



## รายงาน

ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง

### สมาชิก

นางสาวพลอยน้ำทอง	ไชยโยธา	รหัส 67050369
นายรติภัทร	บัวแก้ว	รหัส 67050465

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา ELECTRONICS CIRCUITS (05366023)

และ MICROCONTROLLER AND INTERFACING (05366036)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พุทธศักราช 2568

## บทคัดย่อ

หัวข้อโครงการ

ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของ

คลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง

Prototype system for measuring and heatmapping of  
high-frequency radio waves

ชื่อนักศึกษา

นางสาวพลอยน้ำทอง ไชโยธธา รหัสนักศึกษา 67050369

นายรติภัทร

บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 67050465

ภาควิชา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์อุตสาหกรรมและวิศวกรรมระบบไอโอทีและสารสนเทศ

(สองปริญญา)

คณะ

วิทยาศาสตร์

ปีการศึกษา

2568

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์.ดร. สาหร่าย เล็กชะอุ่ม คณะวิทยาศาสตร์

รองศาสตราจารย์.ดร.บุญยชนะ ภูระหงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

## คำนำ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเสนอเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ “ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง” ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์.ดร.สาทราย เล็กชะอุ่ม คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิดตลอดกระบวนการ รวมทั้ง รองศาสตราจารย์.ดร.บุญยชนะ ภูระหงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะอันมีคุณค่าในการปรับปรุงงานให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบไอโอทีและสารสนเทศ และห้องปฏิบัติการ IERL ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ และทรัพยากรสำหรับการพัฒนา นอกจากนี้ ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมทีมและผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ นายธนวรรณ อรุณทัยพัฒน์, นายธีรภัทร ราชปึก, นายอังศุवाल สมิตชาติ, นายธนทร ภิญโญเมธากุล, นายณัฐวิทย์ โนวังหาร ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนจบกระบวนการ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจด้านการตรวจวัดสัญญาณวิทยุและการทำแผนที่เชิงพื้นที่ ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบติดตามและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมด้านคลื่นวิทยุในอนาคต

ผู้จัดทำ

นางสาวพลอยน้ำทอง ไชโยธา

นายรติภัทร บัวแก้ว

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
คำนำ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
แผนที่ความร้อน (Heatmap)	4
สเปกตรัมอานาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer)	4
ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz	5
แถบกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF)	6
บทที่ 3 แผนการดำเนินการ	7
เตรียมวัสดุและอุปกรณ์	8
การประกอบต้นแบบ	8
ทดสอบและประมวลผลข้อมูล	9
การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)	10
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	12
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	14
บรรณานุกรม	15

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารไร้สายได้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของชีวิตประจำวัน ตั้งแต่อินเทอร์เน็ตภายในบ้าน เครือข่ายในสถานศึกษา/สำนักงาน ไปจนถึงระบบ IoT ขนาดใหญ่ การเติบโตดังกล่าวทำให้สภาพแวดล้อมด้าน คลื่นวิทยุ มีความซับซ้อนขึ้น ทั้งในแง่ความหนาแน่นของผู้ใช้งาน การทับซ้อนของช่องความถี่ และสภาพพื้นที่ที่ทำให้เกิดการสะท้อน หรือหักเห การมองเห็นการกระจายตัวของความแรงสัญญาณเชิงพื้นที่อย่างเป็นระบบจึงมีความ จำเป็นต่อการวางแผนเครือข่าย การแก้ปัญหาจุดอ่อนสัญญาณ การจัดวางอุปกรณ์กระจายสัญญาณให้มี ประสิทธิภาพ และการประเมินคุณภาพบริการในโลกจริง

ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz ถูกใช้อย่างแพร่หลายโดยเทคโนโลยีเช่น Wi-Fi และ Bluetooth ข้อดีคือใช้ งานได้ทั่วโลกและอุปกรณ์มีราคาถูก อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของผู้ใช้และจำนวนอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่ เดียวกันทำให้เกิดการแข่งขันแบนด์วิดท์และสัญญาณรบกวนสูง การทำ “แผนที่ความร้อน (heat map)” ของ ความแรงสัญญาณในย่านนี้จึงเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับทั้งวิศวกรและผู้ใช้ทั่วไป เพราะช่วยสรุปสภาพ RF ให้ เข้าใจได้ในทันที เห็นตำแหน่งฮอตสปอต จุดอ่อน แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และช่วยวิเคราะห์ผลกระทบ การเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์

แม้จะมีเครื่องมือวัดระดับมืออาชีพรุ่นสูง เช่น สเปกตรัมอานาไลเซอร์ แต่เครื่องมือเหล่านี้มักมีต้นทุนสูง ใช้งาน และไม่เหมาะสำหรับงานเก็บข้อมูลเชิงเดินสำรวจ (walk-through) หรือการสาธิตเชิงการเรียนรู้ ระบบราคา ย่อมเยาที่อาศัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวตรวจจับกำลังแบบลอการิทึมซึ่งอ่านค่าเป็นสเกล dB ได้โดยตรง จึง เป็นแนวทางที่น่าดึงดูดในการสร้างต้นแบบสำหรับงานภาคสนามจริง งานวิจัย/สิ่งประดิษฐ์นี้จึงมุ่งพัฒนา “ระบบ ต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง” โดยสนใจสัญญาณที่ย่าน 2.4 GHz และเน้นความ พกพา ใช้งานง่าย ราคาเข้าถึงได้ ขณะเดียวกันยังรักษาความถูกต้องในระดับที่เหมาะสมต่อ การใช้งานวิเคราะห์เชิงพื้นที่

## วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาระบบต้นแบบที่ วัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสีของความแรงสัญญาณ 2.4 GHz ได้จริงในภาคสนาม แบบพกพา ต้นทุนย่อมเยา และใช้งานง่ายเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ รูปแบบการกระจายตัวของสัญญาณไร้สาย ในพื้นที่จริง อันเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนเครือข่ายและระบบ IoT
2. เพื่อลดต้นทุนในการตรวจสอบและประเมินคุณภาพของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการสร้างอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าการใช้เครื่องมือมาตรฐาน เช่น Spectrum Analyzer
3. เพื่อเป็นแนวทางในการ ต่อยอดการใช้งาน สู่ด้านการวางแผนโครงข่ายไร้สายในโรงงาน (Smart Factory), เมืองอัจฉริยะ (Smart City), และระบบ IoT อื่น ๆ ในอนาคต

## ขอบเขตของงานวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มของสัญญาณของย่านความถี่ที่สนใจ โดยมีองค์ประกอบดังนี้

- 1) ย่านความถี่ที่ศึกษา: โฟกัสย่าน 2.4 GHz ด้วยแถบกรองความถี่ (BPF) เฉพาะย่าน
- 2) ปริมาณที่วัด: วัดกำลังรวมของสัญญาณ ด้วยตัวตรวจจับลอการิทึม AD8317
- 3) แพลตฟอร์มต้นแบบ: ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ADC อ่านค่า  $V_{out}$  ของ AD8317 เก็บข้อมูล

ความเข้มของสัญญาณ และ ใช้ GPS Module เก็บค่าลองจิจูดและละติจูด ณ ตำแหน่งที่วัดค่า

- 4) การนำเสนอผล: แผนที่ความร้อน (heat map), ค่ากำลังของสัญญาณบนหน้าจอต้นแบบ

2. ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลา 2 เดือน ตั้งแต่เดือนกันยายน - ตุลาคม 2568

3. ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และอาคารเรียนรวม 12 ชั้น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบต้นแบบสำรวจความเข้มสัญญาณแบบพกพาและราคาย่อมเยา
2. ได้ข้อมูลหันทจุดอัป-จุดแรง แนวทางสัญญาณและผลของสิ่งกีดขวางได้ทันที ช่วยตัดสินใจเชิงพื้นที่ได้แม่นยำขึ้น
3. ได้ข้อมูลอ้างอิงสำหรับแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณ สนับสนุนการวางแผนและปรับปรุงเครือข่ายไร้สาย
4. ได้แผนที่การกระจายตัวของความเข้มสัญญาณ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการ ออกแบบและติดตั้งระบบ ให้

ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย

## บทที่ 2

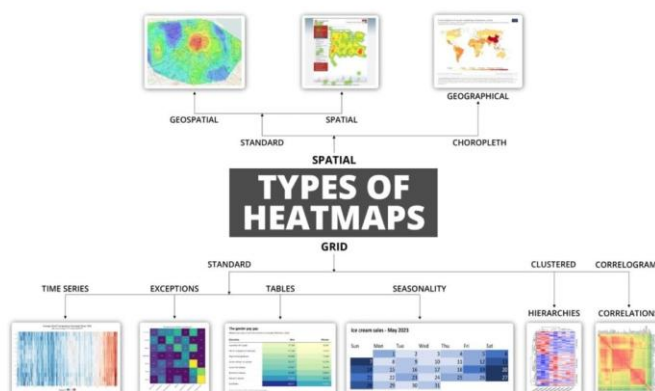
### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

##### 1. แผนที่ความร้อน (Heatmap)

เป็นเทคนิคการนำเสนอภาพข้อมูลแบบสองมิติที่ใช้สีเพื่อแสดงขนาดหรือค่าของแต่ละจุดข้อมูลในชุดข้อมูลนั้น ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงของสีสามารถเกิดขึ้นได้จากสีเส้นหรือความเข้มของสีเพื่อให้สามารถสังเกตได้ว่าปรากฏการณ์นั้นมีการกระจายหรือรวมตัวกันอย่างไรในพื้นที่นั้น ๆ

ในการประยุกต์ใช้ในงานบางอย่าง เช่น การวิเคราะห์อาชญากรรม หรือการติดตามการคลิกบนเว็บไซต์ สีไม่ได้ใช้เพื่อแสดงถึงค่าของแต่ละจุดข้อมูลโดยตรง แต่ใช้เพื่อแสดงถึงความหนาแน่นของจุดข้อมูลแทน



ภาพที่ แสดงประเภทของแผนที่ความร้อน

##### 2. สเปกตรัมอนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer)

เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถแสดงผลการกระจายพลังงานของสัญญาณตามความถี่ ใช้ในการวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณความถี่ โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูงมากๆ เช่น คลื่นวิทยุ (RF) ที่ใช้ในการสื่อสารไร้สาย หรือระบบเรดาร์ต่างๆ เครื่องควบคุมอุณหภูมิความชื้น SCMA ใช้สเปกตรัมอนาไลเซอร์ในการทดสอบคุณภาพของเซนเซอร์และระบบควบคุมที่ต้องอาศัยการรับส่งสัญญาณความถี่ เพื่อให้แน่ใจว่าทำงานได้ตามมาตรฐาน



สเปกตรัมอานาไลเซอร์ทำงานโดยการรับสัญญาณเข้ามา แล้วใช้การกวาดความถี่ (Frequency Sweep) ผ่านตัวกรองความถี่แบนด์วิดท์แคบๆ เพื่อแยกวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ จากนั้นจะแสดงผลเป็นกราฟ 2 มิติ โดยแกน X แทนความถี่ และแกน Y แทนแอมพลิจูดหรือระดับของสัญญาณ ทำให้เห็นการกระจายตัวของสัญญาณในแต่ละย่านความถี่ได้ชัดเจน นอกจากนี้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิความชื้นของ SCMA ยังมีระบบประมวลผลและเปรียบเทียบสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบ ความผิดปกติ และสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ



ภาพที่ เครื่องสเปกตรัมอานาไลเซอร์

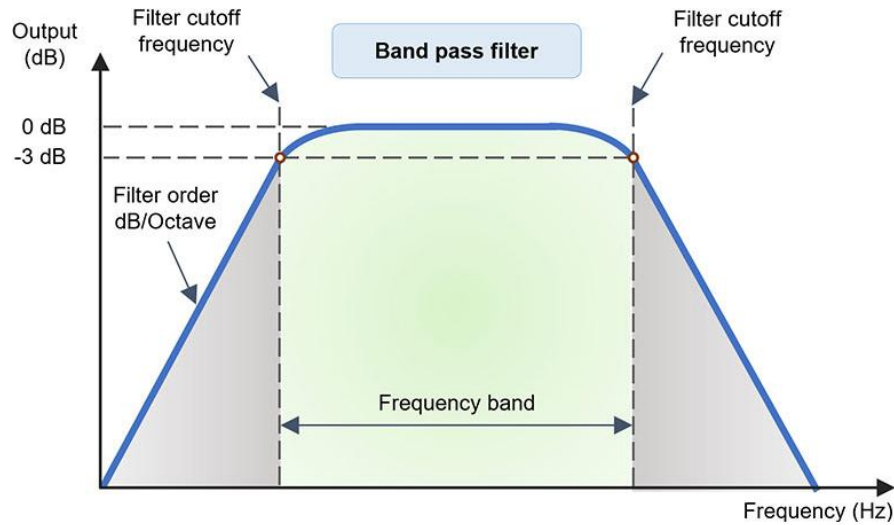
### 3. ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz

ย่าน 2.4 GHz เป็นส่วนหนึ่งของ ISM band ที่เปิดให้ใช้งานแบบไม่ต้องขอใบอนุญาตในหลายประเทศ จึงถูกใช้แพร่หลายโดย Wi-Fi, Bluetooth และ Zigbee; Wi-Fi ในย่านนี้ใช้ช่องความถี่ 20 MHz (นิยมชุดช่องไม่ทับซ้อน 1/6/11), Bluetooth ทำงานที่ 2.402–2.480 GHz โดยแบ่งช่องย่อย (Classic 79 ช่องกว้าง 1 MHz; BLE 40 ช่องกว้าง 2 MHz), ส่วน Zigbee/IEEE 802.15.4 ใช้ช่อง 11–26 (คั่นกัน 5 MHz, กว้าง ~2 MHz) เพื่อเครือข่ายเซ็นเซอร์พลังงานต่ำ ซึ่งทั้งหมดต้องอยู่ร่วมกันในย่านเดียวจึงต้องออกแบบการใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและการรบกวนรอบข้าง; ด้านกฎระเบียบ สหรัฐฯ (FCC §15.247) อนุญาตกำลังส่งเชิงสายสูงสุด 1 W (30 dBm) และ EIRP ได้ราว 4 W ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ขณะที่ ยุโรป (ETSI EN 300 328) จำกัด EIRP 20 dBm (100 mW) และด้านความปลอดภัยโดยรวมอ้างอิงแนวทาง ICNIRP 2020 สำหรับช่วง 100 kHz–300 GHz.

#### 4. แลบบกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF)

แลบบกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF) คือวงจร/อุปกรณ์ที่ “ยอมให้ผ่านเฉพาะความถี่ในย่านหนึ่ง” (passband) และ กดทั้ง ความถี่ต่ำ/สูงกว่าย่านนั้น (stopband) ใช้กันมากในงาน RF เพื่อคัดแยกย่านเป้าหมาย เช่น 2.4 GHz สำหรับ Wi-Fi/Bluetooth/Zigbee ให้หลุดจากสัญญาณนอกย่านก่อนเข้าวัดหรือรับสัญญาณ ตัวกรองถูกนิยามด้วย ความถี่กึ่งกลาง  $f_0$ , แบนด์วิธ  $BW = f_H - f_L$  และ คิวแฟกเตอร์

$Q = f_0/BW$  (ยิ่ง Q สูง ย่านยิ่งแคบและเลือกย่านได้คม) โดยในงาน 2.4 GHz นิยมใช้ SAW/BAW BPF ซึ่งมักมี insertion loss ในย่านผ่านระดับ ~1–2 dB และแบนด์วิธราว 80–90 MHz รอบ 2.45 GHz เหมาะกับมาตรฐานทั่วไปในย่านนี้.



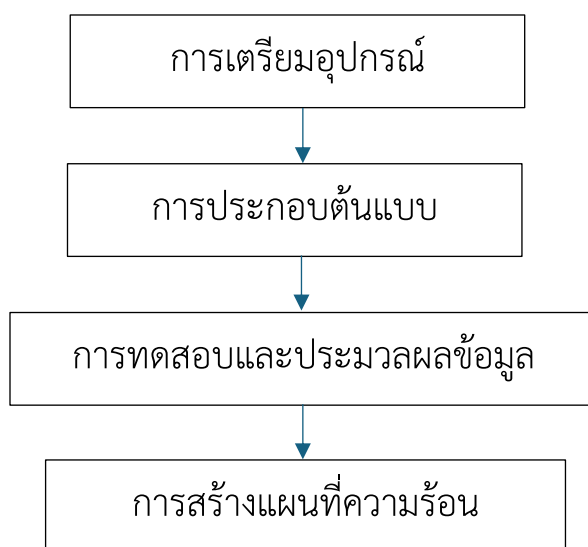
ภาพที่ กราฟการตอบสนองเชิงความถี่ของแลบบกรองความถี่แบบผ่านย่าน (Band-Pass Filter; BPF)

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานของโครงการระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสีของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง ได้แบ่งการดำเนินโครงการออกเป็น 4 ขั้นตอนเพื่อง่ายต่อการศึกษาและสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

1. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์
2. การประกอบต้นแบบ
3. การทดสอบและประมวลผลข้อมูล
4. การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)



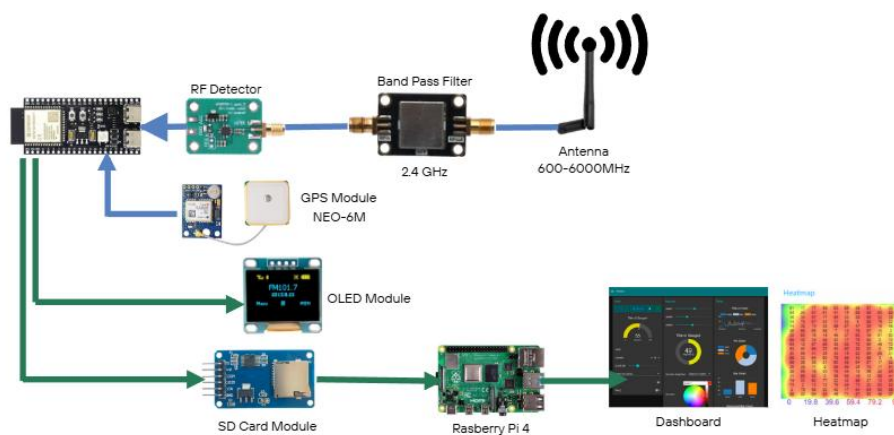
ภาพที่ 1 แผนภาพวิธีการดำเนินงาน

## 1. เตรียมวัสดุและอุปกรณ์

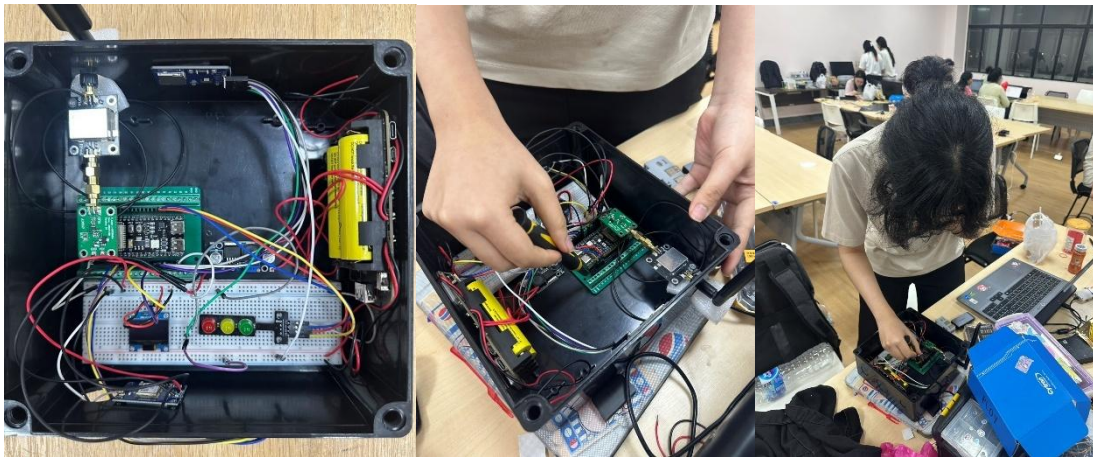
รายการวัสดุ	รายละเอียดของวัสดุ	หน้าที่
Microcontroller	Expressif ESP32-S3-DevKitC-1 WROOM-1-N16R8	ไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก อ่านค่า ADC จาก AD8317, คำนวณ dBm, ควบคุมจอ OLED และ GPS
	Raspberry Pi 4 model B 4 GB	คอมพิวเตอร์ขอบเครือข่ายสำหรับเก็บ-ประมวลผล-แสดงผลขั้นสูง
RF-Detector	AD8317	ตรวจวัดกำลังสัญญาณ RF แล้วแปลงเป็นแรงดัน DC
BPF Module	Saw BPF Module 2.4GHz	กรองสัญญาณเฉพาะย่าน 2.4 GHz เพื่อตัดสัญญาณนอกย่าน
GPS Module	Neo-6M	ให้พิกัดตำแหน่ง เป็นค่าละติจูดและลองจิจูด
Antenna	MX1847 600-6000MHz 8dBi	เสาส่ง-รับสัญญาณ RF มีเกนช่วยเพิ่มความไวทิศทาง
OLED Module	0.96 inch SSD1315 Driver OLED LCD LED Display Module	แสดงสถานะระบบและค่าที่วัด

ตารางที่ 1 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน

## 2. การประกอบต้นแบบ



ภาพที่ 2 ภาพรวมรูปแบบการประกอบต้นแบบ



ภาพที่ 3 ภาพต้นแบบเมื่อประกอบชิ้นส่วนเสร็จสิ้น

### 3. ทดสอบและประมวลผลข้อมูล

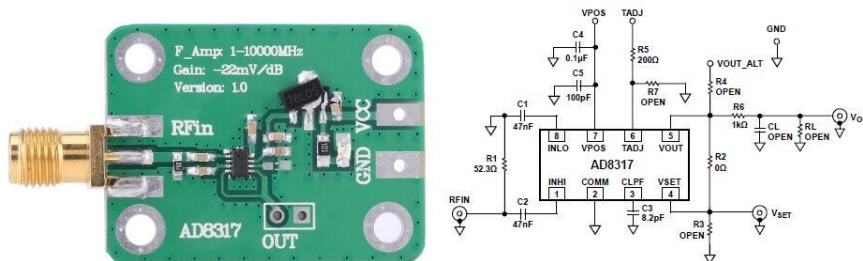
นำข้อมูลที่บันทึกได้มาทำการวิเคราะห์อย่างอัตโนมัติ โดยจากโมดูล AD8317 เป็นโมดูลวงจรวัดกำลัง ของ สัญญาณความถี่วิทยุ (RF) แล้วให้อาต์พุตเป็นแรงดัน ที่แปรผันเชิงเส้นกับสเกล dB เมื่ออ่านที่ ADC จะทำให้ได้ค่า เป็น analog 0-4095 จึงต้องนำไปเข้าสู่ตร ด้านล่าง โดย Vref มีค่าเท่ากับ 3.3 V

$$V_{out} = \frac{ADC\_raw}{4095} \times V_{REF}$$

จะทำให้ได้ค่า Vout เพื่อนำไปแปลงเป็นกำลัง โดยใช้สูตร

$$P_{in(dBm)} = \frac{V_{out} - V_{int}}{slope}$$

ซึ่งจาก datasheet ของโมดูล AD8317 ได้กำหนดค่า slope = -0.022 V และ Vint = 0.014 V



ภาพที่ 4 ภาพโมดูลประกอบ AD8317 และวงจรชิป AD8317





ภาพที่ 5 การทดสอบและประมวลผลข้อมูล

#### 4. การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)

พัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้ Flask Framework ร่วมกับ JavaScript และไลบรารี Leaflet.js และ Heatmap.js โดยการเขียนภาษา Python บน Raspberry Pi 4 เพื่อแสดงแผนที่การกระจายตัวของค่าความเข้มของสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz แบบอินเทอร์แอคทีฟ ผู้ใช้สามารถดูข้อมูลและเลือกพื้นที่แสดงผลได้



ภาพที่ 6 แสดงแผนที่ความร้อนที่ผ่านการเก็บข้อมูล

Map

Table

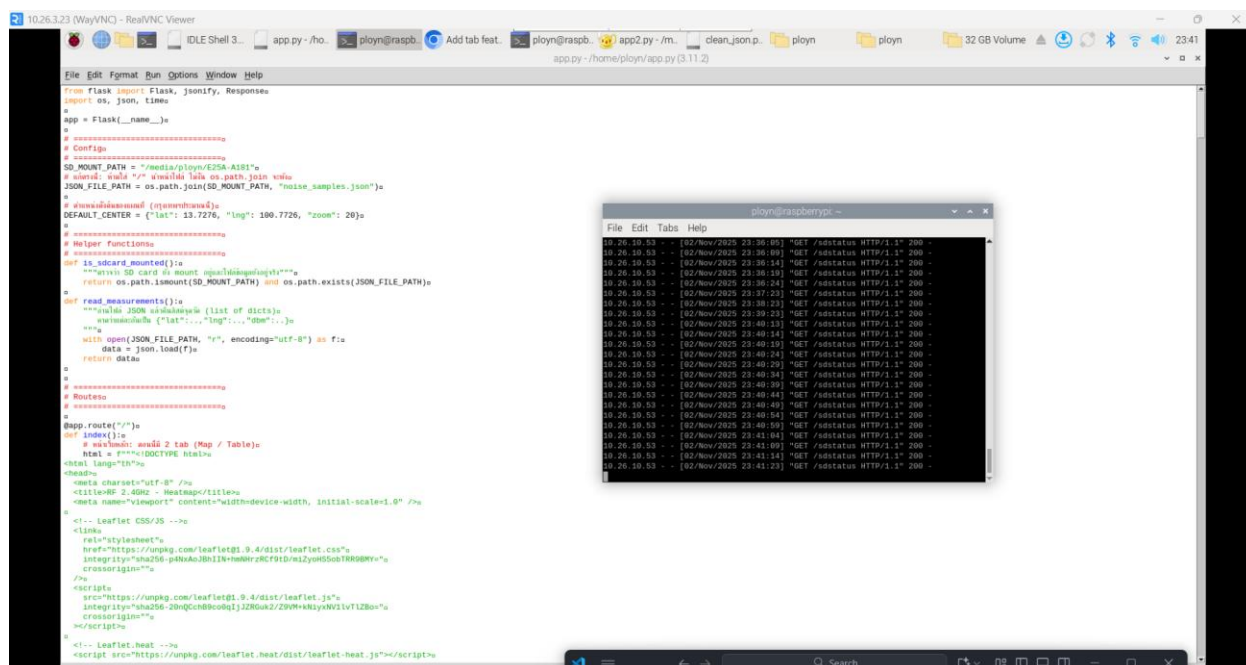
Reload Data

ข้อมูลดิบจากสถานี (Raw Samples)

Rows: 8 | Updated: 21:35:08

#	lat	lng	dsm
0	13.727048	100.772289	-50.3
1	13.727065	100.772244	-48.9
2	13.726978	100.772283	-49.5
3	13.727029	100.772353	-48.8
4	13.726987	100.772289	-51.9
5	13.726714	100.772153	-51.3
6	13.726902	100.772153	-48.5
7	13.726902	100.772153	-48.5

ภาพที่ 7 ข้อมูลที่เก็บได้ที่ถูกแสดงผลในเว็บแอปพลิเคชัน

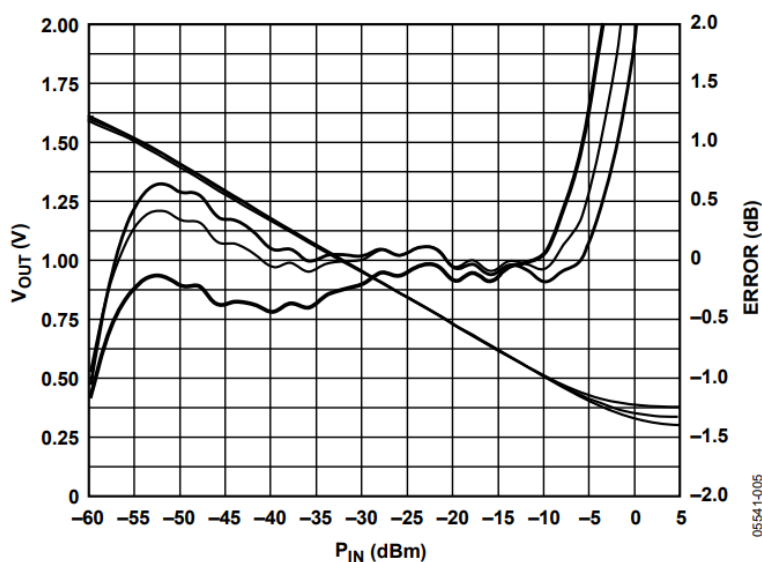


ภาพที่ 8 การทำงานของโปรแกรม โดยรันผ่าน Terminal ของ Raspberry Pi 4

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองพบว่า ค่าที่วัดได้สอดคล้องกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 4 ระหว่างกำลังสัญญาณขาเข้า  $P_{IN}$  (dBm) กับแรงดันเอาต์พุต  $V_{OUT}$  ของ AD8317 (V) ที่ทดสอบราว 2.2 GHz โดยรวมเส้นโค้งหลักจะเอียงลงอย่างเกือบเป็นเส้นตรงในสเกล dB: เมื่อกำลังเพิ่มขึ้นทีละ 1 dB ค่า  $V_{OUT}$  จะเปลี่ยนประมาณ 22 mV ตามคุณสมบัติ “linear-in-dB” ของชิปตรวจจับกำลังแบบลอการิทึม ทำให้เราสามารถอ่านแรงดันแล้วแปลงเป็น dBm ได้ด้วยสมการเส้นตรง ช่วงที่เส้นโค้งคงรูปและไล่ระดับอย่างสม่ำเสมอคือช่วงใช้งานที่เหมาะสมที่สุด

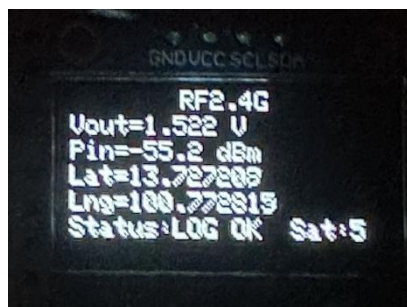


ภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณขาเข้า  $P_{IN}$  (หน่วย dBm บนแกนแนวนอน) กับแรงดันเอาต์พุต  $V_{OUT}$  ของ AD8317 (หน่วยโวลต์บนแกนแนวตั้งซ้าย) ที่ทดสอบราว 2.2 GHz

```

23:48:16.922 -> Vout=1.504 V -> Pin= -54.38 dBm
23:48:17.245 -> Vout=1.504 V -> Pin= -54.37 dBm
23:48:17.555 -> Vout=1.530 V -> Pin= -55.54 dBm
23:48:17.863 -> Vout=1.530 V -> Pin= -55.53 dBm
23:48:18.186 -> Vout=1.546 V -> Pin= -56.27 dBm
23:48:18.510 -> Vout=1.510 V -> Pin= -54.65 dBm
23:48:18.776 -> Vout=1.531 V -> Pin= -55.61 dBm
23:48:19.085 -> Vout=1.320 V -> Pin= -46.02 dBm
23:48:19.394 -> Vout=1.439 V -> Pin= -51.43 dBm
23:48:19.702 -> Vout=1.521 V -> Pin= -55.13 dBm

```



ภาพที่ 10 ภาพส่วนแสดงผลการทดสอบของอุปกรณ์



ระบบสามารถสร้างและแสดงผลแผนที่การกระจายตัวของกำลังของสัญญาณในรูปแบบ Heatmap ได้ครบวงจร โดยพัฒนาเป็น Web Application ด้วย Flask ทำหน้าที่ให้บริการข้อมูลผ่าน API และใช้ JavaScript ร่วมกับไลบรารี Leaflet.js และ Heatmap.js สำหรับเรนเดอร์แผนที่เชิงโต้ตอบ ผู้ใช้สามารถซูม-แพน เลือกพื้นที่แสดงผล เปิด-ปิดชั้นข้อมูล ปรับสเกลสี และตรวจดูค่าที่ตำแหน่งสนใจได้ตามข้อมูลที่ระบบจัดเตรียมไว้



ภาพที่ 7 ภาพแผนที่ความหนาแน่นสีที่ผ่านการทดสอบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการพัฒนา “ระบบเก็บ-แปลง-แสดงผล” เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของสัญญาณในย่าน 2.4 GHz แบบภาคสนามนอกอาคาร โดยใช้ BPF 2.4 GHz คัดสัญญาณก่อนเข้า AD8317 (log power detector) แล้วอ่านค่าแรงดันด้วย ESP32-S3 แปลงเป็น dBm ด้วยโมเดลเชิงเส้นในสเกล dB (slope/intercept) พร้อมการเฉลี่ยหลายตัวอย่าง ข้อมูลแต่ละจุดถูกแนบพิกัดจาก GPS NEO-6M จึงผูกตำแหน่งกับค่ากำลังได้อย่างต่อเนื่อง

ฝั่งซอฟต์แวร์พัฒนาเป็น Web Application (Flask + JavaScript) ใช้ Leaflet.js แสดงแผนที่ฐานและ Heatmap.js เรนเดอร์ค่าความแรง ผู้ใช้ซูม-แพน เลือกพื้นที่และสเกลสี ดูค่าที่พิกัดได้ทันที พร้อมสลับชุดข้อมูลตามเวลา/เส้นทางเดินวัด ระบบรองรับส่งออก CSV/GeoJSON เพื่อวิเคราะห์ซ้ำหรือซ้อนทับกับเลเยอร์ภูมิสารสนเทศอื่น ผลลัพธ์ Heatmap ภาคสนามสะท้อนพฤติกรรม path loss ในที่โล่ง, เงาบังจาก อาคาร/แนวต้นไม้, และการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมกลางแจ้งได้ชัดเจน จึงเหมาะสำหรับงานสำรวจความครอบคลุมสัญญาณ วางตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกอาคาร และติดตามคุณภาพเครือข่ายในพื้นที่เมือง/กึ่งเมือง

ระบบของเราตอบโจทย์เพราะเชื่อมครบตั้งแต่การคัดย่านด้วย BPF การตรวจจับกำลังด้วย AD8317 และการอ่านประมวลผลด้วย ESP32-S3 จนได้ค่า dBm ที่ผูกกับพิกัด GPS จึงสร้าง Heatmap กลางแจ้งที่ได้ตอบได้บนเว็บ ช่วยดูสัญญาณจริงตามพื้นที่ เวลา และเส้นทางได้ทันที ผลลัพธ์ทำให้การตัดสินใจเชิงพื้นที่ เช่น วางตำแหน่งอุปกรณ์ภายนอกอาคารหรือประเมินความครอบคลุมเครือข่าย ทำได้แม่นยำ ชัด และนำไปใช้ต่อในงานวิศวกรรมได้โดยตรง

### บรรณานุกรม

- [1] Analog Devices, Inc., “AD8317: 1 MHz–10 GHz Demodulating Log Amplifier—Datasheet,” 2019. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad8317.html>
- [2] Big Data Institute (BDI) Thailand, “ทำความรู้จักแผนภูมิปฏิทินความร้อน (Calendar Heatmaps),” ธ.ค. 2023. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://bdi.or.th/big-data-101/calendar-heatmaps/>
- [3] Bluetooth SIG, “Bluetooth Technology Overview.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/>
- [4] Bluetooth SIG, “Bluetooth Low Energy (BLE) Primer.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [5] Code of Federal Regulations (eCFR), “47 CFR § 15.247—Operation within the bands 902–928 MHz, 2400–2483.5 MHz, and 5725–5850 MHz.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/part-15/section-15.247>
- [6] ETSI, EN 300 328 V2.2.2: Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques, ก.ค. 2019. [ออนไลน์]. Available: <https://www.etsi.org>
- [7] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz–300 GHz),” Health Physics, 2020. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.icnirp.org>
- [8] IEEE 802.15 Working Group, “IEEE 802.15.4—2.4 GHz channels (11–26) and PHY details.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://ieee802.org/15/>
- [9] Intel, “Guide to Configure Wi-Fi Channels and Channel Widths.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.intel.com>
- [10] Kistler, “Filter (electronics).” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.kistler.com/INT/en/filter-electronics-/C00000109>

[11] Leaflet, “Leaflet—JavaScript library for interactive maps.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์].

Available: <https://leafletjs.com>

[12] P. Wied, “heatmap.js—Dynamic Heatmaps for the Web.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์].

Available: <https://www.patrick-wied.at/projects/heatmapjs>

[13] SCMA, “สเปกตรัมอนาไลเซอร์: หลักการทำงานเป็นอย่างไร และทำไมถึง....” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568.

[ออนไลน์]. Available: <https://scma.co.th/blog/post/what-is-a-spectrum-analyzer>

[14] Wikipedia, “ISM radio band.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available:

[https://en.wikipedia.org/wiki/ISM\\_radio\\_band](https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_radio_band)

[15] Wikipedia, “List of WLAN channels.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available:

[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_WLAN\\_channels](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels)