

ระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

นายพิทย ศุภนิรัตติศัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Smart agriculture monitoring and management system using IoT-enabled devices
based on LoRaWAN

Mr. Pittaya Supanirattisai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Cyber-Physical System

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN
โดย	นายพิทย ศุภนิรัติศัย
สาขาวิชา	ระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ณัฐพล ดำรงค์พลาสีทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล ดำรงค์พลาสีทธิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา พนมเชิง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.กิตติกุล โกวิททางกูร)

พิทย ศุภนิรติศัย : ระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN. (Smart agriculture monitoring and management system using IoT-enabled devices based on LoRaWAN) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ณัฐพล ดำรงค์พลาสิทธิ์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) ที่สามารถควบคุมตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยหลักการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรนี้ อุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งเซนเซอร์ (Sensor End Device) จะทำงานวัดค่าตัวแปรและส่งข้อมูลต่อไปยังตัวรับสัญญาณศูนย์กลาง (Gateway) ที่เปรียบเสมือนเป็นตัวกลางการสื่อสารกับระบบเน็ตเวิร์ก (Network Server) เพื่อให้ข้อมูลต่าง ๆ ถูกประมวลผลและแสดงผลในรายงานภาพรวมผ่านระบบคลาวด์ได้ถูกต้องตามสถานการณ์จริง จากนั้นคำสั่งในการเปิดปิดควบคุมตัวกระตุ้นจะถูกส่งกลับมายังอุปกรณ์ควบคุมตัวกระตุ้น (Actuator End Device) เพื่อทำงานปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงค่าตามที่ตั้งไว้ในเรื่องของระยะเวลาส่งสัญญาณ LoRa พบว่าระยะที่ไกลที่สุดที่อุปกรณ์ยังสามารถส่งสัญญาณไปถึงจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 300 - 1700 เมตร โดยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งอุปกรณ์ เสาส่งสัญญาณ ตำแหน่งที่ตั้ง การตั้งค่าการส่งสัญญาณ ไปจนถึงสัญญาณรบกวนในบริเวณนั้น ๆ เมื่อลองเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง Wi-Fi และ LoRa จะพบว่า นอกจาก LoRa จะมีระยะทางการทำงานที่ไกลกว่าแล้ว ในสถานะที่ระบบมีการทำงานส่งสัญญาณ พลังงานที่ LoRa ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าการส่งสัญญาณด้วย Wi-Fi ถึง 2.4 เท่า ส่วนการใช้พลังงานในสถานะที่ระบบรอการทำงานครั้งต่อไป ถ้าหากใช้บอร์ดที่ออกแบบมาเพื่อการประหยัดพลังงานโดยเฉพาะแล้วการสั่งให้บอร์ดอยู่ในโหมด Deep Sleep จะช่วยให้บอร์ดประหยัดพลังงานได้ถึง 3,330 เท่า เมื่อเทียบกับการที่บอร์ดอยู่ในสถานะการทำงานในโหมด Active ตลอดเวลา

สาขาวิชา ระบบกายภาพที่เชื่อมประสาน ลายมือชื่อนิสิต
ด้วยเครือข่ายไซเบอร์

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370364421 : MAJOR CYBER-PHYSICAL SYSTEM

KEYWORD: Smart farming, Precision agriculture, Internet of Things, IoTs, LoRa,
LoRaWAN, Node-RED

Pittaya Supanirattisai : Smart agriculture monitoring and management system using IoT-enabled devices based on LoRaWAN. Advisor: NATTAPOL DAMRONGPLASIT, Ph.D.

A fully automated, smart agriculture system using IoT enabled devices connected to LoRaWAN network (Long Range Wide Area Network) is proposed in this study. The system is capable of measuring crop growing parameters using low-power and low-cost sensor devices. Environmental conditions are automatically regulated through actuator end devices that receive activation command from a network server, allowing precise control of the water and mist pumps. Real-time data and system status are sent to the cloud and can be accessed via customizable dashboard. The transmission range between LoRa end devices and gateway is found to vary from 300 m to 1700 m, depending on the quality of the LoRa antenna. Compared to a Wi-Fi implemented system, LoRa provides for a longer range of communication and 2.4 times the power reduction when operating in Working state. In an Idle state, the end device conserves power by entering a deep-sleep mode which offers up to 3,330 times reduction in power when compared to an active mode.

Field of Study: Cyber-Physical System

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ณัฐพล ดำรงค์พลาสีทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และเอาใจใส่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ทั้งให้คำแนะนำในด้านวิชาการ องค์ความรู้ แนวทางในการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนการใช้ชีวิต จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ก้องภพ อยู่เย็น ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการค้นคว้า ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษฎา พนมเชิง และ ดร. กิตติกุล โกวิททางกูร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณครอบครัวและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้ที่เกี่ยวข้องศึกษาต่อไป

พิทย ศุภนิรติศัย

สารบัญ

	หน้า
.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
.....ง	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญภาพ.....ฎ	ฎ
บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1	1
1.2 วัตถุประสงค์.....2	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 3	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3	3
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง 4	4
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 8	8
นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ 9	9
2.1 ความหมายของการเกษตรและประเภทของการทำการเกษตร..... 9	9
2.2 ปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช 9	9
2.3 มาตรฐานของระบบฟาร์มสมัยใหม่และการนำมาปรับประยุกต์ใช้กับเกษตรกรรมในประเทศไทย..... 11	11

นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมและการสื่อสารด้วยระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN 14

3.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและการสื่อสารต่าง ๆ..... 14

 3.1.1 LPWAN..... 14

 3.1.2 OSI Model..... 15

 3.1.2.1 Application-oriented layers (Layer 4-7) หรือ Upper Layer 16

 3.1.2.2 Network-dependent Layers (Layer 1-3) หรือ Lower Layer..... 16

3.2 นิยามและหลักการทำงานของระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN..... 17

 3.2.1 นิยามของระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)..... 17

 3.2.2 นิยามของ LoRa (Physical Layer)..... 17

 3.2.3 นิยามของ LoRaWAN (Upper Layer)..... 19

 3.2.4 นิยามของ Network Server 20

 3.2.5 นิยามของ LoRaWAN Application Server..... 21

 3.2.6 วิธีการตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณระหว่าง Gateway และ End Device (Activation)..... 23

3.3 การใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ ผสมผสานกับเทคโนโลยี LoRaWAN เพื่อนำไปต่อยอดกับระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ 26

 3.3.1 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) 26

 3.3.2 Webhook..... 27

 3.3.3 Node red..... 28

 3.3.4 Datacake 29

การติดตั้งและใช้งานระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN 32

4.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN 32

4.2 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN	34
4.2.1 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN : End Device.....	34
4.2.1.1 ประเภทและวิธีการการเปิดใช้งาน End Device กับ The Things Stack.....	35
4.2.1.1.1 Commercial LoRaWAN End Device	35
4.2.1.1.2 Custom LoRaWAN End Device	36
4.2.1.2 End Device ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	37
4.2.2 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN : Gateway.....	38
4.2.2.1 ประเภทและวิธีการการเปิดใช้งาน Gateway กับ The Things Stack.....	38
4.2.2.1.2 Multi Channel Gateway.....	39
4.2.2.1.3 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง Single Channel และ Multi Channel Gateway	40
4.2.2.2 Gateway ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	42
4.3 การใช้งาน The Things Stack ร่วมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ	44
4.3.1 การใช้งาน The Things Stack.....	44
4.3.1.1 การใช้งานหน้าต่างควบคุม Gateway	44
4.3.1.2 การใช้งานหน้าต่างควบคุม End Device.....	44
4.3.2 การใช้งาน The Things Stack ร่วมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ.....	45
4.3.2.1 MQTT Integration with Node-RED.....	46
4.3.2.2 Webhook Integration with Datacake.....	48
4.4 การออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN	50
4.4.1 การออกแบบการทดสอบการทำงานควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช	50
4.4.1.1 รายละเอียด State การทำงานของ End Device.....	50
4.4.1.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการกำหนดค่า State Variable ใน Node-RED.....	52
4.4.2 การออกแบบการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN.....	54

4.4.3 การออกแบบการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน.....	56
ผลการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ.....	58
5.1 ผลการทดสอบการทำงานควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	58
5.2 ผลการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN.....	60
5.3 ผลการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน.....	64
สรุปและข้อเสนอแนะ.....	69
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	69
6.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	71
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ IoT มาใช้ในการแก้ปัญหาในแง่มุมที่ต่างกันในงานวิจัย [8].....	5
ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลจำเพาะของเทคโนโลยีการสื่อสารแต่ละประเภท [14].....	5
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบราคาในการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารแต่ละประเภท [14].....	6
ตารางที่ 4 ตารางแสดงย่านความถี่ใช้งานส่งสัญญาณของ LoRa โดยมีหน่วยเป็น MHz [38].....	18
ตารางที่ 5 ตารางแสดงคุณลักษณะของ The Things Indoor LoRaWAN WiFi Gateway [61]....	43
ตารางที่ 7 ตารางแสดงกระแสไฟฟ้าที่บอร์ดแต่ละประเภทใช้งานในโหมดต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ 6 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Spreading Factor (SF) และขีดจำกัด SNR ที่สามารถรับสัญญาณได้ในงานวิจัย [64].....	64
ตารางที่ 8 ตารางแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้งาน.....	66

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ภาพการคาดการณ์การเพิ่มของจำนวนประชากรเทียบกับทรัพยากรที่มีอยู่ [3].....	1
ภาพที่ 2 ผลการทดสอบและแผนภาพเปรียบเทียบระยะเวลาการส่งสัญญาณกับระยะทางและการตั้ง ค่า Spreading Factor ต่าง ๆ ในงานวิจัย [16].....	7
ภาพที่ 3 โครงสร้างการออกแบบระบบการส่งสัญญาณด้วย LoRa ในฟาร์มการเกษตรของงานวิจัย [17].....	7
ภาพที่ 4 จำนวนครัวเรือน จาก 4 จังหวัด จังหวัดศรีสะเกษ จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดลพบุรี และจังหวัด ฉะเชิงเทรา ระหว่าง พ.ศ. 2541–2555 แยกรายประเภทการผลิตเกษตร [25].....	12
ภาพที่ 5 อุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะปลูก HandySense	13
ภาพที่ 6 ภาพแสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการส่งสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ [31].....	14
ภาพที่ 7 รูปแบบการส่งสัญญาณ Chirp Spread Spectrum Modulation (CSS) ที่ LoRa ใช้งาน [36].....	18
ภาพที่ 8 โครงสร้างระบบการสื่อสารแบบมาตรฐานของ LoRaWAN [41].....	19
ภาพที่ 9 โครงสร้างการทำงานของ LoRa (PHY) และ LoRaWAN (MAC) [34].....	20
ภาพที่ 10 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class A [45]	22
ภาพที่ 11 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class B [45].....	22
ภาพที่ 12 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class C [45]	23
ภาพที่ 13 ขั้นตอนการ Activation ของ End Device เพื่อให้สามารถใช้งานเครือข่ายสื่อสาร LoRaWAN ด้วยวิธี OTAA [45].....	25
ภาพที่ 14 แสดง Key ที่แต่ละองค์ประกอบถูกตั้งค่าไว้ก่อนการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานเครือข่าย สื่อสาร LoRaWAN ด้วยวิธี OTAA [45].....	25
ภาพที่ 15 การสื่อสารและการใช้ Key ในการถอดรหัสข้อมูลในการสื่อสารแบบ End to End รูปแบบ ต่าง ๆ [45].....	26
ภาพที่ 16 แผนผังแสดงการทำงานและโครงสร้างของโปรโตคอล MQTT [50].....	27

ภาพที่ 17	แผนผังแสดงการทำงานเปรียบเทียบระหว่าง API และ Webhook[51].....	28
ภาพที่ 18	ตัวอย่างการใช้งาน Node-RED.....	29
ภาพที่ 19	ตัวอย่าง Dashboard หน้าต่างการแสดงผลค่า Sensor ต่าง ๆ ของ Datacake.....	30
ภาพที่ 20	แผนภาพแสดงการการใช้งานส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วน ของระบบการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN.....	33
ภาพที่ 21	แผนภาพแสดงอุปกรณ์และแนวทางในการส่งต่อของข้อมูลและคำสั่งจาก Sensor End Device ไปสู่ Gateway, Network Server, Actuator End Device.....	34
ภาพที่ 22	หน้าทางการลงทะเบียน Commercial LoRaWAN End Device.....	35
ภาพที่ 23	LAQ4 -- LoRaWAN Air Quality Sensor [57].....	36
ภาพที่ 24	หน้าทางการลงทะเบียน Custom LoRaWAN End Device.....	37
ภาพที่ 25	หน้าทางการ Add Gateway ของ The Things Stack Network Server	42
ภาพที่ 26	The Things Indoor Gateway (TTIG) [61].....	42
ภาพที่ 27	หน้าทางควบคุม Gateway ของ The Things Stack (TTS).....	44
ภาพที่ 28	หน้าทางควบคุม End Device ของ The Things Stack.....	45
ภาพที่ 29	หน้าทางการตั้งค่าการใช้งาน MQTT ใน TTS.....	46
ภาพที่ 30	การใช้งาน Node-RED กับ LoRa ด้วยการเชื่อมต่อแบบ MQTT	46
ภาพที่ 31	ฟังก์ชันการใช้งานของการรับข้อมูล Event Uplink ผ่าน Node-RED.....	47
ภาพที่ 32	ฟังก์ชันการใช้งานของการส่งข้อมูล Downlink ผ่าน Node-RED.....	48
ภาพที่ 33	IoT Platform ต่าง ๆ ที่สามารถเชื่อมต่อกับ TTS ด้วยวิธีการ Webhook.....	49
ภาพที่ 34	หน้าทางการแสดงผลข้อมูลของ IoT Platform Datacake.....	49
ภาพที่ 35	รายละเอียดระดับขั้นการทำงานของ End Device.....	51
ภาพที่ 36	รายละเอียดระดับขั้นการทำงานของ Node-RED	53
ภาพที่ 37	ภาพแสดงการส่งสัญญาณตามจริงที่ค่า SNR มีค่าเป็นบวก [62].....	54
ภาพที่ 38	ภาพแสดงการส่งสัญญาณตามจริงที่ค่า SNR มีค่าเป็นลบ [62].....	54

ภาพที่ 39 ตัวอย่างการใช้งานแอปพลิเคชัน TTN Mapper ในการหาระยะทางในการส่งสัญญาณ [63] 55

ภาพที่ 40 ภาพแสดงการต่อแอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์เพื่อใช้หาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า..... 57

ภาพที่ 41 กราฟรายงานผลข้อมูลอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดิน 58

ภาพที่ 42 กราฟรายงานผลข้อมูลความชื้นอากาศและความชื้นดิน..... 59

ภาพที่ 43 กราฟรายงานผลข้อมูลความเข้มแสง..... 59

ภาพที่ 44 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการส่งสัญญาณระหว่างแต่ละ Spreading Factor (SF) 61

ภาพที่ 45 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการส่งสัญญาณระหว่างแต่ละ End Device..... 62

ภาพที่ 46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณภาพการส่งสัญญาณระหว่างการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง..... 63

ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SNR และ อัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณจากการทดลอง..... 63

ภาพที่ 48 ภาพเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานส่งสัญญาณ LoRa และ Wi-Fi..... 65

ภาพที่ 49 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการส่งสัญญาณระหว่าง LoRa และ Wi-Fi..... 65

ภาพที่ 50 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้งานใน Idle State ขณะที่อยู่ในโหมด Active และ Deep Sleep 66

ภาพที่ 51 ภาพแสดงรายละเอียด Pin ของ RFM95 และวิธีการ Pull Down Pin 67

ภาพที่ 52 เวลาที่บอร์ดใช้ใน Working State และ Idle State ในเวลาหนึ่งวัน..... 67

ภาพที่ 53 พลังงานที่ End Device ใช้ในหนึ่งวันเปรียบเทียบกันระหว่างแต่ละบอร์ด..... 68

ภาพที่ 54 เวลาที่ End Device สามารถทำงานได้เมื่อใช้แบตเตอรี่ LiFePO4..... 68

บทที่ 1

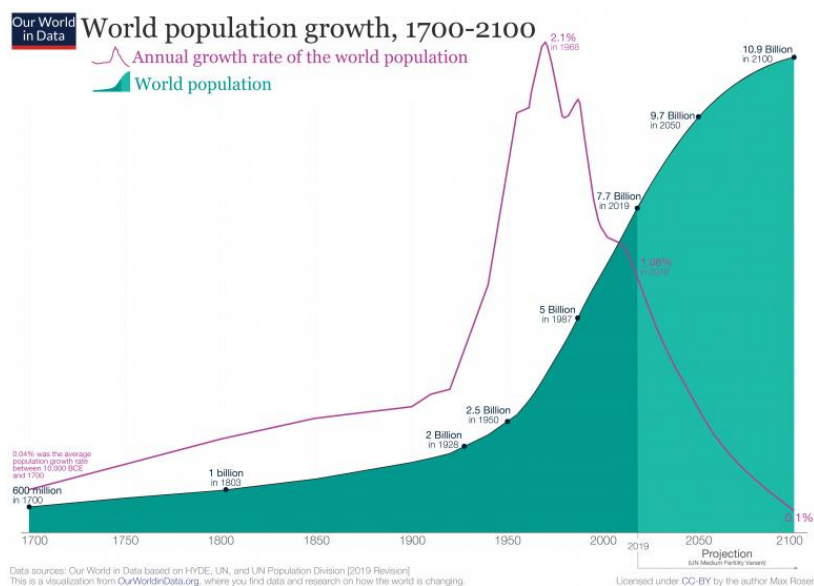
บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาโดยสังเขปของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การบริโภคอาหารและทรัพยากรต่าง ๆ ของมนุษย์ มีอัตราการบริโภคที่เพิ่มสูงมากขึ้นตลอดในทุก ๆ ปี จากการคาดการณ์ขององค์การสหประชาชาติ เผยว่าการเติบโตของประชากรมนุษย์อาจสูงขึ้น ถึงจำนวน 9.7 พันล้านคน จากในปัจจุบัน 7.753 พันล้านคน ในปี 2050 ดังที่แสดงในภาพที่ 1 เรื่องนี้จะมีผลกระทบต่อปัญหาการขาดแคลนอาหารและทรัพยากรต่าง ๆ ของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยวิกฤตเรื่องการขาดแคลนทรัพยากรแบบนี้เคยถูกคาดการณ์ไว้ตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1970 เมื่อโรเบิร์ต มัลธัส นักเศรษฐศาสตร์ ผู้มีชื่อเสียงในทฤษฎีว่าด้วยทรัพยากรมนุษย์ ได้ตั้งสมมติฐานเรื่องขีดจำกัดการเติบโต (The Limits to Growth) ว่าโลกมีทรัพยากรที่จำกัด อีกไม่นานทรัพยากรที่มนุษย์สามารถใช้งานได้จะหมดไป และนอกจากนั้นยังมีการสันนิษฐานเพิ่มเติมว่า ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจะเติบโตสม่ำเสมอและเพิ่มมลพิษจากการใช้ทรัพยากรนั้นๆ อย่างทวีคูณ

โดยในปี 2030 โลกจำเป็นต้องผลิตอาหารเพิ่มขึ้นจากในปัจจุบันประมาณ 50% จึงจะเพียงพอต่อความต้องการอาหารของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับทรัพยากรน้ำที่น้ำจะมีการขาดแคลนเป็นอย่างมากในอนาคต สิ่งนี้เองที่ถือว่าเป็นอีกหนึ่งความท้าทายอย่างมากสำหรับความมั่นคงทางอาหารในอนาคต [1] [2]



ภาพที่ 1 ภาพการคาดการณ์การเพิ่มของจำนวนประชากรเทียบกับทรัพยากรที่มีอยู่ [3]

สำหรับแง่มุมในเรื่องของอาหารและทรัพยากรของประเทศไทย ภาคการเกษตรของไทยถือว่าเป็นหนึ่งในส่วนที่สำคัญที่สุดของการผลิตอาหารของประเทศ โดยการเกษตรในประเทศไทยถือว่าเป็นรากฐานและมีความสำคัญต่อการสร้างความมั่นคงทางอาหารที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเหล่านี้ นอกจากจะผลิตไว้เป็นอาหารหลักของคนในประเทศแล้วยังจัดว่าเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญและเป็นตัวหลักในขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศอีกด้วย ดังนั้นจากเหตุผลที่ว่ามา การทำการเกษตรในประเทศไทยจึงนับเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและเป็นเรื่องที่ส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่ออาหารและทรัพยากรของประเทศ การนำเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์เพื่อเข้ามาช่วยเพิ่มผลผลิตหรือลดทรัพยากรในการทำการเกษตรจึงมีความจำเป็นอย่างมาก สอดคล้องกับอัตราการเติบโตและความต้องการอาหารและทรัพยากรที่สูงมากขึ้นในทุก ๆ ปี แนวคิดของการใช้ระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มผลผลิต ลดทรัพยากร และลดต้นทุนการเกษตร จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพที่จะสามารถช่วยพัฒนาการทำการเกษตรของไทยให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาให้มีความเจริญก้าวหน้าต่อไปได้ [4]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ ที่สามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ได้กับการทำการเกษตรหลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่การเกษตรขนาดเล็กภายในครัวเรือนไปจนถึงฟาร์มการเกษตรที่มีขนาดใหญ่ โดยระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัตินี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารแบบเครือข่าย เข้ามาช่วยในการควบคุมระบบการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากด้วยระบบอัตโนมัติ ไม่ต้องใช้มนุษย์ในการควบคุม เป็นการช่วยลดภาระการทำงานในการดูแลระบบ และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำการเกษตร

ในการควบคุมระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติจะมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก เซนเซอร์ (Sensor) เพื่อวัดค่าต่าง ๆ ในฟาร์ม ประกอบไปด้วยอุณหภูมิอากาศ ความชื้นอากาศ อุณหภูมิดิน ความชื้นดิน และความเข้มแสง จากนั้นจึงทำการส่งข้อมูลมาประมวลผลและแสดงผลข้อมูลที่ระบบศูนย์กลาง ถ้าหากค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชต่าง ๆ ที่วัดได้มีค่าไม่ตรงตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ ระบบจะส่งคำสั่งการทำงานตัวกระตุ้น (Actuator) ต่าง ๆ ให้ทำงานปรับค่าอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับพืชชนิดนั้น ๆ โดย ระบบการรับส่งข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้เลือกนำมาใช้จะถูกสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ที่เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบเครือข่าย มีขอบเขตการส่งสัญญาณที่มีระยะกว้าง ประหยัดพลังงาน มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ ทำให้สามารถนำระบบที่เสนอในงานวิจัยนี้ไปปรับประยุกต์ใช้ตามสภาพการทำงานได้อย่างหลากหลายและมีความเหมาะสมกับการทำการเกษตรในประเทศไทยที่เป็นการเกษตรที่มีขนาดพื้นที่กว้างขวาง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบที่ใช้ควบคุมเซนเซอร์และตัวกระตุ้นในระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ
- 2) เพื่อศึกษาและพัฒนาโปรแกรมที่เป็นตัวสั่งงานระบบการทำงานรับส่งข้อมูลด้วยเซนเซอร์ระยะไกล ผ่านระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN
- 3) เพื่อศึกษาและใช้งานเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่นำไปต่อยอดในการทำระบบประมวลผลอัตโนมัติและระบบเก็บและแสดงผลข้อมูลตามเวลาจริง จากข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับมา
- 4) เพื่อทดสอบผลการทำงานของระบบโดยการสร้างชุดทดสอบระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติขึ้น

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาและศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเครือข่ายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ก่อนจะนำมาใช้ในการออกแบบระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติเพื่อให้ฟาร์มการเกษตรต่าง ๆ สามารถใช้งานระบบที่มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้งานได้จริง มีความประหยัดพลังงานและได้ขอบเขตการทำงานที่กว้างขวาง
- 2) ทำการทดสอบระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ โดยทำให้ระบบสามารถทำงาน ส่งค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่เซนเซอร์อ่านได้จากตำแหน่งต่าง ๆ เข้ามาวิเคราะห์และแสดงผล เพื่อควบคุมการทำงานของตัวกระตุ้นในการควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
 - 1.1) ศึกษาระบบควบคุมเซนเซอร์และตัวกระตุ้น
 - 1.2) ศึกษาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเครือข่ายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN
 - 1.3) ศึกษาวิธีการสร้างโปรแกรมที่เป็นตัวสั่งงานระบบการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ
 - 1.4) ศึกษาเครื่องมือและเทคโนโลยีที่สามารถนำไปต่อยอดกับระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ เพื่อให้การทำงานของระบบเป็นไปอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น
- 2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา
- 3) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 4) ออกแบบและจำลองการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยการสื่อสารแบบเครือข่ายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN
- 5) เก็บผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบ
- 6) วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สร้างระบบควบคุมสั่งงานเซนเซอร์และตัวกระตุ้นเพื่อช่วยในการทำการเกษตรอัตโนมัติ ด้วยการสื่อสารแบบเครือข่ายโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN ในการจัดการ ที่มีระยะการส่งสัญญาณที่ไกล ประหยัดพลังงาน และสามารถนำไปติดตั้งได้จริงในฟาร์มทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่
- 2) ข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทำงานของเซนเซอร์และตัวกระตุ้นอัตโนมัติในระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ เพื่อใช้ในการพัฒนาปรับปรุงตัวระบบต่อไป
- 3) ความรู้และแนวทางการใช้งานเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่สามารถนำไปต่อยอดกับระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ เพื่อให้การทำงานของระบบเป็นไปอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยและวารสารต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำฟาร์มอัจฉริยะหรือการเกษตรที่มีความแม่นยำสูง พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ให้ความสนใจในเรื่องการนำเทคโนโลยีหรือโมเดลในการสื่อสารแบบต่าง ๆ เข้ามาปรับประยุกต์ใช้กับระบบการทำฟาร์ม เช่น ในงานวิจัย [5] ได้กล่าวถึงการออกแบบใช้งานระบบการปลูกพืชอัจฉริยะสำหรับการใช้งานปลูกผักในครอบครัว โดยนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบระบบที่ต้องตอบสนองกับความต้องการในการปลูกพืชของครัวเรือน ได้แก่ ต้องสามารถดูค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ตามเวลาจริง ควบคุมเปลี่ยนความชื้นในดิน ความเข้มแสง และอุณหภูมิของอากาศ เพื่อให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้ การใช้งานในเชิงของฮาร์ดแวร์จะเป็นการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพียงตัวเดียวต่อกับเซนเซอร์และตัวกระตุ้น จากนั้นจึงทำการใส่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ลงไปในบอร์ดนั้น ส่วนในด้านการทำงานส่งข้อมูลขึ้นมาที่คลาวด์ (Cloud) จะใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสาร 4G และ NB-IoT

งานวิจัย [6] กล่าวถึงการออกแบบและใช้งานระบบฟาร์มอัจฉริยะโดยการใช้งานบอร์ด Raspberry Pi, Arduino และใช้งาน Node-RED ที่เป็นเครื่องมือช่วยในการเขียนระบบสั่งการ ในงานวิจัยนี้ จะมีการนำเซนเซอร์เข้ามาต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อทำการวัดค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชต่าง ๆ จากนั้นจึงส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านไวไฟ (Wi-Fi) ผ่านโปรโตคอล MQTT ไปที่ Raspberry Pi ซึ่งเป็นไมโครโพรเซสเซอร์ที่ได้เปิดการทำงานของ Node-RED ไว้ เพื่อใช้งานในการจัดระเบียบข้อมูลและส่งข้อมูลไปแสดงผลต่อที่ local server ต่อไป เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ [7] ที่กล่าวถึงการออกแบบระบบการทำฟาร์มอัจฉริยะโดยมีจุดมุ่งหมายและขั้นตอนที่คล้ายคลึงกัน แต่ว่าทั้งสองงานวิจัยมีความแตกต่างกันที่งานวิจัย [7] ที่จะมีการกล่าวถึงการใช้งานเซลล์สุริยะ (Solar Cell) ในการให้พลังงานกับตัวบอร์ด MCU แต่จะไม่ได้มีการใช้งาน Node-RED Platform ในการจัดระเบียบข้อมูลก่อนการนำไปแสดงผล

งานวิจัย [8] ได้เปรียบเทียบการใช้งานระบบ IoT ในงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาของงานวิจัย [9] [10] [11] [12] และ [13] ในแง่มุมต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ระบบ IoT ที่ทำ จะนำไปใช้กับงานอะไร ต้องการเก็บข้อมูลใดบ้าง เทคโนโลยีที่แต่ละงานวิจัยเลือกใช้ จุดเด่นของระบบที่สร้างขึ้นมา ความท้าทายที่ต้องเจอและวิธีการแก้ไขปัญหานั้น ๆ ซึ่งในแต่ละงานวิจัยก็จะมีมุมมองในการออกแบบที่แตกต่างกันไปตามโจทย์และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ IoT มาใช้ในการแก้ปัญหาในแง่ที่แตกต่างกันในงานวิจัย [8]

No	Author/Year	IOT verticals	Data collection	Technology used	Benefits (Proposed system)	Challenges in existing system	Solution provided
01	Konlakorn 2018 [2]	Smart farming.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperature ✓ Soil moisture ✓ Humidity ✓ pH value ✓ EC value 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mobile technology ✓ Wi-Fi ✓ Cloud computing 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Can measure the temperature, soil moisture, humidity, and pH and EC values. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Human interaction ✓ Water wastage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Auto dosing system ✓ Foggy spray system ✓ Traceability system
02	Deden 2019 [7]	Water management.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soil moisture 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Wi-Fi 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Real time soil moisture monitoring ✓ Remotely access the data. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Water wastage. ✓ Low or high watering 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Real time monitoring system. ✓ Smart dashboard.
03	Ashifuddin 2018 [8]	Smart farming. Field management.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperature ✓ Soil moisture 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arduino Cloud computing ✓ Wi-Fi 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Can detect the temperature, soil moisture. ✓ Lessen the human intercession ✓ Control the high voltage electric equipment. ✓ Store data for future works. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Human interaction ✓ Water wastage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Field monitoring system. ✓ Cloud platform storage for future work.
04	Andreas 2016 [9]	Smart farming. Pest management.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperature ✓ Soil moisture ✓ Event detection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Wi-Fi ✓ Mobile technology 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Real time event detection. ✓ Soil monitoring ✓ Temperature monitoring. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Crop wastage ✓ Decision taking issues. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Smart dashboard ✓ Mobile application ✓ Event detection system
05	Miguel 2018 [10]	Precision farming.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperature ✓ Humidity ✓ Soil moisture ✓ pH value 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Wi-Fi ✓ Cloud computing ✓ Edge computing ✓ 6LoWPAN ✓ Digital/analog IO connection 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Monitor temperature, soil moisture, humidity and pH value. ✓ Utilize the water usage ✓ Electricity saving 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Water wastage ✓ Crop wastage 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Crop management system. ✓ System for precision agriculture

งานวิจัย [14] กล่าวถึงการเปรียบเทียบการทำงานในแง่ต่าง ๆ ของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ Low Power Wide Area Network (LPWAN) โดยในการเปรียบเทียบ จะมีเทคโนโลยีการสื่อสารที่จัดอยู่ในประเภท LPWAN ทั้งสิ้น 4 ชนิด คือ Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT และ LTE-M การเปรียบเทียบจะมีตั้งแต่เปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานในการทำงาน ไปจนถึงราคาที่ใช้ในการติดตั้งและความสามารถในการรองรับการขยายระบบเพิ่มเติม (Scalability) ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 โดยจากตารางจะพบว่า การใช้งานการสื่อสารด้วยวิธีการ LoRaWAN นั้นจะสามารถส่งสัญญาณได้โดยที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการส่งสัญญาณแบบอื่น ๆ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลจำเพาะของเทคโนโลยีการสื่อสารแต่ละประเภท [14]

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE-M
Frequency band (MHz)	868	868	868	700
Spectrum (kHz)	200	1175	180	1080
Sub-channel BW (Hz)	100	125 k	15 k	18 k
Spacing (kHz)	0	200	3.75	15
Modulation	D-BPSK	FSS/CSS	OFDMA	OFDMA
Receiver sensitivity (dBm)	164	154	150	146
Device capacity/cell	100 k	10 k	40 k	50 k
DL payload (Bytes)	8	14	125	1 k
UL payload (Bytes)	12	51	125	1 k
Data rate (bps)	100	1760	50 k	1000 k
Duty cycle/ Tx restriction	140 msg/day	1%	–	–
Bi-directional	HD [1]	HD	HD	FDD, TDD, HD

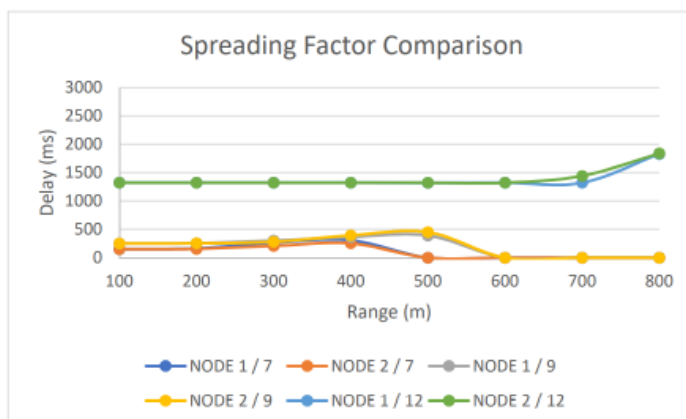
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบราคาในการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารแต่ละประเภท [14]

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE-M	EC-GSM
Equipment cost (K€)	4	1	3-10	6	8
Installation cost (K€)	6	2	10	10	10
Spectrum cost (K€/kHz/site)	0	0	0.001	0.001	0.001
Site build cost (K€)	10	2	20	20	20
Site lease (K€/year)	0.8-1	0.4-1	3.5-8	3.5-8	3.5-8
Transmission installation cost (K€)	0.5	1	0	0	0
Electricity cost (K€/year)	1	0.1	1	1	1
Transmission cost (K€/year)	0.12	0.1	0.1	0.1	0.1
Operation and maintenance cost (relative to CAPEX)	15%	20%	10%	10%	10%

ในงานวิจัย [15] ในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารในประเภท LPWAN นำมาเปรียบเทียบผลการทำงานโดยภาพรวม และส่วนที่เป็นการศึกษาและทดสอบความสามารถและขีดจำกัดในการทำงานของเทคโนโลยี LoRaWAN ในการใช้งานร่วมกับระบบ IoT การตั้งค่า Spreading Factor (SF) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อเวลาในการส่งสัญญาณ ยิ่ง SF สูง ตัวรับสัญญาณก็จะสามารถรับสัญญาณที่ถูกรบกวนสัญญาณได้มากขึ้น ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางที่ไกลขึ้น แต่เวลาในการเดินทางของสัญญาณในอากาศ (Air Time) ก็จะมีเวลานานขึ้นตามไปด้วย และจำนวนตัวรับส่งสัญญาณปลายทาง (End Device) ที่ยิ่งน้อย อัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณ (Success Rate) ก็สูงเพราะไม่มีการชนกันของสัญญาณ

