# การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN

นายจิตติวัชร์ สมุหศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Development of an Automatic Meter Reading and Outage Management System using LoRaWAN Technology

Mr. Jittiwat Samuhasilp

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN |
| โดย | นายจิตติวัชร์ สมุหศิลป์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรเพชญ ชื้อนิธิไพศาล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรีย์ พุ่มรินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จิตติวัชร์ สมุหศิลป์ : การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN. ( Development of an Automatic Meter Reading and Outage Management System using LoRaWAN Technology) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.วันเฉลิม โปรา

Automatic Meter Reading (AMR) เป็นส่วนสำคัญของระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายที่สามารถให้ข้อมูลจากลูกค้าเพื่อการตรวจสอบค่าวัดที่จำเป็นต่อระบบไฟฟ้า และด้วยความช่วยเหลือของเทคโนโลยีการสื่อสารจึงสามารถใช้ AMR ช่วยเหลือในระบบจัดการไฟฟ้าดับได้ เมื่อเกิดการขัดข้อง AMR จะส่งการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับไปยังผู้ให้บริการ (Utilities) เพื่อประเมินสถานการณ์ และส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ขาดไม่ได้คือรูปแบบการสื่อสารของ AMR ซึ่งปัจจุบันมีระบบการสื่อสารที่ได้มีบทบาทมากขึ้น เช่น LoRaWAN ที่เป็น Low Power Wide Area Network (LPWAN) ที่ให้การส่งสัญญาณในระยะไกลโดยใช้พลังงานที่ต่ำ อย่างไรก็ตามมันยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความเร็วในการส่ง ขนาดของข้อมูล หรือ ความจุของเครือข่าย การนำมาใช้งานร่วมกับ AMR เพื่อใช้งานในระบบจัดการไฟฟ้าดับจึงจำเป็นต้องหาอัลกอริธึมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดังกล่าว บทความนี้จึงจะศึกษาถึงวิธีการใช้ LoRaWan ร่วมกับ AMR ในการอ่านค่าวัดหรือสถานะและพัฒนาอัลกอริธึมที่เหมาะสมเพื่อใช้งาน LoRaWAN ร่วมกับระบบจัดการไฟฟ้าดับดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970125521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: AMR, OMS, LoRaWAN

Jittiwat Samuhasilp : Development of an Automatic Meter Reading and Outage Management System using LoRaWAN Technology. Advisor: Asst. Prof. WANCHALERM PORA

Automatic Meter Reading (AMR) is an integral part of the electrical power distribution system that can provide customer information to determine the measurements necessary for the electrical system and with the help of communication technology, so AMR can use in Outage Management System (OMS). When an power outage occurs, AMR can sends a power outage notification to the service provider to assess the situation and the essential part is an indispensable communication model of AMR. Nowadays, the communication system has played more roles, such as LoRaWAN, a Low Power Wide Area Network (LPWAN) that provides long-distance signal transmission using low energy. However, it also has some limitations, such as the speed of transmission, the size of the data or the capacity of the network. In conjunction with AMR to operate in power management systems, it is necessary to find the right algorithms for such applications. This article is going to learn how to use LoRaWan in conjunction with AMR to read the measurement or status and develop the appropriate algorithms to use LoRaWAN in conjunction with such electrical management systems.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Electrical Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือมากมายจากผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ไม่ว่าจะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ผู้ช่วยศาสตรจารย์ วันเฉลิม โปรา ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยจำสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ที่รู้จักทุกคน ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและการประยุกต์วงจร และเพื่อนๆ คนรู้จักของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและมิตรภาพที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณญาติๆ พี่น้องของข้าพเจ้า ที่เข้าใจในตัวข้าพเจ้า คอยช่วยเหลือและสนับสนุนในการตัดสินใจของข้าพเจ้าจนงานวิจัยและวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาอันเป็นที่รักยิ่งที่คอยดูแลเอาใจใส่ เข้าใจและช่วยเหลือข้าพเจ้าจนถึงที่สุดเสมอมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่มีทางสำเร็จเพราะท่านทั้งสอง

ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากโครงการร่วมระหว่างการไฟฟ้านครหลวงและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาทางหลักสูตร Smart Grid and Renewable Energy

จิตติวัชร์ สมุหศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญ

**หน้า**


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ ..... 16

1.1 แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ..... 16

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 17

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย ..... 17

1.4 วิธีการดำเนินงาน ..... 18

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 18

1.6 ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย ..... 18

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง ..... 20

2.1 Automatic meter reading (AMR) ..... 20

2.2 รูปแบบเครือข่ายโทโปโลยี (Topology) ..... 20

2.3 Outage Management System (OMS) ..... 21

2.4 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลและแผนภูมิต้นไม้ ..... 22

โมเดลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ..... 22

2.5 เทคโนโลยีสื่อสาร LoRaWAN ..... 22

2.6 โครงสร้างของ Payload และ Class [1] ..... 25



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 Class A All End Devices ..... 25
2.6.1.4 Message Integrity Code (MIC) ..... 30
2.6.2 Class C – CONTINUOUSLY LISTENING ..... 30
2.7 AS923 LoRaWAN Region Parameter (LoRaWAN 1.1 Regional Parameters) ..... 31
2.7.1 AS923 ISM Band Channel Frequencies [2] ..... 32
2.7.2 AS923 Data Rate และการแปลงรหัสของกำลังขาออก ..... 33
2.7.3 AS923 Maximum Payload Size ..... 34
2.7.7 AS923 Receive Windows ..... 35
2.7.8 AS923 Default Settings ..... 35
2.8 Activation Mode OTAA [1] ..... 35
2.8.1 ข้อความ Join Request ..... 36
2.8.2 การยืนยันตัวตนและการสร้าง Session Key ..... 37
2.8.4 การขนส่ง App_SKey ..... 38
2.8.5 Session Key Generation ..... 38
บทที่ 3 การออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ของ AMR ..... 39
3.1 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ของระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ ..... 39
3.1.1 EVALSTPM33 [3] ..... 39
3.1.1.1 หลักการทำงานของ STPM33 ..... 41
3.1.1.2 โปรโตคอลการสื่อสาร ..... 41
3.1.2 บอร์ด STM32L053R8 Nucleo [4] ..... 43
3.1.3 โมดูล RAK811 [6] ..... 44
3.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ..... 45
3.1.4.1 หน่วยความจำแฟลช ..... 45
3.1.4.2 โมดูล RTC DS3231 ..... 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.4.3 DC-to-DC Step Down LM2596 ..... 46
3.1.4.4 วงจร Super Capacitor ..... 46
3.2 รายละเอียดเฟิร์มแวร์ ..... 47
3.2.1 Init STPM33 ..... 48
3.2.2 การตั้งค่า RAK811 ผ่าน AT Command (Init RAK811) [7] ..... 49
3.2.3 ลูปหลักของโปรแกรม ..... 49
3.2.4 ฟังก์ชั่น RAK811 sendData ..... 50
บทที่ 4 การพัฒนาอัลกอริธึมและการตั้งค่า LoRaWAN ..... 51
4.1 กระบวนการหาจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ..... 52
4.1.1 กระบวนการขั้นบันได (Escalation Procedure) สำหรับการหาจุดผิดพร่องในระบบไฟฟ้า [8] ..... 52
4.1.2 อัลกอริธึม Polling ในระบบไฟฟ้าดับ ..... 55
4.2 อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับด้วย LoRaWAN ..... 57
4.2.1 การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับของ AMR (Outage Notification) [10] ..... 57
4.2.2 การยืนยันอุปกรณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ (Outage Confirmation) ..... 58
4.2.3 การวิเคราะห์ไฟฟ้าดับ ..... 61
4.2.4 Outage Restoration ..... 63
4.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ LoRaWAN ในย่านความถี่ AS923 ISM BAND [1], [2] ..... 64
4.4.1 ค่า Data Rate (ADR), Adaptive Data Rate (ADR) ..... 64
4.4.2 Duty Cycle และ Time on Air ..... 64
4.4.3 การตั้งค่า LoRaWAN สำหรับ OMS ..... 67
บทที่ 5 การพัฒนา Network Server และ Web Application ..... 69
5.1 การใช้งาน CAT LoRa Network Server ..... 69
5.2 โครงสร้างของระบบจัดการไฟฟ้าดับ ..... 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3 การพัฒนา Application Server ..... 70
5.3.1 ฐานข้อมูล (Database Server) ..... 71
5.3.2 Web Application ..... 72
5.3.3 การพัฒนา Mobile Application บน Phonegap ..... 77
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง ..... 79
6.1 การทดสอบส่งข้อมูล LoRa ที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ..... 79
6.1.1 การทดลองประสิทธิภาพการส่งภายในอาคาร ..... 80
6.1.2 การทดลองส่งข้อมูลในระยะใกล้ (150 เมตร) ..... 80
6.1.3 การทดลองส่งข้อมูลในระยะไกล (800 เมตร) ..... 81
6.2 การทดสอบอุปกรณ์ AMR และข้อมูลที่ Network Server ..... 83
6.3 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูล LoRaWAN บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ..... 84
6.3.1 ทดสอบส่งข้อมูลทุกๆ 1 นาที ..... 84
6.3.2 ทดสอบส่งข้อมูลทุกๆ 15 นาที ..... 85
6.3 การทดสอบการส่งข้อมูลตอนไฟฟ้าดับ ..... 86
6.4 การทดสอบ Downlink จาก Network Server และไฟล์ API ..... 87
6.4.1 ทดสอบ Downlink ผ่าน Network Server ..... 87
6.4.2 การส่ง Downlink ผ่าน API ..... 88
6.5 ทดสอบการจัดเก็บฐานข้อมูลใน Database Server ..... 88
6.6 การแสดงผลผ่านทาง Web Application ..... 89
6.6.1 Dashboard ..... 90
6.6.2 Meter ..... 90
6.6.3 Alarm Report ..... 91
6.6.4 Billing Report ..... 92
6.6.5 Alarm History ..... 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.7 ผลทดสอบระบบจัดการไฟฟ้าดับ ..... 93
6.7.1 ตัวอย่างกรณีไฟฟ้าดับเหตุการณ์ที่ 1 ..... 94
6.7.2 ตัวอย่างกรณีไฟฟ้าดับเหตุการณ์ที่ 2 ..... 96
6.7.3 ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการขั้นบันไดและอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับ ..... 97
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ ..... 100
7.1 สรุปผลการทดลอง ..... 100
7.1.1 ประสิทธิภาพในการส่งของ LoRa และ LoRaWAN ..... 100
7.1.2 การใช้งาน LoRaWAN และ AS923 Specification ..... 101
7.1.3 อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับและการหาจุดผิดพร่องในระบบไฟฟ้า ..... 101
7.1.4 การใช้งาน Web Application ร่วมกับระบบจัดการไฟฟ้าดับ ..... 102
7.2 ข้อเสนอแนะ ..... 102
บรรณานุกรม ..... 104
ประวัติผู้เขียน ..... 106

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

**หน้า**

ตารางที่ 1 ย่านความถี่ใช้งาน LoRaWAN ..... 31
ตารางที่ 2 ย่านความถี่ใช้งานประเทศไทย ..... 32
ตารางที่ 3 ช่องความถี่เงื่อนไขต่ำสุดของ AS923 ..... 32
ตารางที่ 4 ช่องความถี่เงื่อนไขต่ำสุดสำหรับ Broadcast ..... 32
ตารางที่ 5 Data Rate ของ AS923 ..... 33
ตารางที่ 6 ระดับกำลังส่งและค่า EIRP สูงสุด ..... 33
ตารางที่ 7 ตาราง Data Rate ของ Uplink และ Down Link ..... 34
ตารางที่ 8 ค่า RX1 DR Offset ..... 35
ตารางที่ 9 ค่าตั้งต้นพื้นฐานสำหรับ AS923 ..... 35
ตารางที่ 10 โครงสร้างข้อความของ STPM33 ..... 42
ตารางที่ 11 ตารางตัวอย่างเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกรณีที่ 1 ..... 94
ตารางที่ 12 ข้อมูลเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกรณีที่ 2 ..... 97
ตารางที่ 13 ผลลัพธ์ของอัลกอริธึมไฟฟ้าดับและวิธีการขั้นบันได ..... 98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 โทโพโลยีแบบต้นไม้ (Tree Topology) ..... 21
รูปที่ 2 รูปแบบการจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ..... 22
รูปที่ 3 โครงสร้างการสื่อสารของ LoRaWAN ..... 24
รูปที่ 4 โครงสร้าง Physical ข้อความ Uplink ..... 25
รูปที่ 5 โครงสร้าง Physical ข้อความ Downlink ..... 26
รูปที่ 6 หน้าต่างรับข้อมูลอุปกรณ์ Class A ..... 26
รูปที่ 7 โครงสร้างของ MAC Massage ..... 27
รูปที่ 8 MAC Payload ของ Data Messages ..... 27
รูปที่ 9 โครงสร้างของ MAC Payload ..... 30
รูปที่ 10 หน้าต่างเวลารับสัญญาณอุปกรณ์ Class C ..... 31
รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการ Activate ในรูปแบบ OTAA ..... 36
รูปที่ 12 Join Request Message ..... 37
รูปที่ 13 Join Accept Message ..... 38
รูปที่ 14 โครงสร้างของมิเตอร์ไฟฟ้า ..... 39
รูปที่ 15 บอร์ด ASSP EVALSTPM33 ..... 40
รูปที่ 16 โครงสร้างของ EVALLSTPM33 ..... 40
รูปที่ 17 การส่งสัญญาณ SCS และ SYN เพื่อรีเซ็ตค่าของ STPM33 ..... 41
รูปที่ 18 การส่งข้อมูลผ่าน SPI ของ STPM33 ..... 42
รูปที่ 19 ตัวอย่างการส่งข้อมูล SPI ..... 43
รูปที่ 20 STM32L053R8 Nucleo ..... 43
รูปที่ 21 โครงสร้าง RAK811 LoRa ..... 44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 22 โมดูล SD Card ..... 45
รูปที่ 23 โมดูล RTC DS3231 ..... 45
รูปที่ 24 โมดูล DC-to-DC Step Down LM2596 ..... 46
รูปที่ 25 Super Capacitor ..... 46
รูปที่ 26 วงร Backup โดย Super Capacitor ..... 47
รูปที่ 27 ลำดับการทำงานของเฟิร์มแวร์ AMR ..... 48
รูปที่ 28 การทำงานของฟังก์ชั่น RAK811_sendData() ..... 50
รูปที่ 29 ตัวอย่างวิธีการขั้นบันได ..... 54
รูปที่ 30 ปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับแบบอนุกรม ..... 55
รูปที่ 31 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแผนภูมิต้นไม้ ..... 56
รูปที่ 32 ข้อมูล Uplink ของอุปกรณ์ AMR ..... 59
รูปที่ 33 ตัวอย่างการ Poll เพื่อยืนยันสถานะ ..... 59
รูปที่ 34 ขั้นตอนของอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับ ..... 61
รูปที่ 35 ตัวอย่างการเกิดไฟฟ้าดับ ..... 62
รูปที่ 36 สมการหาค่า Tsym ..... 65
รูปที่ 37 โครงสร้างแพคเกจ LoRaWAN ..... 65
รูปที่ 38 สมการหาค่าเวลา Tpreamble ..... 65
รูปที่ 39 สมการหาค่า payloadSymbNB ..... 66
รูปที่ 40 สมการหา Tpayload ..... 66
รูปที่ 41 สมการหา Tpacket ..... 66
รูปที่ 42 CAT Network Server Logger ..... 69
รูปที่ 43 โครงสร้างระบบจัดการไฟฟ้าดับโดย LoRaWAN ..... 70
รูปที่ 44 ฐานข้อมูลออนไลน์ใน phpMyAdmin ..... 71
รูปที่ 45 หน้าจอของ Web Application ..... 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 46 การส่งข้อมูลระหว่าง HTML และดาต้าเบส ..... 73
รูปที่ 47 โครงสร้างของ Web Application ..... 74
รูปที่ 48 ตารางสถานะ AMR ในฐานข้อมูล ..... 75
รูปที่ 49 สถานะของหม้อแปลงในญานข้อมูล ..... 76
รูปที่ 50 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บน Phonegap ..... 77
รูปที่ 51 โมดูล LoRa ES920LR ..... 79
รูปที่ 52 โมดูล LoRa ES920LR ..... 79
รูปที่ 53 แผนที่ Google Map แสดงการส่งข้อมูล LoRa ระยะใกล้ ..... 80
รูปที่ 54 แผนที่ Google Map แสดงการส่งข้อมูลระยะไกล ..... 82
รูปที่ 55 อุปกรณ์ AMR ที่สื่อสารโดย LoRaWAN ..... 83
รูปที่ 56 หน้าต่าง Logger แสดงข้อมูลการส่งของ AMR ..... 83
รูปที่ 57 แผนที่ Google Map แสดงตำแหน่งการส่งข้อมูล LoRaWAN ..... 84
รูปที่ 58 ข้อมูลที่เกิดการ Lag ของการส่ง ..... 85
รูปที่ 59 อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลของ AMR ..... 86
รูปที่ 60 การจ่ายไฟโดย Super Capacaitor ..... 86
รูปที่ 61 การทดสอบ Downlink ผ่าน CAT Networkserver ..... 87
รูปที่ 62 หน้าจอ Logger แสดงข้อมูล Downlink ..... 87
รูปที่ 63 แสดงตัวอย่างการส่ง Downlink ผ่าน Web Application ..... 88
รูปที่ 64 การตั้งค่า Routing Profile ..... 88
รูปที่ 65 การเขียนรับค่า JSON API จาก Network Server ..... 89
รูปที่ 66 ตัวอย่าง Uplink JSON ..... 89
รูปที่ 67 ข้อมูล Uplink JSON ที่เก็บในฐานข้อมูล ..... 89
รูปที่ 68 Web Application หน้าจอ Dashboard ..... 90
รูปที่ 69 Web Application Meter ..... 90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 70 หน้าจอแสดงรายละเอียดมิเตอร์แต่ละตัว ..... 91
รูปที่ 71 หน้าจอแสดง Alarm Event ..... 91
รูปที่ 72 การเปลี่ยนสถานะของการ ACK ..... 91
รูปที่ 73 หน้าจอแสดงค่าไฟของลูกค้า ..... 92
รูปที่ 74 หน้าจอแสดงประวัติ Alarrm ..... 93
รูปที่ 75 ฐานข้อมูลเก็บประวัติ Alarm ..... 93
รูปที่ 76 Alarm Event ที่เข้ามาในระบบ ..... 94
รูปที่ 77 หน้าจอแสดงสถานะของมิเตอร์กรณีตัวอย่างที่ 1 ..... 95
รูปที่ 78 แสดงสถานะมิเตอร์และ Alarm หลังการ Poll ..... 95
รูปที่ 79 หน้าต่าง Overview แสดงเหตุการณ์เกิดไฟฟ้าดับกรณีที่ 2 ..... 96
รูปที่ 80 การใช้งานอัลกอริธึม Polling และมิเตอร์ที่ถูก Poll ..... 99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์

มิเตอร์ไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะนอกจากจะวัดหน่วยค่าไฟลูกค้าแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่ในการวัดและส่งข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ ให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการควบคุมระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์เทคโนโลยีต่างๆ เช่น เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร หรือเทคโนโลยีไมโครคอนโทรเลอร์ มาใช้ ทำให้มิเตอร์ไฟฟ้ามีบทบาทในการเป็นหน่วยขั้นพื้นฐานในระบบไฟฟ้าที่จะติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ไฟฟ้าหรือลูกค้ามากยิ่งขึ้น

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมิเตอร์ไฟฟ้าได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จนพัฒนาเป็นการอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ หรือ Automatic Meter Reading (AMR) ซึ่งเป็นระบบการอ่านหน่วยมิเตอร์ผ่านระบบสื่อสารกลางชนิดต่างๆ ประเทศไทยเริ่มมีการติดตั้งและใช้งานในพื้นที่บางส่วน แต่เมื่อพิจารณาการนำ AMR มาใช้งานจริงแล้ว ยังพบปัญหาในหลายๆ ด้าน ที่ทำให้ระบบ AMR ไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เช่น เมื่อมีปัญหาทางระบบไฟฟ้าดับในบางกรณี มิเตอร์ไฟฟ้าจะไม่สามารถส่งข้อมูลที่สำคัญกลับมาให้แก่ระบบได้ ทำให้การวิเคราะห์หาตำแหน่งหรือสาเหตุที่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นไปได้ยาก บางกรณีที่ส่วนของระบบสื่อสารของมิเตอร์ไฟฟ้ามีปัญหา ก็ไม่สามารถจำแนกตรวจสอบได้ว่าเกิดจากไฟฟ้าดับจริงหรือเพราะอุปกรณ์ชำรุด และจำเป็นต้องใช้ข้อมูลการแจ้งเหตุไฟฟ้าดับจากลูกค้าเพื่อหาตำแหน่งและขอบเขตของไฟฟ้าดับ ซึ่งจะเกิดความล่าช้าในการแก้ไขปัญหา

ปัญหาถัดมาคือส่วนของการสื่อสาร ที่เทคโนโลยีในปัจจุบันระบบ AMR ส่วนใหญ่จะใช้รูปแบบ Hardwire ในการส่งข้อมูล ซึ่งในบางจุดการเดินสายจะทำได้ลำบาก ทำให้ก่อให้เกิดปัญหาในการติดตั้งและซ่อมบำรุง และเสียค่าใช้จ่ายในระยะยาวที่ค่อนข้างสูง กรณีใช้ระบบไร้สาย เช่น ระบบ GSM หรือ 3G ในการส่งข้อมูลถือเป็นวิธีที่สะดวกวิธีหนึ่ง แต่ค่อนข้างมีราคาแพง ระบบที่มีในปัจจุบันเองอย่างของ การไฟฟ้านครหลวง ก็จำเป็นต้องมีการแยกอุปกรณ์สื่อสารติดตั้งเพิ่มจากมิเตอร์ไฟฟ้า ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารมีความหลากหลายมากขึ้น ทำให้น่าจะมีเทคโนโลยีสื่อสารที่จะมาทดแทนและแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้ เทคโนโลยีการสื่อสารที่เรียกว่า LoRaWan ก็เป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนามิเตอร์ ด้วยความที่เป็นเทคโนโลยีสื่อสารที่กินพลังงานต่ำมีขอบเขตการติดต่อที่มีระยะไกล

ระบบ Outage management system (OMS) เป็นอีกระบบหนึ่งที่สำคัญในระบบไฟฟ้าที่ใช้ตรวจหาและแจ้งเตือนเหตุการณ์เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ แต่สำหรับระบบที่ใช้งานอยู่ส่วนใหญ่ในปัจจุบันการใช้งานระบบ OMS จะใช้ได้ในระบบแรงสูงเท่านั้น เพราะทางด้านแรงต่ำอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มิเตอร์ไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีความสามารถที่ใช้ในการสื่อสารเพื่อรับ-ส่งข้อมูล ดังนั้นการเพิ่ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เทคโนโลยีในการสื่อสาร เช่น LoRaWan เข้าไปในอุปกรณ์ทางไฟฟ้า และการพัฒนาระบบ OMS จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขและวิเคราะห์ปัญหาในระบบไฟฟ้าได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาและสร้างมิเตอร์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยี LoRaWan มาใช้เป็นระบบการสื่อสารหลัก โดยมุ่งเน้นการใช้งานในการวัด-ส่งข้อมูลของระบบไฟฟ้าและระบบ OMS หรือระบบจัดการไฟฟ้าดับ เพื่อนำมาเพิ่มประสิทธิภาพและแก้ไขปัญหาของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ☐ สร้างและพัฒนาระบบ AMR และโครงข่ายการสื่อสารไร้สายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWan อ้างอิงตามมาตรฐาน AS923
- ☐ ทำระบบการจัดการไฟฟ้าดับ (OMS) และแจ้งเตือนไฟฟ้าดับ
- ☐ พัฒนาซอฟท์แวร์สำหรับคำนวณและจัดเก็บค่าที่อ่านได้ เพื่อคิดค่าไฟและแสดงอุปกรณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ☐ พัฒนามิเตอร์ไฟฟ้า
  - ใช้เทคโนโลยีสื่อสาร LoRaWan
  - 1 เฟส, 230V, 30(100)A
  - วัดแรงดัน กระแสไฟฟ้า กำลังทางไฟฟ้า และหน่วยทางไฟฟ้า
  - มีระบบแจ้งเตือนไฟฟ้าดับและ Last gasp
- ☐ ทดลองติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้า 5 ตัว ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ☐ ใช้ Gateway ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มีการติดตั้งแล้ว และใช้ Network Server บริษัท Actility ของ CAT Telecom และใช้ Computer จำนวน 1 เครื่อง ในการทำหน้าที่เป็น Application Server
- ☐ พัฒนาโปรแกรมประยุกต์บน Network Server ที่คำนวณค่าไฟฟ้าอัตราปกติแบบก้าวหน้าได้
- ☐ สภาพแวดล้อมในการทดลองจะต้องเหมาะสมกับการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้าและอุปกรณ์สื่อสาร

- พัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนมือถือที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Android เพื่อรับการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับ

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- ศึกษาการทำงานของโมดูล STPM33 สำหรับการวัดและอ่านค่าทางไฟฟ้า
- ศึกษามาตรฐาน LoRaWan สำหรับ AS923 ซึ่งใช้งานในประเทศไทย
- ศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ RAK811 และ AT Command ในการสั่งงาน และตั้งค่าเพื่อใช้งานร่วมกับ Network Server ของ CAT Telecom ศึกษาระบบจัดการไฟฟ้าดับ (OMS) และอัลกอริธึมที่ใช้สำหรับระบบจัดการไฟฟ้าดับ
- ออกแบบและพัฒนามิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า และระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติร่วมกับ LoRaWAN
- ศึกษาระบบเก็บฐานข้อมูลและพัฒนาเว็ปแอพลิเคชั่นเพื่อใช้เก็บข้อมูลและจำลองสร้างโปรแกรมประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (GUI)
- ทดสอบการทำงานของระบบ
- รวบรวมผลการทดลอง และสรุปผล

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้ในการออกแบบสร้างมิเตอร์วัดพลังงาน 1 เฟส
- ได้รับความรู้เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRaWAN ย่าน AS923
- ได้รับความรู้ในระบบการจัดการไฟฟ้าดับ (OMS)
- ได้เรียนรู้การออกแบบและพัฒนาเว็ปแอพลิเคชั่นและการจัดการฐานข้อมูลได้

## 1.6 ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ดังนี้

- บทที่ 1 เกริ่นนำความจำเป็นของการใช้งานระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติร่วมกับระบบจัดการไฟฟ้าดับ
- บทที่ 2 อธิบายถึงข้อกำหนดการใช้งาน และข้อกำหนดของ LoRaWAN AS923 ร่วมกับระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติและระบบจัดการไฟฟ้าดับ
- บทที่ 3 กล่าวถึงองค์ประกอบของฮาร์ดแวร์ในระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติและข้อมูลทางด้านเฟิร์มแวร์ของระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ

- บทที่ 4 อธิบายการพัฒนาอัลกอริธึมระบบจัดการไฟฟ้าดับและการตั้งค่า LoRaWAN
- บทที่ 5 การพัฒนาเว็ปแอพลิเคชั่นของระบบการจัดการไฟฟ้าดับและระบบฐานข้อมูล
- บทที่ 6 แสดงข้อมูลการทดลองและการทดสอบใช้งานระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติร่วมกับระบบการจัดการไฟฟ้าดับ (OMS)
- บทที่ 7 แสดงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 Automatic meter reading (AMR)

เทคโนโลยี AMR คือ ระบบการอ่านหน่วยการใช้ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติผ่านช่องทางการสื่อสารชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารแบบมีสายหรือไร้สาย สัญญาณคลื่นวิทยุ (RF) หรือ Power Line Communication (PLC) โดยข้อมูลที่อ่านได้จากมิเตอร์อัตโนมัติทั้งหมดจะถูกส่งไปเก็บที่ระบบฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าไฟ หรือวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาทางไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยผู้ประกอบการในการลดค่าใช้จ่ายในการส่งคนไปอ่านค่าไฟจากมิเตอร์โดยตรง และยังสามารถเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้าด้วยการคำนวณค่าไฟฟ้าสามารถอ้างอิงจากค่าที่เกือบ Real-time แทนการใช้ค่าที่ได้จากการประมาณได้ ซึ่งความสามารถเหล่านี้สามารถช่วยทั้งผู้ประกอบการและผู้บริโภคในการจัดการและบริหารการใช้ไฟฟ้าของลูกค้าได้ โดยเทคโนโลยี AMR สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

- มิเตอร์ ทำหน้าที่วัดพลังงานทางไฟฟ้า เพื่อส่งข้อมูลทางช่องทางการสื่อสารต่อไป
- ระบบการสื่อสาร ทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างมิเตอร์และศูนย์กลางข้อมูล
- ศูนย์กลางข้อมูล ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารกับมิเตอร์เพื่อใช้เก็บข้อมูลและจัดการข้อมูล

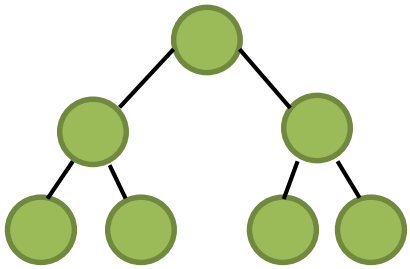
## 2.2 รูปแบบเครือข่ายโทโปโลยี (Topology)

โทโปโลยีของเครือข่าย (Network Topology) หมายถึง แผนผังการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ตามลักษณะทางกายภาพ (Physical Topology) หรือทางตรรกะ (Logical Topology) ซึ่งบ่งบอกถึงตำแหน่งของ คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์เครือข่ายอื่นๆ และเส้นทางการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เหล่านี้ในเครือข่าย และมีผลต่อสมรรถนะของเครือข่ายได้

การเลือกโทโปโลยีของเครือข่ายต้องมีการวางแผนที่ดี เพราะโทโปโลยีจะมีส่งต่อชนิดของสายสัญญาณที่ใช้ รวมถึงลักษณะการเดินสายสัญญาณและลักษณะการสื่อสารกันระหว่างคอมพิวเตอร์ด้วย ซึ่งโทโปโลยีที่ต่างกันก็ต้องใช้วิธีการสื่อสารข้อมูลที่ต่างกัน และวิธีการนี้จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของระบบเครือข่าย

โทโพโลยีแบบต้นไม้ (Tree Topology) มีลักษณะเชื่อมโยงคล้ายกับโครงสร้างแบบดาว โดยมีสายนำสัญญาณแยกออกไปเป็นแบบกิ่งไม่เป็นวงรอบ โครงสร้างแบบนี้จะเหมาะกับการประมวลผลแบบกลุ่มจะประกอบด้วยเครื่อง คอมพิวเตอร์ระดับต่างๆ กันอยู่หลายเครื่องแล้วต่อกันเป็นชั้นๆ แต่

ละกลุ่มจะมีโหนดแม่ (Parent) และโหนดลูก (Child) ดังรูปที่ 1 การสื่อสารข้อมูลจะสามารถผ่านตัวกลางไปยังโหนดอื่นๆ ได้ทั้งหมด และทุกโหนดจะอยู่บนทางเชื่อมและรับส่งข้อมูลเดียวกัน



รูปที่ 1 โทโพโลยีแบบต้นไม้ (Tree Topology)

## 2.3 Outage Management System (OMS)

OMS คือ ระบบจัดการไฟฟ้าดับที่แสดงแผนผังโครงข่ายของระบบจำหน่าย โดยอาจมีการนำระบบ Geographic information system (GIS) มาใช้ในฐานข้อมูลของระบบโครงข่าย และนำข้อมูลจากการโทรแจ้งเหตุขัดข้องของลูกค้าและระบบตรรกะมาช่วยในการวิเคราะห์และคาดการณ์ตำแหน่งที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับ

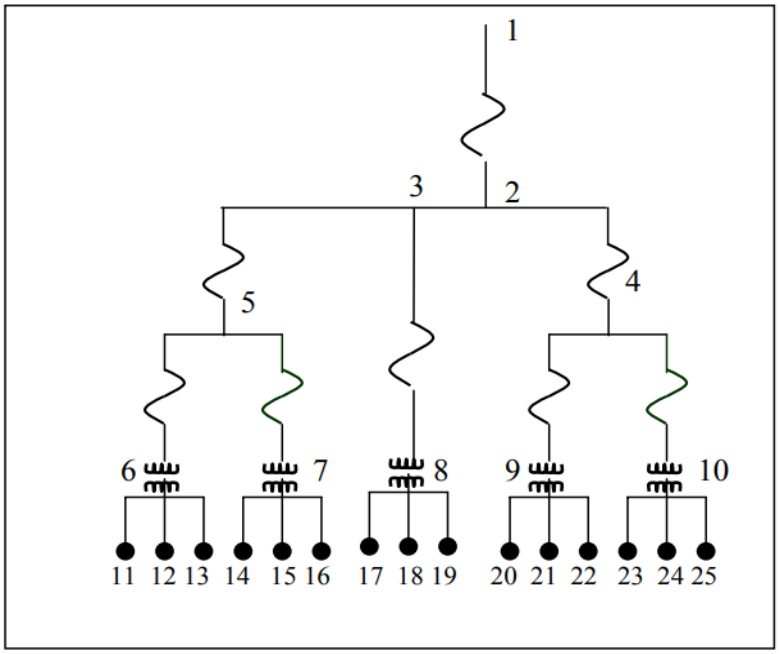
โดยปกติข้อมูลจากการแจ้งเหตุไฟฟ้าขัดข้องจะทำการเก็บรวบรวมโดยศูนย์บริการข้อมูลลูกค้าโดยอาศัยระบบสารสนเทศลูกค้า (Customer Information System, CIS) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งระบบ CIS จะมีแหล่งข้อมูลของลูกค้าทั้งหมดเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่าย เช่น ข้อมูลอุปกรณ์และหม้อแปลงที่เชื่อมต่อ เป็นต้น

นอกจากนี้อุปกรณ์ในระบบอย่าง AMR สามารถช่วยในการตรวจหาไฟฟ้าดับและการกู้คืนระบบไฟฟ้าได้ เพราะ AMR สามารถทำหน้าที่ในการแจ้งเตือนเหตุไฟฟ้าดับเสมือนการแจ้งเหตุไฟฟ้าดับจากลูกค้าได้ แต่คุณลักษณะของ AMR บางอย่างจำเป็นต้องมีระบบการจัดการและคัดกรองที่ดีเพื่อจะให้สามารถนำมาใช้งานในระบบ OMS ได้ โดยปกติแล้ว OMS จะมีการประยุกต์ใช้ในระบบ SCADA เพื่อรายงานเหตุไฟฟ้าดับได้โดยอัตโนมัติ

ส่วนสำคัญอีกอย่างในระบบ OMS คือ ความแม่นยำของข้อมูลต้องมีการตรวจสอบหรือแจ้งสถานะให้เป็นปัจจุบันมากที่สุด เพื่อเพิ่มความถูกต้องและประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหา เนื่องจากจากระบบจัดการไฟฟ้าดับนั้นเป็นการรวมและประสานงานกันของระบบต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ประมวลผลข้อมูล และกู้คืนระบบไฟฟ้าที่ดับของลูกค้าที่โดนผลกระทบ เพื่อลดระยะการกู้คืนระบบไฟฟ้า และความพึงพอใจของลูกค้า เมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับจึงจำเป็นต้องจัดการให้รวดเร็วที่สุด ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำหรือ ข้อมูลที่เป็น Real-time รวมทั้งข้อมูลอื่นๆที่สำคัญ เช่น GIS (Geographic Information Systems) ถือเป็นส่วนสำคัญที่มีส่วนช่วยในกระบวนการจัดการไฟฟ้าดับ

## 2.4 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลและแผนภูมิต้นไม้

โมเดลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล




รูปที่ 2 รูปแบบการจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีลักษณะทางกายภาพแบบเรเดียลที่ไม่มีการวนลูปซึ่งแสดงในรูปที่ 2 โดยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ฟิวส์ สวิตซ์ใบมีด หม้อแปลงและ AMR ในระบบรวมถึงลักษณะการเชื่อมต่อจะสามารถแสดงได้ในรูปแบบของแผนภูมิต้นไม้ได้ โดยให้แต่ละโหนดของแผนภูมิแทนด้วยอุปกรณ์ต่างๆ และกำหนดลักษณะเฉพาะแต่ละโหนดโดยแทนอาจด้วยตัวเลขหรือชื่อต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการแบ่งแยกประเภทและระบุอุปกรณ์ในการเกิดไฟฟ้าดับ

ตัวแผนภูมิต้นไม้จะแสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดโดยมี “ราก” แสดงถึงสถานีไฟฟ้าและ “ใบไม้” หรือปลายสุดของแผนภูมิแสดงถึงลูกค้าในระบบไฟฟ้า โดยลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเริ่มจากสถานีไฟฟ้าผ่านไปถึงลูกค้าทุกราย การเกิดอุปกรณ์ใดๆ ทำงานผิดพลาดจะส่งผลต่อลูกค้าที่ต่ออยู่ด้านล่างทั้งหมด

## 2.5 เทคโนโลยีสื่อสาร LoRaWAN

LoRa เป็น Low Power Wide Area Network (LPWAN) ประเภทหนึ่ง ซึ่งใช้ความถี่คลื่นวิทยุแบบ Spread Spectrum Modulation Scheme แบบมีกรรมสิทธิ์ ซึ่งแตกแขนงออกมาจาก Chirp Spread Spectrum Modulation (CSS) โดยใช้สัญญาณย่านความถี่ที่ไม่มีกรรมสิทธิ์ มี

ลักษณะแบบคลื่นวิทยุระยะไกล (Long-range radio) และมีรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบ Star โดยมี End Device เชื่อมต่อกับโดยตรงกับ Gateway ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อไปสู่การสื่อสารรูปแบบอื่น

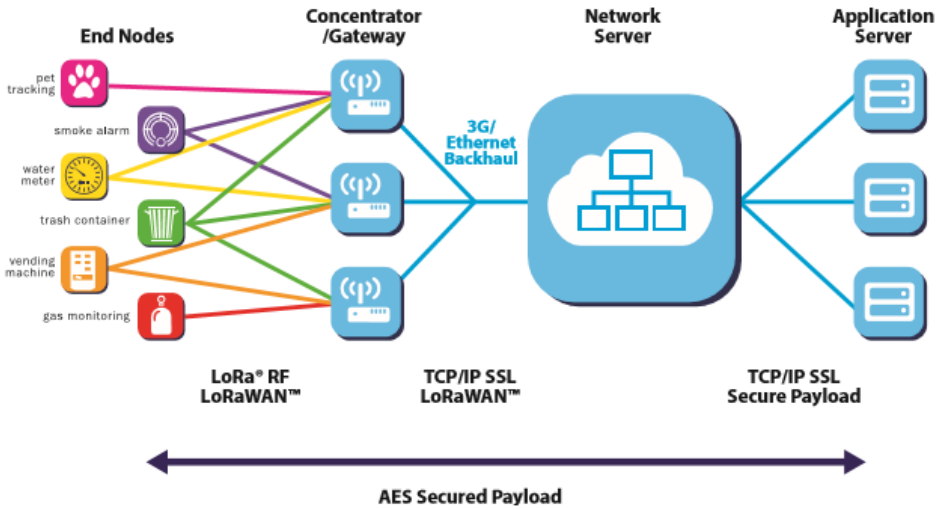
ลักษณะของโครงสร้างโครงข่ายสำหรับ LPWAN จะถูกออกแบบมาให้รองรับการใช้งานอุปกรณ์ครอบคลุมในพื้นที่ที่เป็นบริเวณกว้างและมีการเชื่อมต่อที่ดี แม้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย ทำให้ LPWAN เหมาะสำหรับเทคโนโลยี IoT โดย LPWAN จะมีระยะทางครอบคลุมประมาณ 10-15 กิโลเมตรสำหรับพื้นที่โล่งๆ แต่จะเหลือ 2-5 กิโลเมตรในพื้นที่เมือง ซึ่งมาจากการออกแบบให้ตัวรับสัญญาณมีความไว (sensitivity) สูงมากกว่าการเชื่อมต่อรูปแบบอื่น เช่น Zigbee หรือ Bluetooth แต่ LPWAN ก็มีข้อเสียตรงอัตราการส่งผ่านข้อมูลที่ต่ำกว่าเพราะต้องการให้ประหยัดพลังงาน

LoRaWAN คือ โปรโตคอลสื่อสารและสถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างสำหรับระบบโครงข่าย ในขณะที่ LoRa จะทำหน้าที่ใน Physical Layer เพื่อเชื่อมการสื่อสารในระยะไกล ซึ่งโปรโตคอลสื่อสารและสถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างสำหรับระบบโครงข่ายมีอิทธิพลสำคัญต่อแบตเตอรี่, ความจุของโครงข่าย และความปลอดภัย (Security)

LoRaWAN มีโครงข่ายการสื่อสารเป็นโทโพโลยีรูปแบบดวงดาว (Star) ทำให้มีความแตกต่างจากโครงข่ายสื่อสารส่วนใหญ่ที่เป็นรูปแบบร่างแห (Mesh) เพราะ รูปแบบร่างแหนั้นโหนดแต่ละโหนดจะทำการส่งข้อมูลเชื่อมถึงกันเพื่อเพิ่มระยะและขนาดของโครงข่าย แต่ในขณะที่ระยะทางและขนาดของโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น ความซับซ้อนของระบบก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความจุของระบบโครงข่ายน้อยลงและส่งผลกระทบต่อการกินพลังงานของแบตเตอรี่ในโหนดแต่ละโหนด ต่างกับรูปแบบดวงดาวที่มีความสามารถในการสื่อสารระยะไกลโดยที่ยังประหยัดพลังงานได้มากกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในระบบโครงข่ายของ LoRaWAN โหนดแต่ละโหนดจะเชื่อมต่อถึงกันด้วย Gateway หลายๆ ตัว และ Gateway แต่ละตัวจะส่งข้อมูลหรือ Packet ที่ได้รับสู่ระบบ Cloud-based Network ด้วย Backhaul เช่น Cellular, Ethernet หรือ Wi-Fi ซึ่งใน Network Server ก็จะมีการคัดกรองข้อมูล Packet ที่ได้รับเพื่อตรวจสอบความปลอดภัย และจัดการเกี่ยวกับการเชื่อมต่อผ่าน Gateway ต่างๆ และ Network Server เองยังทำหน้าที่ในการส่งต้อข้อมูลให้กับ Application Server ด้วย ดังรูปที่ 3




รูปที่ 3 โครงสร้างการสื่อสารของ LoRaWAN

ใน LoRaWAN การเลือกอัตราการส่งข้อมูลถือเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างระยะทางในการสื่อสารกับระยะเวลาในการส่งผ่านของข้อความ โดยการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันจะไม่รบกวนซึ่งกันและกัน อัตราการส่งข้อมูลแบบ LoRa จะมีช่วงอยู่ระหว่าง 0.3 กิโลบิตต่อวินาทีถึง 50 กิโลบิตต่อวินาที เพื่อยืดอายุการใช้งานสูงสุดสำหรับแบตเตอรี่และความจุโดยรวมของ Network Server โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย LoRa จึงมีระบบการจัดการอัตราการส่งข้อมูล สำหรับอุปกรณ์ปลายทางแต่ละเครื่อง โดยใช้วิธีการปรับอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย (Adaptive Data Rate หรือ ADR) ตัวอุปกรณ์ปลายทางจึงสามารถส่งถ่ายข้อมูลที่ช่องสื่อสารไหนก็ได้ตลอดเวลาโดยการใช้อัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็วขนาดไหนก็ได้ตราบเท่าที่ยังอยู่ในข้อกำหนดของ LoRaWAN ดังนี้

- ปลายทางสามารถเปลี่ยนแปลงช่องทางในแบบกึ่งสุ่ม (Pseudo-random) สำหรับทุกการส่งผ่านข้อมูล ความหลากหลายของคลื่นความถี่ส่งผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการรบกวนการทำงาน
- อุปกรณ์ปลายทางต้องให้ความสำคัญต่อวัฏจักรการทำงานสูงสุด (Duty Cycle) ในแต่ละ Sub-band ที่ถูกใช้งานและระเบียบข้อบังคับตามแต่ละท้องที่
- อุปกรณ์ปลายทางต้องให้ความสำคัญต่อระยะเวลาการส่งสูงสุด (Dwell-time) ของแต่ละ Sub-band และระเบียบข้อบังคับตามแต่ละท้องที่

โดยต่อวัฏจักรการทำงานสูงสุดและระยะเวลาการส่งสูงสุดของ Sub-band ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดตามภูมิภาคนั้นๆ และการตั้งค่าใน Physical layer

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2.6 โครงสร้างของ Payload และ Class [1]**

โครงสร้างของ LoRa สามารถจำแนก Devices คลาสได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

1. Class A (Baseline) ที่เป็นโหมดปกติทั่วไปของอุปกรณ์ใน LoRa และประหยัดพลังงานที่สุด

2. Class B (Beacon) ซึ่งเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องรับคำสั่งจากรีโมทคอนโทรล

3. Class C (Continuous) จะใช้สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่มีข้อจำกัดเรื่องการกินพลังงาน

อุปกรณ์ LoRaWAN ทุกตัวจำเป็นต้องดำเนินการให้สามารถทำงานได้ตามฟังชั่นก์ Class A เป็นอย่างน้อย แต่คลาสที่เหลือเป็นเพียงทางเลือกทำให้อุปกรณ์ LoRaWAN สามารถดัดแปลงเป็นคลาสๆ อื่นได้ตามความเหมาะสม

สำหรับการใช้งาน สำหรับ LoRa MAC หรือ Medium Access Controller ตามมาตรฐานของ LoRaWan แล้วจะใกล้เคียงกับโปรโตคอล Aloha ที่มีลักษณะเมื่อมีการส่งข้อมูลพร้อมๆ กันจำนวนมาก ก็จะมีวิธีการในการคัดเลือกว่าใครจะได้มีสิทธิในการส่งข้อมูล ซึ่งถูกออกแบบให้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และมีระบบป้องกันตามมาตรฐานที่วางเอาไว้โดยให้มีการ Encryption หลายชั้น เช่น Unique Network Key, Application Key, Device-specific Key เป็นต้น

2.6.1 Class A All End Devices

2.6.1.1 Physical Message Formats

- Uplink Massage เป็นข้อความที่จะถูกส่งโดยอุปกรณ์ End Device ไปที่ Network Server ผ่านเกตเวย์ตัวเดียวหรือหลายตัว ข้อความ Uplink จะใช้แพคเกตของสัญญาณวิทยุ LoRa ที่ประกอบด้วย LoRa Physical Header (PHDR), Header CRC (PHDR_CRC) และมี CRC ของ Payload ซึ่งทั้งหมดจะถูกใส่เข้าไปผ่านตัวส่งสัญญาณวิทยุ ตามรูปที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| Preamble | PHDR | PHDR_CRC | PHYPayload | CRC |
|---|---|---|---|---|

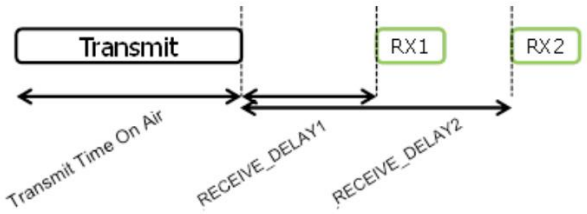
รูปที่ 4 โครงสร้าง Physical ข้อความ Uplink

- Downlink Massage เป็นข้อความที่ถูกส่งจาก Network Server ผ่านเกตเวย์ไปที่อุปกรณ์ End Device หนึ่งๆ ประกอบด้วย LoRa Physical Header (PHDR) และ Header CRC (PHDR_CRC) ตามรูปที่ 5

| Preamble | PHDR | PHDR_CRC | PHYPayload |
|---|---|---|---|

รูปที่ 5 โครงสร้าง Physical ข้อความ Downlink

- Receive Windows อุปกรณ์ Class A ถือเป็นฟังชั่นก์ขั้นพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์ LoRaWAN อุปกรณ์ Class A มีความสามารถในการสื่อสารแบบ 2 ทิศทาง โดยเมื่อมีการส่งข้อความ Uplink ในแต่ละครั้งจะมีการเปิดช่องรับข้อมูล Downlink เป็นเวลาสั้นๆ 2 ช่วงเสมอ ตามรูปที่ 6




รูปที่ 6 หน้าต่างรับข้อมูลอุปกรณ์ Class A

โดยการจัดการช่องการสื่อสารของอุปกรณ์จะใกล้เคียงกับ Aloha Protocol ที่มีลักษณะเมื่อมีการส่งข้อมูลพร้อมๆ กันจำนวนมาก ก็จะมีวิธีการในการคัดเลือกว่าใครจะได้มีสิทธิในการส่งข้อมูล ซึ่งถูกออกแบบให้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 อุปกรณ์ Class A นี้มีการกินพลังงานที่น้อยที่สุดเนื่องจากการที่เครื่องเปิดรับ Downlink สั้นๆ 2 ช่วงเท่านั้นหลังจากทำการส่งข้อมูล Uplink ไปแล้ว ซึ่งถ้าหาก Network Server ต้องการส่งข้อมูล Downlink ก็จำเป็นต้องรอจนกว่าอุปกรณ์นั้นๆ จะส่ง Uplink ครั้งถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1.2 MAC Message Format

ใน LoRa ข้อความ Uplink และ Downlink จะมี PHY Payload (Payload) ที่เริ่มต้นด้วย MAC Header (MHDR) ที่เป็น Single-octet เสมอ แล้วตามด้วย MAC Payload (MACPayload) และจบด้วย 4-octet ของ Message Integrity Code (MIC) โดยจะมี CRC ได้ก็ต่อเมื่อเป็นข้อความ Uplink เท่านั้น ดังรูปที่ 7

*Radio PHY layer:*

| Preamble | PHDR | PHDR_CRC | PHYPayload | CRC* |
|---|---|---|---|---|

Radio PHY structure (CRC* is only available on uplink messages)

*PHYPayload:*

| MHDR | MACPayload | MIC |
|---|---|---|

PHY payload structure

*MACPayload:*

| FHDR | FPort | FRMPayload |
|---|---|---|

MAC payload structure

*FHDR:*

| DevAddr | FCtrl | FCnt | FOpts |
|---|---|---|---|

Frame header structure

รูปที่ 7 โครงสร้างของ MAC Massage

2.6.1.3 MAC Payload ของ Data Messages (MACPayload)

MAC Payload หรือเฟรมของข้อมูล (Data Frame) จะประกอบด้วย Frame Header (FHDR), Port Field (FPort) และ Frame Payload Field (FRMPayload) ตามลำดับ

- Frame Header (FHDR)

FHDR จะประกอบด้วยที่อยู่ของอุปกรณ์ (DevAddr), Frame Control จำนวน 7 octet (FCtrl), Frame Counter จำนวน 2 octet (FCnt) และ Frame Options (FOpts) จำนวน 15 octet ในการส่ง MAC Command ดังรูปที่ 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| Size (bytes) | 4 | 1 | 2 | 0..15 |
|---|---|---|---|---|
| FHDR | DevAddr | FCtrl | FCnt | FOpts |

| Bit# | 7 | 6 | 5 | 4 | [3..0] |
|---|---|---|---|---|---|
| FCtrl bits | ADR | ADRACKReq | ACK | FPending | FOptsLen |

| Bit# | 7 | 6 | 5 | 4 | [3..0] |
|---|---|---|---|---|---|
| FCtrl bits | ADR | ADRACKReq | ACK | RFU | FOptsLen |

รูปที่ 8 MAC Payload ของ Data Messages

☐ Adaptive Data Rate Control (ADR, ADRACKReq ใน FCtrl)

ในโครงข่าย LoRa อุปกรณ์ End Device จะสามารถใช้งาน Data Rate ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ LoRaWan สามารถปรับ

Data Rate ตามแต่ละอุปกรณ์ได้ตามความเหมาะสม ซึ่งเรียกความสามารถนี้ว่า Adaptive Data Rate (ADR) เมื่อทำการใช้งานฟังก์ชั่นนี้ในระบบโครงข่ายก็จะเลือกใช้งาน Data Rate ที่ไวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ในอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ไม่ควรตั้งค่า Data Rate ที่เป็นค่าคงที่ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ ทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของคลื่นวิทยุ ถ้ามีการใช้งาน ADR โครงข่ายจะเป็นตัวควบคุม Data Rate ของอุปกรณ์ผ่าน MAC Command บิท ADR สามารถสั่งใช้งานได้ทั้งจากตัวอุปกรณ์และโครงข่าย บิท ADR นี้ควรสั่งใช้งานให้ได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่และความสามารถของโครงข่าย

- Message Acknowledge Bit และ Acknowledgement Procedure (ACK ใน FCtrl)

ทุกครั้งเมื่อได้รับ Confirmed Data Message ตัวรับ (Receiver) จะต้องทำการตอบกลับ ด้วย Data Frame ที่มีการตั้งค่า acknowledgment bit (ACK) กรณีที่ตัวส่งเป็นอุปกรณ์ End Device ทางด้านโครงข่ายจะต้องส่งการตอบกลับโดยใช้หน้าต่างเปิดรับ (RX) ที่ถูกเปิดโดย End Device

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- Retransmission Procedure

จำนวนครั้งของการส่งข้อความเดิมใหม่อีกครั้ง (Retransmission) โดยที่ต้องการให้มีการตอบกลับแต่ไม่ได้รับ จะขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของอุปกรณ์ End Device และอาจจะแตกต่างกันไปตามแต่ละอุปกรณ์ แต่บางกรณี Network Server ก็ยังสามารถเป็นตัวตัดสินใจในการส่งข้อความได้

ถ้าอุปกรณ์ End Device ถึงจำนวนสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ในการส่ง Retransmission โดยที่ไม่ได้รับการตอบกลับ ตัวอุปกรณ์ End Device สามารถจะลองลด Data Rate เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่ง แต่ก็ขึ้นอยู่

กับอุปกรณ์ที่ตัดสินใจจะทดลองส่งข้อความอีกครั้งด้วย Data Rate ที่ลดลง หรือจะยอมปล่อยข้อความนั้นทิ้งไป

 Frame Pending Bit (FPending ใน FCtrl สำหรับ Downlink)

Frame Pending Bit (FPending) จะถูกใช้โดยการส่ง Downlink เท่านั้น เป็นตัวระบุว่า Gateway มีข้อความที่รอการส่งอยู่และถามอุปกรณ์ End Device เพื่อเปิดช่องรับสัญญาณเพิ่มขึ้นให้เร็วที่สุดโดยการส่งข้อความ Uplink

 Frame Counter (FCnt)

แต่ละอุปกรณ์จะมีเฟรมสำหรับนับจำนวนข้อความที่ส่งและรับอยู่ 2 ประเภท สำหรับนับจำนวน Uplink ที่ส่งไปยัง Network Server (FCntUP) และสำหรับนับจำนวนข้อความ Downlink ที่ได้รับจาก Network Server (FCntDown) ทุกๆ ครั้งที่มีการ Join Accept เข้าโครงข่ายจะมีการรีเซ็ตค่า FCnt เป็น 0 ทุกครั้ง และค่า FCntUP และ FCntDown จะมีการเชื่อมโยงค่าทั้ง 2 ฝั่งทุกการส่งข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่ามีข้อความที่ขาดหายไปขนาดไหนโดยเทียบจาก MAX_FCNT_GAP

 Frame options (FOptsLen ใน FCtrl, FOpts)

Frame-Options Length (FOptsLen) ใน FCtrl แสดงถึงความยาวที่แท้จริงของ Frame Options (FOpts) ซึ่ง FOpts จะทำหน้าที่ในการส่ง MAC Command โดยมีขนาดสูงสุดที่ 15 octets

กรณีที่ FOptsLen เป็นค่า 0 จะแสดงว่าไม่มีการส่ง FOpts แต่ถ้า FOptsLen มีค่าใดก็ตามที่ไม่ใช่ 0 ก็คือมีการส่ง MAC Command ใน FOpts และจะไม่สามารถใช้ port 0 ได้ หรือ FPort ต้องไม่มีค่าหรือมีค่าที่ไม่เท่ากับ 0 และ MAC Command ไม่สามารถแสดงพร้อมกันได้ใน Payload field และ Frame Option

- Port field (FPort)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อใดก็ตามที่ Payload Field ไม่ว่าง ตัว Port Field ต้องมีการแสดงค่าเสมอ และกรณีที่มีค่า Fport เป็น 0 จะหมายความว่า FRMPayload มีการส่งแต่ MAC Command นอกเหนือจากนั้น FPort จะมีค่าได้ตั้งแต่ 1-223 (0x01-0xDF) และจองค่า 224 ไว้สำหรับทดสอบ LoRaWAN MAC Layer Protocal และ FPort 225-255 (0xE1-0xFF) จะจองไว้สำหรับการใช้งานในอนาคต ดังรูปที่ 9

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Size (bytes)** | 7..22 | 0..1 | 0..*N* |
| **MACPayload** | FHDR | FPort | FRMPayload |

รูปที่ 9 โครงสร้างของ MAC Payload

N คือ จำนวน octet ของ Application Payload ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานของแต่ละภูมิภาคซึ่งถูกกำหนดใน “LoRaWAN regional physical layer specification”

- MAC Frame Payload Encryption (FRMPayload)

ถ้า Data Frame มีการส่ง Payload ก่อนที่จะคำนวณ Message Integrity Code (MIC) จะต้องทำการเข้ารหัส FRMPayload ก่อนเสมอ การเข้ารหัสจะใช้วิธี Generic Algorithm (IEEE 578 802.15.4/2006 Annex B [IEEE802154] AES with key length of 128 bits)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

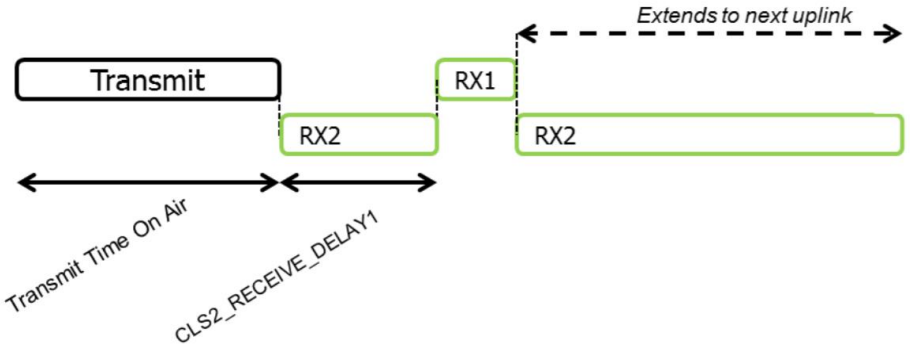
*2.6.1.4 Message Integrity Code (MIC)*

ใช้เป็นรหัสตรวจสอบข้อมูล โดย MIC จะคำนวณโดยใช้ทุก Fields ในข้อความนั้นๆ

2.6.2 Class C – CONTINUOUSLY LISTENING

อุปกรณ์ Class C จะใช้ในอุปกรณ์ที่มีความสามารถเพียงพอในการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์และไม่จำเป็นต้องลดระยะเวลาการเปิดช่องรับสัญญาณของอุปกรณ์ การใช้งาน Class C จะไม่สามารถใช้งานร่วมกับ Class B ได้ อุปกรณ์ Class C จะมีการเปิดหน้าต่าง Rx2 ให้บ่อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยจะเปิด Rx2 เมื่อไม่ได้ส่งข้อมูล หรือ ไม่ได้ทำการเปิด Rx1 การจะใช้งาน Class C จะต้องเปิด Rx2 เวลาสั้นๆ ระหว่างสิ้นสุดการส่ง Uplink และช่วงเริ่มต้นของ Rx1 และต้องเปลี่ยน

กลับเป็น Rx2 ทันทีที่ปิด Rx1 แต่ช่องรับสัญญาณ Rx2 จะต้องเปิดทิ้งไว้จนกว่าอุปกรณ์จะทำการส่งข้อความอีกครั้ง ดังรูปที่ 10




รูปที่ 10 หน้าต่างเวลารับสัญญาณอุปกรณ์ Class C

อุปกรณ์ Class C จะสามารถรับ Downlink แบบ Multicast ได้ ซึ่งต้องมาจาก Application Layer และมีข้อจำกัด คือ ห้ามส่ง MAC Commands, ACK และ ADRACKReq บิท ต้องมีค่าเป็น 0 และบิท FPending ที่ใช้บ่งบอกว่ามีข้อความ Multicast ที่ต้องการจะส่งเพิ่ม แต่เนื่องจาก Class C มีการเปิดหน้าต่างรับสัญญาณเกือบตลอดเวลาจึงไม่ได้ส่งผลอะไรเพิ่มเติม

## 2.7 AS923 LoRaWAN Region Parameter (LoRaWAN 1.1 Regional Parameters)

เป็นข้อกำหนดของค่าต่างๆของ LoRaWAN ที่ใช้ในแต่ละภูมิภาคที่มีความแตกต่างกัน ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ย่านความถี่ใช้งาน LoRaWAN

| Channel Plan | Common Name |
|---|---|
| EU863-870 | EU868 |
| US902-928 | US915 |
| CN779-787 | CN779 |
| EU433 | EU433 |
| AU915-928 | AU915 |
| CN470-510 | CN470 |
| AS923 | AS923 |
| KR920-923 | KR920 |
| IN865-867 | IN865 |
| RU864-870 | RU864 |

โดยประเทศไทยใช้แผนของ Channel ที่จัดอยู่ใน AS923 และ EU433 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ย่านความถี่ใช้งานประเทศไทย

| | | |
|---|---|---|
| Thailand | 433.05 - 434.79 MHz | EU433 |
| | 920 - 925 MHz | AS923 |

2.7.1 AS923 ISM Band Channel Frequencies [2]

ในส่วนนี้จะใช้กับภูมิภาคที่มีความถี่ระหว่าง [923...923.5MHz] ถูกระบุในย่าน ISM Band การแบ่งช่องสัญญาณเครือข่าย (Network Channels) สามารถจัดการได้โดยผู้สั่งการเครือข่ายได้ตามความเหมาะสม แต่จำเป็นต้องใช้ 2 ช่องสัญญาณที่ต้องถูกใช้งานในทุกๆ อุปกรณ์ในย่าน AS923MHz โดยช่องสัญญาณนี้เป็นเงื่อนไขขั้นต่ำสุดสำหรับเกตเวย์ที่ต้องมีการเปิดช่องรับสัญญาณ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ช่องความถี่เงื่อนไขต่ำสุดของ AS923

| Modulation | Bandwidth [kHz] | CH Frequency [MHz] | LoRa DR/Bitrate | Nb Channel | Duty Cycle |
|---|---|---|---|---|---|
| LoRa | 125 | 923.20<br>923.40 | DR0-5<br>/0.3-5<br>kbps | 2 | <1% |

ช่องสัญญาณดังกล่าวเป็นค่าปกติที่ต้องมีในทุกอุปกรณ์และไม่สามารถเปลี่ยนค่าผ่านคำสั่ง NewChannelReq ได้ และเป็นการรับประกันว่าจะเป็นช่องสัญญาณขั้นต่ำสุดที่จะสื่อสารกันระหว่าง End Device และ gateway

อุปกรณ์ใน AS923 MHz ISM band ควรใช้ค่าตั้งต้นของพารามิเตอร์ตามที่แนะนำ คือ EIRP:16 dBm และ AS923 MHz ซึ่ง End Device ควรตั้งลักษณะของโครงสร้างช่องสัญญาณสำหรับเก็บค่าอย่างน้อย 16 ช่อง ซึ่งขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณความถี่และอัตราการส่งข้อมูลที่สามารถใช้ได้ในความถี่นั้นๆ ดังตารางที่ 4 ที่แสดงความถี่ที่ควรใช้สำหรับการ Broadcast สำหรับข้อความ JoinReq

ตารางที่ 4 ช่องความถี่เงื่อนไขต่ำสุดสำหรับ Broadcast

| Modulation | Bandwidth [kHz] | CH Frequency [MHz] | LoRa DR/Bitrate | Nb Channel | Duty Cycle |
|---|---|---|---|---|---|
| LoRa | 125 | 923.20<br>923.40 | DR2-5 | 2 | <1% |

อัตราการส่งข้อมูล (Data Rate หรือ DR) โดยปกติของ JoinReq จะมีช่วงอยู่ที่ DR2-DR5 (SF10/125 kHz – SF7/125 kHz เพื่อให้แน่ใจได้ว่า End Device จะสามารถเข้ากับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อจำกัด Dwell Time ที่ 400 ms ก่อนที่จะได้รับการระบุ Dwell Time ที่แท้จริงจาก Network Server ผ่าน MAC Command ได้

2.7.2 AS923 Data Rate และการแปลงรหัสของกำลังขาออก

MAC Command ถูกใช้ในการถอดรหัสอุปกรณ์ AS923 เพื่อใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ DR ในการส่งข้อมูลผ่านคำสั่ง TxParamSetupReq/Ans ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 Data Rate ของ AS923

| Data Rate | Configuration | Indicative physical bit rate [bit/s] |
|---|---|---|
| 0 | LoRa: SF12/125 kHz | 250 |
| 1 | LoRa: SF11/125 kHz | 440 |
| 2 | LoRa: SF10/125 kHz | 980 |
| 3 | LoRa: SF9/125 kHz | 1760 |
| 4 | LoRa: SF8/125 kHz | 3125 |
| 5 | LoRa: SF7/125 kHz | 5470 |
| 6 | LoRa: SF7/250 kHz | 11000 |
| 7 | FSK: 50 kbps | 50000 |
| 8...14 | RFU | |
| 15 | Defined in LoRaWAN | |

และตาราง TXPower ที่บอกถึงระดับกำลังส่งแต่ละระดับที่สัมพันธ์กับระดับ EIRP สูงสุดของอุปกรณ์ตามตารางที่ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6 ระดับกำลังส่งและค่า EIRP สูงสุด

| TXPower | Configuration (EIRP) |
|---|---|
| 0 | MAX EIRP |
| 1 | MAX EIRP – 2dB |
| 2 | MAX EIRP – 4dB |
| 3 | MAX EIRP – 6dB |
| 4 | MAX EIRP – 8dB |
| 5 | MAX EIRP – 10dB |
| 6 | MAX EIRP – 12dB |
| 7 | MAX EIRP – 14dB |

| | |
|---|---|
| 8...14 | RFU |
| 15 | Defined in LoRaWAN |

โดย EIRP หมายถึง Equivalent Isotropically Radiated Power ที่บ่งบอกถึงกำลังสัญญาณออกในแนวรัศมีที่อ้างอิงกับกำลังส่งเสาสัญญาณแบบ Isotropic ที่ส่งออกเท่ากันในทุกเส้นทางซึ่งแสดงในหน่วยของ dBi

ตามปกติแล้วค่า EIRP สูงสุด ควรเป็น 16 dBm ซึ่งค่านี้สามารถปรับแต่งได้ผ่าน Network Server โดยคำสั่ง TxParamSetupReq ซึ่งควรส่งคำสั่งนี้ทั้งจากทางอุปกรณ์ และ Network Server ซักครั้ง

2.7.3 AS923 Maximum Payload Size

ค่าสูงสุดของขนาด MACPayload (M) จะถูกกำหนดพร้อมค่า Dwell time โดยค่า UplinkDwellTime = 0:No Limit, 1:400 ms ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดทาง PHY Layer ที่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถอดรหัสและรวมผลจากการใช้งาน Repeater ด้วย กรณีที่อุปกรณ์ End Device ไม่มีการใช้งาน Repeater ค่าของ MAC Payload จะได้ค่าตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตาราง Data Rate ของ Uplink และ Down Link

| **DataRate** | **Uplink MAC Payload Size (M)** | | **Uplink MAC Payload Size (M)** | |
|---|---|---|---|---|
| | **UplinkDwellTime = 0** | **UplinkDwellTime = 1** | **UplinkDwellTime = 0** | **UplinkDwellTime = 1** |
| 0 | 59 | N/A | 59 | N/A |
| 1 | 59 | N/A | 59 | N/A |
| 2 | 59 | 19 | 59 | 19 |
| 3 | 123 | 61 | 123 | 61 |
| 4 | 250 | 133 | 250 | 133 |
| 5 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| 6 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| 7 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| 8...15 | RFU | | RFU | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ส่วนค่า Payload (N) ของ Application สูงสุดจะไม่รวมค่าที่เก็บใน FOpt ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า MAC payload จำนวน 8 ไบท์ และอาจจะน้อยกว่านั้นถ้ามีการส่งค่า FOpt มาด้วย

2.7.7 AS923 Receive Windows

หน้าต่าง RX1 จะใช้ในแชแนลเดียวกันกับที่ส่ง Uplink โดยการตั้งค่า Data Rate จะมาจาก Data Rate ของ Uplink และค่า RX1DROffset

**RX1 Data Rate = MIN (5, MAX (MinDR, Upstream Data Rate – RX1DROffset))**

MinDR จะขึ้นอยู่กับบิท DownlinkDwellTime ที่ส่งจากอุปกรณ์ในคำสั่ง TxParamSetupReq

DownlinkDwellTime = 0 (No limit): MinDR = 0

DownlinkDwellTime = 1 (400 ms): MinDR = 2

ค่าที่สามารถใช้ได้ของ RX1DROffset จะมีค่าตั้งแต่ 0:7 ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่า RX1 DR Offset

| RX1DROffset (Coded value) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Effective_RX1DROffset | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | -1 | -2 |

ส่วนค่า RX2 จะถูกกำหนดค่าความถี่และ Data Rate คงที่ โดยปกติจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 923.2 MHz/DR2 (SF10/125 kHz)

2.7.8 AS923 Default Settings

ค่าแนะนำที่ควรตั้งค่าในการใช้งาน AS923 เป็นตามดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าตั้งต้นพื้นฐานสำหรับ AS923

| | |
|---|---|
| RECEIVE_DELAY1 | 1 s |
| RECEIVE_DELAY2 | 2 s (RECEIVE_DELAY1 + 1s) |
| JOIN_ACCEPT_DELAY1 | 5 s |
| JOIN_ACCEPT_DELAY2 | 6 s |
| MAX_FCNT_GAP | 16384 |
| ADR_ACK_LIMIT | 64 |
| ADR_ACK_DELAY | 32 |
| ACK_TIMEOUT | 2 +/- 1 s<br>(สุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง 3 วินาที) |

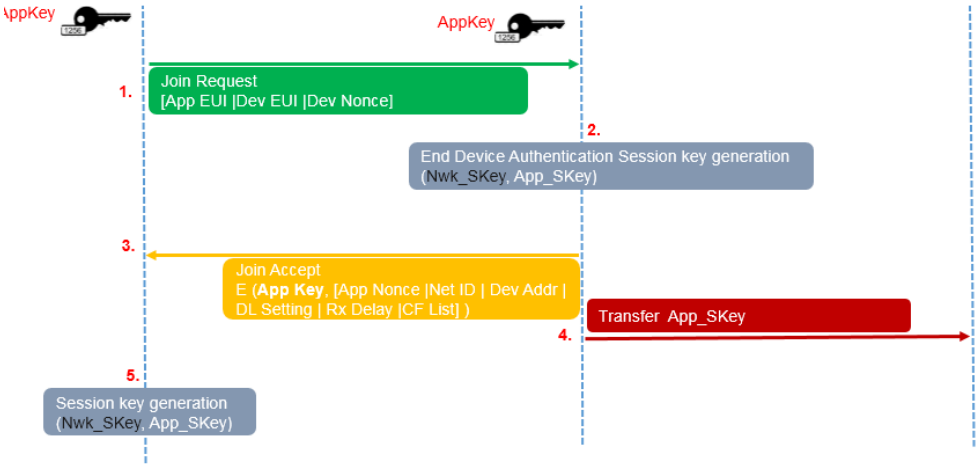
**2.8 Activation Mode OTAA [1]**

ในการใช้งาน LoRaWAN จำเป็นต้องมีการ Activate เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบเสียก่อน เมื่อ End Device ต้องทำการส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบโครงข่ายของ LoRa จำเป็นต้องมีกระบวนการในการเข้าสู่ระบบโครงข่ายก่อน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. Activation By Personalization (ABP) รูปแบบนี้ NwkSkey และ AppSkey จะถูกเก็บไว้ใน End Device ที่ใช้ส่งข้อมูลโดยตรงไปที่โครงข่าย LoRa

2. Over-The-Air Activation (OTAA) ในกระบวนการเข้าร่วมของ End Device ในระบบโครงข่าย LoRa ทั้ง End Device และ Application Server จะใช้ Secret Key อันเดียวกันโดยเรียกว่า App Key และในระหว่างขั้นตอนการเข้าร่วมทั้ง End Device และ Application Server จะมีการแลกเปลี่ยน Sessions Keys (NwkSKey) ระหว่างกัน

ซึ่งวิธี OTAA จะมีข้อดีตรงความปลอดภัยในการใช้งานมากกว่าเพราะมีการแลกเปลี่ยนคีย์ระหว่าง End Device และ Network Server แต่ ABP จะสามารถเข้าสู่ระบบโครงข่ายได้ไวกว่าเนื่องจากมีขั้นตอนที่น้อยกว่า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้งานวิธีการ Acivation แบบ OTAA เท่านั้น




รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการ Activate ในรูปแบบ OTAA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.1 ข้อความ Join Request

หลังจากเปิดใช้งานแล้วโหนด LoRa จะทำการส่งแพจเกจออกไปให้ตัว LoRaWAN Gateway ที่อยู่ในรัศมีทำการ โดยแพคที่โหนดส่งออกไปเรียกว่า “Join Request” รูปแบบ JSON ในแพคเกจ “Join Request” ประกอบด้วย DevEUI (8 ไบท์), JoinEUI (8 ไบท์) และ DevNonce (2 ไบท์) แพคเกจนี้ไม่ได้เข้ารหัสข้อความ แต่จะอาศัย AppKey สร้างรหัส MIC (Message Integrity Code) ขึ้นมาใหม่ เพื่อรับรองความถูกต้องของข้อความที่ส่งไปยัง Network Server

ข้อมูลที่โหนด LoRa ส่งไปให้ Network Server ประกอบไปด้วย

DevEUI เป็นหมายเลขจำนวน 16 ตัว ฐาน 16 (HEX) ตัวเลขนี้จะไม่ซ้ำกัน (Uniquely Identifies) คล้ายๆ กับ MAC Address ในอุปกรณ์ Network ที่เอาไว้อ้างอิงว่าเป็นอุปกรณ์ตัวไหน กำหนดโดยโรงงานผู้ผลิต แต่สำหรับ DevEUI สามารถกำหนดเองได้

JoinEUI เปลี่ยนชื่อมาจาก AppEUI ตามมาตรฐาน LoRaWAN 1.0/1.0.2 เพื่อบอกกับ Network Server ว่าจะใช้ Join-Server ตัวไหนสำหรับการพิสูจน์ตัวตนให้กับแพคเกจ Join-Request

