the system is -93 dBm, -95 dBm and -111 dBm respectively. and the system latencies were 3.37, 9.15, and 4.33 seconds. As for the price of AIS and True's NB-IoT equipment, it is 3,845 baht and 3,805 baht, while the LoRa is 4,455 baht.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างสูงจาก ศ. ดร. วาทีต เบญจพลกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ กรุณาให้ความช่วยเหลือด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง คอยเป็นแรงผลักดัน สนับสนุน รวมถึงให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ทั้งในด้านวิชาการ งานวิจัย ความรู้ การเขียนวิทยานิพนธ์และอื่น ๆ อีกมาก รวมถึงโอกาสที่ได้อีกมากมายที่ท่านเคยได้มอบให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ รศ. ดร. ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และ อาจารย์ ดร. ชัยพร เขมะภาคะพันธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เกียรติมาเป็นกรรมการวิทยานิพนธ์ รวมถึงการแสดงความคิดเห็น ตรวจสอบ และแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว เป็นอย่างสูง ที่คอยให้ความช่วยเหลือคำจุน สนับสนุนส่งเสริม เข้าอกเข้าใจ และเป็นกำลังใจที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เกียรติศักดิ์ บุญประเสริฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 นิยามเกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าพื้นฐานทั่วไป	4
2.1.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power; P)	4
2.1.2 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	4
2.1.3 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ.....	4
2.1.4 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1.5 PWM.....	6
2.2 ความชื้น.....	6
2.3 RSSI Received Signal Strength Indicator (RSSI)	6

2.4	นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแสงสว่าง	7
2.4.1	ความสว่าง	7
2.4.2	ความส่องสว่าง (Luminance).....	7
2.4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)	7
2.4.4	ข้อกำหนดด้านสมรรถนะการส่องสว่างจากกรมทางหลวง	7
2.5	UDP	8
2.6	MQTT	8
2.6.1	MQTT Client	9
2.6.2	MQTT Broker	9
บทที่ 3	วรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	10
3.1	ระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ	10
3.1.1	โคมไฟถนนสาธารณะ	10
3.1.2	แพลตฟอร์มสื่อสาร	11
3.1.3	ส่วนประมวลผล.....	12
3.1.4	งานวิจัยระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะของประเทศไทยที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน	12
3.1.5	ระบบควบคุม (Central Control System) หรือเครื่องแม่ข่าย (server).....	13
3.1.6	ระบบควบคุมเฉพาะพื้นที่ (Local Control System).....	13
3.2	ระบบสื่อสารในระบบไฟถนนสาธารณะของงานวิจัย	14
3.2.1	Backhaul Network	14
3.2.2	Access Network	14
3.2.3	เกตเวย์	14
3.3	ระบบสื่อสารที่พิจารณาสำหรับระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ	16
3.3.1	LoRa	16
3.3.2	NB-IoT	17

บทที่ 4 การออกแบบชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนน	20
4.1 การออกแบบส่วนของการสื่อสาร	20
4.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์.....	23
4.2.1 Arduino mega	24
4.2.2 โคมไฟสาธารณะ	25
4.2.3 ไดรเวอร์	25
4.2.4 PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module	26
4.2.5 LDR Photoresistor Sensor Module.....	28
4.2.6 DC Motor Driver.....	29
4.2.7 RTC Arduino ds3231	30
4.2.8 DHT22 sensor.....	30
4.2.9 เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว แบบไมโครเวฟ	32
4.3 การทำงานและซอฟต์แวร์	32
4.3.1 ส่วนเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์.....	32
4.3.1.1 การตรวจจับความเคลื่อนไหว	34
4.3.1.2 การตรวจจับฝน.....	34
4.3.1.3 การวัดค่าทางไฟฟ้า	35
4.3.2 ส่วนวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมโคมไฟ	35
4.3.2.1 รูปแบบควบคุมเฉพาะความสว่าง.....	37
4.3.2.2 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด	37
4.3.2.3 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด โดยคำนึงถึงรูปแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด).....	38
4.3.2.4 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ.....	39
4.3.2.5 การควบคุมแสงสว่าง	40

4.3.3 ส่วนของระบบสื่อสารกับผู้ใช้งาน	41
4.3.3.1 แพลตฟอร์มเว็บ anto.....	42
4.3.3.2 แพลตฟอร์มเว็บ Magellan.....	43
4.3.3.3 แพลตฟอร์มเว็บ demo.thingsboard.io.....	44
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	45
5.1 ทดสอบความแรงของสัญญาณ หรือ ค่า RSSI (Received Signal Strength Indicator).....	45
5.1.1 ทดสอบความแรงของสัญญาณในพื้นที่ที่ศึกษา.....	45
5.1.2 ทดสอบความแรงของสัญญาณที่ต่ำสุด ที่แต่ละอุปกรณ์รองรับได้.....	45
5.2 ทดสอบของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน.....	48
5.3 ทดสอบการสั่งงานควบคุม.....	50
5.4 ทดสอบเวลาแฝงของระบบ	53
5.5 ทดสอบความเที่ยงตรงในการวัดค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ PZEM-004T	54
5.6 ทดสอบความเที่ยงตรงในการวัดค่าของอุปกรณ์ AM2302 Module dht22	63
5.7 การทดสอบการตอบสนองทำงานในแต่ละ รูปแบบการทำงาน	65
5.8 การคำนวณราคาของอุปกรณ์ควบคุม.....	69
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	71
6.1 สรุป	71
6.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 มาตรฐานความส่องสว่างของกรมทางหลวงตามประเภทถนน	8
ตารางที่ 2 ตารางแสดงข้อดี-ข้อเสียของระบบสื่อสารไฟถนนสาธารณะจากงานวิจัย [4].....	15
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของเทคโนโลยีสื่อสาร LoRa และ NB-IoT [9].....	18
ตารางที่ 4 สัญญาณควบคุมความสว่างในแต่ละระดับ.....	40
ตารางที่ 5 ทดสอบความแรงของสัญญาณ ในสถานที่ห้องปฏิบัติการ และบริเวณที่ติดตั้ง.....	45
ตารางที่ 6 ตารางทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ NB-IoT ในแต่ละจุด	46
ตารางที่ 7 ตารางทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ LoRa ในแต่ละจุด	47
ตารางที่ 8 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa.....	49
ตารางที่ 9 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS	49
ตารางที่ 10 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True.....	50
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ LoRa.....	51
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ AIS	52
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ True	52
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบเวลาแฝงของระบบ	53
ตารางที่ 15 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa.....	56
ตารางที่ 16 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS	56
ตารางที่ 17 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True	57
ตารางที่ 18 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa.....	57

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS	58
ตารางที่ 20 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True	58
ตารางที่ 21 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa	59
ตารางที่ 22 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS	59
ตารางที่ 23 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True.....	60
ตารางที่ 24 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa	60
ตารางที่ 25 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS	61
ตารางที่ 26 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True.....	61
ตารางที่ 27 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa.....	62
ตารางที่ 28 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS .	62
ตารางที่ 29 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True	63
ตารางที่ 30 เปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิ AM2302 Module กับ UT333.....	64
ตารางที่ 31 เปรียบเทียบผลการวัดความชื้น AM2302 Module กับ UT333	65
ตารางที่ 32 ผลการทดสอบการควบคุมไฟถนนภายใต้เงื่อนไขต่างๆ.....	67
ตารางที่ 33 ตารางเปรียบเทียบราคาของระบบควบคุมไฟถนน ทั้ง 3 แพลตฟอร์มการสื่อสาร	69

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ค่าความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	5
รูปที่ 2 ตัวอย่างของสัญญาณ PWM.....	6
รูปที่ 3 การสื่อสารแบบ MQTT.....	9
รูปที่ 4 องค์ประกอบหลักของระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ.....	10
รูปที่ 5 ตัวอย่างโคมไฟถนนสาธารณะ.....	11
รูปที่ 6 ตัวอย่างระบบสื่อสารไฟถนนสาธารณะในไทยที่ถูกพัฒนาขึ้นจาก [4].....	12
รูปที่ 7 ระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะของประเทศไทย จาก [4].....	13
รูปที่ 8 ระบบการทำงานของ LoRaWAN.....	17
รูปที่ 9 True NB-IoT Developer Board.....	20
รูปที่ 10 AIS DEVIO NB-SHIELD.....	21
รูปที่ 11 Heltec WIFI Lora Kit 32 V2.....	22
รูปที่ 12 แผนภาพรวมการสื่อสารของระบบควบคุมไฟถนน บนแพลตฟอร์ม NB-IoT.....	23
รูปที่ 13 แผนภาพรวมระบบควบคุมไฟถนน บนแพลตฟอร์ม LoRa.....	23
รูปที่ 14 Arduino Mega 2560.....	24
รูปที่ 15 โคมไฟ LED ของ Philips รุ่น Philips BRP310 LED module 12700 lm.....	25
รูปที่ 16 LED driver รุ่น Xitanium 150W 0.35-0.70A GL Prog sXt.....	25
รูปที่ 17 PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module.....	26
รูปที่ 18 การทำงานของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า.....	27
รูปที่ 19 LDR Photoresistor Sensor Module.....	28
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างและความต้านทานของ LDR.....	28
รูปที่ 21 20Amp 6V-30V DC Motor Driver.....	29

รูปที่ 22 RTC arduino ds3231	30
รูปที่ 23 DHT22 sensor	30
รูปที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความต้านทานของเซ็นเซอร์	31
รูปที่ 25 โครงสร้างกายของอุปกรณ์ตรวจจับความชื้น	31
รูปที่ 26 Microwave Doppler wireless radar detector probe sensor module HB100	32
รูปที่ 27 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของ arduino และเซนเซอร์ต่างๆ.....	34
รูปที่ 28 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบควบคุมโคมไฟถนน	36
รูปที่ 29 การควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด.....	37
รูปที่ 30 รูปแบบควบคุมอัตโนมัติโดยคำนึงถึงรูปแวดล้อม	38
รูปที่ 31 รูปควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ	39
รูปที่ 32 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของ arduino กับส่วนควบคุมความสว่างของระบบ	41
รูปที่ 33 UI ของเว็บไซต์ https://www.anto.io/	42
รูปที่ 34 UI ของระบบควบคุมไฟถนน ที่ออกแบบบนแพลตฟอร์ม anto	43
รูปที่ 35 ของเว็บไซต์ https://www.anto.io/	43
รูปที่ 36 UI ของระบบควบคุมไฟถนน ที่ออกแบบบนแพลตฟอร์ม magellan.....	44
รูปที่ 37 UI ของเว็บไซต์ demo.thingsboard.io	44
รูปที่ 38 แผนที่ยืดทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ NB-IoT เพื่อหาค่าต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อได้.....	46
รูปที่ 39 แผนที่ยืดทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ LoRa เพื่อหาค่าต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อได้.....	47
รูปที่ 40 อุปกรณ์ของระบบควบคุม	48
รูปที่ 41 ภาพการทดสอบเวลาแฝงของระบบ NB-IoT Ais.....	54
รูปที่ 42 การทดสอบและเก็บผลผ่านปลั๊กมีเตอร์ของ Sharphy.....	55
รูปที่ 43 ตัวอย่างการทดสอบการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิผ่าน UT333	64

รูปที่ 44 ตัวอย่างการทดสอบการตอบสนองทำงานของระบบในรูปแบบต่างๆ.....	66
รูปที่ 45 แสดงรูปการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าใน 1 วัน ผ่านระบบ Magellan.....	69



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ และการตอบสนองความต้องการพลังงานหลายประเทศได้หันไปใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น เนื่องจากพลังงานจากฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด และการตระหนักถึงความสำคัญของสิ่งแวดล้อมที่มีมากขึ้นจากปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าของเชื้อเพลิงแบบฟอสซิล จาก [1] แสดงให้เห็นว่าทั่วโลกพลังงานกว่า 19 เพอร์เซ็นต์ที่ใช้ไปกับการส่องสว่างของไฟถนนสาธารณะ และในประเทศไทยพลังงานส่องสว่างของไฟถนนสาธารณะประมาณ 2 เพอร์เซ็นต์ [2] การส่องสว่างของไฟถนนสาธารณะมีเพื่อส่องสว่างให้ผู้ใช้งาน ทางเท้า ในเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่มืดได้เดินทางอย่างปลอดภัย มองเห็นถึงอันตรายได้ชัดเจนขึ้น การจัดการพลังงานที่ดีจะช่วยลดการใช้พลังงานในการแก้ปัญหาข้างต้นได้ โดยเฉพาะไฟถนนสาธารณะที่มีปริมาณการใช้สูง

จากข้างต้นการนำเทคโนโลยีเข้ามาจัดการพลังงานที่ใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้นในอนาคต อุปกรณ์ต่างๆจะมีความฉลาดขึ้นคือ สามารถสื่อสารกันเองได้ มีเซนเซอร์ในการตรวจวัด และส่วนประมวลผลการจัดการพลังงาน บางระบบอาจจะมีความเคการใช้พลังงานล่วงหน้าเพื่อการจัดการได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย เทคโนโลยีที่จะมีบทบาทมากสำหรับการจัดการพลังงานคือเทคโนโลยีสื่อสาร เป็นส่วนช่วยติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์เพื่อส่งข้อมูลหรือคำสั่งต่างๆที่ใช้ในการจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีสื่อสารที่มีการใช้ในปัจจุบันอย่างแพร่หลายคือ Zigbee, NB-IoT, LoRa จุดเด่นของเทคโนโลยีคือการใช้พลังงานที่ต่ำ อายุการใช้งานนาน การจัดการพลังงานจะเข้ามาอยู่ในทุกภาคส่วนและสอดคล้องกันจนเป็นเมืองอัตโนมัติ รวมทั้งไฟถนนสาธารณะด้วย

ระบบไฟถนนสาธารณะมีการพัฒนาเกิดขึ้นในหลายๆประเทศ มีลักษณะส่วนใหญ่ที่เปลี่ยนไปจากระบบเดิมคือ หลอดไฟเปลี่ยนเป็นหลอด LED ที่ประหยัดพลังงานมากกว่า อายุการใช้งานมากกว่าเดิม และสามารถปรับระดับความสว่างได้ มีการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เพื่อควบคุมระยะไกลและการส่งข้อมูลเพื่อประมวลผลจากส่วนกลาง มีเซนเซอร์คอยวัดรูปแบบแวดล้อมสำหรับการตัดสินใจในการเปิด-ปิด หรือหรี่ไฟให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมนั้นๆ จากงานวิจัย [3] แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าสาธารณะมีการให้งานที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานกว่าระบบเดิมมากถึง 70 เพอร์เซ็นต์

ในประเทศไทยเริ่มมีการพัฒนาระบบไฟถนนสาธารณะด้วยเช่นกัน [4] โดยความร่วมมือระหว่างไฟฟ้านครหลวงกับผู้เชี่ยวชาญจากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย จะเห็นได้ว่าการศึกษานำ

ระบบสื่อสารเข้ามาร่วมกับระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ โดยพิจารณาเปรียบเทียบระบบสื่อสาร Wi-Fi 2.4G, Wi-Fi 5G, PLC, RF ในส่วนติดต่อกับรีเลย์ที่ควบคุมดวงไฟ และระบบสื่อสาร ใยแก้วนำแสง, เซลลูลาร์ ในส่วนติดต่อกับระบบควบคุมทางไกล ผลการศึกษาระบบสื่อสารแต่ละระบบมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่นั้นๆ

จากระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะประเทศไทยยังจำเป็นต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และประกอบกับเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพในปัจจุบัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ ผ่านระบบสื่อสาร NB-IoT และ LoRa
2. เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบสื่อสาร NB-IoT และ LoRa

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ศึกษาผ่านชุดควบคุม Arduino เท่านั้น โดยคำนึงถึงระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ต้นแบบระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ ที่สื่อสารผ่านระบบเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa
2. ได้ศึกษาปัญหา และผลการทดสอบระบบสื่อสาร NB-IoT และ LoRa ของระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ

1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 7 บท โดยมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงนิยามที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ ระบบสื่อสาร NB-IoT และ LoRa

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบของระบบชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ และ
งบประมาณ

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 นิยามเกี่ยวข้อง

2.1 หลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าพื้นฐานทั่วไป

ค่าทางไฟฟ้าไฟฟ้าต่างๆ เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดมีสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน หากค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งนี้มีปริมาณที่สูงเกินขีดจำกัดของตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ สามารถเขียนสมการของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าในโดเมนเวลาได้ดังนี้

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2)$$

2.1.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power; P)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้านำไปใช้งานได้จริงทำให้เกิดงานในระบบ โดยที่จะเกิดกับโหลดประเภทตัวต้านทาน (Resistive Load) ของอุปกรณ์ไฟฟ้า และมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt; W) สามารถคำนวณได้จาก

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta \quad (3)$$

2.1.2 ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ

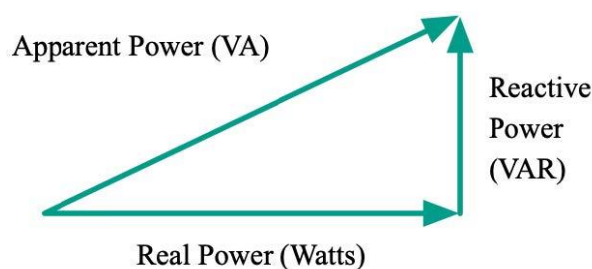
ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power; Q) เป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มาจากส่วนของสมการที่ใช้คำนวณ เกิดจากโหลดประเภทตัวเก็บประจุ (Capacitive Load) หรือตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Load) ในอุปกรณ์ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าส่วนที่โหลดรับเข้าไปและมีการจ่ายคืนสู่แหล่งจ่าย มีหน่วยเป็นวาร์ (VAR) สามารถเขียนสมการในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 4

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta \quad (4)$$

2.1.3 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power; S) คือค่าที่แสดงถึงกำลังไฟฟ้าโดยรวมทั้งหมดที่จ่ายให้กับวงจร มีหน่วยเป็นโวลต์แอมแปร์ (VA) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 5

$$S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$



รูปที่ 1 ค่าความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

2.1.4 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

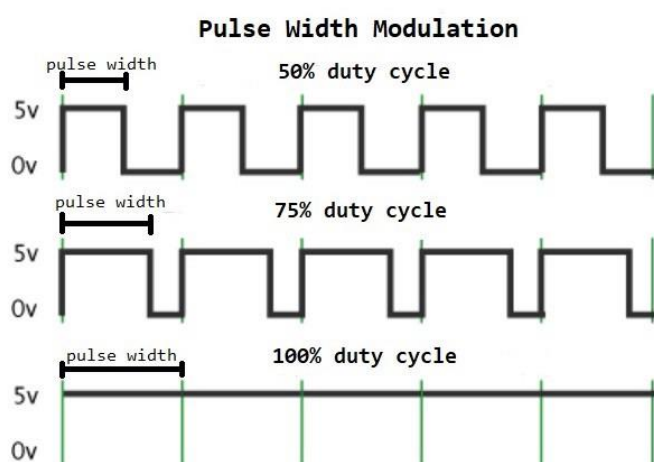
ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor; PF) คือพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวงจร สามารถแสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายังมีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าไรยิ่งทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเท่านั้น ซึ่งสามารถหาค่าได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงหารด้วยค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 6

$$PF = \cos \theta = \frac{P}{S} \quad (6)$$

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในโหลดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน สามารถพิจารณาโหลดออกได้เป็น 3 แบบคือ โหลดตัวต้านทาน (Resistive Load; R) โหลดตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Load; L) และโหลดตัวเก็บประจุ (Capacitive Load; C) โดยโหลดตัวต้านทานจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 1 และลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันจะมีมุมเฟสเดียวกัน แต่โหลดตัวเหนี่ยวนำ และโหลดตัวเก็บประจุจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากับ 1 โดยโหลดตัวเหนี่ยวนำนั้นจะมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชนิดล่าช้า (Lagging Power Factor) ซึ่งเป็นภาวะที่กระแสไฟฟ้ามีเฟสล้าหลังแรงดันไฟฟ้า ส่วนโหลดตัวเก็บประจุนั้นจะมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชนิดนำหน้า (Leading Power Factor) ซึ่งเป็นภาวะที่กระแสไฟฟ้ามีเฟสนำหน้าแรงดันไฟฟ้า

2.1.5 PWM

PWM หรือ Pulse Width Modulation คือสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่คงที่แต่ความกว้างของพัลส์เปลี่ยนแปลงได้ สามารถนำไปใช้ควบคุมอุปกรณ์ที่ต้องควบคุมด้วยสัญญาณ analog เช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์, การควบคุมความสว่างของหลอดไฟ ฯลฯ ในระบบ digital จะไม่สามารถควบคุมอุปกรณ์พวกนี้ได้จริงๆ เราจะต้องใช้ PWM ในการควบคุม โดยจะปรับสัดส่วนคาบเวลาของ High-Low (Duty cycle) ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 2 ตัวอย่างของสัญญาณ PWM

2.2 ความชื้น

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) คืออัตราส่วนของ Absolute Humidity ต่อ Absolute Humidity ที่เป็นไปได้สูงสุด (ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศปัจจุบัน) การอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์หมายความว่าอากาศเต็มไปด้วยไอน้ำและไม่สามารถกักเก็บน้ำหรือไอน้ำได้อีก ซึ่งที่ 100% RH ทำให้เกิดฝนได้ แต่ไม่ได้หมายความว่าความชื้นสัมพัทธ์ จะต้องเป็น 100 เปอร์เซ็นต์เพื่อให้ฝนตก

$$RH = \left(\frac{\text{ความหนาแน่นของไอน้ำ}}{\text{ความหนาแน่นของไอน้ำอิ่มตัว}} \right) \times 100 \quad (7)$$

2.3 RSSI Received Signal Strength Indicator (RSSI)

ในระบบ IEEE 802.11 RSSI คือความแรงของสัญญาณที่ได้รับสัมพัทธ์ในรูปแวลต์ลอัมไร้สายในหน่วย dBm (decibel-milliwatt) เป็นหน่วยที่ใช้วัดค่า RSSI ที่สัมพันธ์กับกำลัง 1 milliwatt

(mW) RSSI เป็นตัวบ่งชี้ระดับพลังงานที่ได้รับจากวิทยุที่รับหลังจากเสาอากาศและการสูญเสียสายเคเบิลที่เป็นไปได้ ดังนั้น ยิ่งค่า RSSI ยิ่งสูง สัญญาณยิ่งแรงข้อผิดพลาดของการสื่อสารน้อย

$$x = 10 \log \frac{P}{1mW} \text{ dBm} \quad (8)$$

2.4 นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแสงสว่าง

แสงเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถทำให้พื้นที่ที่แสงตกกระทบสว่าง ปริมาณพลังงานแสงที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรืออัตราการใช้พลังงาน เรียกว่า ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) มีหน่วยวัดเป็น ลูเมน (Lumen, lm)

2.4.1 ความสว่าง

ความสว่าง คือ ปริมาณแสงหรือฟลักซ์การส่องสว่างที่ตกลงบนพื้นผิวต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ใช้สัญลักษณ์เป็น E มีหน่วยเป็น lux หรือ lm/m^2 โดยแสดงได้ดังสมการ

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (9)$$

2.4.2 ความส่องสว่าง (Luminance)

ความส่องสว่าง คือ ความเข้มข้นการส่องสว่างที่สะท้อนจากพื้นที่หนึ่งหน่วยของพื้นผิวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ใช้สัญลักษณ์เป็น L มีหน่วยเป็น cd/m^2 แสดงได้ดังสมการ

$$L = \frac{I}{A_{\perp}} \quad (10)$$

โดย A_{\perp} คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแสงตกกระทบ

2.2.3 ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity)

ความเข้มส่องสว่าง คือความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างในทิศทางหนึ่ง (ปริมาณแสงต่อมุมตัน) มีสัญลักษณ์เป็น I มีหน่วยเป็น candela (cd) แสดงได้ดังสมการ

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (11)$$

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)

ค่าความสว่างของจุดบนพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแสงตกกระทบมีค่าเท่ากับกับความเข้มส่องสว่างในทิศทางที่ไปยังจุดนั้นหารด้วยกำลังสองของระยะทางระหว่างจุดนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง ดังสมการ

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (12)$$

2.4.4 ข้อกำหนดด้านสมรรถนะการส่องสว่างจากกรมหลวง

เกณฑ์การส่องสว่างไฟถนน เป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับประสิทธิภาพ ในการออกแบบไฟถนน ผู้ออกแบบได้คำนึงถึงด้านความสว่างที่ใช้ค่าความสว่าง (luminance) ความสม่ำเสมอของความ

ส่องสว่าง และความสม่ำเสมอในแต่ละช่องทางวิ่งของความส่องสว่าง ตลอดจนปัจจัยที่ก่อให้เกิดความจ้าตา เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ การใช้ค่าความส่องสว่างนี้ได้ รวมไปถึงเกี่ยวกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของผิวถนนชนิดต่างๆเข้าไปด้วย

ตารางที่ 1 มาตรฐานความส่องสว่างของกรมทางหลวงตามประเภทถนน

ประเภทถนน	ความส่องสว่างเฉลี่ยในแนวนอนต่ำสุด (lx)		
	พื้นที่กลางเมือง	พื้นที่ในเมือง	พื้นที่ชนบท
มอเตอร์เวย์	21.5	15.0	10.75
ทางแยก	21.5	21.5	15.0
ทางสายหลัก	21.5	13.0	9.7
ทางสายรอง	13.0	9.7	6.5
ทางสายท้องถิ่น	9.7	6.5	2.1

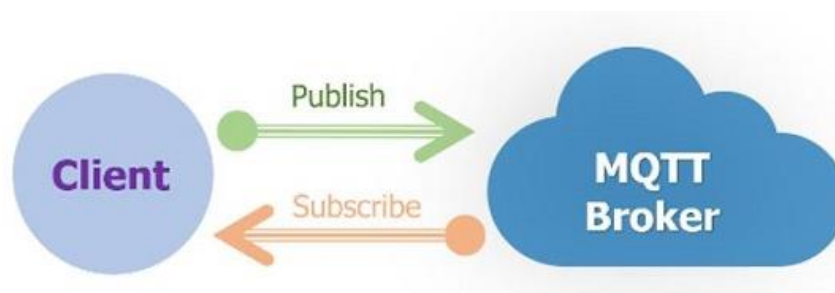
2.5 UDP

UDP (User Datagram Protocol) คือ หนึ่งใน Protocol หลัก ของชุด Protocol อินเทอร์เน็ต โพรโทคอลที่ถูกออกแบบในปี 1980 UDP โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถส่งข้อความในกรณีนี้เรียกว่า Datagram (ดาต้าแกรม) ไปยังโฮสต์อื่นๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล (IP Address) ไม่จำเป็นต้องมีการสื่อสารก่อนเพื่อตั้งค่าช่องทางการสื่อสารหรือเส้นทางข้อมูล

UDP ใช้รูปแบบการสื่อสารแบบไร้สายที่เรียบง่ายโดยมีกลไกโพรโทคอลต่ำสุด ไม่มีบทสนทนาเกี่ยวกับการแสดซึ่งดังนั้นจึงทำให้โปรแกรมของผู้ใช้ไม่สามารถเชื่อถือได้กับเครือข่ายต้นแบบ ไม่มีการรับประกันการจัดส่งการสั่งซื้อหรือการป้องกันซ้ำ

2.6 MQTT

MQTT ย่อมาจาก Message Queuing Telemetry Transport เป็นโพรโทคอลสำหรับใช้ในสื่อสารข้อมูลระหว่าง Machine to Machine (M2M) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1999 ออกแบบมาเพื่อใช้สื่อสารในระบบเครือข่ายที่มีทรัพยากรค่อนข้างจำกัด ใช้งานแบนด์วิดท์ต่ำ สามารถสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ และถ้ามองในด้านที่เกี่ยวกับ Internet of Things จะสามารถประยุกต์ให้อุปกรณ์ต่างๆ เชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายของอินเทอร์เน็ตได้ โดย MQTT ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ



รูปที่ 3 การสื่อสารแบบ MQTT

2.6.1 MQTT Client

MQTT Client เป็นส่วน publish ข้อมูลต่างๆ ขึ้นไปยัง MQTT Broker และสามารถ Subscribe ข้อมูลต่างๆจาก MQTT Broker ผ่านทาง TCP/IP Protocol ถ้ามองในมุมมองของ Internet of Things (IoT) อุปกรณ์จำพวกนี้จะเป็น Device ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายได้ เช่น บอร์ด Arduino Uno Wifi 2, บอร์ด ESP32, บอร์ด ESP8266, บอร์ด Raspberry Pi, เว็ปไซต์, สมาร์ทโฟน

2.6.2 MQTT Broker

MQTT Broker หรือ MQTT Server เป็นซอฟต์แวร์สำหรับรับข้อมูลจาก MQTT Client ที่ได้ publish เข้ามาและสามารถ publish ข้อมูลจาก MQTT Broker ไปยัง MQTT Client ที่ได้ Subscribe ข้อมูลไว้ได้ หากมองในมุมมองของ Internet of Things อุปกรณ์นี้อาจจะเป็น Cloud Server ของค่ายต่างๆ เช่น CloudMQTT, NETPIE, Azure, AWS เป็นต้น หรือใช้ Single Board Computer เช่นบอร์ด Raspberry Pi, LattePanda, Beagle Bone, nanoPi, อื่นๆ

บทที่ 3 วรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1 ระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ

ระบบไฟถนนสาธารณะ คือระบบส่องสว่างของไฟถนน และทางเท้าในพื้นที่สาธารณะ เพื่อให้ผู้ใช้ถนนและทางเท้าได้มีความรู้สึกปลอดภัยในการเดินทาง มองเห็นถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ รวมทั้งปรับปรุงทัศนียภาพแวดล้อมให้เหมาะสม ค่าความสว่างของทางเท้าและถนนมีเกณฑ์กำหนดคุณภาพจากองค์การระหว่างประเทศจากระดับความสว่าง และความสม่ำเสมอของความสว่าง ระบบไฟฟ้าสาธารณะของประเทศไทยในปัจจุบัน [4] จะเริ่มเปิดโคมไฟส่องสว่างในเวลาใกล้ค่ำ และปิดโคมไฟเมื่อใกล้รุ่ง โคมไฟถนนสาธารณะของกรุงเทพมหานคร จะควบคุมการเปิดปิดโคมไฟโดยผ่าน 1. โพรโตคอลที่วัดแสงถ้าค่าต่ำกว่ากำหนดก็จะส่งผ่านวงจรเพื่อเปิดโคมไฟ 2. สวิตช์นาฬิกาตั้งเวลา 3. ด้วยมือ ข้อเสียไม่สามารถควบคุมการเปิดปิดในระยะไกล การทำงานมีรูปแบบคงที่ตลอดเวลา และไม่สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของโคมไฟในเวลาขณะนั้นๆได้

ระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ คือระบบไฟถนนสาธารณะที่ถูกพัฒนาขึ้นให้ดีกว่าเดิม สามารถควบคุมจากทางไกลได้ มีประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าเดิม ประหยัดพลังงาน และสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของโคมไฟถนนสาธารณะได้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1. โคมไฟถนนสาธารณะ 2. แพลตฟอร์มของระบบสื่อสาร 3. ระบบควบคุมกลาง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 องค์ประกอบหลักของระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ

3.1.1 โคมไฟถนนสาธารณะ

เป็นส่วนปลายทางที่ทำหน้าที่ให้แสงสว่างอยู่บนเสาไฟกับผู้ใช้พื้นที่สาธารณะ โดยแต่ละระบบของไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติจะมีส่วนประกอบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งานหรือควบคุมในแต่ละโคมตามรูปที่ 5 โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วย

- หลอดไฟ คือส่วนที่ทำหน้าที่ให้แสงสว่างแก่ผู้ใช้พื้นที่สาธารณะในส่วนนั้นๆ หลอดไฟที่ใช้อาจเป็น LED จาก [5] แสดงให้เห็นว่าประหยัดพลังงานมากกว่าหลอดชนิดอื่น มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ผลิตรคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถหรี่แสงตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมต่างๆ
- เซ็นเซอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่วัดค่าต่างๆของสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆเสาไฟ และส่งข้อมูลต่อไปยังส่วนประมวลผลสำหรับการวิเคราะห์ในการควบคุมแสงสว่าง ชนิดและจำนวนของเซ็นเซอร์ขึ้นอยู่กับระบบไฟถนนสาธารณะที่ออกแบบ
- ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือส่วนประมวลผลย่อยที่ทำหน้าที่วิเคราะห์ควบคุมเปิดปิดหรือหรี่ดวงไฟให้เหมาะสม หรือทำตามคำสั่งจากส่วนกลาง เป็นตัวกลางรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ส่งข้อมูลไปยังมอดูลที่ใช้ในการสื่อสารเพื่อส่งต่อไปยังส่วนประมวลผลส่วนกลาง
- Communication module คือส่วนทำหน้าที่ติดต่อกับส่วนประมวลผลกลาง ผ่านระบบแพลตฟอร์มสื่อสาร ส่งข้อมูลที่รับจากเซ็นเซอร์ และสถานะของโคมไฟสาธารณะไปยังส่วนกลาง และรับคำสั่งควบคุมดวงไฟจากส่วนกลาง

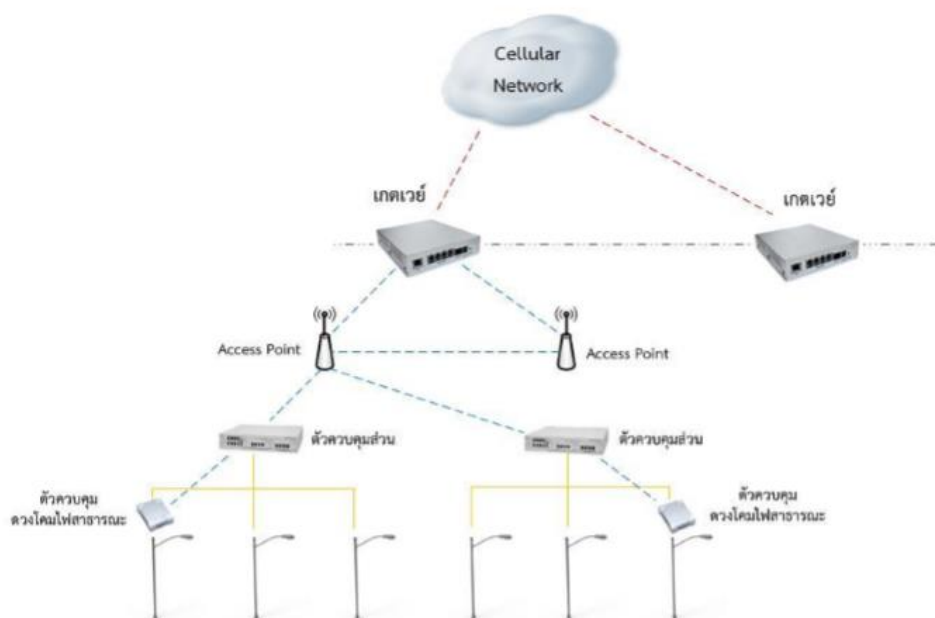


รูปที่ 5 ตัวอย่างโคมไฟถนนสาธารณะ

3.1.2 แพลตฟอร์มสื่อสาร

คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางของระบบสื่อสารระหว่างโคมไฟสาธารณะกับส่วนประมวลผลกลาง แพลตฟอร์มของระบบสื่อสารนั้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ระบบที่เลือกใช้ หรือความเหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ โดยภาพรวมดังรูปที่ 2 จะมี access point ที่เป็นตัวกลางจตุรรวมของโคมไฟ

สาธารณะย่อยและส่งต่อไปยัง core network ที่เป็นเครือข่ายของระบบ และเชื่อมต่อกับ gateway เพื่อส่งขึ้น cloud service หรือส่วนประมวลผลกลางของระบบนั้นๆ



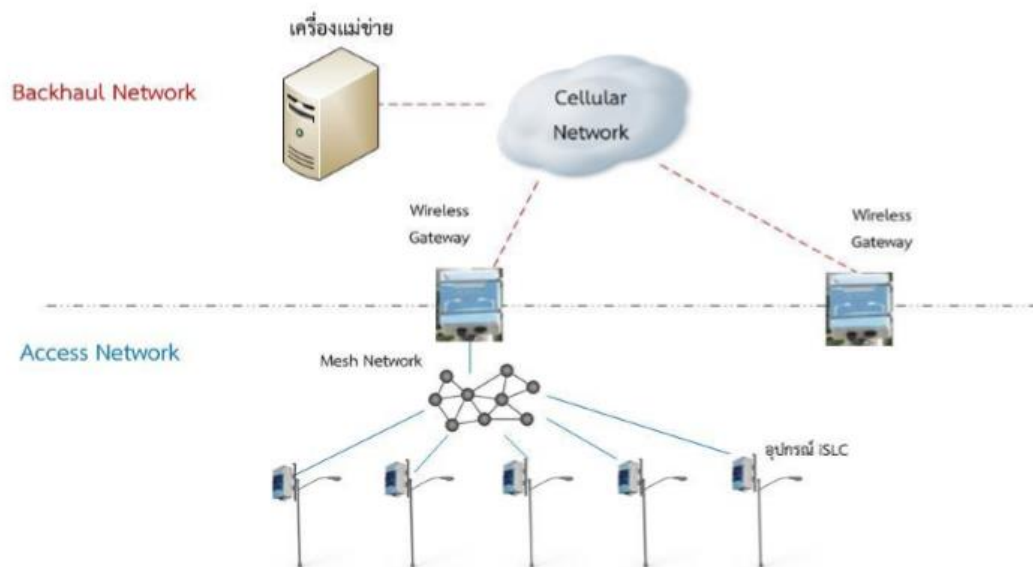
รูปที่ 6 ตัวอย่างระบบสื่อสารไฟถนนสาธารณะในไทยที่ถูกพัฒนาขึ้นจาก [4]

3.1.3 ส่วนประมวลผล

คือส่วนประมวลผลรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากโคมไฟถนนสาธารณะทั้งหมด ให้ประหยัดพลังงานเหมาะสมสอดคล้องกันทั้งระบบ และสั่งเปิดปิดหรือหรี่ดวงไฟไปยังโคมไฟถนนสาธารณะในแต่ละดวงหรือแต่ละกลุ่มขึ้นอยู่กัระบบนั้นๆ หรือสามารถสั่งคำสั่งได้โดยตรง สามารถตรวจสอบการทำงานของโคมไฟแต่ละดวงได้ การทำงานทั้งหมดสามารถทำผ่านระบบ GUI

3.1.4 งานวิจัยระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะของประเทศไทยที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน

การไฟฟ้านครหลวงได้มีความร่วมมือกับทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับงานวิจัยและพัฒนาาระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะโดยนำเทคโนโลยีสื่อสารเข้ามาช่วยในการควบคุมการทำงานของระบบไฟถนนสาธารณะเดิม ระบบสื่อสารที่ถูกนำมาใช้เป็นระบบสื่อสารแบบ 2 ทางและการทำงานแบบเวลาจริง (real time) เพื่อควบคุมเปิด/ปิดและหรี่ไฟให้เหมาะสมกับการใช้งาน, ติดตามการทำงานและระบุสิ่งผิดปกติได้จากส่วนกลาง, สามารถอ่านค่าและบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้ ระบบไฟถนนสาธารณะที่ถูกพัฒนาขึ้นมีโมเดลเป็นดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะของประเทศไทย จาก [4]

ระบบการควบคุมไฟถนนสาธารณะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

3.1.5 ระบบควบคุม (Central Control System) หรือเครื่องแม่ข่าย (server)

คือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมสำหรับการบริหารจัดการควบคุมระบบไฟถนนสาธารณะ การจัดการนี้เป็นส่วนกลางที่บริหารควบคุมระบบไฟถนนสาธารณะทั้งหมดโดยสั่งงานทางไกลผ่านระบบเครือข่ายสื่อสารของระบบไฟถนนสาธารณะ

3.1.6 ระบบควบคุมเฉพาะพื้นที่ (Local Control System)

คืออุปกรณ์ควบคุมที่ติดตั้งบริเวณโคมไฟถนนสาธารณะ การทำงานควบคุมสามารถควบคุมโคมไฟถนนสาธารณะทีละ 1 ดวง หรือหลายๆดวงพร้อมกันขึ้นอยู่กับระบบที่ออกแบบ การควบคุมนั้นจะเป็นการทำงานโดยสั่งงานไปยังรีเลย์ ระบบไฟถนนสาธารณะทั้งหมดนั้นประกอบด้วยระบบควบคุมเฉพาะพื้นที่หลายๆส่วนที่จะถูกสั่งการจากระบบควบคุมอีกที

3.2 ระบบสื่อสารในระบบไฟถนนสาธารณะของงานวิจัย

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนตามลักษณะการใช้งานของระบบไฟถนนสาธารณะได้แก่ 1. Backhaul Network ส่วนสื่อสารระหว่างเครื่องแม่ข่ายกับเกตเวย์ 2. Access Network ส่วนสื่อสารระหว่างเกตเวย์กับโหนด

3.2.1 Backhaul Network

คือระบบในส่วนที่ให้การสื่อสารระหว่างเครื่องแม่ข่ายกับเกตเวย์ ที่จำนวนสายเชื่อมโยง (link) มีจำนวนไม่มาก แต่ระยะสำหรับการสื่อสารนั้นมีระยะที่ไกลและครอบคลุมภายในระยะที่เกตเวย์ของระบบไฟถนนสาธารณะทำงานอยู่ เทคโนโลยีสื่อสารที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยส่วนนี้คือ เซลลูลาร์และใยแก้วนำแสง

3.2.2 Access Network

คือระบบในส่วนที่ให้การสื่อสารระหว่างเกตเวย์กับโคมไฟถนนสาธารณะ และการสื่อสารระหว่างตัวกันเองของโคมไฟถนนสาธารณะ การเชื่อมโยงจำนวนมากกับโคมไฟถนนสาธารณะในบริเวณใกล้เคียง การเชื่อมโยงที่ออกแบบเป็นลักษณะโครงสร้างเครือข่ายแบบ Mesh จะทำให้มีระยะทางและความเชื่อถือได้ของระบบที่สูง เทคโนโลยีสื่อสารที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยในส่วนนี้คือ Power Line Communication (PLC), Zigbee 2.4GHz, Wi-Fi 5GHz

3.2.3 เกตเวย์

คือตัวกลางของการสื่อสาร 2 ระบบทำหน้าที่เชื่อมต่อในส่วน Backhaul Network กับ Access Network เข้าด้วยกัน ตัวเกตเวย์นั้นจะต้องมีความสามารถในการสื่อสารทั้ง 2 ระบบและแปลงระบบสื่อสารหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งได้ทั้งไปและกลับ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงข้อดี-ข้อเสียของระบบสื่อสารไฟถนนสาธารณะจากงานวิจัย [4]