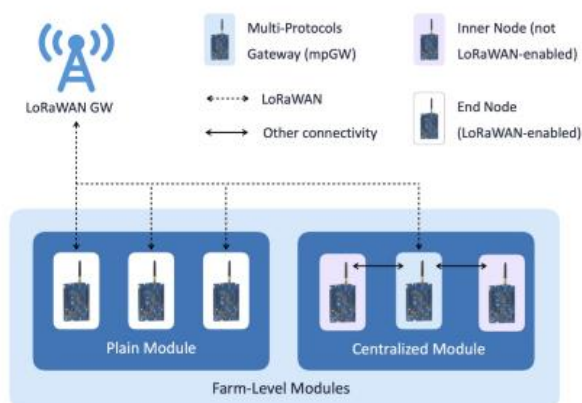
ในงานวิจัย [16] [17] [18] จะเป็นการกล่าวถึงการใช้งานเทคโนโลยี LoRaWAN ในการรับส่งข้อมูลในฟาร์มการเกษตร โดยในแต่ละงานวิจัยจะมีการเสนอแนวทางในการออกแบบระบบเป็นของตัวเอง ในงานวิจัย [16] จะเป็นการออกแบบและใช้งานระบบการทำการเกษตรด้วยเทคโนโลยีการสื่อสาร LoRaWAN ในแถบชนบทของประเทศไทย อินโดนีเซีย มีการใช้งานเซนเซอร์ที่ต่อเข้ากับบอร์ด Arduino เพื่อทำการรายงานผลการอ่านค่าจาก Sensor และข้อมูลผ่านสัญญาณ LoRa เข้ามาที่ตัวกลางรับส่งสัญญาณ (Gateway) ก่อนจะส่งขึ้นมาที่เซิร์ฟเวอร์ (Server) โดยในงานวิจัยได้มีการทดสอบถึงระยะการทำงานและเวลาที่ใช้ในการส่งเทียบกับค่า SF เพื่อหาระยะในการส่งสัญญาณ LoRa ในแถบชนบท ดังที่แสดงในภาพที่ 2

Range (M)	Time (ms)					
	Node 1/7	Node 2/7	Node 1/9	Node 2/9	Node 1/12	Node 2/12
100	150.978805	151.359042	248.433813	251.709302	1321	1321
200	162.019231	156.556511	254.902010	252.490018	1321	1321
300	266.813268	207.247475	301.391393	280.072210	1321	1321
400	305.465116	252.846715	363.876872	391.516129	1321	1322
500	0	0	390.517985	449.640425	1320	1321
600	0	0	0	0	1321	1321
700	0	0	0	0	1321.000807	1440.981308
800	0	0	0	0	1827.963158	1837.191083



ภาพที่ 2 ผลการทดสอบและแผนภาพเปรียบเทียบระยะเวลาการส่งสัญญาณกับระยะทางและการตั้งค่า Spreading Factor ต่าง ๆ ในงานวิจัย [16]

ในงานวิจัย [17] จะมีการแบ่งประเภทของ End Device ออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่สามารถสื่อสารกับ Gateway ได้โดยตรงและประเภทที่ต้องส่งสัญญาณไปประมวลผลที่ตัวสาขาก่อนที่จะส่งไปที่ Gateway วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการทำฟาร์มการเกษตรที่มีผลผลิตหลายชนิดที่ต้องการสถานะแวดล้อมในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างการออกแบบระบบการส่งสัญญาณด้วย LoRa ในฟาร์มการเกษตรของงานวิจัย [17]

ในงานวิจัย [18] จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบที่ช่วยในการวัดค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และรายงานเข้ามาที่ระบบศูนย์กลางก่อนที่จะส่งข้อมูลเหล่านั้นไปแสดงผลใน Grafana และเก็บข้อมูลใน InfluxDB เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

งานวิจัย [19] [20] [21] จะเป็นการใช้งานเทคโนโลยี LoRaWAN เพื่อช่วยในการทำงานกับงานอื่น ๆ นอกเหนือจากงานทางด้านเกษตร โดยในงานวิจัย [19] จะเป็นการใช้งานระบบ LoRaWAN เพื่อตรวจสอบและ

รายงานผลของอุปกรณ์ IoT ในเมืองอัจฉริยะ งานวิจัย [20] ใช้เพื่อพัฒนาระบบการอ่านมิเตอร์อัตโนมัติเพื่อสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับ และ [21] เพื่อใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะ

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของ วิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงนิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำการเกษตรและระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ

บทที่ 3 กล่าวถึงนิยามนิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมและการสื่อสารด้วยระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN

บทที่ 4 กล่าวถึงการติดตั้งและใช้งานระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN ทั้งในส่วนของติดตั้งเซนเซอร์และตัวกระตุ้น และส่วนของการทำงานส่งข้อมูลด้วย LoRaWAN

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยต่อ ๆ ไป

บทที่ 2

นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ

2.1 ความหมายของการเกษตรและประเภทของการทำการเกษตร

การเกษตรหรือการเกษตรกรรม (Agriculture) หมายถึงการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ การเลี้ยงปศุสัตว์และการทำประมง ผู้ที่ทำการเกษตรนั้นจะเรียกว่าเกษตรกร การเกษตรจึงเป็นการทำงานเพื่อควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ การจัดการกับทรัพยากรธรรมชาติ แรงงาน และทุน โดยอาศัยความรู้และประสบการณ์ เพื่อให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรตามความต้องการ ในการดำเนินการในการเกษตร พืช หมายถึง พืชสวน พืชไร่ ป่าไม้ และสัตว์ หมายถึง สัตว์บก สัตว์น้ำ ทั้งที่เป็นสัตว์เลี้ยงและสัตว์ป่า การเกษตรจึงมีขอบเขตครอบคลุมการปลูกพืช การเลี้ยงสัตว์ และการประมง นอกจากนี้ยังรวมถึง การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย

การเกษตรมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่สมัยอดีต โดยมนุษย์รู้จักการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายจากพืชและสัตว์ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปัจจัย 4 คือ อาหาร เครื่องนุ่งห่ม ที่อยู่อาศัย และยารักษาโรค โดยมนุษย์รู้จักเก็บเกี่ยวผลผลิตทางเกษตรนำไปประกอบอาหารรับประทาน สร้างความเจริญเติบโตแก่ร่างกาย นำส่วนต่าง ๆ ของพืชเส้นใยไปผลิตสิ่งทอหรือใช้หนังสัตว์ทำเครื่องนุ่งห่ม ปลูกป่าเพื่อนำไม้ไปเป็นอุปกรณ์การก่อสร้าง สร้างที่พักอาศัย อาคารสถานที่ ทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ต่าง ๆ และปลูกพืชสมุนไพร เพื่อนำไปใช้เป็นยารักษาโรค ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ทั้งสิ้น โดยเราจะสามารถแบ่งประเภทของการทำการเกษตรกรรมออกได้เป็น 4 ประเภท [22] คือ

- 1) กสิกรรม หมายถึง การเพาะปลูกพืช เช่น การทำนา การทำสวน การทำไร่
- 2) ปศุสัตว์ หมายถึง การประกอบอาชีพเลี้ยงสัตว์บนบก เช่น เลี้ยงวัว เลี้ยงหมู หรือเลี้ยงสัตว์จำพวกสัตว์ปีก
- 3) การประมง หมายถึง การประกอบอาชีพการเกษตรทางน้ำ เช่น การเลี้ยงสัตว์น้ำ การจับสัตว์น้ำ
- 4) ด้านป่าไม้ หมายถึง การประกอบอาชีพเกี่ยวกับป่า เช่น การปลูกป่าไม้เศรษฐกิจ การนำผลผลิตจากป่ามาแปรรูปให้เกิดประโยชน์

โดยระบบช่วยเหลือการทำการเกษตรในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่การทำการเกษตรเชิงกสิกรรม หรือการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ แต่ระบบนี้ยังสามารถนำไปใช้กับการทำการเกษตรในรูปแบบอื่นได้เช่นกัน

2.2 ปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

ในการเจริญเติบโตของพืช พืชต้องการปัจจัยที่สำคัญหลายอย่าง [23] [24] ไม่ว่าจะเป็น น้ำ แสง แร่ธาตุ อาหารต่าง ๆ ฯลฯ ในการที่พืชจะมีการเจริญเติบโตที่ดี ย่อมต้องการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สภาพของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่

- 1) วัสดุปลูก สิ่งนี้ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรก ถ้าเลือกใช้เป็นดิน ดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ต้องเป็นดินที่อุ้มน้ำได้ดี ร่วนซุย มีอินทรีย์วัตถุมาก แต่เมื่อใช้ดินปลูกไปนาน ๆ ดินอาจเสื่อมสภาพ เช่น หมด แร่ธาตุ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงดินให้อุดมสมบูรณ์ โดยอาจจะเป็นการใส่ปุ๋ยบำรุงต่าง ๆ เพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืชที่เพาะปลูก ซึ่งพืชจะใช้รากดูดอาหารเหล่านี้ขึ้นไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของพืช

ชนิดของดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกพืช ได้แก่

- 1.1) ฮิวมัส คือ ซากพืชซากสัตว์ที่ตายและเน่าเปื่อยแล้ว อาจได้จากใบหญ้า ใบไม้ซึ่งกองทับถมกันอยู่นาน ๆ จนเน่าเปื่อย มูลสัตว์ เช่น มูลวัว ควาย เป็ด ไก่ และหมู เมื่อใส่ไปในดินก็ทำให้ดินดีขึ้น เพราะมูลสัตว์เมื่อปนอยู่ในดินก็เน่าเปื่อยกลายเป็นฮิวมัส ดินอุดมมักมีสีดำ เมื่อแห้งไม่แข็งเหมือนดินเหนียว น้ำซึมผ่านได้พอสมควร เป็นดินที่พืชส่วนมากชอบ
- 1.2) ดินอุดม เป็นดินที่อุ้มน้ำได้ดีพอสมควร พอเหมาะที่จะทำให้ต้นไม้เจริญงอกงามดี
- 1.3) ดินร่วน เป็นดินที่มีลักษณะซุยมีสีต่างๆ กัน บางชนิดมีสีค่อนข้างดำมีน้ำหนักเบาเนื่องจากมีอินทรีย์วัตถุผสมอยู่มาก มีอาหารบริบูรณ์ การอุ้มน้ำของดินพอเหมาะแก่พืชอุ้มความร้อนไว้พอเพียงอากาศถ่ายเทได้สะดวก การระบายน้ำดี เวลาฝนตกก็ไม่ขึ้น
- 1.4) ดินเหนียว เป็นดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมาก เวลาแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งแต่กระแหว่งเวลาถูกน้ำจะเป็นโคลนตม ทำให้สมบัติของดินเปลี่ยนไป เวลานั้นน้ำตกน้ำซึมลงช้า เพราะเม็ดดินละเอียดสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าชนิดอื่น ๆ อากาศถ่ายเทหรือผ่านเข้าออกระหว่างเม็ดดินไม่ได้ดี มีอาหารพืชบ้างเล็กน้อยแล้วแต่ชนิดของดิน ดินเหนียวมีหลายชนิด มีสีต่าง ๆ กัน
- 1.5) ดินทราย เป็นดินที่มีทรายอยู่เป็นส่วนใหญ่ ดินชนิดนี้มีเนื้อหยาบร่วน ไม่จับกันเป็นก้อน น้ำซึมผ่านไปได้ง่าย อุ้มน้ำไว้ได้น้อย

ในปัจจุบัน นอกจากดินแล้ว การปลูกพืชยังสามารถปลูกได้ด้วยวิธีอื่น ๆ ต่างกันไป เช่น ปลูกด้วยน้ำแบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponics) การปลูกด้วยละอองน้ำ (Aeroponics) เป็นต้น โดยการเกษตรกรรมในประเทศไทยส่วนมากแล้วจะใช้การปลูกโดยมีวัสดุปลูกเป็นดิน ในงานวิจัยนี้จะขอเสนอการปลูกพืชในดินเป็นหลัก แต่ทั้งนี้ระบบที่ออกแบบมาจะสามารถนำไปพัฒนาปรับปรุงและใช้กับการทำการเกษตรด้วยวัสดุปลูกแบบอื่น ๆ ได้ต่อไป

- 2) น้ำหรือความชื้นในดิน น้ำมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก ช่วยละลายแร่ธาตุอาหารในดิน เพื่อให้รากดูดสารอาหารเหล่านี้ไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของลำต้น ใบ และดอกได้ อีกทั้งยังช่วยให้ดินมีความชุ่มชื้น ลดอุณหภูมิที่อยู่ภายในดิน ทำให้การทำงานของกระบวนการต่างๆ ในพืชเป็นไปอย่างปกติ ถ้าพืชไม่ได้รับน้ำเป็นเวลานานๆ จะทำให้พืชเหี่ยวเฉาและตายไปในที่สุด แต่ถ้าพืชได้รับน้ำมากเกินไป จะทำให้รากเน่าและตายได้เช่นกัน
- 3) ธาตุอาหารหรือปุ๋ย เป็นสิ่งที่ช่วยให้พืชเจริญเติบโต โดยแร่ธาตุที่พืชทั่ว ๆ ไปต้องการมากที่สุด คือ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม หรือ N-P-K โดยธาตุอาหารเหล่านี้จะต้องอยู่ในรูปสารละลายที่พืชสามารถนำไปใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพผ่านการดูดแร่ธาตุจากรากหรือการซึมซับผ่านทางใบของต้นพืช

การให้ปุ๋ยต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป จึงจะทำให้การเจริญเติบโตของพืชเป็นไปด้วยดี

- 4) อากาศ ในอากาศมีแก๊สหลายชนิดที่พืชต้องการ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจน ซึ่งใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างอาหารและหายใจ แก๊สทั้งสองชนิดนี้มีอยู่ในดิน ในการปลูกพืชเราจึงควรทำให้ดินโปร่งร่วนซุยอยู่เสมอ เพื่อให้อาหารที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีการถ่ายเทได้
- 5) แสงสว่างหรือแสงแดด พืชต้องการแสงแดดมาใช้ในการสร้างอาหาร คือ น้ำตาล ซึ่งอาหารที่พืชสร้างขึ้นจะลำเลียงไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของพืชถ้าขาดแสงแดด พืชจะแคระแกรน ใบจะมีสีเหลืองหรือขาวซีดและตาย พืชแต่ละชนิดต้องการแสงไม่เท่ากัน พืชบางชนิดต้องการแสงแดดจัด แต่พืชบางชนิดก็ต้องการแสงรำไร
- 6) อุณหภูมิในอากาศและในดิน สำหรับอุณหภูมิภายในอากาศ การเจริญเติบโตของพืชจะหยุดชะงักก็ต่อเมื่อพืชนั้นอยู่ในอุณหภูมิอากาศที่สูงหรือต่ำเกินไป พืชนั้นจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วก็ต่อเมื่อพืชนั้นได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสม อีกทั้งอุณหภูมิในอากาศที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลให้พืชตายลงได้ ส่วนอุณหภูมิภายในดินจะมีอิทธิพลต่อการงอกงามของเมล็ดและราก การดูดซึมซับน้ำ ธาตุอาหารต่าง ๆ ภายในดิน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินขึ้นอยู่กับรังสีของพระอาทิตย์ อุณหภูมิภายในดินนั้นต้องพอเหมาะกับพืชแต่ละชนิด การควบคุมและปรับระดับอุณหภูมิในอากาศและภายในดินนั้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้พืชมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วและแข็งแรง ส่งผลต่อผลผลิตที่ได้รับต่อไป

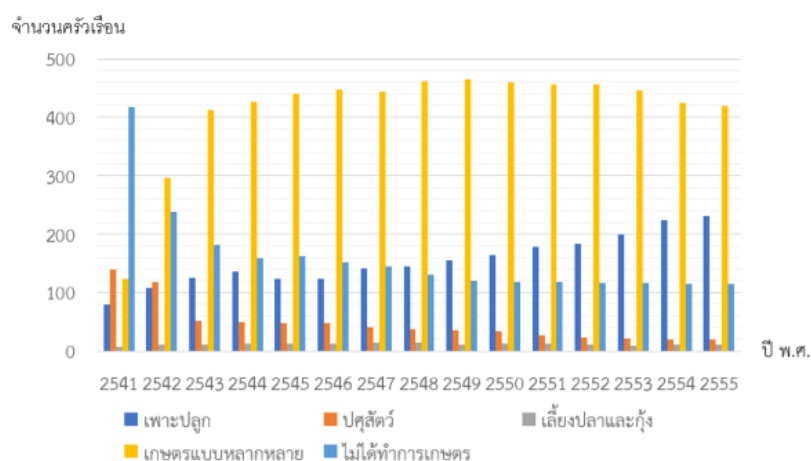
2.3 มาตรฐานของระบบฟาร์มสมัยใหม่และการนำมาประยุกต์ใช้กับเกษตรกรในประเทศไทย

การทำเกษตรสมัยใหม่ [22] หรือ ฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) เป็นการนำแนวคิดในการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาผสมผสานเข้ากับงานด้านการเกษตรต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ ไอที สื่อสาร เซนเซอร์ เทคโนโลยีชีวภาพ รวมทั้งนาโนเทคโนโลยี ที่จะเข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาก็แก่เกษตรกรและช่วยเพิ่มผลผลิต เทคโนโลยีเหล่านี้จะค่อย ๆ เข้ามาแทนที่การทำเกษตรแบบปกติในปัจจุบัน เพราะจะเป็นระบบการทำงาน การเกษตรที่ใช้ต้นทุนที่น้อย ใช้ทรัพยากรต่าง ๆ รวมถึงแรงงานลดลง แต่ให้ผลผลิตที่มีปริมาณและคุณภาพที่มากขึ้น

ฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) เทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะนั้น ตั้งอยู่บนแนวคิดของการทำเกษตรสมัยใหม่ที่เรียกว่า เกษตรแม่นยำสูง (Precision Agriculture) เป็นแนวทางในการทำเกษตรที่มุ่งเน้นไปที่การใช้ทรัพยากรให้สอดคล้องกับสภาพของพื้นที่มากที่สุด ดูแลการเติบโตของต้นพืชอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ เพื่อรักษา สภาพแวดล้อมที่ดีที่สุดให้กับพืชและสัตว์อยู่เสมอ ซึ่งเราสามารถนำเทคโนโลยีนี้ไปปรับใช้ได้ทั้งฟาร์มพืชและสัตว์ เช่น ในการปลูกผักสลัดที่เป็นผักเมืองหนาวในประเทศไทยที่เป็นเมืองร้อน ถ้าอุณหภูมิในดินหรือในอากาศมีอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะส่งผลให้ผักสลัดที่เราปลูกเหี่ยวเฉาและตายลงได้ ดังนั้น ระบบการช่วยการทำเกษตรสมัยใหม่ในงานวิจัยนี้จะเป็นเทคโนโลยีที่จำเป็น ที่จะช่วยควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น แร่ธาตุต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของต้นพืชได้ และไม่จำกัดอยู่แค่ผักสลัด เพราะระบบควบคุมจะเป็นการควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชโดยตรง ทำให้ระบบการช่วยการทำเกษตรนี้ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการปลูกพืชทุก ๆ สายพันธุ์ ซึ่งจุดเด่นของฟาร์มการเกษตรสมัยใหม่ที่มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการทำเกษตรนี้มีความ

แตกต่างกับฟาร์มธรรมดา 2 ส่วนหลัก คือ ในฟาร์มการเกษตรสมัยใหม่ เราจะสามารถควบคุมปัจจัยการเติบโตของต้นพืชได้อย่างเที่ยงตรง สามารถปรับการทำงานของระบบได้อย่างอิสระ และเราสามารถใช้ทรัพยากรทั้งหมดไปอย่าง น้ำหรือปุ๋ย ได้อย่างแม่นยำและตรงต่อความต้องการของต้นพืช ไม่น้อยหรือมากเกินไป เช่น การรดน้ำที่พอดีกับความต้องการของพืช นอกจากจะช่วยทำให้ดินมีความชุ่มชื้นที่พอเหมาะสม่ำเสมออยู่ตลอดแล้ว ยังช่วยลดการสูญเสียทรัพยากรน้ำอีกด้วย ซึ่งจะเป็นไปได้เลยสำหรับเกษตรกรรมแบบดั้งเดิมไม่ว่าจะเป็นเกษตรเคมีหรือเกษตรอินทรีย์ ที่การรดน้ำและให้ปุ๋ยไม่สามารถควบคุมปริมาณให้เท่า ๆ กันในแต่ละแปลงปลูกได้ ส่งผลให้การทำการเกษตรนี้เป็นการทำการเกษตรที่ยั่งยืนในอนาคตต่อไป

ในการนำระบบช่วยการทำการเกษตรที่ว่ามานี้ มาใช้กับประเทศไทยที่ส่วนมากแล้วจะเป็นการปลูกด้วยวิธีแบบดั้งเดิม [25] หรือเป็นการปลูกโดยใช้ดิน โดยหลักแล้วจะแบ่งออกเป็น พืชนา พืชไร่ และพืชสวน เป็นการปลูกโดยใช้พื้นที่กว้าง ปลูกพืชหลากหลายชนิดผสมผสานกับการเลี้ยงปศุสัตว์ โดยจากข้อมูล เกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนในวันที่ 21 เมษายน 2563 จะมีครัวเรือนที่ปลูกพืชเป็นจำนวน 4.809 ล้านครัวเรือน คิดเป็น 59.41% ของเกษตรกรทั้งหมด [26] ดังที่แสดงในภาพที่ 4 การทำระบบช่วยการทำการเกษตรในไทยจึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 4 จำนวนครัวเรือน จาก 4 จังหวัด จังหวัดศรีสะเกษ จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดลพบุรี และจังหวัดฉะเชิงเทรา ระหว่าง พ.ศ. 2541–2555 แยกรายประเภทการผลิตเกษตร [25]

โดยการปรับประยุกต์ใช้การทำเกษตรสมัยใหม่โดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยการทำการเกษตรในประเทศไทยที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้น ได้แก่

- STARCAT WISE FARM [27] โดยจะเป็นชุดอุปกรณ์ควบคุมการเพาะปลูกพืชโดยจะมีการทำงานผ่านการสั่งงานในแอปพลิเคชันในโทรศัพท์มือถือ โดยระบบจะสามารถวัดความชื้นของดิน สั่งการทำงานทั้งรดน้ำและให้ปุ๋ย ไปจนถึงการตรวจดูโรคแมลงในโรงเรือน
- Handy Sense [28] เป็นระบบช่วยการทำการเกษตรแม่นยำ โดยการใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมทางการเกษตรและระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ โดยในการใช้งานจริง ผู้ใช้งานจะ

สามารถการสั่งการทำงานผ่านแอปพลิเคชันที่อยู่ในโทรศัพท์มือถือเพื่อสั่งเปิดปิดระบบควบคุมต่าง ๆ ตามความต้องการ เช่น หากพบการแจ้งเตือนค่าความชื้นในดินต่ำกว่าที่กำหนดสามารถ ผู้ใช้งานจะสามารถกดสั่งการรดน้ำพืชผลได้ทันที นอกจากนั้นแล้ว ระบบยังสามารถตั้งเวลาการทำงานให้ทำงานเป็นรอบหรือทำงานตามเงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างอัตโนมัติอีกด้วย อุปกรณ์ที่ใช้จะถูกแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 อุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะปลูก HandySense

จากการวิเคราะห์ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของระบบช่วยการทำการเกษตรต่าง ๆ ที่มีวางขายอยู่ในปัจจุบันพบว่า อุปกรณ์เหล่านี้จะมีข้อได้เปรียบคือ อุปกรณ์จะสามารถทำงานได้อย่างครบวงจรตามเป้าหมายที่ผลิตภัณฑ์ได้ตั้งไว้ มีสถานะและฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายและครอบคลุม สามารถทำงานได้ตามระยะเวลาจริง ผู้ใช้งานจะสามารถใช้งานระบบได้อย่างง่ายดายผ่านการใช้งานแอปพลิเคชันที่สร้างขึ้นมาสำหรับอุปกรณ์โดยเฉพาะ ส่วนข้อเสียเปรียบที่อุปกรณ์เหล่านี้มีร่วมกันคือ ระบบที่ใช้งานจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านไฟบ้าน ทำให้ในการติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้ จะมีการโยงสายกันไปมาระหว่างแผงควบคุม ตัวเซนเซอร์ และตัวกระตุ้นต่าง ๆ จึงอาจทำให้เกิดความไม่สะดวกในบางสถานการณ์ เช่น ในนาข้าวที่มีขนาดกว้างขวาง นอกจากนั้นแล้ว อุปกรณ์บางประเภทจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านการใช้งาน Wi-Fi ที่มีระยะการส่งสัญญาณที่ไม่กว้างขวาง หมายความว่า ตัวอุปกรณ์และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องตั้งอยู่ในสถานที่ที่สัญญาณ Wi-Fi เข้าถึงอีกด้วย

นอกจากการสร้างและใช้งานอุปกรณ์ช่วยการทำการเกษตรที่ใช้งานกับการปลูกพืชในพื้นที่ดินแล้ว การเปลี่ยนวิธีการปลูกพืชในดินแบบดั้งเดิมด้วยวิธีการปลูกพืชสมัยใหม่แบบต่าง ๆ เช่น การปลูกพืชด้วยการใช้สารละลายหรือไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics) จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในระยะยาว ลดการใช้ทรัพยากร โดยที่ยังคงสามารถปลูกพืชได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง หรือจะเป็นการปลูกพืชในแนวตั้ง (Vertical farming) ในระบบปิด ก็เป็นทางเลือกในการเปลี่ยนวิธีการปลูกพืชที่สามารถเพิ่มผลผลิตที่ได้โดยใช้พื้นที่เพาะปลูกเท่าเดิม ทั้งนี้ การเปลี่ยนวิธีการปลูกพืชไปเลยนี้อาจจะไม่เหมาะกับการปลูกพืชบางชนิดและต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูง จึงอาจไม่เหมาะกับการบางสถานการณ์ที่การปลูกพืชโดยใช้ดินจะมีความเหมาะสมมากกว่า

บทที่ 3

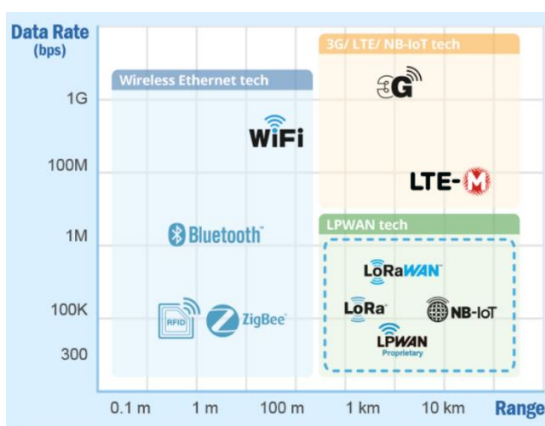
นิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมและการสื่อสารด้วยระบบการสื่อสารแบบ เครือข่าย LoRaWAN

3.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมและการสื่อสารต่าง ๆ

ในการออกแบบระบบการสื่อสารในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจะเลือกใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN เป็นวิธีในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจสอบและควบคุมปัจจัยที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืชในฟาร์มกับ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่ศูนย์กลาง เพราะสามารถทำงานได้ในระยะที่กว้างขวาง ใช้พลังงานต่ำ มีราคาการติดตั้งที่ถูก ใช้ได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่ต้องบำรุงรักษา และยังสามารถสื่อสารได้แม้ในสถานที่ที่สัญญาณ Wi-Fi ไปไม่ถึง โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงนิยามและข้อมูลต่าง ๆ ควบคุมและการสื่อสารต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้งานเทคโนโลยี LoRaWAN เพื่อใช้ในการควบคุมระบบการทำการเกษตรอัจฉริยะ

3.1.1 LPWAN

ลักษณะโครงสร้างของเทคโนโลยี LPWAN [29] [30] หรือ Low Power Wide Area Network จะเป็นเทคโนโลยีที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับความต้องการในการเชื่อมต่อการสื่อสารบนเครือข่ายระหว่าง อุปกรณ์สื่อสารในระยะทางไกล ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง มีการเชื่อมต่อที่ดีแม้จะอยู่ใน สภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยหรือมีสิ่งกีดขวางระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ โดยใช้พลังงานต่ำ แต่จะมี ข้อจำกัด คือ การส่งจะเป็นการส่งข้อมูลที่มีอัตราข้อมูล (Data Rate) ต่ำ ซึ่งจะแตกต่างจากเทคโนโลยีการ สื่อสาร Wireless Ethernet จำพวก Wi-Fi, Ethernet, ZigBee และ Bluetooth ที่การสื่อสารเหล่านี้จะมี ระยะทางในการส่งสัญญาณที่สั้นกว่า และจะแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสาร 3G / 4G / LTE ตรงที่การ สื่อสารเหล่านี้จะใช้พลังงานที่สูงกว่า แต่จะสามารถส่งข้อมูลมีอัตราข้อมูลสูงได้ ดังที่ได้แสดงการเปรียบเทียบ ของแต่ละเทคโนโลยีการสื่อสารในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ภาพแสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการส่งสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ [31]

จากภาพจะแสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยี LPWAN จะมีระยะการสื่อสารที่ไกลกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารอื่น ๆ แต่จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงมาก จากจุดเด่นและข้อจำกัดนี้ ทำให้ LPWAN เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบ IoT ที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ไม่สูงและใช้ในระยะทางที่กว้างไกล โดย LPWAN จะมีระยะการส่งและรับสัญญาณครอบคลุมในระยะไกลที่สุดถึง 5-10 km สำหรับพื้นที่โล่งที่ตัวรับและตัวส่งสัญญาณมีเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight) ถึงกันและตัวรับส่งสัญญาณอยู่ห่างจากพื้นดินและไม่มีสัญญาณอื่น ๆ รบกวน แต่ระยะของสัญญาณจะลดเหลือเพียง 500 m - 1 km ในพื้นที่เมืองที่มีสัญญาณรบกวนและมีอาคารเป็นตัวกั้นสัญญาณ ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่าง อาทิเช่น คุณภาพของเสาสัญญาณ คลื่นสัญญาณรบกวนในละแวกนั้น และความสูงของการติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณจากพื้นดิน เหตุที่ทำให้เทคโนโลยี LPWAN สามารถรับส่งสัญญาณระยะไกลได้ก็คือ การออกแบบให้ตัวรับสัญญาณมีการตอบสนองต่อสัญญาณที่ละเอียดอ่อน (Sensitivity) มากกว่าการเชื่อมต่อรูปแบบอื่น

3.1.2 OSI Model

OSI Model [32] [33] หรือ Open Systems Interconnection Model เป็นรูปแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผ่านระบบเครือข่าย เป็นแบบร่างที่ใช้อ้างอิงในระบบการสื่อสาร (Reference Model) โดยจะแบ่งการทำงานออกเป็น 7 ชั้น (Layer) เรียงตั้งแต่ชั้น 1 ที่อยู่ล่างสุดไปจนถึงชั้น 7 ที่อยู่บนสุด โดยทั้ง 7 ชั้น จะถูกแบ่งตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Application-oriented Layers หรือ Upper Layer

กลุ่มของชั้นที่ใช้สื่อสารการเชื่อมต่อข้อมูลของทั้งฝ่ายผู้ส่งข้อมูล (Senders) และฝ่ายผู้รับข้อมูล (Receivers) เข้ากับแอปพลิเคชัน (Application) ต่าง ๆ โดยการทำงานจะเกี่ยวข้องกับซอฟต์แวร์ (Software) เป็นหลัก

2. Network-dependent Layers หรือ Lower Layer

คือ กลุ่มของชั้นที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อข้อมูลสัญญาณ สื่อสารกันระหว่างฮาร์ดแวร์ (Hardware) ฝ่ายผู้ส่งข้อมูลและฝ่ายผู้รับข้อมูลเข้าด้วยกัน ผ่านระบบเครือข่ายในรูปแบบมีสายหรือไร้สาย โดยการทำงาน ของชั้นเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์เป็นหลัก

การสื่อสารกันของแต่ละชั้นจะสามารถสื่อสารกันได้เฉพาะในชั้นที่อยู่ติดกันเท่านั้น โดยแต่ละชั้น จะมีบทบาท หน้าที่ และหลักการทำงานที่แตกต่างกัน และมีชื่อเรียกตามรูปแบบการสื่อสาร การทำงาน ที่แตกต่างกันไป การนำเสนอการทำงานของแต่ละชั้น ทางผู้วิจัยจะขอนำเสนอข้อมูลเรียงจากชั้นที่เกี่ยวข้องกับ ผู้ใช้งานมากที่สุด เรียงลงไปจนถึงชั้นที่เป็นการสื่อสารกันระหว่างฮาร์ดแวร์ ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีชื่อเรียกดังนี้

3.1.2.1 Application-oriented layers (Layer 4-7) หรือ Upper Layer

Layer 7: Application Layer เป็นชั้นที่อยู่ใกล้ชิดกับผู้ใช้งาน (Users) มากที่สุด ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางของการทำงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้งานโดยตรง ผ่านซอฟต์แวร์ที่ผู้ใช้งานสามารถตอบสนองและสั่งคำสั่งได้อย่างง่ายดาย ตัวอย่างเช่น แอปพลิเคชันของโทรศัพท์มือถือหรือเว็บเบราว์เซอร์ที่ใช้ในการเปิดปิดเว็บไซต์ เป็นต้น

Layer 6: Presentation Layer เป็นชั้นที่ใช้ในการแปลงข้อมูลขาเข้าและขาออกที่มาจาก Application Layer จากข้อความภาษาต่าง ๆ ที่ผู้ใช้งานสามารถอ่านหรือพิมพ์เข้าเป็นรหัสเพื่อส่งต่อไปที่ชั้นต่อไป หรือทำงานรับข้อมูลที่เข้ารหัสเข้ามาและถอดรหัสออกกลับมาเป็นข้อความได้

Layer 5: Session Layer เป็นชั้นที่มีการเชื่อมต่อ (Sync) เงื่อนไขการใช้งานระหว่างเครื่องต้นทางกับเครื่องปลายทาง โดยการตั้งค่าพิกัดและกำหนดเงื่อนไขการสนทนา ประกอบด้วย การรับรองความถูกต้อง (Authentication) และการตั้งค่าการเชื่อมต่ออีกครั้งหลังจากการหยุดชะงักในการใช้งาน ตัวอย่างของชั้นนี้ เช่น Transmission Control Protocol (TCP) และ User Datagram Protocol (UDP) ของอินเทอร์เน็ต เป็นต้น

Layer 4: Transport Layer ทำหน้าที่ควบคุมการขนส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับหรือจากผู้รับไปยังผู้ส่ง การทำงานจะทำงานโดยการแบ่งชิ้นส่วนข้อความที่ต้องการส่งออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ หลายชิ้น เรียกว่า เซ็กเมนต์ (Segment) และทำการใส่ข้อมูลโปรโตคอล (Protocol) ที่ใช้ประกอบไปด้วย Source Port และ Destination Port ลงไปใน Segment เหล่านั้น

3.1.2.2 Network-dependent Layers (Layer 1-3) หรือ Lower Layer

Layer 3: Network Layer ทำหน้าที่สร้างช่องทางการเชื่อมต่อระหว่างเน็ตเวิร์ก (Network) ของผู้ส่งและผู้รับเข้าด้วยกันผ่าน IP Address ซึ่งเป็นการกำหนดที่อยู่ของผู้รับและผู้ส่งข้อมูลและจัดเส้นทางการข้อมูล ตรวจสอบว่าทิศทางที่ส่งข้อมูลถูกต้องหรือไม่ โดย ชั้นนี้จะรับข้อมูลที่เป็น Segment จาก Transport Layer ชั้นที่ 4 มาทำการใส่ข้อมูล IP ของผู้รับและผู้ส่ง ซึ่งหลังจากการปรับแต่งนี้แล้ว ข้อมูลที่เป็น Segment จะถูกเรียกว่าแพ็คเกจ (Packet)

Layer 2: Data Link Layer ทำหน้าที่ตั้งค่าการเชื่อมต่อกับเครือข่ายทางกายภาพที่ส่งข้อมูล โดยชั้นนี้จะรับข้อมูลที่เป็น Packet จาก Network Layer ชั้นที่ 3 มาทำการใส่ข้อมูลการตั้งค่าการเชื่อมต่อเพิ่มเติม เช่น Source MAC, Destination MAC, Tag VLAN, etc. ซึ่งหลังจากการปรับแต่งนี้แล้ว ข้อมูลที่เป็น Packet จะถูกเรียกว่าเฟรม (Frame) ที่จะใช้ในการรับส่งสัญญาณการสื่อสารในชั้นที่ 1 ต่อไป โดยในชั้นนี้จะแบ่งเป็นสองชั้นย่อย ๆ ได้แก่ ชั้นควบคุมลิงค์ตรรกะและชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ ซึ่งจะทำงานร่วมกันในการสร้างความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูล

Layer 1: Physical Layer ทำหน้าที่ส่งสัญญาณการสื่อสารข้อมูลที่เป็น Frame จะถูกส่งผ่าน ตัวกลางต่าง ๆ คือ เครือข่ายทางไฟฟ้ากลไก หรือผ่านคลื่นวิทยุ โดยชั้นนี้จะครอบคลุมอุปกรณ์และรูปแบบการสื่อสารที่หลากหลาย อาทิเช่น การเดินสายเคเบิล ตัวเชื่อมต่อ ตัวรับส่งสัญญาณ และตัวทำซ้ำ (Repeater) อีกด้วย

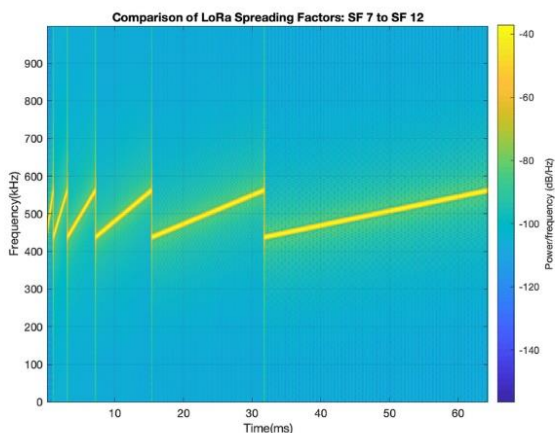
3.2 นิยามและหลักการทำงานของระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN

3.2.1 นิยามของระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

ระบบการสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN หรือ Long Range Wide Area Network [30] เป็นเทคโนโลยีการส่งสัญญาณไร้สายระยะทางไกลพลังงานต่ำหรือ Low Power Wide Area Network (LPWAN) ประเภทหนึ่ง โดย LoRaWAN จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 องค์ประกอบหลัก คือ การส่งสัญญาณ LoRa ซึ่งเป็น Physical Layer และการสื่อสารสัญญาณ LoRa ต่อขึ้นไปบนอินเทอร์เน็ตเรียกว่า LoRaWAN ซึ่งเป็น Upper Layer หรือ MAC Layer โดยในการทำงานของส่วน LoRa ที่เป็น Physical Layer จะเป็นส่วนกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของฮาร์ดแวร์ของ LoRa เป็นการส่งสัญญาณกันระหว่างตัวเซนเซอร์หรือตัวกระตุ้นกับส่วนการทำงานของ LoRaWAN ที่เป็นโปรโตคอลสื่อสารและสถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างสำหรับระบบโครงข่าย จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากสัญญาณ LoRa ส่งต่อขึ้นไป Network Server หรือ Upper Layer ต่อไป การทำงานร่วมกันของ LoRa และ LoRaWAN นี้ เป็นการทำงานเป็นระดับชั้นตามแบบที่เป็นมาตรฐานกลางในการทำงานของระบบเครือข่าย เรียกว่า Open System Interconnection หรือ OSI Model

3.2.2 นิยามของ LoRa (Physical Layer)

LoRa [34] หรือ Long Range เป็น Physical Layer [35] เป็นส่วนกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพทางฮาร์ดแวร์ของ LoRa โดยการส่งสัญญาณของ LoRa จะเป็นการส่งสัญญาณระยะไกลที่ใช้พลังงานต่ำ ส่งสัญญาณชุดข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลต่ำ (0.3 kbps ถึง 5.5 kbps) ส่งไปที่ตัวรับปลายทางที่อยู่ไกลออกไป การส่งสัญญาณนี้จะใช้ความถี่คลื่นวิทยุแบบ Spread Spectrum Modulation Scheme แบบมีกรรมสิทธิ์ ซึ่งแตกแขนงออกมาจาก Chirp Spread Spectrum Modulation (CSS) โดยการใช้งานการส่งสัญญาณในรูปแบบนี้ ผู้ใช้งานสามารถกำหนด Spreading Factor (SF) หรือเป็นค่าที่กำหนดช่วงเวลาในการส่งสัญญาณตามภาพที่ 7 ถ้าหาก SF มีค่าสูง ตัวรับสัญญาณก็จะสามารถรับสัญญาณที่ถูกรบกวนสัญญาณได้มากขึ้น เพราะสัญญาณมีความยาวมากขึ้น แม้อัตราสัญญาณไปส่วนหนึ่งแต่ตัวรับสัญญาณปลายทางก็ยังสามารถถอดรหัสเป็นข้อมูลออกมาได้ ส่งผลให้ระยะทางในการส่งสัญญาณจะไปได้ไกลมากยิ่งขึ้นอีกด้วย แต่ระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในอากาศ (Air Time) และพลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณก็จะมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 7 รูปแบบการส่งสัญญาณ Chirp Spread Spectrum Modulation (CSS) ที่ LoRa ใช้งาน [36]

การส่งสัญญาณรูปแบบนี้ถูกพัฒนาโดย Semtech Corporation โดยมีโปรโตคอล LoRaWAN เป็นมาตรฐานสากล และด้วยเทคนิคนี้เอง เป็นสิ่งที่ทำให้การส่งสัญญาณ LoRa สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลกว่าการส่งสัญญาณไร้สายแบบอื่น จากสถิติโลกที่จดบันทึกไว้ พบว่าระยะทางที่มากที่สุดที่สัญญาณ LoRa สามารถส่งไปได้ถึง คือ 766 km เป็นการส่งสัญญาณจากบอลูนที่ลอยอยู่บนท้องฟ้าซึ่งปราศจากสิ่งกีดขวางที่จะคอยรบกวนสัญญาณ การส่งสัญญาณ LoRa จะเป็นการส่งสัญญาณในช่วงสัญญาณที่ไม่มีกรรมสิทธิ์ (Free Band) โดยช่วงสัญญาณที่ไม่มีลิขสิทธิ์นี้จะแตกต่างกันไปตามแต่ละภูมิภาค [37] เช่น 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz ในยุโรป และ 915 MHz ในสหรัฐอเมริกาตอนเหนือ โดยช่วงความถี่ (Frequency) ที่มีการใช้งาน LoRa ตามประเทศต่าง ๆ จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงย่านความถี่ใช้งานส่งสัญญาณของ LoRa โดยมีหน่วยเป็น MHz [38]

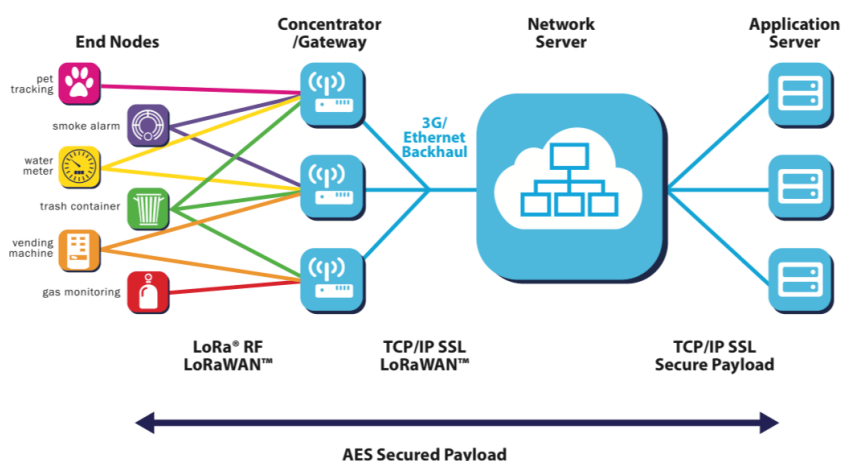
Channel Plan	Common Name
EU863-870	EU868
US902-928	US915
CN779-787	CN779
EU443	EU443
AU915-928	AU915
CN470-510	CN470
AS923	AS923
KR920-923	KR920
IN865-867	IN865
RU864-870	RU864

สำหรับในประเทศไทย ช่วงสัญญาณที่ไม่ติดลิขสิทธิ์นี้จะอยู่ในช่วงความถี่ 920-925 MHz หรือ Channel Plan AS923 [39]

3.2.3 นิยามของ LoRaWAN (Upper Layer)

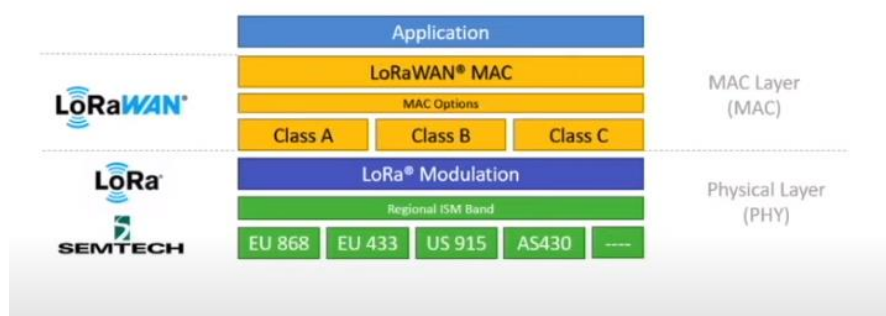
LoRaWAN (Upper Layer) คือ โพรโตคอลการสื่อสารและสถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างสำหรับระบบโครงข่าย มีรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายโทโพโลยี (Topology) รูปแบบดวงดาว (Star) ซึ่งจะมีจุดเด่นอยู่ที่โครงข่ายจะมีขนาดและความซับซ้อนน้อยกว่าโครงข่ายสื่อสารอื่น ๆ อาทิเช่น โครงข่ายรูปแบบร่างแห (Mesh) ทำให้โครงข่ายรูปแบบดวงดาว มีความสามารถในการสื่อสารระยะไกลโดยที่ยังประหยัดพลังงานได้มากกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น ๆ

สถาปัตยกรรมระบบโครงข่ายของ LoRaWAN [40] เซนเซอร์หรือตัวกระตุ้นแต่ละตัวจะถูกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลที่ได้รับหรือต้องการส่งเซนเซอร์หรือตัวกระตุ้นให้เป็นสัญญาณ LoRa และส่งสัญญาณ LoRa นี้ต่อไป โดยจะเรียกไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งตัวที่มีเซนเซอร์หรือตัวกระตุ้นตัวเดียวหรือหลายตัวว่า ตัวรับส่งสัญญาณปลายทางหรือใช้ชื่อภาษาอังกฤษว่า End Node หรือ End Device โดย End Device แต่ละตัวจะส่งข้อมูลที่สามารถอ่านได้ไปยัง Gateway จากนั้น Gateway ที่จับสัญญาณ LoRa ได้จะส่งข้อมูลหรือ Packet ที่ได้รับสู่ Network Server (ระบบ Cloud-based Network) ด้วย Backhaul ต่าง ๆ เช่น Cellular, Ethernet หรือ Wi-Fi ที่ Network Server หลังจากที่ได้รับข้อมูลหรือ Packet มา จะมีการคัดกรองข้อมูลที่ได้รับเพื่อตรวจสอบความปลอดภัย และส่งต่อข้อมูลไปยัง Application Server ต่อไป ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างระบบการสื่อสารแบบมาตรฐานของ LoRaWAN [41]

ในการทำงานของการส่งสัญญาณ LoRaWAN จะเป็นการที่มี LoRa เป็น Physical Layer ที่คอยดูแลควบคุมการเข้ารหัสหรือถอดรหัสของสัญญาณ ตั้งค่าช่วงความถี่ในการใช้งานสัญญาณให้ถูกต้องตามกฎหมายของแต่ละประเทศ และมี LoRaWAN เป็น Upper Layer หรือ MAC Layer (Media Access Control) เป็นตัวกำหนด Class การใช้งาน ของ End Device รวมถึงการปรับแต่งข้อความที่ต้องการส่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการเข้ารหัสและส่งสัญญาณ เช่นเดียวกับการปรับแต่งข้อความที่ได้รับมา เพื่อนำผลต่าง ๆ มาแสดงผลให้ผู้อ่านสามารถอ่านเข้าใจได้โดยง่าย ดังที่แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างการทำงานของ LoRa (PHY) และ LoRaWAN (MAC) [34]

3.2.4 นิยามของ Network Server

LoRaWAN Network Server [42] คือ แกนหลักของระบบ LoRaWAN เปรียบเสมือนเป็นคอมพิวเตอร์หรือเป็นเซิร์ฟเวอร์หลักในการทำงาน คอยจัดการ LoRaWAN Network Layer ซึ่งรวมถึงการจัดการ MAC Layer การตั้งค่า Regional Parameters (ตั้งค่าช่วงความถี่ที่จะทำการส่งสัญญาณออกไป) และการเปิดใช้งาน Adaptive Data Rate (ADR) หรือ ฟังก์ชันการทำงานที่จะตั้งค่า Spreading factor (SF) และ Transmission Power โดยอัตโนมัติให้เหมาะสมกับระยะทางระหว่าง End Device และ Gateway เพื่อให้การส่งสัญญาณประหยัดพลังงานมากที่สุดในขณะที่ยังสามารถส่งถึงกันได้โดยไม่มีปัญหา นอกจากนี้แล้ว LoRaWAN Network Server ยังทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- อนุญาตการเชื่อมต่อและการส่งข้อมูลระหว่าง Gateway และ Network Server ด้วยวิธีการ UDP หรือ TCP
- ควบคุมการทำงานโดยภาพรวมของการส่งสัญญาณ ให้สัญญาณ LoRa ที่ถูกนำมาแปลงค่า เป็นสัญญาณจาก Gateway ตัวที่รับสัญญาณจาก End Device ได้ชัดเจนที่สุด และในทางกลับกัน การส่ง Downlink กลับไปยัง End Device ก็จะถูกส่งผ่าน Gateway ที่สามารถสื่อสารกับ End Device ได้ชัดเจนที่สุด (ในกรณีสัญญาณของ End Device มี Gateway หลาย ๆ ตัวรับค่าได้พร้อมกัน)
- สังเกตสถานการณ์เชื่อมต่อของ End Device , Gateway และ User Applications
- ยืนยันความปลอดภัยและความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ส่งผ่านกัน

โดย LoRaWAN Network Server ยังสามารถแยกย่อยออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

- 1) Private Network Server - เป็น Network Server ส่วนตัวที่เราติดตั้งและควบคุมด้วยตัวเองทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server
- 2) Public Network Server - เป็น Network Server ที่มีผู้ให้บริการอยู่ เช่น The Things Stack (TTS) ที่ผู้ให้บริการคือ The Things Network ที่มีการอนุญาตให้ใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย โดยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ The Things Stack เป็น Network Server ของระบบช่วยการทำการเกษตร เนื่องจาก Network Server นี้ถือเป็นหนึ่งในมาตรฐานสากลของการรับ/ส่งสัญญาณ LoRaWAN มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เช่น สามารถ Integrate ระบบการรับส่งข้อมูลสัญญาณให้ส่งข้อมูลต่อไปยัง Application ที่ต้องการผ่าน MQTT หรือ Webhook

3.2.5 นิยามของ LoRaWAN Application Server

LoRa Application Server [43] คือส่วนที่จัดการ application layer เป็นส่วนที่ทำงานนำข้อมูลที่ได้ออกไปประยุกต์ใช้ในแง่มุมต่างๆ โดยการทำงานร่วมกันกับการใช้งาน MQTT, HTTP Webhooks หรือ API ต่าง ๆ เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลไปยัง Application ภายนอก เช่น Web interface, IoT Software หรือ Visualization Tool ต่าง ๆ

3.2.6 รูปแบบการทำงานของ Device Class ใน LoRaWAN

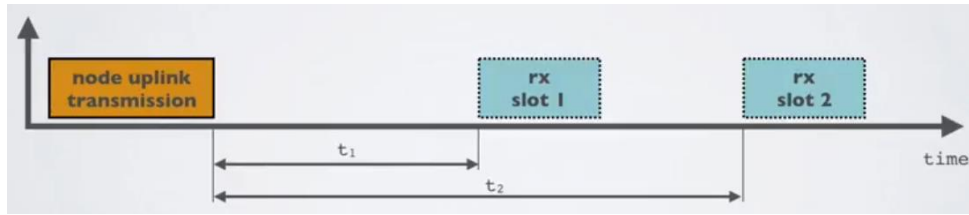
โครงสร้างของ LoRa สามารถจำแนก Devices Class [44] ได้เป็น 3 แบบ คือ

1. Class A (Baseline) เป็นโหมดปกติทั่วไปของอุปกรณ์ใน LoRa ที่อุปกรณ์ LoRa ทุกตัวจะสามารถทำงานในโหมดนี้ได้ และจะเป็นโหมดที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด หลักการทำงานของโหมดนี้คือ ภายหลังจากที่ End Device เปิดพอร์ต Tx (Transmitter) เพื่อส่งสัญญาณ Uplink ไปแล้ว ตัวมันเองจะเปิดช่องรับสัญญาณ Rx (Receiver) ไว้สำหรับการรับ Down Link ทั้งสิ้นอีก 2 ครั้ง โดยครั้งแรกเปิดหลังจากที่ส่งสัญญาณ Uplink ไปแล้ว 5 วินาที และครั้งที่ 2 เปิดหลังจากเปิดครั้งแรก 1 วินาที

ข้อดี คือ การทำงานใน Class นี้จะประหยัดพลังงานมาก ๆ

ข้อเสีย คือ Downlink ที่ส่งกลับมาหาตัวอุปกรณ์ LoRa อาจจะต้องรอเวลาให้พอดีกัน ซึ่งก็มีโอกาสที่ข้อมูลอาจสูญหายหากจังหวะการส่งไม่พอดีกัน

โดยอุปกรณ์ใน Class A จะเหมาะสมสำหรับการใช้งานกับการส่งข้อมูลที่เซนเซอร์อ่านได้ จาก End Device ขึ้นมาที่ Gateway ตามปกติ และไม่จำเป็นต้องมีกำลัง Downlink กลับไปส่งงานตัว End Device มากนัก เช่น การอ่านค่าจากเซนเซอร์ทุก ๆ 30 นาที ดังที่แสดงในภาพที่ 10



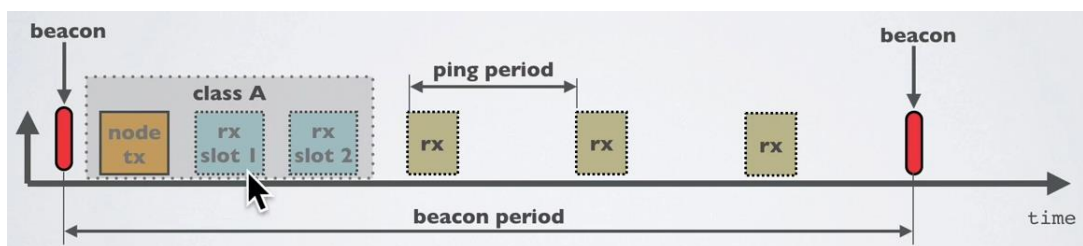
ภาพที่ 10 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class A [45]

2. Class B (Beacon) เหมาะสำหรับอุปกรณ์ End Device ที่ต้องรับคำสั่งจากรีโมทคอนโทรล การทำงานจะเป็นการที่ End Device มีการเปิดพอร์ต Rx ไว้ตามเวลาที่กำหนดเป็นรอบ ๆ ทำให้ Gateway สามารถสื่อสาร ส่งสัญญาณหรือคำสั่ง Downlink ต่าง ๆ กลับมาที่ End Device ได้

ข้อดี คือ Gateway จะสามารถส่ง Downlink กลับมาได้บ่อยมากขึ้น ตามช่วงเวลาที่เปิดพอร์ต Rx ทำให้สามารถควบคุม Latency ได้ตามช่วงระยะเวลาที่กำหนดระหว่างการเปิดพอร์ต Rx

ข้อเสีย คือ การทำงานใน Class นี้จะเปลืองพลังงานมากกว่า Device Class A

อุปกรณ์ใน Class B จะเหมาะสมกับการทำงานจำพวกที่ต้องมีการส่งสัญญาณกลับมาสั่งงาน End Device อยู่บ่อยครั้ง ดังที่แสดงในภาพที่ 11 เช่นการส่งคำสั่งให้เครื่องจักรหรือตัวกระตุ้นทำงานเปิดปิด บ่อยครั้ง



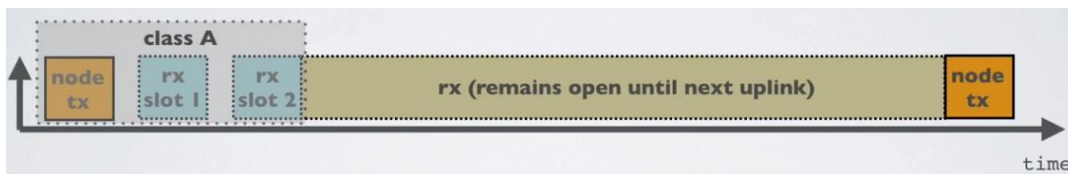
ภาพที่ 11 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class B [45]

3. Class C (Continuous) จะใช้สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องมีการรับ Downlink อยู่ตลอดเวลา โดย End Device จะมีการเปิดพอร์ต Rx ตลอดเวลา

ข้อดี คือ Gateway จะสามารถส่ง Downlink กลับมาเมื่อใดก็ได้ ทำให้มี Latency ที่ต่ำที่สุด

ข้อเสีย คือ จะเป็น Device Class ที่เปลืองพลังงานมากที่สุด

อุปกรณ์ใน Class C จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายที่คอยให้พลังงานไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา การใช้งานส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลอัปเดตเวอร์ชันการทำงานของตัว End Device ดังที่แสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงเวลาในการเปิดพอร์ต Rx เพื่อรับข้อมูล Downlink ของอุปกรณ์ Class C [45]

อุปกรณ์ LoRaWAN ทุกตัวจะสามารถใช้งานฟังก์ชันใน Class A ได้ และสำหรับ Class B และ Class C จะสามารถใช้งานได้บางอุปกรณ์ตามความเหมาะสม โดยการใช้งานอุปกรณ์ที่รองรับทั้ง 3 Class จะสามารถเปลี่ยน Class ไปมากันได้อย่างอิสระตามความต้องการใช้งานในขณะนั้น

หลักการใช้งาน ทุก ๆ Device Class การส่ง Uplink จาก End Device ขึ้นไปที่ Gateway จะสามารถกระทำเมื่อใดก็ได้ โดยสำหรับ LoRaWAN MAC Layer หรือ Media Access Control ที่มีเพื่อกำหนด Class ของ Device และใช้ในเตรียมการส่งสัญญาณ LoRa แล้ว ตามมาตรฐานของ LoRaWAN การส่งสัญญาณ Uplink จะใกล้เคียงกับโปรโตคอล Aloha แบบ Pure Aloha ที่มีลักษณะการส่งสัญญาณที่ตัวส่งสัญญาณ End Device จะสามารถส่งสัญญาณ Uplink ขึ้นมาที่ Gateway เวลาใดก็ได้ ดังนั้นเมื่อมีการส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน จำนวนมาก อาจก่อให้เกิดการชนกันของสัญญาณ (Packet Collision) ส่งผลให้ข้อมูลหรือ Packet ที่ต้องการส่งนั้น สูญหายลงไปได้ การใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อปรับปรุง Quality-of-Service (QoS) จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณให้ตีมากยิ่งขึ้น เช่น เปลี่ยนการใช้งานการส่ง Uplink จาก Pure Aloha ไปเป็น Slotted Aloha ตาม [46] หรือ การใช้ Mixed Integer Linear Programming (MILP) ในการปรับค่า Spreading Factor (SF) และค่า Carrier Frequency (CF) ให้มีความเหมาะสมต่อการส่งสัญญาณมากที่สุดตาม [47] การปรับค่า SF ให้เหมาะสมนี้จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการส่งของสัญญาณและเวลาที่สัญญาณอยู่ในอากาศ (Time on air) ถ้าเวลาที่สัญญาณอยู่ในอากาศใช้เวลานานจะเป็นผลทำให้เกิดโอกาสที่ข้อมูลจะชนกันและสูญหายไปสูงมากขึ้นตามไปด้วย และในการส่งสัญญาณนั้น จะถูกออกแบบให้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และมีระบบป้องกันตามมาตรฐานที่วางเอาไว้โดยให้มีการ Encryption หลายชั้น เช่น Unique Network Key, Application Key และ Device-specific Key

3.2.6 วิธีการตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณระหว่าง Gateway และ End Device (Activation)

ในการเริ่มใช้งาน LoRaWAN End Device จำเป็นที่จะต้องมีการ Activate เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายของ LoRa ก่อน [48] [45]

ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

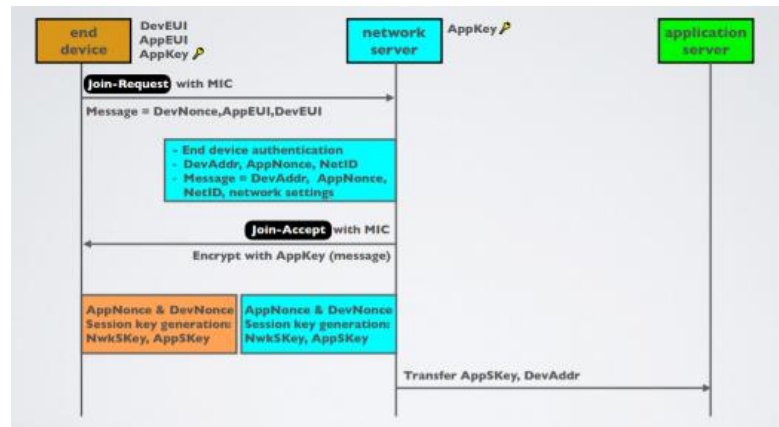
1. Over-The-Air Activation (OTAA) ในกระบวนการเริ่มใช้งานของ End Device ในระบบโครงข่าย LoRa จำเป็นที่จะต้องมีการ Activate การทำงานด้วย Key ต่าง ๆ โดยก่อนการเริ่มต้นการใช้งาน

End Device จะต้องมี DevEUI, AppEUI และ AppKey ส่วน Network Server ก็จะต้องมี AppKey เดียวกับที่ End Device มีอยู่กับตัว

โดยหลังจากเปิดใช้งานแล้ว End Device จะทำการส่ง Packet ออกไปให้ตัว LoRaWAN Gateway ที่อยู่ในระยะการสื่อสาร โดย Packet แรกที่ส่งออกไป เรียกว่า Join-Request เป็น Packet ที่ไม่ได้เข้ารหัสข้อความ แต่ภายใน Packet จะมี DevNonce เป็นตัวเลขสุ่มขึ้นมาป้องกันการที่ End Device เดิม ขอเชื่อมต่อซ้ำ ๆ เข้ามาที่ Network Server, AppEUI เป็นเลขบ่งบอกถึง Application Server ทำหน้าที่เหมือนกับเป็นเลขของ port, DevEUI เป็นเลขที่ระบุเฉพาะถึง End Device ขึ้นนั้น ๆ คล้าย ๆ กันกับ MAC address โดยที่ End Device สำเร็จรูปที่มีขายตามท้องตลาดบางตัวจะมี DevEUI มาอยู่แล้ว และสุดท้ายคือ Message Integrity Code (MIC) ที่ถูกสร้างขึ้นโดย AppKey

พอหลังจากที่ Gateway ได้รับ Join Request แล้ว ตัว Gateway จะส่ง Packet นี้ขึ้นไปประมวลผลที่ Network Server ที่จะทำการตรวจสอบ DevNonce ว่าไม่ได้มีการส่งสัญญาณขอเชื่อมต่อที่มี DevNonce ซ้ำมาแล้วหรือไม่ ถ้ามีซ้ำก็จะทำการปฏิเสธ Packet นั้นไป จากนั้น Network Server จะทำการพิสูจน์ว่า End Device นั้นมีอยู่และสามารถใช้งานได้จริงด้วย MIC แล้วจึงทำการสร้าง Key ต่าง ๆ เพื่อส่งกลับไปยืนยันให้แก่ End Device ประกอบไปด้วย DevAddr (Device Address) เป็นรหัสที่สร้างอิงมาจาก DevEUI ทำหน้าที่คล้าย ๆ กับการเป็น client ip-address, AppNonce ที่เป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา, NetID ที่เป็นตัวระบุ Network ที่ใช้งาน และ Message Integrity Code (MIC) ที่ถูกสร้างขึ้นโดย AppKey โดย เนื้อหาในข้างในจะถูกเข้ารหัสไว้ด้วย AppKey แล้วจึงส่งข้อมูลทั้งหมดนี้กลับไปให้ End Device โดย Packet ที่ส่งกลับไปนี้ เรียกว่า Join-Accept ตอนนี้ ทั้ง End Device และ Network Server จะมี AppNonce และ DevNonce เป็นค่าเดียวกันแล้ว

หลังจากนั้น ทั้ง End Device และ Network Server จะใช้ AppNonce และ DevNonce ในการสร้าง Network Session Key (NwkSkey) เพื่อใช้ในการตรวจสอบยืนยัน Message Integrity Code (MIC) รวมทั้งใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัสของ Payload อีกด้วย และจะทำการสร้าง Application Session Key (AppSKey) เพื่อใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัสของ Payload แบบ End-to-end จาก End Device ไปสู่ Application Server ทั้งสอง Key นี้เองที่ Network Server จะส่งต่อไปที่ Application Server ในกรณีที่ถ้าผู้ใช้งานต้องการให้ Payload ถูกถอดรหัสที่ Application Server โดยตรง ขั้นตอนการ Activation ด้วยวิธี OTAA จะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการ Activation ของ End Device เพื่อให้สามารถใช้งานเครือข่ายสื่อสาร LoRaWAN ด้วยวิธี OTAA [45]

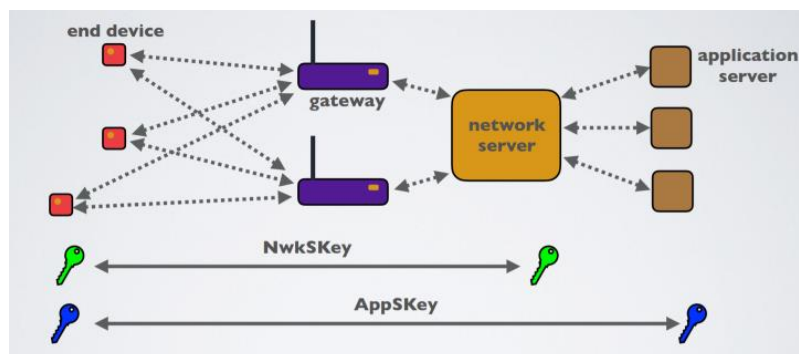
2. Activation By Personalization (ABP) ในการ Activation รูปแบบนี้ จะไม่มีการส่ง Packet Join-Request และ Join-Accept โดยที่ End Device จะไม่ได้มีการเก็บ DevEUI, AppEUI และ AppKey ไว้ แต่จะมีการเก็บการตั้งค่าของ DevAddr, AppSKey และ NwkSKey ส่วนทาง Network Server จะเก็บการตั้งค่าของ DevAddr และ NwkSKey และในส่วนของ Application Server จะมีการเก็บการตั้งค่าของ DevAddr และ AppSKey พอ End Device ต้องการที่จะส่งข้อมูลไปที่ Network Server ข้อมูลนั้นจะถูกเข้ารหัสและส่งไปที่ และข้อความดังกล่าวจะถูกถอดรหัสที่ปลายทางตาม Key ที่ได้ตั้งค่าไว้ โดย Key ที่ End Device, Network Server และ Application Server ใช้ในการ Activation ด้วยวิธี ABP จะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดง Key ที่แต่ละองค์ประกอบถูกตั้งค่าไว้ก่อนการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานเครือข่ายสื่อสาร LoRaWAN ด้วยวิธี OTAA [45]

วิธี Over-The-Air Activation (OTAA) จะมีความปลอดภัยในการใช้งานมากกว่าวิธี Activation By Personalization (ABP) เพราะ OTAA จะมีการแลกเปลี่ยน Key ระหว่าง End Device และ Network Server แต่ ABP จะสามารถเข้าสู่ระบบโครงข่ายได้ไวกว่า เนื่องจากมีขั้นตอนที่น้อยกว่า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีการ Activation แบบ OTAA

โดยหลังจากการ Activation เสร็จเรียบร้อยแล้ว การสื่อสารและการใช้ Key ในการถอดรหัสของข้อมูลจาก End Device ไปที่ Network Server และจาก End Device ไปที่ Application Server จะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การสื่อสารและการใช้ Key ในการถอดรหัสข้อมูลในการสื่อสารแบบ End to End รูปแบบต่าง ๆ [45]

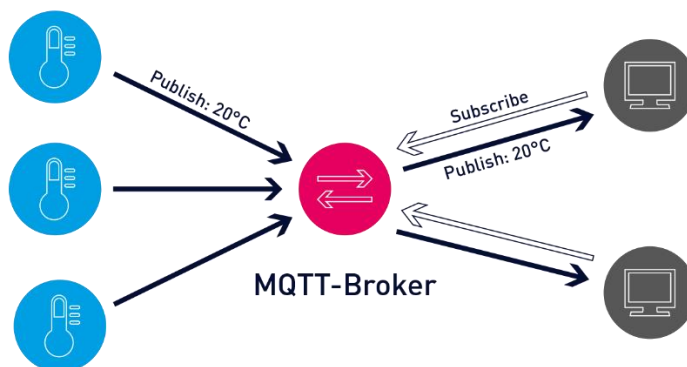
3.3 การใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ ผสมผสานกับเทคโนโลยี LoRaWAN เพื่อนำไปต่อยอดกับระบบช่วยการทำงานเกษตรอัตโนมัติ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้เครื่องมือ โปรแกรม วิธีการในการสื่อสาร หรือ โปรโตคอล (Protocol) ต่าง ๆ ในการใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี LoRaWAN

3.3.1 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [49] เป็นโปรโตคอลที่ออกแบบมาเพื่อ การเชื่อมต่อแบบ M2M (machine-to-machine) หรือก็คือ ระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการทำงานร่วมกันกับ IOT (Internet of Things) โดยเฉพาะ เนื่องจากโปรโตคอลการสื่อสารแบบ TCP/IP เดิม นั้นปกติแล้วจะมีการส่งข้อมูลแบบ One-To-One การส่งเช่นนี้จะทำให้เปลืองทรัพยากรเป็นอย่างมาก เพราะระบบ IOT ส่วนมากแล้วจะมีการส่งข้อมูลตลอดเวลา และอุปกรณ์หรือแอปพลิเคชันที่คอยรับข้อมูลอยู่นั้น อาจจะมีจำนวนมาก ดังนั้น การส่งข้อมูลที่ดีที่สุดจะต้องเป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบของ One-To-All เช่น การส่งข้อมูลเซนเซอร์ที่อ่านได้จาก End Device โดยเทคโนโลยี LoRaWAN ไปต่อยังแอปพลิเคชันจำนวนมากที่ใช้ในการจัดการ ประมวลผล หรือนำค่าไปแสดงผลต่อไป

MQTT เป็นโปรโตคอลที่มีน้ำหนักเบา ถูกออกแบบมาให้ใช้งานเพื่อส่งข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ๆ มี Bandwidth ที่ต่ำ จึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับการนำโปรโตคอลนี้ มาใช้งานร่วมกับ LoRaWAN โดยหลักการทำงานของ MQTT จะเป็นแบบ Publish และ Subscribe ซึ่งจะคล้ายคลึงกับหลักการใช้ใน Web Service ที่ต้องใช้เว็บเซิร์ฟเวอร์เป็นตัวกลางระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน แต่ MQTT จะใช้ตัวกลางที่เรียกว่า Broker เพื่อทำหน้าที่จัดคิวรับส่งข้อมูลระหว่าง Publisher (ผู้ส่งสาร) และ Subscriber (ผู้รับสาร) ดังที่แสดงแผนผังการทำงานในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แผนผังแสดงการทำงานและโครงสร้างของโปรโตคอล MQTT [50]