DevNonce คือเลขหมายที่เกิดจากการสุ่มสร้างขึ้นมาจากตัวโหนด เพื่อส่งไปให้ Network Server เกิดขึ้นมาในช่วงกระบวนการ Join-Request เพื่อป้องกันการปลอมแปลงของตัวตอบกลับแพคเกจ Join-Request เลขหมายที่สร้างขึ้นมาจะไม่ซ้ำกันระหว่างตัวโหนดกับ Network Server

MIC คำนวณมาจากโหนด LoRa จะอาศัย AppKey สร้างรหัส MIC (Message Integrity Code) ขึ้นมาใหม่ เพื่อรับรองความถูกต้องของข้อความที่ส่งไปยัง Network Server ว่าไม่มีการเปลี่ยนแก้ไขข้อมูลระหว่างทาง

รูปที่ 12 Join Request Message

2.8.2 การยืนยันตัวตนและการสร้าง Session Key

หลังจากที่ Network Server ได้รับแพคเกจแล้ว จะตรวจสอบว่าเลขหมายของ DevNonce มีการใช้ก่อนหน้าหรือไม่ ถ้าพบว่ามีการใช้มาก่อน ก็จะนำแพคเกจนั้นออกไปทันที แต่ถ้าพบว่ายังไม่เคยใช้ ก็จะดำเนินการต่อโดย Network Server จะนำ AppKey สร้างเป็นรหัส MIC (Message Integrity Code) ขึ้นมา โดยรหัส MIC (Message Integrity Code) ที่สร้างขึ้นนี้ เป็นของฝั่ง Network Server จากนั้นมันจะเปรียบเทียบรหัส MIC ที่มันสร้างขึ้นมาเองกับรหัส MIC ที่ได้รับจากแพคเกจ “Join-Request” ว่าตรงกันหรือไม่ ถ้าข้อความไม่มีการแอบแก้ไข แอบเปลี่ยนข้อมูลระหว่างทาง (Integrity of the Message) แล้ว Network Server ก็จะสร้างคีย์ขึ้นมาใหม่ ได้แก่ DevAddr (Device Address) , AppNonce และ NetID และนำมาสร้าง Nwk_SKey และ App_SKey

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.3 Join Accept Message

Network Server จะทำการสร้างแพคเกจขึ้นมาใหม่ เรียกว่า “Join-Accept” ประกอบด้วย DevAddr, AppNonce, NetID และ Network Settings จากนั้นจะนำ AppKey มาสร้างรหัส MIC (Message Integrity Code) ขึ้นมาใหม่อีกชุด และทำการเข้ารหัสแพคเกจด้วย AppKey และ Network Server จะส่งแพคเกจตอบกลับไปยังโหนด LoRa โดยแพคเกจที่ตอบกลับไปจะเข้ารหัสไว้ (Encrypted Message) โดยใช้อัลกอริทึมในการเข้ารหัส คือ AES 128

บิต (Advanced Encryption Stabdard) และมี MIC (Message Integrity Code) ส่งไปเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลอีกด้วย

NetID หมายเลขของเครือข่าย (unique ID)

DevAddr คล้ายกับ IP Address ของ Network เป็น Address ของตัวโหนดแบบสั้นที่ได้มาจาก Network Server มีขนาด 32 บิตและจะไม่ซ้ำกันใน Network เดียวกัน มันจะถูกใช้ระบุใน Header ของแพคเกจเฟรมที่รับส่งกัน ระหว่างตัวโหนด Network Server และ Application Server

DLSetting ค่าการตั้งค่าของ Downlink พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่า DR ของดาวน์ลิงค์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างตัวโหนดเป็นต้น

RxDelay ค่าหน่วงเวลาที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูล

CFList การกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน และการตั้งค่าแต่ละความถี่ ดังรูปที่ 13

รูปที่ 13 Join Accept Message

2.8.4 การขนส่ง App_SKey

เนื่องจาก App_SKey นั้นใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์โหนดและ Application Server เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการส่ง App_SKey ไปที่ Application Server ด้วย แต่เนื่องจาก LoRa ไม่ได้กำหนดวิธีการส่งข้อมูลดังกล่าว จึงสามารถกำหนดวิธีการได้ตามที่เหมาะสม โดยอาจนำไปรวมกับขั้นตอนการ Join ได้

2.8.5 Session Key Generation

หลังจากที่ตัวโหนดได้รับ AppNonce จากแพคเกจที่ Network Server ส่งไป ตัวโหนดจะนำ AppNonce และ DevNonce มาสร้าง “เซสชั่นคีย์” ได้แก่ Nwk_SKey (Network Session Key) และ App_SKey (Application Session Key)

Network Session Key (NwkSKey) จะนำมาใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูล ระหว่าง LoRa-Node และ Network Server คีย์นี้จะใช้ในการคำนวณเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อความ MIC (Message Integrity Code) ว่าข้อความทั้งหมดเป็นข้อความที่เชื่อถือได้

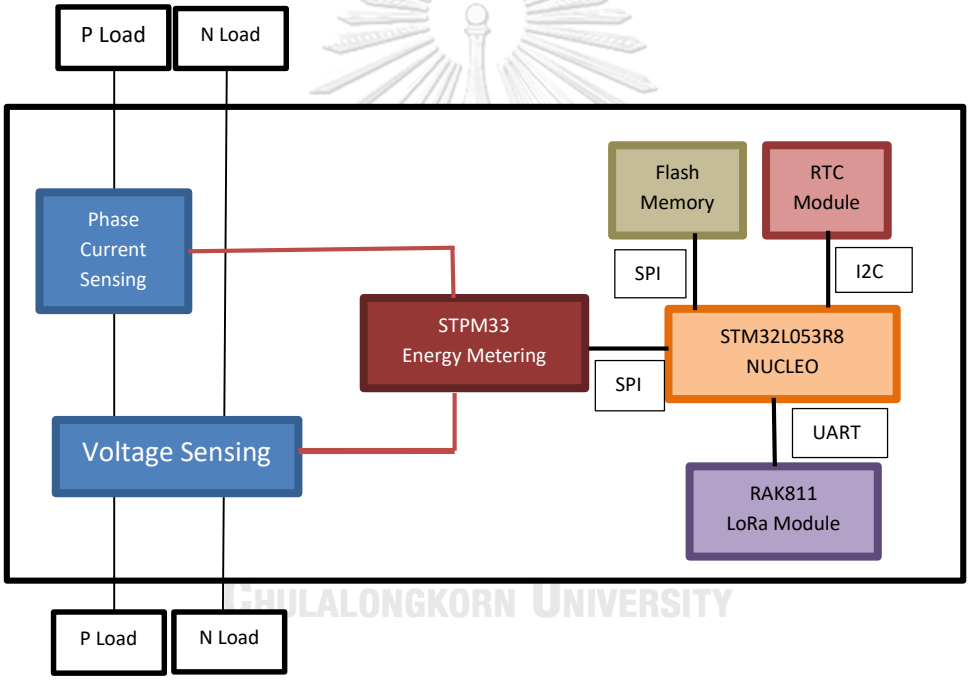
ส่วน Application Session Key (AppSKey) จะนำมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่าง LoRa-Node และ Application Server ใช้สำหรับการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูล Payload ทั้งหมด โดยจะเข้ารหัสระหว่างตัวโหนดและ Application Server ซึ่งหมายความว่าไม่มีใครสามารถรู้ข้อความระหว่างทางที่รับส่งได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 3 การออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ของ AMR

## 3.1 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ของระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะจำลองระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติจำนวน 5 ตัวเพื่อจำลองการส่งข้อมูลของลูกค้าเพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาประกอบในแอพพลิเคชั่นการจัดการไฟฟ้าดับ ซึ่งจะใช้ที่พิกัด 220 V 1 เฟส 2 สาย สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าและการใช้พลังงานจากบ้านของลูกค้า โดยผ่านหน่วยประมวลผลพิเศษสำหรับวัดค่าโดยเฉพาะ STPM33 ก่อนผ่านบอร์ดสำเร็จรูป STM32L053R8 Nucleo ที่เป็นตัวประมวลผลกลางผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ SPI ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะทำการบันทึกลงบน ข้อมูลในแฟลชก่อนส่งข้อมูลผ่าน UART ให้ RAK811 เพื่อส่งข้อมูลทาง LoRaWAN ไปประมวลผลที่ Application Server ต่อไป ดังรูปที่ 14

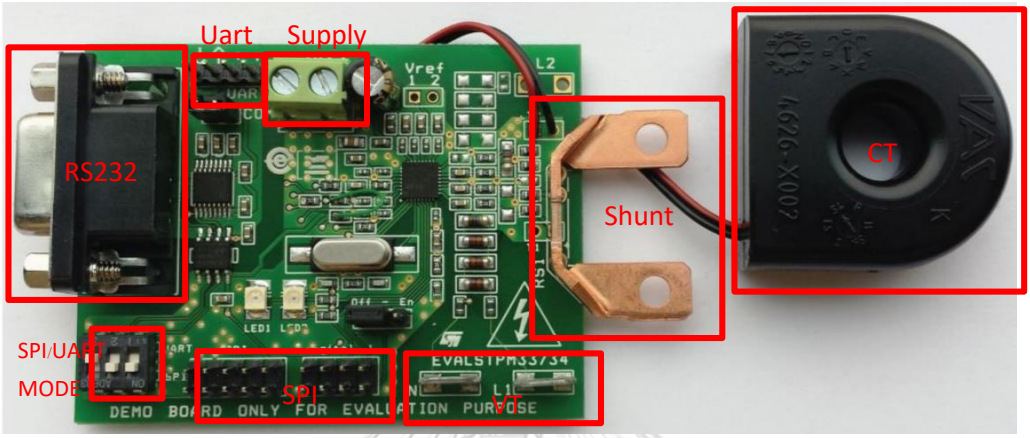



รูปที่ 14 โครงสร้างของมิเตอร์ไฟฟ้า

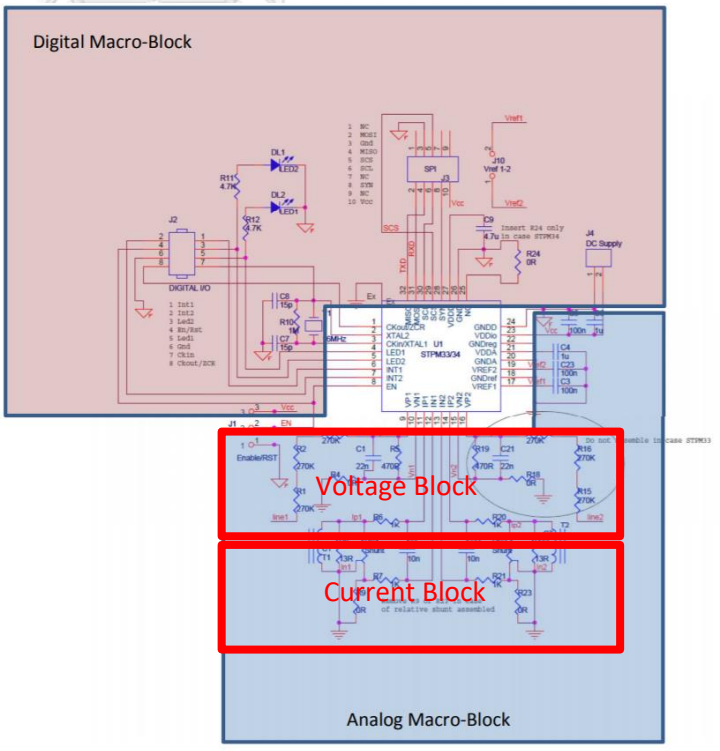
### 3.1.1 EVALSTPM33 [3]

STPM33 คือ Application Specific Standard Products (ASSP) หรือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เฉพาะในการวัดค่าพลังงานทางไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่มี IC ชนิดพิเศษของบริษัท Semtech ที่ไว้ใช้สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าโดยเฉพาะ สามารถใช้การสื่อสารผ่านทาง SPI หรือ UART และมีหัวสำหรับต่อ RS232 โดยตรง ซึ่งบอร์ดนี้สามารถวัดค่ากระแสได้ผ่านทาง Current Transformer (CT) หรือ Shunt มีความสามารถในการวัดค่าโดยให้ค่าความแม่นยำที่สูง (น้อยกว่า 0.1% เมื่อมีพิกัด 5000:1 และ น้อยกว่า 0.5% เมื่อมีพิกัด 10000:1) สามารถวัดได้ทั้งค่าทันทีทันใด (instantaneous) และ

คลื่นกระแส การคำนวณ RMS ของค่าทางไฟฟ้า เช่น กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ตัว STPM33 จะประกอบด้วย IC 2 ส่วน ได้แก่ส่วน Analog และ Digital โดยที่ Analog จะประกอบด้วย Low-offset Amplifiers, Analog-to-Digital Converter (ADC), Regulator และ DC Buffers ส่วน Digital จะประกอบด้วยตัวกรองข้อมูล Digital และหน่วยประมวลสัญญาณ Digital (Digital Signal Processor) ดังรูปที่ 15 และ 16




รูปที่ 15 บอร์ด ASSP EVALSTPM33



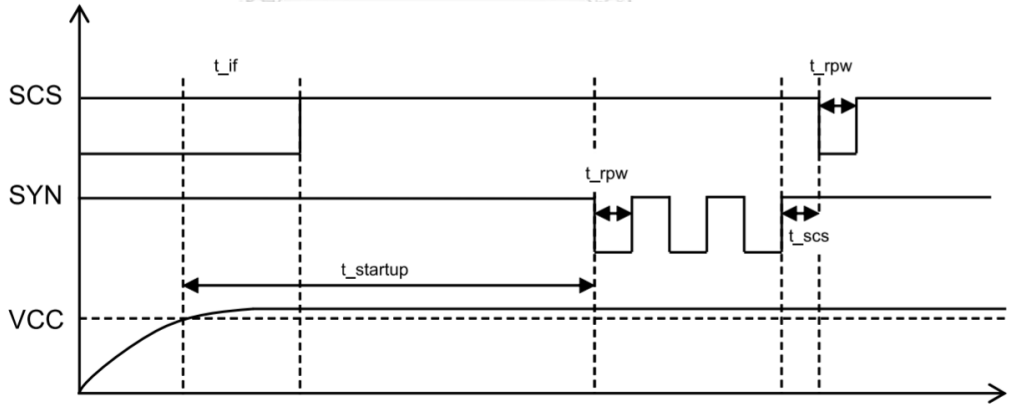

รูปที่ 16 โครงสร้างของ EVALLSTPM33

*3.1.1.1 หลักการทำงานของ STPM33*

จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. ส่วนของแอนาล็อก จะรับแรงดันและกระแสจากส่วนรับค่าแล้วแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลผ่าน Analog/Digital Converters (ADCs) หรือตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลความละเอียด 24 บิตที่เชื่อมโยงกับ Clock ก่อนผ่านตัวปรับปรุงสัญญาณก่อนได้ค่าออกมาเป็นค่ากระแสและแรงดันในรูปแบบดิจิตอลที่มีความสัมพันธ์กับเวลา
2. ส่วนของดิจิตอล จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor หรือ DSP) ที่จะคำนวณค่าทางไฟฟ้าแบบเรียลไทม์จากค่าวัดกระแสและแรงดันที่ได้รับจากส่วนของแอนาล็อก เช่น กำลัง พลังงาน หรือค่า RMS ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดจะถูกนำไปเก็บไว้ที่รีจิสเตอร์ขนาด 32 บิท

การใช้เลือกการใช้งานช่องทางการสื่อสารของ STPM จะมีรูปแบบเฉพาะของตัวเองอยู่ โดยการเลือกขาสัญญาณ SCS เป็น LOW ก่อนที่ Vcc และขา EN จะทำงาน และเมื่อทำการส่งข้อมูลก็จะต้องปรับขา SCS เป็น low ตามรูปแบบการใช้งาน SPI ตามปกติ และใช้ขา SYN สำหรับรีเซ็ตรีจิสเตอร์ของ DSP โดยส่งสัญญาณ 3 ลูก เพื่อเป็นการรีเซ็ตการทำงานของ STPM33 ซึ่งควรส่งซักครั้งก่อนจะใช้งานตามรูปที่ 17




รูปที่ 17 การส่งสัญญาณ SCS และ SYN เพื่อรีเซ็ตค่าของ STPM33

*3.1.1.2 โปรโตคอลการสื่อสาร*

ต่อการสื่อสาร 1 รอบ ข้อมูลที่ส่งจะมีขนาด 4+1 (Optional CRC) ไบท์ ซึ่งมีลำดับของการส่งข้อมูลดังตารางที่ 10

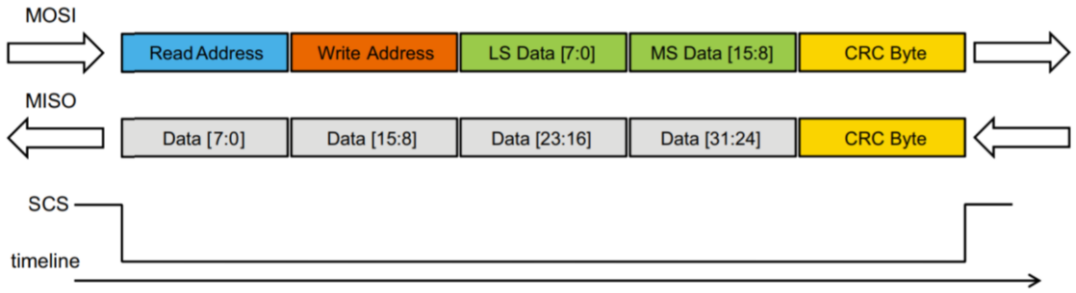
ตารางที่ 10 โครงสร้างข้อความของ STPM33

| Byte | Master-side transmitted data | Slave-side transmitted data |
|---|---|---|
| 1 | ADDRESS ของรีจิสเตอร์ 32 บิทที่จะอ่าน | ข้อมูลที่ฝั่งมาสเตอร์ขอไบท์ LSB |
| 2 | รีจิสเตอร์ 16 บิทที่ต้องการเขียน | ข้อมูลที่ฝั่งมาสเตอร์ขอไบท์ที่ 2/4 |
| 3 | รีจิสเตอร์ 16 บิทแบบ LSB ที่ต้องการเขียน | ข้อมูลที่ฝั่งมาสเตอร์ขอไบท์ที่ 3/4 |
| 4 | รีจิสเตอร์ 16 บิทแบบ MSB ที่ต้องการเขียน | ข้อมูลที่ฝั่งมาสเตอร์ขอไบท์ที่ 4/4 |
| 5(option) | Cyclic Redundancy Check | Cyclic Redundancy Check |

ข้อมูลข้างต้นเป็นการส่งข้อมูลระหว่าง Master และ Slave ในการสื่อสารเซสชั่นเดียวกัน SPI สามารถส่งข้อมูลเพื่อเรียกอ่านค่า (Read Request) และเขียนค่า (Write Request) ได้ ซึ่งเมื่อมาสเตอร์มีการรับข้อมูล ก็จะเป็นข้อมูลของเซสชั่นที่ขอก่อนหน้านี้ และจะปิดท้ายด้วย CRC เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าไม่มีข้อมูลเสียหายระหว่างการส่ง

ในระหว่างการส่งข้อมูลของ MOSI จะมีการสลับลำดับการส่งข้อมูลโดยนำไบท์ Least-Significant (LS) [BIT 7:0] เป็นลำดับที่ 3 แล้วนำ ไบท์ Most-Significant (MS) [BIT 15:8] เป็นลำดับที่ 4

ส่วนของ MISO ไบท์ลำดับแรกที่มาสเตอร์จะได้รับจะเป็น Least-Significant (LS) [BIT 7:0] และลำดับสุดท้ายเป็น Most-Significant (MS) [BIT 31:24] ดังรูปที่ 18 โดยระหว่างการส่งต้องส่ง SCS เป็น LOW ตามรูปแบบการสื่อสารของ SPI




รูปที่ 18 การส่งข้อมูลผ่าน SPI ของ STPM33

ข้อมูลและรีจิสเตอร์สำหรับตั้งค่าจะถูกจัดการด้วยแถวหน่วยความจำภายในขนาด 32 บิท แต่จะสามารถเข้าถึงได้เพียง 16 บิทในการเขียน 1 ครั้ง โดย Address จะมีจำนวนทั้งหมด 70 แถว และมีเพียง 21 แถวแรกที่สามารถเขียนข้อมูลได้ จึงมี 42 Address สำหรับ 16 บิทที่สามารถใช้งานเขียนได้

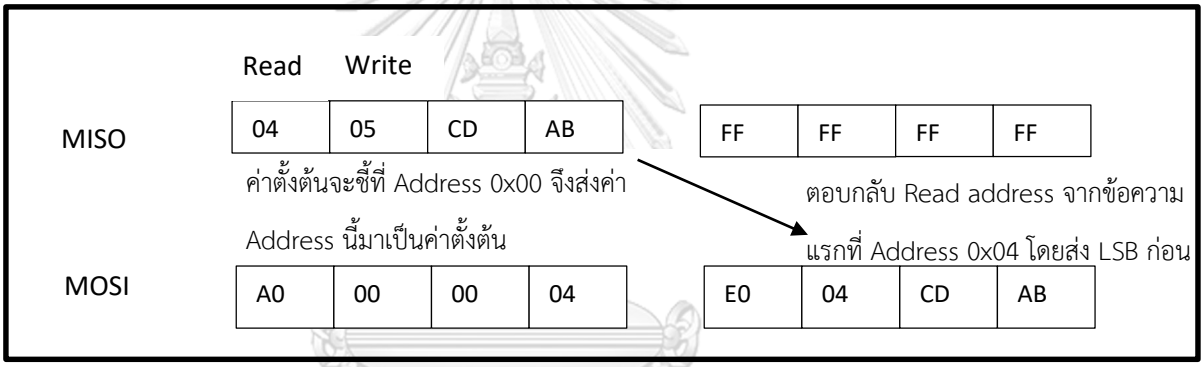
โดยในตัวอย่างนี้จะทำการปิดการใช้งาน CRC ในการส่ง จึงจะทำการส่งเพียงแต่ 4 ไบท์นั้น การจะเขียนบิทที่ 31-16 (MSB) ในแถวที่ 1 (Address 03) ด้วยข้อมูล 0xABCD และอ่านแถวที่ 2 (Address 04) ในการส่งครั้งถัดไป จำเป็นต้องส่ง 4 ไบท์ดังนี้

04_05_CD_AB

ซึ่งการตอบกลับของข้อมูลแรกจะตอบกลับจากรีจิสเตอร์แรกที่มีค่าตั้งต้นคือ 0x04000A0 เสมอ และการจะรับข้อมูลจากรีจิสเตอร์ Address 04 มาสเตอร์ต้องส่งข้อมูลดังนี้

FF_FF_FF_FF

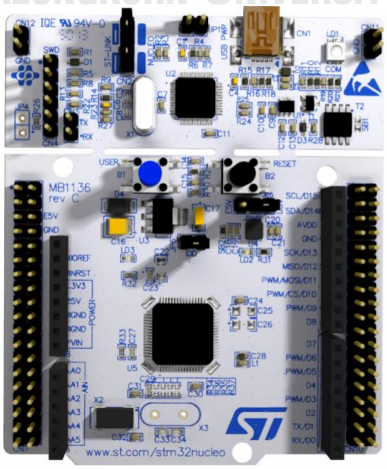
ซึ่งค่าตั้งต้นของรีจิสเตอร์ Address 04 มีค่าตั้งต้นคือ 0x00004E0 แต่จากการส่งการเขียน (Write Request) จากข้อความแรกด้วย 0xABCD ทำให้ข้อมูลที่ได้จึงควรเป็น 0xABCD04E0 โดยจะตอบกลับในรูปแบบของ LSB ดังตัวอย่างในรูปที่ 19




รูปที่ 19 ตัวอย่างการส่งข้อมูล SPI

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.2 บอร์ด STM32L053R8 Nucleo [4]

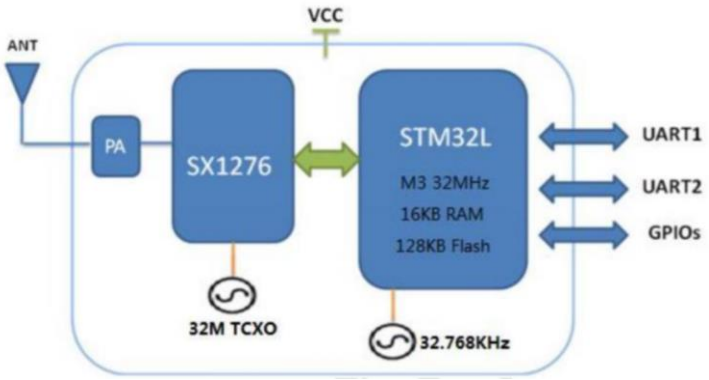


รูปที่ 20 STM32L053R8 Nucleo

ทำหน้าที่ในการเป็นตัวประมวลผลกลางในการติดต่อสื่อสารกับทุกอุปกรณ์ในระบบและประมวลผลค่าวัดจาก STPM33 ตัวบอร์ดใช้ STM32L053R8 [5] เป็น IC ที่พัฒนาโดยบริษัท STMicroelectronics ที่เน้นการใช้พลังงานที่ต่ำ เป็นตระกูล Arm Cortex-M0+ 32 บิต ความเร็วการทำงานสูงสุดที่ 32 MHz มีโมดูลภายที่ใช้ติดต่อสื่อสาร 2 ช่อง I2C, 2 ช่อง SPI, 1 ช่อง I2S และ 2 ช่อง UART และตัวบอร์ดมี Arduino Shield ทำให้สามารถใช้งานคู่กับโมดูล Arduino ได้
ส่วน SPI ใช้ทำการสื่อสารกับ EVALSTPM33 เพื่อรับค่ารีจิสเตอร์และแปลงเป็นค่าทางไฟฟ้าและใช้ร่วมกับ Flash Memory ในการบันทึกค่าทางไฟฟ้าตามเวลาที่กำหนด
ส่วน I2C ใช้ติดต่อกับโมดูล RTC เพื่อให้ได้ค่าทางเวลาที่แม่นยำ ซึ่งจำเป็นต่อการบันทึกค่าทางระบบไฟฟ้า ส่วน UART ใช้ติดต่อสื่อสารกับ RAK811 ใช้สำหรับส่งค่าไปที่ Network Server

3.1.3 โมดูล RAK811 [6]

อุปกรณ์ RAK811 เป็นอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้เทคโนโลยี LoRa ที่มีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อย ซึ่งรองรับการใช้งานในย่านความถี่ AS923 และได้รับการรับรองจดทะเบียนการใช้งานในเมืองไทยเรียบร้อยแล้ว ตัวอุปกรณ์นี้รองรับการใช้งานทั้งคลาส A และ C ตามข้อกำหนดของ LoRaWAN และยังรองรับการใช้งานแบบ Point to Point ตัวอุปกรณ์จะประกอบด้วย SX1276 ของ semtech และ STM32L โดยสั่งการผ่านคำสั่ง AT Command ผ่านการเชื่อมต่อ UART ในการสั่งการและตั้งค่าของอุปกรณ์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ภายนอกได้ ดังรูปที่ 21



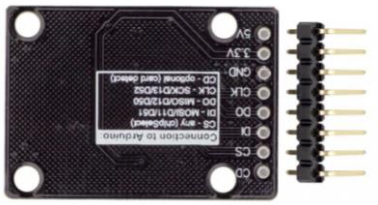

รูปที่ 21 โครงสร้าง RAK811 LoRa

ตัวอุปกรณ์ RAK811 จะแบ่งประเภทของอุปกรณ์ของย่านความถี่วิทยุออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. อุปกรณ์ย่านความถี่วิทยุต่ำ ซึ่งใช้กับ EU433 และ CN470 เท่านั้น 2. อุปกรณ์ย่านความถี่วิทยุสูงซึ่งใช้กับ EU868, US915, AU915, KR920, AS923, IN865 ซึ่ง

ข้อแตกต่างของอุปกรณ์เกิดจากการออกแบบอุปกรณ์และชิพที่ใช้มีการใช้งานที่แตกต่างกัน สามารถรองรับรูปแบบการสื่อสาร LoRaWAN ทุกย่านความถี่ ISM Band ที่ได้รับการรับรองแล้ว รองรับการสื่อสาร Point to Point และการใช้งานแบบ OTAA/ABP สามารถใช้งานผ่าน UART หรือ Serial Port โดยผ่านคำสั่ง AT Command

3.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ

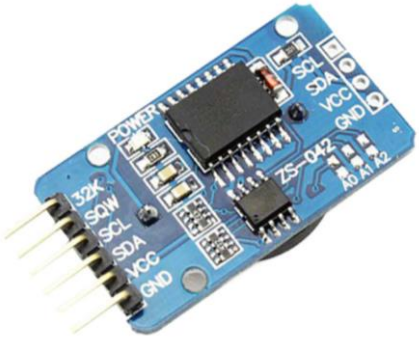
*3.1.4.1 หน่วยความจำแฟลช*



รูปที่ 22 โมดูล SD Card

เป็นโมดูลอ่าน Micro SD และ MMC ของ Robotdyn ที่รองรับ FAT และ FAT32 มีไอซีบัฟเฟอร์ CD4054 เพื่อการสื่อสารที่รวดเร็วและสามารถใช้งานผ่าน SPI ทำหน้าที่ในการเก็บค่าข้อมูลทางไฟฟ้าทุกๆ 15 นาที

*3.1.4.2 โมดูล RTC DS3231*




รูปที่ 23 โมดูล RTC DS3231

โมดูล Real Time Clock (RTC) DS3231 คือ อุปกรณ์ที่ให้ค่าเวลาตามจริง ซึ่งทำงานโดยการจับสัญญานนาฬิกาที่ได้มาจาก Crystal ทำหน้าที่ในการบันทึกเวลาอย่าง

ต่อเนื่องถึงแม้ว่าจะไม่มีไฟเลี้ยงที่ตัวบอร์ด ตัวเวลาก็ยังคงนับได้ต่อ โมดูล RTC นี้ใช้เพื่อบันทึกเวลา (Time Stamp) มีการสื่อสาร I2C ที่มีความเร็วสื่อสารที่ 400 kHz

*3.1.4.3 DC-to-DC Step Down LM2596*

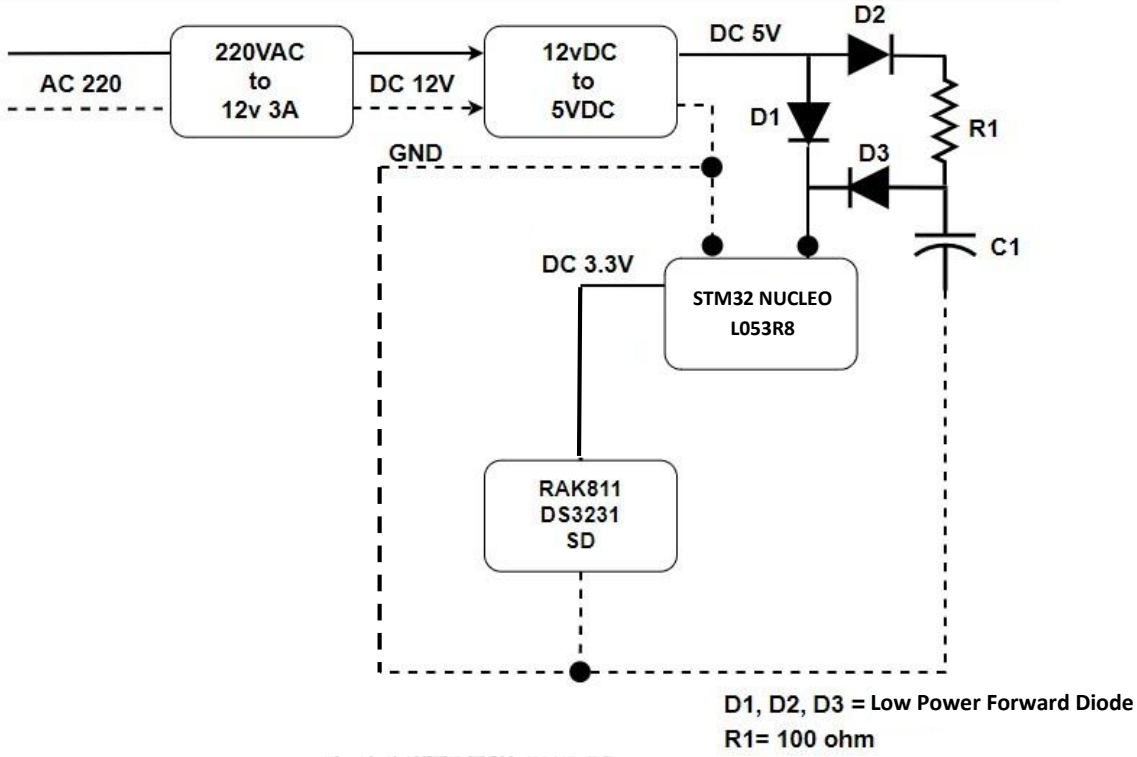
รูปที่ 24 โมดูล DC-to-DC Step Down LM2596

สำหรับแหล่งไฟจะใช้ DC-to-DC Step Down LM2596 ที่สามารถปรับแรงดันขาออกได้ ใช้หลักการแปลงไฟของ Buck Converter มีแรงกันขาเข้า 12 Vdcใช้แปลงไฟขาออกให้เหลือ 5 Vdc สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ที่พิกัด 3 A ทำหน้าที่เลี้ยงไฟให้แก่อุปกรณ์มิเตอร์ทั้งระบบ

*3.1.4.4 วงจร Super Capacitor*

ใช้สำหรับเป็นวงจร Backup เมื่อไฟดับ มิเตอร์จำเป็นต้องส่งข้อมูลครั้งสุดท้าย (Last Gasp) ให้แก่ Network Server โดยวงจรจะใช้ Super Capacitor ขนาด 5.5 V 1.5 F ของ Panasonic ลักษณะดังรูปที่ 25 เพื่อจ่ายไฟให้แก่ระบบเมื่อวงจร Supply หายไป โดยใช้หลักของการคายประจุของ Capacitor ตามรูปที่ 26

รูปที่ 25 Super Capacitor

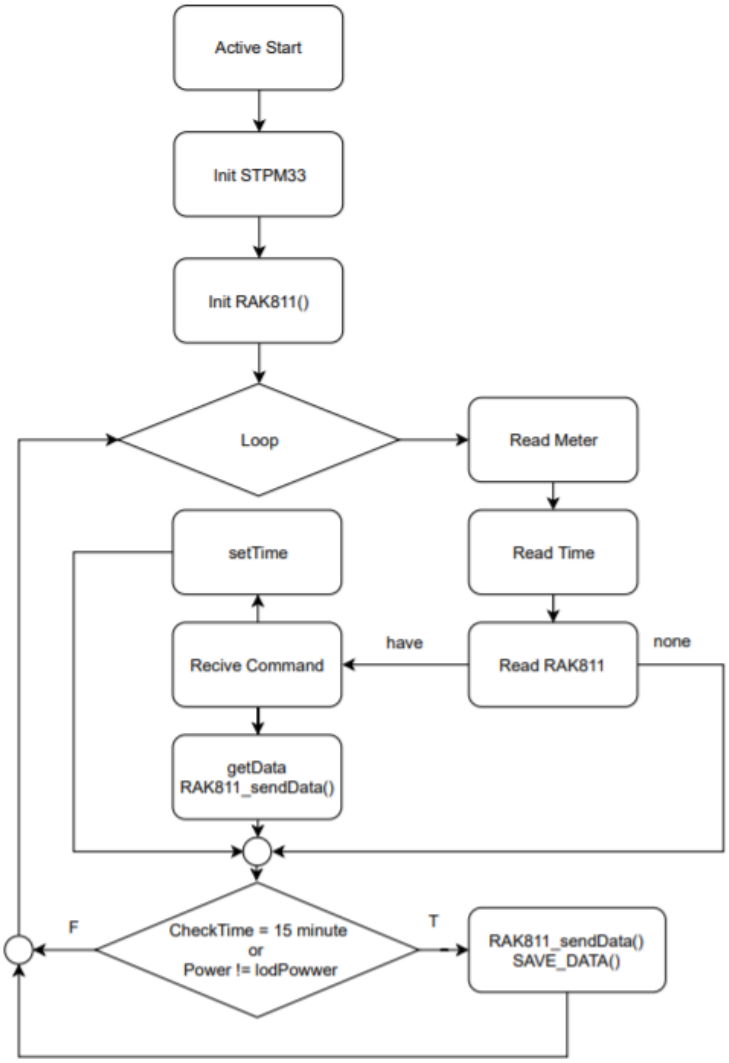



รูปที่ 26 วงร Backup โดย Super Capacitor

### 3.2 รายละเอียดเฟิร์มแวร์

เฟิร์มแวร์ของมิเตอร์จะพัฒนาผ่านโปรแกรม Arduino IDE โดยใช้ไลบรารี่ ของ STM32L NUCLEO-64 โดยมีหน้าที่หลักๆ คือเป็นตัวสื่อสารกับ EVALSPTM33 เพื่ออ่านค่าวัดจากรีจิสเตอร์ แปลงค่าที่อ่านได้จาก STPM33 บันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำแฟลช และส่งข้อมูลผ่าน RAK811 เพื่อนำข้อมูลไปใช้ต่อที่ Network Server ดังรูปที่ 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 27 ลำดับการทำงานของเฟิร์มแวร์ AMR

3.2.1 Init STPM33

การตั้งค่าตั้งต้น STPM33 เมื่อเริ่มต้นจะทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้นและสั่งการให้ STPM33 เริ่มการสื่อสารกับ STM32L053R8 ผ่านฟังก์ชั่น Init STPM33 โดยโปรแกรมจะประกอบไปด้วย