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
Access network		
ระบบสื่อสาร PLC	<ul style="list-style-type: none"> - ติดตั้งง่ายจากสายไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่แล้ว - เหมาะสมกับระบบเนื่องจากคอมไฟถนนสาธารณะมีการเชื่อมต่อกับสายไฟอยู่แล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถส่งผ่านหม้อแปลงได้ - ยังไม่ได้ใช้งานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในไทยมากนัก
Zigbee 2.4GHz	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูก ติดตั้งง่าย - มีความเชื่อถือได้สูงเนื่องจากเป็นระบบ mesh - มีผลิตภัณฑ์ให้เลือกใช้หลากหลายในท้องตลาด 	<ul style="list-style-type: none"> - โดรนสัญญาณรบกวนได้ง่าย - มีข้อจำกัดด้านจำนวนโนด ปลายทางใน 1 โครงข่าย และข้อจำกัดด้านจำนวน Hop ในการสื่อสาร
Wi-Fi 5GHz	<ul style="list-style-type: none"> - ติดตั้งง่าย มีความยืดหยุ่น - มีปัญหาด้านการรบกวนน้อยเนื่องจากย่าน 5GHz มีการใช้งานน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์หลากหลาย ราคาสูง
Backhaul Network		
ระบบสื่อสารแบบเซลลูลาร์	<ul style="list-style-type: none"> - การลงทุนครั้งแรกต่ำ - สามารถติดตั้งใช้งานได้รวดเร็ว - ไม่ต้องดูแลรักษาโครงข่ายด้วยตัวเอง - รองรับการขยายระบบ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถจัดการระบบสื่อสารเองได้ - เสียค่าบริการระบบรายเดือน - มีความปลอดภัยของระบบต่ำกว่าระบบอื่น
ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง	<ul style="list-style-type: none"> - แบนด์วิธกว้าง - มีความปลอดภัยและเชื่อถือได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งที่สูงและค่าบำรุงรักษาที่สูง

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบของระบบสื่อสาร จะเห็นได้ว่าการใช้งานระบบสื่อสารในส่วน Access network เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ Zigbee น่าจะมีความเหมาะสมและส่วน Backhaul Network การสื่อสารแบบระบบสื่อสารแบบเซลลูลาร์ มีความเหมาะสม แต่ระบบสื่อสารของ Zigbee มีข้อจำกัดด้านจำนวนอุปกรณ์ปลายทางของระบบสื่อสาร และการรบกวน

ของสัญญาณได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาเทคโนโลยีสื่อสารอื่นที่อาจจะเหมาะสมมากกว่าตามที่จะกล่าวต่อไป

3.3 ระบบสื่อสารที่พิจารณาสำหรับระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ

ระบบสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟถนนสาธารณะอัตโนมัติ เป็นเทคโนโลยีสื่อสารที่มีจุดเด่นของเทคโนโลยีชนิดนี้คือ การสื่อสารแบบ 2 ทาง, อัตราการส่งข้อมูลต่ำ, ราคาถูก, ประหยัดพลังงาน โดยที่เทคโนโลยีสื่อสารที่ถูกพัฒนาขึ้นในปัจจุบันนั้นมีจำนวนมากและคุณสมบัติในแต่ละส่วนแตกต่างกัน การเลือกใช้เทคโนโลยีสื่อสารให้เหมาะสมต่อระบบก็เป็นสิ่งที่จำเป็น เทคโนโลยีที่จะพิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้คือ LoRa, NB-IoT

3.3.1 LoRa

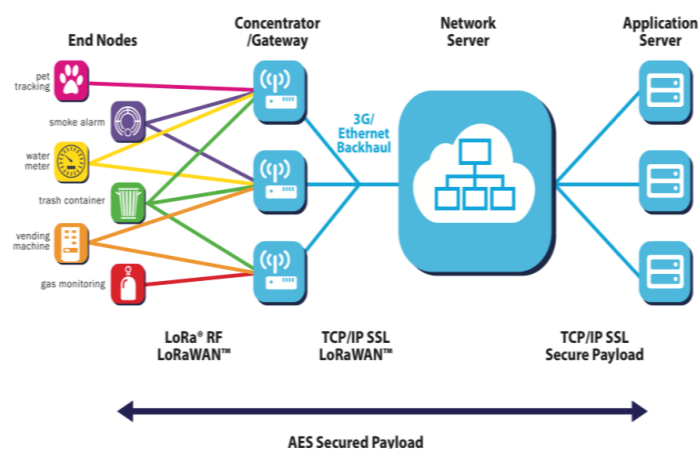
ย่อมาจาก Long Range [6] เป็นเทคโนโลยีสื่อสารโดยใช้เทคนิค Proprietary Spread Spectrum technology ในการมอดูเลตที่ถูกพัฒนาจาก Semtech Corporation การสื่อสารถูกกำหนด LoRaWAN Protocol โดย LoRa Alliance ย่านความถี่ที่สามารถใช้ได้ในประเทศไทยคือ 433 MHz และย่านความถี่ 920-925 MHz โดยไม่ติด licensed กำหนดโดย กสทช. [7] คุณสมบัติของ LoRa คือ

- ความแรงต่ำสุดของเครื่องลูกข่ายที่ใช้งานได้ (Sensitivity) คือ -137 dBm
- ระยะสัญญาณสามารถส่งได้ไกลถึง 15 km
- กำลังที่ใช้ส่งสัญญาณต่ำ กินไฟน้อย
- ราคาถูก มีหลายยี่ห้อให้เลือกใช้ในตลาด

เทคโนโลยีสื่อสาร LoRa มีการกำหนดโพรโทคอลการสื่อสารและสถาปัตยกรรมโครงข่าย LoRaWAN (LoRa WIDE Area Network) ซึ่งสถานีฐาน (Base Station) หรือเกตเวย์ที่ใช้พลังงานต่ำ (LPWAN gateways) จะถูกใช้สำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง (End Devices) กับโครงข่ายหลัก (Core Network) โดยแต่ละเกตเวย์จะส่งต่อชุดแพ็คเกจข้อมูลที่ได้รับจาก End-node ไปยังเครือข่ายเซิร์ฟเวอร์บนคลาวด์ผ่านระบบเชื่อมโยงแบ็คฮอว์ล (backhaul) ต่าง ๆ เช่น เซลลูลาร์ (Cellular), อีเทอร์เน็ต (Ethernet), เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic), ดาวเทียม (Satellite) และ Wi-Fi เป็นต้น อุปกรณ์ปลายทางอย่างเซ็นเซอร์สามารถสื่อสารกับเกตเวย์หนึ่งหรือหลายเกตเวย์ก็ได้ผ่านการสื่อสาร LoRa แบบต้นทางถึงปลายทางโดยตรงหรือ Single-hop ในขณะที่เกตเวย์ทั้งหมดถูกเชื่อมต่อ

กับเครือข่ายเซิร์ฟเวอร์หลักผ่านการเชื่อมต่อด้วยมาตรฐาน IP โดยที่ LoRaWAN สามารถแบ่งส่วนประกอบการใช้งานได้เป็น 4 ส่วน ตามรูปที่ 8 ได้แก่

1. End-Devices หรืออุปกรณ์ต่างๆ เช่น Sensor เป็นต้น
2. Concentrator/Gateway หรือจุดเชื่อมต่อของเครือข่าย
3. Network Server หรือระบบเครือข่าย
4. Application Server หรือระบบประมวลข้อมูล



รูปที่ 8 ระบบการทำงานของ LoRaWAN

โดยแต่ละ LoRaWAN Gateway นั้นสามารถรับส่งข้อมูลกับ Endpoint Module ได้หลายอันพร้อมๆกัน โดยขึ้นอยู่กับอัตราการรับส่งข้อมูลและจำนวน Channel ที่ตัว Gateway รับผิดชอบ

3.3.2 NB-IoT

ย่อมาจาก Narrow Band Internet of Things [8] ถูกพัฒนามาจาก 3GPP ผู้กำกับดูแลมาตรฐานด้านการสื่อสารบนโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบุใน Release ที่ 3 ของ 3GPP ใน เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2559 โดยการใช้งานที่ย่านความถี่เดียวกับ LTE ที่ถูกออกแบบให้ใช้กำลังต่ำ ความเร็วในการสื่อสารและการส่งข้อมูลต่ำด้วย โดยที่ประเทศไทยมีบริษัทเครือข่ายสื่อสารเคลื่อนที่ให้บริการ คือ AIS และ True

คุณสมบัติของ NB-IoT คือ

- กำลังที่ใช้ส่งสัญญาณต่ำ อุปกรณ์สามารถใช้ได้ยาวนานถึง 10 ปีต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง
- ใช้แบนด์วิธของสัญญาณน้อย

- สามารถทำงานร่วมกับเครือข่าย LTE ได้
- ระยะสัญญาณสามารถส่งได้ไกลกว่า 10 km
- สามารถใช้ได้ทั้งในอาคาร และนอกอาคาร

เทคโนโลยีสื่อสาร NB-IoT เป็นการเชื่อมต่อข้อมูลกับอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านโครงข่ายของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทั้งนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายสามารถเลือกใช้ช่องสัญญาณร่วมกับระบบ LTE (4G) ได้ทั้งหมด 3 โหมดด้วยกัน ได้แก่ Stand alone, Guard band และ In-band ในฝั่งของเซิร์ฟเวอร์ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IoT (Application Server - AS) มาตรฐาน NB-IoT เปิดให้ผู้ให้บริการสามารถเลือกได้ว่าจะเปิดให้บริการเชื่อมต่อ IP โดยตรงหรือจะเชื่อมต่อผ่านเกตเวย์ของผู้ให้บริการ (Service Capability Exposure Function - SCEF) ทำให้อุปกรณ์ขนาดเล็กไม่ต้องรองรับ IP ด้วยตัวเอง โดย NB-IoT เรียกกระบวนการส่งข้อมูลแบบไม่ใช่ IP นี้ว่า Non-IP Data Delivery (NIDD)

จากตารางที่ 3 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีสื่อสาร LoRa และ NB-IoT แสดงให้เห็นด้านคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical features) ในแต่ละพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งทั้งเทคโนโลยี LoRa และ NB-IoT ต่างก็มีข้อได้เปรียบเสียเปรียบต่างกัน

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของเทคโนโลยีสื่อสาร LoRa และ NB-IoT [9]

พารามิเตอร์ (Parameters)	เทคโนโลยี LoRa	เทคโนโลยี NB-IoT
Spectrum	Unlicensed	Licensed LTE bandwidth
Modulation	CSS	QPSK
Bandwidth	500 kHz - 125 kHz	180 kHz
Peak Data Rate	290 bps - 50 kbps (DL/UL)	DL:234.7 kbps; UL:204.8 kbps
Link Budget	154 dB	150 dB
Power efficiency	Very High	Medium High
Mobility	Better than NB-IoT	No connected mobility (only idle mode reselection)
Energy Efficiency	>10 years battery life of devices	>10 years battery life of devices

พารามิเตอร์ (Parameters)	เทคโนโลยี LoRa	เทคโนโลยี NB-IoT
Area Traffic Capacity	Depends on gateway type	40 devices per household, ~55k devices per cell
Interference immunity	Very High	Low
Standardization	De-facto Standard	3GPP Rel.13 (planned)



บทที่ 4 การออกแบบชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนน

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa ที่ใช้สำหรับทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1.การออกแบบส่วนของการสื่อสาร, 2. การออกแบบฮาร์ดแวร์ และ 3.การทำงานและซอฟต์แวร์

โดยชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa ที่ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันการทำงานดังนี้

- ควบคุมการเปิด / ปิดและหรี่แสงในระดับที่ต้องการได้ จากศูนย์ควบคุมส่วนกลาง
- ตรวจสอบ ติดตาม และระบุความผิดปกติของโคมไฟถนนที่เกิดขึ้นในระบบ ได้จากศูนย์ส่วนกลาง
- อ่านค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า
- ควบคุมสังเกตการณ์และแสดงผลผ่านระบบเว็บเสิร์ฟเวอร์

4.1 การออกแบบส่วนของการสื่อสาร

จากศึกษาเทคโนโลยีสื่อสารที่เลือกใช้ NB-IoT มีผู้ให้บริการสัญญาณในไทยดังนี้ ในส่วนของ NB-IoT มีเครือข่าย True และ AIS ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทุกจังหวัด จากการตรวจสอบพื้นที่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่ามีสถานีฐานที่ให้บริการ NB-IoT จากผู้ให้บริการทั้ง 2 ราย ครอบคลุมในบริเวณที่ใช้ในการทดสอบ อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการสื่อสารจากผู้ให้บริการแต่ละรายที่พัฒนาออกมาขาย มีดังต่อไปนี้ 1. AIS: DEVIO NB-SHIELD 2. True: True NB-IoT Developer Board ซึ่งอุปกรณ์ทั้ง 2 มีเบ้ารองรับการใช้งาน Arduino ทำให้สามารถเชื่อมต่อการทำงานของเซ็นเซอร์ต่างๆได้ง่าย และสามารถใช้งานโดยการเรียกใช้งานคลังโปรแกรม (Library) ส่งข้อมูลขึ้นคลาวด์เว็บไซต์



รูปที่ 9 True NB-IoT Developer Board

True NB-IoT board (รูปที่ 9) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสาร NB-IoT ของบริษัท True โดยมีคุณสมบัติดังนี้

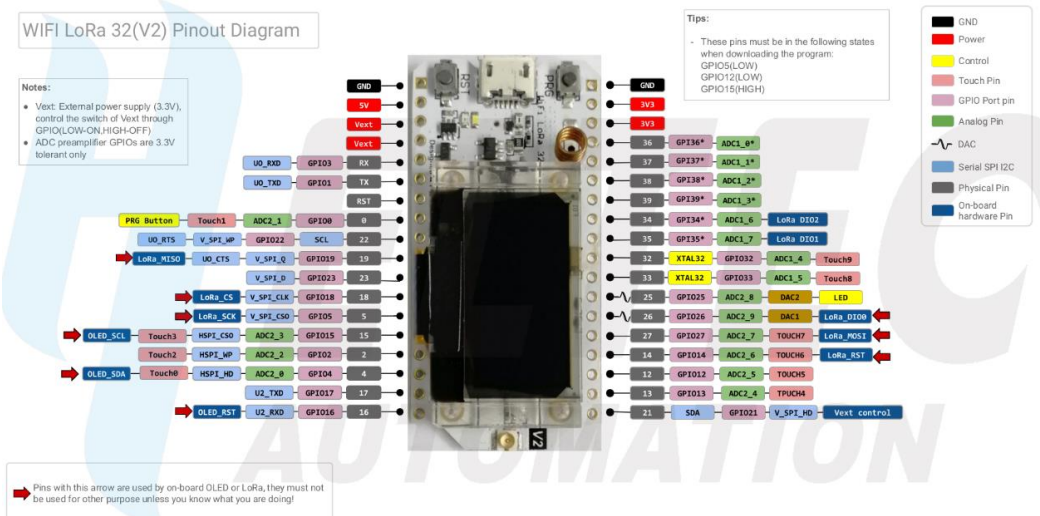
- ออกแบบโดยใช้โมดูลสื่อสาร Quectel BC95
- รองรับความถี่ 900 MHz ในระบบ LTE-Cat.NB1
- รองรับความเร็วของการสื่อสารสูงสุด 24 kbps (download) และ 15.625 kbps (upload)
- รองรับโพรโทคอล UDP, CoAP, IPv4 ตามมาตรฐานของ NB-IoT
- สามารถเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi
- True NB-IoT Developer Board สำหรับกลุ่มนักประดิษฐ์และนักพัฒนา ราคาอุปกรณ์ 1,150 บาท) พร้อมกับสิทธิในการรับส่งข้อมูลไม่จำกัดบนเครือข่าย NB-IoT ฟรีนาน 1 ปี (มูลค่าปีละ 330 บาทต่ออุปกรณ์)



รูปที่ 10 AIS DEVIO NB-SHIELD

AIS DEVIO NB-SHIELD I (รูปที่ 10) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสาร Nb-IoT ของบริษัท AIS โดยมีคุณสมบัติดังนี้

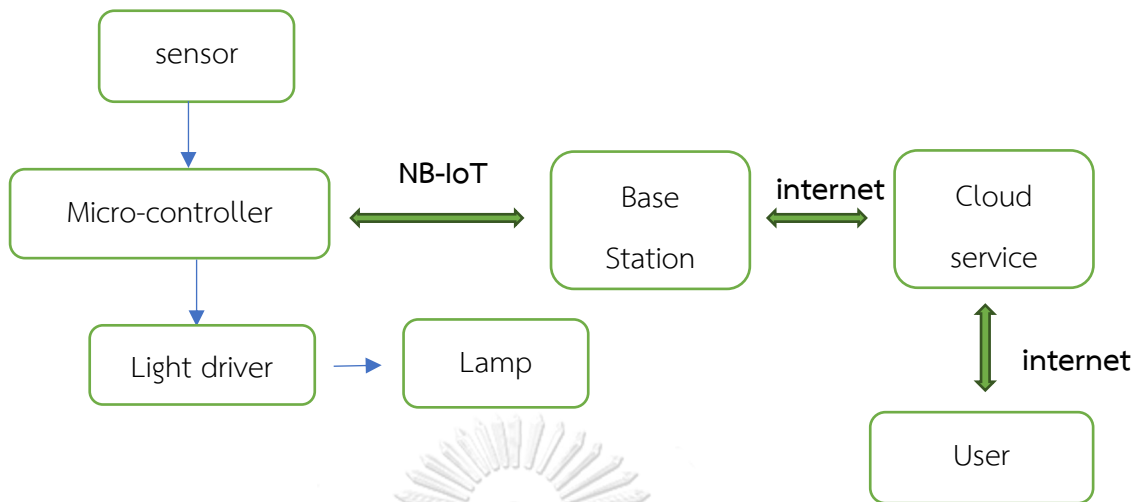
- ออกแบบโดยใช้โมดูลสื่อสาร Quectel BC95
- รองรับความถี่ 900 MHz ในระบบ LTE-Cat.NB1
- รองรับความเร็วของการสื่อสารสูงสุด 24 kbps (download) และ 15.625 kbps (upload)
- รองรับโพรโทคอล UDP, CoAP
- DEVIO NB-SHIELD ราคาอุปกรณ์ 1,564.50 บาท (รวม VAT) ซึ่งรวมค่าบริการ IoT ฟรี 1 ปี (มูลค่าปีละ 374.50 บาทต่ออุปกรณ์) [8]
- sensitivity -131 dBm



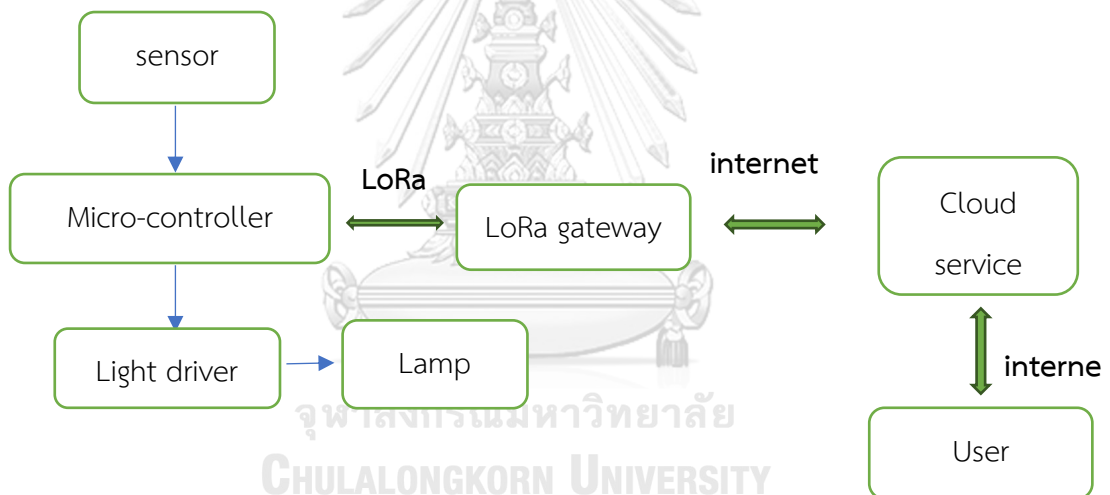
รูปที่ 11 Heltec WiFi Lora Kit 32 V2

Heltec WiFi Lora Kit 32 เป็นบอร์ดพัฒนา IoT ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ออกแบบและผลิตโดย Heltec Automation ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบูรณาการอย่างสูงโดยใช้ ESP32 + SX127x มีฟังก์ชัน Wi-Fi, BLE, LoRa รวมถึงระบบจัดการแบตเตอรี่ Li-Po และหน้าจอ 0.96" OLED รวมอยู่ด้วย โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ไมโครโพรเซสเซอร์ ESP32 (คูอัลคอร์ 32 บิต MCU + ULP core) พร้อมชิป LoRa SX1276/SX1278
- อินเทอร์เฟซ Micro USB พร้อมตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า
- อินเทอร์เฟซแบตเตอรี่ออนบอร์ด SH1.25-2, ระบบจัดการแบตเตอรี่ลิเธียมในตัว (การจัดการการชาร์จและการคายประจุ, การป้องกันการชาร์จไฟเกิน, การตรวจจับพลังงานแบตเตอรี่, การสลับอัตโนมัติของพลังงาน USB / แบตเตอรี่)
- WiFi ในตัว, LoRa, การเชื่อมต่อเครือข่าย Bluetooth สามตัว, Wi-Fi ออนบอร์ด, เส้าอากาศโลหะ 3D 2.4GHz เฉพาะ Bluetooth,
- รองรับการพัฒนากับ Arduino



รูปที่ 12 แผนภาพรวมการสื่อสารของระบบควบคุมไฟถนน บนแพลตฟอร์ม NB-IoT



รูปที่ 13 แผนภาพรวมระบบควบคุมไฟถนน บนแพลตฟอร์ม LoRa

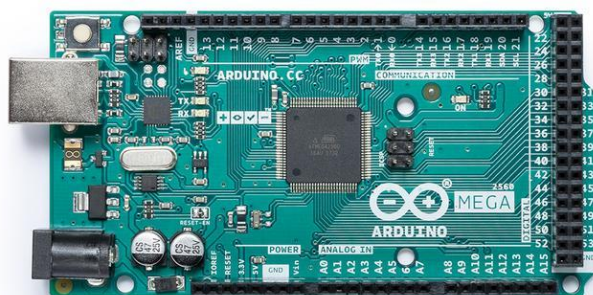
จากรูปที่ 12 และ 13 จะเห็นได้ว่าภาพรวมระบบควบคุมไฟถนนของงานวิจัยนี้ บนแพลตฟอร์ม LoRa และ NB-IoT มีความแตกต่างในส่วนที่เชื่อมต่อข้อมูลเข้าสู่อินเทอร์เน็ตเนื่องจากอุปกรณ์ NB-IoT ที่เลือกใช้เป็นอุปกรณ์ของผู้บริการเครือข่ายมือถือในประเทศไทยอย่าง AIS และ TRUE จึงสามารถเชื่อมต่อเข้าเครือข่ายหรือ base station ของผู้ให้บริการได้โดยตรง ต่างจากส่วนของ LoRa ที่จะใช้ Heltec WIFI Lora Kit 32 2 ตัวสื่อสารกัน โดยมี 1 ตัวจะทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ของระบบ

4.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

อุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมไฟถนนนอกจากส่วนที่ใช้สำหรับสื่อสารแล้ว อุปกรณ์ในส่วนอื่นๆจะใช้งานร่วมกับ Arduino mega เช่นกัน รวมทั้งอุปกรณ์สำหรับควบคุมโคมไฟถนน เช่น LED

ไทรเวอร์ และรีเลย์ และในส่วนของเซ็นเซอร์จะพิจารณาจากค่าที่ต้องวัดดังต่อไปนี้ เวลา แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟจริง ตัวประกอบกำลัง ความถี่ ความสว่างแสง และความชื้นสัมพัทธ์ โดยมีอุปกรณ์สำคัญดังต่อไปนี้

4.2.1 Arduino mega



รูปที่ 14 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดที่ใช้ชิป ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก เป็นบอร์ดที่พัฒนาต่อยอดมาจากบอร์ด Arduino Uno R3 มี digital input/output 54 ขา สามารถใช้เป็น output แบบ PWM ได้ 15 ขา มี analog inputs 16 ขา มี UARTs (hardware serial ports) 4 ขา ทำงานที่ความถี่ 16 MHz สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล USB หรือใช้ adaptor AC-to-DC เพื่อเริ่มต้นใช้งาน และมีปุ่ม reset สามารถต่อเข้ากับ shields ที่ออกแบบเพื่อใช้งานกับ Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดที่มีขาสำหรับต่อใช้งานเยอะ จึงเป็นบอร์ดที่เหมาะสมสำหรับใช้กับโปรเจกต์ที่ต้องการใช้งาน Sensor จำนวนมาก และเนื่องจากบอร์ดมีหน่วยความจำค่อนข้างสูงจึงเหมาะกับงานที่ต้องการเก็บข้อมูลมาก ๆ

4.2.2 โคมไฟสาธารณะ



รูปที่ 15 โคมไฟ LED ของ Philips รุ่น Philips BRP310 LED module 12700 lm

โคมไฟที่เลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นโคมไฟ LED ของ Philips รุ่น Philips BRP310 LED module 12700 lm ที่ตัวโคมให้แสงสีขาวเหมาะสำหรับใช้งานร่วมกับถนนทุกประเภท เช่น ถนนสายรอง ลานจอดรถ หรือ ใช้เป็นโคมไฟถนนสาธารณะ เป็นต้น ตัวโคมไฟ สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของสนิมได้เป็นอย่างดี โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- ให้ความสว่าง 12700 lumen
- ทำงานที่แรงดัน 220-240 โวลต์
- ทำงานที่ความถี่ 50-60 เฮิรต์
- กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 140 วัตต์
- มุมองศาของดวงโคมเป็นแบบมุมองศาขนาดกลาง (Medium beam) ที่ขนาด 20-30 องศา

4.2.3 ไดรเวอร์



รูปที่ 16 LED driver รุ่น Xitanium 150W 0.35-0.70A GL Prog sXt

ไดรเวอร์ LED คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแสไฟ กระแสตรงให้กับหลอด LED ตอบสนองต่อความต้องการที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจร โดยให้พลังงานไฟฟ้าคงที่เมื่อ LED

เป็นสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ไดรเวอร์ แหล่งจ่ายไฟภายในตัวเองซึ่งมีสัญญาณขาออกที่ตรงกับลักษณะทางไฟฟ้าของไดรเวอร์ LED อาจมีการลดแสงโดยวงจรการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ ระดับพลังงานของ LED จะคงที่ตลอดเวลาโดยไดรเวอร์ LED เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตลอดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและลดลง หากไม่มีไดรเวอร์ที่เหมาะสมอุปกรณ์จะร้อนและไม่เสถียร ทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการทำงานปกติ และไดรเวอร์ยังมีความสามารถควบคุม เปิด ปิด หรือหรี่ไฟได้ผ่านสัญญาณควบคุม สำหรับการใช้งานกับ Philips BRP310 LED module 12700 lm ที่มีกำลังไฟฟ้าที่ 150 วัตต์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ LED driver ของ Xitanium 150W 0.35-0.70A GL Prog sXt ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถควบคุมโคมไฟผ่านวิธีการควบคุมได้ 3 แบบ 1-10 โวลต์, ควบคุมแบบ DALI, และสัญญาณสำหรับการโปรแกรม ซึ่งสามารถควบคุมไฟได้ 10-100 เปอร์เซนต์
- ทำงานปกติที่กำลังไฟฟ้า 30-150 วัตต์
- ความถี่ 50-60 เฮิร์ต

4.2.4 PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module

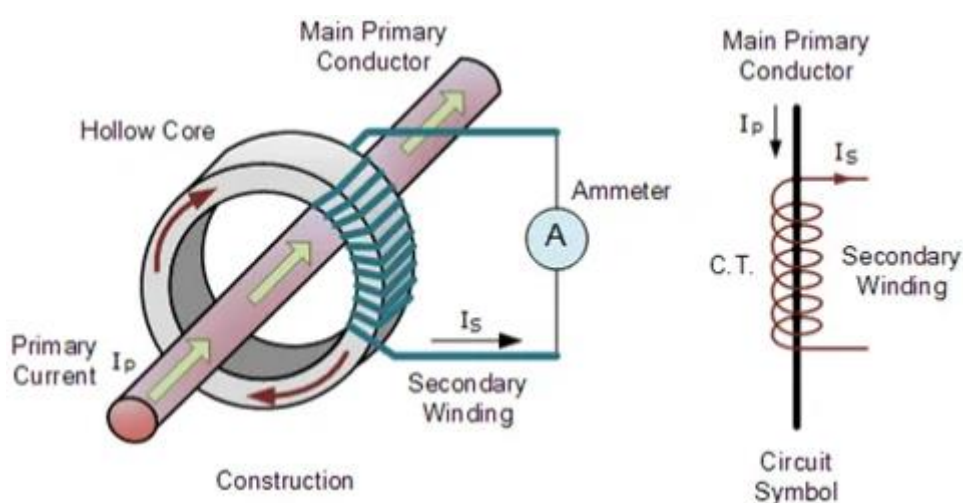


รูปที่ 17 PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module

PZEM-004T เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้หลากหลายค่าดังนี้ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า วัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง และตัวประกอบกำลัง ส่งค่าต่างๆออกมาจากโมดูลผ่านการสื่อสารแบบ serial (TX, RX) ซึ่งสามารถสื่อสารกับบอร์ด Arduino ได้ PZEM-004T สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ครอบคลุมทั้งหมดของโคมไฟที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- สื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย UART (หรือ Serial)
- แรงดัน (VAC) อ่านค่าได้ตั้งแต่ 80-260 Vrms (ความละเอียด 0.1 V และความผิดพลาดไม่เกิน 0.5%)

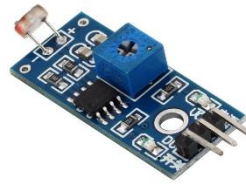
- กระแส (IAC) ใช้งานได้ตั้งแต่ 0-10 A (สำหรับรุ่น PZEM-004T-10A) และความละเอียดในการวัด 0.001 A และ ความผิดพลาดไม่เกิน 0.5%) วัดค่ากระแสไฟฟ้าด้วย CT Current Transformer
- กำลังไฟฟ้าจริง 0-2.3 กิโลวัตต์ ความละเอียดในการวัด 0.1 วัตต์
- ค่าตัวประกอบกำลังวัดค่าได้ตั้งแต่ 0-1 ความละเอียด 0.01 และความแม่นยำ 1 %
- ความถี่วัดค่าได้ตั้งแต่ 45 ถึง 65 เฮิรท์



รูปที่ 18 การทำงานของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

CT (Current Transformer) หรือ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าคืออุปกรณ์ที่ใช้ในการลดทอนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงให้เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าพิสัย (Range) ของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้านั้น จากรูป 18 โครงสร้างของ CT หรือ Current Transformer หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า จากรูปด้านบนจะเห็นว่าขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (Primary Winding) มีสายไฟผ่านแกนของ CT เพียงเส้นเดียว หมายความว่า CT วัดกระแสไฟฟ้าจะใช้งานกับโหลดได้หนึ่งตัวต่อ 1 เฟส ในส่วนของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Winding) จะมีการพันขดลวดที่แกน Hollow Core จำนวนรอบของขดลวดมากกว่า โดยแกนวงกลมของหม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า (CT) ทำมาจากเหล็กซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสูญเสียต่ำ ซึ่งมีความสำคัญต่อค่าความแม่นยำของตัว CT ในการทำงานของ CT จะอาศัยหลักการวัดกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต และลดทอนกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต) แบบสัดส่วนเพื่อไปต่อร่วมกับแอมป์มิเตอร์

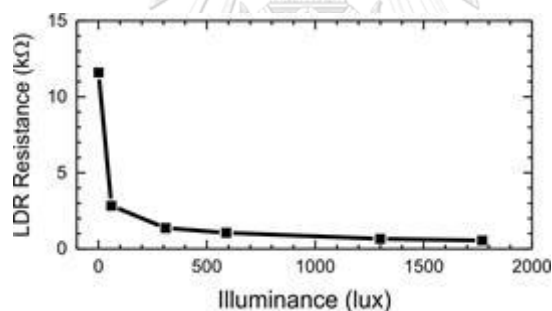
4.2.5 LDR Photoresistor Sensor Module



รูปที่ 19 LDR Photoresistor Sensor Module

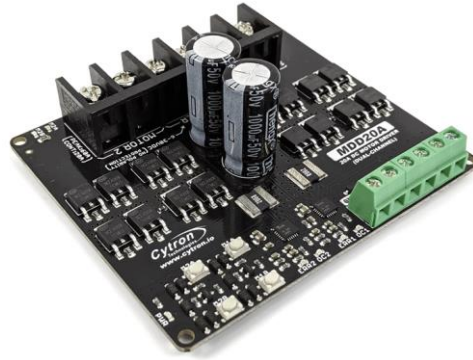
โมดูลเซ็นเซอร์แสง แบบตัวต้านทานที่แปรค่าตามแสง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามโดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 20 โมดูลนี้ให้สัญญาณออกมาเป็นแบบดิจิตอลและอนาล็อกสามารถปรับตัวต้านทานปรับค่าได้

- ทำงานที่ 3.3-5.0 โวลต์ ผ่านขา Vcc
- สัญญาณขาออกที่ขา A0 เป็นสัญญาณแบบอนาล็อก และช่องสัญญาณที่ขา D0 เป็นสัญญาณแบบดิจิตอล



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างและความต้านทานของ LDR

4.2.6 DC Motor Driver



รูปที่ 21 20Amp 6V-30V DC Motor Driver

DC Motor Driver รุ่น MDD20A เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมแบบสองทิศทางของมอเตอร์ DC แบบแปลงสัญญาณไฟฟ้าจาก AC เป็น DC ที่แรงดันไฟฟ้าขาออก 6V ถึง 30V ไดรเวอร์มอเตอร์นี้สามารถควบคุมได้ด้วยอินพุต PWM และ DIR ด้วยช่วงแรงดันลอจิกอินพุตตั้งแต่ 1.8V ถึง 12V ผ่านคอนโทรลเลอร์ได้หลากหลาย Arduino, Raspberry Pi, PLC และมีคุณสมบัติการป้องกันกระแสเกินช่วยป้องกันไม่ให้ไดรเวอร์มอเตอร์เสียหายเมื่อมอเตอร์หยุดทำงานหรือต่อมอเตอร์ขนาดใหญ่ เมื่อมอเตอร์พยายามดึงกระแสมากเกินไปที่ตัวขับเคลื่อนจะสามารถรองรับได้ กระแสของมอเตอร์จะถูกจำกัดที่เกณฑ์สูงสุด โดยงานวิจัยนี้ใช้ MDD20A สำหรับใช้งานเพื่อควบคุมการหรี่ไฟของ LED driver ที่แรงดัน 1-10 V โดยที่คุณสมบัติ

- รองรับความถี่ของสัญญาณ PWM สูงสุด 20 Hz
- รองรับแรงดันสัญญาณ PWM ที่ 1.8 V, 3.3 V, 5 V, และ 12V
- แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกที่ 6 V-30 V
- มีระบบป้องกันกระแสเกิน

4.2.7 RTC Arduino ds3231

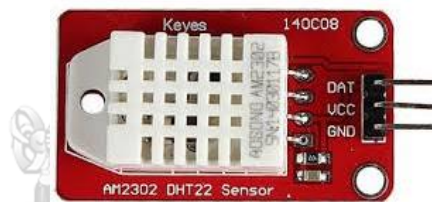


รูปที่ 22 RTC arduino ds3231

RTC Arduino ds3231 เป็นโมดูลนาฬิกาแบบเวลาจริง RTC (Real Time Clock) ที่มีความเที่ยงตรงของเวลามากเนื่องจากมีวงจรวัดอุณหภูมิภายใน เพื่อคำนวณชดเชยความถี่ของ Crystal ที่มีผลจากอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมรอบกวน มีแบตเตอรี่รีชาร์จภายใน สามารถใช้งานได้โดยไม่มีแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก มีฟังก์ชันในการบอกวันและเวลา สามารถตั้งเวลาได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- ความแม่นยำของเวลา ± 2 ppm ในช่วงอุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส
- ทำงานที่ 3.3-5.5 โวลต์

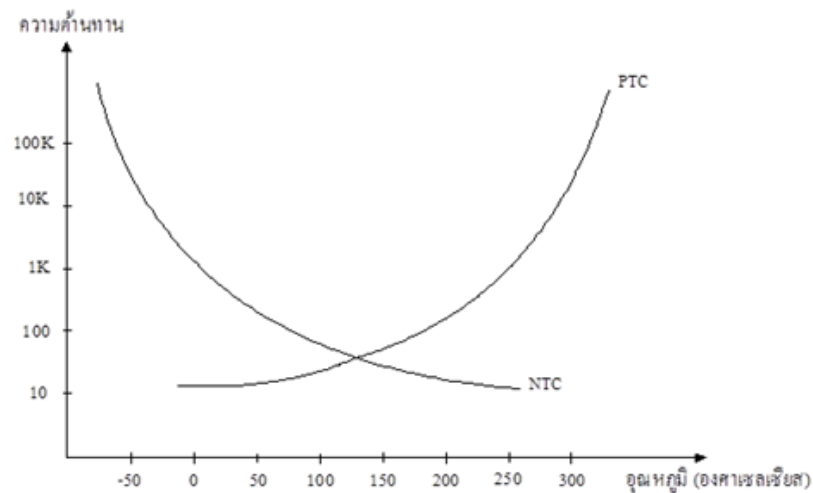
4.2.8 DHT22 sensor



รูปที่ 23 DHT22 sensor

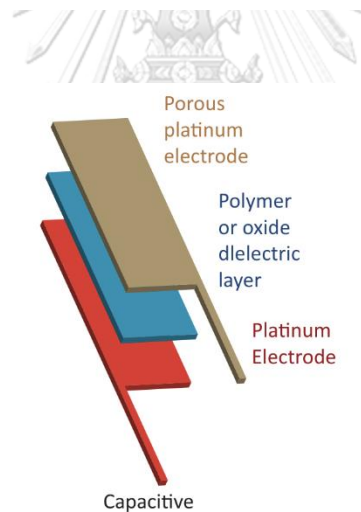
DHT22 หรือ AM2302 Module โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ ใช้งานโดยที่ไฟจ่ายเลี้ยง 3.3-6 โวลต์ให้กับขา Vcc ดังรูปที่ 23 ต่อขา GND เข้ากับกราวด์ของระบบ และมีสัญญาณขาออกที่ขา DAT เป็นสัญญาณแบบดิจิตอล โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- สเกลความละเอียดของค่าความชื้นที่ 0.1%RH และอุณหภูมิ 0.2 องศาเซลเซียส
- สามารถวัดค่าความชื้นในช่วง 0-100% และวัดอุณหภูมิในช่วง (-40) – 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความต้านทานของเซ็นเซอร์

โดยที่เซ็นเซอร์วัดความอุณหภูมิภายในของ AM2302 เป็นแบบ NTC (Negative Temperature Coefficients) คือ เมื่ออุณหภูมิลดลง จะมีค่าความต้านทานลดลง โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ใช้ตรวจสอบความร้อนเพื่อควบคุมระดับการทำงาน เช่น ในวงจรขยายเสียงที่ดีใช้ตรวจจับความร้อนที่เกิดจากการทำงาน แล้วป้อนกลับไปลด การทำงานของวงจรให้น้อยลง



รูปที่ 25 โครงสร้างภายในของอุปกรณ์ตรวจจับความชื้น

โดยที่เซ็นเซอร์วัดความชื้นภายในเป็นแบบ Capacitive Humidity Sensor เซ็นเซอร์แบบนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบไปด้วยชั้นฐานแผ่นฟิล์มบางที่ทำจากโพลีเมอร์ ดังรูปที่ 25 ซึ่งจะถูกลวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง พื้นผิวเป็นฟิล์มบางที่ถูกเคลือบด้วยอิเล็กโทรดโลหะแบบมีรูพรุนสำหรับป้องกันฝุ่นและแสงแดด โดยค่าความชื้นนี้จะทำให้เปลี่ยนแปลงค่าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดการผันผวนของค่าความต้านทานที่ substrate (สารตัวนำ) โดยเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนไป 1 เปอร์เซ็นต์ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive) ก็จะมีค่าเปลี่ยนไป 0.2 ถึง 0.5 pF ซึ่งเซ็นเซอร์แบบนี้มักนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม

4.2.9 เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว แบบไมโครเวฟ



รูปที่ 26 Microwave Doppler wireless radar detector probe sensor module HB100

เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวไมโครเวฟเป็นเครื่องตรวจจับการเคลื่อนไหวของวัตถุโดยตรวจจับคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัตถุ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องตรวจจับอินฟราเรดทั่วไป วัตถุที่ตรวจจับจะไม่จำกัดแค่ร่างกายมนุษย์ ยังสามารถตรวจจับวัตถุอื่น ๆ ไม่มีชีวิตได้ และเซ็นเซอร์ไมโครเวฟไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นและอื่นๆ

- ทำงานที่ 5 V
- ทำงานที่กระแสสูงสุด 60 mA
- ปรับระยะทางการตรวจจับได้ 2-16 เมตร
- ตรวจจับสิ่งไม่มีชีวิตได้