โดยหลักการทำงานของ MQTT จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

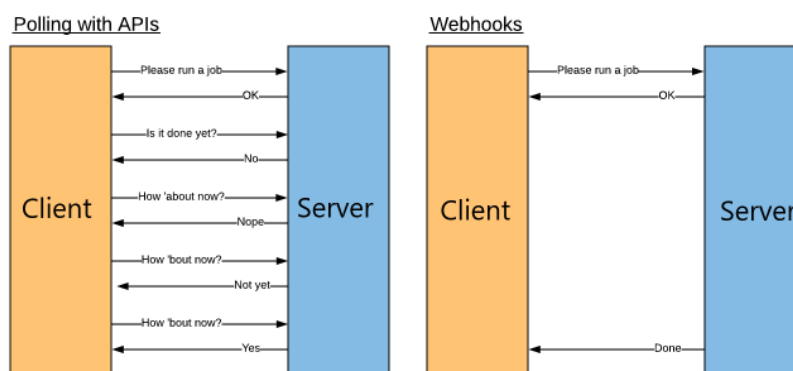
1. Broker (Server) คือตัวกลางในการรับข้อมูลจาก Publisher และส่งข้อมูลให้กับ Subscriber
2. Clients (Subscriber / Publisher)
 - Publisher คือตัวส่งข้อมูลให้กับ Topic ที่อยู่ใน Broker เรียกว่าการ Publish
 - Subscriber คือตัวรับข้อมูลจาก Topic ที่อยู่ใน Broker เรียกว่าการ Subscribe
3. Topic คือหัวเรื่องที่เราต้องการรับส่งข้อมูล ระหว่าง Publisher กับ Subscriber

ขั้นตอนในการทำงานรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล MQTT นั้น จะกระทำโดยการทำ Subscriber จะ Subscribe ใน Topic ที่ต้องการได้รับข้อมูลกับ Broker และจากนั้นเมื่อ Publisher ทำการ Publish ข้อมูลมาที่ Topic นั้น Subscriber ที่ Subscribe ใน Topic นั้น ก็จะได้รับข้อมูลที่ Publish เข้ามาใน Broker

3.3.2 Webhook

Webhooks คือ Service ที่ทำหน้าที่ในการส่ง Request เป็น HTTP POST ไปยัง URL ที่ได้กำหนดไว้ การทำงานของ Webhook จะคล้ายคลึงกับการทำงานของ API แต่เป็นการใช้งาน API แบบสลับข้างกัน กล่าวคือ โดยปกติแล้วการทำงานของ API ตามปกติ ผู้ให้บริการหรือผู้ให้ข้อมูล โดยอาจจะเป็นเซิร์ฟเวอร์ เว็บไซต์ หรือ แอปพลิเคชัน ต่าง ๆ เปิด API ให้ใช้งาน เวลาที่ผู้ใช้งานหรือผู้ที่ต้องการข้อมูล โดยอาจเป็นเซิร์ฟเวอร์ เว็บไซต์ หรือ แอปพลิเคชันต่าง ๆ เช่นกัน ต้องการข้อมูล ผู้ใช้ก็จะส่งคำร้องขอ (Request) ไปยัง URL ที่ต้องการจึงจะได้รับข้อมูลกลับมา การใช้ API แบบนี้ ในกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการตรวจสอบการทำงานที่ไม่รู้ว่าเกิดขึ้นเมื่อใด ผู้ใช้งานจะต้องส่งคำร้องขอไปยังผู้ให้บริการซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่องแบบ Polling ทำให้เสียทรัพยากรและเพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนให้การสื่อสารเป็นอย่างมาก ในทางกลับกันในกรณีที่การส่งข้อมูลกลายมาเป็นแบบ Webhook ผู้ใช้งานจะไม่ได้ส่งคำร้องขอไปที่ URL ของผู้ให้บริการแล้ว แต่กลับกัน ทางฝั่งผู้ให้บริการจะเป็นคนที่ให้ URL หรือ API ที่ต้องการให้ส่งข้อมูลมาถึง ส่งไปให้แก่ผู้ให้บริการตั้งแต่เริ่มแรกเลย แทน แล้วเมื่อใดที่ผู้ให้บริการต้องการส่งข้อมูลอะไร ผู้ให้บริการก็สามารถส่งข้อมูลนั้นมายังผู้ใช้งานทันทีที่ข้อมูลที่ต้องการจะส่งเกิดขึ้น ในที่นี้ข้อมูลที่ต้องการจะส่งในลักษณะนี้ส่วนมากแล้วจะเป็นข้อมูลที่เกิดจากเหตุการณ์ (Event) บางอย่างตามเวลาจริง (Real-Time) ดังที่แสดงในภาพที่ 17 เช่น การส่งข้อมูลค่า

สัญญาณของเซนเซอร์ไปวิเคราะห์ผลในแอปพลิเคชันอื่น ๆ เมื่อระบบได้รับค่าข้อมูลของเซนเซอร์ เป็นต้น โดยส่วนมากแล้ว การส่งข้อมูลผ่าน Webhook ในลักษณะนี้ ข้อมูลจะถูกส่งผ่าน HTTP POST และข้อมูลจะมาในรูปแบบ JSON แต่ก็อาจมีบ้างที่เป็น XML ขึ้นอยู่กับผู้ให้บริการแต่ละราย

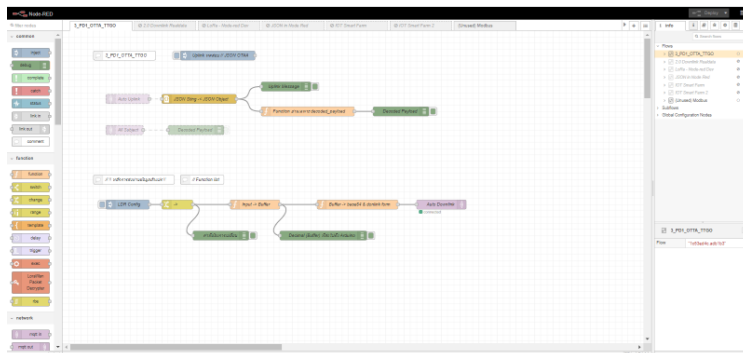


ภาพที่ 17 แผนผังแสดงการทำงานเปรียบเทียบระหว่าง API และ Webhook[51]

3.3.3 Node red

Node-RED [52] เป็นเครื่องมือการเขียนโปรแกรมที่จะช่วยในการเชื่อมโยงระหว่าง Server, Hardware Device, Client, API และ Online Service ต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยการใช้ Interface มาช่วยในเรื่องการเขียนโปรแกรมและจัดการโครงสร้างเงื่อนไขของระบบให้เห็นการทำงานออกมาเป็นภาพชัดเจน ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่จริงและระบบคลาวด์ (Cloud) เป็นไปได้อย่างง่ายดาย เหมาะสมสำหรับแนวคิดของ IoT ดังที่แสดงในภาพที่ 18

โดยในการใช้งาน Node-RED ผู้ใช้งานสามารถใช้งาน Node หรือฟังก์ชันที่สมบูรณ์ในตัวของมันเองอยู่แล้ว นำมาใช้งานเพื่อรับ Input หรือ ส่ง Output ออกมาได้ตามต้องการ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของแต่ละฟังก์ชันหรือจะเขียนฟังก์ชันเฉพาะทางขึ้นมาเพื่อใช้กับระบบที่ออกแบบไว้ได้อีกด้วย การใช้งาน Node-RED จะช่วยลดขั้นตอนการทำงานและลดความยุ่งยากของการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานในระบบ IoT ลงอย่างมาก โดยภาษาที่ใช้ในการใช้งาน Node-RED จะเป็น JavaScript โดยมี Platform เป็น Node.js และชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารกันระหว่าง Node แล้วโดยส่วนมากแล้วจะเป็น JSON



ภาพที่ 18 ตัวอย่างการใช้งาน Node-RED

ในการใช้งาน Node-RED นอกจากจะมีข้อดีมากมายที่จะช่วยให้การทำงานการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานกับระบบ IOT เป็นไปอย่างง่ายดายแล้วนั้น Node-RED จะมีข้อจำกัดของการใช้งานอยู่ 2 ข้อ คือ

1. Node-RED จะไม่มีแอปพลิเคชันบนมือถือ โดยทั่วไปแล้วการใช้งานจึงต้องใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์หรือเว็บเบราว์เซอร์ในมือถือเท่านั้น ซึ่งข้อนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้แอปพลิเคชันอื่น ๆ เข้ามาช่วย ตัวอย่างเช่น Blynk หรือจะเขียนแอปพลิเคชันเพื่อใช้ในการทำงานขึ้นมาใหม่ด้วย Flutter Framework ด้วยตัวเองเลยก็ทำได้ แล้วจึงใช้วิธีการส่งข้อมูลระหว่างกันด้วย MQTT หรือ Webhook ต่อไป
2. การทำงานของ Node-RED ต้องมีเซิร์ฟเวอร์ที่คอยสั่งการทำงานของ Node-RED กล่าวคือ จะต้องมีความพร้อมของหน่วยประมวลผลที่ทำงานอยู่หากต้องการใช้ Node-RED ตลอดเวลา ซึ่งในข้อนี้เราสามารถใช้งาน Raspberry Pi ในการเป็นหน่วยประมวลผลของ Node-RED ได้เลย

3.3.4 Datacake

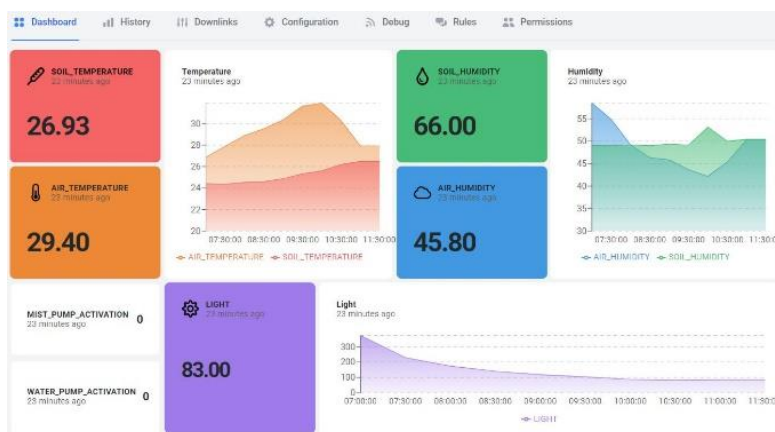
Datacake [53] คือ IOT Platform ที่ให้บริการโดยบริษัท Datacake GmbH. มีฟีเจอร์ (Feature) ให้ใช้งานอย่างหลากหลาย ไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมก็สามารถใช้งานได้โดยง่าย และสามารถปรับแต่งการทำงานของแต่ละฟีเจอร์ได้อย่างอิสระ ดังที่แสดงในภาพที่ 19 โดยเหตุผลที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Datacake มาเป็น IOT Platform ที่ใช้ในการเก็บและแสดงผลการอ่านค่าสัญญาณเซนเซอร์ภายในระบบ เนื่องจากมีฟีเจอร์การทำงานหลักที่ตรงกับการใช้งาน ดังนี้

- เป็น IOT Platform ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี LoRaWAN การติดตั้งให้สามารถใช้งานเข้ากันได้กับ LoRaWAN Network Server เป็นไปได้โดยง่าย เพราะตัว Datacake จะมีหลาย ๆ ฟังก์ชันที่ The Things Stack ที่เป็น LoRaWAN Network Server มีอยู่แล้ว อาทิเช่น ฟังก์ชัน Payload Formatter ที่จะคอยแปลงค่าที่อ่านได้จากสัญญาณให้กลายเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการอ่านและนำไปใช้งานต่อไป

- สามารถปรับแต่งการแสดงผลรูปแบบของกราฟ จนถึงชนิดของตัวแปรที่จะแสดงผลใช้ในการแสดงผลค่าของเซนเซอร์ในหน้าต่างแสดงผล (Dashboard) และสามารถส่งหน้าต่างแสดงผลนี้เองไปให้ผู้ใช้งานที่ต้องการดูข้อมูลแบบ Realtime
- มี Data Storage ไว้สำหรับเก็บและดูข้อมูลย้อนหลังเปรียบเทียบกับข้อมูลล่าสุด ทำให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลจากอดีตจนถึงปัจจุบัน

นอกจากนี้แล้ว Datalogic ยังมีฟีเจอร์การใช้งานเสริมที่สามารถเลือกใช้งานได้ดังต่อไปนี้

- สามารถใช้งานร่วมกับ End Device ที่มีระบบ GPS อยู่ในตัว เช่น Dragino LoRaWAN GPS Tracker LGT-92 เพื่อใช้งานส่งตำแหน่งพิกัดเข้ามาที่ Gateway และนำพิกัดในแต่ละจุดที่ได้มาเขียนเป็นเส้นทางการเดินทางของ End Device ในแผนที่ตามเวลาจริง การใช้งานฟีเจอร์นี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นการดูเส้นทางการเคลื่อนที่ของ End Device ที่เกิดขึ้น จะใช้ในกรณีที่ End Device มีการเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ เช่น การติดตาม End Device ไร่กับยานพาหนะ เพื่อดูเส้นทางที่ขับเคลื่อนไป เป็นต้น
- มีระบบการจัดการผู้ใช้งาน (User Management) กำหนดบทบาทให้แต่ละ Account ที่เข้ามา ให้มีสิทธิการเข้าถึงฟังก์ชันการทำงานที่แตกต่างกันไป
- มีระบบแจ้งเตือนการทำงานผ่าน SMS ในกรณีที่พบเหตุการณ์บางอย่างหรือค่าบางอย่างเกินกว่าเงื่อนไขที่ตั้งไว้
- สามารถแบ่งกลุ่มการทำงาน (Workspace) ได้หลายกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มก็จะมีความเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง ทำให้สามารถทำงานได้หลายประเภทในเวลาเดียวกัน
- มี Open APIs ไว้สำหรับการเชื่อมต่อเซอร์วิส (Service) ต่าง ๆ ภายนอกได้



ภาพที่ 19 ตัวอย่าง Dashboard หน้าต่างการแสดงผลค่า Sensor ต่าง ๆ ของ Datalogic

จากเหตุผลที่ว่ามาทั้งหมดนี้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Datalogic มาเป็น IoT Platform ในการเก็บและแสดงผลข้อมูล ในทางกลับกัน หากไม่ต้องการใช้ Datalogic ก็จะสามารถเลือกใช้ฐานข้อมูล (Database) ที่ใช้เก็บข้อมูลเป็น Open Source Time Series Database ที่มีชื่อว่า InfluxDB และ หน้าต่างแสดงผล

(Dashboard) เป็น Grafana ได้ โดยแนวทางนี้จะเป็นการเก็บข้อมูลไว้ในเซิร์ฟเวอร์ส่วนตัวของเราเอง ฟังก์ชันการทำงานหลักจะเหมือนกับของ Datacake เพียงแต่ถ้าหากต้องการฟังก์ชันการทำงานเสริมต่าง ๆ จะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมไปด้วยตัวเอง

บทที่ 4

การติดตั้งและใช้งานระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

4.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

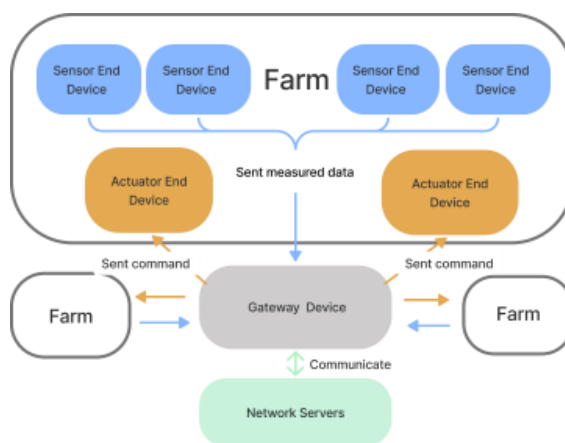
ในหัวข้อส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN นี้ จะมุ่งเน้นไปที่การนำเสนอหลักการออกแบบระบบเพื่อเอาไว้ช่วยควบคุมปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชให้มีความเหมาะสมผ่านการทำงานของเซนเซอร์และตัวกระตุ้น โดยระบบที่นำเสนอจะสามารถใช้งานได้ในระยะกว้างไกลและใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ส่วนประกอบหลักของระบบจะสามารถแบ่งออกมาได้เป็น 4 ส่วน ซึ่งการทำงานของแต่ละส่วนจะเชื่อมโยงไปหากัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) **Sensor End Device** เป็น End Device ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบเข้ากับ LoRa Module และเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่ในการวัดค่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช ประกอบไปด้วย อุณหภูมิในอากาศ ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิในดิน ความชื้นในดิน และความเข้มของแสงในขณะนั้น จากนั้นจึงแจ้งค่าส่งต่อไปที่ Gateway ตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อทำการประมวลผลค่าดังกล่าว โดย End Device ประเภทนี้ จะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในฟาร์มตามความเหมาะสม เพื่อให้ค่าที่ส่งกลับมาที่ Gateway ได้ค่าปัจจัยจากทั่วทั้งเขตฟาร์มที่ได้ทำการเพาะปลูก
- 2) **Actuator End Device** เป็น End Device ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบเข้ากับ LoRa Module และตัวกระตุ้นโดยในงานวิจัยนี้ ตัวกระตุ้นที่ใช้จะเป็นปั้มน้ำและปั้มหอม โดยหน้าที่ของปั้มน้ำจะใช้ในการรดน้ำต้นไม้เพิ่มความชื้นในดิน และปั้มหอมใช้พ่นหอมเพื่อลดอุณหภูมิ / เพิ่มความชื้นให้แก่อากาศ การสั่งการทำงานเปิดปิดปั้มน้ำแต่ละตัวจะถูกควบคุมผ่านการทำงานของรีเลย์ (Relay) โดย End Device ประเภทนี้ จะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่สามารถเข้าถึงแหล่งน้ำของฟาร์ม เพื่อให้สามารถปั้มน้ำส่งผ่านน้ำตามท่อหรือสายส่งน้ำเข้าไปในตัวฟาร์มได้
- 3) **Gateway Device** เป็นเสมือนจุดศูนย์รวมของการรับส่งสัญญาณของทั้งอาณาเขตฟาร์ม ทำหน้าที่รับค่าสัญญาณจาก End Device ทั้ง 2 ประเภทผ่านสัญญาณ LoRa และส่งค่าที่ได้ต่อไปที่ Network Server ผ่าน Backhaul ต่าง ๆ เช่น Wi-Fi, 4G, 5G, Ethernet etc.
- 4) **Network Server** มีหน้าที่แสดงผลข้อมูลที่ได้รับจาก Gateway เลือกข้อมูลจากสัญญาณที่มีความชัดเจนมากที่สุด และส่งข้อมูลเหล่านั้นต่อไปยังแอปพลิเคชันหรือซอฟต์แวร์ที่มีผู้ให้บริการต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำข้อมูลไปใช้ต่อไป ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลจะถูกส่งต่อไปที่
 - Datacake ผ่านวิธีการ Webhook [54] [55] โดย Datacake เป็นเครื่องมือสำหรับเก็บและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ เทียบกับเวลา

- Node-RED ผ่านโปรโตคอล MQTT ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการเขียนโปรแกรมและคอยเชื่อมโยงระบบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ที่ Node-RED นี้เอง ข้อมูลที่อ่านเข้ามาจะถูกนำมาประมวลผล ตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานว่าอุณหภูมิหรือความชื้นมีค่าที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าหากไม่เหมาะสมแล้ว จะต้องสั่งเปิดการทำงานของระบบตัวกระตุ้นในสวนใด จึงจะปรับให้ค่ากลับมาเหมาะสมหรือต้องส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานให้เข้ามาจัดการกับระบบต่อไป

ซึ่งหลังจากข้อมูลถูกนำไปประมวลผลใน Node-RED และได้คำสั่งที่เหมาะสมในการสั่งการทำงาน เปิดปิดตัวกระตุ้นต่าง ๆ แล้ว คำสั่งการทำงานนี้ก็จะถูกส่งกลับไปสั่งการทำงานที่ Actuator End Device ต่อไป โดยสถานการณ์ทำงานต่าง ๆ ของระบบในปัจจุบันนี้ทางผู้วิจัยจะขอเรียกว่า ตัวแปรสถานะ (State Variable) และจะมีการใช้งานในบทต่อ ๆ ไป

โดยสรุปแล้วหลักการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN จะเริ่มต้นที่ Sensor End Device จะทำการตรวจสอบตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช จากนั้นจึงส่งข้อมูลที่ได้ไปสู่ LoRaWAN Gateway ที่อยู่ในบริเวณนั้นผ่านสัญญาณ LoRa การส่งนี้จะเรียกว่า Uplink จากนั้น Gateway จะส่งข้อมูลต่อไปสู่ The Things Stack (TTS) ที่เป็น Network Server ผ่าน Wi-Fi ซึ่งจะทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลออกไปแสดงผลต่อที่ Datacake ผ่าน Webhook เช่นเดียวกับการส่งข้อมูลต่อไปประมวลผลที่ Node-RED ผ่าน MQTT เพื่อหาคำสั่งการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในขณะนั้น ก่อนส่งคำสั่งนั้นกลับไปยัง Network Server และส่งต่อไปที่ Actuator End Device ให้ทำการเปิดปิดตัวกระตุ้นต่าง ๆ เพื่อปรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชให้มีค่าที่เหมาะสมมากที่สุดโดยการส่งนี้จะเรียกว่า Downlink ในการใช้งานส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วน ในแปลงปลูกจริง ในแปลงปลูก 1 แปลง จะประกอบไปด้วย Sensor End Device จำนวนมากกระจายอยู่โดยทั่วตามขนาดของแปลงปลูก Gateway หนึ่งตัวที่อยู่ในเขตที่มีสัญญาณ Wi-Fi เพื่อให้ Gateway สามารถส่งข้อมูลขึ้นไปยัง Network Server ได้ และ Actuator End Device ที่คอยควบคุมการทำงานของปั๊ม อยู่ในจุดที่มีแหล่งน้ำในฟาร์ม การใช้งานส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วน สามารถจำลองการใช้งานได้ตามภาพที่ 20



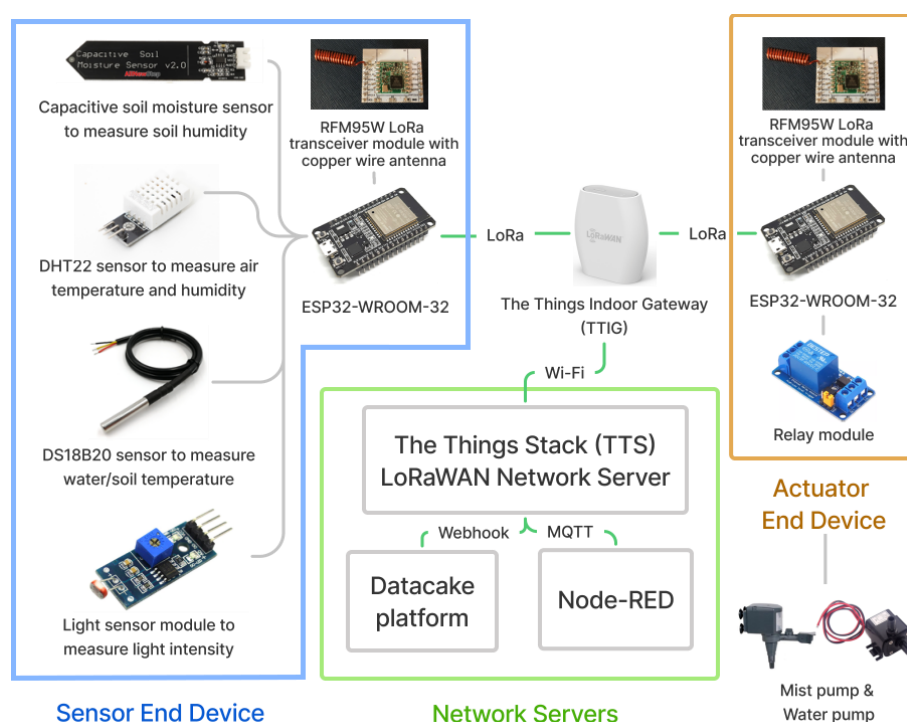
ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงการใช้งานส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วน ของระบบการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

4.2 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN

การติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN นั้น จะสามารถแบ่งการติดตั้งและใช้งานระบบได้เป็น 2 ส่วน คือ

- 1) การติดตั้งวงจรรระบบของ End Device
- 2) การติดตั้งวงจรรระบบของ Gateway

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้เซนเซอร์และตัวกระตุ้นตามภาพที่ 21 ทั้งนี้ในการใช้งานจริงนั้น ผู้ใช้งานสามารถเลือกเพิ่มหรือลดประเภทของเซนเซอร์และตัวกระตุ้นได้ตามความเหมาะสมในการใช้งานต่อไป ภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจริงถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก ก และ ภาคผนวก ข



ภาพที่ 21 แผนภาพแสดงอุปกรณ์และแนวทางในการส่งต่อของข้อมูลและคำสั่งจาก Sensor End Device ไปสู่ Gateway, Network Server, Actuator End Device

4.2.1 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรรระบบ LoRaWAN : End Device

การใช้งาน End Device หรือ End Device เพื่อวัดค่าจากเซนเซอร์หรือส่งคำสั่งการทำงานไปยังตัวกระตุ้นนั้น ขั้นตอนแรกในกรณีที่เป็น Commercial LoRaWAN End Device จะต้องเริ่มจากการเปิดใช้งานครั้งแรก จากนั้นจึงนำตัว End Device ไปลงทะเบียน (Register) เอาไว้ใน LoRaWAN Network Server ที่ใช้งานอยู่ในงานวิจัยนี้จะเป็น The Things Stack (TTS) Network Server เสียก่อน จากนั้นจึงจะเริ่มใช้งานตัว End Device ได้

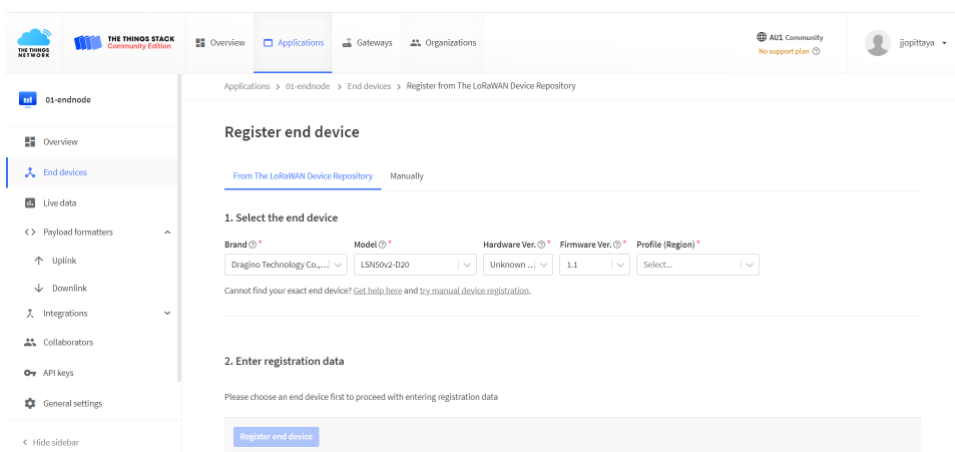
4.2.1.1 ประเภทและวิธีการการเปิดใช้งาน End Device กับ The Things Stack

โดยหลักแล้วการแบ่งประเภทของ End Device จะแบ่งได้ด้วยกัน 2 ประเภท คือ

4.2.1.1.1 Commercial LoRaWAN End Device

End Device ประเภทนี้จะเป็น End Device สำเร็จรูปที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยส่วนมากแล้วจะทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์เพื่อวัดค่าบางอย่าง ตัว End Device มีแบบกันน้ำเข้าหรือไม่กันน้ำเข้าให้เลือกซื้อใช้งานตามความเหมาะสม เช่น LAQ4 -- LoRaWAN Air Quality Sensor [56] ในภาพที่ 21 เป็น Commercial LoRaWAN End Device ที่มีขาย สำเร็จรูป ใช้ในการวัดคุณภาพอากาศ

ในการเปิดใช้งาน End Device ประเภทนี้ จะเป็นการเปิดใช้งานตามคู่มือของ บริษัทผู้ผลิต โดยซอฟต์แวร์การทำงานของ End Device จะถูกเขียนลงบนอุปกรณ์ โดยหลังจากเปิดใช้งานให้มาลงทะเบียนเครื่องมือบน TTS โดยให้เลือกไปที่ Register End Device : From The LoRaWAN Device Repository จากนั้นจึงเลือก Brand Model และข้อมูลเวอร์ชันต่าง ๆ ตามคู่มือของบริษัทผู้ผลิต ดังที่แสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 หน้าต่างการลงทะเบียน Commercial LoRaWAN End Device

การใช้งาน End Device ในลักษณะนี้ จะมีความสะดวกในการใช้งาน ผู้ใช้จะสามารถซื้อ ติดตั้ง และใช้งานได้ทันทีตามเป้าหมายในการใช้งาน ดังในภาพที่ 22 จะเป็น LoRaWAN End Device ของบริษัท Dragino Technology Co. ชื่อรุ่น LAQ4 ที่จะทำหน้าที่ในการวัด TVOC (Total Volatile Organic Compound), eCO2 (equivalent CO2) อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ จากนั้นจะรายงานผลการวัดมาทางการสื่อสารแบบ LoRaWAN



ภาพที่ 23 LAQ4 -- LoRaWAN Air Quality Sensor [57]

4.2.1.1.2 Custom LoRaWAN End Device

เป็น End Device ที่สร้างขึ้นมาจากส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- เซนเซอร์และตัวกระตุ้น สามารถเลือกใช้ได้ตามความต้องการใช้งาน เซนเซอร์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดที่เห็นกันอยู่โดยทั่วไป จะมีตั้งแต่วัดอุณหภูมิ วัดความชื้น หรือวัดระยะของวัตถุที่อยู่ด้านหน้า ไปจนถึงเซนเซอร์ที่มีการตรวจสอบเฉพาะทาง เช่น วัดปริมาณแร่ธาตุ หรือวัด pH ในน้ำ / ดิน เป็นต้น และตัวกระตุ้น เช่น รีเลย์สวิตช์ (Relay Switch) ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เปิดปิดสวิตช์อัตโนมัติ
- บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro Controller Unit) ที่ใช้เพื่อการเขียนโปรแกรมในการอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์หรือสั่งการทำงานของตัวกระตุ้น เช่น บอร์ด ESP32 / ESP8266 / Arduino UNO และอื่น ๆ
- LoRa Module Transceiver 915MHz ใช้ในการส่งและรับสัญญาณ LoRa รวมถึงการเข้ารหัส (Modulate) และการถอดรหัส (Demodulate) สัญญาณ
- เสาส่งสัญญาณ (Antenna) ใช้สำหรับการส่งสัญญาณ LoRa ถ้าหากไม่มีเสาส่งสัญญาณ เวลาส่งสัญญาณ พลังงานที่ควรจะมีตัวถ่ายเทพลังงานสัญญาณออกไปจะไปไหนไม่ได้ และย้อนกลับมาที่ตัววงจรส่งสัญญาณและตัวบอร์ด ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อตัวอุปกรณ์ได้

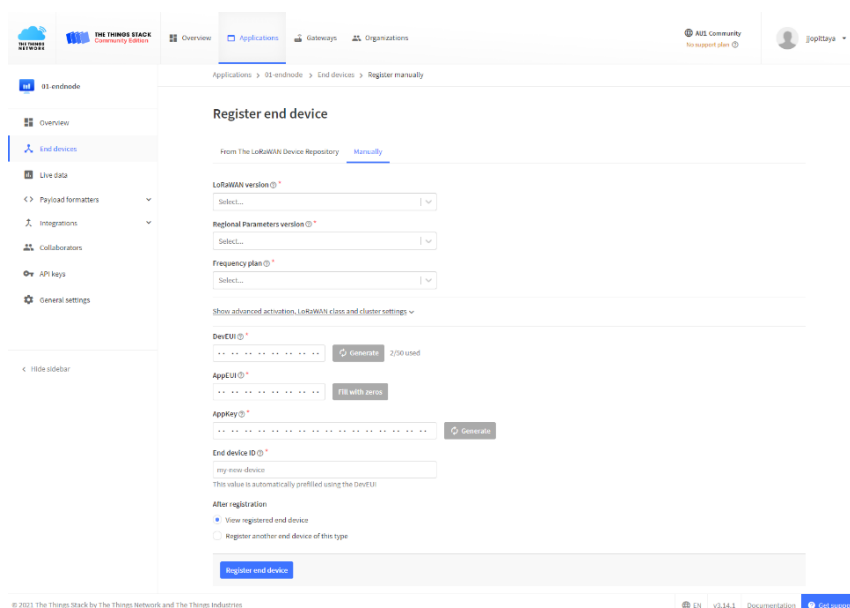
โดยการใช้งาน จะต้องประกอบขึ้นส่วนต่าง ๆ เหล่านี้เข้าด้วยกัน จากนั้นจึงเขียนโปรแกรมลงไปที่บอร์ด MCU เพื่อเป็นการกำหนดเงื่อนไขการทำงานให้แก่ End Device

หลังจากที่เขียนโปรแกรมและจ่ายไฟให้แก่บอร์ด MCU แล้ว ให้ผู้ใช้งานลงทะเบียน End Node บน TTS โดยให้เลือกไปที่ Register End Device : Manually โดยค่าต่าง ๆ ที่ทำการลงทะเบียน ให้ใส่รายละเอียดต่าง ๆ ตามในภาพที่ 24 ดังนี้

LoRaWAN Version : เลือก Version ตามที่ Endnode รองรับ

Regional Parameters Version : เลือก Rev B

Frequency Plan	:	เลือก Asia 920-923 MHz
DevEUI	:	กด Generate แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ใน Code
JoinEUI	:	กด Generate แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ใน Code
AppKey	:	กด Generate แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ใน Code
NwkKey	:	กด Generate แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ใน Code
End Device ID	:	ตั้งชื่อ End Device ที่เราลงทะเบียนนี้



ภาพที่ 24 หน้าต่างการลงทะเบียน Custom LoRaWAN End Device

หลังจากการลงทะเบียนแล้ว LoRaWAN End Node ก็จะสามารถใช้งานในการรับส่งข้อมูลผ่าน TTS ได้ทันที และในการทำงานครั้งต่อไปที่เข้ามาที่ TTS ก็จะสามารถเลือก End Devices ที่เราลงทะเบียนไว้แล้วขึ้นมาใช้งานได้ทันที

4.2.1.2 End Device ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้ Custom LoRaWAN End Device เนื่องจากจะสามารถเขียนโปรแกรมต่าง ๆ ขึ้นมาใช้งานได้ตามความต้องการ มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า โดยการทำงานของเซนเซอร์และตัวกระตุ้นจะต้องมีความสัมพันธ์กัน ซึ่ง LoRaWAN End Device มีส่วนประกอบดังนี้

1. บอร์ด MCU และตัวส่งสัญญาณ LoRa ที่ใช้เหมือนกันทั้ง Sensor End Device และ Actuator End Device

- a) Board FireBeetle ESP32 (Microcontroller) เป็นบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการใช้งานที่หลากหลาย มีแรม 320 Kibibyte, รอม 448 Kibibyte, พอร์ตแอนกประสงค์ (General Purpose Input/Output) 30 พอร์ต จ่ายพลังงานด้วยไฟ 5V ผ่านสาย USB หรือผ่านพอร์ต Vin
- b) LoRa Module Transceiver 915MHz ใช้งาน RFM95W ที่มี Chipset Sx1276 เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับส่งสัญญาณการสื่อสาร LoRa ด้วยการใช้พลังงานต่ำแต่ได้ระยะทางที่ไกล โดยตัวอุปกรณ์สามารถรับสัญญาณที่มีความละเอียดได้ละเอียดสุดที่ -146 dBm
- c) Copper Wire Antenna เป็นเสาอากาศรูปทรงสปริงที่ทำขึ้นมาจากทองแดงขด

2. เซนเซอร์และเครื่องมือที่ใช้งานร่วมกันกับ Sensor End Device

- a) DHT22 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ
- b) DS18B20 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน
- c) Capacitive Soil Moisture Sensor เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน
- d) LDR Light Sensor Module เซนเซอร์วัดความเข้มของแสง

3. ตัวกระตุ้นและเครื่องมือที่ใช้งานร่วมกันกับ Actuator End Device

- a) 3.3V Relay module
- b) Sonic AP2500 Water pump ป้อนน้ำที่ไชรต้นน้ำในระบบ
- c) Green-01 Misting pump ป้อนหมอกใช้เพื่อพ่นหมอกไอน้ำในระบบ

ภาพของอุปกรณ์และราคาที่ใช้ทั้งหมดจะถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก ก และภาคผนวก ข

4.2.2 รายละเอียดและการติดตั้งวงจรระบบ LoRaWAN : Gateway

การจะใช้งาน LoRaWAN เพื่อควบคุมระบบการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ นั้น จำเป็นต้องมี Gateway เพื่อทำการรับส่งข้อมูลระหว่าง End Device ต่างๆ โดยในการใช้งาน Gateway เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ LoRa ที่ส่งมาจาก End Device นั้น จะต้องมีการสร้างและเปิดใช้งานการทำงานของตัว Gateway จากนั้นจึงทำการ Register เข้ากับ LoRaWAN Network Server ที่ใช้งานอยู่ โดยอาจใช้เป็น The Things Stack (TTS) จึงจะเริ่มใช้งานตัว Gateway นั้นได้

4.2.2.1 ประเภทและวิธีการการเปิดใช้งาน Gateway กับ The Things Stack

โดยหลักแล้วการแบ่งประเภทของ Gateway จะแบ่งได้ด้วยกับ 2 ประเภท [58] คือ

4.2.2.1.1 Single Channel Gateway

Single Channel Gateway คือ Gateway สำหรับการทดสอบการรับส่งสัญญาณ LoRa เบื้องต้น ใช้ในการรับสัญญาณที่มีการกำหนดค่า Spreading Factor (SF) และช่วงสัญญาณ (Channel) ที่ใช้ส่งตายตัว โดย Single Channel Gateway นี้ จะสามารถใช้งานรับ Uplink จาก End Device ได้เพียงอย่างเดียว แต่จะไม่สามารถใช้ Downlink ในการส่งสัญญาณจาก Gateway กลับมาที่ End Device ได้ อีกทั้งการสื่อสารของระบบทั้งหมดจะสื่อสารอยู่ในช่วงสัญญาณเดียว ทำให้โอกาสในการชนกันของสัญญาณเป็นไปได้สูงหากมีการใช้งานกับ End Device หลายตัว ส่งผลให้ข้อความที่ส่งเข้ามามีอัตราการสูญหายสูงขึ้นตามไปด้วย และทาง TTS ที่เป็น Network Server จะไม่สนับสนุนการใช้งาน Single Channel Gateway ทำให้โค้ดและไลบรารี (Library) ต่าง ๆ ที่ใช้งานร่วมกับ Gateway ประเภทนี้จะไม่มีการอัปเดตเพิ่มเติมและถือว่าเป็นของที่ล้าสมัยไปแล้ว

Single Channel Gateway จะใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ LoRa แบบเดียวกับที่ End Device ใช้ นั่นก็คือ LoRa Module Transceiver 915MHz โดยใช้งานควบคู่กันกับไมโครโพรเซสเซอร์ เช่น Raspberry Pi 4 และเสาสัญญาณตามที่ต้องการ ถึงแม้ว่าจะเป็น Gateway ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการใช้งานเบื้องต้น แต่หลักการทำงานของ Single Channel Gateway นั้น จะมีความคล้ายคลึงกับ Multi Channel Gateway ซึ่งหลักการทำงานโดยสังเขปของ Single Channel Gateway จะเป็นการที่ End Device เริ่มส่งสัญญาณ LoRa ใน SF และ Channel ที่ตรงกับที่ Gateway รอรับอยู่ จากนั้นสัญญาณจะถูกรับจากเสาสัญญาณที่อยู่กับ Gateway และส่งเข้ามาถอดรหัสที่ LoRa Module ที่ทำงานร่วมกันกับไมโครโพรเซสเซอร์ จากนั้นจะใช้โปรโตคอล UDP Packet Forwarder ในการส่งข้อมูลต่อไปที่ Network Server

4.2.2.1.2 Multi Channel Gateway

Multi Channel Gateway เป็น Gateway ที่ใช้งานกันโดยทั่วไป โดยจะสามารถรับสัญญาณได้ทุก ๆ Spreading Factor (SF) จากในหลาย ๆ Channel โดยที่เราไม่ต้องกำหนดว่าเราจะรับที่ SF ไต ที่ Channel ไตเลย เราเพียงแค่ว่ากำหนดว่าเราอยู่ในภูมิภาคสัญญาณ (Regional Parameter) ไต จากนั้นไม่ว่าสัญญาณที่ส่งมาจาก End Device จะเป็นสัญญาณที่มี SF หรือ Channel ไต Gateway ก็จะสามารถรับได้ทั้งหมดโดยถ้าหากเป็นสัญญาณที่ต่าง SF หรือ Channel กันแล้ว สัญญาณก็จะไม่เกิดการชนกันทำให้ไม่มีข้อมูลสูญหาย การใช้งาน Gateway ประเภทนี้เป็นรูปแบบที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้น Library การทำงานต่าง ๆ ที่เป็น Open-Source จะมีการพัฒนาปรับปรุงอย่างสม่ำเสมอ โดยคอมมูนิตี้ที่ใช้งาน LoRaWAN โดย Multi Channel Gateway จะใช้ LoRa

Concentrator Module ที่เป็นเสมือน LoRa Module หลาย ๆ ตัว ร่วมกันกับไมโครโพรเซสเซอร์และเสาสัญญาณ หลักการทำงานของ Multi Channel Gateway นั้น จะเริ่มจากการที่ End Device ส่งสัญญาณ LoRa เข้ามาที่ Gateway จากนั้นสัญญาณจะถูกรับจากเสาสัญญาณ จำแนกและถอดรหัสโดย LoRa Concentrator Module ร่วมกับไมโครโพรเซสเซอร์ จากนั้นจึงส่งข้อมูลต่อไปที่ Network Server ด้วย Basic Station Protocol

4.2.2.1.3 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง Single Channel และ Multi Channel Gateway

ในที่นี้จะสังเกตเห็นได้ว่าการใช้งานของ Multi Channel Gateway จะมีข้อดีที่เห็นได้ชัดมากกว่าการใช้งาน Single Channel Gateway โดยจะสามารถเปรียบเทียบการใช้งานระหว่าง Gateway ทั้ง 2 แบบ ได้ดังนี้ [59]

1. Single Channel Gateway จะรองรับวิธีตั้งค่าเริ่มต้นการใช้งานส่งสัญญาณข้อมูล (Activation) เฉพาะวิธี ABP (Activation By Personalization) เท่านั้น ส่วน Multi Channel Gateway จะใช้ได้ทั้งแบบ ABP และแบบ OTAA (Over-The-Air Activation)

2. Single Channel Gateway จะตั้งค่าให้รับข้อมูลเฉพาะ Channel ความถี่ใด ความถี่หนึ่ง และ SF ใด SF หนึ่งเท่านั้น แตกต่างจาก Multi Channel Gateway ที่จะรองรับความถี่ได้ถึง 8 Channel และ SF7-SF12 พร้อมกัน โดยรวมแล้วจะรับได้ถึง 48 รูปแบบ โอกาสที่สัญญาณจะชนกันที่ความถี่ตรงกันและ SF ตรงกันในพื้นที่ที่มีการใช้งาน End Device จำนวนมากก็น้อยลง ทำให้ Multi Channel Gateway จะสามารถรองรับการใช้งาน End Device ได้มากกว่า Single Channel Gateway

3. Multi Channel Gateway จะสามารถสร้าง Downlink ในการส่งข้อมูลคำสั่ง จาก Application Server หรือ Network Server ส่งไปยัง End Device ตัวเดียวหรือหลายตัว เพื่อนำไปใช้สั่งการทำงานของตัวกระตุ้นหรือตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ เช่น สั่งให้ปั๊มน้ำบริเวณใดบริเวณหนึ่งทำงาน หรือให้ทำงานพร้อมกันทั้งฟาร์ม แตกต่างจากการใช้งาน Single Channel Gateway ที่จะไม่สามารถใช้งาน Downlink ได้ และจากการที่ Multi Channel Gateway ส่ง Downlink ได้ ทำให้สามารถทำการยืนยันการส่งข้อมูลสำเร็จ (Acknowledge Package) เวลาที่มีการส่ง Uplink ขึ้นไปที่ Gateway โดยการส่ง Downlink กลับไปยืนยันที่ End Device ว่า Gateway ได้รับข้อมูลแล้วได้

4. Multi Channel Gateway รองรับ End Device ได้หลาย Class มากขึ้น ทั้ง Class A, Class B, Class C แตกต่างจาก Single Channel Gateway ที่รองรับแค่ Class A เท่านั้น

5. Single Channel Gateway ใช้ UDP Packet Forwarder Protocol ในการส่งข้อมูลจาก Gateway มาที่ Network Server เป็นโปรโตคอลเก่าที่ไม่มีการพัฒนาแล้ว ส่วน Multi Channel Gateway ใช้ Basic Station Protocol เป็นการสื่อสารแบบ TCP/IP ซึ่งมีข้อได้เปรียบในการใช้งานหลายข้อ เช่น มีการอัปเดตโปรโตคอลจากส่วนกลาง สามารถตั้งค่าการจัดการต่าง ๆ ในการใช้งานได้ มีการตรวจสอบสิทธิ์แบบ TLS และ Token-based และมีการจัดการ Channel-Plan จากส่วนกลาง

6. ค่าใช้จ่ายในการสร้าง Multi Channel Gateway จะมีราคาสูงกว่าการใช้งาน Single Channel Gateway เพราะ LoRa Concentrator จะมีราคาแพงกว่า LoRa Module

ด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น การใช้งาน Multi Channel Gateway จะรองรับ Channel และ SF ได้มากกว่า Single Channel Gateway และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ดีกว่า Single Channel Gateway แต่จะแลกมาด้วยค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่สูงกว่า

4.2.2.1.4 การเปิดใช้งาน Gateway กับ The Things Stack Network Server

ในการเปิดใช้งาน Gateway นั้น ถ้าหากเป็น Gateway ที่ประกอบขึ้นมาเองจะมีการลงทะเบียนใช้งาน TTS ในหน้า Add Gateway แต่ถ้าหากเป็น Gateway ที่มีการเชื่อมต่อวงจรมicro-pro세서และ LoRa Concentrator รวมทั้งมีการใส่ Code คำสั่งการทำงานมาตั้งแต่เริ่มแรกจากผู้ผลิต Gateway อยู่แล้วการลงทะเบียน จะทำในหน้าต่าง Claim Gateway โดยทั้ง 2 วิธี จะมีการกรอกรายละเอียดที่สำคัญต่าง ๆ ที่เหมือนกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 25 ดังนี้

- Owner: ชื่อเจ้าของ Gateway
- Gateway ID: เป็นชื่อที่เราจะใช้เรียก Gateway โดยจะไม่สามารถเปลี่ยนในภายหลังได้
- Gateway EUI: เป็นชุดเลขฐาน 16 เฉพาะของแต่ละ Gateway เป็นเลขชี้เฉพาะของ Gateway นั้น ๆ ได้มาจากการสั่งให้โปรแกรมทำงาน โปรโตคอลการส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น UDP Packet Forwarder, Basic Station
- Gateway Server address: เป็นตำแหน่งของ Server address ที่เราจะใช้งาน ในที่นี้หากใช้งาน TTS ในประเทศไทย ให้เลือกใช้ Server ของ Australia: au1.cloud.thethings.network ที่จะอยู่ใกล้กับประเทศไทยมากที่สุด
- Frequency Plan: จะใช้ช่วงสัญญาณใด ซึ่งสำหรับในประเทศไทย ให้เลือกใช้ช่วงสัญญาณ Asia 923 – 925 MHz

The screenshot shows the 'Add gateway' interface in The Things Stack. The 'General settings' section contains the following fields: Owner (dropdown), Gateway ID (text), Gateway EUI (text), Gateway name (text), Gateway description (text), Gateway Server address (text), Require authenticated connection (checkbox), Gateway status (checkbox), and Gateway location (checkbox). The 'LoRaWAN options' section includes: Frequency plan (dropdown), Schedule downlink late (checkbox), Enforce duty cycle (checkbox), and Schedule any time delay (text input with dropdown). A 'Create gateway' button is located at the bottom right of the form.

ภาพที่ 25 หน้าต่างการ Add Gateway ของ The Things Stack Network Server

4.2.2.2 Gateway ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การจะใช้งาน Gateway เพื่อควบคุมระบบการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัตินั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยในการใช้งานต่าง ๆ [60] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เป็น Multi Channel Gateway ที่ชื่อว่า The Things Indoor Gateway (TTIG) โดยจะเป็น 8 Channel Gateway ที่มี Channel รับส่งข้อมูลอยู่ที่ 8 Uplink Channel และ 1 Downlink Channel ทำให้สามารถรับข้อมูลได้จาก End Device พร้อม ๆ กันจำนวน 8 ตัว และส่งการทำงานกลับไปได้ครั้งละ 1 ตัว โดย TTIG ใช้งาน Chip LoRa Concentrator ของ Semtech SX1308 ร่วมกับหน่วยประมวลผลที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษโดยจะสามารถต่อ ESP8266 WiFi Connectivity เป็น Backhaul ส่งข้อมูลขึ้นมายัง The Things Stack (TTS) ที่เป็น Network Server หลักในการประมวลผลของ LoRaWAN



ภาพที่ 26 The Things Indoor Gateway (TTIG) [61]

โดยคุณลักษณะ (Specification) ของ The Things Indoor Gateway (TTIG) จะมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางแสดงคุณลักษณะของ The Things Indoor LoRaWAN WiFi Gateway [61]

LoRa	
Chipset	Semtech SX1308
Channels	8 Channels
Receive Sensitivity	-140/-135 dBm (EU/US)
Transmit Power	Upto +27 dBM
LoRaWAN® Spec Version	V.1.0.3
Packet Forwarder	Basic station protocol
Wi-Fi	
SoC	ESP9266
Mode	802.11 b/g/n, Client Mode
Tx Power	+20 dBm
Frequency Bands	2.4 GHz
WAN/LAN ports	-
USB Port	USB Type-C (900 mA)
Security	WPA/WPA2
Dimensions	90*80*40 mm
Operating Temperature	0-40°C
Certification	CE/FC/IC/RCM/WPC/RoHS
Other Details	
Interfaces	LED indicators
Antenna Type	Integrated
Frequency Band	AU915

4.3 การใช้งาน The Things Stack ร่วมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ

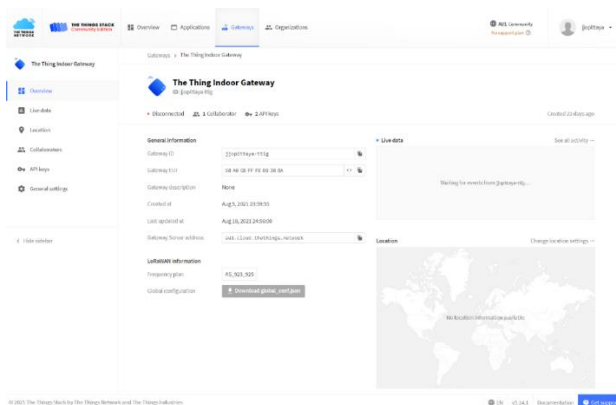
4.3.1 การใช้งาน The Things Stack

การใช้งาน The Things Stack หรือ TTS (LoRaWAN Network Server) จะเริ่มต้นจากการที่ผู้ใช้งานลงทะเบียน Gateway และ End Device กับ TTS แล้ว เมื่อใดก็ตามที่ข้อมูลหรือ Packet ที่ End Device ส่งมายัง Gateway ข้อมูลนั้นก็จะถูกส่งต่อขึ้นมาที่ TTS ผ่าน Backhaul ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นสัญญาณ Wi-Fi โดยในการใช้งานอ่านค่าหรือใช้งานส่งคำสั่งกลับไปจะสามารถใช้งานได้หน้าต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1.1 การใช้งานหน้าต่างควบคุม Gateway

ในหน้าต่างควบคุม Gateway ตามภาพที่ 27 จะมีเมนูต่าง ๆ ที่สามารถเลือกใช้งานได้ดังนี้

- 1) Overview: ใช้ในการดูรายละเอียดโดยรวมของ Gateway สามารถดูข้อมูลโดยรวมที่เราตั้งค่าการใช้งานของ Gateway ได้
- 2) Live Data: เอาไว้ใช้ดูข้อมูลตามเวลาจริงที่ Gateway ตัวนั้น ๆ ได้รับมา
- 3) Location: ใช้ดูว่า Gateway ที่เราใช้งานอยู่ที่ตำแหน่งใดเทียบกับแผนที่
- 4) Collaborators: เราสามารถกำหนดสิทธิการใช้งานของ User คนอื่น ๆ ได้อย่างอิสระในกรณีที่ Gateway นี้ มีการใช้งานร่วมกันหลายคน
- 5) API keys: เป็นการสร้าง API keys เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่าง TTS และ Network / Application อื่น ๆ
- 6) General Setting: เป็นเมนูที่เอาไว้ใช้ในการตั้งค่าการใช้งานของ Gateway



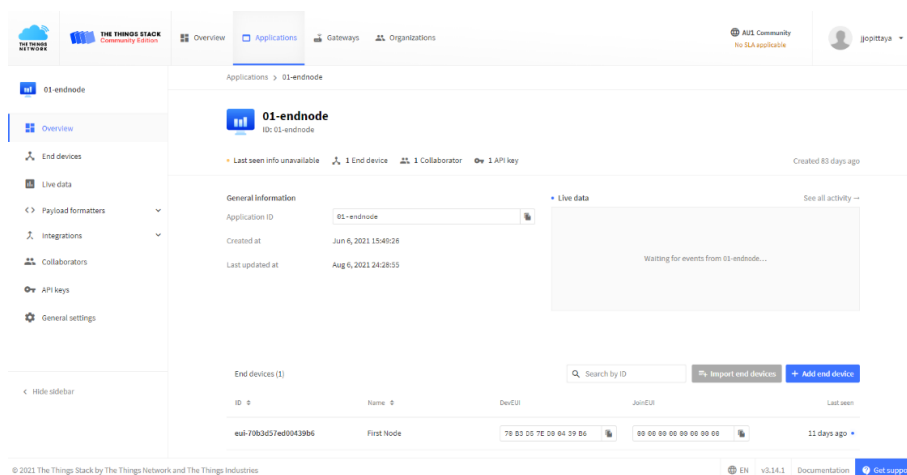
ภาพที่ 27 หน้าต่างควบคุม Gateway ของ The Things Stack (TTS)

4.3.1.2 การใช้งานหน้าต่างควบคุม End Device

ในหน้าต่างควบคุม End Device ตามภาพที่ 28 จะมีเมนูที่สามารถเลือกใช้งานได้ดังนี้

- 1) Overview: ใช้ในการดูรายละเอียดโดยรวมของ End Device สามารถดูข้อมูลโดยรวมที่เราตั้งค่าการใช้งานของ End Device ได้

- 2) Live Data: เอาไว้ใช้ดูข้อมูลตามเวลาจริง ที่ End Device ตัวนั้น ๆ ส่งข้อมูล Uplink ออกไป หรือได้รับ Downlink กลับมา
- 3) Payload Formatters: ใช้สำหรับการใส่ Code แปลงข้อมูลที่ Network Server ได้รับ/ ส่งออก จากข้อมูลที่ส่งเข้ามาจำนวนมาก ให้คัดเหลือเฉพาะส่วนที่จำเป็นต้องใช้และนำไปแสดงผลต่อไป
- 4) Integration: เป็นส่วนที่จะให้ระบบใช้งานร่วมกันกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ ซึ่งจะขอแยกรายละเอียดและกล่าวในหัวข้อถัดไป
- 5) Collaborators: เราสามารถกำหนดสิทธิการใช้งานของ User คนอื่น ๆ ได้อย่างอิสระ ในกรณีการใช้งาน End Device นี้ มีการใช้งานร่วมกันหลายคน
- 6) API keys: เป็นการสร้าง API keys เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่าง TTS และ Network / Application อื่น ๆ
- 7) General Setting: เป็นเมนูที่เอาไว้ใช้ในการตั้งค่าการใช้งานของ Gateway



ภาพที่ 28 หน้าต่างควบคุม End Device ของ The Things Stack

4.3.2 การใช้งาน The Things Stack ร่วมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ

ในการใช้งาน The Things Stack (TTS) ร่วมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ TTS จะมีฟังก์ชัน Integration ที่อยู่ในหน้าต่างการควบคุม End Device โดยการใช้งานฟังก์ชัน Integration เพื่อเชื่อมต่อ TTS เข้ากับเครื่องมือและเทคโนโลยีต่าง ๆ นั้นจะสามารถใช้งานเชื่อมต่อได้หลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น MQTT, Webhooks, Storage Integration, AWS IoT, Azure IoT Hub, LoRa Cloud เพื่อให้การเชื่อมต่อสามารถทำได้อย่างอิสระและสามารถนำข้อมูลไปต่อยอดใช้ให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงที่สุด ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการ 2 วิธี ในการนำข้อมูลที่มีอยู่ในระบบออกมาใช้งานต่อ คือ วิธี MQTT เพื่อเชื่อมต่อไปยังเครื่องมือช่วยการเขียนโปรแกรม Node-RED และ Webhooks เพื่อเชื่อมต่อไปยัง Visualization Database ของ Datacake

4.3.2.1 MQTT Integration with Node-RED

ในการใช้งาน MQTT ใน TTS นั้น ผู้ใช้งานสามารถเข้ามาสร้าง API key ที่จะใช้งานในการ Publish ข้อมูลตามหัวข้อที่เราต้องการเข้าไปใน MQTT Server ใน Topic ที่เฉพาะเจาะจงของแต่ละ End Device ที่เราใช้งานรับส่งข้อมูลได้ การเริ่มใช้งานผู้ใช้งานสามารถกดปุ่ม Generate new API key และ นำ API key นี้ไปใส่เอาไว้ใน เครื่องมือ / แอปพลิเคชันที่เราต้องการ

MQTT

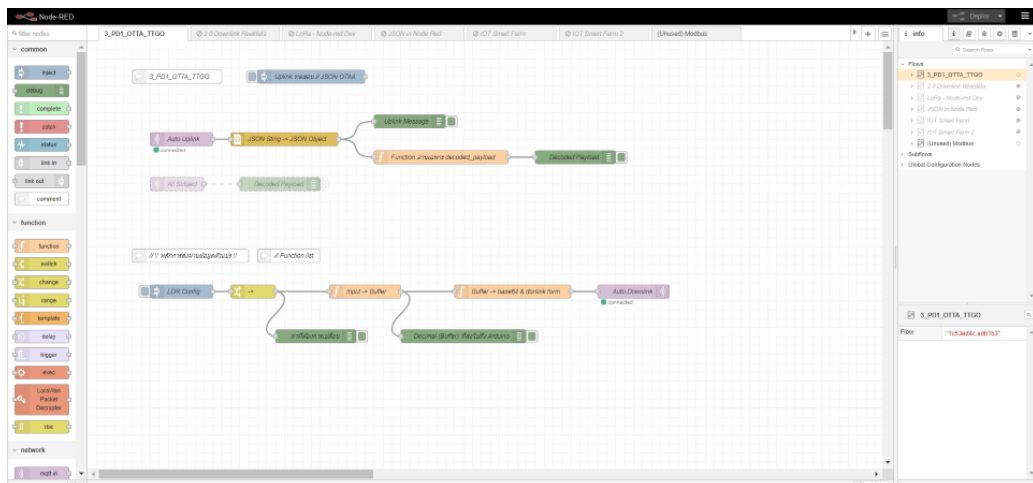
The Application Server exposes an MQTT server to work with streaming events. In order to use the MQTT server you need to create a new API key, which will function as connection password. You can also use an existing API key, as long as it has the necessary rights granted. Use the connection information below to connect.

Connection credentials

Public address	au1.cloud.thethings.network:1883
Public TLS address	au1.cloud.thethings.network:8883
Username	01-endnode@ttn
Password	Generate new API key Go to API keys

ภาพที่ 29 หน้าต่างการตั้งค่าการใช้งาน MQTT ใน TTS

ในงานวิจัยนี้จะใช้งาน TTS ร่วมกับ Node-RED ด้วย MQTT Protocol โดยการให้ TTS Publish ข้อมูลเซนเซอร์ที่ได้รับมาจาก Uplink ของแต่ละ Sensor End Device ลงไปใน Topic แยกกันไป และ Node-RED จะ Subscribe ใน Topic นั้น ๆ เช่นเดียวกับการส่ง Downlink ที่ Node-RED จะ Publish คำสั่งลงไป Topic ที่ TTS ที่ควบคุม Actuator End Device ตัวที่ต้องการสั่งการทำงานนั้น Subscribe อยู่ ดังที่แสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การใช้งาน Node-RED กับ LoRa ด้วยการเชื่อมต่อแบบ MQTT

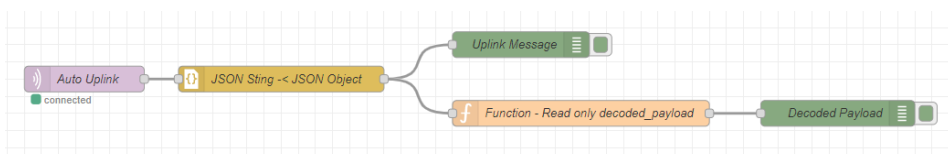
การใช้งาน Node-RED ในงานวิจัยนี้ จะใช้งานเพื่อควบคุมการรับส่งข้อมูลจาก End Device พร้อม ๆ กันจำนวนมาก สามารถแบ่งการทำงานเป็นหมวดหมู่และสามารถสร้างฟังก์ชันและโหมดในการทำงานต่าง ๆ ได้ โดยในการใช้งาน Node-RED ในงานวิจัยนี้จะมีฟังก์ชันในการใช้งานต่าง ๆ ดังนี้

1. ฟังก์ชันที่เอาไว้สำหรับการดูข้อมูล Event ที่เกิดขึ้นกับระบบ LoRa

เราสามารถตั้งค่าให้ mqtt in node ทำการเลือกรับข้อมูลจากหัวข้อที่ Subscribe เพื่อให้เมื่อ gateway รับ event ต่าง ๆ จาก End Device แล้ว TTS จะทำการ publish ข้อมูลดังกล่าวมาให้ Node-RED รับข้อมูลตามที่สนใจด้วย ดังนี้

- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/join
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/up
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/down/queued
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/down/sent
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/down/ack
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/down/nack
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/down/failed
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/service/data
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/location/solved

โดยในงานวิจัยนี้จะเลือก Subscribe รายการ v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/up เพื่อเป็นการรับข้อมูล Uplink มาจาก End Device โดยใช้ mqtt in node จากนั้นจึงนำมาผ่านฟังก์ชันต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลสุดท้ายที่แสดงผลออกมาเป็นข้อมูลเฉพาะ Payload เพื่อให้สามารถดูและนำไปใช้งานต่อได้โดยง่าย



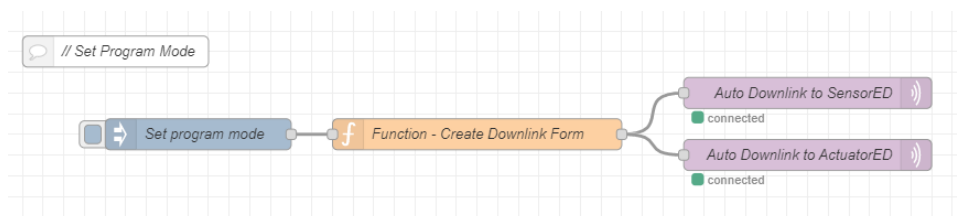
ภาพที่ 31 ฟังก์ชันการใช้งานของการรับข้อมูล Event Uplink ผ่าน Node-RED

2. ฟังก์ชันที่เอาไว้สำหรับการส่งข้อมูล Downlink กลับเข้าไปภายในระบบ

โดยเราสามารถตั้งค่าให้ mqtt out node ทำการ Publish ข้อมูลคำสั่งไปยังหัวข้อที่ TTS ได้ Subscribe อยู่ เพื่อส่งคำสั่งต่าง ๆ จาก Gateway ต่อไปยัง End Device ได้ดังนี้

- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/ down/push
- v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/ down/replace

โดยในงานวิจัยนี้ ผู้ใช้งานสามารถเลือกการใช้งานคำสั่งต่าง ๆ ที่จะสั่งการทำงานไปยัง End Device ได้โดยที่ผู้ใช้งาน สามารถพิมพ์ชุดเลขคำสั่งที่ต้องการในช่อง inject node แล้วจึงกดปุ่มส่ง ข้อมูลคำสั่งที่อยู่ด้านซ้ายของ inject node เพื่อส่งข้อมูลต่อ ๆ ไปยัง mqtt out node และ mqtt out node จะทำการ Publish ข้อมูลต่อไป

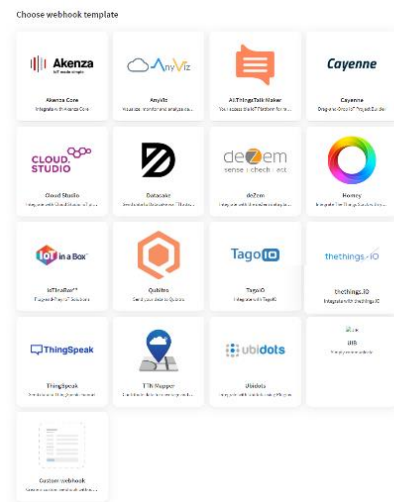


ภาพที่ 32 ฟังก์ชันการใช้งานของการส่งข้อมูล Downlink ผ่าน Node-RED

จากทั้งสองฟังก์ชันการใช้งาน เมื่อเรานำเอามารวมกัน Node-RED ก็จะสามารถรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเพาะปลูกที่ Sensor End Device อ่านค่า นำมาผ่านเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อสร้างเป็นระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ จากนั้นจึงส่งคำสั่งที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ นั้น ส่งต่อไปที่ Actuator End Device เพื่อทำการควบคุมตัวกระตุ้นให้ทำงานต่อไป

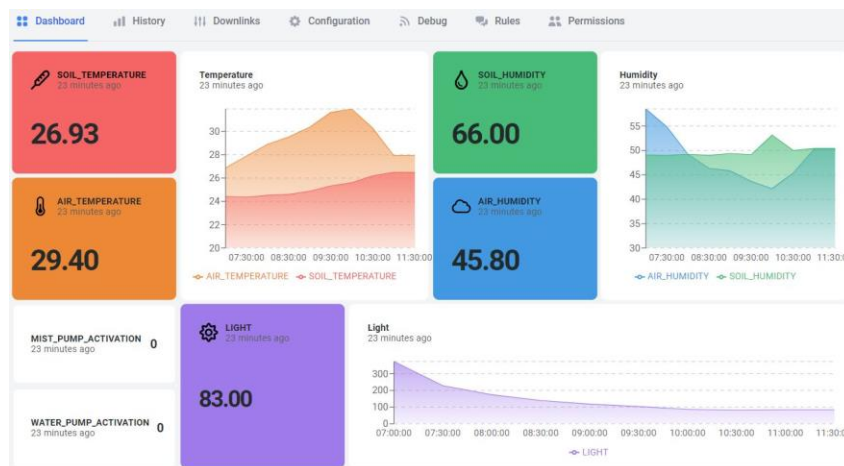
4.3.2.2 Webhook Integration with Datacake

การใช้งาน Webhook เพื่อส่งต่อข้อมูลที่ TTS ได้รับไปสู่ Datacake ที่เป็น IoT Platform นั้น ผู้ใช้งานสามารถเข้ามาตั้งค่าการใช้งาน Webhook ได้ตามภาพที่ 33 โดยจากภาพจะเห็นได้ว่า TTS สามารถเชื่อมต่อ Webhook ได้กับหลากหลาย IoT Platform ตามแต่ที่ผู้ใช้งานต้องการ อีกทั้งยังสามารถเลือก Add Webhook ที่ผู้ใช้งานพัฒนา IoT Platform ใหม่ขึ้นมาเองหรืออยู่นอกเหนือจากรายการนี้ได้อีกด้วย การเริ่มใช้งานผู้ใช้งานสามารถกรอก Webhook ID และ Token ที่ได้มาจาก IoT Platform ลงไปเป็นอันเสร็จสิ้น



ภาพที่ 33 IoT Platform ต่าง ๆ ที่สามารถเชื่อมต่อกับ TTS ด้วยวิธีการ Webhook

ในงานวิจัยนี้จะใช้งาน Datacake โดยหลังจากที่เราเปิดการใช้งานของ Datacake ใน The Things Stack แล้ว ผู้ใช้งานจะต้องเข้ามาตั้งค่าฟิลด์ (Field) และวิธีการถอดรหัสของ Payload ที่ได้รับมาก่อน เพื่อจับคู่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ End Device ส่งเข้ามากับค่าฟิลด์ที่อยู่ภายใน Datacake แล้วจากนั้นจึงมาตั้งค่าหน้า Dashboard เพื่อนำข้อมูลในฟิลด์ต่าง ๆ ออกมาแสดงผลในรูปแบบตามแต่ที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยผลที่ได้ออกมาจะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 หน้าต่างการแสดงผลข้อมูลของ IoT Platform Datacake

4.4 การออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบช่วยการทำงานการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

4.4.1 การออกแบบการทดสอบการทำงานควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

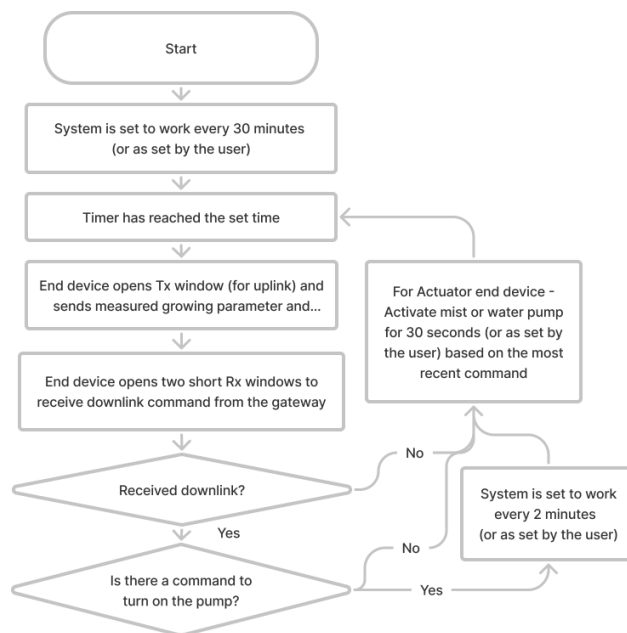
ในการทดสอบการควบคุมตัวแปร ทางผู้วิจัยได้ออกแบบการสั่งงานเปิดปิดตัวกระตุ้นที่อยู่กับ Actuator End Device โดยพิจารณาจากการประมวลผลค่าตัวแปรที่ได้รับมาจาก Sensor End Device ตามเงื่อนไขต่าง ๆ โดยอัตโนมัติ โดยในการทำงาน ระบบการทำงานนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของสถานะการทำงานของ End Device ที่จะใช้การสื่อสาร LoRa ใน Class A ทั้ง Sensor End Device และ Actuator End Device และส่วนของสถานะการประมวลผลข้อมูลของ Node-RED การทำงานของทั้ง 2 ส่วน จะมีการทำงานไปพร้อม ๆ กันและสถานะการเปิดปิดของตัวกระตุ้น (State Variable) ก็จะถูกส่งเชื่อมโยงไปหากัน โดยทางผู้วิจัยได้มีการกำหนดสถานะการเปิดปิดของตัวกระตุ้น หรือ State Variable เอาไว้ทั้งสิ้น 2 ตัวแปร คือ

1. Mist Pump Activation ใช้ตัวแปรคือ activate_mist_pump เป็นสถานะการทำงานของระบบที่บ่งบอกถึงการทำงานของปั๊มหมอก ถ้ามีค่าเป็น 0 คือ ปิด ถ้ามีค่าเป็น 1 คือ เปิด
2. Water Pump Activation ใช้ตัวแปรคือ activate_water_pump เป็นสถานะการทำงานของระบบที่บ่งบอกถึงการทำงานของปั๊มน้ำ ถ้ามีค่าเป็น 0 คือ ปิด ถ้ามีค่าเป็น 1 คือ เปิด

การตรวจสอบผลการทำงานจะดูว่าระบบจะสามารถเปิดปิดการใช้งานตัวกระตุ้นตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ใน Node-RED เพื่อควบคุมค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ตลอดหรือไม่ โดยการดูค่าของ State Variable พร้อม ๆ กันกับการดูการทำงานของปั๊มเพื่อควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยในการทดสอบนี้ จะทำโดยใช้ค่า Spreading Factor (SF) เท่ากับ 7 และใช้การส่งสัญญาณระหว่าง End Device และ Gateway เป็นระยะทาง 50 m เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.1.1 รายละเอียด State การทำงานของ End Device

การทำงานของ End Device ทั้ง Sensor End Device และ Actuator End Device จะมี State การทำงานที่คล้ายคลึงกันเพื่อให้สามารถใช้งาน State Variable เพื่อเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยน State การทำงานร่วมกันได้ตามภาพที่ 35



ภาพที่ 35 รายละเอียดระดับขั้นการทำงานของ End Device

- ตอนเริ่มต้นการทำงานของ End Device จะเป็นช่วงที่ End Device จะตั้งค่าการทำงานเริ่มต้น และทำการเชื่อมต่อตัวเองเข้ากับ Gateway ด้วยวิธีการแบบ OTAA
- จากนั้นระบบทำงานทุก ๆ 30 นาที เมื่อตัวกระตุ้นทุกตัวไม่เปิดการใช้งาน หรือก็คือ State Variable ทุกตัวมีค่าเท่ากับ 0 ในรอบการทำงานทุก ๆ 30 นาที นี้
 - Sensor End Device จะทำหน้าที่ตรวจสอบและส่งค่าที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ประกอบไปด้วย อุณหภูมิอากาศ ความชื้นอากาศ อุณหภูมิดิน ความชื้นดิน ความเข้มข้นของแสง และสถานะของ State Variable ในปัจจุบัน ส่งไปให้แก่ Gateway ทุก ๆ 30 นาที อ้างอิงจากเวลาที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรจากระบบการทำฟาร์มอัจฉริยะในงานวิจัยก่อนหน้าที่มีเวลาระหว่างการวัดตั้งแต่ 10 – 60 นาที
 - Actuator End Device จะรายงาน State Variable ไปให้แก่ Gateway ทุก ๆ 10 นาที และรอรับคำสั่งการเปิดการทำงานของตัวกระตุ้น หาก Actuator End Device ได้รับคำสั่งในการเปิดตัวกระตุ้นตัวใด ก็จะทำให้การเปิดตัวกระตุ้นตัวนั้นเป็นเวลา 30 วินาที
- ระบบทำงานทุก ๆ 2 นาที เมื่อใดก็ตามที่ระบบมีการใช้งานปั๊มหรือใช้งานตัวกระตุ้นใด ๆ หรือก็คือ State Variable ตัวใดมีตัวหนึ่งมีค่าไม่เท่ากับ 0 ระบบจะมีการทำงานเพื่อตรวจค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและส่งคำสั่งต่าง ๆ ตามเงื่อนไขทุก ๆ 2 นาที จากนั้นเมื่อใดก็ตามที่ State Variable ทุกตัวมีค่ากลับมาเป็น 0 แล้ว ระบบก็จะกลับไปทำงานทุก ๆ 30 นาที โดยในช่วงที่ระบบมีการเปิดใช้งานตัวกระตุ้นอยู่นี้

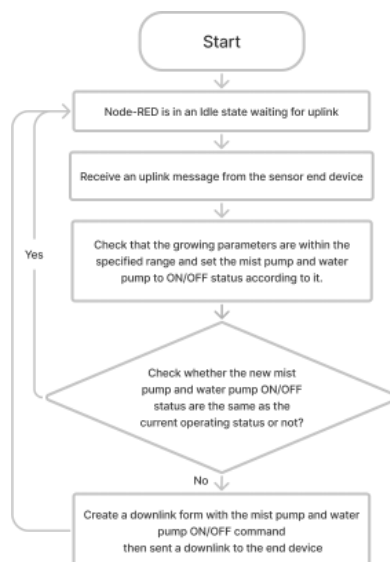
- Sensor End Device จะรายงานค่าต่าง ๆ ที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ ส่งให้ Gateway ประมวลผลทุก ๆ 2 นาที

- Actuator End Device จะส่งรายงานค่า State Variable กลับขึ้นไป Gateway ทุก ๆ 2 นาที และรอรับคำสั่งการเปิดปิดการทำงานของตัวกระตุ้น หาก Actuator End Device ได้รับคำสั่งในการเปิดปิดตัวกระตุ้นตัวใด ก็จะทำให้การเปิดตัวกระตุ้นตัวนั้นเป็นเวลา 30 วินาที

โดยในการทำงานของทั้ง Sensor End Device และ Actuator End Device นั้น ทุกครั้งที่มีการส่ง Uplink รายงานค่าต่าง ๆ ขึ้นไปยัง Gateway ตัว End Device จะทำการเปิดขารับ Downlink ไว้สำหรับให้ Node-RED สามารถส่ง Downlink ผ่าน TTS ลงไปอัปเดตโหมดในการทำงานหรือสถานะการเปิดปิดของตัวกระตุ้น (State Variable) หรือปรับช่วงเวลาต่าง ๆ ของทุกขั้นตอนที่อยู่ในระบบ ดังนั้นจึงทำให้ระบบนี้สามารถปรับการทำงานต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม โดยที่ผู้ใช้งานสามารถสั่งปรับการตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ออนไลน์ได้

4.4.1.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการกำหนดค่า State Variable ใน Node-RED

การทำงานของ Node-RED เพื่อควบคุมระบบการทำการเกษตรอัตโนมัติ จะเริ่มตั้งแต่การรับค่า Uplink จาก End Device เข้ามาผ่าน mqtt in node ส่งต่อไปที่ Node ที่ทำหน้าที่ดึงเฉพาะค่าที่ใช้งานออกมาและส่งต่อไปยัง Node เงื่อนไขการทำงานเพื่อกำหนด State Variable ที่เหมาะสม จากนั้นจึงส่งไปที่ Node ที่ทำการตรวจสอบค่า State Variable หรือตัวแปรสถานะการทำงานของตัวกระตุ้นว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิมหรือไม่ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง ข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยัง Node ที่ทำการสร้าง Downlink และส่งไปที่ mqtt out node เพื่อส่ง State Variable กลับไปที่ TTS ก่อนจะส่งต่อไปยัง End Device เพื่อให้ได้มีการอัปเดตสถานะการทำงานต่อไป รายละเอียดระดับขั้นการทำงานของ Node-RED จะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 รายละเอียดระดับขั้นการทำงานของ Node-RED

โดยเงื่อนไขที่ใช้การทำงานของระบบ ที่ถูกกำหนดอยู่ใน Node เงื่อนไข มีรายละเอียดดังนี้

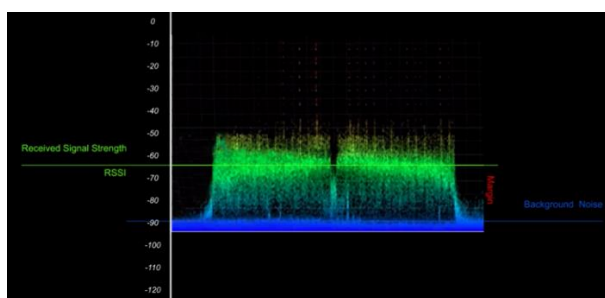
- Node-RED จะทำงานเพื่อรอการรับ Uplink จาก Network Server เมื่อได้รับค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชต่าง ๆ มาแล้ว ข้อมูลจะถูกประมวลผลตามเงื่อนไข คือ
 - หากอุณหภูมิในดินหรือในอากาศมีค่ามากกว่า 32 °C หรือความชื้นในอากาศมีค่าน้อยกว่า 50% ให้เปิดการทำงานของปั๊มหมอก หากทั้งอุณหภูมิในดิน ในอากาศ น้อยกว่า 32 °C และความชื้นในอากาศมีค่ามากกว่า 50% ให้ปิดการทำงานของปั๊มหมอก
 - หากความชื้นในดินมีค่าน้อยกว่า 50% ให้เปิดการทำงานของปั๊มน้ำ หากความชื้นในดินมีค่ามากกว่า 50% ให้ปิดการทำงานของปั๊มน้ำ
- จากนั้น Node-RED จะตรวจสอบว่า คำสั่งในการเปิดปิดการทำงานของตัวกระตุ้นหรือปั๊มน้ำต่าง ๆ มีค่าเหมือนเดิมกับที่ระบบเป็นอยู่ในตอนนี้หรือไม่ ถ้าเหมือนกัน Node-RED จะไม่ได้ทำอะไรเพิ่มเติมและกลับไปอยู่ในสถานะรอรับสัญญาณ Uplink จาก Network Server แต่ถ้าแตกต่างกัน Node-RED จะสร้างคำสั่ง Downlink เพื่อสั่งการทำงานเปิดปิดตัวกระตุ้นกลับไปที่ Network Server และส่งต่อไปยัง Actuator End Device ต่อไป

ทั้งนี้ค่าขอบเขตของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ตั้งมาเกิดจากสมมติฐานสถานะแวดล้อมในการปลูกพืชที่เหมาะสมของพืชโดยทั่วไปและเป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบระบบการทำงานอัตโนมัติ ในการใช้งานจริง ผู้ใช้งานสามารถปรับค่าอุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมต่อการปลูกพืชแต่ละชนิด ในการใช้งาน Node-RED เราสามารถเลือกให้ Node-RED

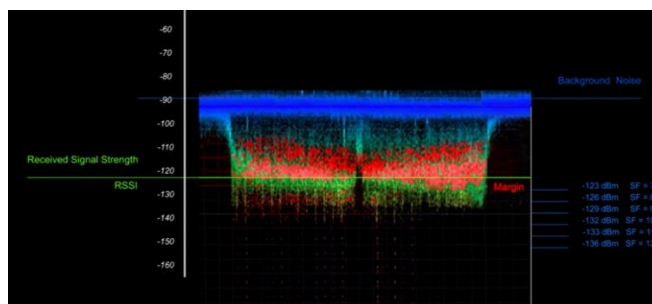
ทำงานหน่วยประมวลผลต่าง ๆ บนคอมพิวเตอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ เช่น Raspberry Pi หรือจะใช้บริการ Cloud Server จากผู้ให้บริการต่าง ๆ เช่น Datacake ที่เปิดให้บริการ Cloud Hosted Node-RED ออนไลน์ที่ชื่อ Cake Red โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ Raspberry Pi เป็นเครื่องมือในการใช้งาน Node-RED เนื่องจากมีความสะดวกในด้านอุปกรณ์และไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมใด ๆ

4.4.2 การออกแบบการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

ในส่วนของ การทดสอบระยะทางในการสื่อสารของสัญญาณ ระหว่าง End Device และ Gateway ดัชนีที่เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของการส่งสัญญาณจะมีทั้งสิ้น 2 ค่า ด้วยกัน คือ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับหรือ Received Signal Strength Indication (RSSI) และอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ได้รับเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนหรือ Signal-to-Noise Ratio (SNR) โดยค่า SNR นี้ จะเป็นค่าของความแรงของสัญญาณ LoRa ที่ตัวรับสัญญาณได้รับลบกับค่าความแรงของสัญญาณรบกวน (Noise) มีหน่วยเป็น dB โดยถ้าค่า SNR มีค่าเป็นบวก หมายถึงสัญญาณ LoRa จะมีความแรงมากกว่าความแรงของสัญญาณรบกวน และจะถือว่าเป็นสัญญาณที่ชัดเจนและมีคุณภาพสูง ดังที่แสดงในภาพที่ 37 แต่ถ้าหาก SNR มีค่าเป็นลบ หมายความว่าสัญญาณ LoRa จะมีความแรงน้อยกว่าความแรงของสัญญาณรบกวน และจะถือว่าเป็นสัญญาณที่ไม่ชัดเจนและไม่มีคุณภาพดังที่แสดงในภาพที่ 38



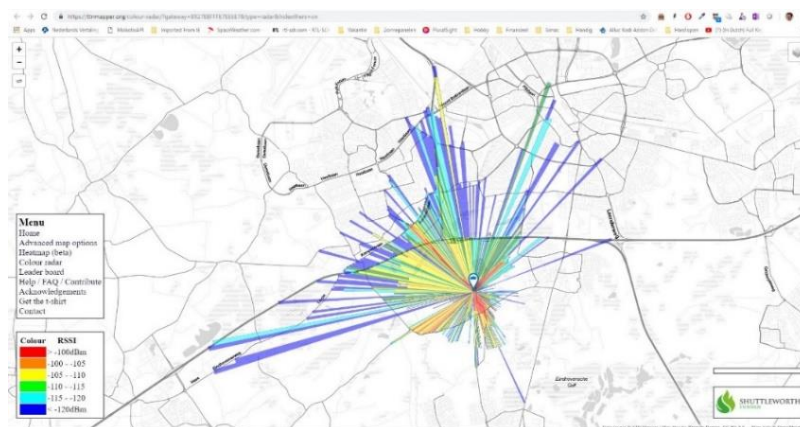
ภาพที่ 37 ภาพแสดงการส่งสัญญาณตามจริงที่ค่า SNR มีค่าเป็นบวก [62]



ภาพที่ 38 ภาพแสดงการส่งสัญญาณตามจริงที่ค่า SNR มีค่าเป็นลบ [62]

ในการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณ ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบค่า Signal-to-noise ratio (SNR) เทียบกับตำแหน่งของการส่งสัญญาณ และอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณ (Success Rate) ที่ได้รับผลมาจาก TTS โดยวิธีการที่จะใช้ทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณนี้ ทางผู้วิจัยได้คิดค้นและศึกษาวิธีการทดสอบโดยได้ผลสรุปออกมาทั้งสิ้น 2 วิธีการ ดังนี้

- 1) ทดสอบโดยการทดลองส่งสัญญาณจากระยะต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้รับมาจาก TTS มาตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลเทียบกับตำแหน่งที่ได้ส่งสัญญาณออกไป
- 2) ใช้งานแอปพลิเคชัน TTN Mapper [63] เพื่อเข้ามาช่วยในการทดสอบระยะการทำงาน โดยวิธีการเริ่มการทดสอบใช้งาน คือ การลงทะเบียนตัว Gateway และ End Device ไว้กับ TTN Mapper และตั้งค่าการส่งข้อมูลแบบ MQTT จาก TTS ไปสู่แอปพลิเคชัน TTN Mapper โดยหลักการทำงานของ TTN Mapper คือ การที่ตัวแอปพลิเคชันจะให้ผู้ใช้งานทำเครื่องหมายตำแหน่งของ Gateway เอาไว้ในแผนที่ก่อน จากนั้นให้เรานำตัว End Device พร้อมโทรศัพท์ที่มีแอปพลิเคชันอยู่ออกจากตัว Gateway ในระยะทางที่เหมาะสม เมื่อใดก็ตาม Gateway ได้รับสัญญาณ Uplink จาก End Device แอปพลิเคชันจะทำการทำเครื่องหมายตำแหน่งของ End Device พร้อมระบุความเข้มข้นของสัญญาณที่ Gateway ได้รับในแผนที่จริง ๆ ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 39 ทั้งนี้ การใช้ TTN Mapper ในงานจริง พบว่าการระบุตำแหน่งสถานที่ส่งสัญญาณในแผนที่ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง



ภาพที่ 39 ตัวอย่างการใช้งานแอปพลิเคชัน TTN Mapper ในการหาระยะทางในการส่งสัญญาณ [63]

การทดสอบจะเป็นการส่งสัญญาณขนาด 10 Byte ที่ Bandwidth 125 kHz Frequency 920-925 MHz หรือ Channel Plan AS923 ทุก ๆ 1 นาที เป็นจำนวนทั้งสิ้น 10 รอบ ติดต่อกัน ทดสอบโดยใช้ Spreading Factor 7 และ 10 การทำการทดสอบถูกจัดขึ้น 3 ครั้ง ใน 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ช่วงถนนพุทธมณฑลสาย 2 ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ถนนภายในสำนักงานพุทธมณฑล โดยการติดตั้ง

The Things Indoor Gateway (TTIG) จะถูกติดตั้งไว้ที่จุดที่อยู่สูงและไม่มีสิ่งใดรบกวน จากนั้นจึงได้ทำการส่งสัญญาณ LoRa จาก End Device ในสถานที่ต่าง ๆ เข้ามาที่ Gateway ตามเส้นทางโดยเว้นระยะห่างจาก Gateway เป็นระยะทางครั้งละ 100 m จนกว่าบอร์ดทุกชนิดจะส่งสัญญาณไปไม่ถึง ในการทดสอบนี้ ผู้ทดลองจะใช้ End Device ในการทดสอบทั้งหมด 5 ประเภท ประกอบไปด้วย

- 1) บอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ
- 2) บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง
- 3) บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi / Frequency Range 824-960Mhz, 1710-1990Mhz
- 4) บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi / Frequency Range 698-960 MHz, 1710-2170 MHz, 2300-2700 MHz
- 5) บอร์ด Heltec LoRa 32 ที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi / Frequency Range 824-960Mhz, 1710-1990Mhz

4.4.3 การออกแบบการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน

ในการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่บอร์ด Sensor End Device และ Actuator End Device ใช้ในการทำงานอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ระบบจะมีช่วงการทำงาน 2 ช่วง คือ

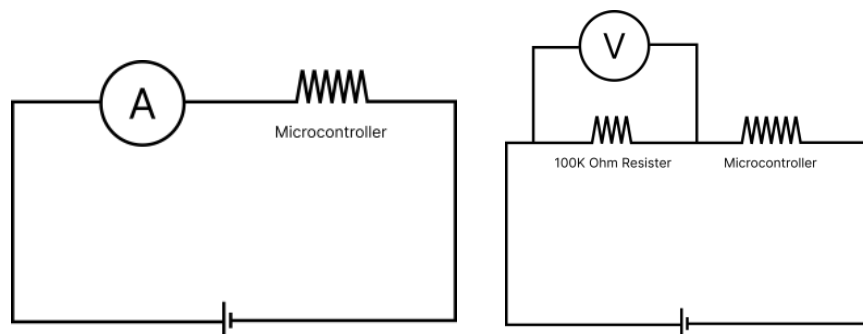
1. สถานะที่ระบบมีการทำงาน (Working State) วัดค่าจากเซนเซอร์ เปิดปิดตัวกระตุ้น หรือ รับส่งสัญญาณ LoRa โดยการทดสอบจะทดสอบโดยการวัดการใช้กระแสไฟฟ้าในช่วงที่บอร์ดทำงานส่งสัญญาณ LoRa เทียบกับการส่งสัญญาณแบบเดียวกันด้วยการใช้ Wi-Fi
2. สถานะที่ระบบรอบการทำงานครั้งต่อไป (Idle State) ทดสอบโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้งาน Deep Sleep Mode ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อสั่งให้บอร์ดเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงาน เทียบกับการไม่ได้ใช้โหมดประหยัดพลังงาน โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการใช้พลังงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ตัว มีการใช้พลังงานในโหมด Deep Sleep แตกต่างกัน คือ ESP32-WROOM-32 และ FireBeetle ESP32 ที่เป็นบอร์ดที่ออกแบบมารองรับโดยเฉพาะกับโหมด Deep Sleep [65] เพื่อให้การทำงานในระหว่างที่บอร์ดอยู่ในสถานะรอบการทำงานมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดดังที่แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ตารางแสดงกระแสไฟฟ้าที่บอร์ดแต่ละประเภทใช้งานในโหมดต่าง ๆ

Board Type	Reference [mA]	Light-Sleep [mA]	Deep-Sleep [mA]	Hibernation [mA]
ESP32-WROOM-32	51	10	9	9
Ai-Thinker NodeMCU-32S	55	15.05	6.18	6.18
Adafruit HUZZAH32	47	8.43	6.81	6.8
Sparkfun ESP32 Thing	41	5.67	4.43	4.43
FireBeetle ESP32	39	1.94	0.011	0.008
WiPy 3.0	192	-	0.015	-

ในการทำงานของบอร์ด บอร์ดจะทำงานอยู่ในทั้ง 2 สถานะ สลับกันไปเรื่อย ๆ โดยปกติแล้ว บอร์ดจะอยู่ใน Idle State เป็นส่วนมาก ซึ่งเป็นระยะเวลาเกือบทั้งหมดของการใช้งานและจะอยู่ใน Working State เป็นระยะเวลาสั้น ๆ การออกแบบระบบให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดจึงต้องคำนึงพลังงานไฟฟ้าที่บอร์ดใช้ใน Idle State เป็นสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ให้พลังงานบอร์ดด้วยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตหรือ LiFePO4 ที่มีแรงดันไฟฟ้าอิมินอล (Nominal Voltage) หรือก็คือระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ มีค่าเท่ากับ 3.3 V

ในการทดสอบ ผู้วิจัยจะทดสอบโดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่บอร์ดใช้งานโดยวิธีการต่อแอมมิเตอร์ (Ammeter) อนุกรมเข้ากับวงจร ด้วยวิธีการนี้จะสามารถหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากแหล่งจ่ายพลังงานไปสู่บอร์ดได้โดยตรง หลังจากนั้นจึงนำค่ากระแสที่ได้มาหาพลังงานไฟฟ้าต่อไป แต่ในบางกรณีเนื่องจากกระแสที่ใช้ภายในระบบมีค่าน้อยมาก ๆ บางครั้งการต่อแอมป์มิเตอร์อนุกรมเข้ากับวงจรโดยตรงจะส่งผลกระทบต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จนและไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดสอบโดยการใช้โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ต่อคร่อมกับตัวต้านทานเพื่อวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานตัวนั้นแล้วจึงคำนวณหาค่ากระแสและนำมาหาค่าพลังงานไฟฟ้าต่อไปดังที่แสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ภาพแสดงการต่อแอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์เพื่อใช้หาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

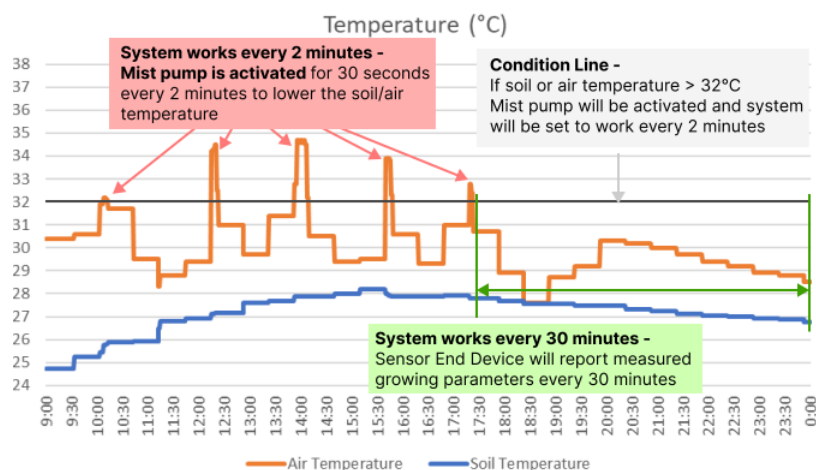
บทที่ 5

ผลการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติ

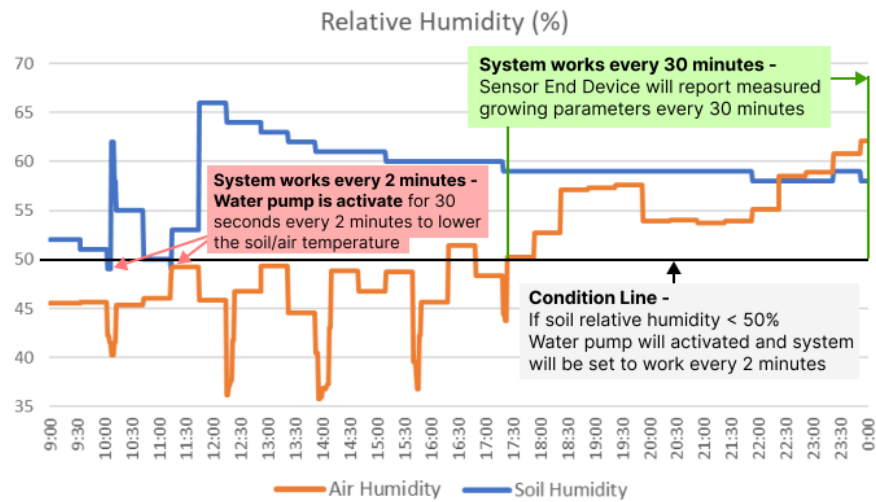
ในการทดสอบการทำงานของระบบระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN การทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบการควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช อันเป็นหัวใจหลักของการออกแบบและสร้างระบบนี้ขึ้นมา การทดสอบเพื่อดูถึงระยะในการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ LoRaWAN และการทดสอบเพื่อดูถึงพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน

5.1 ผลการทดสอบการทำงานควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

จากการทดสอบใช้งานระบบการทำงานอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN พบว่าในการทดสอบ การทำงานของ End Device ทั้งสองตัวตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อใดที่ค่าอุณหภูมิหรือความชื้นของอากาศหรือดินมีค่าสูงหรือต่ำกว่าเงื่อนไขที่ตั้งเอาไว้ใน Node-RED ระบบจะมีการทำงานเพื่อสั่งการทำงานของตัวกระตุ้นที่เหมาะสมกับงานนั้นให้เริ่มทำงานเพื่อปรับค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชให้กลับมาอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม ตัวอย่างการทำงานที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ เช่น Sensor End Device ตรวจจับอุณหภูมิของอากาศหรือดินมีค่าสูงกว่า 32 °C แล้ว ระบบจะเปลี่ยนการทำงานจาก Idle State เป็น Activation State เพื่อสั่งการทำงานเปิดตัวกระตุ้น ซึ่งในเงื่อนไขนี้จะเป็นการเปิดการทำงานของปั๊มหมอก จากนั้น เมื่อปั๊มทำงานเพื่อลดอุณหภูมิของทั้งอากาศและดินลงมาต่ำกว่า 32 °C แล้ว ระบบจะสั่งปิดการทำงานของปั๊มและกลับไปทำงานอยู่ใน Idle State นั้นเอง โดยภาพแสดงผลข้อมูลที่วัดได้จะถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 41 42 และ 43 โดยข้อมูลผลการทดลองโดยละเอียดจะอยู่ในภาคผนวก ค



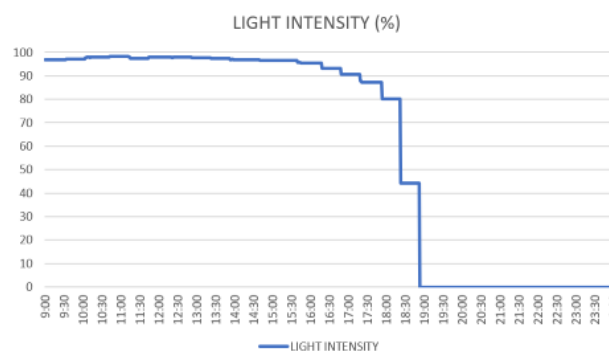
ภาพที่ 41 กราฟรายงานผลข้อมูลอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดิน



ภาพที่ 42 กราฟรายงานผลข้อมูลความชื้นอากาศและความชื้นดิน

จากภาพที่ 41 และ ภาพที่ 42 แสดงผลการทำงานในช่วงที่กราฟต่าง ๆ มีข้อมูลที่มีความถี่มาก ช่วงนั้นจะเป็นช่วงที่ระบบอยู่ใน Activation State ที่ระบบมีการส่งข้อมูลเพื่ออัปเดตค่าตัวแปรทุก ๆ 2 นาที และเป็นช่วงที่มีการเปิดใช้งานของปั๊มต่าง ๆ ส่วนในช่วงที่ข้อมูลที่มีความถี่ต่ำ หมายถึง ระบบกำลังอยู่ใน Idle State ที่มีการส่งข้อมูลมาทุก ๆ 30 นาที เป็นช่วงที่ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชทุกตัวแปรตรงตามเงื่อนไข โดยจากการทดสอบการทำงานสามารถสรุปข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นได้ดังต่อไปนี้

- มีช่วงที่อุณหภูมิอากาศสูงกว่าเงื่อนไขที่ตั้งไว้ คือ ห้ามเกิน 32 °C ทั้งสิ้น 5 ครั้ง วัดอุณหภูมิอากาศ ณ สูงสุดของทั้ง 5 ครั้ง ได้ที่ 34.59 °C เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของอากาศกลับมาอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของตัวกระตุ้นเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ 6 นาที นานที่สุดที่ 13 นาที
- ความชื้นของดินวัดได้ต่ำกว่าจุดที่ตั้งไว้ตามเงื่อนไข คือ ห้ามต่ำกว่า 50% ทั้งสิ้น 2 ครั้ง มีค่าความชื้นต่ำสุดอยู่ที่ 49% ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานเพิ่มค่าความชื้นเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ 6 นาที นานที่สุดที่ 8 นาที



ภาพที่ 43 กราฟรายงานผลข้อมูลความเข้มแสง

- จากภาพที่ 43 ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0% – 100% โดยในเวลากลางวันค่าความเข้มของแสงจะมีค่าที่สูงและในช่วงตั้งแต่ 15:30 – 19:00 น. จะเป็นช่วงเวลาที่แสงเริ่มหายไป จนแสงหายไปจนหมดในเวลา 19:00 น.

จากการทดสอบพบว่าในการทำงานของระบบเพื่อควบคุมค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชนั้น ระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการ สามารถวัดผลและสั่งการการทำงานระหว่าง Sensor End Device, Actuator End Device, Gateway และ Network Server ได้ โดยการทำงานปัจจุบัน Sensor End Device จะส่งข้อมูลขึ้นมาที่ Gateway ทุก ๆ 30 นาที ในกรณีที่ไม่มีค่าตัวแปรใดเกินขอบเขตที่ตั้งไว้ โดยช่วงระยะเวลา 30 นาที นี้ อาจเป็นช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเกินไปสำหรับหน้าร้อนที่อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้นอย่างมากในระยะเวลา 30 นาที ดังนั้นการปรับช่วงระยะเวลานี้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ฤดูกาล ความต้องการของพืชแต่ละชนิด จึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำเป็นอย่างมาก

5.2 ผลการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

คุณภาพของการส่งสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัยทั้ง Spreading Factor (SF) คลื่นรบกวนต่าง ๆ และสิ่งกีดขวางการส่งสัญญาณทางกายภาพต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกนำค่า SNR มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SNR, Success Rate และระยะทางในการส่งสัญญาณ โดยเปรียบเทียบการส่งสัญญาณกันจากแต่ละอุปกรณ์ และจาก 2 Spreading Factor คือ SF7 และ SF10 เนื่องจาก SNR เป็นค่าตัวแปรที่สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของการส่งสัญญาณเทียบกับสภาวะแวดล้อมได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบโดยละเอียดของการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง จะแสดงอยู่ในภาคผนวก ง

ในการทดสอบครั้งแรก (Scenario #1) เป็นการทดสอบในพื้นที่ช่วงถนนพุทธมณฑลสาย 3 โดยการใช้ End Device ทั้งหมด 3 แบบ ส่งโดยใช้ SF7 และ SF10 มีระยะของการส่งสัญญาณที่ไกลที่สุดที่ยังมีอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณมากกว่า 90% อยู่ที่

- SF7 100 m และ SF10 200 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ
- SF7 300 m และ SF10 500 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง
- SF7 800 m และ SF10 1000 m สำหรับบอร์ด Heltec LoRa 32 builtin มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi

ในการทดสอบครั้งที่สอง (Scenario #2) เป็นการทดสอบในพื้นที่ช่วงถนนในสำนักงานพุทธมณฑล โดยการใช้ End Device ทั้งหมด 5 แบบ ส่งโดยใช้ SF7 มีระยะของการส่งสัญญาณที่ไกลที่สุดที่ยังมีอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณมากกว่า 90% อยู่ที่

- SF7 100 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ
- SF7 400 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง

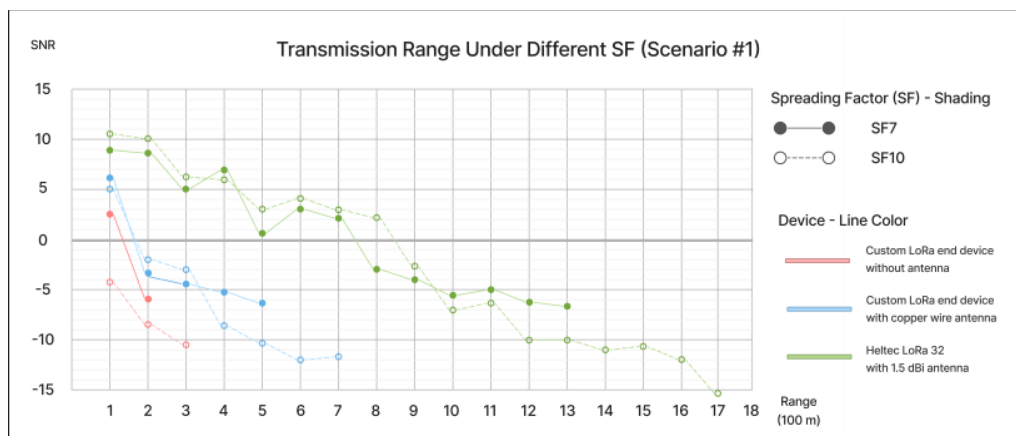
- SF7 700 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi
- SF7 1100 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi
- SF7 900 m สำหรับบอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi

ในการทดสอบครั้งที่สาม (Scenario #3) เป็นการทดสอบในพื้นที่ช่วงถนนในสำนักงานพุทธมณฑล โดยการใช้ End Device ทั้งหมด 5 แบบ ส่งโดยใช้ SF10 มีระยะของการส่งสัญญาณที่ไกลที่สุดที่ยังมีอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณมากกว่า 90% อยู่ที่

- SF10 200 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ
- SF10 500 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง
- SF10 300 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi
- SF10 800 m สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi
- SF10 1,000 m สำหรับบอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi

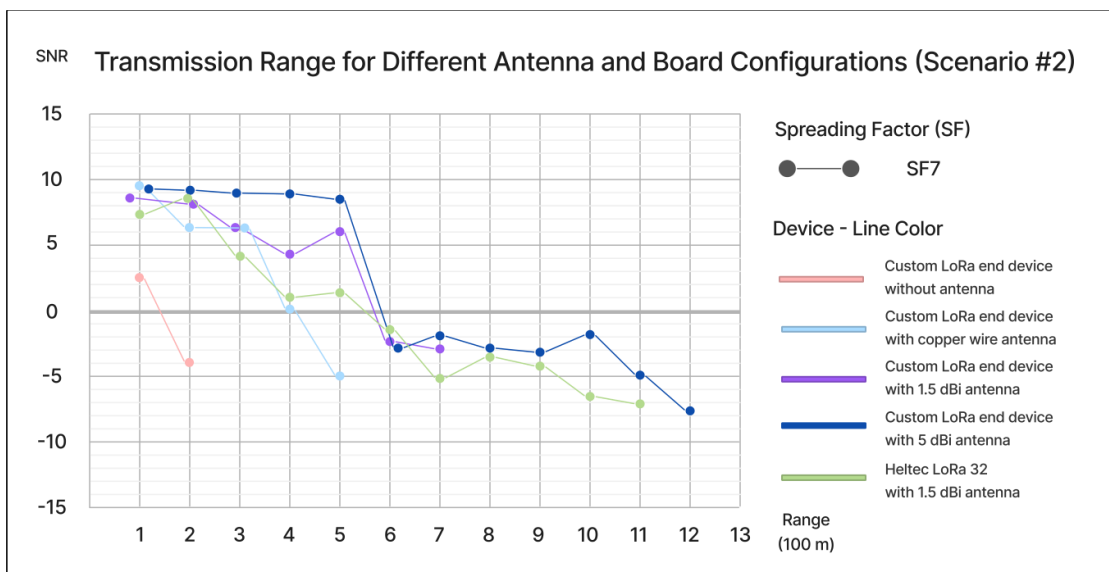
จากการทดสอบทั้งสามครั้งจะสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในการทดสอบครั้งที่ 1 ผลการทดสอบที่ได้เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์เดียวกันที่ SF ที่มีค่าสูงกว่าจะมีระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลกว่า และคุณภาพของอุปกรณ์และเสารับส่งสัญญาณเองก็มีผลต่อคุณภาพในการส่งสัญญาณ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่ถูกออกแบบมาให้รับส่งสัญญาณ LoRa โดยเฉพาะ เช่น บอร์ด Heltec LoRa 32 และเสาอากาศที่มีกำลังการขยายสัญญาณสูงกว่า จะสามารถส่งสัญญาณที่มีคุณภาพและได้ระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลกว่า ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 44 โดยผลการทดสอบโดยละเอียดจะถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก ง



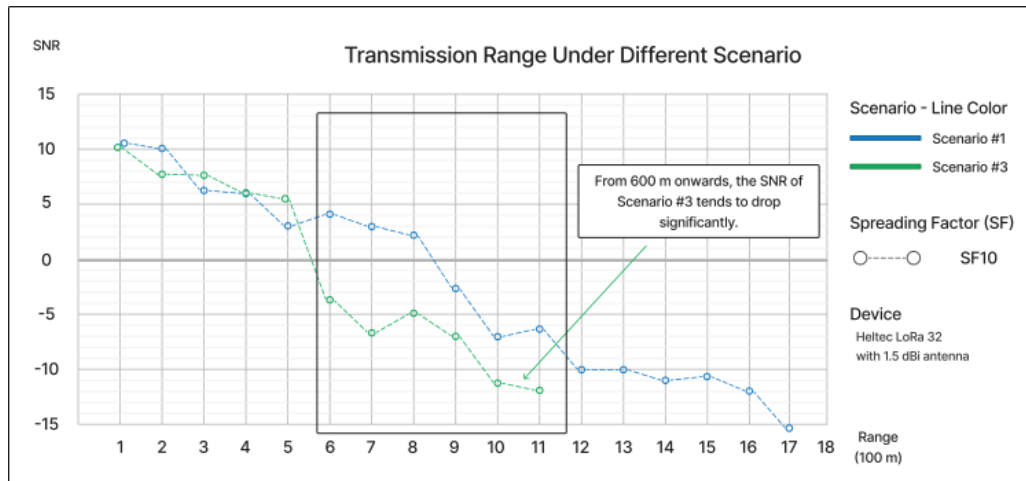
ภาพที่ 44 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการส่งสัญญาณระหว่างแต่ละ Spreading Factor (SF)

2. ในการทดสอบครั้งที่ 2 End Device ที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 1,100 เมตร สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi รองลงมาคือ 900 เมตร สำหรับบอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi และ 700 เมตร สำหรับบอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi ตามลำดับ ในการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า เสาอากาศที่มีค่าการขยายสัญญาณที่สูงจะส่งผลให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพตามไปด้วย และถ้าหากใช้เสาส่งสัญญาณเดียวกัน อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อรับส่งสัญญาณ LoRa โดยเฉพาะเช่น บอร์ด Heltec LoRa 32 จะสามารถส่งสัญญาณได้ดีกว่าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาประกอบกันกับ LoRa Module ดังภาพที่ 45 ทั้งนี้ ในการใช้งานเสาส่งสัญญาณที่มีค่าการขยายสัญญาณที่มากหรืออุปกรณ์ที่ดีกว่าจะมีค่าอุปกรณ์ที่มีค่าสูงมากกว่าดังที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ก



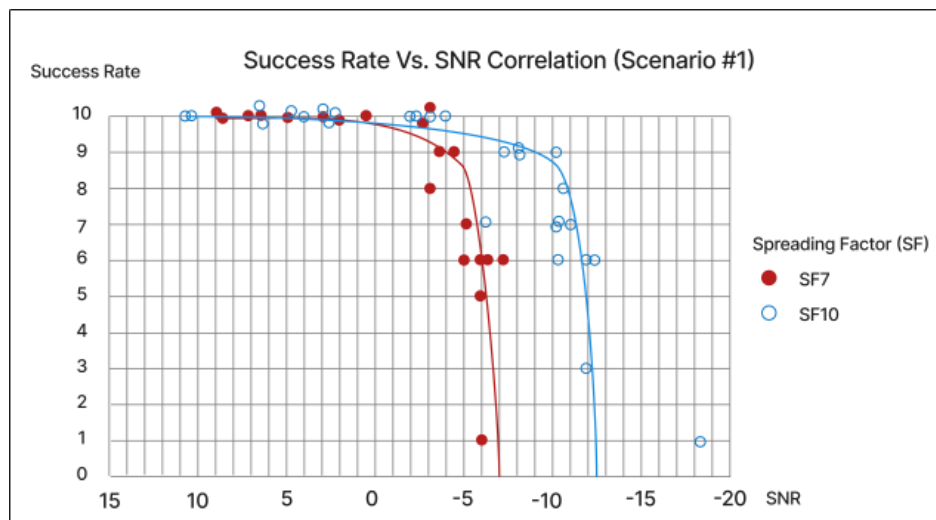
ภาพที่ 45 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการส่งสัญญาณระหว่างแต่ละ End Device

3. ในการทดสอบครั้งที่ 3 จะมีข้อสังเกตคือ แม้เป็นการส่งด้วย SF10 ในสถานที่เดียวกันกับการทดสอบครั้งที่ 2 แต่ระยะที่ End Device ส่งสัญญาณได้ เมื่อเทียบกับครั้งที่ 2 แล้ว พบว่าระยะที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าการทดสอบครั้งที่ 2 ที่ใช้ SF7 เหตุผลที่เป็นเช่นนั้น คาดว่าอาจมาจากในการทดสอบครั้งที่ 3 มีสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการส่งสัญญาณ LoRa เกิดขึ้น ซึ่งการถูกสัญญาณรบกวนนี้ ถ้าวัดเปรียบเทียบค่า SNR จากอุปกรณ์เดียวกันระหว่างการทดสอบครั้งที่ 1 2 และ 3 แล้ว จะพบว่าในระยะทางที่เท่ากัน ที่ระยะ 600 เมตร เป็นต้นไป ค่า SNR จากการทดลองในครั้งที่ 3 จะมีแนวโน้มการลดลงของค่า SNR ที่สูงมากกว่าการทดลองในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เป็นอย่างมาก จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า การทดลองครั้งที่ 3 อาจจะมีปัจจัยรบกวนบางอย่างที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการส่งสัญญาณ LoRa ดังที่แสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณภาพการส่งสัญญาณระหว่างการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง

4. เมื่อลองวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Success Rate และ SNR ในการทดสอบ Scenario #1 ในภาพที่ 43 แล้วจะพบว่า ระหว่าง SF7 และ SF10 นั้น ที่ SF10 จะมีช่วง SNR ที่ตัวรับสัญญาณยังคงสามารถรับสัญญาณได้ต่ำกว่า SF7 จากการทดสอบ SF7 จะมีช่วง SNR ที่สามารถรับสัญญาณได้อยู่ในช่วง 9 ถึง -7 และการรับสัญญาณจะรับไม่ได้สมบูรณ์ทุกครั้งเริ่มต้นที่ -3 ในขณะที่ SF10 จะมีช่วง SNR ที่สามารถรับสัญญาณได้อยู่ในช่วง 10.5 ถึง -12.5 และการรับสัญญาณจะรับไม่ได้สมบูรณ์ทุกครั้งเริ่มต้นที่ -6 เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ในการส่งสัญญาณด้วย SF ที่สูงจะใช้ระยะเวลาการส่งสัญญาณที่ยาวนานกว่า ตัวรับสัญญาณปลายทางจะสามารถถอดรหัสสัญญาณที่ได้รับได้ง่ายแม้ถูกรบกวนสัญญาณ ในขณะที่ SF น้อย เมื่อถูกรบกวนสัญญาณเพียงนิดเดียว ตัวรับสัญญาณปลายทางก็จะไม่สามารถถอดรหัสสัญญาณได้แล้ว ดังที่แสดงในภาพที่ 47 โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Spreading Factor (SF) และขีดจำกัด SNR ที่สามารถรับสัญญาณได้ตามงานวิจัย [64] จะถูกแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SNR และ อัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณจากการทดลอง

ตารางที่ 7 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Spreading Factor (SF) และขีดจำกัด SNR ที่สามารถรับสัญญาณได้ในงานวิจัย [64]

SF	Chirps / Symbol	SNR	Airtime ^a	Bitrate
7	128	-7.5	56.5 ms	5469 bps
8	256	-10	-103 ms	3125 bps
9	512	-12.5	185.3 ms	1758 bps
10	1024	-15	371 ms	977 bps
11	2048	-17.5	741 ms	537 bps
12	4096	-20	1318.9 ms	293 bps

^a 20 bytes per packet and Code Rate = 4/5.

โดยจากการทดลองจะสามารถสรุปได้ว่า สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งการทำงานของระบบการส่งสัญญาณ LoRa คือ เรื่องระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ การเลือกใช้ SF ที่เหมาะสมกับระยะการส่งสัญญาณจะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะที่ใช้พลังงานในการส่งน้อยที่สุด เรื่องของสัญญาณรบกวน ในที่นี้อาจเป็นสัญญาณ Wi-Fi หรือเป็นสัญญาณที่มีช่วงคลื่นสัญญาณใกล้เคียงกับช่วงคลื่นที่ใช้ส่งสัญญาณ LoRa ซึ่งจะมีผลทำให้คุณภาพของสัญญาณแยกลงได้ การติดตั้ง End Device จึงควรติดตั้งในพื้นที่ที่มีการรบกวนของสัญญาณภายนอกน้อยที่สุด และในเรื่องของอุปกรณ์และเสาส่งสัญญาณ อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อรับส่งสัญญาณ LoRa โดยเฉพาะ จะมีประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณที่ดีกว่าอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นมาเองแต่ก็จะมีราคาที่สูงกว่า ดังที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ก เช่นเดียวกับคุณภาพของเสาส่งสัญญาณนั้นจะมีผลกระทบต่อคุณภาพในการส่งสัญญาณ การเลือกเสาส่งสัญญาณที่ดีจะทำให้คุณภาพในการส่งสัญญาณดีขึ้นได้

5.3 ผลการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน

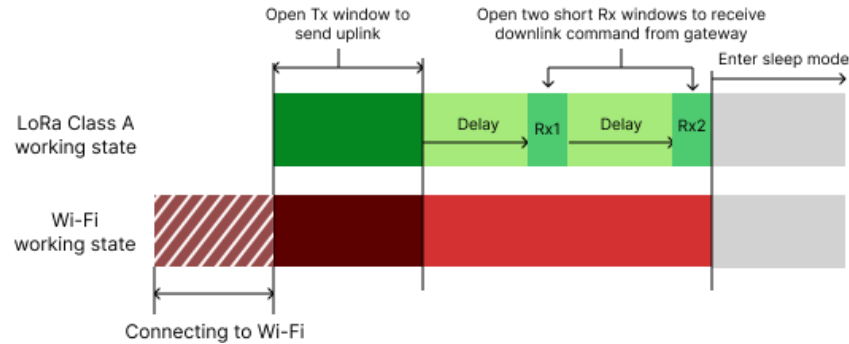
ในการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งานในทั้ง 2 สถานะการทำงาน ได้ผลดังต่อไปนี้

1) สถานะที่ระบบมีการทำงาน (Working State)

ในสถานะนี้ End Device จะมีการทำงานเพื่อวัดค่าจากเซนเซอร์ เปิดปิดตัวกระตุ้น หรือ รับส่งสัญญาณ LoRa ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอพลังงานเฉพาะส่วนที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และ LoRa Module ใช้งานรับส่งสัญญาณ LoRa เทียบกับการใช้พลังงานในการรับส่งข้อมูลด้วย Wi-Fi เนื่องจากพลังงานที่เซนเซอร์และตัวกระตุ้นแต่ละตัวใช้จะแตกต่างกันไปตามแต่ละอุปกรณ์ตามแล้วแต่ที่ผู้ใช้งานต้องการ

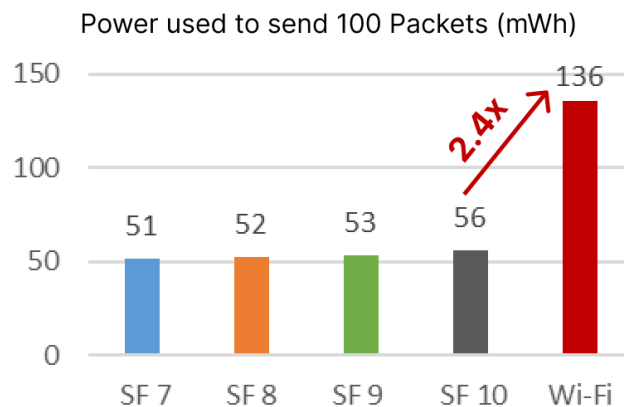
โดยในการรับส่งสัญญาณด้วยสัญญาณ LoRa ในงานวิจัยนี้ จะใช้อุปกรณ์เป็น Class A End Device กล่าวคือ จาก End Device ที่อยู่ในสถานะนอนหลับ (Deep Sleep) ในตอนเริ่มการส่งสัญญาณ LoRa Class A จะทำการเปิดหน้าต่างสำหรับส่งสัญญาณ Uplink คือ Tx จากนั้น เมื่อส่งสัญญาณข้อมูลสำเร็จแล้ว เครื่องจะเปิดหน้าต่างรับสัญญาณ Downlink คือ Rx สั้น ๆ สองครั้ง เพื่อรอรับคำสั่งที่จะส่งกลับมา แตกต่างกับ

การทำงานส่งข้อมูลของ Wi-Fi ที่เมื่อใดก็ตามที่จะต้องทำการรับส่งข้อมูล บอร์ดจะต้องเปิดการทำงานและเชื่อมต่อ Wi-Fi ทุกครั้งทำให้สูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมาก ดังที่แสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ภาพเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานส่งสัญญาณ LoRa และ Wi-Fi

การเปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการส่งสัญญาณ 100 ครั้ง ครั้งละ 10 Byte ที่ระยะ 50 m โดยใช้การส่งผ่านสัญญาณ LoRa และส่งผ่าน Wi-Fi ผลที่ได้จะแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 กราฟเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการส่งสัญญาณระหว่าง LoRa และ Wi-Fi

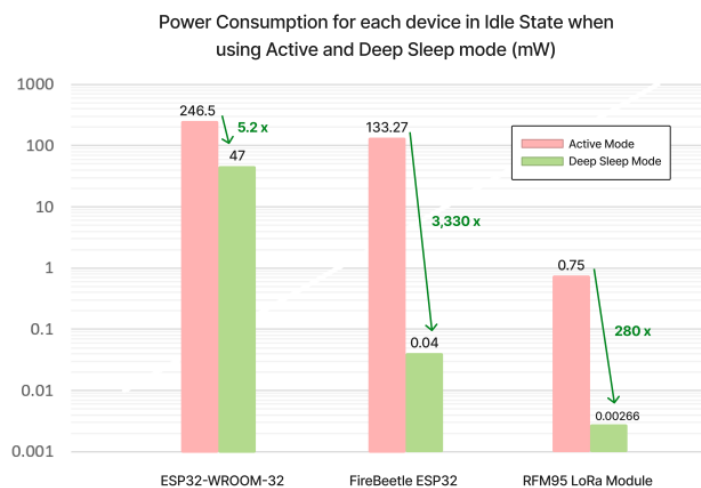
ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการใช้ Wi-Fi ในการส่งสัญญาณจะกินพลังงานมากถึง 2.5 เท่า ของพลังงานเมื่อเทียบกับการส่งสัญญาณด้วย LoRa โดยพลังงานที่เพิ่มขึ้นมามากถึง 2.5 เท่า ส่วนมากจะมาจากขั้นตอนการเชื่อมต่อ Wi-Fi ใหม่ทุกครั้งที่มีการรับส่งสัญญาณ

2) สถานะที่ระบบรอการทำงานครั้งต่อไป (Idle State)

จากการทดสอบ ในขณะที่ End Device อยู่ในสถานะ Idle State บอร์ดจะเข้าสู่โหมด Deep Sleep แทนโหมด Active เพื่อให้บอร์ดประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในโหมด Deep Sleep เทียบกับโหมด Active ทดสอบโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และ RFM95 LoRa Module จะถูกแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 50

ตารางที่ 8 ตารางแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้งาน

Device	Power Consumption (mW)	
	Active	Deep Sleep
ESP32-WROOM-32	246.5	47
FireBeetle ESP32	133.273	0.04
	Active	Off
RFM95 LoRa Module	0.75	0.00266

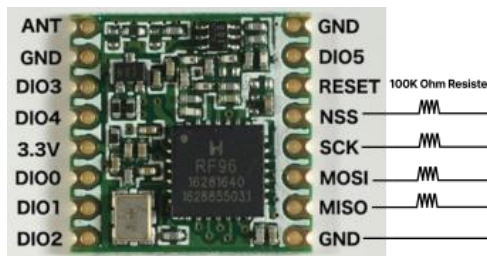


ภาพที่ 50 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้งานใน Idle State ขณะที่อยู่ในโหมด Active และ Deep Sleep

ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ พบว่าการใช้โหมด Deep Sleep จะสามารถลดพลังงานของอุปกรณ์ได้เมื่อเทียบกับการใช้งานในโหมด Active ได้มากถึง 5.2 เท่า หากใช้งานบอร์ด ESP32-WROOM-32 และมากถึง 3,300 เท่า หากใช้งานบอร์ด FireBeetle ESP32

นอกเหนือจากตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว อุปกรณ์ส่งสัญญาณ RFM95 LoRa Module ยังสามารถเลือกปิดการใช้งานในช่วงขณะที่บอร์ดไม่มีการใช้งานใด ๆ ได้อีกด้วย ทั้งนี้ในการปิดการใช้งาน RFM95 LoRa Module นั้น โดยปกติแล้วในกรณีที่ผู้ทดลองใช้การบัดกรีประกอบอุปกรณ์ส่งสัญญาณ RFM95 ขึ้นมาเอง ในระหว่างที่ RFM95 กำลังปิดการใช้งาน Pin บาง Pin จะยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ RFM95 ใช้ มีค่าสูงกว่า 0.00266 mW จากการทดสอบพบว่า Pin NSS SCK MISO และ MOSI เมื่อ RFM95 ปิดการใช้งาน ค่าแรงดันไฟฟ้าของ Pin ดังกล่าวจะไม่ได้มีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 V แต่จะมีค่าตั้งแต่ 50 – 69 mV ทางผู้วิจัยจึงได้ทดสอบโดยการทำให้ Pull-down Pin โดยการต่อ Pin ดังกล่าวเข้ากับตัวต้านทาน 100 K Ohm แล้วจากนั้นจึงต่อเข้ากับ Pin GND เพื่อดึงค่าแรงดันไฟฟ้าให้แต่ละ

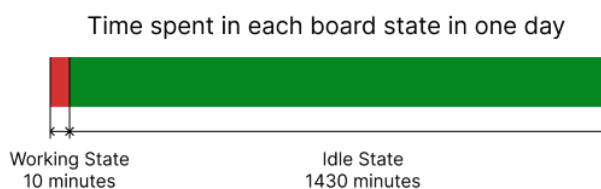
Pin เป็น 0 V ผลลัพธ์ที่ได้คือ พลังงานไฟฟ้าที่ RFM95 ใช้จะลดลงเหลือ 0.00266 mW ในขณะที่ระบบ ยังคงสามารถทำงานรับส่งสัญญาณ LoRa ได้ตามปกติ ดังที่แสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 ภาพแสดงรายละเอียด Pin ของ RFM95 และวิธีการ Pull Down Pin

ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหมด Deep Sleep ในส่วนของอุปกรณ์อื่น ๆ จำพวกเซนเซอร์และ ตัวกระตุ้น จากการทดลองพบว่า ตัวกระตุ้นจำพวกรีเลย์ (Relay) ในขณะที่บอร์ดอยู่ในโหมด Deep Sleep รีเลย์จะไม่มีการใช้พลังงานใด ๆ เลย ในขณะที่การใช้เซนเซอร์บางตัวในโหมด Deep Sleep จะมีการกิน พลังงานที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถเลือกตัดพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้ออกไปได้โดยการใช้รีเลย์เป็นตัว ควบคุมการจ่ายไฟของเซนเซอร์แต่ละตัว กล่าวคือ เมื่อบอร์ดอยู่ในโหมด Deep Sleep ที่เซนเซอร์ไม่ต้อ งมีการทำงานใด ๆ รีเลย์จะเป็นตัวตัดการจ่ายพลังงานให้แก่เซนเซอร์ แล้วเมื่อใดที่ End Device ต้องการใ้ งานเซนเซอร์เพื่อวัดค่าต่าง ๆ เมื่อนั้นรีเลย์จะเปิดการทำงานจ่ายไฟฟ้าไปให้เซนเซอร์ก่อนเป็นเวลา 3-5 วินาที แล้วจากนั้น เซนเซอร์จึงทำงานวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นหรือแสงสว่างต่าง ๆ ส่งไปให้ Gateway ผ่าน สัญญาณ LoRa ต่อไป ด้วยวิธีนี้จะสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่เซนเซอร์และตัวกระตุ้นต่าง ๆ ใช้งานได้

จากการทำงานของ End Device ตามที่ได้ทดสอบไปในการทดลองควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการ เจริญเติบโตของพืชพบว่า เวลาที่ End Device ใช้ในแต่ละสถานะ (State) ในเวลาหนึ่งวันจะประกอบไป ด้วย การทำงานใน Working State ประมาณ 10 นาที (ส่งสัญญาณ LoRa ไปทั้งสิ้น 70 ครั้ง) การทำงานใน Idle State ประมาณ 1,430 นาที ดังที่แสดงในภาพที่ 52 (ภาพไม่ได้สเกลตามค่าจริง)

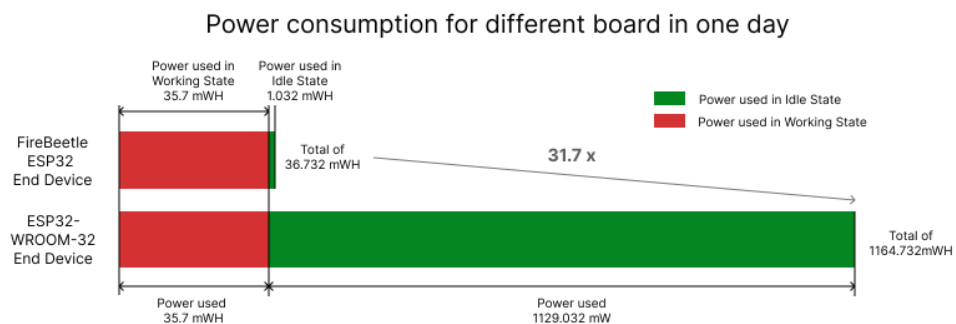


ภาพที่ 52 เวลาที่บอร์ดใช้ใน Working State และ Idle State ในเวลาหนึ่งวัน

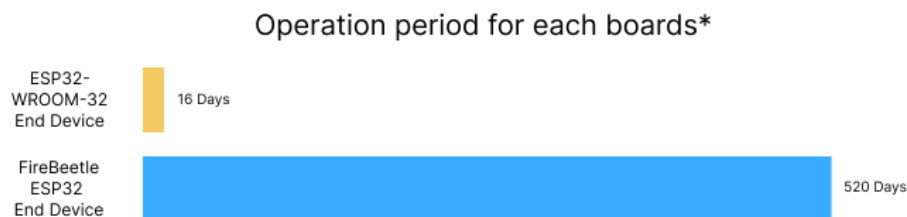
ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่ทางผู้วิจัยเลือกใช้ในการสร้าง End Device จะใช้เป็นบอร์ด FireBeetle ESP32 ซึ่งเป็นบอร์ดที่ประหยัดพลังงานมากกว่าบอร์ด ESP32-WROOM-32 เป็นอย่างมาก ในขณะที่บอร์ด อยู่ในสถานะที่ไม่ได้มีการทำงานใด ๆ (Idle State) หรืออยู่ในโหมด Deep Sleep จะมีค่าดังนี้

- FireBeetle ESP32 ในโหมด Deep Sleep จะใช้พลังงาน 0.04 mW เมื่อนำมารวมกับพลังงานที่ RFM95 LoRa Module ใช้ 0.003 mW รวมกันแล้วจะมีค่า 0.043 mW โดยคิดเป็นพลังงานที่ใช้ในสถานะที่ไม่ได้มีการทำงานใด ๆ ต่อวันหรือ 24 ชั่วโมง จะอยู่ที่ประมาณ 1.032 mWh
- ESP32-WROOM-32 ที่ในขณะที่อยู่ในโหมด Deep Sleep จะใช้พลังงาน 47 mW เมื่อนำมารวมกับพลังงานที่ RFM95 LoRa Module ใช้ 0.003 mW รวมกันแล้วจะมีค่า 47.043 mW คิดเป็นพลังงานที่ใช้ในสถานะที่ไม่ได้มีการทำงานใด ๆ ต่อวันหรือ 24 ชั่วโมง จะอยู่ที่ประมาณ 1129.032 mWh

ส่วนในการใช้งาน End Device ในสถานะที่ระบบมีการทำงาน (Active State) เพื่อวัดค่าตัวแปร หรือเปิดการใช้งานตัวกระตุ้นต่าง ๆ และส่งข้อมูลเหล่านี้ต่อไปยัง Gateway โดยจากการทดสอบพบว่า ในการส่งสัญญาณ LoRa 100 ครั้งด้วย SF7 จะใช้พลังงานอยู่ที่ประมาณ 51 mWh ถ้าหากใน 1 วัน มีการส่งข้อมูลทั้งสิ้นประมาณ 70 ครั้งอ้างอิงตามการทดลองควบคุมตัวแปรที่ส่งผลการเจริญเติบโตของพืช พลังงานในสถานะที่ระบบมีการทำงานที่ใช้ต่อวันจะอยู่ที่ประมาณ 35.7 mWh ถ้าหาก End Device ใช้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตหรือ LiFePO4 ที่จะมีความจุอยู่ที่ 19.2 WH ในวันหนึ่งเมื่อรวมการทำงานของ End Device ทั้งสองสถานะแล้ว บอร์ด FireBeetle จะใช้พลังงานอยู่ที่ 36.732 mWh จะสามารถใช้งานได้ 520 วัน ส่วนบอร์ด ESP32-WROOM-32 จะใช้พลังงานอยู่ที่ 1164.732 mWh จะสามารถใช้งานได้ 16 วัน ทั้งนี้ในการคำนวณจะไม่ได้รวมถึงพลังงานที่เซนเซอร์และตัวกระตุ้นใช้งาน ดังที่แสดงในภาพที่ 53 (ภาพไม่ได้สเกลตามค่าจริง) และภาพที่ 54 (ภาพสเกลตามค่าจริง)



ภาพที่ 53 พลังงานที่ End Device ใช้ในหนึ่งวันเปรียบเทียบกันระหว่างแต่ละบอร์ด



*Assume End Device operates on LiFePo4 battery (19.2 WH)

ภาพที่ 54 เวลาที่ End Device สามารถทำงานได้เมื่อใช้แบตเตอรี่ LiFePO4

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอแนวคิด วิธีการออกแบบ การสร้างและใช้ระบบอัตโนมัติเพื่อช่วยในการทำงานทางด้านการเกษตร ช่วยลดค่าใช้จ่าย ลดภาระในการดูแลระบบ ลดทรัพยากรที่ต้องใช้ในการเพาะปลูก แต่เพิ่มผลผลิตที่ได้ โดยระบบช่วยการทำการเกษตรนี้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในฟาร์มหลายประเภท ทั้งฟาร์มในครัวเรือนขนาดเล็กไปจนถึงฟาร์มการเกษตรขนาดใหญ่ โดยระบบได้ใช้การสื่อสารแบบเครือข่ายด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN เข้ามาใช้ร่วมกับการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ต่าง ๆ เพื่อให้การวัดค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช การประมวลผล และการแสดงผล ไปจนถึงการควบคุมการทำงานของตัวกระตุ้นต่าง ๆ ทำงานโดยอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเหมาะสมในการใช้งานจริง จากการสร้างและทดสอบการใช้งานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN นั้น สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

การทำงานเพื่อควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชนั้น พบว่าจากการทดลอง ใช้งานระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ในส่วนของการงานเพื่อทำการวัดและรายงานผลค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชจาก Sensor End Device พบว่าอุปกรณ์สามารถวัดและรายงานผลค่าของตัวแปรตามที่ต้องการและส่งไปยัง Gateway ด้วยสัญญาณ LoRa และส่งต่อไปยัง TTS Network Server ด้วย Wi-Fi ได้ อย่างถูกต้อง ตามระยะเวลาที่กำหนดและในส่วนการทำงานของ Actuator End Device การทำงานเพื่อควบคุมตัวกระตุ้นนั้น สามารถทำงานเปิดปิดปั๊มหมอกและปั๊มน้ำ เพื่อควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชต่าง ๆ ได้ตามที่ตั้งค่าไว้ ในส่วนของการใช้งานเครื่องมือซอฟต์แวร์อื่น ที่ใช้งานในระบบประกอบไปด้วย Node-RED สามารถใช้งานเพื่อควบคุมเงื่อนไขในการใช้งานของตัวกระตุ้นและยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าเวลาต่าง ๆ ของระบบการทำงานได้อย่างอิสระ และ Datacake จะแสดงผลการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ จาก Sensor End Device ออกมาได้อย่างถูกต้อง

2. คุณภาพของการส่งสัญญาณ

จากการทดลองเพื่อทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณ LoRa สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน หรือ Signal-to-noise ratio (SNR) ตำแหน่งของการส่งสัญญาณ และอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณ (Success Rate) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายปัจจัย สามารถสรุปได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อต้องการติดตั้งระบบการทำงานที่ต้องใช้การสื่อสารด้วยเทคโนโลยี LoRa ดังนี้

1. การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ LoRaWAN Gateway คือ The Things Indoor Gateway (TTIG) ที่เป็น Gateway ขนาดเล็ก ที่ออกแบบมาไว้ใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณในระยะสั้น ไม่มีเสารับส่งสัญญาณภายนอกตัว อุปกรณ์ ทำให้สามารถรับส่งสัญญาณ LoRaWAN ได้ในระยะที่สั้นกว่าการใช้ Outdoor Gateway ที่มีเสารับส่งสัญญาณที่ดีกว่า และตัว End Device ที่งานวิจัยนี้ใช้ในการทดสอบเป็นบอร์ด Heltec LoRa 32 และ End Device ที่สร้างขึ้นเองจากไมโครคอนโทรลเลอร์ FireBeetle ESP32 และ LoRa Module Transceiver 915Mhz หรือก็คือ RFM95W ที่ต่อเข้ากับเสาส่งสัญญาณแบบต่าง ๆ จากการทดสอบพบว่า คุณภาพของบอร์ดและค่าการขยายสัญญาณของเสาส่งสัญญาณจะมีผลโดยตรงต่อระยะทางในการส่งสัญญาณ ถ้าบอร์ดมีคุณภาพดี และเสาส่งสัญญาณมีค่าการขยายสัญญาณที่สูง สัญญาณที่ส่งออกมาจะมีคุณภาพดีตามไปด้วย
2. เรื่องตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ End Device ให้ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวน (ในที่นี้อาจเป็นสัญญาณ Wi-Fi หรือเป็นสัญญาณที่มีช่วงคลื่นสัญญาณใกล้เคียงกับช่วงคลื่นที่ใช้ส่งสัญญาณ LoRa) ไม่มากและควรเป็นพื้นที่โล่งแจ้งที่ตัวรับและตัวส่งสัญญาณมีเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight) ถึงกัน
3. การเลือกใช้ SF ที่เหมาะสมกับระยะการส่งสัญญาณ โดยการเลือก SF ที่เหมาะสมจะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะที่ใช้พลังงานในการส่งน้อยที่สุด

3. พลังงานไฟฟ้าที่ End Device ใช้งาน

พลังงานที่ใช้ในการทำงานของระบบช่วยการทำการเกษตรอัตโนมัติจะทดสอบโดยการวัดกระแสและความดัน จากนั้นจึงเอามาคำนวณเป็นกำลังงานและพลังงานต่อไป ในการทดสอบจะใช้แบตเตอรี่ LiFePO4 ที่มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.3 V ในการทดสอบ โดยจะสามารถแบ่งช่วงการทำงานของ End Device ออกเป็นทั้งสิ้น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ระบบมีการทำงาน (Working State) เพื่อส่งข้อมูลจาก End Device ไปสู่ Gateway จากการทดสอบ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อความของการสื่อสารแบบ LoRa บอร์ดจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูล 100 ครั้ง ด้วย SF7 - SF10 จะใช้พลังงานอยู่ที่ 51 - 56 mWh ส่วนการส่งข้อมูลโดยใช้ Wi-Fi ในเงื่อนไขเดียวกัน บอร์ดจะใช้พลังงานอยู่ที่ 136 mWh
2. ช่วงที่ระบบรอการทำงานครั้งต่อไป (Idle State) โดยจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การให้บอร์ดเข้าสู่โหมด Deep Sleep ในขณะที่บอร์ดไม่ได้มีการใช้งาน จะมีผลต่อการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก โดยจะสามารถประหยัดพลังงานได้มากถึง 3,330 เท่า ถ้าใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ FireBeetle ESP32 ที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานในโหมด Deep Sleep โดยเฉพาะ โดยการใช้งานบอร์ด ESP32-WROOM-32 ในโหมด Deep Sleep จะใช้พลังงานอยู่ที่ 47 mW ในขณะที่ FireBeetle ESP32 ในโหมด Deep Sleep จะใช้พลังงานอยู่ที่ 0.04 mW

นอกจากนั้นอุปกรณ์ส่งสัญญาณ LoRa หรือ RFM95 ยังสามารถสั่งปิดการใช้งานเมื่อไม่ใช้และทำการ Pull Down ตัว Pin ที่มีไฟตกค้างโดยจะได้พลังงานต่ำสุดอยู่ที่ 0.003 mW

6.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. เนื่องจาก LoRaWAN นั้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการสื่อสารระยะไกล ส่งผลให้การใช้งานโดยปกติแล้วระหว่างทางของการส่งสัญญาณอาจมีสิ่งกีดขวางจำนวนมาก ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์จึงเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับระยะทางและความชัดเจนของสัญญาณที่จะส่งไปถึง การติดตั้ง Gateway ในพื้นที่ที่ความเหมาะสมในการส่งสัญญาณ บนพื้นที่สูงที่ไม่มีผนังอาคารหรือสิ่งกีดขวางใด ๆ กั้น หรือในบริเวณที่มีที่มีเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวางและในสถานที่ที่ปราศจากสัญญาณรบกวน จะทำให้ได้สัญญาณที่มีคุณภาพสูง ทั้งนี้ในงานวิจัย [66] จะนำเสนอผลการทดลองส่งสัญญาณในสถานที่ที่มีสิ่งกีดขวางด้วย SF ต่าง ๆ การทดสอบในสถานที่จริงเพื่อเลือก SF ให้เหมาะสมในการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่ควรทำเป็นอย่างมาก
2. ในเรื่องของทางเลือกอุปกรณ์ในการใช้ส่งสัญญาณ LoRa ตัว End Device ที่ทำขึ้นเองในงานวิจัยนี้ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับตัวส่งสัญญาณ LoRa Module ในการใช้งานจริง จะได้คุณภาพในการรับส่งสัญญาณที่น้อยกว่าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบเฉพาะทางไว้สำหรับการรับส่งสัญญาณ LoRa คาดว่าเหตุผลส่วนหนึ่งที่ทำให้เป็นแบบนี้เป็นผลเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทำงานซึ่งเกิดจากคนในขณะที่ทำการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ความผิดพลาดในการบัดกรีสายส่งสัญญาณต่าง ๆ และในส่วนของตัว Gateway ที่งานวิจัยนี้เลือกใช้เป็น The Things Indoor Gateway (TTIG) ที่จะมีประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณไม่เท่ากับ Outdoor Gateway ดังนั้น ระยะทางในการส่งสัญญาณจะมีค่าปรับเปลี่ยนไปจากงานวิจัยนี้ หากใช้อุปกรณ์ เสาร์ับส่งสัญญาณ และตัว Gateway ที่เปลี่ยนแปลงไป การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการของงานนั้น ๆ จึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงเพื่อให้ได้ระยะทางในการส่งสัญญาณที่ต้องการในราคาอุปกรณ์ที่เหมาะสม
3. การใช้งาน The Things Stack Network Server (TTS) ที่เป็น Public Network Server ของ The Things Network การใช้งาน Public Network Server นี้ จะมีข้อดี คือ สามารถใช้งานได้สะดวก จัดการข้อมูลได้อย่างง่ายดาย แต่ในขณะเดียวกัน การจะปรับแต่งหรือพัฒนา Network Server ให้สามารถบริหารจัดการและดูแลการสื่อสารของ Packet ในระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น หรือทำงานจัดการโครงข่ายให้เพียงพอต่อการใช้งานจริงเมื่อข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการใช้งานจริงในงานที่มีข้อมูลจำนวนมากหรือเป็นงานที่มีความซับซ้อน การพัฒนา Network Server ของตัวเอง จึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำ
4. การควบคุมระบบช่วยทำการเกษตรอัตโนมัติในงานวิจัย จะใช้การควบคุมสั่งการทำงาน เปลี่ยนเงื่อนไขการเปิดปิด หรือปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน โปรแกรม Node-RED โดยตรง ถ้าหากต้องการให้การใช้งานระบบช่วยทำการเกษตรอัตโนมัติมีความสะดวกและเหมาะสมแก่การใช้งานของแต่ละบุคคล วิธีการหนึ่งคือการสร้างและใช้

งานแอปพลิเคชันที่จะเป็นส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface) ซึ่งจะทำให้ระบบช่วยทำการเกษตรอัตโนมัตินี้ ใช้งานได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

5. ระบบช่วยทำการเกษตรอัตโนมัติที่ออกแบบมานั้น สามารถนำไปใช้กับการเกษตรในรูปแบบอื่นหรืองานควบคุมอัตโนมัติอื่น ๆ ได้ตามความเหมาะสม โดยการเปลี่ยนเซนเซอร์และตัวกระตุ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้น ๆ

บรรณานุกรม

1. มโนจันทร์เพ็ญ, ณ. รายงานยูเอ็นคาด ประชากรโลกเพิ่มสูงถึง 9.7 พันล้านคนภายในปี 2050 อินเดียเตรียมแข่งจีนครองแชมป์มีประชากรมากที่สุดในโลก. 2019, June 19; Available from: <https://thestandard.co/the-world-population-prospects-2019/>.
2. (TCDC), ส.อ.T.C.D.C. มองไปข้างหน้า 2050: การอยู่รอดด้วยความมั่นคงด้านทรัพยากร (Water-Food-Energy Security Nexus). 2020, July 9; Available from: <https://www.creativethailand.org/new/article/trend/32516/th#LOOK-ISAN-NOW-Water-Food-Energy-Security-Nexus>.
3. Roser, M. *Two centuries of rapid global population growth will come to an end*. 2019, June 18; Available from: <https://ourworldindata.org/world-population-growth-past-future>.
4. ดร.โสภณศรี จันทรัตน์, ผ.ด.ว.อ., ผศ. ดร.ภูมิสิทธิ์ มหาสุวีระชัย, ดร.กรรณิการ์ ธรรมพานิชวงศ์, นายจิรัฐ เจริญพิงพร. ภูมิทัศน์ภาคเกษตรไทย จะพลิกโฉมอย่างไรสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน? 2562; Available from: https://www.bot.or.th/Thai/ResearchAndPublications/articles/Pages/Article_26Sep2019.aspx.
5. Wang, X., Z. Kaili, and H. Zhiyong. *Open Field Smart Planting System of Family Farm*. in *2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*. 2021.
6. Sunehra, D. and M. Srinidhi. *Implementation of Smart Urban Farming using Raspberry Pi, Arduino and Node-RED Platform*. in *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*. 2020.
7. Yaseen, M.T., F.Y. Abdullah, and M.H. Almallah. *Smart Green Farm*. in *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. 2020.
8. Bandara, T.M., W. Mudiyansele, and M. Raza. *Smart farm and monitoring system for measuring the Environmental condition using wireless sensor network - IOT Technology in farming*. in *2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*. 2020.
9. Wongpatikaseree, K., P. Kanka, and A. Ratikan. *Developing Smart Farm and*

- Traceability System for Agricultural Products using IoT Technology*. in 2018 *IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. 2018.
10. Ardiansyah, D., et al., *Wireless Sensor Network Server for Smart Agriculture Optimatization*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **621**(1): p. 012001.
 11. Islam, N., B. Ray, and F. Pasandideh. *IoT Based Smart Farming: Are the LPWAN Technologies Suitable for Remote Communication?* in 2020 *IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*. 2020.
 12. Kamilaris, A., et al. *Agri-IoT: A semantic framework for Internet of Things-enabled smart farming applications*. in 2016 *IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. 2016.
 13. Zamora-Izquierdo, M.A., et al., *Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing*. *Biosystems Engineering*, 2019. **177**: p. 4-17.
 14. Hossain, M.I. and J.I. Markendahl, *Comparison of LPWAN Technologies: Cost Structure and Scalability*. *Wireless Personal Communications*, 2021.
 15. Miles, B., et al., *A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture*. *Computer Communications*, 2020. **164**: p. 148-157.
 16. Prakosa, S.W., et al., *Design and Implementation of LoRa Based IoT Scheme for Indonesian Rural Area*. *Electronics*, 2021. **10**(1): p. 77.
 17. Codeluppi, G., et al., *LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture*. *Sensors*, 2020. **20**(7): p. 2028.
 18. Kimogol, S.S., *Smart Farming For Emerging Economies A LoRaWAN Based Approach*. 2019, University of Oslo. p. 113.
 19. Basford, P.J., et al., *LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long Term Evaluation*. *Sensors*, 2020. **20**(3): p. 648.
 20. สมุทสิลป์, จ., การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN, in *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า. 2562, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*
 21. สุขะโท, ณ., ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย, in *จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า. 2562, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*

22. องค์การมหาชน). ส. เกษตรกร อาชีพที่อยู่คู่กับคนไทยมาช้านาน. Available from: https://www.arda.or.th/knowledge_detail.php?id=33.
23. LEGA Corporation Co., L. ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช. Available from: <https://legatool.com/wp/10911/>.
24. ทुरुปลูกปัญญา. ปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช. 2021, Aug 06; Available from: <https://www.trueplookpanya.com/learning/detail/33764>.
25. เซาวานา เพชรรัตน์, พ.ว., เบญจพร เชื้อนสุวรรณค์. รูปแบบการผลิตเกษตรของครัวเรือนไทยในชนบท. 2019, May 15; Available from: <https://www.pier.or.th/abridged/2019/10/>.
26. สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สรุปข้อมูลสถิติการเกษตรและสหกรณ์ที่สำคัญ 2020, April 24; Available from: <https://www.opsmoac.go.th/nakhonsithammarat-dwl-files-421191791137>.
27. Farm, S.W.; Available from: <https://www.facebook.com/StarCatWiseFarm/>.
28. HandySense. Available from: <https://handysense.io/>.
29. WAVIoT. *What is LPWAN*. Available from: <https://waviot.com/technology/>.
30. จำกัฒ, บ.ว. เทคโนโลยี LPWAN คืออะไร ในไทยมีอุปกรณ์ IoT ไหนรองรับบ้าง. 2020, May 12; Available from: <https://blog.ibcon.com/?p=710>.
31. Advantech Co., L. *Wireless Communication*. 2020; Available from: https://www.advantech.com/products/wireless-i-o-devices/sub_cff2131f-4a19-433f-b404-b7875680a53c.
32. Wasit. ทำความรู้จัก OSI Model. 2020, Aug 28; Available from: <https://www.ablenet.co.th/2020/08/28/what-is-osi-model/>.
33. Imperva. *OSI Model*. Available from: <https://www.imperva.com/learn/application-security/osi-model>.
34. Semtech. *What Is LoRa®?* ; Available from: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
35. Techopedia. *Physical Layer*. 2020, Aug 7; Available from: <https://www.techopedia.com/definition/8866/physical-layer>.
36. Kim, D.-H., E.-K. Lee, and J. Kim, *Experiencing LoRa Network Establishment on a Smart Energy Campus Testbed*. Sustainability, 2019. **11**: p. 1917.
37. Network, T.T., *Regional Parameters*.
38. Network, T.T. *LoRaWAN Frequency Plans*. Available from:

<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans/>.








39. กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่อง
โทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม ที่ไม่ใช่ประเภท *Radio Frequency
Identification: RFID* ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน ๙๒๐ - ๙๒๕ เมกะเฮิรตซ์. 2560.
40. Network, T.T. *LoRaWAN Architecture*. Available from:
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>.
41. Yegin, A., et al., *3 - LoRaWAN protocol: specifications, security, and capabilities*,
in *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, B.S. Chaudhari and M.
Zennaro, Editors. 2020, Academic Press. p. 37-63.
42. Industries, T.T., *What is a LoRaWAN Network Server?* 2020, Aug 27.
43. Network, T.T., *Application Server*.
44. Network, T.T. *Device Classes*. Available from:
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>.
45. Lie, R. *LoRaWAN*. Available from:
[https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.ht
ml](https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html).
46. Polonelli, T., et al., *Slotted ALOHA on LoRaWAN-Design, Analysis, and
Deployment*. *Sensors*, 2019. **19**(4): p. 838.
47. Sallum, E., et al., *Improving Quality-Of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area
Networks through Optimized Radio Resource Management*. *Journal of Sensor
and Actuator Networks*, 2020. **9**(1): p. 10.
48. Lie, R., *Build LoRa gateway using Raspberry Pi 3 model B and Dragino LoRa
shield v1.1*. 2016.
49. Corinne Bernstein, K.B., Alexander S. Gillis. *MQTT (MQ Telemetry Transport)*.
Available from: [https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/MOTT-
MO-Telemetry-Transport](https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/MOTT-MO-Telemetry-Transport).
50. Shovic, D.J.C. *mqtt-architecture*. 2022; Available from:
[https://www.switchdoc.com/2020/01/tutorial-using-mqtt-on-switchdoc-labs-
ourweather-station/mqtt-architecture/](https://www.switchdoc.com/2020/01/tutorial-using-mqtt-on-switchdoc-labs-ourweather-station/mqtt-architecture/).
51. Bindra, I. *The Theory about Webhooks*. 2019, Oct 27; Available from:

- <https://ishmeet1995.medium.com/lets-talk-about-webhooks-part-1-theory-9fc66bd3413d>.
52. Contributors, O.F. *Node-RED*. Available from: <https://nodered.org>.
 53. Datacake. *Datacake*. Available from: <https://datacake.co/>.
 54. NATTHASATH. *API vs Webhook*. 2018, Sep 26; Available from: <https://codeinsane.wordpress.com/2018/10/26/api-vs-webhook/>.
 55. Hexton, C. *What is a webhook: How they work and how to set them up*. Available from: <https://www.getvero.com/resources/webhooks/>.
 56. DRAGINO. *LAQ4 -- LoRaWAN Air Quality Sensor*. 2021, Mar 23; Available from: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/174-laq4.html>.
 57. Electronics, A. *LAQ4 LoRaWAN Air Quality Sensor*. Available from: <https://www.antratek.com/laq4-lorawan-air-quality-sensor>.
 58. Tech, e. *LoRa Gateways*. Available from: <https://ethicstech.in/en/products/iot/lora-gateways>.
 59. Lima, S. *LoRaWAN® Gateway*. 2020, Jan 26; Available from: <https://khunsomsak.medium.com/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87-lorawan-gateway-%E0%B8%AA%E0%B8%B3%E0%B8%AB%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%9A-%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%A8%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%A2-dragino-lg308-as923-th-ec25-744c0d37b7a5>.
 60. Yordanov, V. *Things to Consider When Picking A LoRaWAN® Gateway*. 2021, Jun 24; Available from: <https://news.rakwireless.com/things-to-consider-when-picking-a-lorawan-gateway/>.
 61. Seeedstudio. *The Things Indoor LoRaWAN WiFi Gateway based on SX1308*. Available from: <https://wiki.seeedstudio.com/The-Things-Indoor-Gateway/>.
 62. Network, T.T. *RSSI and SNR*. Available from: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>.
 63. Network, T.T. *TTN Mapper*. Available from: <https://ttnmapper.org/heatmap/>.
 64. Sallum, E., et al., *Improving Quality-Of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area Networks through Optimized Radio Resource Management*. *Journal of Sensor*

- and Actuator Networks, 2020. **9**: p. 10.
65. David, C. *Guide to Reduce the ESP32 Power Consumption by 95%*. Available from: <https://diyIoT.com/reduce-the-esp32-power-consumption/>.
 66. Ayele, E.D., *Performance analysis of LoRa radio for an indoor IoT applications*. 2017.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รูปภาพและรายชื่ออุปกรณ์พร้อมราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย

FireBeetle ESP32 ราคา 320 บาท	
ESP32-WROOM-32 ราคา 189 บาท	
Heltec LoRa 32 ราคา 875 บาท	
RFM95 (LoRa Module) ราคา 170 บาท	
DHT22 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ ราคา 108 บาท	
DS18B20 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน ราคา 36 บาท	
Capacitive Soil Moisture Sensor เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ราคา 36 บาท	

<p>LDR Photoresistor Sensor Module ราคา 30 บาท</p>	
<p>3.3V Relay module ทั้งนี้สามารถใช้งาน 5V Relay module ก็ได้เช่นกัน ราคา 35 – 140 บาท</p>	
<p>Green-01 Misting pump ปั๊มหมอกใช้เพื่อพ่นหมอกโอโซนในระบบ ราคา 450 บาท</p>	
<p>Sonic AP2500 Water pump ปั๊มน้ำที่ใช้รดน้ำในระบบ ราคา 269 บาท</p>	

ภาคผนวก ข รูปอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทดลอง

Sensor End Device



Actuator End Device



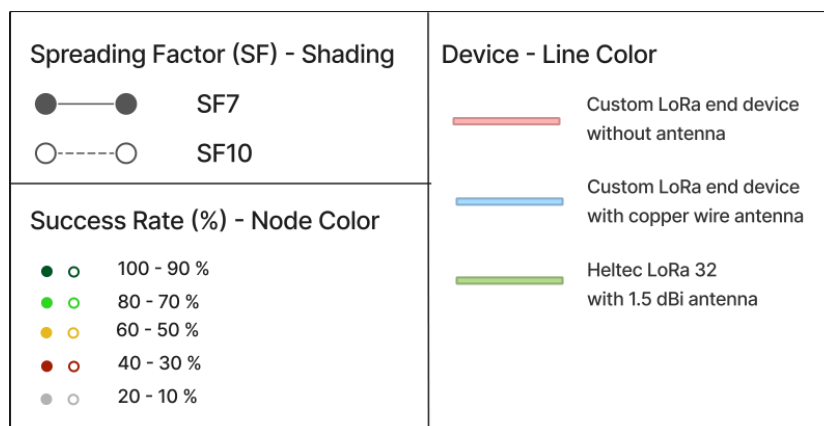
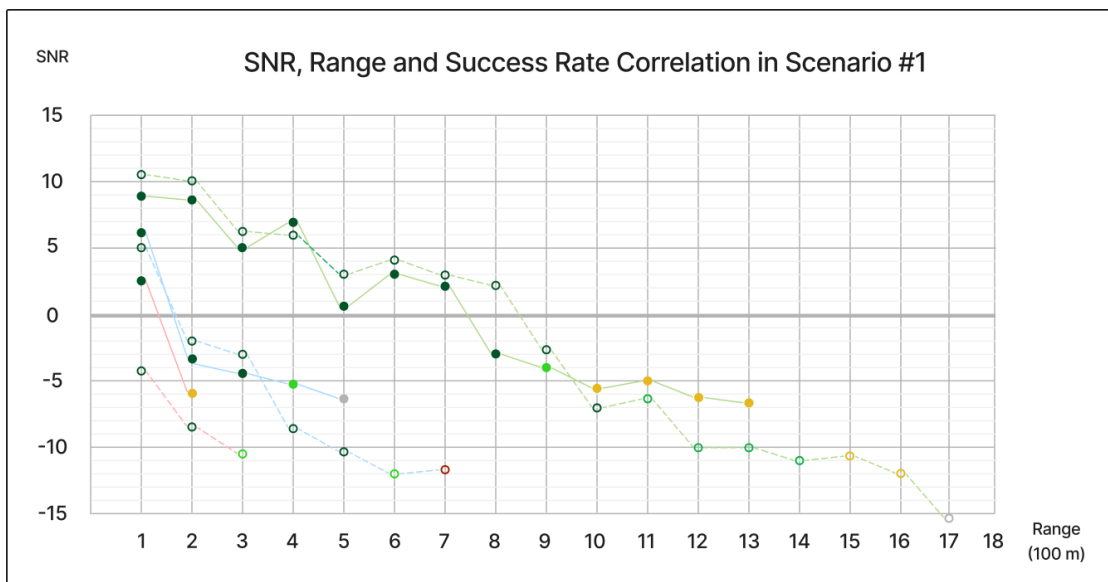
ภาคผนวก ค ข้อมูลจริงที่ได้รับจาก Sensor End Device ในการทดสอบการวัดค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ตั้งแต่เวลา 09:00 – 24:00

time	COUNT	SOIL_ TEMPERATU RE	SOIL_ HUMIDITY	AIR_ TEMPERATU RE	AIR_ HUMIDITY	LIGHT	MIST_ PUMP_ ACTIVATION	WATER_ PUMP_ ACTIVATION	RAINING_ STATE
9:04	1	24.75	52	30.4	45.5	133	0	0	0
9:34	2	25.25	51	30.6	45.6	112	0	0	0
10:04	3	25.43	49	31.9	42.3	89	0	0	0
10:06	4	25.43	49	31.9	41.6	80	0	1	0
10:08	5	25.75	62	32.2	40.3	87	0	1	0
10:11	6	25.81	58	32.09	41.6	91	1	0	0
10:13	7	25.87	55	31.7	45.3	78	1	0	0
10:43	8	25.93	50	29.5	46	71	0	0	0
11:13	9	26.5	49	28.3	48.5	79	0	0	0
11:15	10	26.81	53	28.8	49.2	108	0	1	0
11:45	11	26.93	66	29.4	45.8	83	0	0	0
12:15	12	27.12	64	34.2	36.2	77	0	0	0
12:17	13	27.12	64	34.3	37.2	80	1	0	0
12:19	14	27.18	64	34.5	37.7	85	1	0	0
12:21	15	27.18	64	32.5	41.8	91	1	0	0
12:23	16	27.18	64	31	46.7	86	1	0	0
12:53	17	27.62	63	29.7	49.3	99	0	0	0
13:23	18	27.68	62	31.4	44.5	109	0	0	0
13:53	19	27.87	61	32.8	40.5	127	0	0	0
13:56	20	27.87	61	34.7	35.8	122	1	0	0
13:58	21	27.87	61	34.59	36	125	1	0	0
14:00	22	27.87	61	34.7	36.9	126	1	0	0
14:02	23	27.87	61	34.59	36.8	127	1	0	0
14:04	24	27.87	61	34.7	37.09	130	1	0	0
14:06	25	27.87	61	34.5	37.3	123	1	0	0
14:08	26	27.87	61	32.2	43.1	125	1	0	0
14:10	27	27.87	61	30.5	48.8	130	1	0	0
14:40	28	28	61	29.4	46.7	137	0	0	0
15:10	29	28.18	60	29.5	48.7	144	0	0	0
15:40	30	28	60	33.9	39.59	173	0	0	0
15:43	31	27.93	60	33.9	38	174	1	0	0
15:45	32	27.93	60	33.8	36.8	181	1	0	0
15:47	33	27.87	60	32.3	42.3	187	1	0	0
15:49	34	27.87	60	30.6	45.6	182	1	0	0
16:19	35	27.87	60	29.3	51.4	275	0	0	0
16:49	36	27.93	60	31	48.3	380	0	0	0
17:19	37	27.81	59	32.8	44.4	501	0	0	0
17:21	38	27.81	59	32.4	43.7	519	1	0	0
17:23	39	27.81	59	30.7	50.2	528	1	0	0
17:54	40	27.68	59	28.9	52.7	816	0	0	0
18:23	41	27.56	59	27.6	57.1	2288	0	0	0
18:53	42	27.56	59	28.7	57.3	4095	0	0	0
19:23	43	27.5	59	29.2	57.6	4095	0	0	0
19:53	44	27.5	59	30.3	53.9	4095	0	0	0
20:23	45	27.31	59	30.2	54	4095	0	0	0
20:53	46	27.25	59	30	53.7	4095	0	0	0
21:23	47	27.12	59	29.7	53.9	4095	0	0	0
21:53	48	27.06	58	29.4	55.1	4095	0	0	0
22:23	49	27	58	29.2	58.5	4095	0	0	0
22:53	50	26.93	58	28.9	58.9	4095	0	0	0
23:23	51	26.87	59	28.8	60.8	4095	0	0	0
23:53	52	26.75	58	28.5	62.1	4095	0	0	0

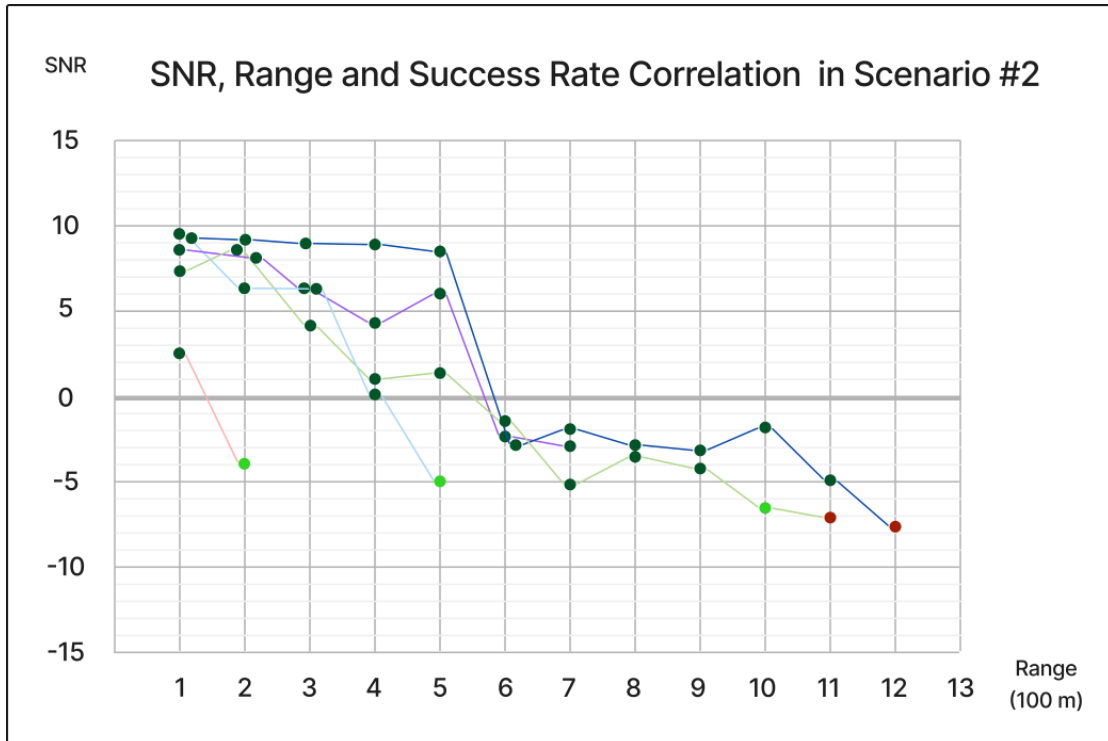
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณ

ในการทดสอบคุณภาพของการส่งสัญญาณทั้งสิ้น 3 ครั้ง จากภาพกราฟการทดลอง กราฟที่ได้จะเป็นการรวมข้อมูลความสัมพันธ์ของ SNR และระยะทางระหว่าง End Device และ Gateway เป็นแกน X และ Y ส่วนอัตราความสำเร็จในการส่งสัญญาณ (Success Rate) จะถูกแทนด้วยสีของแต่ละปม โดยในกราฟจะเป็นการเปรียบเทียบการส่งสัญญาณกันจากแต่ละอุปกรณ์ โดยแต่ละอุปกรณ์จะใช้แทนเป็นสีของเส้นที่แตกต่างกัน และสุดท้าย SF7 และ SF10 จะแตกต่างกันด้วยความถี่ของปมและประเภทของเส้น ดังที่ได้อธิบายในภาพกราฟ

ในการทดสอบครั้งแรกในช่วงถนนพุทธมณฑลสาย 3 จะเป็นการทดสอบโดยใช้งานอุปกรณ์ทั้งหมด 3 แบบ คือ บอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง และ บอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi ทดสอบด้วย SF 7 และ SF10 ได้ผลดังนี้

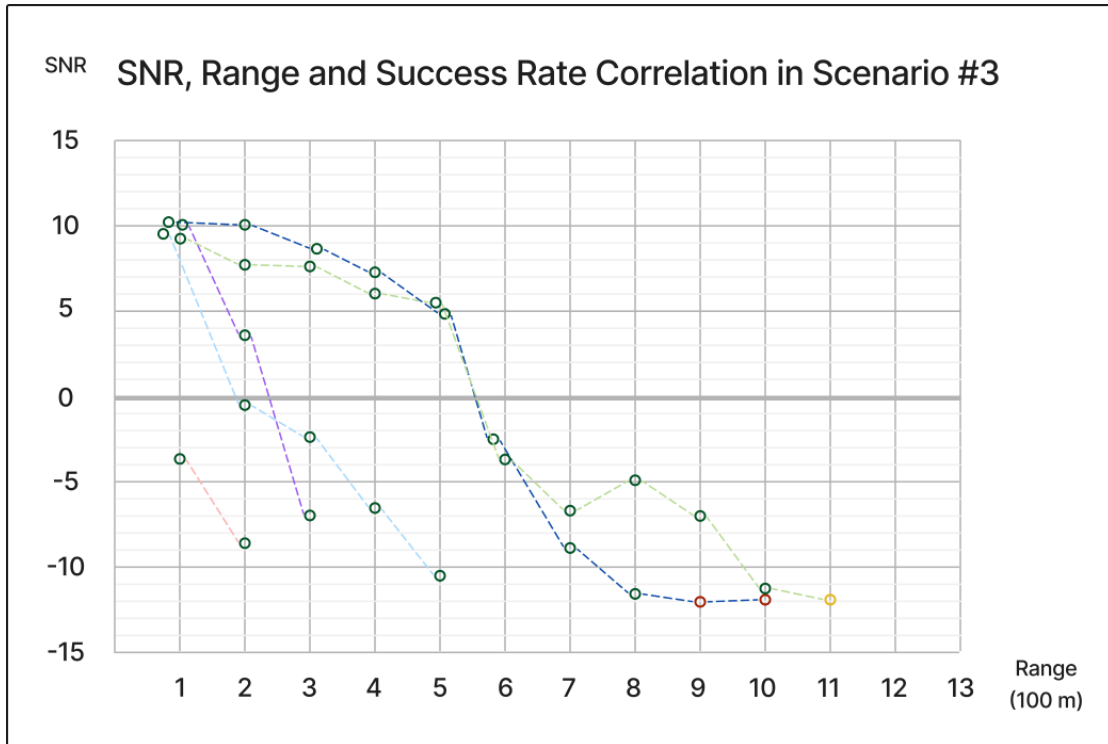


ในการทดสอบครั้งที่สองในช่วงถนนภายในสำนักงานพุทธมณฑล จะเป็นการทดสอบโดยการใช้ End Device ทั้งหมด 5 แบบ คือ บอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi และบอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi ทดสอบด้วย SF 7 ได้ผลดังนี้



<p>Spreading Factor (SF) - Shading</p> <p>● — ● SF7</p>	<p>Device - Line Color</p> <p>— Custom LoRa end device without antenna</p> <p>— Custom LoRa end device with copper wire antenna</p> <p>— Custom LoRa end device with 1.5 dBi antenna</p> <p>— Custom LoRa end device with 5 dBi antenna</p> <p>— Heltec LoRa 32 with 1.5 dBi antenna</p>
<p>Success Rate (%) - Node Color</p> <p>● ○ 100 - 90 %</p> <p>● ○ 80 - 70 %</p> <p>● ○ 60 - 50 %</p> <p>● ○ 40 - 30 %</p> <p>● ○ 20 - 10 %</p>	

ในการทดสอบครั้งที่สามในช่วงถนนภายในสำนักงานพุทธมณฑล จะเป็นการทดสอบโดยการใช้ End Device ทั้งหมด 5 แบบ คือ บอร์ดประกอบเองที่ไม่มีเสาอากาศ บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศทองแดง บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi บอร์ดประกอบเองที่มีเสาอากาศ Gain 5 dBi และบอร์ด Heltec LoRa 32 มีเสาอากาศ Gain 1.5 dBi ทดสอบด้วย SF 10 ได้ผลดังนี้



<p>Spreading Factor (SF) - Shading</p> <p>○-----○ SF10</p>	<p>Device - Line Color</p> <p>———— Custom LoRa end device without antenna</p> <p>———— Custom LoRa end device with copper wire antenna</p> <p>———— Custom LoRa end device with 1.5 dBi antenna</p> <p>———— Custom LoRa end device with 5 dBi antenna</p> <p>———— Heltec LoRa 32 with 1.5 dBi antenna</p>
<p>Success Rate (%) - Node Color</p> <p>● ○ 100 - 90 %</p> <p>● ○ 80 - 70 %</p> <p>● ○ 60 - 50 %</p> <p>● ○ 40 - 30 %</p> <p>● ○ 20 - 10 %</p>	

ภาคผนวก จ ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลที่รับที่ TTS Network Server จากการทดสอบการส่งสัญญาณ

```

{
  "name": "as.up.data.forward",
  "time": "2021-12-02T08:01:27.417378190Z",
  "identifiers": [
    {
      "device_ids": {
        "device_id": "eui-70b3d57ed00439b6",
        "application_ids": {
          "application_id": "01-endnode"
        }
      }
    },
    {
      "device_ids": {
        "device_id": "eui-70b3d57ed00439b6",
        "application_ids": {
          "application_id": "01-endnode"
        },
        "dev_eui": "70B3D57ED00439B6",
        "join_eui": "0000000000000000",
        "dev_addr": "260DE377"
      }
    }
  ],
  "data": {
    "@type": "type.googleapis.com/ttn.lorawan.v3.ApplicationUp",
    "end_device_ids": {
      "device_id": "eui-70b3d57ed00439b6",
      "application_ids": {
        "application_id": "01-endnode"
      },
      "dev_eui": "70B3D57ED00439B6",
      "join_eui": "0000000000000000",
      "dev_addr": "260DE377"
    },
    "correlation_ids": [
      "as:up:01FNX2K7BMMBRV8XEJ1KJ6XBXX",
      "gs:conn:01FNX069GB9SV0VPBX29QQ3ARC",
      "gs:up:host:01FNX069RT8T7X28J9ZBH91Y5V",
      "time": "2021-12-02T08:01:27.012754917Z",
      "received_at": "2021-12-02T08:01:27.412910760Z",
      "uplink_message": {
        "session_key_id": "AX16J8Fjala5PSRAZGuZgQ==",
        "f_port": 1,
        "f_cnt": 3,
        "frm_payload": "Aw==",
        "rx_metadata": [
          {
            "gateway_ids": {
              "gateway_id": "jjopittaya-ttig",
              "eui": "58A0CBFFFE8038BA"
            },
            "time": "2021-12-02T08:01:27.012754917Z",
            "timestamp": 2518962724,
            "rssi": -101,
            "channel_rssi": -101,
            "snr": 9.5,
            "uplink_token": "Ch0KGwoPampvcGI0dGF5S10dGlnEghYoMv//oA4uhCkpJGxCRoLCNf6oY0GEK7eymAgolmD76dJKgs1/qhjQYQ5b+KBg=="
          }
        ],
        "settings": {
          "data_rate": {
            "lora": {
              "bandwidth": 125000,
              "spreading_factor": 8
            }
          },
          "coding_rate": "4/5",
          "frequency": "923200000",
          "timestamp": 2518962724,
          "time": "2021-12-02T08:01:27.012754917Z",
          "received_at": "2021-12-02T08:01:27.205378505Z",
          "consumed_airtime": "0.082432s",
          "network_ids": {
            "net_id": "000013",
            "tenant_id": "ttn",
            "cluster_id": "ttn-au1"
          }
        },
        "correlation_ids": [
          "as:up:01FNX2K7BMMBRV8XEJ1KJ6XBXX",
          "gs:conn:01FNX069GB9SV0VPBX29QQ3ARC",
          "gs:up:host:01FNX069RT8T7X28J9ZBH91Y5V",
          "gs:uplink:01FNX2K7523TF0TQ5R581GMZ4J",
          "ns:uplink:01FNX2K7554CKDBVJKS0KACQWF",
          "rpc:/ttn.lorawan.v3.GsNs/HandleUplink:01FNX2K755QBAE8EJ1P9YQRND",
          "rpc:/ttn.lorawan.v3.NsAs/HandleUplink:01FNX2K7BMPc25B9F8DK1N2W6B"
        ],
        "origin": "ip-10-102-4-87.ap-southeast-2.compute.internal",
        "context": {
          "tenant-id": "CgN0dG4="
        },
        "visibility": {
          "rights": [
            "RIGHT_APPLICATION_TRAFFIC_READ",
            "RIGHT_APPLICATION_TRAFFIC_READ"
          ]
        },
        "unique_id": "01FNX2K7B55P0JNQMRO0MMACM"
      }
    }
  }
}

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิทย ศุภนิรัติศัย
วัน เดือน ปี เกิด	4 กรกฎาคม 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	1091 หมู่บ้านเพชรเกษม 3 ถนนเพชรเกษม 94 แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160
ผลงานตีพิมพ์	-
รางวัลที่ได้รับ	-