- เลือกโหมดการสื่อสารแบบ SPI ตามหัวข้อ...
- Global Reset โดยการส่งคลื่นสัญญาณแบบ Pulse ที่ขา SCS และ SYN
- เขียนค่าตั้งต้นของรีจิสเตอร์เพื่อให้ทำงานตามที่ต้องการ รวมถึงค่าคาลิเบตต่างๆ

3.2.2 การตั้งค่า RAK811 ผ่าน AT Command (Init RAK811) [7]

อุปกรณ์ RAK811สามรถใช้งานโดยสั่งการโดย AT Command ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ Uart ซึ่งคำสั่งดังกล่าวสามารถดูเพิ่มเติมได้จากเอกสาร RAK811 LoRa AT Command User Guide V1.4 ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเน้นการใช้งานและตั้งค่าในย่านความถี่ AS923 และเชื่อมต่อกับ Network Server ของ CAT ที่ให้บริการโครงข่ายเกตเวย์กับ Network Server ในไทย โดยมีคำสั่งที่สำคัญสำหรับการตั้งค่า LoRaWAN ดังนี้

- at+get_config เป็นคำสั่งสำหรับดูค่า Parameter ของอุปกรณ์ที่ตั้งค่าไว้ โดยปกติจะไว้ตรวจสอบค่าที่ตั้งว่าถูกต้องตามที่ต้องการหรือไม่ และใช้ดู Key หรือ Address ต่างๆ ของอุปกรณ์เพื่อใช้ติดต่อกับ Network Server
- at+set_config เป็นคำสั่งสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ เช่น Key และ Address ต่างๆ การจัดการ Channel หรือค่า DR และ Delay ต่าง ๆ เป็นต้น
- at+band ใช้กำหนด Firmware ตั้งต้นของอุปกรณ์ให้รองรับกับการใช้งานในย่านความถี่ที่กำหนด ซึ่งจะใช้งานในย่านความถี่ AS923
- at+join ใช้กำหนดวิธีการ Activate เพื่อเชื่อมต่อกับ Network Server โดยมีให้เลือก 2 ประเภทคือ OTAA และ ABP
- at+dr ใช้สำหรับกำหนดค่า DR สำหรับการส่ง โดยค่านี้จำเป็นต้องตั้งใหม่ทุกรอบ
- at+send ใช้สำหรับส่งข้อความ Payload ไปยัง Network Server โดยสามารถเลือกประเภทของข้อความ Unconfirm และ Confirm ได้
- at+recv เป็นคำสั่งที่ผู้ใช้ไม่สามารถสั่งใช้งานได้เอง คำสั่งนี้จะทำงานอัตโนมัติเมื่อได้รับการตอบกลับจาก Network Server และเป็นการบอก error ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมต่อกับ Network Server

ซึ่งคำสั่งสุดท้ายเมื่อตั้งค่าต่างๆ เรียบร้อยคือ at+join=otaa และจะได้รับการตอบกลับจาก Network Server ผ่านทางคำสั่ง at+recv =0,3,0 ซึ่งจะหมายถึงการเชื่อมต่อกับ Network Server เสร็จสมบูรณ์แล้ว กรณีที่ไม่สามารถเข้าร่วมกับ Network Server ได้ก็จะทำการทดลองเข้าร่วมใหม่เป็นจำนวน 7 ครั้ง หากสำเร็จก็จะไปสู่ขั้นต่อไปทันที

3.2.3 ลูปหลักของโปรแกรม

ตัวลูปหลักของโปรแกรมตัว STM32L053R8 จะทำการอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ของ STPM33 ทุกๆ 0.5 วินาที เพื่อตรวจสอบและคำนวณค่าวัดทางไฟฟ้าที่สำคัญของระบบ แบ่งแยกประเภทพลังงาน และอ่านค่าเวลาจากโมดูล RTC เพื่อนำไปเป็น Timestamp ของ

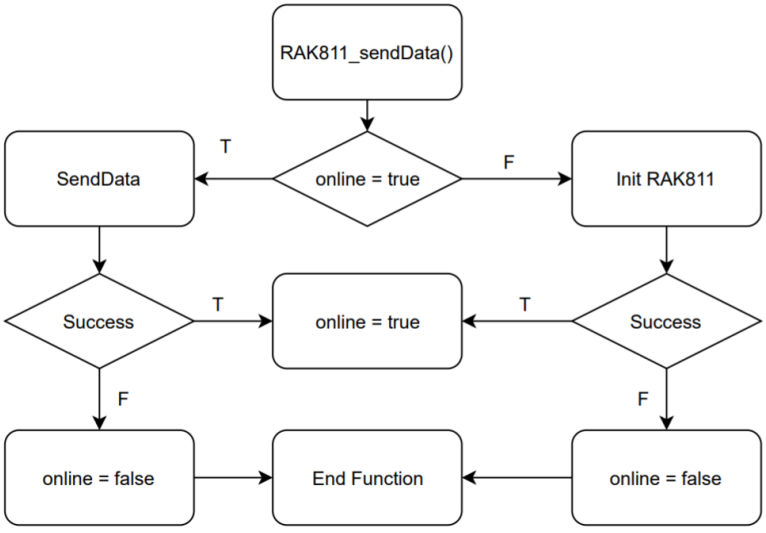
ระบบเพื่อใช้บันทึกใน Log ก่อนจะอ่านค่าจาก RAK811 เพื่อตรวจสอบสถานะและคำสั่งที่อาจจะยังคงค้างจาก Network Server เพื่อทำตามคำสั่งก่อน ซึ่งคำสั่งเหล่านี้อาจจะเป็นการกำหนดค่าเวลาใหม่ หรือเป็นการ Poll จาก Network Server เพื่อเอาค่าวัดทางไฟฟ้า ณ ขณะนั้น กรณีที่ไม่มีคำสั่งใดๆ คงค้างจาก RAK811 ก็จะทำการตรวจสอบเวลาที่ต้องส่งข้อมูลทุกๆ 15 นาที หรือให้ส่งข้อมูลทันทีถ้าเกิดมีไฟฟ้าดับเกิดขึ้นโดยตรวจสอบจากแรงดันและกระแสจากรีจิสเตอร์ของ STPM33 แล้วบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำแฟลช กรณีที่ไม่เข้าเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อก็จะกลับไปเริ่มต้นลูปใหม่อีกครั้ง

ในส่วนของการ Read Meter จะมีส่วนตรวจสอบข้อมูลในรีจิสเตอร์ของค่าพลังงาน (Energy) ว่าเต็มแล้วหรือไม่ กรณีที่ค่าดังกล่าวเกิดเต็มก็จะทำการรีเซ็ตค่ารีจิสเตอร์ DSP ที่เก็บค่าวัด ด้วย Global Reset เหมือนกับในส่วนของ Init STPM33

### 3.2.4 ฟังก์ชั่น RAK811 sendData

เป็นฟังก์ชั่นในการส่งข้อมูลของ RAK811 โดยจะทำการตรวจสอบสถานะของการเข้าร่วม Network Server ก่อน กรณีที่ยังไม่ได้ทำการเชื่อมต่อก็จะเรียกใช้ Init RAK811 เพื่อทำการเข้าร่วมกับ Network Server ใหม่ กรณีที่เข้าร่วมเรียบร้อยแล้ว ก็จะส่งข้อมูลโดยผ่านคำสั่ง at+send ซึ่งการส่งข้อมูลของ RAK811 ในวิทยานิพนธ์นี้ จะส่งในรูปแบบ Unconfirmed เท่านั้น เนื่องจากการส่งแบบ Confirm จะเป็นการเพิ่มภาระให้กับ Network Server อย่างมาก การเช็คสถานะ (Online) จึงตรวจสอบกรณีการเข้าร่วมกับ Network Server แล้วหรือไม่เท่านั้น โดยตรวจสอบจาก Error ที่เกิดขึ้นทางคำสั่ง at+recv ดังรูปที่ 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 28 การทำงานของฟังก์ชั่น RAK811_sendData()

# บทที่ 4 การพัฒนาอัลกอริธึมและการตั้งค่า LoRaWAN

ในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาระบบจัดการไฟฟ้าดับร่วมกับการใช้อัลกอริธึมสำหรับค้นหาตำแหน่งไฟฟ้าดับและการ Polling ที่จำเป็นต้องมีการกำหนดรูปแบบแทนโครงสร้างของระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการพัฒนาอัลกอริธึม เพื่อบ่งบอกถึงการเชื่อมต่อทางกายภาพที่ถูกต้อง โดยปกติแล้วรูปแบบทางกายภาพของระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่าย (Distribution System) ที่ใช้โดยทั่วไปจะมีรูปแบบเป็นเรเดียล ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดตอนทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือสวิตซ์ใบมีด ซึ่งออกแบบมาโดยมีโครงสร้างแบบการสืบทอดลำดับชั้นและมีการติดตั้งจุดตัดตอนทางระบบไฟฟ้าให้จำกัดขอบเขตของลูกค้าที่จะโดนผลกระทบจากเหตุไฟฟ้าดับให้มีจำนวนน้อยที่สุดและง่ายต่อการหาตำแหน่งเกิดจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้า ซึ่งลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล นี้ สามารถที่จะแสดงออกมาในรูปแบบแผนภูมิต้นไม้ (Tree Topology) ได้เสมอ

ส่วนประกอบสำคัญของระบบจัดการไฟฟ้าดับ (OMS) คือ ความสามารถในการหาตำแหน่งของจุดผิดพร่องเมื่อเกิดปัญหาไฟฟ้าดับขึ้น ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่โครงสร้างทางกายภาพของระบบที่คล้ายกับแผนภูมิใบไม้ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างโหนดหรืออุปกรณ์ต่างๆ โดยเปรียบให้รากของแผนภูมิคือสถานีไฟฟ้าและใบไม้เป็นเสมือนลูกค้า ที่มีการไหลของพลังงานไล่จากรากไปยังใบ ซึ่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบ เรเดียล การที่มีอุปกรณ์ทางไฟฟ้าใดๆ ก็ตามทำงานล้มเหลวของอุปกรณ์ใดก็ตามจะส่งผลลูกค้าที่อยู่ด้านล่างด้วยเสมอ การจะอาศัยข้อมูลจากสวิตซ์หรือฟิวส์ที่ไม่มีการมอนิเตอร์นั้นก็ทำได้ยากเพราะข้อมูลไม่เพียงพอ แต่การทราบข้อมูลที่มาจากลูกค้าโดยตรงถือเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งแต่ก่อนอาจจะใช้การโทรแจ้งเตือนจากลูกค้า (Trouble Call) แต่เนื่องจากปัจจุบันมีการพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ (AMR) ที่มีการส่งข้อมูลจากลูกค้าที่แม่นยำและรวดเร็วขึ้น ทำให้สามารถใช้ข้อมูลเหล่านี้วางแผนและตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับได้อย่างแน่ชัด เช่น การวางแผน Polling เพื่อยืนยันสถานะของอุปกรณ์เภท AMR ในระบบและหาจุดร่วมของลูกค้าที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับเป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์จึงจะนำกระบวนการหาจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ มาร่วมใช้งานกับ AMR เพื่อพัฒนาอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับด้วย LoRaWAN

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**4.1 กระบวนการหาจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ**

4.1.1 กระบวนการขั้นบันได (Escalation Procedure) สำหรับการหาจุดผิดพร่องในระบบไฟฟ้า [8]

กระบวนการขั้นบันไดหรือวิธีการขั้นบันได (Escalation Procedure) เป็นวิธีในการหาจุดร่วมอย่างหนึ่งโดยไล่จากอุปกรณ์หรือโหนดที่อยู่ในขั้นต่ำไล่ไปหาอุปกรณ์หรือโหนดที่อยู่ในขั้นสูงกว่า ซึ่งกระบวนการนี้ตั้งบนข้อสันนิษฐานที่ว่าอุปกรณ์โดยปกติมักจะทำงานล้มเหลวแบบเดี่ยวๆ มากกว่าที่จะมีปัญหาพร้อมๆ กัน จากข้อกำหนดนี้การหาจุดเกิดไฟฟ้าบกพร่องโดยวิธีการขั้นบันไดจึงเป็นวิธีการหนึ่งในการหาจุดร่วมของอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าบกพร่องได้ ในกระบวนการขั้นบันไดแบบพื้นฐาน เมื่อมีลูกค้ารายใดรายหนึ่งภายใต้หม้อแปลงใดหม้อแปลงหนึ่งแจ้งว่าเกิดเหตุไฟฟ้าดับ ก็จะทำการบันทึกเหตุการณ์นั้นและไล่อุปกรณ์ขึ้นไปจนกว่าจะเจออุปกรณ์ที่มีจุดร่วมเดียวกัน ถ้ามีการแจ้งเหตุที่ 2 หลังจากเหตุการณ์แรก โดยลูกค้าแจ้งว่าเกิดเหตุไฟดับโดยอยู่ภายใต้หม้อแปลงเดียวกับเหตุการณ์ก่อนหน้านี้ก็จะถือว่าเป็นเหตุการณ์ไฟดับที่มีสาเหตุร่วมกัน ถ้ามีการแจ้งเหตุไฟดับโดยที่เหตุการณ์แรกยังไม่คลี่คลายภายใต้อุปกรณ์เดียวกันก็ถือว่าเป็นเหตุไฟดับจากเหตุการณ์เดียวกันหมด นั่นทำให้มีข้อเสียที่ว่าอาจจะไม่สามารถแยกเหตุการณ์ไฟดับที่เกิดหลายๆ จุดในบางกรณีได้ แต่เหตุการณ์ไฟดับดังกล่าวอาจสามารถแยกได้โดยวิธีการนำเวลาที่เกิดเหตุจากการแจ้งมาคำนวณเพิ่มเติม หรือกรณีเกิดไฟดับเนื่องจากพายุหนัก ก็อาจจะรวมการแจ้งเตือนทั้งหมดรวมเป็นเหตุการณ์เดียวกันทั้งหมด ปัญหาของการใช้กระบวนการขั้นบันไดในระบบไฟฟ้าสามารถสรุปได้ ดังนี้

4.1.1.1 ความไม่แน่นอนของข้อมูลขาเข้า

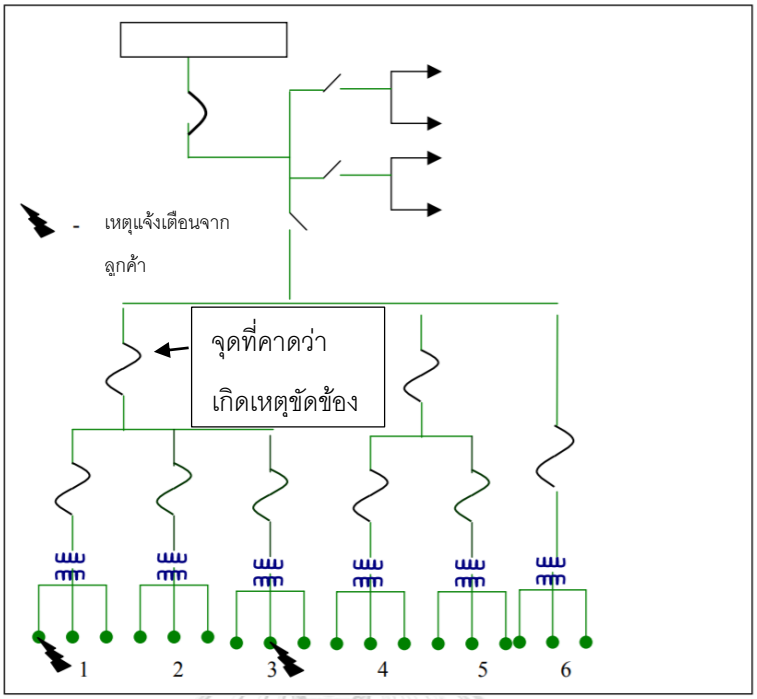
ข้อมูลลำดับหนึ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการคาดการณ์ไฟฟ้าดับคือ การแจ้งเตือนจากลูกค้า (Trouble Call) ที่เกิดไฟฟ้าดับ แต่ในสมัยก่อนการแจ้งเตือนจากลูกค้ามักใช้เวลานานเพราะโดยส่วนมากลูกค้ามักจะรอประมาณ 10-15 นาทีก่อนที่จะโทรแจ้งไปยังผู้ให้บริการ (Utilitie) และอาจมีเพียง 30% ของลูกค้าที่ได้รับผลกระทบจากไฟดับที่จะโทรแจ้งเตือนภายใน 1 ชั่วโมงแรกเท่านั้น รวมถึงจำนวนของลูกค้าที่อยู่ในที่พักอาศัย ณ เวลาที่เกิดเหตุอาจจะมีไม่เพียงพอที่จะเอามาคำนวณได้ด้วย ทำให้อาจมีโอกาสแม้กระทั่งการไม่ได้รับการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับใดๆ เลยจากลูกค้า ทำให้วิธีการแบบขั้นบันไดไม่สามารถนำมาใช้คาดการณ์ตำแหน่งจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร หรือแม้แต่การนำข้อมูลจากระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) ที่ติดตั้งภายในสถานีมาใช้คำนวณและคาดการณ์เหตุไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่ายก็ทำได้อย่างจำกัด เพราะถึงแม้ข้อมูลจะมีความน่าเชื่อถือสูงแต่ข้อมูลที่มีจะอยู่แค่ส่วนของรากของ

แผนภูมิต้นไม้เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ข้อมูลจากลูกค้าโดยตรงที่มีความน่าเชื่อถือสูงจึงเป็นส่วนสำคัญในการแก้ไขปัญหานี้ ด้วยปัจจุบันที่มีระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ (AMR) ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในการทำหน้าแทนการแจ้งเตือนจากลูกค้าดังกล่าว ด้วยข้อมูลค่าวัดที่มีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถให้ข้อมูลแก่ผู้ให้บริการได้แทบตลอดเวลา และสามารถสอบถามข้อมูลหรือทำการ Polling เพื่อยืนยันสภาพ (Confirmation) ของไฟฟ้าดับได้

4.1.1.2 ปัญหา Over Escalation

ในเหตุการณ์ที่มีการเกิดเหตุไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายเกิดขึ้นพร้อมกันหลายจุด เช่น พายุ หรือความร้อนที่ส่งผลต่อหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น การได้รับแจ้งเตือนจากลูกค้าจากสายป้อนเดียวกันโดยวิธีปกติก็จะทำการไล่ย้อนหาอุปกรณ์ที่จุดร่วมจุดเดียวกัน แต่กรณีที่เกิดเหตุไฟดับหลายจุดจากลูกค้าพร้อมๆ กัน ทางผู้ให้บริการ (Utilitie) อาจจำเป็นต้องตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอุปกรณ์ที่อยู่ด้านล่างเกือบทั้งหมดเพื่อหาจุดที่ผิดพร่องที่เกิดขึ้นแท้จริง ดังในรูปที่ 29 ที่มีการรับแจ้งเหตุไฟดับที่ตำแหน่งที่ 1 และ 3 ถ้าใช้วิธีขั้นบันได Escalation ตามปกติก็จะได้จุดร่วมของอุปกรณ์ที่เกิดปัญหาคือ ตำแหน่ง Fuse ที่อยู่ด้านบน ซึ่งในเหตุการณ์จริงอาจเป็นปัญหาจากหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเกิดเหตุไฟดับจากลูกค้าที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกันก็ได้ เพราะฉะนั้นการยืนยันสถานะของอุปกรณ์และข้อมูลของอุปกรณ์ที่แท้จริงจากส่วนของอุปกรณ์ด้านล่างหรือใบของแผนผังต้นไม้ จึงมีส่วนสำคัญในการหาจุดผิดพร่องของการเกิดไฟดับที่แท้จริงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 29 ตัวอย่างวิธีการขั้นบันได

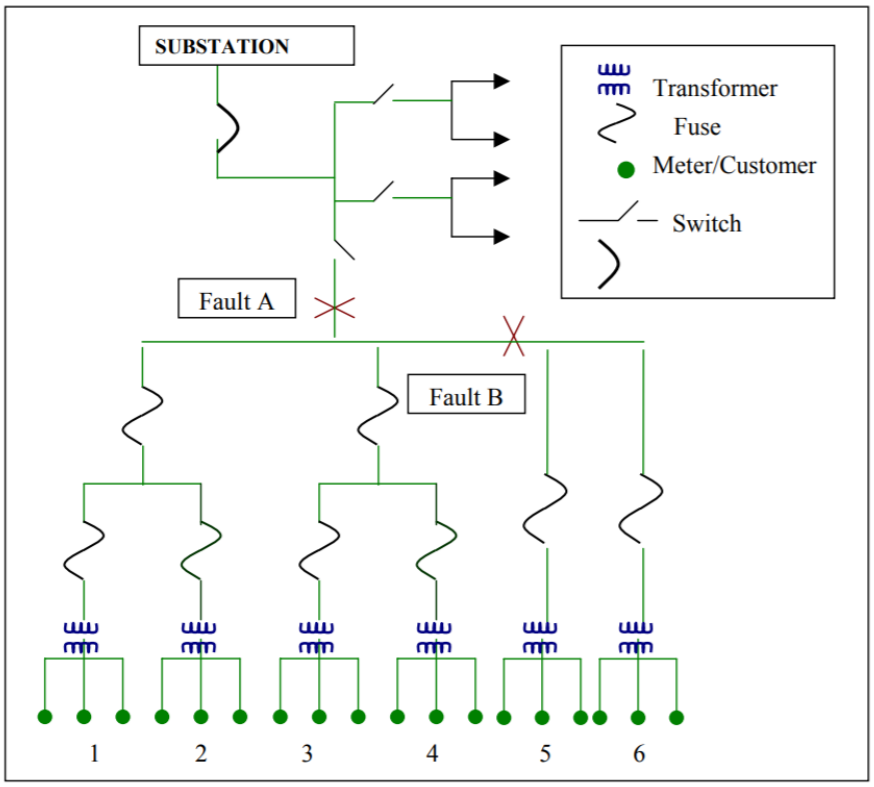
4.1.1.3 ปัญหาการเกิดไฟดับแบบอนุกรม (Cascading Outage)

การหาตำแหน่งที่เกิดจุดผิดพร่องที่แท้จริงในเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถือเป็นเรื่องท้าทายอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในเหตุการณ์ที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับในหลายๆ จุดพร้อมกัน เช่น เวลามีพายุเข้า ทำให้มีความซับซ้อนในการหามากยิ่งขึ้นซึ่งในบางสถานการณ์อาจเกิดเหตุการไฟฟ้าดับแบบอนุกรมระบบไฟฟ้า (Series Outages) เป็นเหตุการณ์เกิดไฟฟ้าดับแบบต่อเนื่องที่ไม่สามารถทำการหาจุดผิดพร่องที่แม่นยำจากวิธีการปกติได้ ซึ่งมี 2 เหตุการณ์เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน แต่ด้วยวิธีปกติจะสามารถหาตำแหน่งจุดผิดพร่องได้เพียงจุดเดียวเท่านั้น

กรณีที่ 1: สมมติว่าได้รับแจ้งเตือนเหตุไฟฟ้าดับจากลูกค้า (Trouble Call) ภายใต้หม้อแปลง 5 และ 6 เท่านั้น ซึ่งวิธีหาแบบขั้นบันไดตามปกติจะหาจุดผิดพร่องได้เพียงจุด B เพียงอย่างเดียวละไม่สามารถหาตำแหน่งผิดพร่องที่จุด A ได้

กรณีที่ 2: สมมติว่าได้รับแจ้งเตือนเหตุไฟฟ้าดับจากลูกค้าภายใต้หม้อแปลงทุกๆ ตัว ใช้วิธีการหาไฟฟ้าดับด้วยวิธีการขั้นบันไดตามปกติ ก็จะหาจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A ได้ และเมื่อจุดผิดพร่องที่ตำแหน่ง A ถูกซ่อมแซม ถ้าไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถแจ้งสถานะของลูกค้าเมื่อระบบไฟฟ้ากลับมาปกติ จุดผิดพร่องที่ตำแหน่ง B ก็จะถูกมองข้ามไปเพราะถือว่าได้ซ่อมแซมจุดผิดพร่องไปแล้ว ทั้งๆ ที่

ลูกค้าภายใต้ตำแหน่ง B ยังมีไฟฟ้าดับอยู่ ดังรูปที่ 30




รูปที่ 30 ปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับแบบอนุกรม

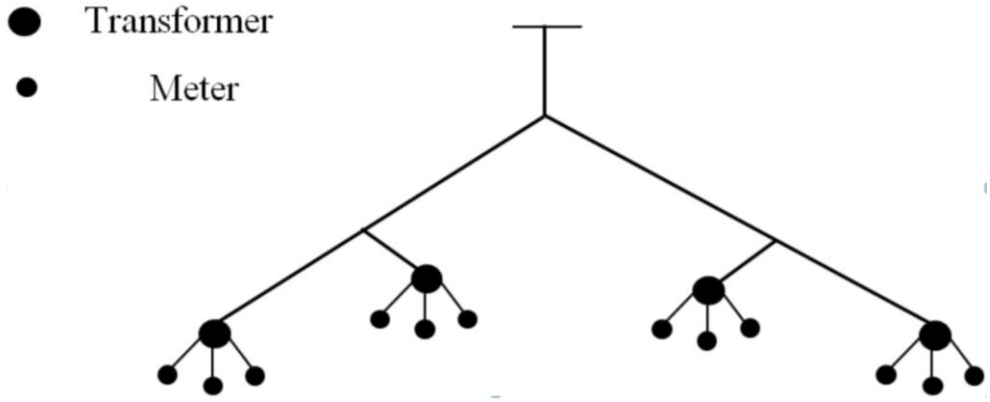
ซึ่งในระหว่างเกิดเหตุการณ์เหล่าระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติจะเป็นส่วนสำคัญในการช่วยหาจุดผิดพร่องทั้งหมดเนื่องจากความสามารถในการ Poll ที่จะยืนยันสภาพการทำงานของระบบไฟฟ้าของลูกค้าแต่ละราย หรือความสามารถในการแจ้งเตือนการกลับมาของระบบไฟฟ้า (Restoration) เพื่อยืนยันการแก้ไขปัญหาทั้งหมดว่าครบถ้วนหรือไม่

4.1.2 อัลกอริธึม Polling ในระบบไฟฟ้าดับ

วิธีการ Polling เป็นวิธีการหนึ่งของผู้ให้บริการ (Utilities) ในการทราบค่าสถานะของอุปกรณ์ทุกเวลาที่ต้องการ แต่ในบางสถานการณ์ ผู้ให้บริการไม่สามารถทำการ Polling จากอุปกรณ์ทั้งหมดพร้อมๆ กันได้ ไม่ว่าจะเป็นเพราะความสามารถของอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัด AMR ที่ไม่รองรับ ข้อจำกัดทางด้านโครงข่ายการสื่อสาร หรือการที่ AMR มีความสามารถสื่อสารไปได้แค่ทิศทางเดียว เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนา Polling Algorithm [9] เพื่อใช้ความสามารถในการอ่านค่าตามความต้องการของอุปกรณ์เพื่อแก้ไขปัญหาไฟฟ้าบกพร่องเพื่อยืนยันการกลับมาของระบบไฟฟ้า ซึ่งวิธีการนี้ก็ใช้ลักษณะทางกายภาพของระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายที่เป็นรูปแบบแผนผังต้นไม้ในการคาดการณ์สถานะของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

เช่นเดียวกับวิธีการขั้นบันได แต่วิธีนี้ผู้ให้บริการ (Utilities) สามารถใช้วิธีการ Poll ในส่วนที่เกิดปัญหาของระบบจำหน่ายที่อุปกรณ์ที่สามารถให้ข้อมูลได้มากที่สุดสำหรับเหตุการณ์นั้นๆ เพื่อคาดการณ์การเกิดตำแหน่งเกิดไฟฟ้าดับแบบต่อเนื่อง (Cascading Outages) ถ้ามีจุดผิดพร่องในระบบไฟฟ้าภายใต้เหตุการณ์แรก ก็จะสามารถ Poll ที่อุปกรณ์เพื่อหาลูกค้าที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับได้ แต่เนื่องจากวิธีการนี้อาจใช้เวลาและไม่สามารถ Poll ไปที่ทุกอุปกรณ์ได้ทั้งหมด จึงควรที่จะมีข้อจำกัดบางส่วนที่เพียงพอแค่ยืนยันว่ามีไฟฟ้าดับเกิดขึ้นจริงเท่านั้น อาจจะอาศัยจำนวนของมิเตอร์ หรือเวลาเป็นตัวกำหนด ขึ้นกับผู้ให้บริการนั้นๆ ว่าจะกำหนดเท่าไร

จุดประสงค์หลักสำหรับอัลกอริธึม Polling นี้จะเป็นการใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการใช้การเชื่อมต่อแบบวนลูป โดยอาศัยแผนภูมิแบบต้นไม้ โดยแต่ละโหนดจะแสดงถึงอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือตัวอ่านมิเตอร์อัตโนมัติ ซึ่งบางระบบอาจปรับใช้งานได้ตามความเหมาะสม ดังรูปที่ 31




รูปที่ 31 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแผนภูมิต้นไม้

ซึ่งการใช้งานอัลกอริธึมนี้จำเป็นต้องกำหนดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ และตำแหน่งของโหนดให้ชัดเจนเพื่อความถูกต้องและประสิทธิภาพในการ Poll เพื่อให้ได้รับข้อมูลที่เหมาะสม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่ หมายเลขที่บ่งบอกลักษณะของเครื่องมือวัดแต่ละตัว (MID) รูปแบบการเชื่อมต่อ หมายเลขที่บ่งบอกลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า (TrID) และอัตราความสำเร็จของการส่งข้อความ (Packet Success Rate หรือ PSR) เป็นต้น ซึ่งค่า PSR นี้จำเป็นในการจำแนกประสิทธิภาพของมิเตอร์แต่ละตัว นำมาวิเคราะห์ร่วมกับจำนวนการเชื่อมต่อถึงอุปกรณ์ที่มีปัญหานั้นๆ (link) เมื่อเหตุการณ์ไฟฟ้าดับได้มีการแก้ไขจากผู้ให้บริการ (Utilities) แล้ว ก็จะสามารถใช้ข้อมูลอ้างอิงจากตำแหน่งที่เกิดไฟฟ้าดับเพื่อทราบข้อมูลทั้งหมดของมิเตอร์ที่อยู่ภายใต้จุดบกพร่องนั้นได้ และค่า PSR นี้ก็สามารถใช้เพื่อ

คำนวณมิเตอร์ที่ถูก Poll เพื่อคาดการณ์สถานะของระบบไฟฟ้าโดยรวมทั้งหมดและยืนยันการกลับมาของระบบไฟฟ้าได้

**4.2 อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับด้วย LoRaWAN**

ในการพัฒนาระบบจัดการไฟฟ้าในวิทายานิพนธ์นี้ จะประยุกต์นำวิธีการตรวจสอบไฟฟ้าดับโดยใช้วิธีการขั้นบันได ร่วมกับการใช้ Polling ในการตรวจสอบสภาพการทำงานของ เนื่องจาก LoRaWAN มีข้อจำกัดเนื่องจากลักษณะโครงข่ายและข้อจำกัดทางกายภาพของอุปกรณ์ โดยเฉพาะข้อความ Downlink ที่ใช้ในการ Poll ทำให้อุปกรณ์ประเภท AMR จะต้องถูก Poll เฉพาะเมื่อเวลาที่ต้องการจริงๆ เท่านั้น ในระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายที่ลักษณะทางกายภาพแบบแผนภูมิต้นไม้ การเกิดข้อผิดพร่องเพียงส่วนเดียวในระบบไฟฟ้าจะส่งผลต่ออุปกรณ์ที่อยู่เบื้องล่างของอุปกรณ์นั้นทั้งหมด ในมุมกลับกันการไล่อุปกรณ์ที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับจากอุปกรณ์ด้านล่างก็สามารถหาจุดที่เกิดข้อผิดพร่องได้เช่นกัน ซึ่งก็คือหลักการของวิธีการขั้นบันได ที่ใช้สำหรับหาจุดร่วมของตำแหน่งที่เกิดไฟฟ้าดับได้ แต่ทั้งนี้ในการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ผิดพร่องดังกล่าวจะทำการไล่ขึ้นไปทีละขั้นโดยเน้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งต่างจากวิธีการขั้นบันไดที่จะหาจุดต้นสุดของอุปกรณ์ร่วมเท่านั้น โดยวิธีการนี้จะใช้ร่วมกับความสามารถ “Last Gasp” ของ AMR ที่สามารถส่งสัญญาณเป็นครั้งสุดท้ายเมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับเพื่อแจ้งเตือนแก่ผู้ให้บริการ (Utilities) โดยลดการ Poll ของอุปกรณ์โดยที่ไม่จำเป็นได้

4.2.1 การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับของ AMR (Outage Notification) [10]

โดยปกติการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับจากลูกค้าจะใช้วิธีการโทรแจ้งเตือนจากลูกค้า (Trouble Call) เป็นหลัก ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่แน่นอนและมีความน่าเชื่อถือต่ำ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น ทำให้จึงสมควรมีการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับในรูปแบบอื่นที่มีความน่าเชื่อถือสูงมาส่งการแจ้งเตือนไฟดับนี้แทน ด้วยคุณสมบัติของมิเตอร์ไฟฟ้า AMR ที่มีระบบ Last gasp ซึ่งเมื่อมีมิเตอร์ตัวใดรับรู้ว่าเกิดไฟดับ ก็จะส่งข้อมูลเป็นครั้งสุดท้ายให้แก่ผู้ให้บริการ (Utilities) ก่อนจะปิดการทำงานไป วิธีนี้นอกจากจะรู้ว่ามิเตอร์ไฟฟ้าตัวใดที่เกิดไฟฟ้าดับแล้ว ศูนย์ควบคุมยังได้ข้อมูลที่สำคัญต่างๆ เช่น Time Stamp, ลักษณะการใช้ไฟก่อนดับ เป็นต้น เพื่อมาวิเคราะห์หาสาเหตุได้ ซึ่งวิธีการนี้จะนำมาใช้แทนการแจ้งเตือนจากลูกค้า (Trouble call) ที่ไม่มีความแน่นอนและความเชื่อถือต่ำได้

การจะใช้งานความสามารถ Last Gasp นี้ได้ จำเป็นต้องออกแบบให้มิเตอร์มีคุณสมบัติในการสำรองไฟเพื่อเอามาใช้งานชั่วคราวเมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับ เพราะแหล่งจ่ายไฟปกติของ AMR จะเอามาจากแหล่งเดียวกันกับที่จ่ายไฟให้กับลูกค้า โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ Super Capacitor มาใช้งานในการจ่ายไฟสำรอง เนื่องจากมีระยะการใช้งานที่ค่อนข้างนาน และการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับของ AMR ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการทำงานหลังไฟดับที่ยาวนาน เพราะหน้าที่หลักของระบบสำรองไฟนี้มีเพื่อให้เพียงพอต่อการส่งข้อความ Last

Gasp เป็นครั้งสุดท้ายได้เท่านั้น อาจจะประมาณ 1-2 นาทีก็เพียงพอต่อการส่งข้อมูลแล้ว ซึ่งรายละเอียดของ AMR และระบบ Last Gasp ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นเรียบร้อยแล้ว

แต่ในการใช้การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับจาก AMR โดยวิธีนี้อาจไม่สามารถได้รับการแจ้งเตือนจากอุปกรณ์ที่มีเหตุไฟฟ้าดับได้ทั้งหมดอยู่ดี เนื่องจากโครงสร้างและข้อจำกัดของ LoRaWAN หรือ อุปกรณ์บางตัวเองอาจมี PSR ที่ต่ำและเนื่องจากการส่งข้อมูลแบบมีการตอบกลับ (Confirmation) ของ LoRaWAN มีข้อจำกัดจากข้อระเบียบของโครงข่ายเอง (LoRaWAN Specification) เพราะการตอบกลับจาก Network Server เองถือเป็นการใช้ Bandwidth ของการตอบกลับ Downlink จาก Network Server ซึ่งส่งผลต่อ Traffic ของโครงข่าย ทำให้ไม่สามารถใช้งานการตอบกลับแก่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นการใช้ข้อมูลร่วมกับการแจ้งเตือนจากลูกค้าก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการรับแจ้งเหตุไฟฟ้าดับของระบบจัดการไฟฟ้าดับได้ ซึ่งถึงแม้ในกระบวนการหาตำแหน่งไฟฟ้าดับถึงแม้จะไม่ได้รับข้อมูลทั้งหมดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกตัว ก็ยังสามารถหาจุดผิดพร่องจากข้อมูลเท่าที่มีได้ก็ตาม

4.2.2 การยืนยันอุปกรณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ (Outage Confirmation)

เมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับและได้รับการแจ้งเตือนจากอุปกรณ์ AMR ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธี Last Gasp แล้ว การยืนยันสถานะโดยรวมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าถือเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้าเช่นกัน เพราะเป็นการยืนยันถึงจำนวนที่แท้จริงของอุปกรณ์ AMR ที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับจริงๆ เพื่อเอามาคาดการณ์ตำแหน่งผิดพร่องที่เป็นจริงได้ โดยวิธีทั่วไปที่จะใช้คือการที่ผู้ให้บริการ (Utilitie) จะใช้วิธีการ Poll อุปกรณ์ AMR ที่แจ้งเตือนและอุปกรณ์ AMR ข้างเคียงภายใต้หม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อไฟฟ้าอันเดียวกัน เพื่อยืนยันขอบเขตการเกิดเหตุไฟฟ้าดับที่แท้จริง แต่ในโครงข่ายสื่อสาร LoRaWAN การจะยืนยันอุปกรณ์ทุกตัวที่แจ้งเหตุไฟฟ้าดับนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการส่ง Downlink ของโครงข่ายที่กล่าวไว้ข้างต้น การ Poll จึงต้องอาศัยการข้อกำหนดบางอย่างที่จะเลือกว่าอุปกรณ์ตัวใดบ้างที่สมควร Poll เพื่อตรวจสถานะแล้วได้ข้อมูลที่สำคัญมากที่สุด

4.2.2.1 Packet Successful Rate (PSR)

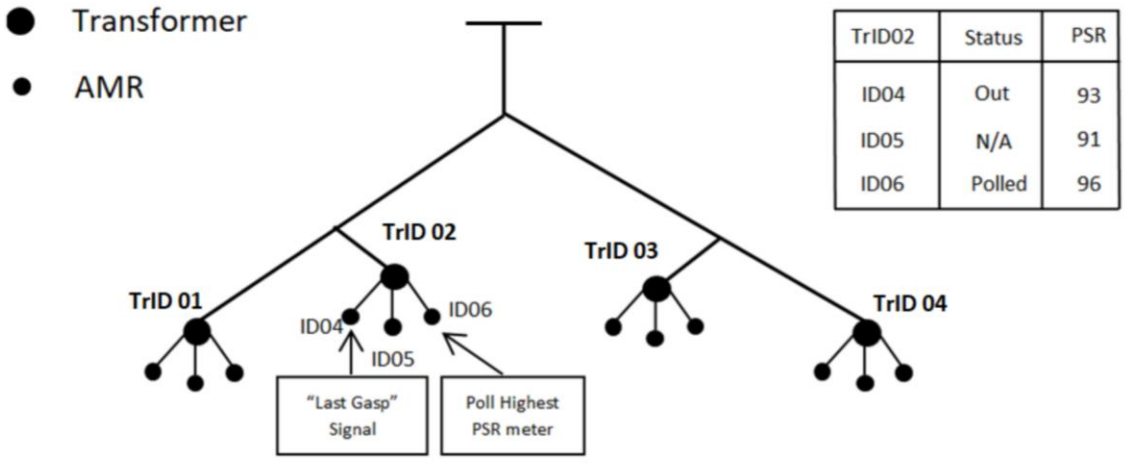
อัตราความสำเร็จของการส่งข้อความ (PSR) [9] ถือเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างหนึ่งในการบอกถึงประสิทธิภาพหรือความสามารถในส่งข้อความของ AMR นั้นๆ ในการ Poll จึงสมควรเลือกอุปกรณ์ที่มีค่า PSR มากที่สุดของ AMR ที่อยู่ภายใต้หม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อในระดับเดียวกัน โดยค่า PSR ใน LoRaWAN สามารถ

คำนวณได้จาก Frame Counter (FCnt) ภายใต้ MAC Payload ของ LoRaWAN ซึ่งข้อมูลนี้สามารถดึงข้อมูลมาได้จาก Network Server ตามรูปที่ 32


```
"DevEUI_uplink": {
    "Time": "2019-10-29T10:45:03.126+07:00",
    "DevEUI": [redacted]
    "DevAddr": [redacted]
    "FPort": "1",
    "FCntUp": "3",
    "ADRbit": "1",
    "MType": "2",
    "FCntDn": "3",
    "payload_hex": "10300010f0ffffffcb20f0fffffffff0",
    "mic_hex": "21f66f08",
    "Lrcid": "00000231",
    "LrrRSSI": "-116.000000",
    "LrrSNR": "1.000000",
```


รูปที่ 32 ข้อมูล Uplink ของอุปกรณ์ AMR

ซึ่งจะแยกทั้ง FCntUP และ Down ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ MAC Massage Format ข้างต้น ค่าเหล่านี้จะนำมาเก็บข้อมูลไว้ในฐานข้อมูล (Database) และเอามาคำนวณค่า PSR ที่แท้จริงของอุปกรณ์ที่มีการอัพเดทค่าทุกครั้งที่มีการส่งข้อความได้ ดังรูปที่ 33




รูปที่ 33 ตัวอย่างการ Poll เพื่อยืนยันสถานะ

4.2.2.2 การ Poll อุปกรณ์และประเภทของไฟฟ้าดับ (Poll Selective and Outage Types)

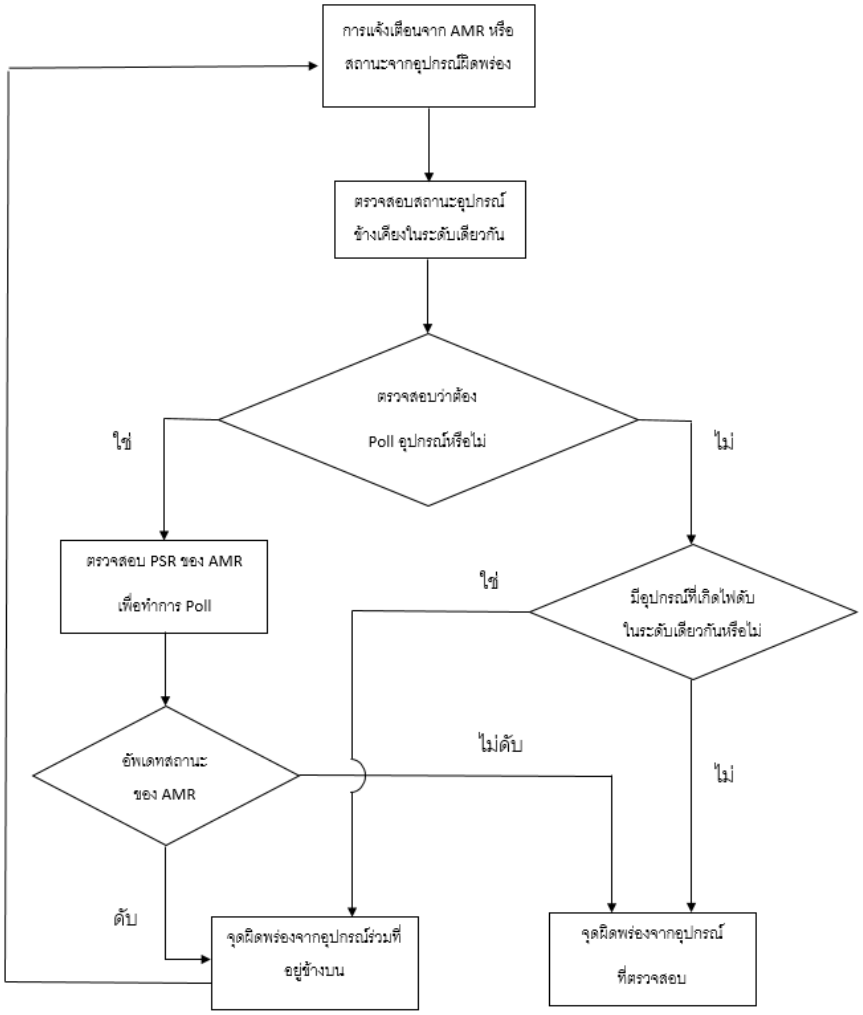
ในการเลือกอุปกรณ์ AMR ที่จะ Poll นั้นเป็นจะเป็นการ Poll เพื่อแยกประเภทของการเกิดไฟฟ้าดับของลูกค้า โดยมี 2 กรณีหลักได้แก่ การเกิดไฟฟ้าดับเพียงรายเดียว หรือการเกิดไฟฟ้าดับจากเหตุบกพร่องของหม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อร่วมกัน

การเกิดไฟฟ้าดับของลูกค้าเพียงรายเดียวจะเป็นการเกิดไฟฟ้าดับโดยมีสาเหตุมาจากลูกค้าเอง ไม่ว่าจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ลูกค้าใช้งาน หรือการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรภายในบ้านเอง การยืนยันรูปแบบไฟฟ้าดับนี้สามารถยืนยันได้จากการ Poll อุปกรณ์ข้างเคียงที่อยู่ภายใต้หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ตัดต่อเดียวกัน โดยสามารถเลือกได้จากอุปกรณ์ที่มีค่า PSR สูงสุด กรณีที่อุปกรณ์ที่ถูก Poll นั้นส่งสัญญาณมาว่ายังทำงานได้ตามปกติก็จะถือว่าไฟฟ้าดับจากลูกค้าดังกล่าวเป็นการดับของลูกค้าเพียงรายเดียว แต่ในกรณีที่ AMR ที่ ถูก Poll นั้นไม่ได้รับการตอบกลับหรือส่งสัญญาณว่าไฟฟ้าดับก็จะเป็นการบ่งบอกว่าเป็นการเกิดไฟฟ้าดับจากเหตุบกพร่องของหม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อร่วมกัน

ในกรณีที่อุปกรณ์ AMR มีการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับมากกว่า 1 อุปกรณ์ภายใต้หม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อในระดับเดียวกันก็จะถือว่าเป็นการบ่งบอกว่าเป็นการเกิดไฟฟ้าดับจากเหตุบกพร่องของหม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อร่วมกันโดยทันที แต่ทั้งนี้จะตั้งอยู่ในข้อสันนิษฐานที่ว่าโอกาสที่จะเกิดไฟฟ้าดับเพียงรายเดียวมีโอกาสเกิดได้ต่ำกว่าการเกิดไฟฟ้าดับจากเหตุบกพร่องของหม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อร่วมกัน เพราะนั่นจะทำให้การที่เกิดไฟฟ้าดับเพียงรายเดียวภายใต้อุปกรณ์หม้อแปลงเดียวกันมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.3 การวิเคราะห์ไฟฟ้าดับ

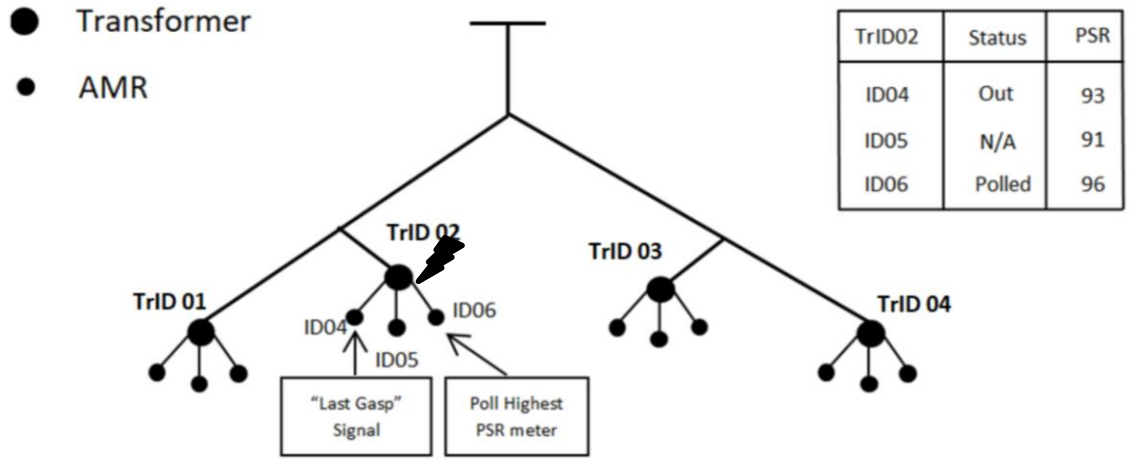



รูปที่ 34 ขั้นตอนของอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการวิเคราะห์ขอบเขตและสาเหตุการเกิดไฟฟ้าดับ จะสามารถใช้วิธีลำดับขั้นบันได เพื่อไล่หาจุดบกพร่องจากอุปกรณ์ AMR ด้านล่างได้ โดยทำหลังจากได้การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับจาก AMR และการยืนยันประเภทของการเกิดไฟฟ้าดับ จากภาพที่ 39 ทุกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจะมีการกำหนดหมายเลขจำแนกของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ได้แก่ หมายเลขมิเตอร์ (MID) หมายเลขหม้อแปลง (TrID) และโหนดต่างๆ ที่อาจหมายถึงอุปกรณ์อื่นในระบบไฟฟ้าให้ครบถ้วน อัลกอริธึมจะอาศัยวิธีลำดับขั้นบันไดในการหาจุดผิดพร่อง โดยจะเริ่มจากส่วนของใบหรือ AMR ก่อนเสมอว่ามีอุปกรณ์ใดเกิดเหตุไฟฟ้าดับ และตรวจสอบดูว่ามีอุปกรณ์ใดๆ ที่อยู่ระดับเดียวกันภายใต้โหนดหรืออุปกรณ์ตัดต่อเดียวกันมีเหตุไฟฟ้าดับหรือไม่ นั่นก็เพื่อหาจุดร่วมกันของอุปกรณ์ที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับซึ่งอุปกรณ์นั้นเองคืออุปกรณ์ที่เกิดเหตุผิดพร่องในระบบไฟฟ้า แต่ในกรณีที่เมื่อไล่ขึ้นไปยังมีอุปกรณ์ข้างเคียงในระดับเดียวกันภายใต้

โหนดหรืออุปกรณ์ตัดต่อร่วมกันยังมีเหตุไฟฟ้าดับอยู่ ก็จะไล่ขึ้นอุปกรณ์ขึ้นไปจนจะหยุดเมื่อไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่มีเหตุผิดพร่องในระบบไฟฟ้าที่อยู่ในระดับเดียวกันภายใต้อุปกรณ์ตัดต่อหรือโหนดเดียวกันได้แล้วเท่านั้น




รูปที่ 35 ตัวอย่างการเกิดไฟฟ้าดับ

จากภาพที่ 35 เกิดเหตุไฟดับที่หม้อแปลงหมายเลข 2 (TrID 2) สมมติให้มีการได้รับแจ้งเตือน ไฟฟ้าดับ Last Gasp จากอุปกรณ์ AMR หมายเลข 4 (MID 4) หม้อแปลง TrID 2 จึงเป็นอุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบว่าเป็นจุดบกพร่องหรือไม่ ภายใต้หม้อแปลง TrID 2 เองก็มีมิเตอร์ข้างเคียงโดย AMR หมายเลข 6 (MID 6) เป็นอุปกรณ์ AMR ที่มี PSR สูงที่สุดก็จะถูก Poll เพื่อตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ กรณีที่ได้รับการตอบกลับจากอุปกรณ์ว่ามีไฟฟ้าดับที่ AMR หมายเลข 6 (MID 6) นี้หรือว่าไม่มีการตอบกลับภายในระยะเวลาที่กำหนดก็จะถือว่าอุปกรณ์นี้เกิดเหตุไฟฟ้าดับ ก็จะยืนยันได้ว่าอุปกรณ์ที่มีเกิดเหตุผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าคืออุปกรณ์ที่ AMR หมายเลข 4 และ หมายเลข 6 (MID 4 และ MID 6) มีจุดเชื่อมต่อร่วมกันซึ่งก็คือหม้อแปลงหมายเลข 2 (TrID 2) นั่นเอง แต่ในตัวอย่างนี้เกิดได้รับการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับจาก AMR หมายเลข 6 หรือ 5 จาก Last Gasp โดยอัตโนมัติก็จะยืนยันได้ว่าอุปกรณ์ที่มีเกิดเหตุผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าคืออุปกรณ์หม้อแปลงหมายเลข 2 (TrID 2) ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการ Poll ใดๆ

ในความเป็นจริงในกรณีเกิดเหตุไฟฟ้าดับจากเหตุบกพร่องของหม้อแปลงหรืออุปกรณ์ตัดต่อ มีโอกาสที่จะใช้การ Poll ค่อนข้างน้อย เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานการณ์จริงมีจำนวนที่มาก ดังนั้นเหตุการณ์ที่จะมีเพียงอุปกรณ์เดียวที่จะแจ้งเหตุไฟฟ้าดับได้นั้นมีโอกาสที่น้อยมากๆ จากอัลกอริธึมนี้ ขอเพียงแค่มีการแจ้งเหตุไฟฟ้าดับภายใต้อุปกรณ์ร่วมกัน

เพียงตัวเดียวก็เพียงพอต่อการยืนยันจุดบกพร่องในระบบไฟฟ้านี้แล้ว เพราะฉะนั้นการ Poll จึงเป็นการยืนยันว่าเกิดเหตุไฟฟ้าดับแบบเพียงรายเดียวเท่านั้น

4.2.4 Outage Restoration

เมื่อแก้ไขเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหรือจุดผิดพร่องของระบบไฟฟ้าทั้งหมดเสร็จสิ้น จำเป็นต้องมีการยืนยันเพื่อให้ทราบได้ว่าเหตุการณ์ทั้งหมดได้คลี่คลายแล้ว การส่งข้อมูลยืนยันจากอุปกรณ์ AMR จึงเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่ง โดยอาจสามารถแบ่งข้อมูลที่ใช้สำหรับการยืนยันการกลับมาของระบบไฟฟ้าได้เป็นหัวข้อ ดังนี้

- Power on Massage โดยอาศัยความสามารถของ AMR ที่จะทำงานเมื่ออุปกรณ์มีไฟเลี้ยงกลับมา ซึ่งใช้แจ้งเตือนแก่ผู้ให้บริการว่าอุปกรณ์หรือสภาพการทำงานได้กลับมาทำงานตามปกติแล้ว
- Daily Massage เป็นการส่งข้อมูลตามรอบของ AMR ตามที่กำหนด โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดไว้ที่ทุกๆ 15 นาที ซึ่งข้อความประเภทนี้จะใช้สำหรับการยืนยันการกลับมาของอุปกรณ์ก็ต่อเมื่อ Power on Massage ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งการใช้ข้อความนี้จะมีข้อเสียที่ต้องรอเวลาตามรอบกำหนดของ AMR ทำให้ไม่สามารถทราบสถานะของ AMR เพื่อตรวจสอบทันทีได้
- Poll Massage กรณีที่ ไม่สามารถได้รับข้อความจากทั้ง Power on และ On Basis Massage ได้ ผู้ให้บริการ (Utilities) หรือผู้สั่งการสามารถเลือกที่จะ Poll เพื่อตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ด้วยตัวเองได้ แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของ LoRaWAN ทำให้ไม่สามารถใช้ Downlink กับ AMR ทุกตัวได้ จึงต้องเลือกอุปกรณ์เท่าที่จำเป็นโดยอ้างอิงจาก PSR เป็นหลัก

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าดับโดยใช้อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับดังกล่าวจะเป็นการแก้ปัญหาของวิธีการขั้นบันได ที่มีปัญหาในการตรวจสอบเหตุการณ์ไฟฟ้าดับรูปแบบ Over Escalation เนื่องจากอัลกอริธึมนี้จะมุ่งเน้นการวิเคราะห์การเกิดไฟฟ้าดับที่หม้อแปลงเป็นหลัก และอาศัยความน่าเชื่อถือของข้อมูลจาก AMR ที่สามารถส่งข้อมูลเพื่อแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของลูกค้าแต่ละรายได้ และการใช้งาน AMR ที่มีระบบแจ้งเตือนทั้งตอนเริ่มทำงานและตอนเกิดไฟดับ ก็สามารถการแก้ไขปัญหาการเกิดไฟฟ้าดับแบบอนุกรม เพราะสามารถตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ที่แท้จริงได้เมื่อเข้าสู่ขั้นตอน Outage Restoration กรณีที่ยังมีอุปกรณ์บางตัวที่ยังเกิดไฟฟ้าดับอยู่ก็ยังสามารถตรวจสอบเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงได้

## 4.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ LoRaWAN ในย่านความถี่ AS923 ISM BAND [1], [2]

4.4.1 ค่า Data Rate (ADR), Adaptive Data Rate (ADR)

การสื่อสาร LoRaWAN ระหว่างอุปกรณ์ End Device และ เกตเวย์ จะมีรูปแบบการแจกจ่ายข้อมูลไปยังช่องสัญญาณความถี่และอัตราเร็วของการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งในย่านความถี่ AS923 จะอนุญาตให้ใช้อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Data Rate, DR) 0-7 ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อข้างต้น การเลือกใช้งาน DR ของ LoRaWAN ในการส่งข้อมูลสมควรเลือกให้เหมาะกับการใช้งานซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะการใช้ DR แต่ละระดับจะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อดี-ข้อเสียระหว่างความเร็วในการส่งข้อมูลและระยะในการส่ง และการส่งข้อมูลโดยใช้ DR ที่แตกต่างกันก็จะไม่แทรกแซงซึ่งกันและกัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเลือก DR ที่สูงๆ ความเร็วในการส่งข้อมูลก็จะสูงตาม แต่แลกกับระยะทางที่ส่งข้อมูลได้จะลดลง ทำให้การเลือก DR ของอุปกรณ์ End Device ต้องควรเลือกให้อัตราเร็วในการส่ง ขนาด Payload และระยะทางในการส่งให้สัมพันธ์กัน นอกจากนี้โครงข่าย LoRaWAN ยังมีการปรับปรุง DR ของแต่ละอุปกรณ์ End Device โดยสั่งจาก Network Server ได้ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า Adaptive Data Rate (ADR) ซึ่งใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบโครงข่ายได้ด้วยตนเอง

สำหรับอุปกรณ์ AMR ที่มีการส่งข้อมูลวัด หรือ Load Profile ตามคาบเวลาที่กำหนด ข้อมูลที่ต้องส่งอาจจะมีขนาดใหญ่ (100-200 ไบท์) ทำให้ไม่สามารถใช้ DR ที่มีค่าต่ำ ๆ ได้ ดังตารางที่ 13 จะเห็นว่าค่า DR ที่รองรับสำหรับ Payload ขนาดใหญ่โดยมี Dwell time ไม่เกิน 400 ms จะอยู่ที่ DR 4-7 แต่สำหรับ DR 6-7 จะไว้ใช้สำหรับสำรองหรือใช้เป็นตัวเลือกในบางกรณีเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถใช้งานโดยปกติได้ นอกจากนี้การจะเลือกว่าแต่ละอุปกรณ์ควรใช้ DR ไหนยังต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ End Device และเกตเวย์ โดยอุปกรณ์ที่อยู่ในระยะไกลกว่าก็สมควรใช้ DR ที่ต่ำกว่าและสมควรเฉลี่ยการใช้งานอุปกรณ์แต่ละ DR เหมาะสม

4.4.2 Duty Cycle และ Time on Air

เนื่องจาก LoRaWAN เป็นการใช้งานในย่านความถี่ที่เป็น unlicensed band ดังนั้นโครงข่าย LoRaWAN จึงต้องมีข้อกำหนดบางอย่างเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้โครงข่ายมีความหนาแน่นมากเกินไป (Network Congestion) จึงมีการกำหนดค่าของ Duty Cycle ขึ้น โดยแต่ละอุปกรณ์ในความถี่ AS923 จะให้มี Duty Cycle ไม่เกิน 1% ซึ่งนั่นหมายถึงอุปกรณ์แต่ละตัวมีเวลาที่ใช้ในการส่งสูงสุดไม่เกิน 36 วินาทีต่อชั่วโมง โครงข่ายที่ให้บริการ Network Server ได้ตั้งข้อกำหนดไม่ให้ทำการส่งข้อความที่ถี่จนเกินไป เพื่อให้แต่ละอุปกรณ์ End

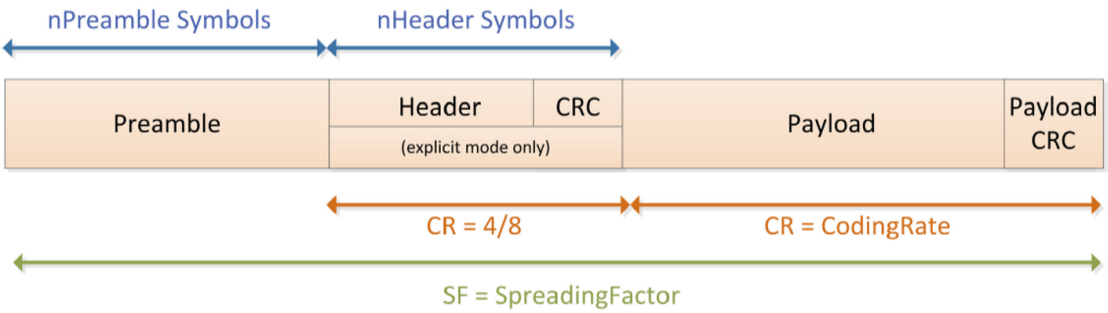
Device แต่ละตัวสามารถใช้งานคลื่นความถี่นั้นๆ ได้อย่างเท่าเทียมกัน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

กำหนดตัวแปร Tsym คือ ระยะเวลาในการส่ง Symbol

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

รูปที่ 36 สมการหาค่า Tsym

และ Packet ของ LoRaWAN จะแบ่งออกเป็นหลายๆ ส่วน ซึ่งมีดังนี้




รูปที่ 37 โครงสร้างแพคเกจ LoRaWAN

โดยเวลาในการส่งแต่ละส่วนจะคำนวณแยกออกจากกันโดย

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25)\, Tsym$$

รูปที่ 38 สมการหาค่าเวลา Tpreamble

Tpreamble คือเวลาในการส่งของ Preamble ซึ่งใช้ในการตรวจจับสัญญาณ LoRa และ npreamble เป็นจำนวน ของ Preamble Symbol ที่จะกำหนดแตกต่างกันไป โดยมีค่ามาตรฐานอยู่ที่ 8 symbols

สำหรับ Payload ที่เหลือสามารถคำนวณค่า payloadSymNb หรือ ค่าจำนวน Symbols ที่เหลือได้จาก

$$payloadSymbNb = 8 + max\left(ceil\left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)}\right)(CR + 4), 0\right)$$

รูปที่ 39 สมการหาค่า payloadSymbNB

โดย PL คือค่าจำนวน Payload ในหน่วย ไบท์

SF คือ Spreading Factor

H = 0 เมื่อใช้งาน Header หรือเท่ากับ 1 เมื่อไม่ใช้งาน Header

DE = 1 เมื่อเปิดการใช้งานปรับปรุง Data Rate ขนาดต่ำ เท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้ใช้งาน

CR คือ ค่า Coding Rate ใช้สำหรับการเข้ารหัสมีค่าตั้งแต่ 1-4

ซึ่งจากสูตรดังกล่าวจะสามารถนำมาคำนวณ เวลาในการส่ง Payload ได้ดังนี้

$$T_{payload} = payloadSymbNb \ \ Tsym$$

รูปที่ 40 สมการหา Tpayload

และเมื่อต้องการเวลาในการส่งทั้งหมดจะได้

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}$$

รูปที่ 41 สมการหา Tpacket

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กำหนดให้ Tpacket คือเวลาที่ใช้ในการส่งทั้งหมด

Tpreamble คือเวลาของ Preamble Symbol

Tpayload คือเวลาในการส่งของ Payload

ตัวอย่าง: สมมติให้การส่งข้อมูล LoRaWAN มีค่า SF = 7, BW = 125 kHz, CR = 1 มี Payload 100 ไบท์ มีขนาด Preamble 8 ไบท์ กำหนดให้มี Header และไม่ใช้งาน DE จะสามารถคำนวณเวลา Time On Air ได้เท่ากับ 174.32 ms ในการส่งแต่ละครั้งซึ่งเมื่อมาคำนวณร่วมกับ Duty Cycle 1% จะได้ว่าอุปกรณ์นี้สามารถส่งข้อความได้ทุกๆ 17.43 วินาที เพื่อไม่ให้เกิน Duty Cycle ที่กำหนด ซึ่งเป็นเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้การใช้งาน AMR กับ OMS ไม่สมควร Polled อุปกรณ์เดิมซ้ำเมื่ออุปกรณ์นั้นๆ ได้ส่งข้อความบอกสถานะมาแล้ว

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนด Payload ของข้อมูลมีขนาด 60 ไบท์ และกำหนดการใช้งน HEADER โดยมี CR = 1 เมื่อคำนวณร่วมกับ Duty cycle 1% และใช้ DR 4 จะสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ ดังนี้

Time on Air = 205.31 ms

Duty Cycle 1% จะต้องส่งข้อความโดยเว้นช่วงเวลาอย่างน้อย 21 วินาที

4.4.3 การตั้งค่า LoRaWAN สำหรับ OMS

4.4.3.1 การเลือก Class

การใช้งาน Class ของอุปกรณ์ LoRaWAN ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ใช้อุปกรณ์ Class C เนื่องจากอุปกรณ์ควรที่จะรับข้อความ Downink จาก Network Server ได้ทุกเวลา กรณีที่ใช้ Class A จะมีปัญหาเมื่อเกิดไฟฟ้าดับแล้วต้องจาก Poll ถามอุปกรณ์อื่นๆ ก็จำเป็นต้องรอการตอบกลับหลังจากช่วงที่อุปกรณ์ AMR ส่งข้อความตามเวลาที่กำหนดไว้แล้วเท่านั้น (ทุก 15 นาที) ทำให้การตอบสนองต่อไฟฟ้าดับนั้นจะช้าจนเกิดไป

4.4.3.2 การเลือก Activation Mode

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การเข้าร่วม Network Server แบบ Over-The-Air Activation (OTAA) ซึ่งในโหมด OTAA ก่อนที่จะเริ่มเปิดใช้งานอุปกรณ์ด้วยวิธี OTAA จะต้องเตรียมขั้นตอนคีย์ DevEUI , AppEUI และ AppKey ให้กับอุปกรณ์เสียก่อน ซึ่งมีหลายวิธี เช่น กำหนดใน CODE ที่เขียนขึ้น หรือใช้ AT Command กำหนดให้กับโมดูลโดยตรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโมดูลใช้งาน จากนั้นให้สร้างข้อมูลของอุปกรณ์ใน Network Server โดยกำหนดคีย์ต่างๆ ให้ตรงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.3.3 การตั้งค่าเบื้องต้นของ LoRaWAN ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดไว้ดังนี้

ISM BAND: AS923

Data Rate (DR): 4-5

RX Data Rate: 2

Join Activation: OTAA

Adaptive Data Rate (ADR): ON

Massage Type: Unconfirmed Massage

และค่าอื่นๆ เป็นค่าตั้งต้นปกติของ AS923 ดังในหัวข้อ 2.7.8

มี Channel ตามมาตรฐาน จำนวน 8 Channel สำหรับ Uplink และ RX1 และ 1 Channel สำหรับ Downlink RX2



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

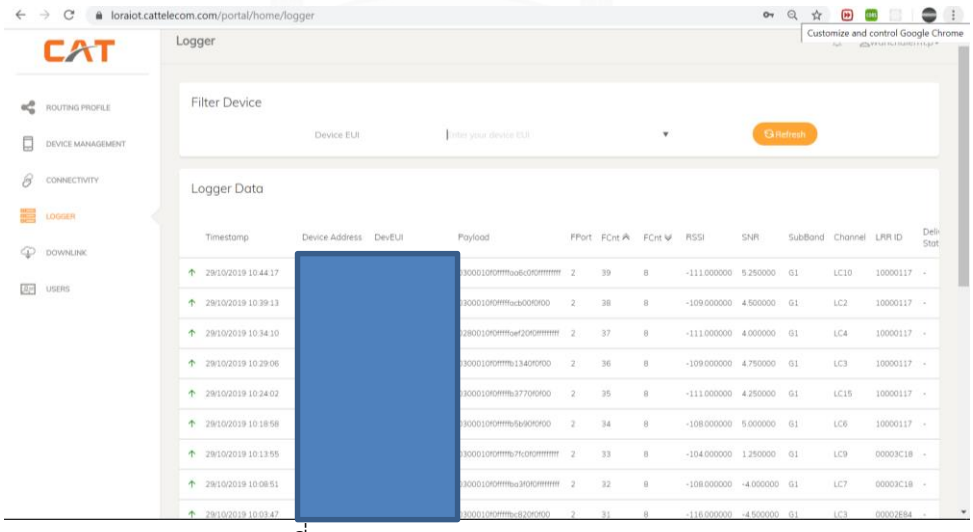
# บทที่ 5 การพัฒนา Network Server และ Web Application

## 5.1 การใช้งาน CAT LoRa Network Server

บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) หรือ CAT Telecom Public Company Limited เป็นบริษัทเจ้าแรกในไทยที่เริ่มให้บริการ โครงข่าย LoRa (Long Range Network) อย่างเป็นทางการ ซึ่งรองรับการให้บริการ IoT และเปิดให้บริการภายใต้ชื่อ “LoRa IoT by CAT” ซึ่งสามารถตรวจสอบขอบเขตการติดตั้งและพื้นที่การให้บริการของ LoRaWAN ได้ที่ https://LoRaiot.cattelecom.com

นอกจากนี้บริษัท CAT มีการจำหน่ายอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับ LoRaWAN และมีการร่วมมือกับหน่วยงานต่างๆ เพื่อสนับสนุนการใช้งาน LoRa ในไทย และเปิดให้บริการ Network Server แก่ผู้ที่สนใจที่จะทดลองใช้งาน LoRaWAN โดยได้ติดตั้งเกตเวย์และโครงสร้างพื้นให้แก่ผู้ใช้บริการโดยเสียค่าสมัครเป็นรายปีต่ออุปกรณ์

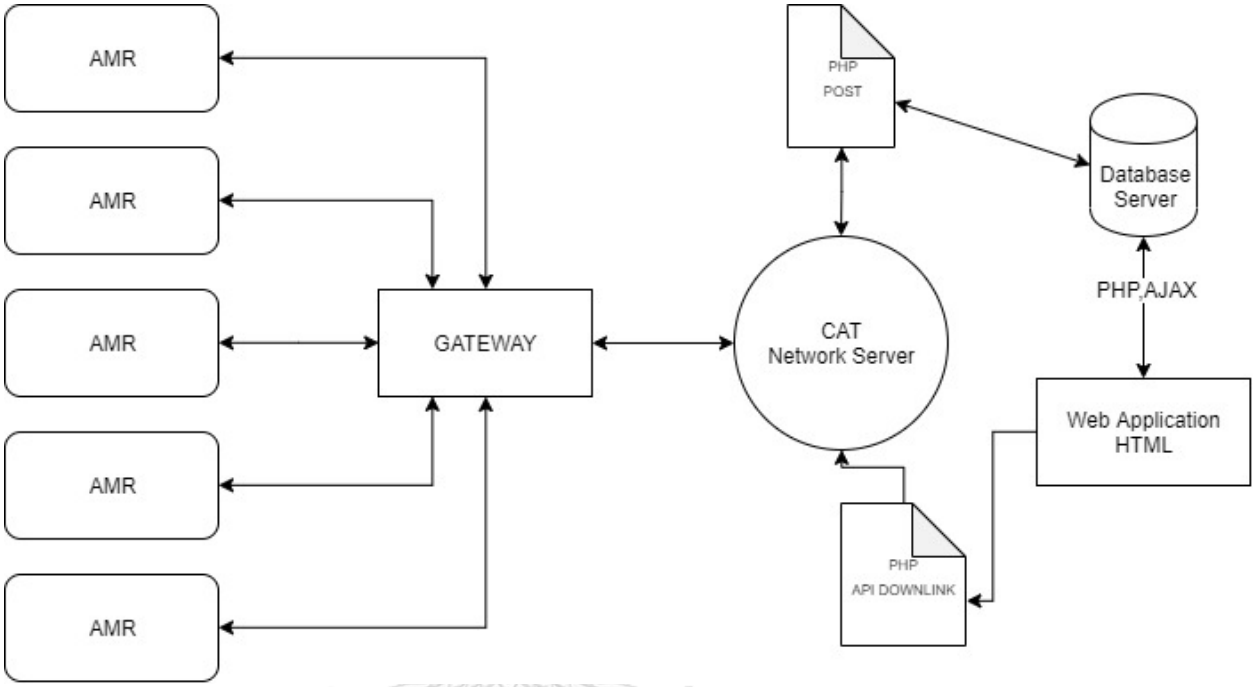
บริษัท CAT Telecom ได้เปิดให้ผู้ใช้บริการ LoRaWAN แก่ผู้ที่สนใจ โดยเสียค่าใช้จ่ายเป็นรายปีต่ออุปกรณ์ โดยการใช้งาน Network Server ของ CAT Telecom ต้องสมัครใช้งานผ่านเว็ปไซต์ https://LoRaiot.cattelecom.com การใช้งาน Network Server ของ CAT Telecom นี้ อุปกรณ์ End Device ต้องทำการส่งข้อมูลผ่าน Gateway ที่ CAT Telecom เป็นผู้ติดตั้ง และต้องลงทะเบียนอุปกรณ์ End Device ในเว็ปไซต์ก่อน เมื่อลงทะเบียนอุปกรณ์แล้ว ข้อมูลที่ถูกส่งมาจาก End device ผ่าน Gateway เพื่อเข้า Network Server ของ CAT โดยจะมี Logger ไว้ใช้ตรวจสอบข้อมูลของการส่งข้อความของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 42




รูปที่ 42 CAT Network Server Logger

ซึ่งจะบอกรายละเอียดและข้อมูลของการใช้งาน End Device ที่ส่งมาถึง Network Server ได้ แต่ในหน้าจอ Logger นี้จะสามารถย้อนดูข้อมูลในอดีตได้แค่บางส่วนเท่านั้น การใช้งานจึงจำเป็นต้องส่งผ่านข้อมูลจาก Network Server มาเก็บที่ฐานข้อมูลที่ต้องการใช้งานจริง

**5.2 โครงสร้างของระบบจัดการไฟฟ้าดับ**




รูปที่ 43 โครงสร้างระบบจัดการไฟฟ้าดับโดย LoRaWAN

ระบบโครงสร้างของระบบจัดการไฟฟ้าดับและ LoRaWAN จะมีลักษณะตามรูปที่ 43 โดยอุปกรณ์ AMR ทุกตัวจะส่งข้อมูลผ่านไปที่ Gateway ของ LoRa ที่ติดตั้งไว้ ตัวเกตย์จะเป็นตัวส่งผ่านข้อมูลไปที่ Network Server เพื่อจัดการและบริหารข้อมูลที่ได้รับทั้งหมด ข้อมูลเหล่านี้จะส่งไปที่ URL ของไฟล์ PHP ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งจะถูกนำไปคัดแยกลงตารางใน Database Server การเรียกใช้งานข้อมูลจากตารางเหล่านี้จะถูกเรียกจาก Web Application ที่เป็นไฟล์ HTML โดยผ่านตัวกลางคือ PHP โดยรับในรูปแบบของ AJAX และเมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับข้อมูลที่จะต้องส่งกลับไปเพื่อสอบถามสถานะของอุปกรณ์ (Poll) จะถูกส่งผ่านทางไฟล์ PHP API Downlink โดยตรง

**5.3 การพัฒนา Application Server**

โปรแกรมที่ถูกใช้ในการพัฒนา Application Server มีอยู่ 3 โปรแกรมได้แก่ Visual Studio Code เป็นโปรแกรมสำหรับพัฒนาและแก้ไขซอร์สโค้ดที่มีการสนับสนุนสำหรับการดีบัก การควบคุม Git ในตัวและ GitHub การเน้นไวยากรณ์ การเติมโค้ดอัจฉริยะ ตัวอย่าง และ code refactoring มันสามารถปรับแต่งได้หลายอย่าง ให้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนธีม แป้นพิมพ์ลัด การตั้งค่า

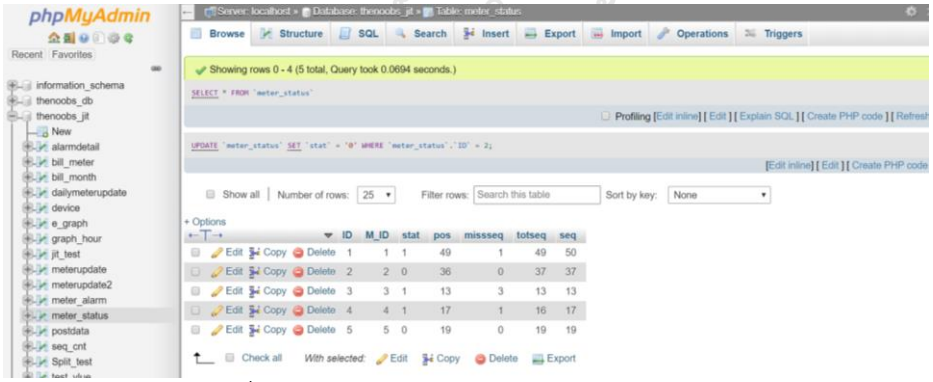
และติดตั้งส่วนขยายที่เพิ่มฟังก์ชันการทำงานเพิ่มเติมได้ ซึ่งจะใช้เพื่อพัฒนาไฟล์ตระกูล PHP เพื่อใช้ติดต่อกับ Database และส่วนของ Web Application ที่พัฒนาบนไฟล์ตระกูล HTML

MySQL Workbench 8.0 CE เป็นโปรแกรมจัดการฐานข้อมูล MySQL Server ของค่าย MySQL ซึ่งประกอบด้วยฟีเจอร์หลัก ๆ 3 ตัวด้วยกันคือ SQL Development, Data Modeling และ Server Administration ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย โดยจะนำมาจัดการกับฐานข้อมูลแบบออฟไลน์ของข้อมูล AMR ทั้งสถานะและค่าวัดต่างๆ

PHP Myadmin เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นใน PHP ซึ่ง phpMyAdmin มีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการจัดการ MySQL ผ่านเว็บ phpMyAdmin สนับสนุนการดำเนินการต่างๆ บน MySQL สามารถดำเนินการผ่านอินเทอร์เฟซผู้ใช้และมีความสามารถในการดำเนินการคำสั่ง SQL ได้โดยตรง ซึ่งจะนำมาใช้จัดการบนฐานข้อมูลออนไลน์ของข้อมูลทั้งหมดของ AMR ทั้งสถานะและค่าวัดต่างๆ

5.3.1 ฐานข้อมูล (Database Server)

ฐานข้อมูลออนไลน์ (Database Online) เป็นฐานข้อมูลที่ใช้สำหรับ Web Application ที่อยู่บนออนไลน์ ซึ่งจัดการผ่าน phpMyAdmin เนื่องจากเป็นโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลที่แต่ละเจ้าส่วนใหญ่จะมีใช้งานเป็นขั้นต่ำ ซึ่งข้อมูลที่ส่งผ่าน Network Server ทุกอย่างจะถูกส่งไปยัง URL ที่ลงทะเบียนไว้ใน Routing Profile ซึ่งที่ Application Server จะเขียนไฟล์ PHP เพื่อรับข้อมูลในรูปแบบ JSON ก่อนคัดแยกไปที่ฐานข้อมูล MySQL ดังรูปที่ 44



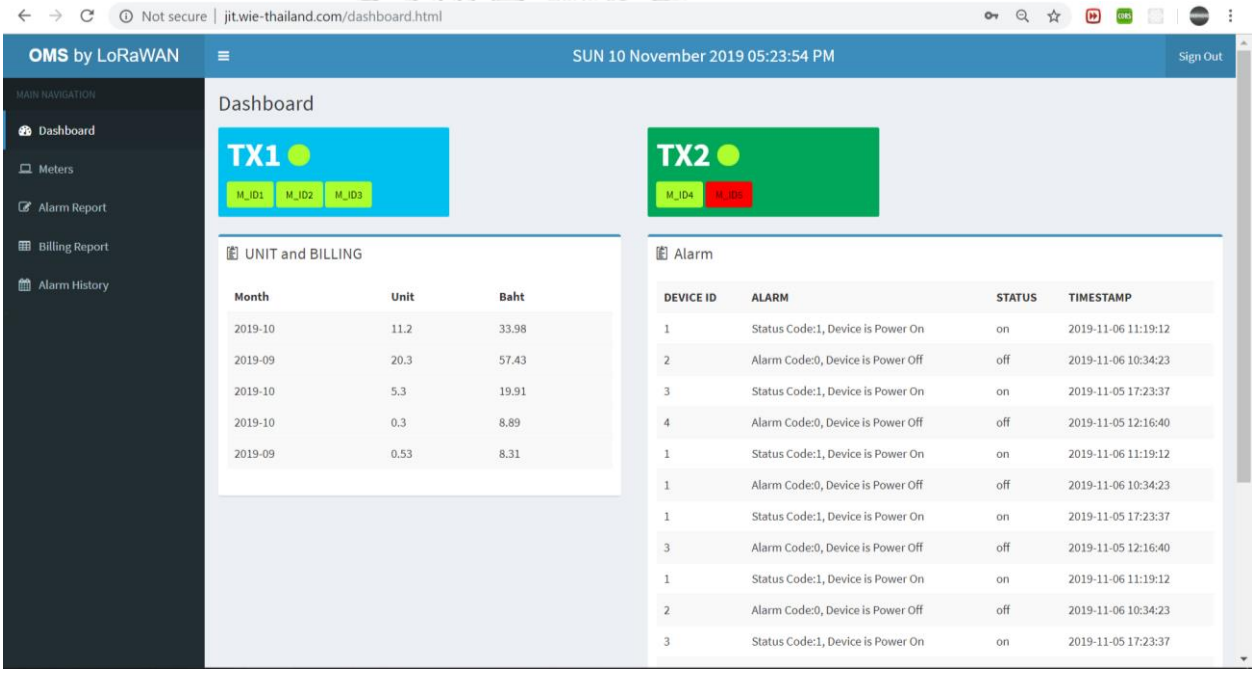

รูปที่ 44 ฐานข้อมูลออนไลน์ใน phpMyAdmin

ซึ่งข้อมูลที่ได้รับมาจะอยู่ในรูปแบบของ JSON ที่สามารถนำมาใช้ในการระบุตัวตนของอุปกรณ์ในระบบ (MID) และใช้ FCNT เพื่อคำนวณค่า PSR ของอุปกรณ์ นอกนี้ยังมีค่าอื่นๆ ที่สามารถบอกประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อกับโครงข่าย LoRaWAN และมีข้อมูล PayloadHEX ที่เป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของ AMR ด้วย

5.3.2 Web Application

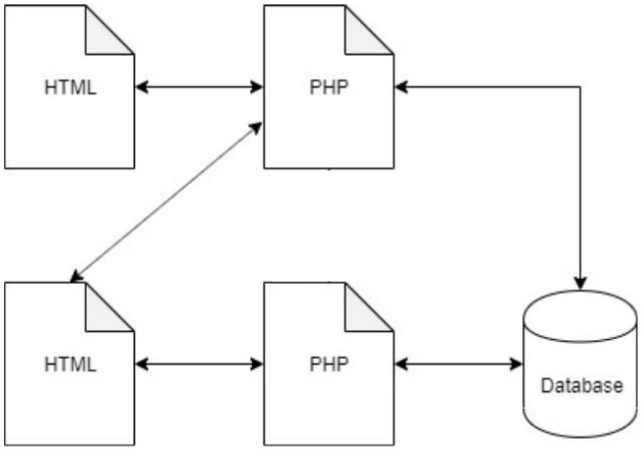
การพัฒนา Web Application นี้จะทำในรูปแบบ Responsive Web ที่มีการตอบสนองต่อหน้าจอและอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถใช้งาน Web Application ได้บนทุกอุปกรณ์ โดยอ้างอิงโครงสร้างมาจาก Bootstrap ที่เป็น Frontend Framework ที่รวม HTML, CSS และ JS เข้าด้วยกันสำหรับพัฒนาเว็บ ที่รองรับทุกในทุกอุปกรณ์ ที่เปิดให้นักพัฒนาสามารถนำไปใช้งานพัฒนาเว็บไซต์ได้แบบฟรี (Open Source) ในชื่อว่า Bootstrap Framework โดยมีระบบกริด (Grid) มาช่วยการคำนวณค่าหน้าจอพร้อมกับปรับขนาดของหน้าจอให้แสดงผลกับทุกๆ หน้าจอโดยอัตโนมัติ

ถึงแม้ว่า Bootstrap จะมีโครงสร้างพื้นฐานที่บังคับให้การออกแบบตาม Framework ที่มีมาให้ แต่ก็สามารถที่จะเขียนพวก CSS และ Stylesheet เพิ่มเติม เพื่อเข้าไปจัดการกับหน้าต่างการใช้งานต่างๆ ที่ต้องการได้ ดังรูปที่ 45




รูปที่ 45 หน้าจอของ Web Application

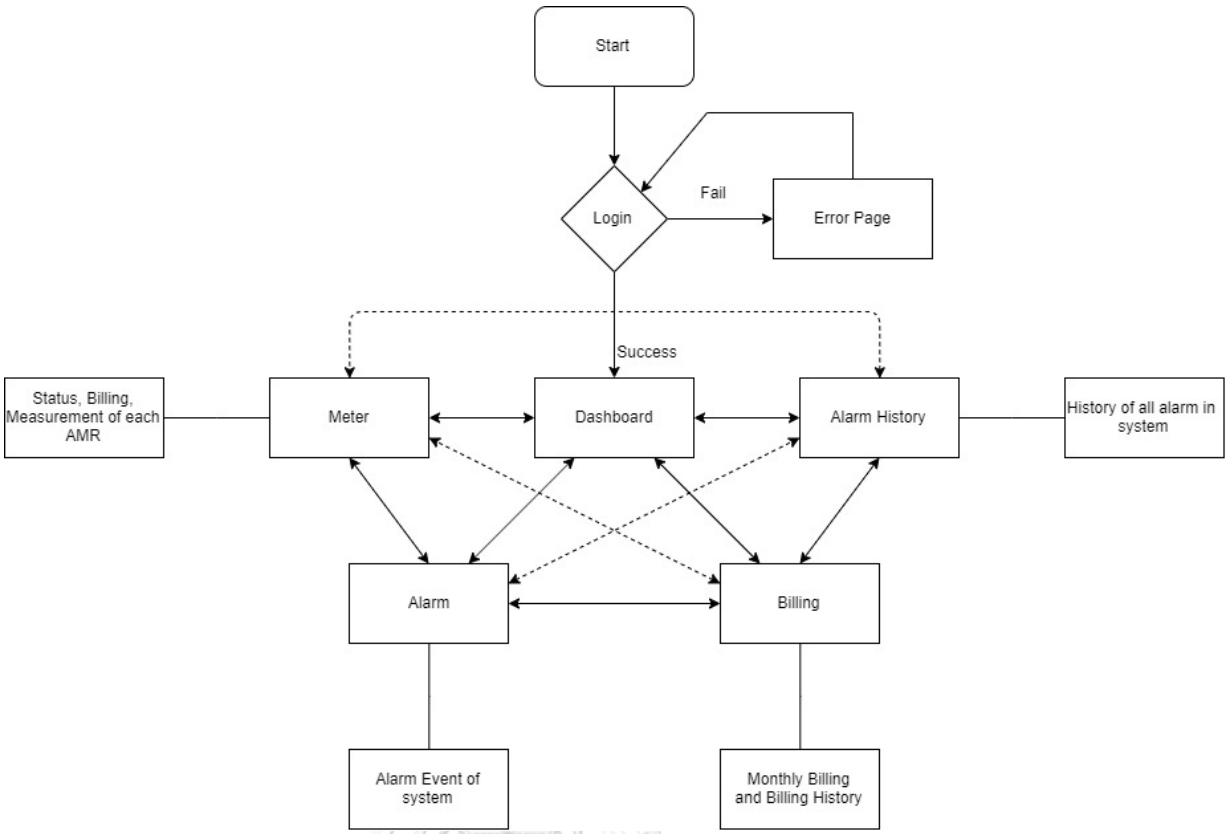
5.3.2.1 โครงสร้างของ Web Application




รูปที่ 46 การส่งข้อมูลระหว่าง HTML และดาต้าเบส

Web Application จะพัฒนาผ่านโปรแกรม Visual Studio Code เป็นหลัก ซึ่งจะใช้ภาษา HTML, Javascript และใช้ PHP สำหรับส่วนด้านหลัง (Back End) ดังรูปที่ 46 โดยจะมีเพียงไฟล์ตระกูล PHP ที่ติดต่อกับฐานข้อมูลเพื่อทำหน้าที่ในการดึงข้อมูลที่ HTML ต้องการใช้งานจาก Database Server ส่งต่อไปให้ HTML และรับอินพุทจากไฟล์ HTML เพื่อบันทึกลงตารางใน Database โดยจะมีไฟล์ PHP และ HTML ที่มีฟังก์ชั่นการจัดการไฟฟ้าดับเขียนเอาไว้เพื่อตรวจสอบไฟฟ้าดับตามอัลกอริธึม ทุกหน้าฟังก์ชันการใช้งานจะอัพเดทข้อมูลที่เก็บในฐานข้อมูลแบบกึ่ง Real-Time ที่จะมีช่วงการอัพเดททุกๆ 3 วินาที โดยจะเริ่มต้นที่หน้าต่างการ Login ผ่าน URL ที่ได้ทำการลงทะเบียนเอาไว้ ซึ่งหน้าจอจะมีเมนูในการเกิดเพื่อเชื่อมโยงไปที่หน้าอื่นๆ ได้ทั้งหมด และมีโครงสร้างของ Web Application ดังรูปที่ 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 47 โครงสร้างของ Web Application

ซึ่งหน้าเมนูหลักๆ ของ Web Application จะสามารถแบ่งได้เป็น 6 ส่วน ดังนี้

- Dashboard หลัก ที่จะแสดงสถานะซึ่งประกอบด้วย AMR และหม้อแปลงไฟฟ้า และแสดงผลการใช้พลังงานและค่าไฟโดยรวมของลูกค้าแต่ละราย รวมถึง Alarm บางส่วนเพื่อให้สะดวกแก่การมองภาพรวมทั้งระบบ โดยหน้าจอนี้จะมีการดึงข้อมูลจากไฟล์ตระกูล PHP เพื่อดึงข้อมูลสถานะ การคิดค่าไฟ และ Alarm แจ้งเตือนโดยรวมของระบบจากตารางในฐานข้อมูล
- Meter จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่
  - หน้าจอนี้จะแสดงรายละเอียดของ AMR ที่มีอยู่ทั้งระบบ ทั้ง Alarm สถานะและค่าวัดของ AMR รวมถึงค่าไฟโดยรวมแต่ละเดือนของลูกค้าแต่ละราย โดยดึงข้อมูลจากไฟล์ตระกูล PHP ที่รวบรวมค่าสถานะและค่าวัดจาก AMR ของลูกค้าตแต่ละราย
  - ข้อมูล AMR ของลูกค้าแต่ละราย ซึ่งจะแสดงการใช้พลังงาน และค่าวัดทางไฟฟ้า รวมถึงรายการค่าไฟในอดีตของลูกค้า

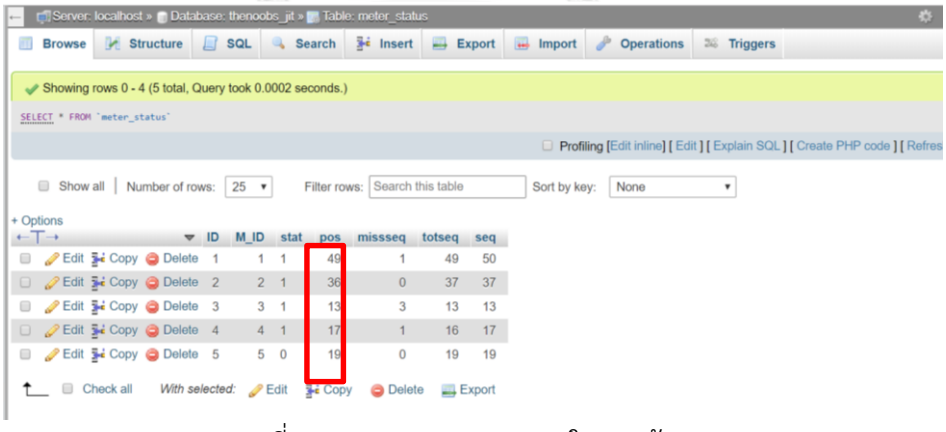
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- Alarm Report เป็นหน้าจอใช้สำหรับตัวสอบ Alarm Event ที่ยังคงค้างในระบบรอการแก้ไข (Ack) ซึ่งผู้ใช้งานต้องทำการ Clear Alarm เพื่อเป็นการตอบรับว่าได้รับรู้ (Ack) Alarm ที่เกิดขึ้นแล้ว
- Billing Report ใช้สำหรับดูรายการค่าไฟทั้งปัจจุบันและย้อนหลังของลูกค้าแต่ละราย โดยผู้ใช้งานสามารถใส่รหัส MID ของ AMR เพื่อตรวจสอบค่าไฟได้
- Alarm Historical ใช้สำหรับค้นหาและดู Alarm ย้อนหลังทั้งหมดของ AMR ซึ่งสามารถค้นหาได้จากทั้งวันที่และช่วงเวลา หรือ MID
- Overview สำหรับมอง Single Line มุมกว้างของระบบไฟฟ้าส่วนจำหน่ายทั้งระบบ แสดงการเชื่อมต่อและสถานะของอุปกรณ์ทั้งระบบ และใช้จำลองการทำงานของระบบจัดการไฟฟ้าดับ

5.3.2.2 ข้อมูลใน Web Application

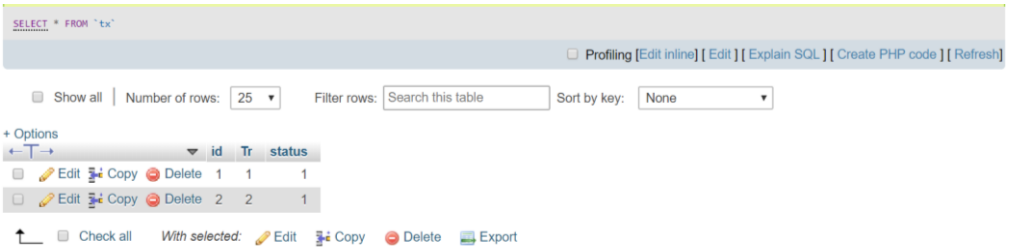
ถึงแม้ว่าในแต่ละหน้าจะมีการนำข้อมูลมาขึ้นแสดงผลที่แตกต่างกัน แต่ข้อมูลหลักๆ ที่นำมาใช้งานใน Web Application ระบบจัดการไฟฟ้าดับจะมีลักษณะคล้ายๆ กัน โดยแบ่งประเภทของข้อมูลออกมาได้ ดังนี้

- สถานะของมิเตอร์และหม้อแปลง นอกจากค่าวัดตามปกติของอุปกรณ์ AMR แล้ว ค่าสถานะมิเตอร์จะนำมาจากการส่งข้อมูลของ AMR ที่กำหนดให้มีบิทแสดงสถานะของข้อมูลที่ส่งมาในตาราง meter_stat ใน Database Server ดังรูปที่ 48




รูปที่ 48 ตารางสถานะ AMR ในฐานข้อมูล

ส่วนสถานะของหม้อแปลงจะคำนวณจากอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับและอัพเดทค่าทั้งหมดลงตาราง ดังรูปที่ 49




รูปที่ 49 สถานะของหม้อแปลงในฐานข้อมูล

โดยกำหนดให้สีของอุปกรณ์บ่งบอกสถานะดังนี้

M_ID1 สีเขียวบ่งบอกถึงสถานะการทำงานที่ปกติ

M_ID5 สีแดงบ่งบอกถึงสถานะไฟฟ้าดับ

M_ID2 สีม่วงบ่งบอกถึงการไม่ทราบสถานะของอุปกรณ์หรือขาดการติดต่อ โดยสีนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อุปกรณ์ขาดการติดต่อไปในระยะเวลาที่กำหนดเป็นเวลา 1 ชม. หรือไม่มีการตอบกลับจากการ Poll ของ Application Server

☐ ค่าไฟรายเดือน

การคิดค่าไฟจะอ้างอิงจากอัตราค่าไฟที่อยู่อาศัยของการไฟฟ้านครหลวง โดยยังไม่คิดค่า ft โดย อัตราค่าไฟฟ้าใหม่นี้เริ่มใช้ตั้งแต่ค่าไฟฟ้า ประจำเดือนพฤศจิกายน 2561 เป็นต้นไป มีการคำนวณค่าไฟดังนี้

○ อัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน

ค่าพลังงานไฟฟ้า

15 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) แรก (หน่วยที่ 1 – 15) หน่วยละ 2.3488 บาท

10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 16 – 25) หน่วยละ 2.9882 บาท

10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 26 – 35) หน่วยละ 3.2405 บาท

65 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 36 – 100) หน่วยละ 3.6237 บาท

50 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 101 – 150) หน่วยละ 3.7171 บาท

250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 – 400) หน่วยละ 4.2218 บาท

เกินกว่า 400 หน่วย (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป) หน่วยละ 4.4217 บาท

ค่าบริการ (บาท/เดือน) : 8.19

○ อัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

ค่าพลังงานไฟฟ้า

150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) แรก (หน่วยที่ 1 – 150) หน่วยละ 3.2484 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 – 400) หน่วยละ 4.2218 บาท

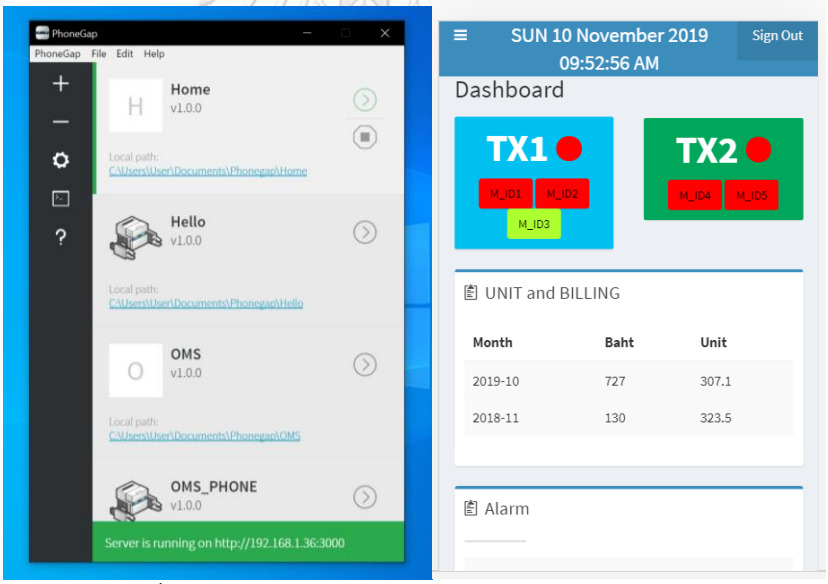
เกินกว่า 400 หน่วย (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป) หน่วยละ 4.4217 บาท

ค่าบริการ (บาท/เดือน) : 38.22

โดยแต่ละอุปกรณ์จะเก็บค่าประเภทของการคิดค่าไฟเก็บเอาไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้จะได้จากค่าของ AMR แล้วนำมาบันทึกลงในตารางได้โดยตรง

- Alarm ของระบบ จะตรวจสอบจากการแจ้งเตือนของอุปกรณ์ AMR ที่ส่งมาในระบบ โดย Alarm ทั่วไปที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด จะถูกจัดเก็บไว้ใน Alarm Historical แต่จะมี Alarm พิเศษชนิดหนึ่งคือ Event Alarm เป็นค่า Alarm ที่ยังคงค้างและแสดงผลในระบบไฟฟ้า เป็นการบ่งบอกว่า Alarm ได้เกิดขึ้นรอการรับรู้ (Ack) จากผู้ใช้งาน เป็นเสมือนการแจ้งเตือนการเกิดไฟฟ้าดับอย่างหนึ่ง กรณีผู้ใช้งานได้กด ACK เรียบร้อยแล้ว Alarm จะถูกย้ายไปในหมวดหมู่ของ Alarm ทั่วไป

5.3.3 การพัฒนา Mobile Application บน Phonegap




รูปที่ 50 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บน Phonegap

ในการพัฒนา Application บนโทรศัพท์จะใช้งานโปรแกรม Phonegap ที่เป็นโปรแกรมพัฒนา Mobile Application โดยใช้ภาษา HTML HTML5 หรือ JavaScript ซึ่งเป็นภาษาเดียวกับการพัฒนาเว็บไซต์ โดยมีหลักการคือ Phonegap จะทำหน้าที่รันหน้าเว็บที่เป็น HTML บน Application ที่ต้องติดตั้งลงบนเครื่อง หรือที่เรียกกันว่า Native Application ซึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของ Phonegap คือ อะไรก็ตามที่พัฒนาบน JavaScript หรือ HTML อยู่แล้วจะสามารถนำมาปรับใช้งานบน Phonegap ได้ทันที แต่ข้อเสียของ

Phonegap คือ ไม่ใช่ Native Application เต็มตัวจึงทำให้ไม่สามารถเรียกฟังก์ชั่นบางอย่างขึ้นมาใช้งานได้และไม่สามารถใช้งานไฟล์ที่เกี่ยวกับ Server ได้ เช่น PHP, ASP



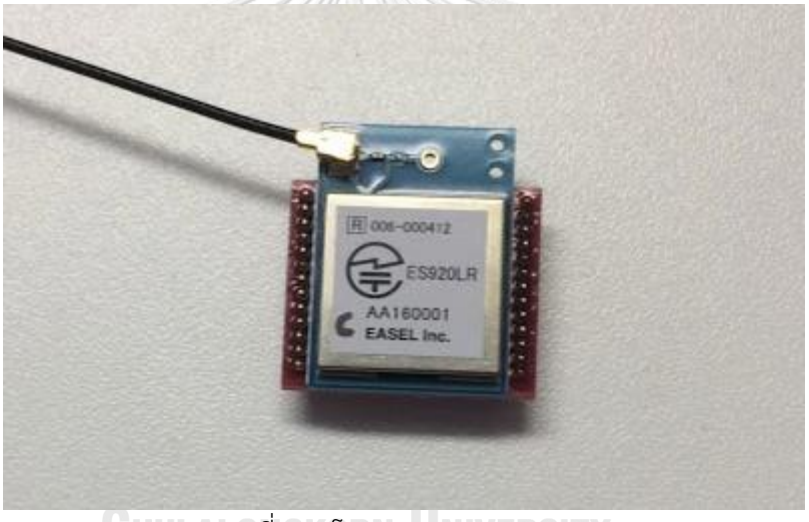
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการทดสอบใช้งาน LoRa ที่ได้ทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และการส่งข้อมูลของ AMR โดยมีโมดูลสื่อสาร LoRaWAN รอบๆ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยร่วมกับระบบจัดการไฟฟ้าดับโดยผ่าน Web Application ที่ได้พัฒนาขึ้น

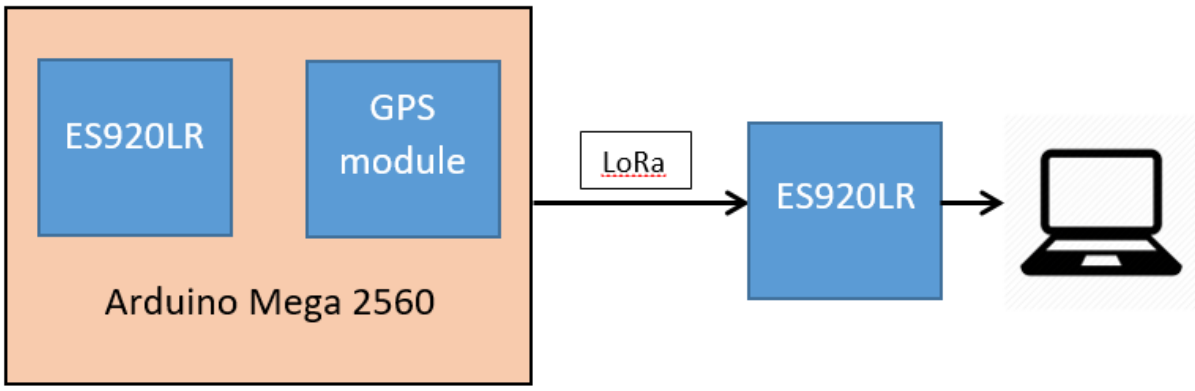
## 6.1 การทดสอบส่งข้อมูล LoRa ที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ LoRa ในเขตเมืองในแง่ของประสิทธิภาพและความสามารถในการส่งข้อมูล โดยจะทำการส่งข้อมูล GPS บริเวณรอบๆ มหาวิทยาลัยโตเกียวด้วยอุปกรณ์ LoRa ธรรมดา (ไม่รวม LoRaWAN) ในการทดลองนี้ได้ใช้โมดูล ES920LR ดังรูปที่ 51 ควบคุมผ่าน Arduino Mega 2560 และรับข้อมูลอุปกรณ์ GPS ผ่านการสื่อสารแบบ Serial และภาครับจะเป็นโมดูล ES920LR ที่ต่อกับโน้ตบุคเพื่อเก็บและตรวจสอบข้อมูลที่ได้ ดังรูปที่ 52




CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 51 โมดูล LoRa ES920LR




รูปที่ 52 โมดูล LoRa ES920LR

โดยภาครับจะติดตั้งภายในอาคารที่ตึกวิศวกรรมศาสตร์ 2 ชั้น 12 ในมหาวิทยาลัยโตเกียว วิทยาเขต Hongo

ในการส่งข้อมูลจะส่งเป็นข้อมูล GPS ทุกๆ 1 วินาทีด้วย LoRa SF 12 โดยแบ่งเป็น 3 การทดลอง

6.1.1 การทดลองประสิทธิภาพการส่งภายในอาคาร

ในการทดลองแลกจะทดการส่งข้อมูลโดยทดลองส่งผ่านทีละชั้นตั้งแต่ชั้น 10 ลงไปในการส่งข้อมูล อุปกรณ์ LoRa สามารถส่งข้อมูลได้จนถึงชั้นที่ 3 โดยไม่มีปัญหาอะไร แต่เมื่อลงไปที่ชั้นต่ำกว่านั้นเริ่มมีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จที่ต่ำลงอย่างมาก (น้อยกว่า 50%) และเมื่อไปถึงชั้นใต้ดิน อุปกรณ์ LoRa ไม่สามารถส่งข้อความใดๆ ได้เลย

6.1.2 การทดลองส่งข้อมูลในระยะใกล้ (150 เมตร)

การทดลองนี้ทดสอบโดยการนำอุปกรณ์ LoRa เดินผ่านรอบตัวรับสัญญาณในระยะใกล้ๆ ไม่เกิน 150 เมตร ดังแสดงภาย Google Map ในรูปที่ 53

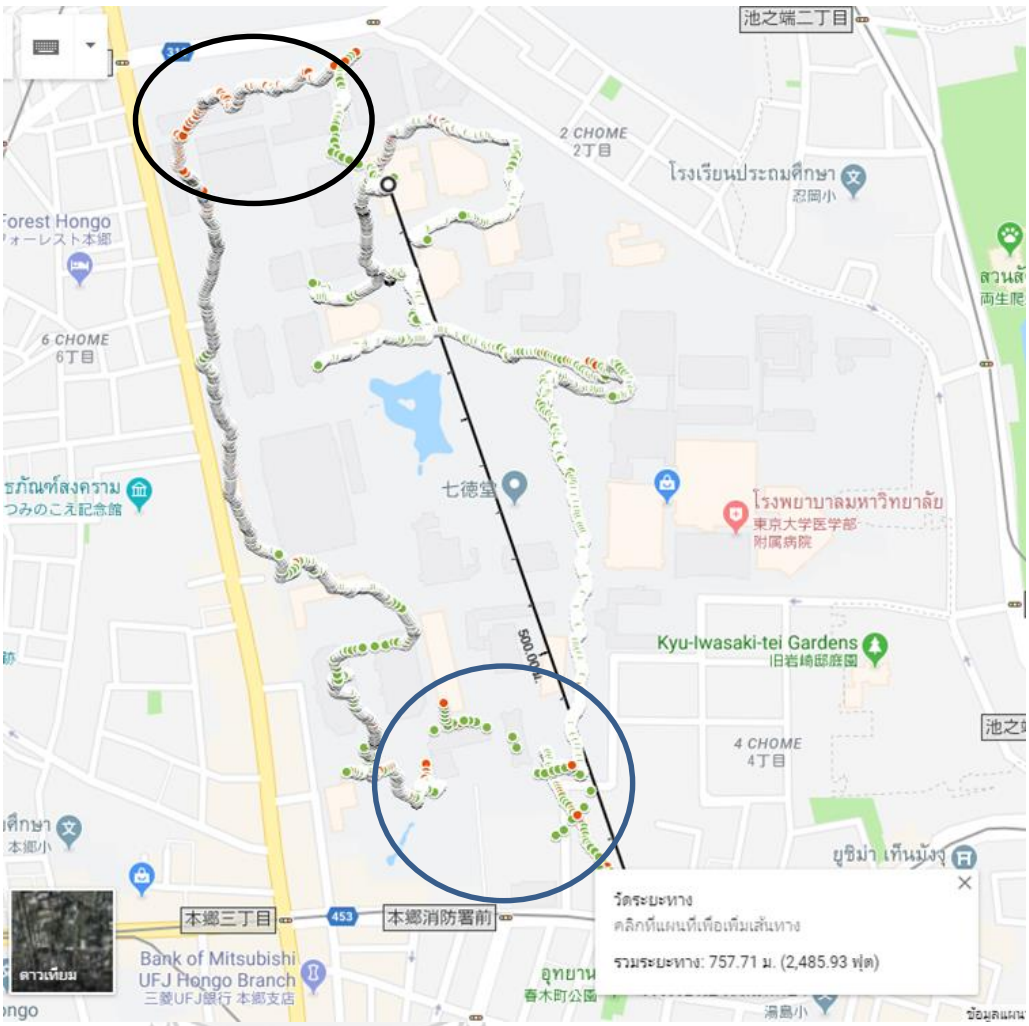
รูปที่ 53 แผนที่ Google Map แสดงการส่งข้อมูล LoRa ระยะใกล้

โดยเริ่มจากจุดหมายเลข 1 ไปที่จุดหมายเลข 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา ซึ่งใช้เวลา 12 นาที 58 วินาที หรือ 778 แพคเกจที่ส่ง จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ LoRa สามารถส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในบริเวณที่โล่งแจ้ง แต่ในบริเวณวงกลมสีแดงเกิดการขาดหายของการส่งข้อมูลเนื่องจากมีตึกสูงบังเส้นทางการส่งข้อมูลและอยู่ภายใต้อาคาร ทำให้ข้อมูลบริเวณส่วนนี้หายไปเป็นเวลา 30 วินาที และบริเวณวงกลมสีดำก็เกิดการขาดหายไปของข้อมูลบางส่วนแม้จะอยู่ในที่โล่งแจ้งเนื่องจากมีตึกสูงบังทิศทางในการส่งข้อมูล โดยหากคิดอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (PSR) จากผลการทดลองนี้จะอยู่ที่ 88.56% แต่กรณีที่ไม่คิดการส่งข้อความภายในอาคารในวงกลมสีแดง อัตราความสำเร็จในการส่งข้อความจะสูงถึง 92.42%

6.1.3 การทดลองส่งข้อมูลในระยะไกล (800 เมตร)

การทดลองนี้จะทดสอบโดยการเพิ่มระยะทางของการส่งข้อมูลเป็น 800 เมตร รอบมหาวิทยาลัยโตเกียว โดยแสดงผลผ่าน Google Map ดังรูปที่ 54 โดยจุดสีเขียวแสดงถึงข้อความหรือแพคเกจที่สามารถส่งได้สำเร็จ จุดสีแดงแสดงถึงจุดที่มีเกิดการสูญหายของข้อมูล ในบริเวณวงกลมสีดำที่ระยะ 700-800 เมตรจะเห็นว่าเกิดการขาดช่วงของข้อมูลค่อนข้างมาก เนื่องจากอยู่ในบริเวณตึกสูงทำให้การส่งสัญญาณ GPS มีปัญหา และเกิดการสูญหายของข้อมูลขึ้นบางส่วนแต่ก็ยังสามารถส่งข้อมูลส่วนใหญ่ได้ตามปกติ แต่ในวงกลมสีดำจะเห็นว่ามีอัตราการสูญหายของข้อมูลที่สูงมาก เนื่องจากมีตึกสูงหลายตึกบดบังเส้นทางการส่งข้อมูลแม้ระยะทางจะใกล้กว่า แสดงให้เห็นว่าทัศนวิสัยหรือสิ่งกีดขวางในเส้นทางการส่งข้อมูล เช่น อาคารหรือตึกจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล LoRa อย่างมาก ซึ่งในการทดลองนี้มีอัตการส่งข้อมูลสำเร็จอยู่ที่ 81.89%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



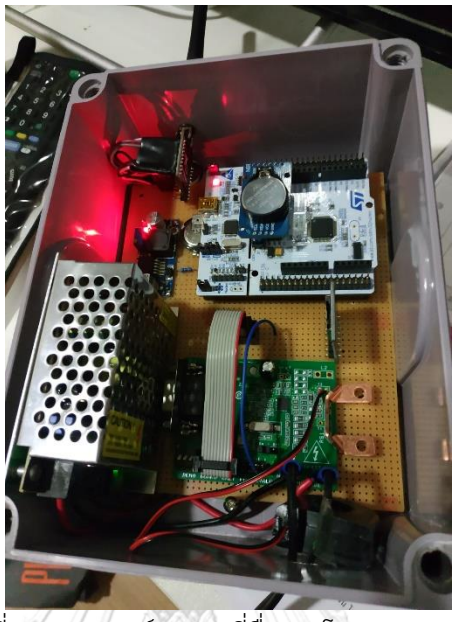

รูปที่ 54 แผนที่ Google Map แสดงการส่งข้อมูลระยะไกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าประสิทธภาพของการส่ง LoRa จะถูกลดทอนอย่างมากเมื่อติดตั้งในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นของตึกสูง เพราะฉะนั้นการใช้งาน LoRa ควรเลือกภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมโดยรวมที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้การทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนบางประการเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ตัวรับที่ยังไม่เหมาะสมเพราะอยู่ภายในตัวอาคารและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์รับสัญญาณได้หลายประการ

## 6.2 การทดสอบอุปกรณ์ AMR และข้อมูลที่ Network Server

ในการติดตั้งการ AMR จะติดตั้งบริเวณรอบๆ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจำนวน 5 ตัว และทดสอบการจ่ายโหลดทั่วไปของอุปกรณ์ เช่น เพื่อจำลองการใช้งานของมิเตอร์ตามรูปที่ 64



รูปที่ 55 อุปกรณ์ AMR ที่สื่อสารโดย LoRaWAN

ค่าที่ได้จะถูกคำนวณและส่งผ่าน RAK811 พร้อมวันและเวลาของค่านั้นๆ ทุกๆ 15 นาที และค่าที่ได้จะถูกแสดงบน Network Server ของ CAT Telecom ดังรูปที่ 65

| Timestamp | Device Address | DevEUI | Payload | FPort | FCnt | FCnt | RSSI | SNR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 29/10/2019 10:44:17 | | | 0300010f0fffffaa6c0f0fffffffff | 2 | 39 | 8 | -111.000000 | 5.250000 |
| 29/10/2019 10:39:13 | | | 0300010f0fffffacb00f0f00 | 2 | 38 | 8 | -109.000000 | 4.500000 |
| 29/10/2019 10:34:10 | | | 0280010f0fffffaef20f0fffffffff | 2 | 37 | 8 | -111.000000 | 4.000000 |
| 29/10/2019 10:29:06 | | | 0300010f0fffffb1340f0f00 | 2 | 36 | 8 | -109.000000 | 4.750000 |
| 29/10/2019 10:24:02 | | | 0300010f0fffffb3770f0f00 | 2 | 35 | 8 | -111.000000 | 4.250000 |
| 29/10/2019 10:18:58 | | | 0300010f0fffffb5b90f0f00 | 2 | 34 | 8 | -108.000000 | 5.000000 |
| 29/10/2019 10:13:55 | | | 0300010f0fffffb7fc0f0fffffffff | 2 | 33 | 8 | -104.000000 | 1.250000 |
| 29/10/2019 10:08:51 | | | 0300010f0fffffba3f0f0fffffffff | 2 | 32 | 8 | -108.000000 | -4.000000 |
| 29/10/2019 10:03:47 | | | 0300010f0fffffbc820f0f00 | 2 | 31 | 8 | -116.000000 | -4.500000 |

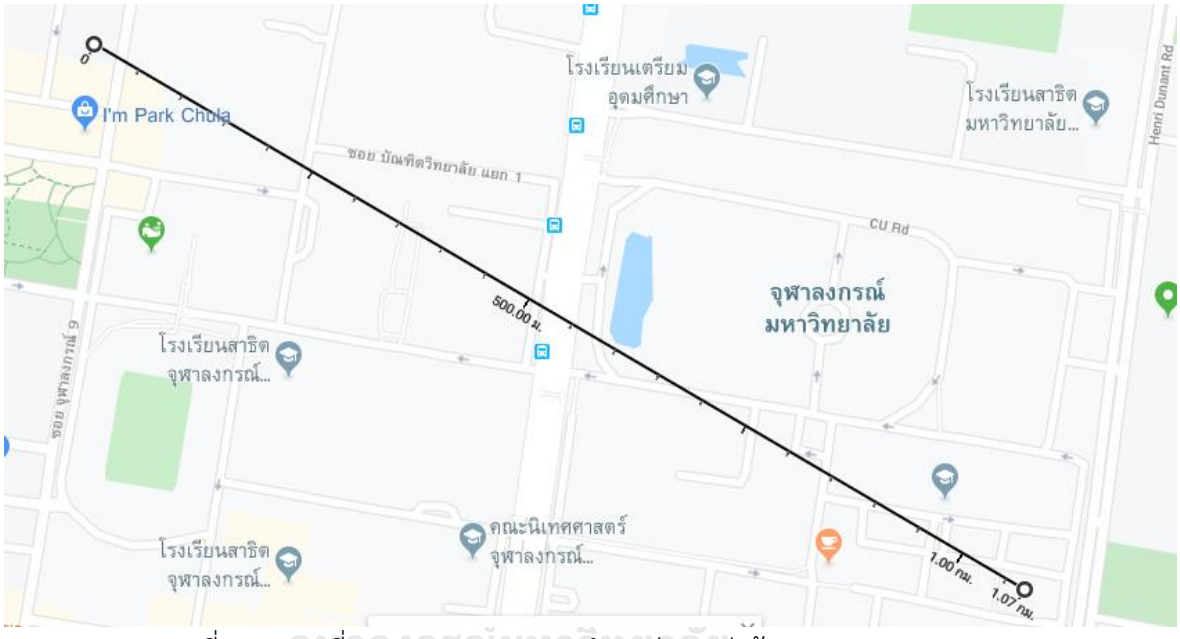
รูปที่ 56 หน้าต่าง Logger แสดงข้อมูลการส่งของ AMR

ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถบอกประสิทธิภาพของข้อมูลที่ส่งได้โดยดูจากจำนวน FCnt ที่บอกลำดับของข้อความที่ส่ง ซึ่งถ้าลำดับมีความต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของข้อความที่ทาง Network Server ได้รับอย่างครบถ้วน และค่า RSSI (Received Signal Strength Indicator) ที่

บอกระดับบ่งชี้ของความแรงของคลื่นความถี่วิทยุที่วัดที่ตัวรับ ซึ่งส่วนใหญ่กำหนดค่าต่ำสุดไว้ที่ -120 dBm ซึ่งการทดสอบนี้อุปกรณ์ทั้งหมดผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำในการส่งข้อมูล และค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังส่งที่นับและกำลังของคลื่นรบกวน โดยค่า SNR สำหรับ LoRaWAN จะมีค่าอยู่ที่ 10 dB ถึง -20 dB ซึ่งอุปกรณ์สามารถส่งค่าได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน

## 6.3 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูล LoRaWAN บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดลองนี้จะติดตั้งอุปกรณ์ AMR ที่ส่งข้อมูลผ่าน LoRaWAN ที่ชั้น 21 อาคารระเบียงจุฬาซึ่งห่างจากจุดติดตั้งเกตเวย์ของ CAT ประมาณ 1 กิโลเมตร ดังรูปที่ 57 โดยจะทำการทดลองออกเป็น 2 กรณี




รูปที่ 57 แผนที่ Google Map แสดงตำแหน่งการส่งข้อมูล LoRaWAN

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 6.3.1 ทดสอบส่งข้อมูลทุกๆ 1 นาที

ในการทดลองนี้จะทดสอบส่งข้อมูล AMR ทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 3 วัน ที่ DR 2 โดยข้อมูลที่ส่งจะเป็นค่าวัดทางไฟฟ้าที่ส่งตามปกติขนาด 40 ไบท์ จากการทดลองส่งพบว่า เกิดการ Lag ของข้อมูลเกิดขึ้น โดยจะมีข้อมูลย้อนหลังบางเวลา ถูกส่งกลับมาๆ ทั้งที่ได้ข้ามข้อมูลเวลานั้นไปแล้ว ดังรูปที่ 58

| | |
|---|---|
| 6179 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T20:56:54.885+... |
| 6180 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:12:54.879+... |
| 6181 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:13:53.506+... |
| 6182 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:14:54.66+0... |
| 6183 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:15:55.289+... |
| 6184 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:16:54.893+... |
| 6185 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:07:55.238+... |
| 6186 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:08:54.831+... |
| 6187 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:09:54.479+... |
| 6188 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:17:54.486+... |
| 6189 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:10:55.627+... |
| 6190 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:11:55.233+... |
| 6191 | {"DevEUI_uplink":{"Time":"2019-12-05T21:14:54.66+0... |

รูปที่ 58 ข้อมูลที่เกิดการ Lag ของการส่ง

จะเห็นว่าข้อมูล ณ วันที่ 5 ธันวาคม 2562 เวลา 21:54:16 น. ถูกส่งมาเป็นลำดับที่ 6184 แต่ข้อมูลลำดับถัดมาจำนวน 3 ค่า (ลำดับที่ 6185-6187) กลับเป็นค่าย้อนหลัง เมื่อ 7-9 นาทีที่แล้วตามลำดับ ซึ่งในกรณีนี้ถือว่าเป็นข้อมูลสูญหายเพราะเป็นข้อมูลในอดีต ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ จากการทดลองพบข้อมูลรูปแบบนี้จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการส่งข้อมูลที่ถี่เกินไปจนเกตเวย์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้ทัน ถึงแม้อุปกรณ์จะส่งโดยตรงตามข้อกำหนดของ AS923 แล้วก็ตาม อาจเป็นเพราะความหนาแน่นของการส่งผ่านข้อมูลในบริเวณนี้มากเกินกว่าที่เกตเวย์จะรับได้ สำหรับกรณีแรกนี้มีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จที่ 20% เท่านั้น

6.3.2 ทดสอบส่งข้อมูลทุกๆ 15 นาที

ในการทดลองถัดมาจะทำการส่งข้อมูลเหมือนกรณีแรกแต่จะทำการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์จำนวน 4 ตัวเป็นเวลา 1 วัน และส่งข้อความทุกๆ 15 นาที พบว่ามีอัตราการส่งข้อสำเร็จที่สูงโดยตรวจสอบจากฐานข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในระบบ (PSR) และไม่เกิดการ Lag หรือการส่งข้อมูลล่าช้าเกิดขึ้น พบเพียงการตกหล่นของข้อมูลบางตัว ดังรูปที่ 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

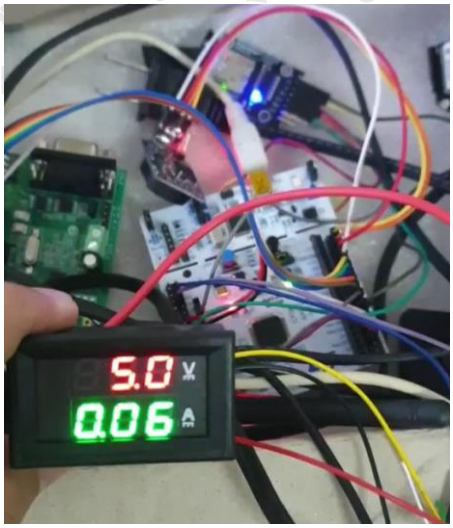
| M_ID | stat | pos | missseq | totseq | seq | trid |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 95.7879 | 85 | 2018 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 95.2381 | 96 | 2016 | 2 | 1 |
| 3 | 0 | 95.7874 | 84 | 1994 | 0 | 2 |
| 4 | 2 | 95.7852 | 84 | 1993 | 0 | 2 |

รูปที่ 59 อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลของ AMR

โดยทั้ง 4 ตัวมีอัตราการส่งข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน โดยอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จโดยเฉลี่ย (PSR) จะอยู่ที่ 95.65%

## 6.3 การทดสอบการส่งข้อมูลตอนไฟฟ้าดับ

เมื่อเกิดไฟฟ้าดับ AMR ต้องมีไฟเลี้ยงพอช่วงหนึ่งเพื่อส่งข้อมูล Last Gasp แจ้งเตือนว่าเกิดเหตุไฟดับเป็นครั้งสุดท้าย ซึ่งได้ทำได้โดยการถอดแหล่งจ่ายไฟของมิเตอร์ AMR เพื่อทดสอบ โดย SPM33สามารถตรวจจับแหล่งจ่ายไฟที่หายไปได้ แล้วเตรียมส่งข้อมูลผ่าน RAK811 เพื่อแจ้งเตือนแก่ Network Server โดยในสภาวะที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟนี้ จะให้แหล่งจ่ายไฟจากวงจรการคายประจุของ Super Capacitor โดยจากการทดสอบอุปกรณ์ AMR จะกินกระแสอยู่ที่ 0.05-0.07 mA ซึ่งสามารถหน่วงไฟแหล่งจ่ายจนเพียงพอต่อการส่งข้อความ Last Gasp เป็นครั้งสุดท้ายได้ ดังรูปที่ 60



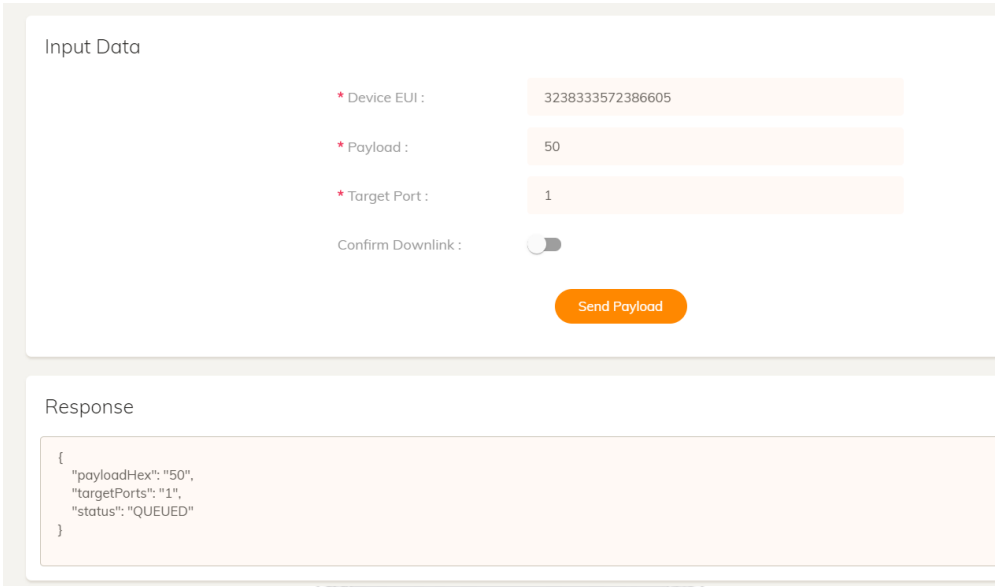

รูปที่ 60 การจ่ายไฟโดย Super Capacaitor

## 6.4 การทดสอบ Downlink จาก Network Server และไฟล์ API

ในการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจการส่งข้อความเพื่อทำการ Poll ค่าสถานะของอุปกรณ์ AMR ในระบบโดยจะทำการทดสอบผ่าน 2 วิธี

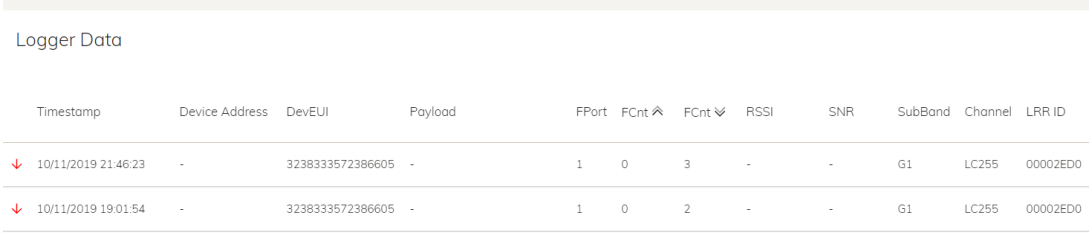
6.4.1 ทดสอบ Downlink ผ่าน Network Server

ใน Network Server ของ CAT จะมีส่วนให้ทดสอบการส่งข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 61




รูปที่ 61 การทดสอบ Downlink ผ่าน CAT Networkserver

ซึ่งถ้าข้อมูลที่ใส่ถูกต้องก็จะส่ง Response ตอบที่ด้านล่างและขึ้นสถานะ QUEUED เพื่อรอการส่งข้อมูล โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดการส่งข้อความ ‘50’ เพื่อเป็นการขอข้อมูลจาก AMR ณ เวลาปัจจุบัน และจะแสดงขึ้นใน Logger ดังรูปที่ 62




รูปที่ 62 หน้าจอ Logger แสดงข้อมูล Downlink

กรณีที่อุปกรณ์ได้รับข้อความจาก Network Server ก็จะส่งข้อความตอบกลับเป็นค่าสถานะและค่าวัดใน Payload

6.4.2 การส่ง Downlink ผ่าน API

จะทำโดยการส่งผ่านไฟล์ PHP ที่ทำการเขียนชื่อ api_testing.php เพื่อรับ Token เพื่อติดต่อกับ Network Server และการส่งข้อความ Downlink ตามหัวข้อที่ 4.2.4 ได้ผลดังรูปที่ 63

**ตัวอย่างข้อมูล token**


```
{
    "access_token": "d36df837-fc47-49b9-bfda-01c49c98fba3",
    "token_type": "bearer",
    "refresh_token": "7a4ace39-de66-42b3-bcad-7939eaa52d8e",
    "expires_in": 51910,
    "scope": "read trust write"
}
```


**ตัวอย่างข้อมูล downlinkMessages**

- Device EUI :
- Payload : 50
- Target Port : 1;

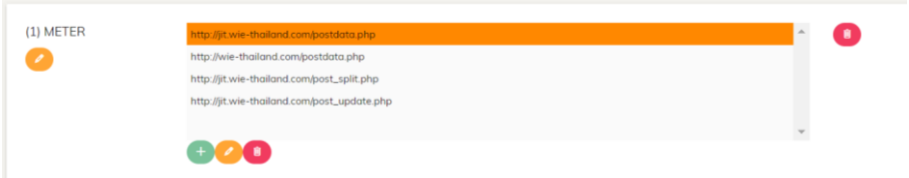

```
{
    "payloadHex": "50",
    "targetPorts": "1",
    "status": "QUEUED"
}
```


รูปที่ 63 แสดงตัวอย่างการส่ง Downlink ผ่าน Web Application

## 6.5 ทดสอบการจัดเก็บฐานข้อมูลใน Database Server

Network Server จะทำหน้าที่ในการจัดการข้อมูลเบื้องต้น แต่การที่จะนำข้อมูลไปใช้งานต้องมีการส่งข้อมูลไปที่ Application Server โดยส่งข้อมูลผ่าน API POST ในข้อมูลรูปแบบ JSON ดังรูปที่ 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




รูปที่ 64 การตั้งค่า Routing Profile

โดยกำหนด URL ที่จะส่งข้อมูลไปดังรูป ซึ่งปลายทางจะเป็นไฟล์ PHP ที่เขียนเพื่อรับข้อมูล JSON ดังกล่าว

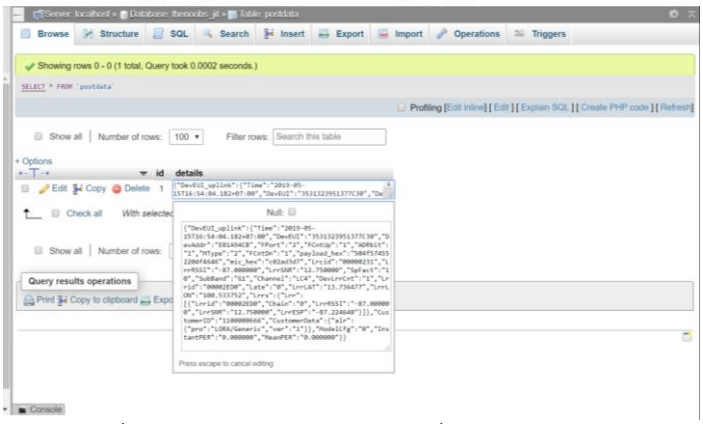
```php
# Get JSON as a string
$json_str = file_get_contents('php://input');

# Get as an object
$json_obj = json_decode($json_str);

if(!isset($json_str) || empty($json_str)) {

    $json_str = "no data";
}
```

รูปที่ 65 การเขียนรับค่า JSON API จาก Network Server


```
{
    "DevEUI_uplink": {
        "Time": "2019-11-08T23:24:22.938+07:00",
        "DevEUI": "3238333572386605",
        "DevAddr": "E01A0761",
        "FPort": "1",
        "FCntUp": "0",
        "ADRbit": "1",
        "MType": "2",
        "FCntDn": "0",
        "payload_hex": "11",
        "mic_hex": "a268144d",
        "Lrcid": "00000231",
        "LrrRSSI": "-110.000000",
        "LrrSNR": "-7.500000",
        "SpFact": "10",
        "SubBand": "G1",
        "Channel": "LC3",
        "DevLrrCnt": "1",
        "Lrrid": "00002E82",
        "Late": "0",
        "LrrLAT": "13.765064",
        "LrrLON": "100.528671",
        "Lrrs": {
```


รูปที่ 66 ตัวอย่าง Uplink JSON

ซึ่งข้อมูลนี้ได้ถูกส่งไปที่ Database Server เพื่อแยกและจัดเก็บข้อมูลลงตามตารางที่คัดแยกไว้อีกที และตรวจสอบได้จาก PHPMyAdmin ของ Database Server ที่ใช้งาน

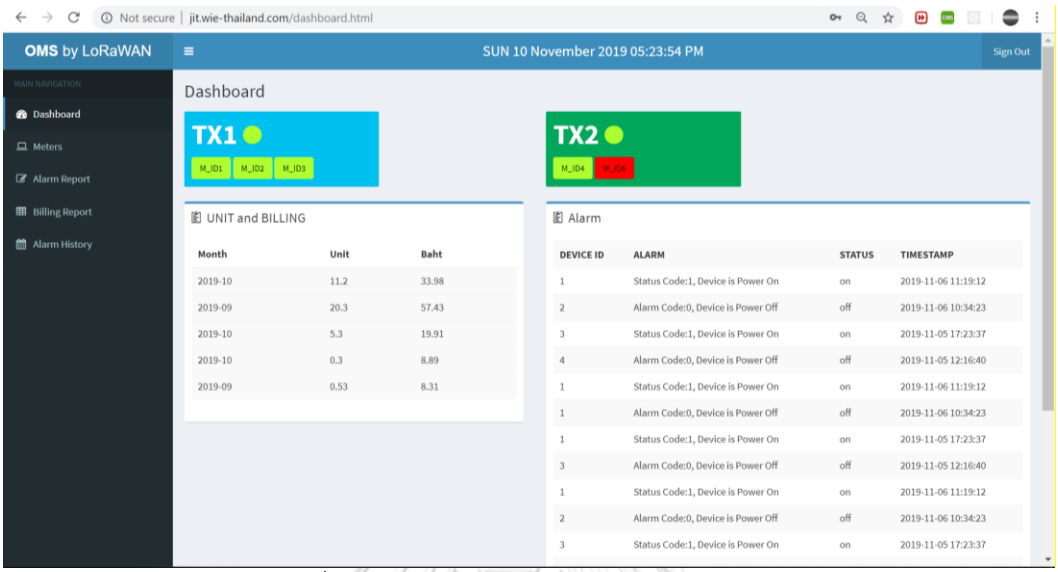



รูปที่ 67 ข้อมูล Uplink JSON ที่เก็บในฐานข้อมูล

### 6.6 การแสดงผลผ่านทาง Web Application

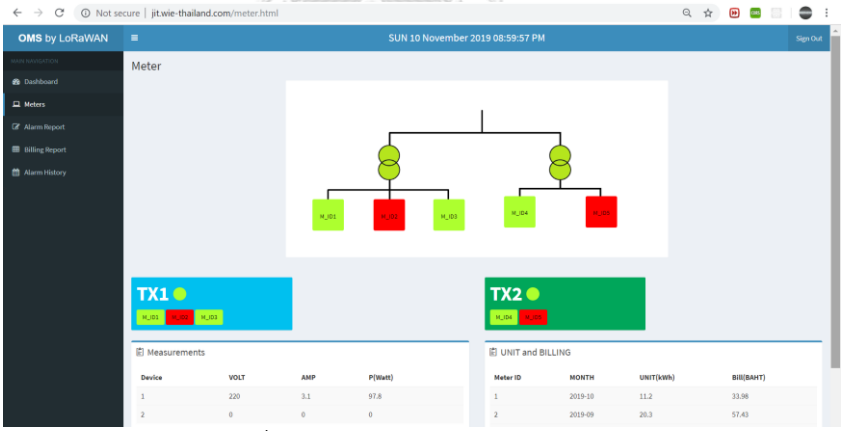
การใช้งาน Web Application สำหรับระบบจัดการไฟฟ้าดับและ LoRaWAN สามารถเข้าใช้งานได้ทาง http://jit.wie-thailand.com/index.html ที่ทำการอัพโหลดลงเซิฟเวอร์ไว้

6.6.1 Dashboard จะแสดงข้อมูลต่างๆ โดยบอกถึงรายละเอียดของค่าไฟรายเดือน สถานะของอุปกรณ์ และ Alarm ทั้งหมดของระบบ ดังรูปที่ 68



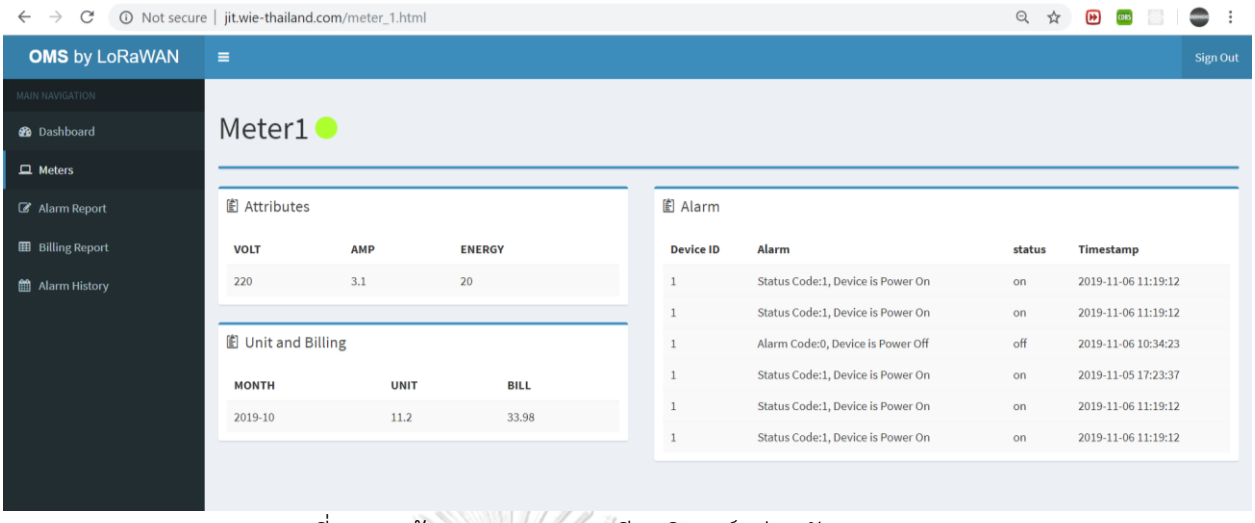

รูปที่ 68 Web Application หน้าจอ Dashboard

6.6.2 Meter เป็นหน้าจอเพื่อตรวจสอบรายละเอียดของมิเตอร์ของลูกค้าที่อยู่ในระบบ




รูปที่ 69 Web Application Meter

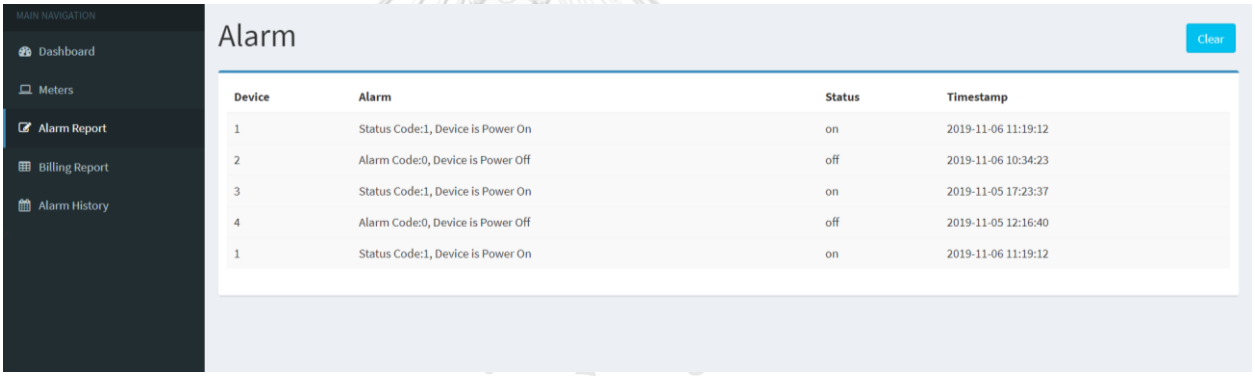
สามารถแสดงค่าวัดและสถานะต่างๆ ของอุปกรณ์มิเตอร์แต่ละตัวที่มีอยู่ในระบบ และบิลรายเดือนของลูกค้า โดยในหน้าจอนี้สามารถกดไปที่สัญลักษณ์ของมิเตอร์แต่ละตัวเพื่อแสดงสถานะเฉพาะของอุปกรณ์และ Alarm ของอุปกรณ์นั้นๆ




รูปที่ 70 หน้าจอแสดงรายละเอียดมิเตอร์แต่ละตัว

6.6.3 Alarm Report

จะแสดงข้อมูลของ Event Alarm ที่ยังรอการตอบรับ (Ack) ในระบบไฟฟ้า




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 71 หน้าจอแสดง Alarm Event

ซึ่งเมื่อกดปุ่ม Clear ทางขวาบนก็จะเปลี่ยนสถานะของ Alarm เป็นได้รับการ Ack เรียบร้อย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะในไปบันทึกในตารางของฐานข้อมูล

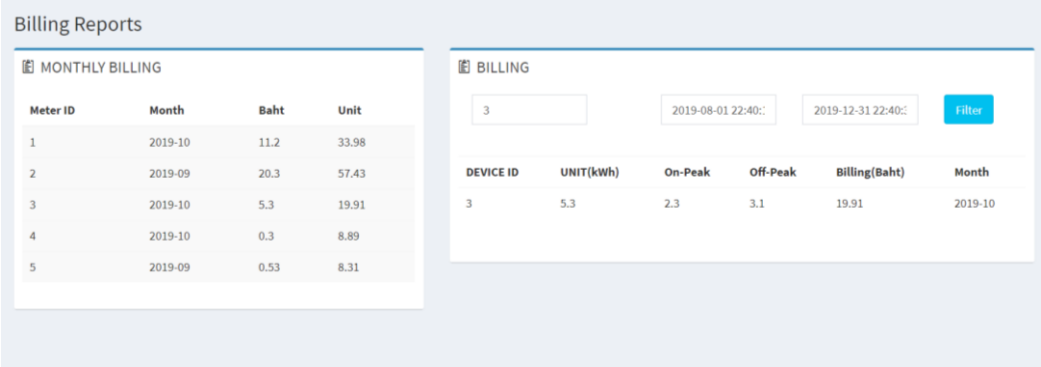
| ID | M_ID | alarm | ttime | clr |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 2019-11-06 11:19:12 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 2019-11-06 10:34:23 | 0 |
| 3 | 3 | 1 | 2019-11-05 17:23:37 | 0 |
| 4 | 4 | 0 | 2019-11-05 12:16:40 | 0 |
| 5 | 1 | 1 | 2019-11-06 11:19:12 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 2019-11-06 10:34:23 | 1 |

| ID | M_ID | alarm | ttime | clr |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 2019-11-06 11:19:12 | 1 |
| 2 | 2 | 0 | 2019-11-06 10:34:23 | 1 |
| 3 | 3 | 1 | 2019-11-05 17:23:37 | 1 |
| 4 | 4 | 0 | 2019-11-05 12:16:40 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 2019-11-06 11:19:12 | 1 |

รูปที่ 72 การเปลี่ยนสถานะของการ ACK

6.6.4 Billing Report

แสดงรายละเอียดของค่าไฟของลูกค้าทั้งหมดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งสามารถใช้งานในการหาข้อมูลเฉพาะเจาะจงของลูกค้าหรือวันเวลาที่ต้องการได้



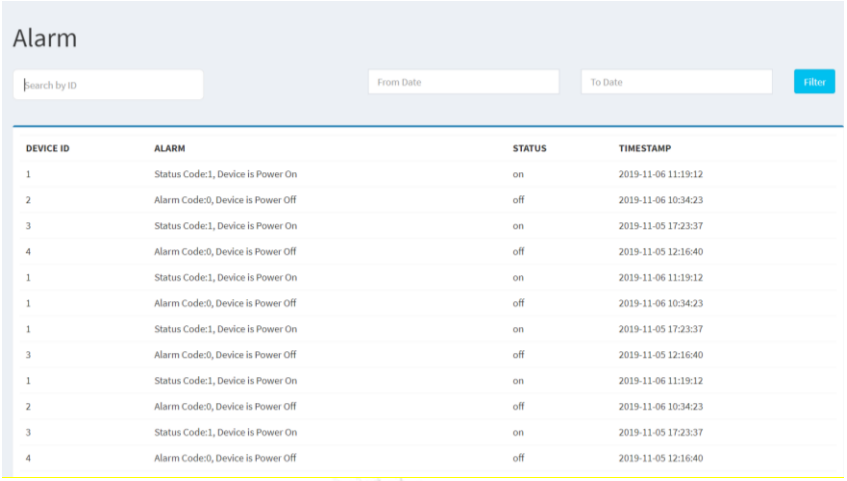

รูปที่ 73 หน้าจอแสดงค่าไฟของลูกค้า

ซึ่งข้อมูลที่มาคำนวณจะมาจากพลังงานที่อ่านได้จากมิเตอร์ AMR ที่เป็นค่าสะสมโดยรวมจากทั้งหมด เมื่อข้อมูลพลังงานถูกส่งมาก็จะทำการหักลบกับข้อมูลเดิมเพื่อหาค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นที่แท้จริง ซึ่งการคำนวณทั้งหมดจะทำผ่านไฟล์ตระกูล PHP ที่ทำไว้เพื่อคำนวณค่าโดยเฉพาะ ก่อนจะนำไปบันทึกไว้ในตารางของฐานข้อมูล

6.6.5 Alarm History

แสดงข้อมูลของ Alarm ทั้งหมดที่มีในระบบ และสามารถเลือกค้นหาจากฐานข้อมูลโดยใช้ MID หรือวันเวลาที่ต้องการ โดยข้อมูลของ Alarm จะนำข้อมูลมาจากข้อความจาก AMR ที่ส่งมาทาง LoRaWAN โดยกำหนดผ่านทาง Payload สองตัวแรกของ Payload นั้นๆ ตามรูปที่ 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

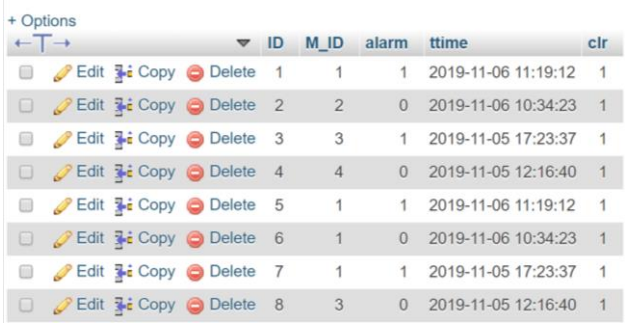



รูปที่ 74 หน้าจอแสดงประวัติ Alarrm

ซึ่ง Alarm จะถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูล โดยข้อความ Payload จะมี port ที่กำหนดประเภทที่จะเป็นตัวแบ่งแยกประเภทของ Alarm โดยจะแบ่งออกมาเป็น 4 ประเภท ซึ่งจัดเก็บในฐานข้อมูลดังรูปที่ 75

- Restore หรือ Power On จะเป็นสถานะที่จะส่งมาเมื่อไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้ตามปกติหรือ AMR เริ่มทำงาน
- Power Off เป็นสถานะแจ้งว่าเกิดเหตุไฟฟ้าดับที่ AMR ซึ่งจะเป็นการส่ง Last Gasp ของ AMR ลูกค้า
- Normal เป็นการส่งข้อความตามคาบเวลาที่กำหนด ข้อความประเภทนี้จะไม่ถูกบันทึกใน Alarm เพราะเป็นการส่งข้อมูลปกติ
- Poll เป็นการตอบข้อความจากการ Poll จากทาง Application Server

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 75 ฐานข้อมูลเก็บประวัติ Alarm

## 6.7 ผลทดสอบระบบจัดการไฟฟ้าดับ

การทดสอบระบบจัดการไฟฟ้าดับของ Web Application จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

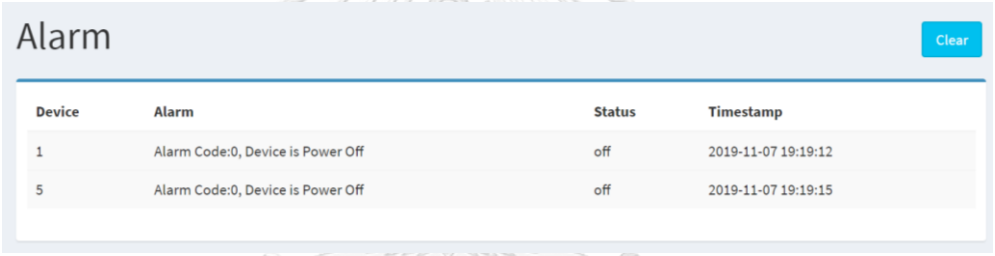
6.7.1 ตัวอย่างกรณีไฟฟ้าดับเหตุการณ์ที่ 1

เกิดเหตุไฟฟ้าดับในระบบที่มีหม้อแปลงจำนวน 2 ตัวและมีมิเตอร์ AMR จำนวน 5 ตัว

ตารางที่ 11 ตารางตัวอย่างเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกรณีที่ 1

| Actual Fault | Input (MID) | Meters to be Polled (PSR) | Possibly Outage Transformer |
|---|---|---|---|
| **TrID 1, MID5** | MID1, MID5 | 2 (PSR:95)<br>3 (PSR:94)<br>4 (PSR:97) | 1, 2 |

มีข้อมูลจากมิเตอร์เป็นข้อความ Last Gasp ของ MID 1 และ 5 ตามตารางที่ 11 และมี Alarm แสดงดังรูปที่ 76




รูปที่ 76 Alarm Event ที่เข้ามาในระบบ

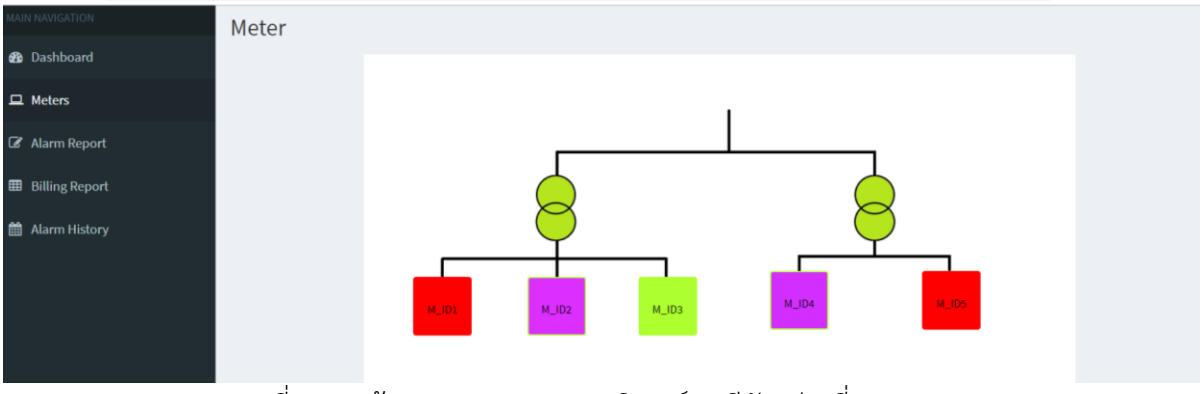
6.7.1.1 ตรวจสอบตำแหน่งเกิดไฟฟ้าดับ

จากข้อมูลดังกล่าวจะได้ว่า MID 1 และ 5 มีโอกาสเกิดเหตุไฟฟ้าดับแบบลูกค้ารายเดียวทั้งคู่ และสามารถเกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์หม้อแปลงเกิดเหตุไฟฟ้าดับได้อีกคือ TrID1 และ TrID2 จึงต้องทำการยืนยันสถานะไฟดับดังกล่าว

6.7.1.2 ตรวจสอบสถานะโดยการ Poll

ทำการตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ในระบบโดยการ Poll AMR ข้างเคียงภายใต้หม้อแปลงไฟฟ้าเดียวกัน โดยเลือก AMR ที่มีค่า PSR สูงสุดที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล จากตารางที่ 17 จะต้อง Poll MID หมายเลข 2 และ 4 เพื่อยืนยันสถานะดังกล่าวตามรูปที่ 77

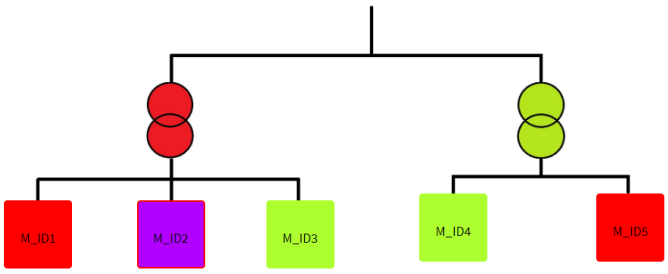
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

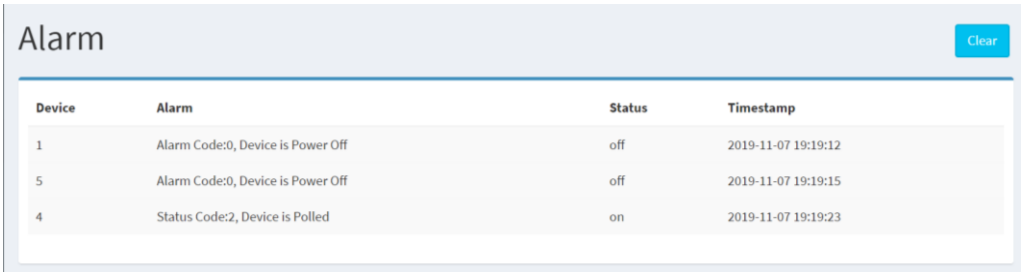



รูปที่ 77 หน้าจอแสดงสถานะของมิเตอร์กรณีตัวอย่างที่ 1

6.7.1.3 ยืนยันขอบเขตการเกิดไฟดับ

ในกรณีนี้มีการตอบกลับจาก AMR หมายเลข 4 (MID4) ว่าสถานะปกติ ซึ่งแสดงว่าการเกิดไฟดับที่ MID หมายเลขเป็นไฟฟ้าดับของลูกค้าเพียงรายเดียว แต่ในการ Poll AMR หมายเลข 2 (MID2) ไม่มีการตอบกลับจากอุปกรณ์ จึงอนุมานได้ว่า AMR หมายเลข 2 (MID2) อาจเกิดเหตุไฟดับ จากอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับและแผนภูมิต้นไม้ เมื่อมีอุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้โหนดเดียวซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลงหมายเลข 1 (TrID1) เกิดไฟฟ้าดับเกิดไฟฟ้าดับตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป (MID1 และ MID2) โหนดร่วมของอุปกรณ์นั้นจะเป็นจุดที่เกิดไฟฟ้าบกพร่องทำให้อุปกรณ์หม้อแปลงหมายเลข 1 (TrID1) เป็นจุดที่เกิดไฟฟ้าผิดพร่องในระบบ ตามรูปที่ 78

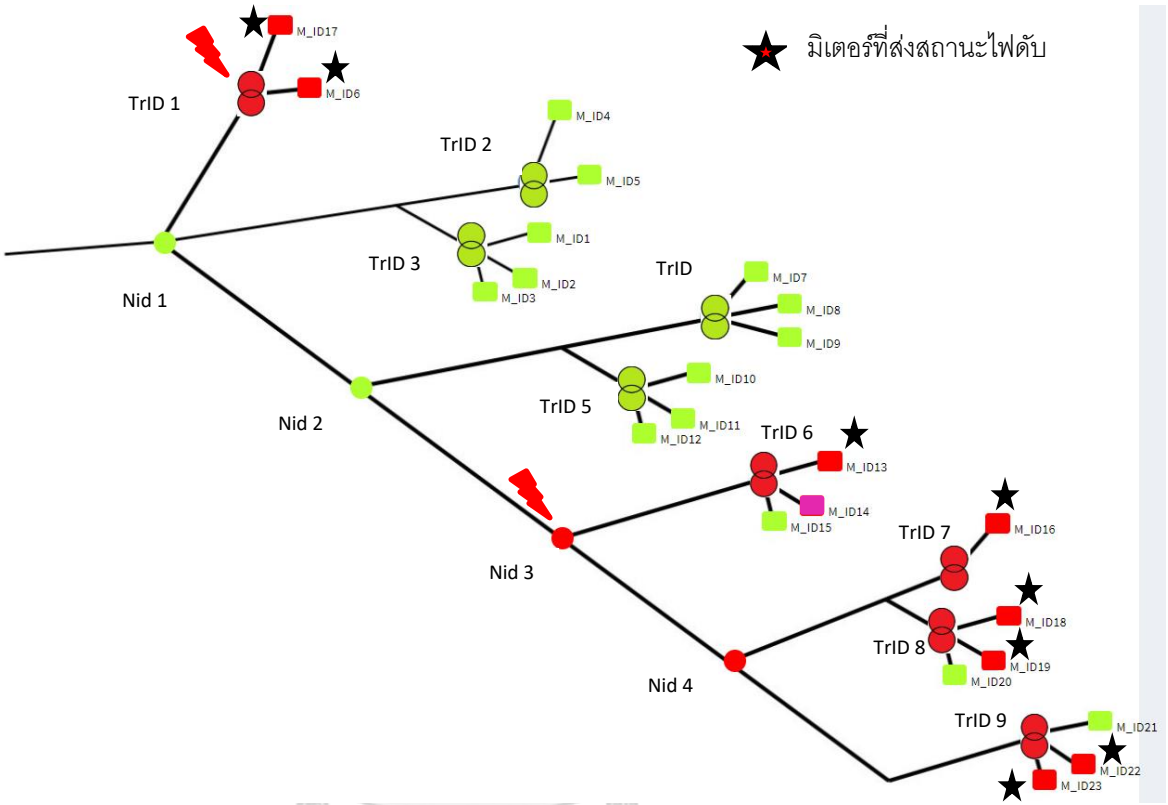



รูปที่ 78 แสดงสถานะมิเตอร์และ Alarm หลังการ Poll

จากข้อสรุปดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าเกิดเหตุไฟดับที่เวลาไล่เลี่ยกันจำนวน 2 ตำแหน่งคือที่ AMR ของลูกค้า MID 5 และที่ตำแหน่งหม้อแปลง 1 ซึ่งสรุปเหตุการณ์ดังกล่าวทั้งหมดได้ในตารางที่ 11

6.7.2 ตัวอย่างกรณีไฟฟ้าดับเหตุการณ์ที่ 2




รูปที่ 79 หน้าต่าง Overview แสดงเหตุการณ์เกิดไฟฟ้าดับกรณีที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จะเป็นการจำลองการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับผ่านหน้าต่าง Overview ของ Web Application ระบบจัดการไฟฟ้าดับ โดยได้จำลองระบบไฟฟ้าและอัลกอริธึมเอาไว้ โดยเกิดเหตุไฟฟ้าดับภายในระบบที่มีหม้อแปลงจำนวน 9 ตัวและมี AMR ทั้งหมด 23 ตัว ตามรูปที่ 79 เกิดเหตุผิดพร่องทางระบบไฟฟ้าที่อุปกรณ์ 2 จุดคือ ที่หม้อแปลงหมายเลข 1 (TrID 1) และ โหนดหมายเลข 3 (Nid 3) โดยได้รับข้อมูลจาก AMR ตามตารางที่ 12 ต่อไปนี้

ตารางที่ 12 ข้อมูลเหตุการณ์ไฟฟ้าดับกรณีที่ 2

| Actual Fault | Input (MID) | Meters to be Polled (PSR) | Possibly Outage Transformer | Possibly Fault Node |
|---|---|---|---|---|
| **Nid 3, TrID 1** | 6,13,16,17,18,19,22,23 | 14 (PSR:93)<br>or<br>15 (PSR:90) | 1, 7, 8, 9 | 4 |

6.7.2.1 ตรวจสอบตำแหน่งเกิดไฟฟ้าดับ

จากข้อมูลที่ได้รับมามีการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับ (Input) ตามตารางที่ 18 ซึ่งจากการใช้อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับจะสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์หรือโหนดที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีจุดบกพร่องได้แก่ หม้อแปลงหมายเลข (TrID) 1, 7, 8, 9 และโหนดที่ (Nid) 4 แต่จะมีอุปกรณ์ AMR ที่ต้องตรวจสอบว่าเป็นไฟฟ้าดับของลูกค้าเพียงรายเดียวหรือไม่ที่ AMR หมายเลข (MID) 13

6.7.2.2 ตรวจสอบสถานะโดยการ Poll

เพื่อเป็นการตรวจสอบข้อมูลดังกล่าวจึงต้องต้องทำการ Poll อุปกรณ์ AMR ข้างเคียงในระดับเดียวกัน ได้แก่ AMR หมายเลข (MID) 14 และ 15 แต่เนื่องจาก AMR หมายเลข (MID) 14 มีค่า PSR ที่มากกว่าจึงทำการ Poll อุปกรณ์ AMR หมายเลข (MID) 14 นี้ ซึ่งมีการส่งข้อมูลกลับมาว่ามีการเกิดไฟฟ้าดับเกิดขึ้น

6.7.2.3 ยืนยันขอบเขตการเกิดไฟดับ

จากข้อมูลทั้งหมดจึงคาดการณ์ได้ว่าหม้อแปลงหมายเลข 6 (TrID 6) อาจเป็นจุดเกิดไฟฟ้าบกพร่องได้ แต่เมื่อไล่ดูจากข้อมูลขึ้นไปพบว่าหม้อแปลงหมายเลข 6 (TrID 6) และโหนดหมายเลข (Nid) 4 มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ข้างบนคือโหนดหมายเลข (Nid) 3 ร่วมกัน จึงสรุปได้ว่าในเหตุการณ์นี้มีจุดผิดพร่องทางระบบไฟฟ้า 2 จุด ได้แก่ โหนดหมายเลข (Nid) 3 และหม้อแปลงหมายเลข (TrID) 1

6.7.3 ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการขั้นบันไดและอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับ

ปกติแล้วการหาจุดผิดพร่องไฟฟ้าดับโดยวิธีการขั้นบันไดโดยทั่วไปจากตัวอย่างที่ 2 จะทำการหาจุดผิดพร่องร่วมของอุปกรณ์ไล่ขึ้นไปจนหยุดเมื่อหาจุดร่วมของอุปกรณ์ทั้งหมดได้เท่านั้น ทำให้กรณีนี้อุปกรณ์ที่สาเหตุไฟฟ้าดับจะมีเพียงอุปกรณ์เดียวคือโหนดหมายเลข 1 (Nid

1) ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากอัลกอริธึมข้างต้น ที่จะมีจุดผิดพร่องของระบบไฟฟ้าดับ 2 จุด ซึ่งเปรียบเทียบได้ตามตารางที่ 13

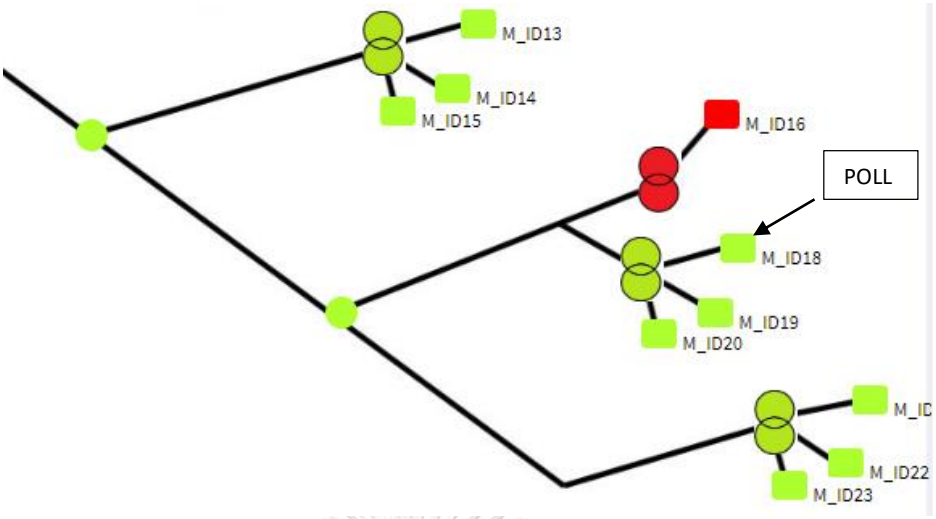
ตารางที่ 13 ผลลัพธ์ของอัลกอริธึมไฟฟ้าดับและวิธีการขั้นบันได

| | วิธีการขั้นบันได | อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับ |
|---|---|---|
| จุดผิดพร่องไฟฟ้าดับ | Nid 1 | Trid1, Nid3 |

ซึ่งข้อแตกต่างดังกล่าวมีผลอย่างมากต่อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ในกรณีที่เกิดไฟฟ้าดับหลายจุด เช่น กรณีตัวอย่างที่ 2 การวิเคราะห์แบบวิธีการขั้นบันไดจะพิจารณากรณีนี้เป็นรูปแบบ Over Escalation ทันที ทำให้มีโอกาสสูงที่จะไม่สามารถหาจุดที่ผิดพร่องที่แท้จริงได้ถ้าเกิดจุดผิดพร่องพร้อมกันหลายจุด ซึ่งกรณีตัวอย่างนี้อาจเกิดได้จากเหตุการณ์เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง แต่การใช้อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับดังกล่าวก็อาจเกิดข้อผิดพลาดได้ถ้าอุปกรณ์ภายใต้หม้อแปลงหรือโหนดอื่นๆ ไม่สามารถส่งข้อมูลที่จำเป็นได้เพียงพอ อาจส่งผลให้การวิเคราะห์ผิดพลาด เช่น จากกรณีตัวอย่างที่ 2 เกิดจุดผิดพร่องทางไฟฟ้าดับเป็นโหนดที่ 1 (Nid1) จริงๆ แต่อุปกรณ์ที่สามารถส่งข้อมูลมาได้มีเพียงตามรูปที่ 79 ก็จะทำให้วิเคราะห์จุดที่เกิดจุดผิดพร่องพลาดเช่นกัน

ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างกันคือรูปแบบการ Poll ในอัลกอริธึม Polling ตามปกติจะมีการวิเคราะห์จำนวน Link หรือจำนวนเส้นทางการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เข้ามาคำนวณด้วย ยกตัวอย่างตามกรณีที่ 2 ที่มิเตอร์หมายเลข 16 (Mid16) ที่มีการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับมา กรณีที่เป็นไฟฟ้าดับจากลูกค้ารายเดียวแล้ว ตามวิธีการ Polling จะทำการตรวจสอบมิเตอร์ที่มีจำนวน Link หรือเส้นทางการเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดในการ Poll ด้วยจำนวน 1 ตัว ในกรณีนี้คือมิเตอร์หมายเลข 18 19 20 (Mid 18,19,20) ตามรูปที่ 80 แต่ในอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับนี้จะไม่คำนวณตรงส่วนนี้ไปเพราะจะมุ่งเน้นการหาจุดผิดพร่องโดยมุ่งเน้นไปที่หม้อแปลงเป็นหลัก จะไม่ทำการ Poll ไปที่อุปกรณ์อื่นนอกจากหม้อแปลงนั้นๆ และคิดกรณีดังกล่าวเป็นไฟฟ้าดับรายเดียว เพราะต้องการลดมิเตอร์ที่ต้องถูก Poll ไปให้ได้มากที่สุด เนื่องจากข้อจำกัดของ LoRaWAN และอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ว่าอุปกรณ์มิเตอร์ภายใต้หม้อแปลงอื่นสามารถส่งข้อมูลการแจ้งเตือนไฟฟ้าดับได้ตามปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 80 การใช้งานอัลกอริธึม Polling และมิเตอร์ที่ถูก Poll

แต่ทั้งนี้ในการวิเคราะห์และหาสาเหตุของระบบไฟฟ้าดับก็ขึ้นอยู่กับผู้สั่งการหรือผู้ใช้งานที่จะพิจารณาและตัดสินใจเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพ โดยในสถานการณ์จริงอาจมีการนำข้อมูลจากแหล่งอื่นๆ มาประกอบในการตัดสินใจ เช่น การแจ้งเตือนจากลูกค้า หรือสถานการณ์หน้าสถานที่จริงจากช่างไฟฟ้า และประสบการณ์ในการทำงานมาประกอบเพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าดับโดยใช้อัลกอริธึมดังกล่าวจึงเป็นแค่ข้อมูลประกอบการตัดสินใจอย่างหนึ่งสำหรับผู้ที่ดูแลระบบไฟฟ้าเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# 7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 ประสิทธิภาพในการส่งของ LoRa และ LoRaWAN

จากการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการส่งของ LoRa จากการทดลองแรกจะสรุปได้ว่าความสามารถในการส่งข้อมูลของ LoRa มีประสิทธิภาพที่ดีอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จมากกว่า 90% แม้จะส่งข้อความในอัตราที่ถี่มากๆ และสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะทางที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตรได้ แต่มีปัญหาหลักๆ ในการส่งข้อมูลผ่านตึกหรือสิ่งก่อสร้างที่จะทำให้ลดประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเป็นอย่างมาก ทำให้บางกรณีไม่สามารถส่งข้อมูลได้อย่างที่ควรจะเป็น เพราะฉะนั้นการใช้งานในเขตเมืองที่มีอาคารหนาแน่นจำเป็นต้องวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่เหมาะสม การติดตั้งอุปกรณ์อย่างตัวภาครับก็ควรติดตั้งในสถานที่ที่มี Line of Sight (LoS) ไม่มีสิ่งก่อสร้างบดบัง

ส่วนกรณีการใช้งานแบบ LoRaWAN ที่ในการทดลองนี้ทดสอบกับ เกตเวย์ และ Network Server ของ CAT Telecom โดยเกตเวย์ของ CAT Telecom ติดตั้งที่ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดองนี้ได้ทดสอบส่งข้อมูลในระยะ 1 กิโลเมตรด้วย DR2 ในการทดลองนี้ไม่พบปัญหาเรื่องระยะทางหรือประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเพราะอุปกรณ์เพราะเกตเวย์ติดตั้งด้วยอุปกรณ์และตำแหน่งที่เหมาะสม แต่กรณีที่ส่งข้อมูลด้วยความถี่ที่มากๆ เช่น ทุกๆ 1 นาที จะเกิดการ Lag ของข้อมูลเกิดขึ้น หรือการส่งข้อมูลในอดีตย้อนหลัง ทั้งนี้เกิดจากการจัดการข้อมูลของเกตเวย์ได้รับข้อมูลที่ส่งจากอุปกรณ์ End Device จำนวนมาก และต้องจัดเรียงคิวในการส่งข้อมูล กรณีที่อุปกรณ์บางตัวมีการส่งข้อมูลที่ถี่เกินไป ข้อมูลบางอย่างจะยังไม่ถูกส่งแต่จะทำการเข้าคิวข้อมูลนั้นเอาไว้ และส่งข้อมูลในปัจจุบันก่อน จนเมื่อทราฟฟิคว่างเพียงพอแล้วจึงเริ่มการส่งข้อมูลย้อนหลังดังกล่าว ทำให้เกิดอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลที่ต่ำเนื่องจากข้อมูลดังกล่าวถือเป็นข้อมูลที่สูญหายของระบบ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะเวลาระหว่างการส่งข้อมูลที่มากขึ้น ดังในการทดสอบที่ทดลองส่งข้อมูลทุกๆ 15 นาทีแทนพบว่าไม่พบการ Lag ของข้อมูลเลย มีเพียงข้อมูลที่ส่งไม่สำเร็จบางส่วนที่มีน้อยมาก และอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จสูงถึง 95.65%

จากการทดลองประสิทธิภาพของ LoRa และ LoRaWAN ทั้งหมดจะสรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของ LoRa และ LoRaWAN มี 2 ส่วนสำคัญได้แก่

1. เรื่องของ LoS หรือ เส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง ดังในการทดสอบ LoRa ที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ถึงแม้อุปกรณ์จะอยู่ในระยะที่สามารถส่งข้อมูลได้ แต่การไปอยู่ภายใต้อาคารที่มีสิ่งกีดขวางหลายชั้น จะส่งผลให้อุปกรณ์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้

ตามที่ควรจะเป็น ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์หรือการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมดังที่การทดสอบด้วย LoRaWAN ไม่พบปัญหาดังกล่าว

2. ความถี่ในการส่งข้อมูลของ LoRaWAN เนื่องจากการใช้งาน LoRaWAN เป็นการใช้งานในย่านความถี่ที่ไม่มีกรรมสิทธิ์ และใช้เกตเวย์ของ CAT Telecom ที่เป็นการใช้งานร่วมกับผู้อื่น ทำให้การส่งข้อมูลที่ถี่มากจนเกินไปจะเกิดปัญหาทราฟฟิคของข้อมูล จนข้อมูลไม่สามารถส่งได้อย่างที่ควรจะเป็น ต่างจากการส่งข้อมูลด้วย LoRa ที่เป็นการส่งข้อมูลแบบตัวต่อตัว (Point to Point) ไม่ได้มีการใช้งานร่วมกับผู้อื่น ทำให้อัตราความถี่ในการส่งข้อมูลส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งโดยรวมของระบบนั้นมีค่าที่น้อย ซึ่งปัญหาเหล่านี้แก้ไขได้โดยการลดความถี่ในการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ End Device หรือในแง่ของผู้ให้บริการ Network Server ก็สามารถเพิ่มจำนวนเกตเวย์ในระบบก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของ LoRaWAN ดียิ่งขึ้น

7.1.2 การใช้งาน LoRaWAN และ AS923 Specification

ในการใช้งาน LoRaWAN ตามแต่ละภูมิภาคจะมีข้อตกลงร่วมกันหรือ Specification และการตั้งค่าพารามิเตอร์ตามที่กำหนดของแต่ละภูมิภาค โดยในประเทศไทยมีสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) เป็นผู้กำหนดหลักเกณฑ์ดังกล่าว โดยให้ใช้ย่านความถี่ที่ AS923 (Region Parameter) ซึ่งหลักเกณฑ์ดังกล่าวผู้ใช้งาน LoRaWAN ทั้งหมดพึงทำตาม แต่ทั้งนี้การตั้งค่าบางอย่างก็ขึ้นอยู่กับผู้ให้บริการ Network Server ที่ใช้งานเช่นกัน บางกรณีผู้ให้บริการ Network Server บางเจ้าจะกำหนดข้อตกลงเพิ่มเติมในการใช้งาน เช่น กำหนดคลาสของอุปกรณ์ที่จะใช้งานหรือจำนวน Downlink ที่จะส่งได้แต่ละวันเพิ่มเติม นอกเหนือจากข้อกำหนดข้างต้น

ซึ่งในการใช้งาน Netork Server ของ CAT Telecom นั้นไม่ได้มีข้อกำหนดใดๆ เพิ่มเติมนอกเหนือไปจากข้อกำหนดของภูมิภาค AS923 แต่พบปัญหาในการใช้งานเมื่อส่งข้อมูลที่มีความถี่มากเกินไป จนเกิดการต่อคิวของข้อมูลทำให้มีการส่งข้อมูลย้อนหลังเกิดขึ้น (lag) ทั้งนี้ผู้ใช้งานควรต้องพิจารณาความเหมาะสมและแก้ไขการทำงานเบื้องต้นให้ส่งข้อมูลอย่างเหมาะสม เพราะถึงแม้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน AS923 แล้ว การใช้งานจริงอาจไม่สามารถทำได้ตามมาตรฐานนั้นๆ หรือผู้ใช้งานและผู้ให้บริการควรหาข้อตกลงเพิ่มเติมในการใช้งาน Network Server เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว

7.1.3 อัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับและการหาจุดผิดพร่องในระบบไฟฟ้า

จากผลการทดลองอัลกอริธึมการจัดการระบบไฟฟ้าดับพบว่าสามารถนำงานมาใช้งานร่วมกับ AMR ที่มีความสามารถในการส่ง Last Gasp ได้และการส่งข้อมูลทางไฟฟ้าโดยใช้ LoRaWAN ก็สามารถแจ้งเหตุการณ์ทางไฟฟ้าและข้อมูลรายคาบได้อย่างเหมาะสม โดยมุ่งเน้น

ให้ส่งข้อมูลเท่าที่จำเป็นและลดการ Poll ของอุปกรณ์ในระบบลง แต่ทั้งนี้ก็แลกกับประสิทธิภาพในการคาดการณ์ที่ลดลงในบางสถานการณ์ถ้าอุปกรณ์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้เพียงพอ ยกตัวอย่างจากกรณีไฟฟ้าดับแบบ Over Escalation ถ้าอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับดังกล่าวสามารถรับข้อมูลได้เพียงพอต่อการวิเคราะห์ ก็จะสามารถคัดแยกอุปกรณ์ที่ผิดพร่องในระบบไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน แต่กรณีข้อมูลที่ส่งมาไม่ครบถ้วนจะทำให้การคาดการณ์ผิดพลาดจากกรณีไฟฟ้าดับจากลูกค้าหลายส่วน เป็นไฟฟ้าดับส่วนบนแบบ Over Escalation แทน ทำให้การใช้งานอัลกอริธึมขั้นบันไดในกรณีนี้จะให้ผลที่ถูกต้องกว่า แต่เนื่องจากอัลกอริธึมที่ใช้งานมุ้งเน้นที่การทราบสถานะของอุปกรณ์ประเภทหม้อแปลงเป็นหลัก จึงสามารถลดการ Poll อุปกรณ์นอกเหนือจากหม้อแปลงนั้นๆ ลงไปได้ และการ Poll ยังเป็นการยืนยันสถานะของไฟฟ้าดับอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งสามารถตรวจสอบการเกิดไฟฟ้าดับแบบอนุกรม (Cascading Outage) ได้

7.1.4 การใช้งาน Web Application ร่วมกับระบบจัดการไฟฟ้าดับ

จากผลการทดสอบจะสรุปได้ว่า Web Application การจัดการไฟฟ้าดับที่ใช้เทคโนโลยี LoRaWAN สามารถปรับใช้งานกับอัลกอริธึมการจัดการไฟฟ้าดับที่มีอัลกอริธึมรูปแบบแผนผังต้นไม้ร่วมกับวิธีการ Poll ของอุปกรณ์ได้ และอุปกรณ์ AMR ที่พัฒนาร่วมกับการสื่อสาร LoRaWAN สามารถใช้งานในการส่งข้อมูลให้แก่ Application Server ได้ ที่ย่านความถี่ AS923 และตั้งค่า LoRaWAN ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยผ่าน Network Server ของ CAT Telecom

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการคาดการณ์ไฟฟ้าดับนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและปริมาณของข้อมูลของการสื่อสาร LoRaWAN ที่สามารถป้อนเข้ามาในระบบได้ อาจมีบางกรณีที่การคาดการณ์ไฟฟ้าดับดังกล่าวไม่สามารถหาตำแหน่งที่ผิดพร่องได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากความผิดพลาดทางการสื่อสารจึงอาจต้องใช้ข้อมูลต่างๆ มาประกอบ เช่น ของมูลโทรศัพท์จากลูกค้าโดยตรง สภาพอากาศและภูมิศาสตร์หน้างาน และประสบการณ์ของผู้ใช้งานเพื่อให้ได้ความถูกต้องยิ่งขึ้น

ในการทดลองเองก็มีข้อจำกัดในการติดตั้งจำนวน AMR ที่มีเพียง 5 ตัวเท่านั้น ทำให้การทดสอบระบบจัดการไฟฟ้าดับบางส่วนต้องทดสอบร่วมกับการจำลองสถานการณ์โดยผสมข้อมูลจากทั้ง AMR และข้อมูลจากอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้น

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับได้ทำการพัฒนาอัลกอริธึมสำหรับจัดการไฟฟ้าดับโดยอ้างอิงจากวิธีการขั้นบันไดและการใช้ Polling ที่มุ่งเน้นในการหาอุปกรณ์ขัดข้องในระดับหม้อแปลงเป็นหลัก เพื่อลด

จำนวนอุปกรณ์ที่จะต้องส่งข้อมูลและให้เหมาะสมกับระบบโครงสร้างของเครือข่าย LoRaWAN แต่ก็มีบางกรณีถ้า AMR ของลูกค้าไม่สามารถส่งข้อมูลให้เพียงพอต่อการพิจารณาขั้นต้นก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งอุปกรณ์ที่ขัดข้องได้ ดังนั้นอาจใช้วิธีการอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นการแจ้งเตือนจากลูกค้า หรือสภาพอุปกรณ์และลักษณะสถานที่จริง ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าดับส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือประสบการณ์และความรู้ของผู้ใช้งานที่เป็นส่วนสำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว สำหรับการพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติโดย LoRaWAN เพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้นอาจทำได้โดยการเพิ่มประสิทธิของระบบจัดการไฟฟ้าดับ เช่น การเพิ่มเงื่อนไขของการแจ้งเตือนที่หม้อแปลง เมื่อมี AMR ของลูกค้าที่หม้อแปลงดังกล่าวเกิดไฟดับไปตามที่กำหนด หรือการนำการหาระบบไฟฟ้าดับแบบขั้นบันไดมาเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจร่วมกับอัลกอริธึมจัดการไฟฟ้าดับดังกล่าวเป็นต้น

ปัญหาอีกอย่างที่พบในการใช้งาน LoRaWAN คือ ระบบโครงข่ายและเกตเวย์ของ CAT Telecom ที่ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลบางส่วนได้ ทำให้การแก้ไขปัญหาและพัฒนาบางอย่างไม่สามารถทำได้ เช่น กรณีเกิดการส่งข้อมูลย้อนหลัง (Lag) ที่ไม่สามารถเข้าไปจัดการเกตเวย์หรือ Network Server แก้ไขปัญหาดังกล่าว และทั้งนี้ขนาดของการให้บริการโครงข่ายอาจยังไม่เพียงพอต่อความต้องการเมื่อใช้งานจริงเมื่อมีข้อมูลขนาดใหญ่ขึ้น ในการใช้งานจริงจึงควรทำการติดตั้งเกตเวย์ และพัฒนา Network Server ของตัวเอง เพื่อการง่ายต่อการบริหารจัดการและดูแลการสื่อสารของ Packet ในระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจัยสำคัญอีกอย่างของ LoRaWAN คือตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งจากการทดลองการส่งสัญญาณของ LoRa ที่มหาวิทยาลัยโตเกียวจะเห็นว่า ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์มีความสำคัญอย่างมาก การติดตั้งอุปกรณ์ในอาคารที่มีผนังกั้นหลายชั้นจะส่งผลต่อทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลลดลง แม้อุปกรณ์ตาม Specification จะระบุการใช้งานหลายกิโลเมตรก็ตาม ทำให้การใช้งาน LoRaWAN จึงติดตั้งในบริเวณที่มีเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight) ที่เหมาะสมเพื่อให้ส่งข้อมูลถึงเกตเวย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

# บรรณานุกรม


1. N. Sornin, A.Y., *"LoRa Specification 1.1", Lora Alliance Standard specification*. Oct. 2017.
2. *LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, LoRaWAN™ 1.1 Regional Parameters* Jan. 2015.
3. *ST Microelectronics, STPM32, STPM33, STPM34: ASSP for metering applications with up to four independent 24-bit 2nd order sigma-delta ADCs, 4 MHz OSF and 2 embedded PGLNA, datasheet*.
4. STMicroelectronics, *UM1724 User manual STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)*. 2019.
5. STMicroelectronics, *STM32L053C6 STM32L053C8 STM32L053R6 STM32L053R8 Datasheet.* 2019.
6. Shenzhen Rakwireless Technology CO., L., *RAK811 Lora Module Datasheet V1.4.* www.ralwireless.com, 2018.
7. Shenzhen Rakwireless Technology CO., L., *RAK811 Lora AT Command User Guide V1.4*. 2018, www.rakwireless.com.
8. Venganti, T., *OUTAGE MANAGEMENT VIA POWERLINE COMMUNICATION BASED AUTOMATED METER READING SYSTEMS* in *Electrical Engineering*. 2004, Mississippi State University. p. 86.
9. R. Fischer, A.L.a.N.S., *A General Polling Algorithm Using a Wireless AMR System for Restoration Confirmation*, in *IEEE Power Engineering Review*. 2001. p. 70-77.
10. Schulz, Y.L.a.N.N., *Knowledge-based system for distribution system outage locating using comprehensive information*, in *IEEE Transactions on Power Systems*. May 2002. . p. 451-456.


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ-สกุล** | จิตติวัชร์ สมุหศิลป์ |
| **วัน เดือน ปี เกิด** | 12 มกราคม 2535 |
| **สถานที่เกิด** | กรุงเทพมหานคร |
| **วุฒิการศึกษา** | สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวุศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาตร์ปี 2557 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต แขนงวิชา Smartgrid and Renewable Energy ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559 |
| **ที่อยู่ปัจจุบัน** | 18 ซ. ประชาอุทิศ 78 เขต/แขวง ทุ่งครุ กทม. |
| **ผลงานตีพิมพ์** | Development of an Automatic Meter Reading and Outage Management System using LoRaWAN Technology:2018 IEEE 5th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University