4.3 การทำงานและซอฟต์แวร์

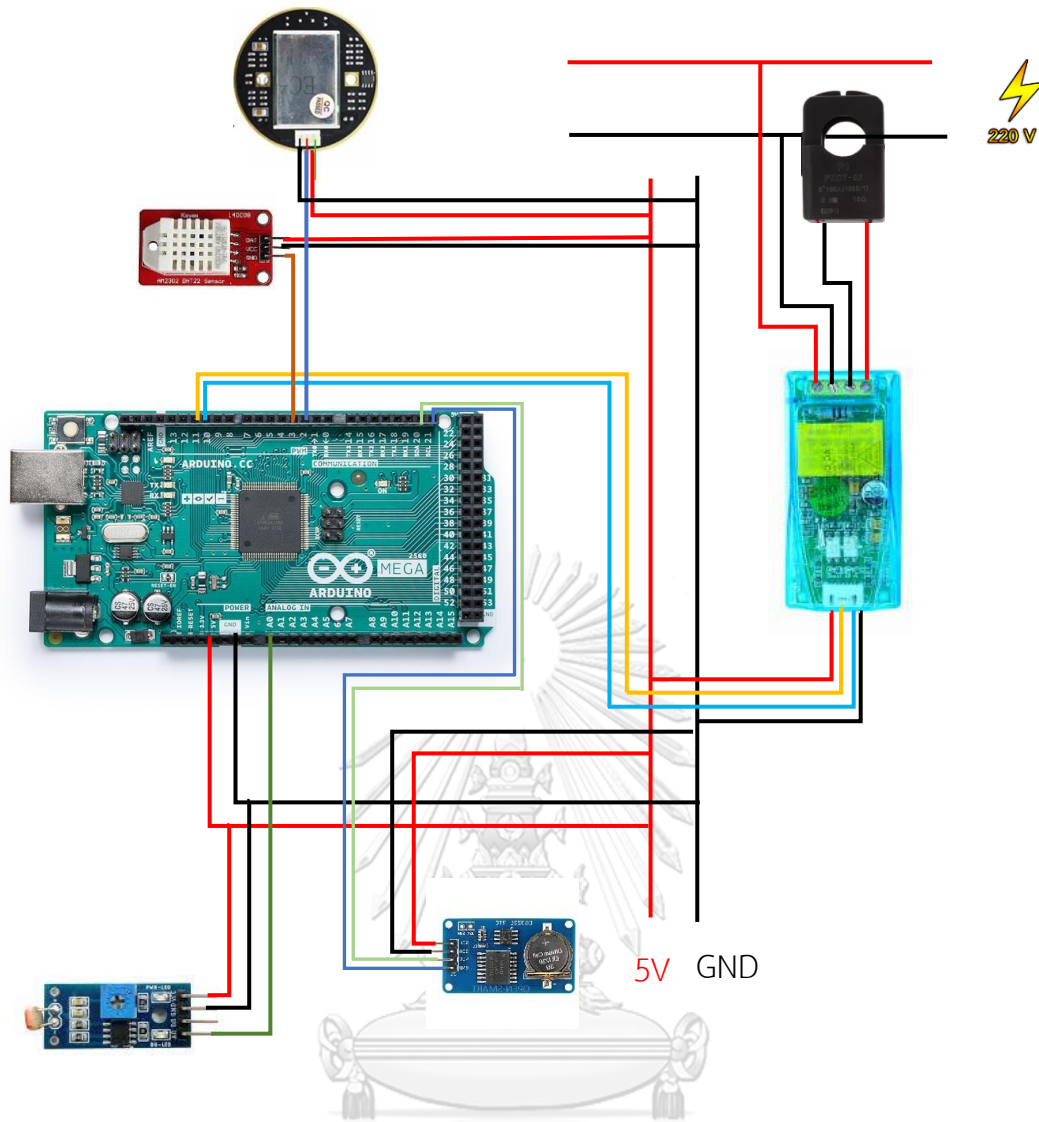
งานวิจัยนี้แบ่งการทำงานของระบบควบคุมไฟถนนออกเป็น 3 ส่วน โดยมี 1. ส่วนเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ 2. ส่วนวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมคอมไฟ และ 3. ส่วนของระบบสื่อสารกับผู้ใช้งาน โดยที่ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากส่วนเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ เก็บข้อมูลจากสภาพแวดล้อมในขณะนั้น แล้วส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังส่วนวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมคอมไฟที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการทำงาน ส่วนนี้นำข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์และข้อมูลที่ได้จากแดชบอร์ดมาประมวลผลต่อเพื่อส่งงานไปยัง รีเลย์และ LED ไดรเวอร์ เพื่อควบคุมความสว่างของคอมไฟ จากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปยังส่วน of ระบบสื่อสารกับผู้ใช้งาน ซึ่งใช้แดชบอร์ดสำหรับการสื่อสารกับผู้ใช้งาน ผู้ใช้สามารถมอนิเตอร์ค่าต่างๆ และควบคุมการทำงานของคอมไฟได้

4.3.1 ส่วนเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์

ในการใช้งานระบบควบคุมไฟถนนแบบควบคุมอัตโนมัติ ต้องอาศัยข้อมูลจากสถานะแวดล้อมต่างๆ มาประกอบสำหรับการสั่งงาน โดยปัจจัยแวดล้อมที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ประกอบการตัดสินใจใน

การกำหนดระดับความสว่างของโคมไฟมีดังนี้ เวลา ความสว่างแสง ความชื้นสัมพัทธ์ และการเคลื่อนไหว แต่สำหรับการใช้งานระบบควบคุมไฟถนนจำเป็นต้องสามารถตรวจสอบการทำงานของโคมไฟได้ ว่าโคมไฟสามารถทำงานปกติหรือไม่ ถ้าเกิดการงานที่ผิดปกติหรือการชำรุดของอุปกรณ์ ผู้ใช้งานเช็คได้จากแดชบอร์ดที่แสดงค่าทางไฟฟ้าของโคมไฟนั้นๆ โดยอาศัยพารามิเตอร์ดังนี้ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟจริง ตัวประกอบกำลัง ความถี่ การอ่านค่าต่างๆของเซนเซ็น สามารถอ่านค่าได้โดยการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เข้ากับ Arduino ได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านอุปกรณ์แปรค่า แต่บางอุปกรณ์บางชนิดต้องอาศัย library สำหรับสื่อสารเพื่อที่จะแปลงค่าที่อ่านได้ผ่าน Arduino โดยลักษณะเชื่อมต่ออุปกรณ์เป็นดังรูปที่ 27 และมีการทำงานของเซ็นเซอร์เป็นดังนี้





รูปที่ 27 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของ arduino และเซนเซอร์ต่างๆ

4.3.1.1 การตรวจจับความเคลื่อนไหว

เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว sensor module HB100 สามารถตรวจจับได้ที่ ระยะทางสูงสุดที่ 16 เมตร จะให้สัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัลถ้าจับการเคลื่อนไหวได้ โดยเซ็นเซอร์นี้ถูกออกแบบสำหรับการตรวจจับรถหรือคนที่สัญจรบริเวณถนน หากไม่มีผู้คนหรือรถผ่านเซ็นเซอร์ในระยะเวลา 120 วินาทีจะทำการหรีตัวโคมไฟเพื่อประหยัดพลังงาน

4.3.1.2 การตรวจจับฝน

ในช่วงเวลาที่ฝนตกนั้นวิสัยทัศน์ของผู้ใช้ถนนจะแย่งกว่าช่วงเวลาปกติ ประกอบกับถนนที่ลื่นและแองน้ำบนถนน อาจจะทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงขึ้นได้หากผู้ใช้ถนนไม่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ดังนั้นสำหรับความปลอดภัยในช่วงเวลาที่เกิดฝน ผู้ใช้ถนนต้องการแสงสว่างจากโคมไฟ

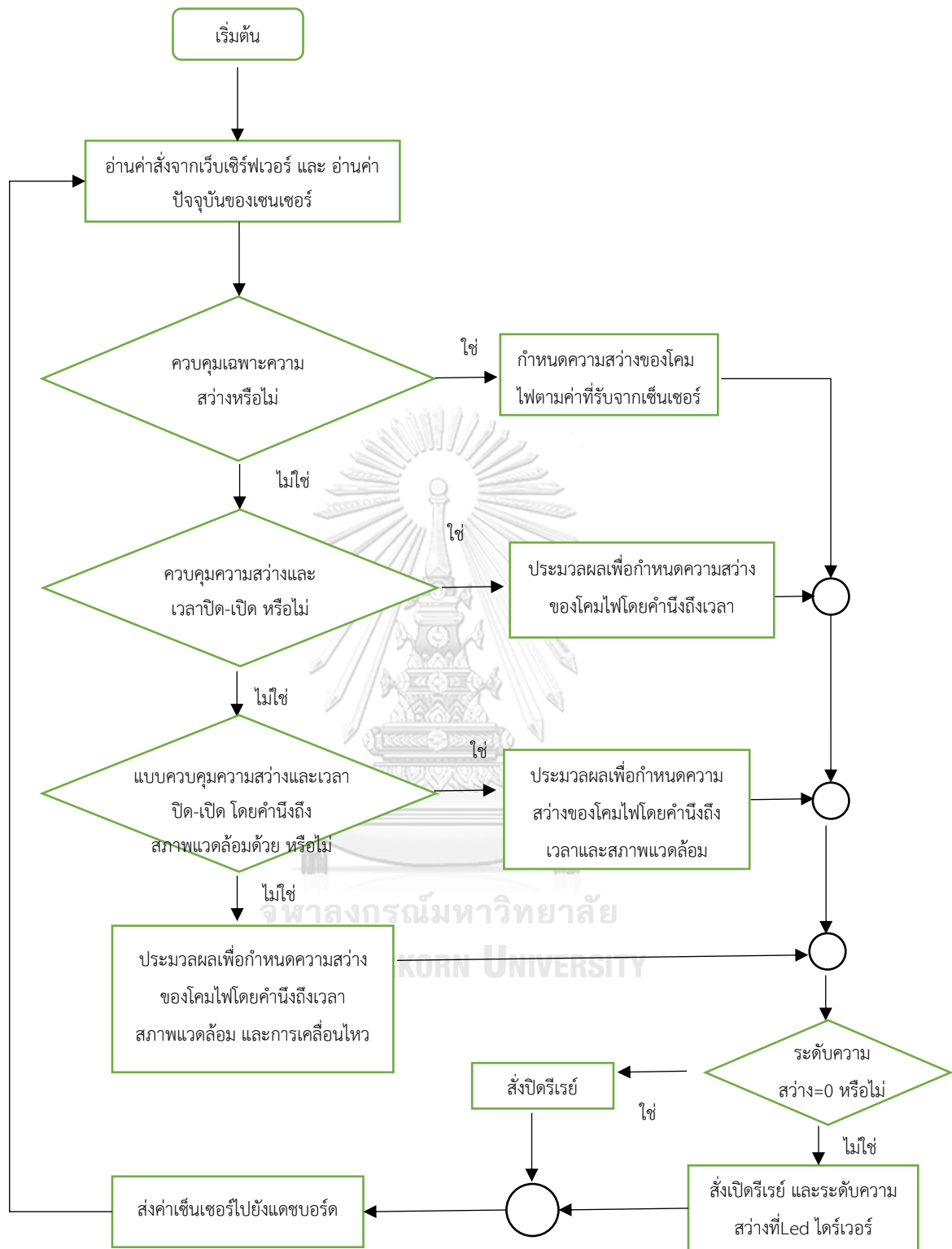
ถนนมากกว่าปกติ งานวิจัยนี้ได้ใช้เซ็นเซอร์เซ็นเซอร์ความชื้น สำหรับการตรวจจับฝน ในช่วงเวลาที่เกิดฝนนั้นความชื้นจะสูงขึ้นกว่าปกติจนใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยงานวิจัยกำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจเพิ่มระดับความสว่างของโคมไฟ

4.3.1.3 การวัดค่าทางไฟฟ้า

การวัดค่าทางไฟฟ้าเป็นการวัดเพื่อแสดงผลแก่ผู้ใช้งานสำหรับการตรวจสอบอุปกรณ์ของโคมไฟจากระยะไกล ว่าสามารถใช้งานได้ปกติหรือไม่ สามารถตรวจสอบการทำงานของโคมไฟย้อนหลังได้จากระบบ โดยค่าทางไฟฟ้าที่ใช้วัดจากเซ็นเซอร์ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟจริง ตัวประกอบกำลัง และความถี่

4.3.2 ส่วนวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมโคมไฟ

จากภาพรวมของระบบ ข้อมูลต่างๆที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกส่งมาที่ Arduino mega ซึ่งทำหน้าที่รับส่งข้อมูล และวิเคราะห์ผลสำหรับควบคุมโคมไฟ โดยเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ ในส่วนของ การวิเคราะห์ข้อมูลจะมีโปรแกรมการควบคุมโคมไฟ โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 4 รูปแบบการทำงาน แบบที่ 1.ควบคุมเฉพาะความสว่าง 2.ควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด 3.แบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด) 4.รูปควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ โดยมีแผนภาพการทำงานตามรูปที่ 25 การทำงานเริ่มจากการรับข้อมูลจากส่วนของเซ็นเซอร์และข้อมูลจากแดชบอร์ดที่ผู้ใช้กำหนดไว้ รายละเอียดแต่ละรูปแบบการทำงานในการกำหนดความสว่างของโคมไฟดังนี้



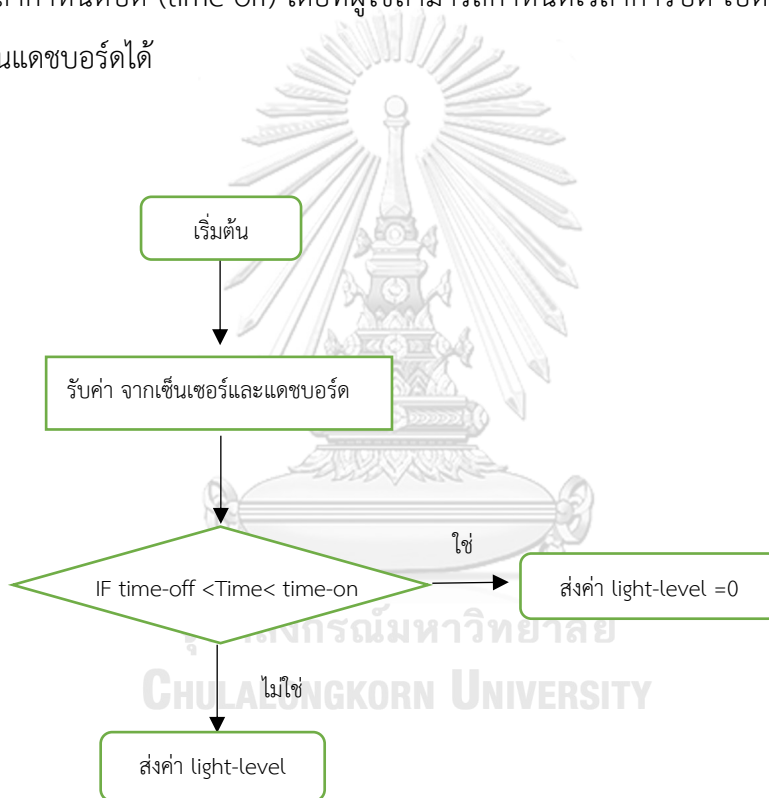
รูปที่ 28 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบควบคุมโคมไฟถนน

4.3.2.1 รูปแบบควบคุมเฉพาะความสว่าง

เป็นรูปแบบการควบคุมที่ไม่คำนึงถึงรูปแวดล้อมหรือเวลาในการเปิด-ปิด ความสว่างของโคมไฟจะขึ้นอยู่กับค่าความสว่างที่กำหนดไว้ในขณะนั้นโดยตรง การทำงานโหมดนี้เหมาะสำหรับการควบคุมเฉพาะกิจ

4.3.2.2 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด

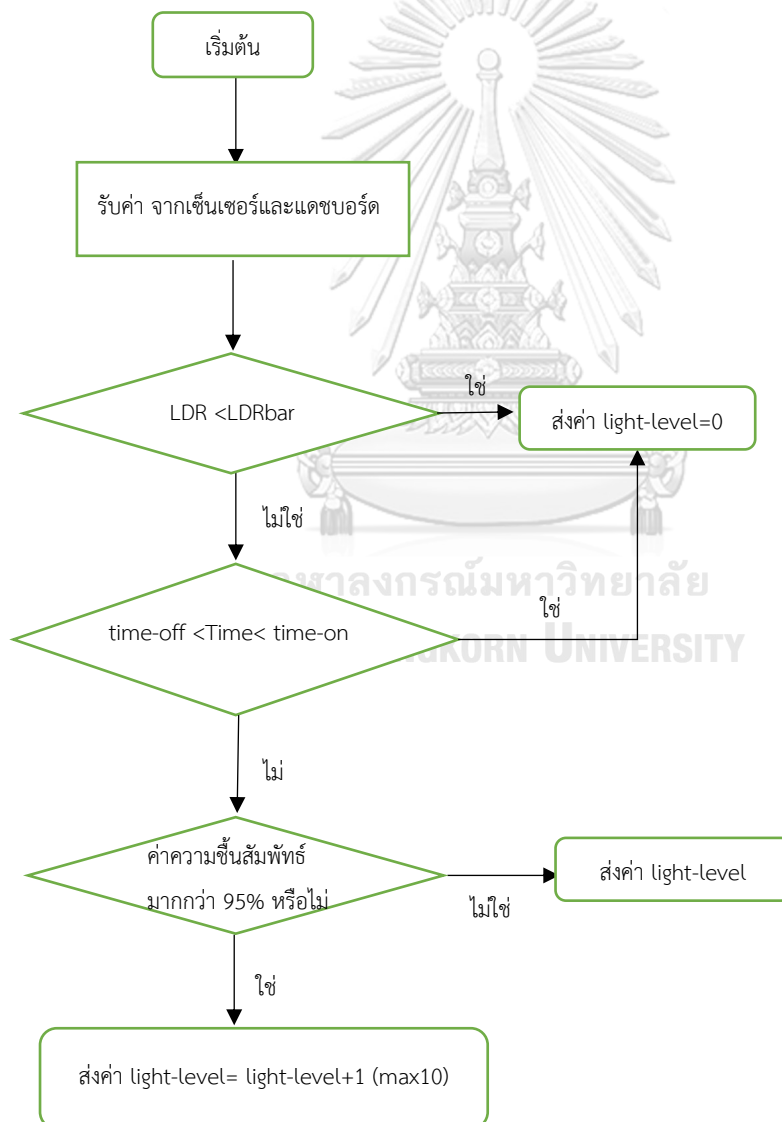
เป็นรูปแบบการควบคุมความสว่างโดยคำนึงถึงเวลาปิด-เปิด ไฟที่ถูกช้อนเข้าระบบ เมื่อเวลาถึงเวลากำหนดเปิด (time-on) ระบบจะสั่งให้โคมเปิดไฟด้วยระดับความสว่างที่กำหนดไว้ และโคมจะปิดอีกครั้งเวลากำหนดปิด (time-off) โดยที่ผู้ใช้สามารถกำหนดเวลาการปิด-เปิด และความสว่างของโคมไฟผ่านแดชบอร์ดได้



รูปที่ 29 การควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด

4.3.2.3 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาเปิด-ปิด โดยคำนึงถึงรูปแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด)

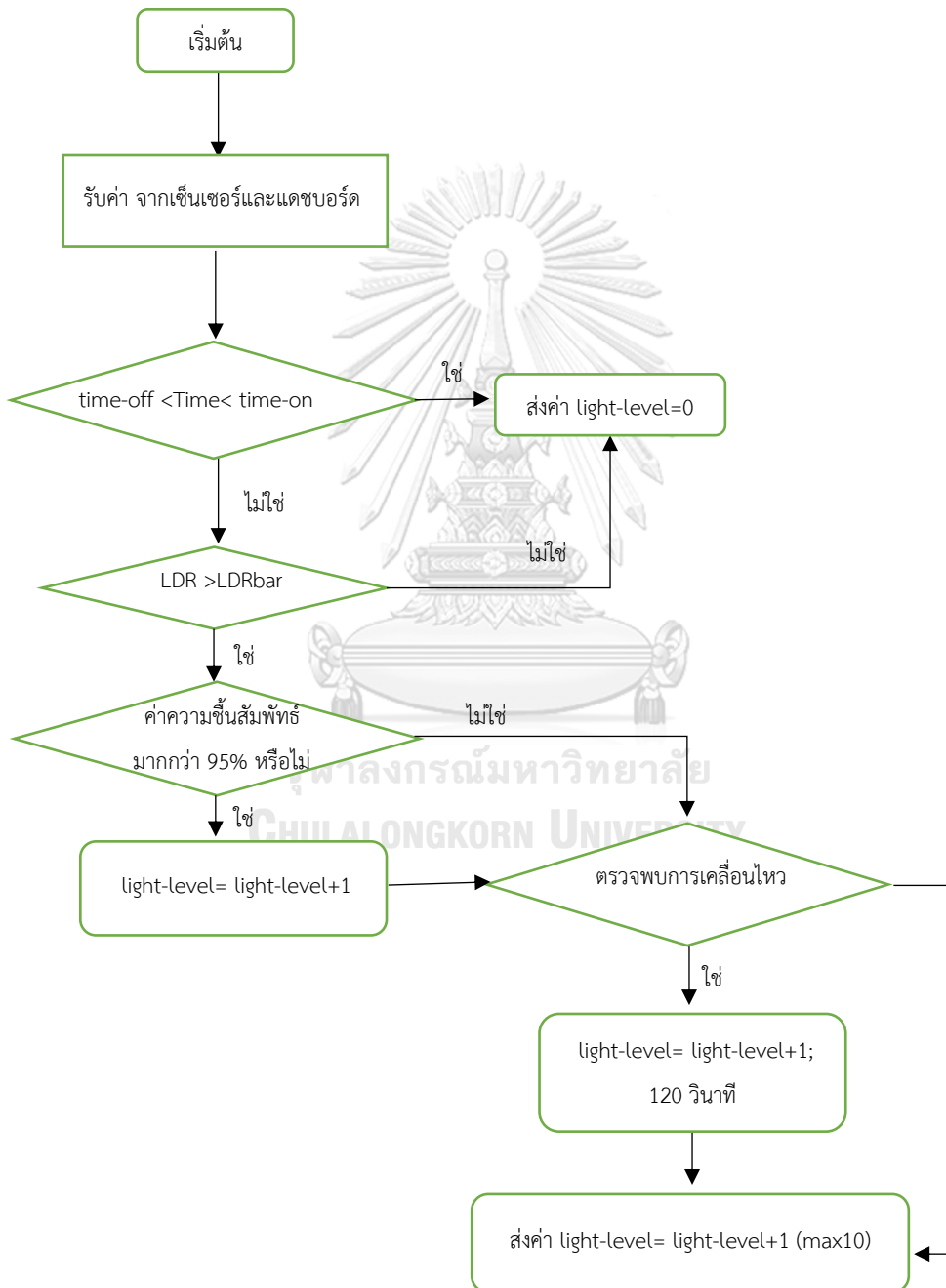
เป็นรูปแบบการควบคุมความสว่างโดยคำนึงถึงเวลาเปิดปิดไฟที่ถูกป้อนเข้าระบบ เมื่อเวลาถึงเวลากำหนดเปิด (time-on) หรือเซ็นเซอร์แสงรับค่ามาต่ำกว่าที่กำหนด ระบบจะสั่งให้โคมเปิดไฟด้วยระดับความสว่างที่กำหนดไว้ หรือเพิ่มระดับความสว่างหากระบุจากเซ็นเซอร์ความชื้นมีค่ามากกว่าที่กำหนด (หมายความว่าอาจจะเกิดฝนตกบริเวณนั้น) และโคมจะปิดอีกครั้งเวลากำหนดปิด (time-off) โดยที่ผู้ใช้สามารถกำหนดเวลาการเปิด-ปิด และความสว่างของโคมไฟผ่านแดชบอร์ดได้ แต่ค่าคงที่ทางแสงและความชื้นถูกกำหนดด้วยโปรแกรมไว้ตั้งแต่ต้น



รูปที่ 30 รูปแบบควบคุมอัตโนมัติโดยคำนึงถึงรูปแวดล้อม

4.3.2.4 รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ

เป็นรูปแบบการควบคุมความสว่างที่มีลักษณะคล้ายกับรูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด) แต่เพิ่มเซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวสำหรับการกำหนดความสว่าง โดยตั้งค่าอุปกรณ์ถ้าเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้จะเพิ่มความสว่างของโคมไฟ 1 ระดับ เป็นเวลา 120 วินาที



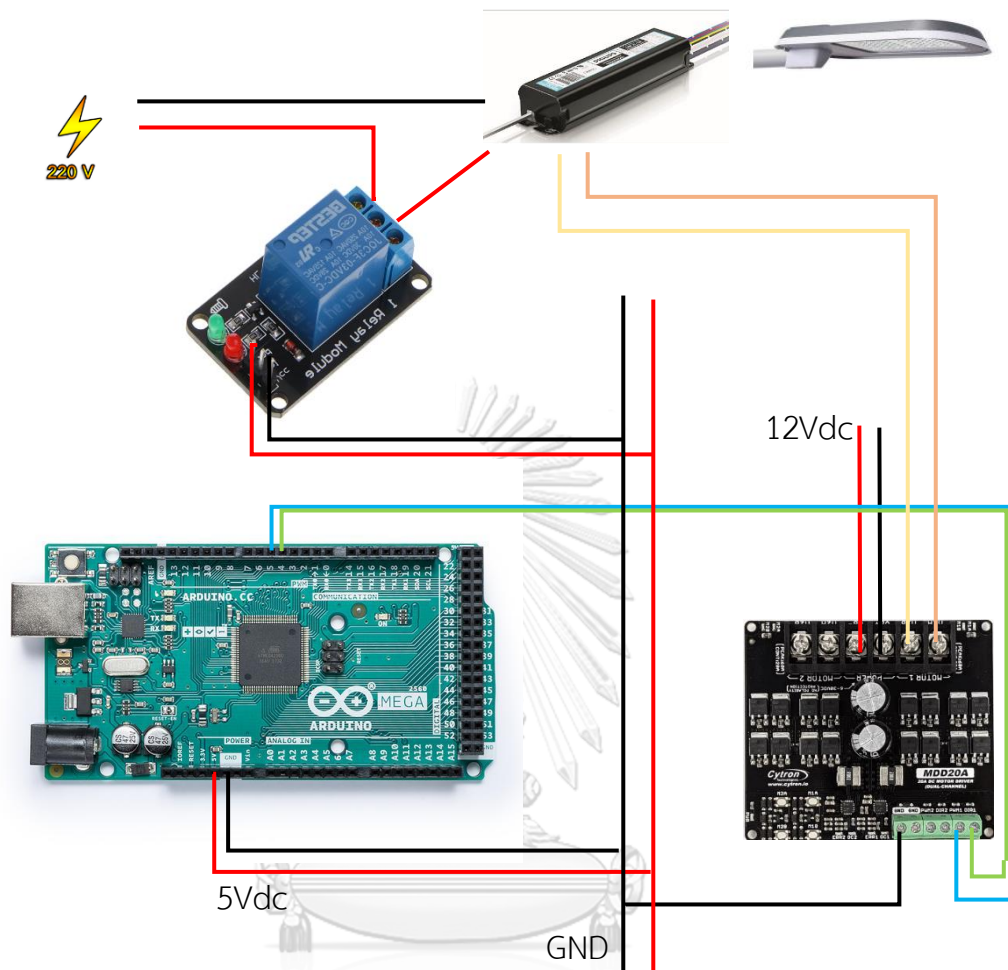
รูปที่ 31 รูปควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ

4.3.2.5 การควบคุมแสงสว่าง

การควบคุมแสงสว่างเป็นการทำางโดยใช้ LED driver ที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ 1-10V ด้วยแรงดัน 1-10V จะสามารถควบคุมความสว่างที่ 10-100% โดยที่แรงดันไฟ 1-10 V เกิดจาก Arduino mega ส่งสัญญาณ analog แบบสัญญาณ PWM ไปยัง MDD20A หลังจากนั้น MDD20A จะแปลงสัญญาณ PWM ที่มี duty cycle 0-100% เป็น 0-10V แต่วิธีการควบคุมแบบ 1-10V ของ LED driver ไม่สามารถสั่งงานปิดโคมไฟได้ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ออกแบบการควบคุมการปิดไฟโดยอาศัยรีเลย์ที่ต่อกับไฟบ้าน 220V ก่อนเข้าโคมไฟ สำหรับสั่งปิดโคมไฟจาก Arduino mega ได้โดยตรง เมื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังรีเลย์ให้เปิดวงจรทำให้ไม่มีไฟเลี้ยงไปยังโคมไฟ ทำให้ตัวโคมไฟปิดตามการสั่งการ โดยรูปแบบการทำงานตามตารางที่ 5

ตารางที่ 4 สัญญาณควบคุมความสว่างในแต่ละระดับ

ระดับความสว่าง	สัญญาณควบคุมรีเลย์	duty cycle ของสัญญาณ PWM	สัญญาณควบคุม LED driver
0	on	0%	0V
1	off	10%	1V
2	off	20%	2V
3	off	30%	3V
4	off	40%	4V
5	off	50%	5V
6	off	60%	6V
7	off	70%	7V
8	off	80%	8V
9	off	90%	9V
10	off	100%	10V



รูปที่ 32 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อของ arduino กับส่วนควบคุมความสว่างของระบบ

4.3.3 ส่วนของระบบสื่อสารกับผู้ใช้งาน

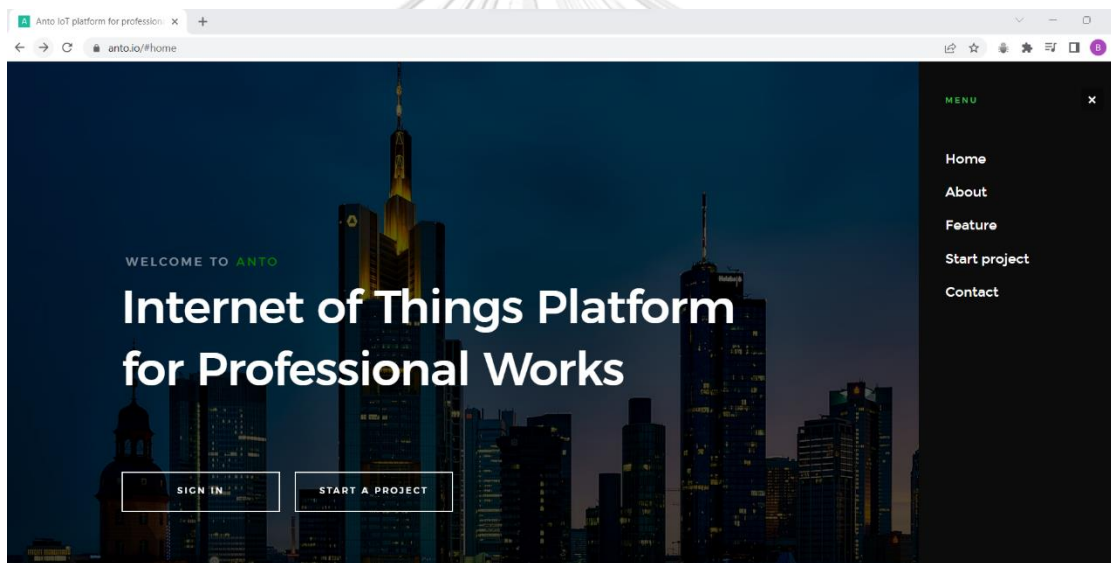
ในส่วนการต่อประสานกับผู้ใช้งานจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถมอนิเตอร์หรือสั่งการควบคุมระยะไกลได้โดยผ่านระบบสื่อสารแบบ LoRa หรือ NB-IoT ผ่านเว็บไซต์บนระบบอินเทอร์เน็ต เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการใช้งานแม้อยู่นอกสถานที่โดยที่งานวิจัยนี้เลือกใช้

1. <https://www.anto.io/> สำหรับ เทคโนโลยีสื่อสารแบบ LoRa
2. <https://magellan.ais.co.th/> สำหรับ เทคโนโลยีสื่อสารแบบ NB-iot ของ AIS
3. <https://demo.thingsboard.io/> สำหรับ NB-iot ของ true

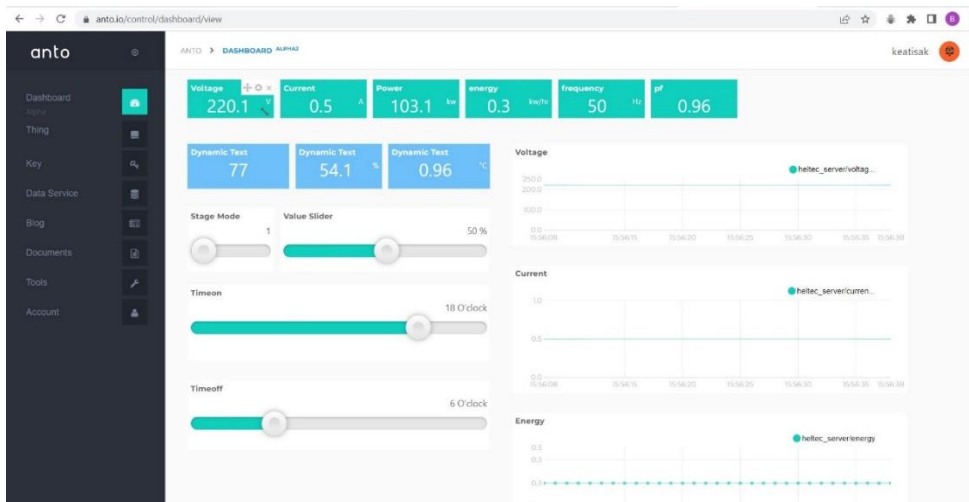
ปัจจัยที่งานวิจัยเลือกใช้แพลตฟอร์มกับระบบสื่อสารชนิดต่างกัน จากความสามารถในการรองรับของโพรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของแพลตฟอร์มและระบบสื่อสารที่ต่างกัน และซอฟต์แวร์ที่รองรับแต่ละแพลตฟอร์มที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย

4.3.3.1 แพลตฟอร์มเว็บ anto

Anto เป็นสื่อกลางในการสื่อสาร ที่พัฒนาโดยคนไทย และเปิดให้ใช้บริการฟรี เป็นเสมือนตัวกลางในการสื่อสารระหว่างสิ่งต่างๆบนโลกอินเทอร์เน็ต เช่น การส่งงานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเทอร์เน็ตโดยใช้โทรศัพท์มือถือของคุณ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันระบบรองรับการติดต่อสื่อสารผ่าน HTTP, HTTPS, MQTT, MQTTS, WebSocket ทำให้ต้องเสียเวลาในการติดตั้งเซิร์ฟเวอร์ รวมถึงดูแลรักษาระบบ โดยงานวิจัยนี้เป็นการใช้ MQTT เป็นโพรโตคอลสำหรับการสื่อสาร LoRa



รูปที่ 33 UI ของเว็บไซต์ <https://www.anto.io/>



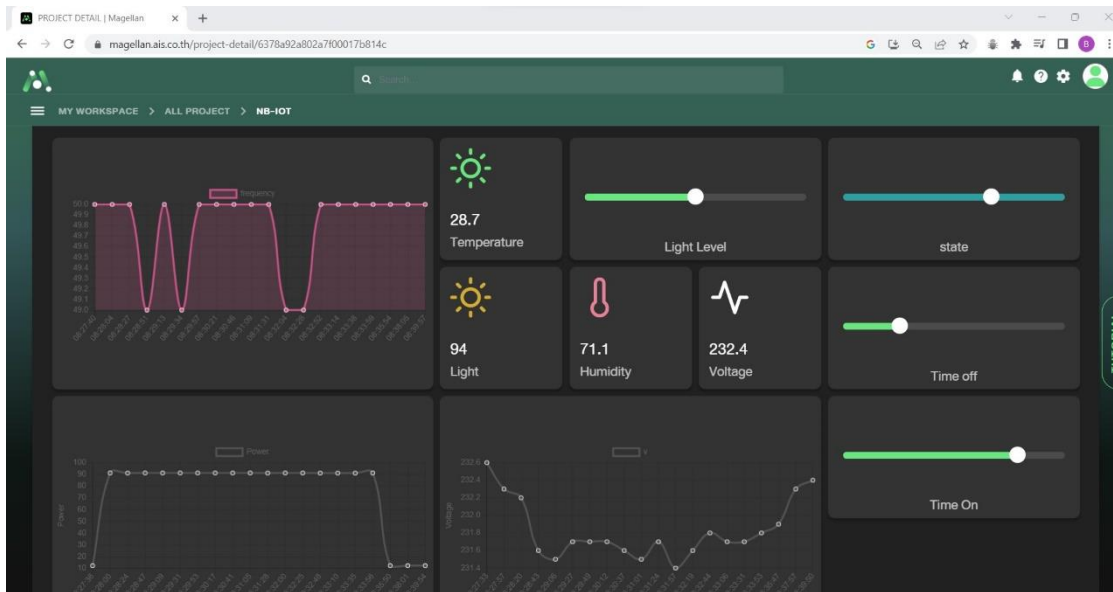
รูปที่ 34 UI ของระบบควบคุมไฟถนน ที่ออกแบบบนแพลตฟอร์ม anto

4.3.3.2 แพลตฟอร์มเว็บ Magellan

Magellan เป็น AIS IoT Platform ที่ออกแบบมาสำหรับกลุ่มผู้เริ่มต้นพัฒนาอุปกรณ์ IoT ซึ่งเป็น Platform ตั้งต้นสำหรับการเรียนรู้และต่อยอดให้นักพัฒนาสามารถสร้างสรรค์เทคโนโลยี IoT แบบง่ายๆ โดย Magellan มี SDK (Software Developer Kit) สำหรับรองรับระบบกับ อุปกรณ์ AIS ไว้แล้ว รวมทั้ง Magellan ยังมี API และ Dashboard ให้สามารถเรียกใช้งาน และแสดงค่าเซ็นเซอร์ต่างๆ โดยที่ Magellan รองรับโปรโตคอล CoAP ที่จะทำให้ให้นักพัฒนาสามารถทดสอบทดลองการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT ผ่านระบบสื่อสารของ AIS



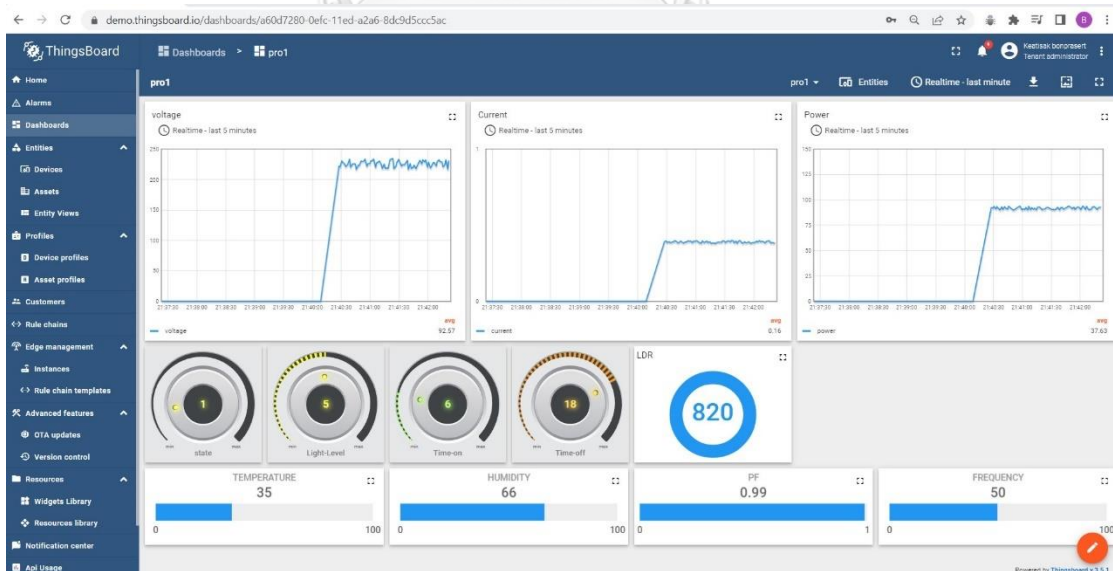
รูปที่ 35 ของเว็บไซต์ <https://www.anto.io/>



รูปที่ 36 UI ของระบบควบคุมไฟถนน ที่ออกแบบบนแพลตฟอร์ม magellan

4.3.3.3 แพลตฟอร์มเว็บ demo.thingsboard.io

Thingsboard.io คือ IoT platform ตัวหนึ่งที่เป็น open source รองรับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ ผ่าน MQTT CoAP และ HTTP อีกทั้งยังสามารถรวมบริการ พวก AWS IoT, Azure IoT และอื่นๆเข้ามาใช้งานได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 37 UI ของเว็บไซต์ demo.thingsboard.io

บทที่ 5 ผลการทดสอบ

5.1 ทดสอบความแรงของสัญญาณ หรือ ค่า RSSI (Received Signal Strength Indicator)

5.1.1 ทดสอบความแรงของสัญญาณในพื้นที่ที่ศึกษา

การทดสอบแรกของงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณเพื่อตรวจสอบความพร้อมของการสื่อสารของสถานที่นั้นที่ทดสอบ วัดโดยทดสอบจากบอร์ด ที่ทำหน้าที่เป็นโมดูลสื่อสารต่อเข้ากับบอร์ด Arduino และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยตรวจสอบค่า RSSI โดยทดสอบทั้ง LoRa, NB-IoT AIS และ NB-IoT ในสถานที่ห้องปฏิบัติการ และบริเวณที่ทดสอบ

ตารางที่ 5 ทดสอบความแรงของสัญญาณ ในสถานที่ห้องปฏิบัติการ และบริเวณที่ติดตั้ง

ชนิดของระบบสื่อสาร	Sensitivity	RSSI ห้องปฏิบัติการ	RSSI บริเวณที่ทดสอบ
NB-IoT True	-131 dBm	-51 dBm	-61 dBm
NB-IoT AIS	-131 dBm	-51 dBm	-70 dBm
LoRa	-142 dBm	-67 dBm	-68 dBm

ผลการทดสอบสัญญาณตามตารางที่ 5 ที่พบว่าระบบทั้ง 3 ความแรงของสัญญาณมากกว่า ค่า sensitivity ถึง 40 dBm ทำให้อุปกรณ์ทั้ง 3 สามารถเชื่อมต่อรับส่งข้อมูลได้ปกติ โดยที่การทดสอบของระบบ LoRa อุปกรณ์ควบคุมอยู่ห่างกับ gateway ไม่เกิน 10 เมตร

5.1.2 ทดสอบความแรงของสัญญาณที่ต่ำสุด ที่แต่ละอุปกรณ์รองรับได้

สัญญาณแบบ NB-IoT ทำงานโดยสัญญาณที่เชื่อมต่อกับ base station ที่ใกล้ที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยไม่สามารถระบุระยะของอุปกรณ์สื่อสาร NB-IoT กับ base station ได้แน่ชัด จึงอาศัยการหาพื้นที่ที่มีความแรงของสัญญาณต่ำและไปยังทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณที่ต่ำกว่า จนกว่าอุปกรณ์ไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้



รูปที่ 38 แผนที่จุดทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ NB-IoT เพื่อหาค่าต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อได้

การทดสอบโดยกำหนดจุดที่จะทดสอบตามรูปที่ 38 มีผลการทดสอบในแต่ละจุดตามตารางที่ 6 โดยแต่ละจุดห่างกัน 50 เมตรพบว่าความแรงของสัญญาณที่ต่ำที่ True NB-IoT Developer Board สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้คือ -93 dBm ที่จุดที่ 3 และ พบว่าความแรงของสัญญาณที่ต่ำที่ AIS DEVIO NB-SHIELD สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้คือ -95 dBm ที่จุดที่ 4 ค่าทั้งสองแตกต่างกันไม่มากนักเนื่องจากอุปกรณ์ของทั้ง 2 ใช้โมดูลสื่อสาร Quectel BC95 เหมือนกัน

ตารางที่ 6 ตารางทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ NB-IoT ในแต่ละจุด

ระบบสื่อสาร	Sensitivity	1	2	3	4	5
NB-IoT True	-131 dBm	-83 dBm	-87 dBm	-93 dBm	NA	NA
NB-IoT AIS	-131 dBm	-78 dBm	-83 dBm	-87 dBm	-95 dBm	NA



รูปที่ 39 แผนที่จุดทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ LoRa เพื่อหาค่าต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อได้

การทดสอบโดยกำหนดจุดที่จะทดสอบตามรูปที่ 38 โดยที่จุดที่ 1 เป็นตำแหน่งของ LoRa gateway โดยที่การทดสอบในจุดที่ 1 วางชุดทดสอบ LoRa ห่างจาก LoRa gateway 5 เมตร และจุด ห่างกันระหว่างจุด 50 เมตร ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 7 พบว่าระบบสามารถสื่อสารได้ในจุดสุดท้ายที่ 7 ห่างกับจุดที่ 1 ประมาณ 300 เมตร ที่ความแรงสัญญาณต่ำสุด -111 dBm เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้เป็นเกตเวย์ที่ใช้เป็นขนาดเล็ก หากใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมจะช่วยให้ระยะการสื่อสารได้ไกลมากขึ้น

ตารางที่ 7 ตารางทดสอบความแรงของสัญญาณชุดทดสอบ LoRa ในแต่ละจุด

ตำแหน่งที่	ค่า RSSI
1	-60 dBm
2	-76 dBm
3	-83 dBm
4	-88 dBm
5	-95 dBm
6	-101 dBm
7	-111 dBm
8	NA

5.2 ทดสอบของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน โดยทดสอบว่าระบบควบคุมส่งค่าต่างๆ จากเซ็นเซอร์ไปยังแดชบอร์ดได้ถูกต้องหรือไม่ และทดสอบการควบคุมจากแดชบอร์ดว่าสามารถส่งค่ากลับไปยังอุปกรณ์ควบคุมได้ถูกต้องหรือไม่

เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ 1. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

2. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS

3. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True

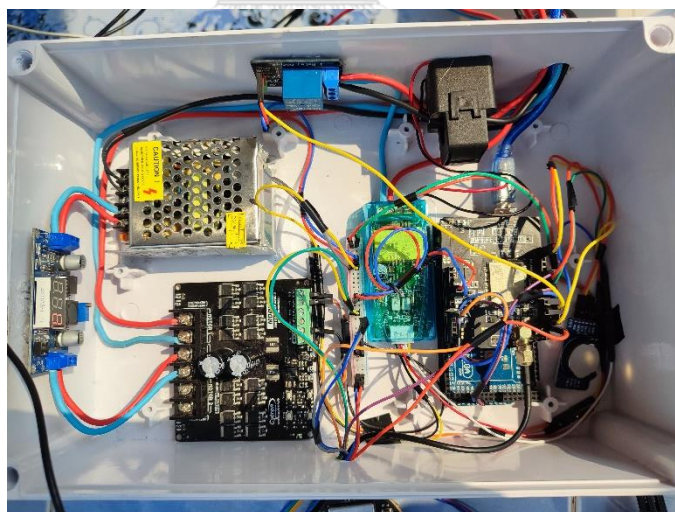
4. คอมพิวเตอร์

วิธีการทดสอบ

1. เปิดใช้งานชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยการทำงานที่โคมไฟ 100%

2. อ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดได้ผ่าน Arduino IDE และค่าที่แสดงผลผ่านแดชบอร์ด และบันทึกผล

3. เปลี่ยนชุดทดสอบเป็นระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS และ True แล้วทำข้อ 1-2 ตามลำดับ



รูปที่ 40 อุปกรณ์ของระบบควบคุม

ตารางที่ 8 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ค่าที่ตรวจจับ	ค่าที่อ่านได้จาก Arduino IDE	ค่าที่อ่านได้จาก แดชบอร์ด	ความถูกต้อง ของข้อมูล
แรงดันไฟฟ้า (V)	230.1	230.1	100%
กระแสไฟฟ้า (A)	0.40	0.40	100%
กำลังไฟจริง (W)	90.9	90.9	100%
ตัวประกอบกำลัง	0.95	0.95	100%
ความถี่ (Hz)	50	50	100%
ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)	56.6	56.6	100%
อุณหภูมิ (T)	33.7	33.7	100%
ค่าความสว่าง (Ω)	58	58	100%

ตารางที่ 9 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย AIS

ค่าที่ตรวจจับ	ค่าที่อ่านได้จาก Arduino IDE	ค่าที่อ่านได้จาก แดชบอร์ด	ความถูกต้อง ของข้อมูล
แรงดันไฟฟ้า (V)	216.0	216.0	100%
กระแสไฟฟ้า (A)	0.43	0.43	100%
กำลังไฟจริง (W)	89.3	89.3	100%
ตัวประกอบกำลัง	0.96	0.96	100%
ความถี่ (Hz)	50	50	100%
ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)	55.6	55.6	100%
อุณหภูมิ (T)	34	34	100%
ค่าความสว่าง (Ω)	59	59	100%

ตารางที่ 10 ผลทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารของชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย True

ค่าที่ตรวจจับ	ค่าที่อ่านได้จาก Arduino IDE	ค่าที่อ่านได้จาก แดชบอร์ด	ความถูกต้อง ของข้อมูล
แรงดันไฟฟ้า (V)	231.7	231.7	100%
กระแสไฟฟ้า (A)	0.43	0.43	100%
กำลังไฟจริง (W)	91.1	91.1	100%
ตัวประกอบกำลัง	0.93	0.93	100%
ความถี่ (Hz)	50	50	100%
ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)	55.2	55.2	100%
อุณหภูมิ (T)	33.8	33.8	100%
ค่าความสว่าง (Ω)	57	57	100%

5.3 ทดสอบการสั่งงานควบคุม

การทดสอบเป็นการทดสอบการสั่งควบคุมโคมไฟถนน ผ่าน แดชบอร์ด สำหรับทดสอบชุดควบคุมว่าสามารถสั่งการทำงานปิด หรือเปิดแบบกำหนดความสว่าง 1- 10 ระดับของโคมไฟได้ โดยวัดสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้ LED ไตรเวอร์ วัดกำลังไฟฟ้าของโคมไฟ และวัดความสว่างของโคมไฟ

เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ 1. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

2. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS

3. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True

4. โคมไฟ

5. เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า

วิธีการทดสอบ

1. นำชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa ต่อเข้ากับโคมไฟ

2. เปิดใช้งานชุดทดสอบควบคุมไฟถนน และสั่งงานปิดโคมไฟถนนผ่านเว็บอ่านค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ผ่านโปรแกรม Arduino IDE และบันทึกผล

3. ใช้เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ควบคุม LED ไตรเวอร์

กำลังไฟฟ้าของโคมไฟถนน เครื่องมือวัดความสว่างที่ระยะห่างจากโคมไฟ 5 เซนติเมตร และบันทึกผล

4. ทำข้อ 2 และ 3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนการสั่งสถานะการทำงานของโคมไฟที่เปิดไฟที่ความสว่าง 1-10 ระดับ
5. เปลี่ยนชุดทดสอบเป็นระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS และ True แล้วทำข้อ 2-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ LoRa

ระดับความสว่าง	ค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ควบคุม LED ไตรเวอร์ (V)	ค่าความผิดพลาดของสัญญาณควบคุม	กำลังไฟฟ้าของโคมไฟ (W)
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00%	0.00
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.98	-2.00%	24.8
2 (ความสว่างที่ 20 %)	1.99	-0.50%	48.9
3 (ความสว่างที่ 30 %)	2.97	-1.00%	64.8
4 (ความสว่างที่ 40 %)	3.99	-0.25%	81.0
5 (ความสว่างที่ 50 %)	4.96	-0.80%	90.7
6 (ความสว่างที่ 60 %)	5.98	-0.33%	103.9
7 (ความสว่างที่ 70 %)	6.95	-0.71%	103.9
8 (ความสว่างที่ 80 %)	7.98	-0.25%	103.9
9 (ความสว่างที่ 90 %)	8.95	-0.56%	103.9
10 (ความสว่างที่ 100 %)	9.97	-0.30%	103.9

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ AIS

ระดับความสว่าง	ค่าแรงดันไฟฟ้าของ สัญญาณที่ควบคุม LED ไดรเวอร์ (V)	ค่าความผิดพลาด ของสัญญาณควบคุม	กำลังไฟฟ้าของโคมไฟ (W)
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00%	0.00
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.98	-2.00%	24.9
2 (ความสว่างที่ 20 %)	1.98	-1.00%	48.5
3 (ความสว่างที่ 30 %)	2.97	-1.00%	66.1
4 (ความสว่างที่ 40 %)	3.96	-1.00%	78.2
5 (ความสว่างที่ 50 %)	4.97	-0.60%	91.2
6 (ความสว่างที่ 60 %)	5.97	-0.50%	98.3
7 (ความสว่างที่ 70 %)	6.96	-0.57%	103.9
8 (ความสว่างที่ 80 %)	7.96	-0.50%	103.9
9 (ความสว่างที่ 90 %)	8.97	-0.33%	103.9
10 (ความสว่างที่ 100 %)	9.98	-0.20%	103.9

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการควบคุมความสว่างโคมไฟ True

ระดับความสว่าง	ค่าแรงดันไฟฟ้าของ สัญญาณที่ควบคุม LED ไดรเวอร์ (V)	ค่าความผิดพลาด ของสัญญาณควบคุม	กำลังไฟฟ้าของโคมไฟ (W)
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00%	0
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.99	-1.00%	25.300
2 (ความสว่างที่ 20 %)	1.97	-1.50%	47.500
3 (ความสว่างที่ 30 %)	2.98	-0.67%	64.900
4 (ความสว่างที่ 40 %)	3.99	-0.25%	89.900
5 (ความสว่างที่ 50 %)	4.97	-0.60%	91.200
6 (ความสว่างที่ 60 %)	5.94	-1.00%	99.700
7 (ความสว่างที่ 70 %)	6.98	-0.29%	103.600
8 (ความสว่างที่ 80 %)	7.98	-0.25%	103.700
9 (ความสว่างที่ 90 %)	8.97	-0.33%	103.500
10 (ความสว่างที่ 100 %)	9.98	-0.20%	103.500

จากตารางที่ 11, 12, และ 13 การทดสอบระบบควบคุมความสว่างของชุดทดสอบทั้ง 3 พบว่าการทำงานของส่วนควบคุมความสว่างตอบสนองได้ปกติ โดยผลแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณใช้ที่ควบคุม LED ไดรเวอร์ เทียบกับตารางที่ 6 ที่ถูกออกแบบไว้ พบว่าค่าความผิดพลาดของแรงดันสัญญาณควบคุมมีค่าไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของสัญญาณควบคุมเกิดจากอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟ และการโมดูเลทสัญญาณ PWM โดยคำสั่ง map (lighlevel,0,10,0,255) สำหรับการหา duty cycle ค่าที่ออกมาจะถูกทำให้เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ควบคุมจึงมีความผิดพลาดจากที่ออกแบบเล็กน้อยตามผลการทดสอบที่ออกมาข้างต้น

นอกจากข้างต้นแล้วยังพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าของโคมไฟในแต่ละระดับมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่องแปรผันตามระดับความสว่างอย่างมีนัยยะสำคัญจนถึงระดับความสว่าง 6 ส่วนระดับความสว่างที่ 7-10 กำลังของโคมไฟถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 103.9 วัตต์ ทั้งนี้แรงดันของสัญญาณควบคุม LED ไดรเวอร์ ตอบสนองการทำงานตามที่กำหนด ดังนั้นจึงสรุปสาเหตุข้างต้นเกิดจากโคมไฟเก่าที่ไม่มีสามารถทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 150 วัตต์ได้

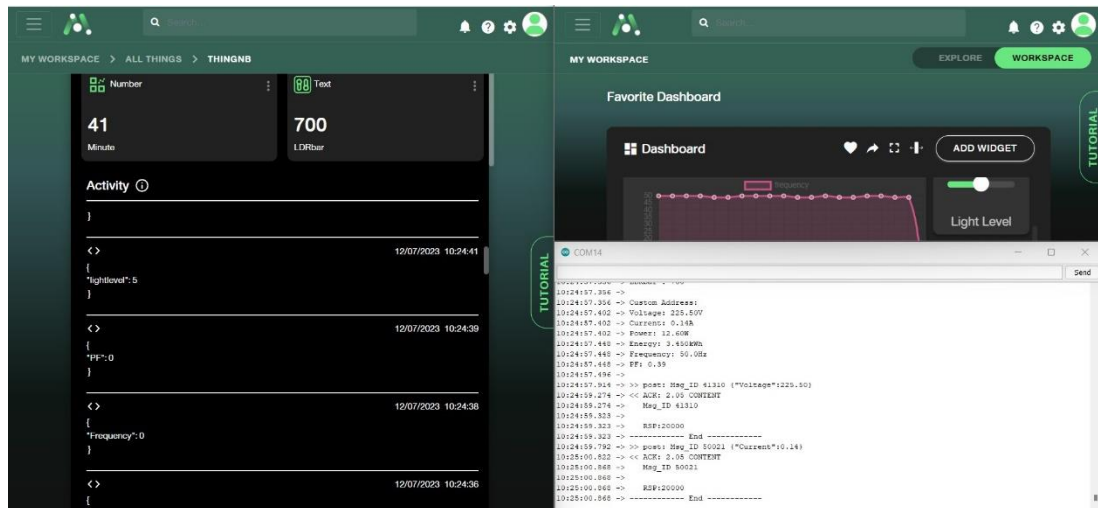
5.4 ทดสอบเวลาแฝงของระบบ

การทดสอบเวลาแฝงของระบบ (Latency time) จะทดสอบโดยสั่งเปิดโคมไฟผ่านแดชบอร์ดของทั้ง 3 ระบบสื่อสาร และวัดระยะเวลาที่กดสั่งเปิดโคมจนโคมเปิดและส่งค่ากลับมายังแดชบอร์ด โดยที่ค่าเวลาแฝงของระบบจะเป็นครึ่งหนึ่งของเวลาดังกล่าว

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบเวลาแฝงของระบบ

ครั้งที่	แฝงของระบบ LoRa (s)	แฝงของระบบ NB-IoT Ais (s)	แฝงของระบบ NB-IoT True (s)
1	3.23	8.69	5.34
2	3.04	9.36	4.23
3	2.39	8.56	4.65
4	4.01	8.77	4.10
5	3.45	9.48	3.98
6	3.06	9.73	3.65
7	3.56	9.25	3.75
8	3.64	9.41	3.23
9	3.19	9.33	3.44
10	3.75	8.94	3.49
ค่าเฉลี่ย	3.37	9.15	4.33

ผลการทดสอบเวลาแฝงของระบบจากตารางที่ 14 แสดงให้เห็นว่าเวลาแฝงของระบบ LoRa มีค่าน้อยสุดอยู่ที่ 3.37 วินาที เนื่องจาก library ของระบบ LoRa สามารถส่งข้อมูลหลายตัวแปรได้พร้อมกัน ทำให้เวลาแฝงน้อยกว่าระบบอื่น และในส่วนของเวลาแฝงของระบบ NB-IoT Ais มีค่า 9.15 วินาที ซึ่งมากกว่าระบบอื่นๆ เนื่องจากตัวระบบของเซิร์ฟเวอร์กำหนดให้มี delay ในการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 ภาพการทดสอบเวลาแฝงของระบบ NB-IoT Ais

5.5 ทดสอบความเที่ยงตรงในการวัดค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ PZEM-004T

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าของโคมไฟถนน โดยชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนน ทั้ง 3 ชุดทดสอบ ที่ใช้ PZEM-004T เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการวัดค่าทางไฟฟ้า และอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าผ่าน Arduino mega เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy โดยการทดสอบคำนึงถึง สถานะการทำงานปกติของโคมไฟถนนในรูปแบบต่างๆ ดังนี้ ปิดไฟ และเปิดไฟที่ความสว่าง 1-10 ซึ่งค่าทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบไฟได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า วัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง และตัวประกอบกำลัง

เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ 1. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

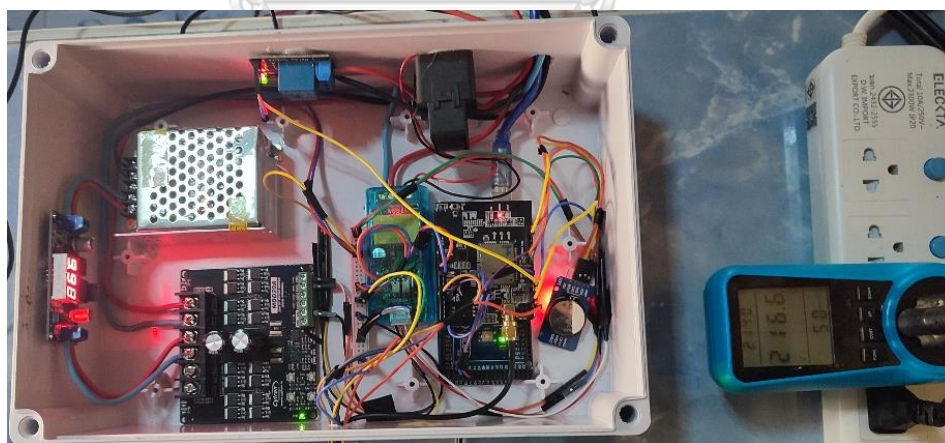
2. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS
3. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True
4. โคมไฟ
5. เครื่องมือวัด ปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy

วิธีการทดสอบ

1. นำชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์
2. เปิดใช้งานชุดทดสอบควบคุมไฟถนน และสั่งงานปิดคอมพิวเตอร์ไฟถนนผ่านเว็บอ่านค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ผ่านโปรแกรม Arduino IDE และบันทึกผล
3. ปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy วัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆของคอมพิวเตอร์ไฟถนนและบันทึกผล
4. ทำข้อ 2 และ 3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนการสั่งสถานะการทำงานของคอมพิวเตอร์ไฟที่เปิดไฟที่ความสว่าง 1-10 ระดับ
5. เปลี่ยนชุดทดสอบเป็นระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย AIS และ True แล้วทำข้อ 2-4 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่วัดจาก PZEM-004T กับปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy โดยใช้ค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ PZEM-004T จากการคำนวณตามสมการที่ค่าความผิดพลาดของ PZEM-004T =

$$\left| \frac{\text{ค่าที่วัดได้จาก PZEM-004T} - \text{ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ A}}{\text{ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ A}} \times 100 \right| \quad (13)$$



รูปที่ 42 การทดสอบและเก็บผลผ่านปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ระดับความสว่าง	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (V)	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (V)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	230.1	230.3	0.09%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	233.4	233.9	0.21%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	233.8	233.8	0.00%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	235.0	235.4	0.17%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	237.3	233.8	1.50%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	234.7	233.8	0.38%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	233.6	235.1	0.64%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	237.6	23.61	0.64%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	234.8	234.6	0.09%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	231.8	231.3	0.22%

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย
AIS

ระดับความสว่าง	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (V)	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (V)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	215.3	214.3	0.47%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	213.5	212.3	0.57%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	211.9	210.8	0.52%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	215.0	213.6	0.66%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	216.0	216.5	0.23%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	218.3	218.3	0.00%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	216.9	216.3	0.28%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	218.5	217.5	0.46%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	220.6	219.6	0.46%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	219.3	217.6	0.78%

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย

True

ระดับความสว่าง	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (V)	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (V)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	223.5	225.4	0.84%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	220.0	218.6	0.64%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	222.1	220.9	0.54%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	219.6	221.8	0.99%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	217.6	218.0	0.18%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	220.7	219.8	0.41%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	222.7	219.0	1.69%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	220.3	222.6	1.03%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	222.6	220.0	1.18%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	223.5	220.0	1.59%

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ระดับความสว่าง	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (A)	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (A)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.15	0.15	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	0.23	0.23	4.55%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	0.30	0.30	3.45%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	0.36	0.36	2.86%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	0.40	0.39	2.56%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	0.44	0.44	0.00%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	0.46	0.45	2.22%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	0.45	0.44	2.27%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	0.46	0.44	4.55%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	0.46	0.45	2.22%

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครื่องข่าย AIS

ระดับความสว่าง	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (A)	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (A)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.14	0.14	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	0.24	0.24	4.35%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	0.33	0.32	3.13%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	0.38	0.38	0.00%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	0.43	0.42	4.88%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	0.47	0.45	4.44%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	0.49	0.48	4.26%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	0.49	0.48	4.26%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	0.49	0.48	4.26%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	0.49	0.48	4.26%

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครื่องข่าย True

ระดับความสว่าง	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ จาก PZEM-004T (A)	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (A)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.14	0.14	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	0.24	0.24	4.35%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	0.32	0.31	3.23%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	0.38	0.37	2.70%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	0.43	0.42	4.88%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	0.47	0.45	4.44%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	0.47	0.47	2.17%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	0.48	0.47	4.35%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	0.48	0.47	4.35%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	0.48	0.47	4.35%

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ระดับความสว่าง	กำลังไฟฟ้าจริงวัดได้ จาก PZEM-004T (W)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (W)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	25.5	25.0	2.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	47.6	48.7	2.26%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	64.7	65.2	0.77%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	80.4	80.6	0.25%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	90.9	91.3	0.44%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	100.7	103.9	3.08%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	103.7	103.9	0.19%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	103.5	103.9	0.38%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	103.4	103.9	0.48%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	103.3	103.9	0.58%

ตารางที่ 22 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย AIS

ระดับความสว่าง	กำลังไฟฟ้าจริงวัดได้ จาก PZEM-004T (W)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (W)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	24.9	24.3	2.47%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	47.2	48.0	1.67%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	65.5	65.9	0.61%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	80	80.2	0.25%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	89.3	89.5	0.22%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	98.9	98.5	0.41%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	103.3	103.9	0.58%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	103.3	103.9	0.58%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	103.2	103.9	0.67%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	103.2	103.9	0.67%

ตารางที่ 23 เปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย True

ระดับความสว่าง	กำลังไฟฟ้าจริงวัดได้ จาก PZEM-004T (W)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy (W)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	24.8	24.7	0.40%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	47.9	48.7	1.64%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	65.4	65.9	0.76%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	78.6	78.8	0.25%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	89.1	91.3	2.41%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	99.2	98.5	0.71%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	103.3	103.9	0.58%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	103.4	103.9	0.48%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	103.5	103.9	0.38%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	103.6	103.9	0.29%

ตารางที่ 24 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ระดับความสว่าง	ตัวประกอบกำลังวัดได้ จาก PZEM-004T	ตัวประกอบกำลังที่วัดได้ จากปลั๊กมิเตอร์ Sharphy	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.76	0.76	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	0.89	0.90	1.11%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	0.93	0.94	1.06%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	0.94	0.95	1.05%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	0.95	0.98	3.06%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	0.96	0.97	1.03%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	0.96	0.97	1.03%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	0.96	0.99	3.03%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	0.96	0.96	0.00%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	0.96	0.97	1.03%

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย AIS

ระดับความสว่าง	ตัวประกอบกำลังวัดได้ จาก PZEM-004T	ตัวประกอบกำลังที่วัดได้ ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	24.9	24.3	1.25%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	47.2	48	3.19%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	65.5	65.9	2.08%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	80.0	80.2	3.06%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	89.3	89.5	3.03%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	98.9	98.5	3.03%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	103.3	103.9	1.02%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	103.3	103.9	2.02%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	103.2	103.9	3.03%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	103.2	103.9	3.03%

ตารางที่ 26 เปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT
เครือข่าย True

ระดับความสว่าง	ตัวประกอบกำลังวัดได้ จาก PZEM-004T	ตัวประกอบกำลังที่วัดได้ จาก ปลั๊กมิเตอร์ Sharphy	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	0.75	0.75	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	0.9	0.93	3.23%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	0.93	0.95	2.11%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	0.95	0.95	0.00%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	0.96	1.00	4.00%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	0.96	0.98	2.04%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	0.96	0.99	3.03%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	0.96	1.00	4.00%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	0.97	1	3.00%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	0.97	0.99	2.02%

ตารางที่ 27 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน LoRa

ระดับความสว่าง	ความถี่ได้จาก PZEM-004T (Hz)	ความถี่ที่วัดได้จาก ปลั๊ก มิเตอร์ Sharphy (Hz)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	50.00	50.01	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	49.90	50.00	0.20%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	50.00	50.01	0.00%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	50.00	50.00	0.00%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	50.00	50.00	0.00%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	50.00	50.00	0.00%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	50.00	50.00	0.00%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	50.00	50.00	0.00%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	50.00	50.00	0.00%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	50.00	50.00	0.00%

ตารางที่ 28 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครื่องข่าย AIS

ระดับความสว่าง	ความถี่ได้จาก PZEM-004T (Hz)	ความถี่ที่วัดได้จาก ปลั๊ก มิเตอร์ Sharphy (Hz)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	50.00	50.00	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	49.90	50.00	0.00%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	50.00	50.00	0.00%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	50.00	50.00	0.00%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	50.01	50.00	0.00%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	50.00	50.00	0.00%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	50.00	50.00	0.00%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	50.00	50.00	0.00%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	49.90	50.01	0.00%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	50.00	50.00	0.00%

ตารางที่ 29 เปรียบเทียบผลการวัดความถี่ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน NB-IoT เครือข่าย True

ระดับความสว่าง	ความถี่ได้จาก PZEM-004T (Hz)	ความถี่ที่วัดได้จาก ปลั๊ก มิเตอร์ Sharphy (Hz)	ค่าความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ PZEM-004T
0 (ปิดโคมไฟ)	0.00	0.00	0.00%
1 (ความสว่างที่ 10 %)	50.00	50.00	0.00%
2 (ความสว่างที่ 20 %)	49.90	50.00	0.00%
3 (ความสว่างที่ 30 %)	50.00	50.00	0.00%
4 (ความสว่างที่ 40 %)	50.01	50.00	0.00%
5 (ความสว่างที่ 50 %)	50.00	50.00	0.00%
6 (ความสว่างที่ 60 %)	50.00	50.01	0.00%
7 (ความสว่างที่ 70 %)	50.00	50.00	0.00%
8 (ความสว่างที่ 80 %)	50.00	50.00	0.00%
9 (ความสว่างที่ 90 %)	50.00	50.00	0.00%
10 (ความสว่างที่ 100 %)	50.00	50.00	0.00%

ผลการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ PZEM จากตารางที่การทดสอบข้างต้น พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความถี่ เทียบกับปลั๊กมิเตอร์ Sharphy ต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ระบบควบคุมไฟถนนไม่ต้องการความเที่ยงตรงในการวัดมากนักความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆแค่ 5 เปอร์เซ็นต์เพียงพอต่อการใช้งานสำหรับโคมไฟ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.6 ทดสอบความเที่ยงตรงในการวัดค่าของอุปกรณ์ AM2302 Module dht22

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของโคมไฟถนน โดยชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนน ที่ใช้ AM2302 Module dht22 เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการวัดค่าทางไฟฟ้า และอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าผ่าน Arduino mega เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ UT333 โดยการทดสอบดังนี้

เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ 1. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน

2. คอมพิวเตอร์

3. เครื่องมือวัด UT333

วิธีการทดสอบ

1. เปิดชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน

2. เก็บค่าความชื้นและอุณหภูมิผ่านบราวเซอร์ทุก 3 ชม. ตั้งแต่ 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 12.00, 15.00, 18.00 และ 21.00 น.
3. วัดค่าความชื้นและอุณหภูมิด้วยเครื่องมือวัด UT333 ในช่วงเวลาเดียวกันกับข้อที่ 2



รูปที่ 43 ตัวอย่างการทดสอบการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิผ่าน UT333 ตารางที่ 30 เปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิ AM2302 Module กับ UT333

เวลา	อุณหภูมิ (°C) ที่อ่านได้จาก AM2302	อุณหภูมิ (°C) ที่อ่านได้จาก UT333	ค่าความผิดพลาด
0.00	32.2	33.4	-3.59%
3.00	30.3	31.5	-3.81%
6.00	30.4	32.0	-5.00%
9.00	31.0	32.3	-4.02%
12.00	44.9	45.8	-1.97%
15.00	42.4	43.7	-2.97%
18.00	34.6	33.8	2.37%
21.00	33.7	33.1	1.81%

ตารางที่ 31 เปรียบเทียบผลการวัดความชื้น AM2302 Module กับ UT333

เวลา	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จาก AM2302	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จาก UT333	ค่าความผิดพลาด
0.00	77.1	75.3	2.39%
3.00	79.6	78.2	1.79%
6.00	82.5	79.9	3.25%
9.00	64.6	62.1	4.03%
12.00	55.7	52.6	5.89%
15.00	47.3	44.1	7.26%
18.00	69.4	64.4	7.76%
21.00	80.2	75.1	6.79%

ผลการทดสอบการวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ได้จากเซ็นเซอร์ AM2302 เทียบกับเครื่อง UT333 ตามตารางที่ 30 และ 31 ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ความชื้นผิดพลาดมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์แต่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ การใช้งานกับระบบควบคุมไฟถนนที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ ใช้งานค่าความชื้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบการควบคุมความสว่างเท่านั้นโดยใช้สำหรับประกอบการตัดสินใจเพื่อเพิ่มความสว่างของแสงในช่วงเวลาที่น่าจะเกิดฝน ดังนั้นค่าความผิดพลาดของความชื้นเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลต่อการตัดสินใจและการทำงานของระบบมากนัก โดยจะมีการทดสอบถัดไปในหัวข้อ 5.6

5.7 การทดสอบการตอบสนองทำงานในแต่ละรูปแบบการทำงาน

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในแต่ละรูปแบบการทำงาน เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถทำงานได้ปกติในทั้ง 4 รูปแบบดังนี้ 1.ควบคุมเฉพาะความสว่าง 2.ควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด 3.แบบควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด) 4.รูปควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด แบบอัตโนมัติ

เครื่องมือที่ใช้การทดสอบ 1. ชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน

2. คอมพิวเตอร์

วิธีการทดสอบ

1. เปิดชุดทดสอบระบบควบคุมไฟถนน

2. โดยเช็คค่าเริ่มต้นของการทำงานดังนี้ เวลาเปิด (time-on) = 18.00 น.,

เวลาปิด (time-off) = 6.00., LDRbar = 700 , ระดับค่าความสว่างเริ่มต้น
lighthlevel-switch=5

3. ทดสอบระบบการควบคุมรูปแบบ (state) ต่างๆ ทั้ง 4 ตาม
สภาพแวดล้อมและเวลาตามเงื่อนไขในตารางที่ 32 และเก็บผล



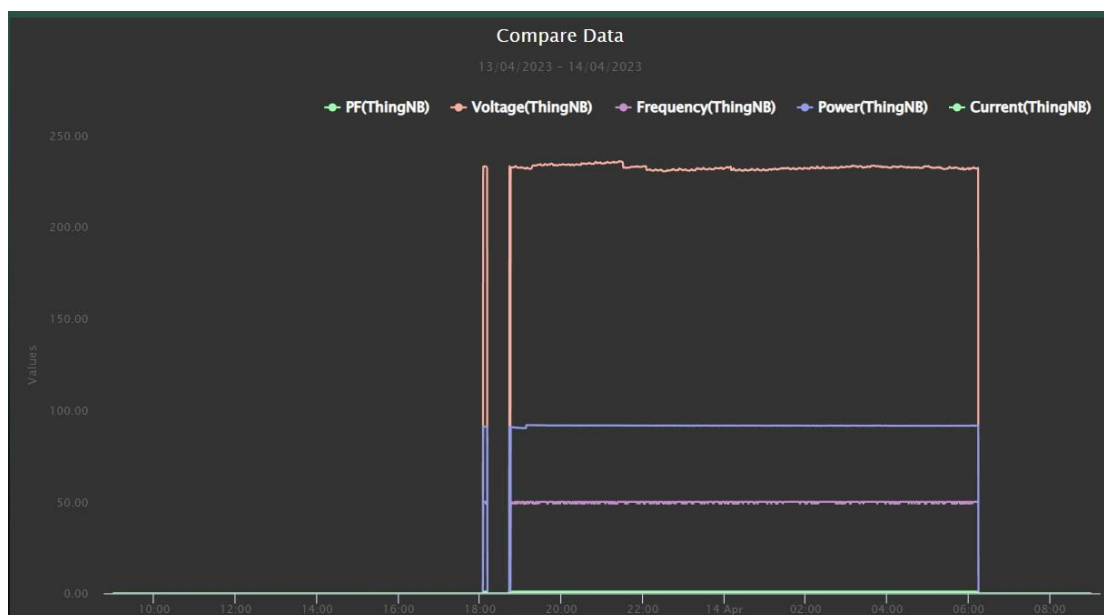
รูปที่ 44 ตัวอย่างการทดสอบการตอบสนองทำงานของระบบในรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 32 ผลการทดสอบการควบคุมไฟถนนภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

รูปแบบ	เงื่อนไข	ระดับความสว่าง (lightlevel)
1.ควบคุมเฉพาะความสว่าง	- ไม่มีเงื่อนไข	5
2.ควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิด	- ช่วงเวลาระหว่าง 6.00-18.00 นาฬิกา	0
	- ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน	5
3.แบบควบคุมอัตโนมัติโดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อม	- ช่วงเวลาระหว่าง 6.00-18.00 นาฬิกา - $LDR < LDR_{bar}$	0
	- ช่วงเวลาระหว่าง 6.00-18.00 นาฬิกา - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นน้อยกว่า 95%	5
	- ช่วงเวลาระหว่าง 6.00-18.00 นาฬิกา - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นมากกว่า 95%	6
	- ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR < LDR_{bar}$	5
	- ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นน้อยกว่า 95%	5
	- ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นมากกว่า 95%	6
	- ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นน้อยกว่า 95%	5
4.รูปควบคุมความสว่างและเวลาปิด-เปิดแบบอัตโนมัติ	- ช่วงเวลาระหว่าง 6.00-18.00 นาฬิกา - $LDR < LDR_{bar}$	0

	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นน้อยกว่า 95% - ไม่พบวัตถุเคลื่อนไหว 	5
	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นมากกว่ากว่า 95% - ไม่พบวัตถุเคลื่อนไหว 	6
	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นน้อยกว่า 95% - พบวัตถุเคลื่อนไหว 	6
	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงเวลาระหว่าง 18.00 นาฬิกาถึง 6.00 นาฬิกาของอีกวัน - $LDR > LDR_{bar}$ - ค่าความชื้นมากกว่า 95% - พบวัตถุเคลื่อนไหว 	7

ผลการทดสอบข้างต้นในเงื่อนไขต่างๆ กับรูปแบบการควบคุมทั้ง 4 แบบ เมื่อเทียบกับรูปแบบการตัดสินใจที่งานวิจัยนี้ได้ออกแบบไว้ตามรูปที่ 26, 27, 28 พบว่าค่าระดับความสว่างที่เป็นไปตามที่งานวิจัยได้ออกแบบไว้ตามเงื่อนไขทั้งหมด



รูปที่ 45 แสดงรูปการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าใน 1 วัน ผ่านระบบ Magellan

5.8 การคำนวณราคาของอุปกรณ์ควบคุม

คำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ชุดควบคุมโดยคำนวณค่าอุปกรณ์เปรียบเทียบกับชุดควบคุมบนระบบสื่อสารทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 33 ตารางเปรียบเทียบราคาของระบบควบคุมไฟถนน ทั้ง 3 แพลตฟอร์มการสื่อสาร

อุปกรณ์	ราคา (บาท)	NB-IoT AIS	NB-IoT ture	LoRa
Arduino Mega 2560	720	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
PZEM-004T	320	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
LDR Photoresistor Sensor	30	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
DC Motor Driver	1200	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
RTC ds3231	85	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
DHT22 sensor	85	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
Motion sensor	300	1 ตัว	1 ตัว	1 ตัว
lora heltec	900			2 ตัว
AIS DEVIO NB-SHIELD	1,190	1 ตัว		
True NB-IoT Developer Board	1,150		1 ตัว	
Total cost		3,845	3,805	4,455

จากตารางที่ 33 เมื่อเปรียบเทียบราคาของระบบควบคุมไฟถนน พบว่าระบบสื่อสารของ Lora มีราคาที่แพงกว่าระบบอื่นเนื่องจากเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบนี้ไว้โดยใช้ อุปกรณ์ lora heltec ที่ทำหน้าที่เป็น gateway อีกหนึ่งตัวอีกทั้งราคาที่ยังรวมยังไม่รวมค่าใช้จ่ายในส่วนที่ gateway ต้องเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่านระบบไวไฟอีกด้วย ในส่วนของระบบ Ais ค่าบริการรายปีอยู่ที่ปีละ 350 บาท และของ True อยู่ที่ปีละ 300 บาทซึ่งสามารถสื่อสารกับเสา สัญญาณที่ให้บริการทั่วประเทศได้เลยสะดวกและมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบ LoRa เป็นอย่างมาก



บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบควบคุมไฟถนนอัตโนมัติ บนแพลตฟอร์มเทคโนโลยี NB-IoT และ LoRa โดยมีแนวคิดที่จะสร้างระบบควบคุมที่อาศัยการทำงานผ่าน Arduino เป็นแกนหลักในการทำงาน เพื่อเชื่อมต่อกับระบบสื่อสาร LoRa และ NB-IoT ของ AIS และ True และใช้สำหรับการประเมินผลสำหรับการสั่งควบคุมความสว่าง และการเปิด-ปิดของโคมไฟ ผ่านเว็บไซต์ anto.io, magellan.ais.co.th และ demo.thingsboard.io โดยออกแบบมีรูปแบบการควบคุมความสว่าง 4 แบบ 1.ควบคุมเฉพาะความสว่าง 2.ควบคุมความสว่างและเวลาเปิด-ปิด 3.แบบควบคุมความสว่างและเวลาเปิด-ปิด โดยคำนึงถึงรูปแวดล้อมด้วย (ความชื้นและแสงแดด) 4.รูปแบบควบคุมความสว่างและเวลาเปิด-ปิด แบบอัตโนมัติ และอาศัยพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมดังนี้ เวลา, ความชื้น, ความเข้มแสง และการตรวจจับการเคลื่อนไหว จากเซ็นเซอร์ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์เพื่อปรับความสว่างให้เข้ากับสถานการณ์ต่างๆ และสามารถมอนิเตอร์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของโคมไฟได้

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมไฟถนน อัตโนมัติ ทั้ง 3 แพลตฟอร์มการสื่อสารสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยตอบสนองต่อการสื่อสารของระบบทั้งส่งข้อมูลไปยังระบบ หรือรับข้อมูลการสั่งการผ่านหน้าเว็บได้ ระบบ NB-IoT สามารถใช้ได้ในพื้นที่ทั่วไปที่มีสัญญาณครอบคลุมถึงบริเวณวงกว้างค่าความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับความใกล้ไกลกับเสาสัญญาณโทรศัพท์ทั่วไปของ AIS และ True โดยที่ค่าความแรงสัญญาณต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้คือ แต่ในส่วนของระบบ LoRa ต้องพึ่ง Wi-Fi เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบอินเทอร์เน็ตและความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับการจัดวาง gateway ของระบบ มีค่าความแรงสัญญาณต่ำสุดที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ -111 dBm และระบบทั้งหมดสามารถประเมินผลสำหรับการควบคุมความสว่างของโคมไฟ ตามสภาพแวดล้อมและรูปการทำงานต่างๆได้อย่างถูกต้อง โดยที่มีค่าเวลาแฝงของระบบ LoRa, NB-IoT ของ AIS และ True มีค่าอยู่ที่ 3.37, 9.15 และ 4.33 วินาทีตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับปลั๊กมิเตอร์ของ Sharphy ต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เพียงพอต่อการใช้มอนิเตอร์การทำงานของโคมไฟ ในส่วนของราคาของอุปกรณ์ของ NB-IoT ของ AIS และ True อยู่ที่ 3,845 บาท และ 3,805 บาท ตามลำดับส่วนของ LoRa อยู่ที่ 4,455 บาท

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เพื่อป้องกันไฟกระชากทำให้อิเล็กทรอนิกส์เสียหายและมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าปกติ
2. ออกแบบอุปกรณ์บนแผ่น PCB บอร์ด ร่วมกับการลดขนาดเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม เพื่อให้มีขนาดเล็กและเหมาะสมกับการใช้งาน
3. เปลี่ยนรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลให้อยู่บนคลาวด์ผ่าน Node-RED แทนไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเปลี่ยนหรืออัปเดตการทำงานเพิ่มเติมในภายหลัง



เอกสารอ้างอิง

- [1] World on the edge – Energy Data Efficiency 2010. Available at (Accessed on March 1, 2019)
- [2]http://www.eppo.go.th/images/EnergyStatistics/energyinformation/Energy_Statistics/00All.pdf (Accessed on March 5, 2019)
- [3] Gul Shahzad, Heekwon Yang, Arbab Waheed Ahmad, and Chankil Lee, “Energy-Efficient Intelligent Street Lighting System Using Traffic-Adaptive Control”, IEEE Sensors, Vol. 16, No. 13, 2016, pp. 5397-5405
- [4] รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมไฟถนนสาธารณะ ของการไฟฟ้านครหลวง, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปีพ.ศ.2560
- [5] Satwinder Singh, “Review of an Energy Efficient Smart Street Lighting System”, International Journal of Research (IJR), Vol-1, Issue-5, 2014, pp. 1018-1023
- [6] [Online], <http://www.flyingmorning.com/th/articles/99980%E0%B8%97%E0%B8%B3%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A-lora> (Accessed on March 7, 2019)
- [7] [Online] <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/289/51.PDF> (Accessed on March 29, 2019)
- [8] รศ. ดร.ปรีชา กอเจริญ และคณะ, บทความวิชาการ “เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย สำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง”, [Online], https://www.tcithaijo.org/index.php/NBTC_Journal/article/download/11003/89414/ (Accessed on March 23, 2019)
- [9] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei and Seung-Hoon Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT” [Online], <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061#tbl1> (Accessed on March 23, 2019)

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เกียรติศักดิ์ บุญประเสริฐ
วัน เดือน ปี เกิด	29 สิงหาคม พ.ศ.2537
สถานที่เกิด	จ.ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	122 หมู่ 1 ต.ตาหลวง อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY