

ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย  
สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ



นายวงศธร ภาธรสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรม โทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**WIRELESS SENSOR NETWORK FOR LOW POWER  
RADIO FREQUENCY DETECTION SYSTEM**

The logo of Suranaree University of Technology is a large, faint watermark in the center of the page. It features a stylized figure of a person standing on a platform, with a large 'S' and 'U' behind them. The figure is surrounded by a circular border with a scalloped edge. The Thai text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the logo.

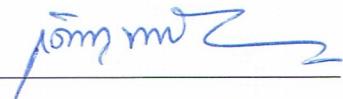
**Wongsathon Pathonsuwan**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Engineering in  
Telecommunication and Computer Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2020**

# ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

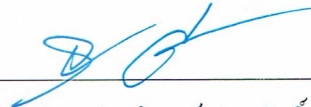
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ร.อ. ดร.ประ โยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วศขร ภาธรสุวรรณ : ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ( WIRELESS SENSOR NETWORK FOR LOW POWER RADIO FREQUENCY DETECTION SYSTEM ) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์, 117 หน้า

ปัจจุบันคลื่นความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตมีอัตราการมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้อาจก่อให้เกิดการรบกวนของคลื่นวิทยุ ส่งผลให้อุปกรณ์ไร้สายบริเวณรอบ ๆ ทำงานผิดปกติหรือเกิดการรบกวนขึ้นรุนแรงอาจทำให้อุปกรณ์ไร้สายหยุดการทำงาน ซึ่งกรณีที่รบกวนขึ้นรุนแรงจนอุปกรณ์ไร้สายบริเวณรอบ ๆ ไม่สามารถใช้งานได้ นั้น จะมีการร้องขอให้ตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวน ซึ่งการตรวจสอบจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของสถานที่ใช้งานที่ชัดเจน กรณีที่ไม่ทราบตำแหน่งของสถานที่ใช้งานที่ชัดเจนก่อให้เกิดความล่าช้าในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวน ดังนั้นการมีเครื่องตรวจจับสัญญาณรบกวนที่มีความแม่นยำสูงจะช่วยให้แก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นผลทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยใช้สายอากาศอัตรายสูงด้านหน้า และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมในการตรวจจับความถี่เป้าหมายหรือสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ยังใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม RF Switch ในการเลือกอ่านข้อมูลผ่านเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมหรือตัวรับสัญญาณ Wi-Fi และไมโครคอนโทรลเลอร์ยังทำหน้าที่ในการรับส่งตำแหน่ง ทิศทางของสายอากาศ ผลที่ได้จากการตรวจวัดไปยังฐานข้อมูล ซึ่งวิธีนี้สามารถวัดระดับสัญญาณรบกวนและสามารถระบุตำแหน่งของสัญญาณรบกวนได้อย่างแม่นยำ

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

WONGSATHON PATHONSUWAN : WIRELESS SENSOR NETWORK  
FOR LOW POWER RADIO FREQUENCY DETECTION SYSTEM.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. FLT. LT. PRAYOTH KUMSAWAT,  
Ph.D., 117 PP.

RF MEASURING SENSOR/LORA WAN/LOW-POWER RADIO FREQUENCY  
/TRANSCEIVER DETECTION SYSTEM.

Nowadays, the frequency that does not require a license has a rapidly increasing rate of the tendency to be used, which may cause radio interference. It affects the surrounding wireless devices to malfunction or severe radio interference and may cause the wireless devices to stop working. In case of severe interference which the surrounding wireless devices cannot be used will be requested to be examined for devices that emit interference. The examiner has to specify the precise location of the interference device to examine and solve the exact problem. If examiner can't identify the location that cause a delay of detecting devices that emit interference. Therefore, having a highly accurate noise detector would provide quick and efficient troubleshooting solutions that led to this research. The research presents Wireless Sensor Network for Low Power Radio Frequency Detection System. Which uses an antenna and the spectrum signal analyzer to detect the target frequency or the interference.

In addition, a microcontroller is used to control the RF Switch to selectively read the data via a spectrum analyzer or Wi-Fi receiver. Then a microcontroller also serves to transmit the position, the direction of the antenna and the results of the

measurements to the database. Moreover, this method can measure the signal and specify the position of the interference precisely.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ หัวหน้าสาขาวิศวกรรม โทรคมนาควม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการ ศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วย ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

วงศธร ภาธรสุวรรณ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย .....	3
1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.7 สรุป .....	4
<b>2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ราชเบอร์รี่ พาย (Raspberry Pi) .....	5
2.3 เทคโนโลยีลอรา (LoRa Technology) .....	7
2.4 โมดูล GPS (GPS module) .....	8
2.5 โมดูลเข็มทิศดิจิทัล (Digital Compass Module) .....	9
2.6 บริการเครือข่ายประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ Firebase .....	9
2.7 RF Switch .....	9
2.8 เครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger .....	10
2.9 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS Garmin รุ่น eTrex 10 .....	11



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence).....	11
2.11 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN).....	12
2.12 มาตรฐานประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม.....	15
2.12.1 ตารางวัดความถูกต้องหรือเมตริกซ์วัดประสิทธิภาพ .....	15
2.12.2 ค่าความแม่นยำในการจำแนกข้อมูล (Accuracy).....	16
2.12.3 ค่าความแม่นยำ (Precision) .....	16
2.12.4 ความผิดพลาด (Error).....	16
2.12.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error - MAE).....	16
2.12.3 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error-MSE).....	17
2.13 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	17
2.14 กล่าวสรุป.....	22
<b>3 วิธีดำเนินงาน.....</b>	<b>23</b>
3.1 บทนำ.....	23
3.2 การออกแบบระบบการติดตามโดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ.....	23
3.3 การออกแบบระบบการส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต.....	26
3.3.1 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบ 3G/4G .....	26
3.3.2 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบ 3G/4G .....	27
3.4 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่ วิทยุกำลังส่งต่ำ.....	29
3.4.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม .....	31
3.5 การออกแบบซอฟต์แวร์ .....	37
3.6 กล่าวสรุป .....	40
4 ผลการดำเนินงาน .....	41
4.1 กล่าวนำ .....	41
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ GPS .....	41
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานทิศทางการหมุนของสายอากาศ.....	42
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูล แบบลORA.....	44
4.5 การทดสอบการควบคุม RF Switch.....	46
4.6 การทดสอบการส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม.....	48
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล.....	50
4.8 ผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่าง จากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจาก สายอากาศเทียบกับ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม .....	53
4.9 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ .....	101
4.10 กล่าวสรุป .....	102
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	105
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์ .....	105
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	106
รายการอ้างอิง .....	107
ภาคผนวก .....	109
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	109
ประวัติผู้เขียน .....	117

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รายละเอียดของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย Model A Model B และ Model B+ .....5
2.2	ตัวอย่างฟังก์ชันถ่ายโอนและลักษณะกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่าง ๆ.....14
2.3	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....17
4.1	การเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้รับจากโมดูลรับสัญญาณ GPS Ublox Neo M8N เทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมพกพา Garmin รุ่น eTrex 10.....42
4.2	การเปรียบเทียบทิศทางที่ได้รับจากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลเทียบกับเข็มทิศดิจิทัล จากเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger .....43
4.3	ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูล GPS โดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา .....45
4.4	ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล.....50
4.5	คำสั่งการควบคุม RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase .....52
4.6	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่าย ประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) .....55
4.7	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่าย ประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) .....58
4.8	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่าย ประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) .....61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.9	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) .....	64
4.10	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) .....	67
4.11	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) .....	70
4.12	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) .....	73
4.13	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) .....	76
4.14	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 2.45 GHz).....	79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.15	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 5.0 GHz).....	83
4.16	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz).....	87
4.17	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz).....	89
4.18	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz).....	91
4.19	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 1 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz).....	93
4.20	ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz).....	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.21 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่าย ประสาทเทียม (เรื่อล่ำที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)..... 98



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	บอร์ดราสเบอร์รี่ พาย Model B+ รุ่นที่ 3 ..... 7
2.2	บอร์ดคลอรา ..... 8
2.3	โมดูล GPS ..... 8
2.4	โมดูลเข็มทิศดิจิตอล ..... 9
2.5	RF Switch ..... 10
2.6	ตัวรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger ..... 10
2.7	เครื่อง GPS Garmin รุ่น eTrex 10 ..... 11
2.8	ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม ..... 13
2.9	ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายอินพุต ..... 13
2.10	ตัวอย่างเมตริกซ์วัดประสิทธิภาพ ..... 15
3.1	แผนภาพของระบบทั้งหมด ..... 23
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด ..... 25
3.3	อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม ..... 25
3.4	โมดูล GPS และ โมดูลเข็มทิศดิจิตอล ..... 26
3.5	แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุ กำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G ..... 27
3.6	แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุ กำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G ..... 28
3.7	แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล โดยใช้เทคโนโลยีคลอรา ..... 29
3.8	แผนภาพโครงข่ายประสาทเทียม ..... 30
3.9	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบ (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 1 ..... 31
3.10	กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 2 ..... 32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 3.....	32
3.12 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 4.....	33
3.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 5.....	33
3.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 6.....	34
3.15 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 7.....	34
3.16 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 8.....	35
3.17 กราฟแสดงค่า Performance ของการฝึกฝนแต่ละครั้ง.....	35
3.18 ตารางวัดความถูกต้อง (Accuracy) ของผลการทำนาย.....	36
3.19 ตัวอย่างหน้าจอซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ.....	37
3.20 ตัวอย่างหน้าจอซอฟต์แวร์การทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียม.....	38
4.1 ภาพแสดงตำแหน่งและระยะทางทั้งหมดในการทดสอบการรับส่งข้อมูล.....	45
4.2 กรณีก่อนใช้ RF Switch .....	47
4.3 กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย.....	47
4.4 กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านค่าจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ .....	48
4.5 ค่าที่บอร์ด Raspberry Pi อ่านได้จากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลและ โมดูล GPS .....	49
4.6 ค่าที่คอมพิวเตอร์รับได้ผ่านสาย RS232 .....	49
4.7 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จาก การทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz).....	57



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz).....	60
4.9 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz).....	63
4.10 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz).....	66
4.11 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz).....	69
4.12 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz).....	72
4.13 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz).....	75
4.14 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5 GHz).....	78
4.15 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถั่ว ทดสอบความถี่ 2.4 GHz) .....	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถั่ว ทดสอบความถี่ 5 GHz) .....	86
4.17 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz) .....	88
4.18 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz) .....	90
4.19 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz) .....	92
4.20 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz) .....	94
4.21 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz) .....	96
4.22 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz) .....	100
4.23 ซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ .....	101
4.24 ซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ ในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม .....	102
4.25 ฐานข้อมูล Google Firebase .....	102

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงความเป็นมา และเหตุจูงใจ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ แนวทางการดำเนินวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) มีหน้าที่ในการบริหารคลื่นความถี่ และกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ปราศจากการรบกวนในระดับรุนแรง โดยสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) มีหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ เพื่อสนับสนุนข้อมูลในการบริหารคลื่นความถี่ ทางสำนักงาน กสทช. จึงมีเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ที่สำคัญ ได้แก่ สถานีตรวจสอบการใช้ความถี่วิทยุระบบควบคุมระยะไกล เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ (Spectrum Analyzer) เครื่องวัดความแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเครื่องรับคลื่นความถี่ (Receiver) ซึ่งผลที่วัดได้จากเครื่องมือและอุปกรณ์ จะถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัยและแก้ไขปัญหาการใช้คลื่นความถี่ที่มีการรบกวน

การจัดสรรคลื่นความถี่เพื่อการใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ คลื่นความถี่ที่ต้องได้รับใบอนุญาต และคลื่นความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาต โดยคลื่นความถี่แบบที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตจะกำหนดให้ใช้กำลังส่งต่ำ และไม่คุ้มครองการรบกวน ซึ่งคลื่นความถี่ประเภทนี้หากมีการร้องขอให้ตรวจสอบ สำนักงาน กสทช. จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของสถานที่ใช้งานที่ชัดเจนเพื่อให้การตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพอย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่มีทราบตำแหน่งของสถานที่ใช้งานที่ชัดเจน หรือต้องการตรวจสอบการกระจายตัวของการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ เช่น การใช้คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ของ Wi-Fi หรือการใช้คลื่นความถี่ย่าน UHF ของโดรน เป็นต้น ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง เช่น พื้นที่ในรัศมี 5 กิโลเมตร จากสี่แยกสะพานควาย หรือ พื้นที่ในรัศมี 4 กิโลเมตร จากสี่แยกราชประสงค์ หรือ พื้นที่ 2 กิโลเมตร จากสนามหลวง เป็นต้น ทางสำนักงาน กสทช. จะมีข้อจำกัดของเครื่องมือและ

อุปกรณ์ที่จะใช้ในการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ในลักษณะดังกล่าว ดังนั้นจึงนำไปสู่งานวิจัยระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในการหาทิศทางของสายอากาศ และติดตามตำแหน่งของยานพาหนะที่ใช้ในการตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ พร้อมทั้งส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) สำหรับการใช้งานกับระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ โดยใช้ RF Measuring Sensors ซึ่งมีเทคโนโลยีโลรา (LoRa Technology) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและพัฒนาระบบการติดตาม โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

1.3.2 ออกแบบและพัฒนาระบบการส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยแบ่งได้ 2 กรณีคือ

1.3.2.1 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G

1.3.2.2 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีอุปกรณ์ต้นแบบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำที่สามารถวัดตรวจสอบสัญญาณได้ทั้งแบบอิสระและแบบเครือข่ายในบริเวณพื้นที่ที่กำหนดทั้งบนภาคพื้นดินและภาคทะเล

1.4.2 ได้รับความรู้การสื่อสารและขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

1.4.3 มีซอฟต์แวร์ เพื่อใช้สำหรับติดตามตำแหน่ง ทิศทางการหมุนของสายอากาศและรวบรวมข้อมูลการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

1.4.4 มีข้อมูลของระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูลรวมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบและพัฒนาระบบส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

1.5.3 ออกแบบและพัฒนาระบบติดตาม GPS สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

1.5.4 เก็บชุดข้อมูลในการฝึกฝนและทดสอบให้กับระบบโครงข่ายประสาทเทียม

1.5.5 ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

1.5.6 ทดสอบการทำงานของต้นแบบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในการติดตาม GPS สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

1.5.7 ทดสอบการทำงานของต้นแบบโครงข่ายประสาทเทียม ร่วมกับต้นแบบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

1.5.8 จัดทำรายงานแบบสมบูรณ์

## 1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล ออกแบบระบบ ทดสอบระบบ วิเคราะห์และสรุปผล โดยประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินการวิจัยของงานวิจัยนี้

**บทที่ 2** กล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

**บทที่ 3** กล่าวถึงวิธีดำเนินการออกแบบระบบการติดตามยานพาหนะที่ตรวจสอบความถี่ โดยทำการส่งตำแหน่ง GPS เพื่อใช้ในการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ทิศทางการหมุนของสายอากาศไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

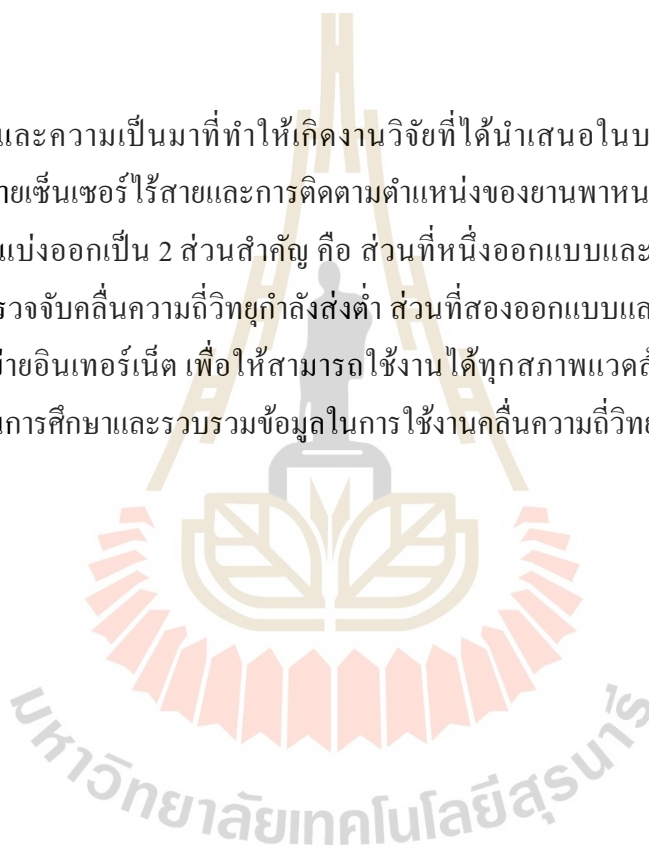
รวมถึงการออกแบบระบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะที่ติดตั้งระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ และซอฟต์แวร์ของระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำมาวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต

## 1.7 สรุป

ปัญหาและความเป็นมาที่ทำให้เกิดงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทที่ 1 นี้ เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนที่หนึ่งออกแบบและพัฒนาระบบติดตาม GPS สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ส่วนที่สองออกแบบและพัฒนาระบบส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถใช้งานได้ทุกสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและรวบรวมข้อมูลในการใช้งานคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ



## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอทฤษฎี ความรู้พื้นฐาน หลักการ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ใช้การติดตาม GPS ระบุตำแหน่งของยานพาหนะที่ใช้ในการตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ และเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายรวมทั้งรายละเอียดของการบริการเครือข่ายประมวลผลแบบกลุ่มเมฆที่ใช้เก็บข้อมูลบนอินเทอร์เน็ตที่ใช้เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมและประมวลผล อุปกรณ์ที่ใช้สื่อสารในเครือข่าย เซ็นเซอร์หรือโมดูลที่ใช้งาน เป็นต้น

#### 2.2 ราสเบอร์รี่ พาย (Raspberry Pi)

ราสเบอร์รี่ พาย (Raspberry Pi) ลักษณะคล้ายกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลขนาดเล็กที่ไม่มีอุปกรณ์ต่อพ่วง เริ่มแรกแพลตฟอร์มราสเบอร์รี่ พาย ถูกออกแบบเพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับใช้งานด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ ราคาไม่แพง และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ เช่น จอภาพ มอเตอร์ โดยบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย แบ่งได้เป็น 3 แบบหลัก ๆ ได้แก่ Model A Model B และ Model B+ ซึ่งมีรายละเอียดของบอร์ดในแต่ละแบบและรุ่นของการพัฒนา แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย Model A Model B และ Model B+

Model A	รุ่นที่ 1	หน่วยประมวลผลตระกูล ARM ของบริษัท Broadcom BCM2835 มีแรมขนาด 256 เมกะไบต์ ช่องเชื่อมต่อสำหรับการใช้งานทั่วไป จำนวน 26 ช่อง มีพอร์ตยูเอสบี(USB port) จำนวน 1 ช่อง พอร์ตเอชดีเอ็มไอ (HDMI port) จำนวน 1 ช่อง สัญญาณวิดีโอที่สน์คอมโพสิต (Composite Video port) จำนวน 1 ช่อง ช่องหูฟังขนาด 3.5 มิลลิเมตร จำนวน 1 ช่อง และ ช่องต่อไมโครเอสดีการ์ด แต่ไม่มีช่องเชื่อมต่อเครือข่ายแลน
---------	-----------	---

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย Model A Model B และ Model B+ (ต่อ)

Model B	รุ่นที่ 1	พัฒนาขึ้นจาก Model A เพิ่มแรมให้มีขนาด 512 เมกะไบต์ ช่องเชื่อมต่อสำหรับการใช้งานทั่วไปเพิ่มเป็น 40 ช่อง มีพอร์ตยูเอสบี (USB port) จำนวน 2 ช่อง และช่องต่อ RJ-45 สำหรับเครือข่ายแลน จำนวน 1 ช่อง
	รุ่นที่ 2	พัฒนาขึ้นจากรุ่นที่ 1 โดยเปลี่ยนหน่วยประมวลผลใหม่เป็น Broadcom BCM2836 ตระกูล ARM Cortex-A7 4 แกนสมอง และเพิ่มแรมเป็น 1 กิกะไบต์ ทำงานที่ความเร็ว 900 เมกะเฮิร์ตซ์
	รุ่นที่ 3	พัฒนาขึ้นจากรุ่นที่ 2 โดยเปลี่ยนหน่วยประมวลผลใหม่ เป็น Broadcom BCM2837 ตระกูล ARM Cortex-A8 64 บิต 4 แกนสมอง ทำงานที่ความเร็ว 1.2 กิกะเฮิร์ตซ์ เพิ่มความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11n และเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุบลูทูธ รุ่น 4.0
	รุ่นที่ 4	พัฒนาขึ้นจากรุ่นที่ 3 ใช้หน่วยประมวลผล Broadcom BCM2711 Quad-Core ARM Cortex-A72 ความเร็ว 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์ มีอรมให้เลือก 3 ขนาด (1 2 และ 4 กิกะไบต์) รองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายทั้ง 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ มาตรฐาน IEEE 802.11n เครือข่ายไร้สาย 5 กิกะเฮิร์ตซ์ IEEE มาตรฐาน 802.11ac และเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุบลูทูธ รุ่น 5.0 มีพอร์ตยูเอสบี 3.0 (USB 3.0 port) จำนวน 2 ช่อง และพอร์ตยูเอสบี 2.0 (USB 2.0 port) จำนวน 2 ช่อง มีพอร์ตไมโครเอชดีเอ็มไอ (Micro-HDMI port) จำนวน 2 พอร์ต
Model B+	รุ่นที่ 3	พัฒนาขึ้นจากรุ่นที่ 3 Model B โดยเปลี่ยนหน่วยประมวลผลใหม่ เป็น Broadcom BCM2837B0 ที่มีความเร็วในการทำงานเป็น 1.4 กิกะเฮิร์ตซ์ รองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายทั้ง 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ มาตรฐาน IEEE 802.11n และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ IEEE มาตรฐาน 802.11ac



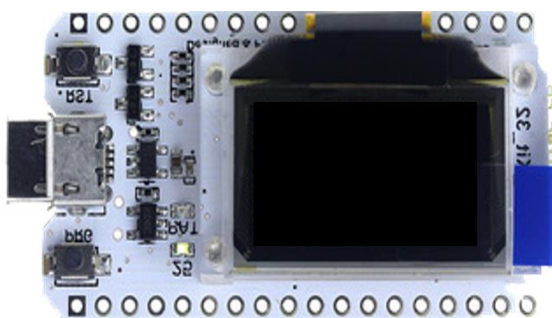
เนื่องจากบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย เป็นแพลตฟอร์มที่ใช้ระบบปฏิบัติการ ผู้ใช้จำเป็นต้องดาวน์โหลดระบบปฏิบัติการที่เก็บอยู่ในไฟล์ที่มีการบีบอัดเรียกว่า ไฟล์อิมเมจ (Image File) แล้วติดตั้งลงในหน่วยความจำแบบไมโครเอสดีการ์ด (Micro SD Card) ขนาด 4 กิกะไบต์ขึ้นไป ขั้นตอนดังกล่าวสามารถทำบนคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงนำไมโครเอสดีการ์ดไปติดตั้งที่บอร์ด เพื่อใช้งานได้ตามต้องการ โดยบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ การเขียนโปรแกรม และอื่น ๆ อีกมากมาย ตัวอย่างบอร์ดราสเบอร์รี่พายแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บอร์ดราสเบอร์รี่ พาย Model B+ รุ่นที่ 3

### 2.3 เทคโนโลยีลอรา (LoRa Technology)

ลอรา เป็นชื่อที่ถูกเรียกย่อมาจากคำว่า Long Range Low Power Wireless แพลตฟอร์มลักษณะเฉพาะของลอราคือ เป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบไร้สายในระยะไกล กินกำลังไฟต่ำ ประหยัดแบตเตอรี่ รองรับจำนวนของอุปกรณ์ไอโอที (IoT) ได้จำนวนมาก และยังสามารถเชื่อมต่อกับเกตเวย์ (Gateway) เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) เรียกว่า ลอราแวน (LoRa WAN) ตัวอย่างบอร์ดลอราแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บอร์ดลอรา

## 2.4 โมดูล GPS (GPS module)

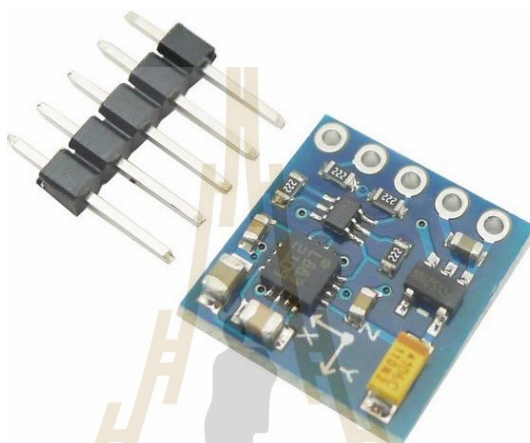
โมดูล GPS เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณจากระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System) โดยระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก เป็นระบบที่ดาวเทียมประมาณ 24 ดวง โคจรรอบโลกและแต่ละดวงมีระยะห่างเท่า ๆ กัน จากระบบ GPS นี้ทำให้คนบนพื้นโลกที่มีเครื่องรับสัญญาณสามารถที่จะทราบพิกัดและตำแหน่งที่อยู่ของตนเองได้ โดยความแม่นยำของการระบุตำแหน่งนั้นอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 เมตร ในอุปกรณ์รับสัญญาณส่วนใหญ่ แต่สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ GPS ชนิดพิเศษที่ใช้ในกองทัพอาจสามารถรับสัญญาณได้แม่นยำถึงระยะ 1 เมตร ตัวอย่างโมดูล GPS แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมดูล GPS

## 2.5 โมดูลเข็มทิศดิจิทัล (Digital Compass Module)

โมดูลเข็มทิศดิจิทัลเป็นเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ระบุตำแหน่งทิศทาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับหุ่นยนต์ หรืออุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ ที่ต้องมีการเคลื่อนที่ สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำโมดูลเข็มทิศดิจิทัลมาประยุกต์ใช้งานโดยเป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุนของสายอากาศ ตัวอย่าง โมดูลเข็มทิศดิจิทัลแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โมดูลเข็มทิศดิจิทัล

## 2.6 บริการเครือข่ายประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ Firebase

เป็น Platform ที่รวบรวมเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับการจัดการในส่วนของ Backend หรือ Server side ซึ่งทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้ง Firebase เป็น NoSQL Cloud database ที่เก็บข้อมูลในรูปแบบของ JSON และมีการเชื่อมต่อข้อมูลแบบทันทีกับทุกอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ Firebase ยังรองรับการทำงานเมื่อออฟไลน์ (ข้อมูลที่ออฟไลน์ จะถูกเก็บไว้จนกระทั่งระบบกลับมาออนไลน์ เมื่อระบบออนไลน์ก็จะทำการเชื่อมต่อข้อมูลให้อัตโนมัติ)

## 2.7 RF Switch

RF Switch เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเลือกสัญญาณอินพุตให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ว่าจะเลือกอินพุตเป็นสัญญาณจากเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่โดยตรง หรือสัญญาณจากอุปกรณ์รับสัญญาณ Wi-Fi มาใช้ในการวิเคราะห์แหล่งกำเนิดสัญญาณที่สายอากาศตรวจจับ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 RF Switch

## 2.8 เครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger

ตัวรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger แสดงได้ดังรูปที่ 6 จากบริษัท Aaronia AG โดย Aaronia GPS Logger มีเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย 6 เซ็นเซอร์ดังนี้

- ตัวรับสัญญาณ GPS
- เซ็นเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor)
- เซ็นเซอร์ตรวจจับความเอียง (Tilt Sensor)
- เข็มทิศดิจิทัล (Digital Compass)
- เซ็นเซอร์วัดความเร็ว (Accelerometer Sensor)
- เซ็นเซอร์ความสูง (Height Sensor)

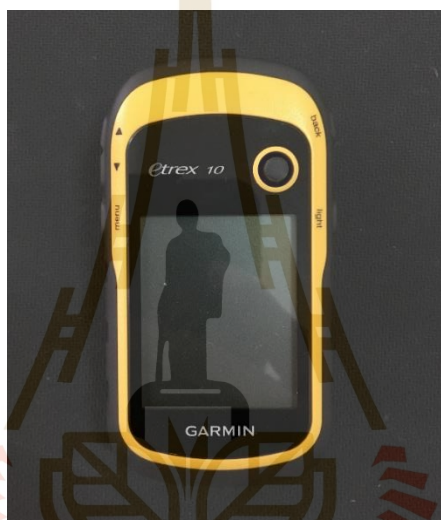
นอกจากนี้ ยังมีซอฟต์แวร์สำหรับคอมพิวเตอร์ในการใช้ตรวจสอบการวางแผนสายอากาศ บันทึกลงหรือวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 ตัวรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger

## 2.9 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS Garmin รุ่น eTrex 10

เป็นเครื่องกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียม GPS แบบพกพา มีความคลาดเคลื่อนของการหาตำแหน่งไม่มากกว่า 10 เมตร RMS นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการนำทาง คำนวณพื้นที่ วัดความกดอากาศ วัดระดับความสูง บันทึกตำแหน่ง และยังสามารถนำข้อมูลที่บันทึกออกจากรุ่นไปใช้งานอื่นได้ ๆ เช่น การนำพิกัดที่บันทึกไปใช้กับโปรแกรม Google Earth เป็นต้น เครื่อง GPS Garmin รุ่น eTrex 10 จะถูกใช้เป็นตัวเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของโมดูล GPS ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ เครื่อง GPS Garmin รุ่น eTrex 10 แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่อง GPS Garmin รุ่น eTrex 10

## 2.10 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence - AI) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของสาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ที่หลากหลาย ซึ่งเกี่ยวข้องกับวิธีการสร้างคอมพิวเตอร์ให้มีความฉลาด เพื่อให้สามารถคิด ทำงาน และเรียนรู้ได้ด้วยตัวมันเอง โดยมีจุดประสงค์หลักก็ทำเพื่อให้มันสามารถทำงานแทนมนุษย์ได้ แต่ความก้าวหน้าในการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกกำลังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนทัศน์ในแทบทุกภาคส่วนของอุตสาหกรรมเทคโนโลยี ในตอนนี้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา และมีการคาดหมายว่าจะมีความสามารถเหนือมนุษย์ในช่วง Strong AI โดยการที่จะเปลี่ยนผ่านไปสู่ช่วงนั้น Machine จำเป็นต้องเรียนรู้วิธีการคิด

ของมนุษย์ทั้งในด้านเทคนิคและกระบวนการจัดเก็บข้อมูลในสมอง ซึ่งชนิดของปัญญาประดิษฐ์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อยได้แก่

1. การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เป็นส่วนที่ถูกใช้งานเสมือนเป็นสมองของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นการสอนให้ระบบคอมพิวเตอร์ทำการเรียนรู้ได้โดยตนเองโดยการให้ข้อมูลในการฝึกฝนหรือการสอนอัลกอริทึมให้เรียนรู้ทำความเข้าใจและตัดสินใจได้ด้วยตัวเองจากข้อมูลที่ป้อนให้ การเรียนรู้ของเครื่องสามารถถูกแบ่งออกเป็นการเรียนรู้ได้ 2 แบบใหญ่ ๆ ได้แก่ การเรียนรู้แบบผู้สอน (Supervised Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) เป็นอัลกอริทึมที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในส่วนสำหรับฝึกฝน (training data) และส่วนที่รับกลับมาเพื่อปรับปรุง (feedback) จากมนุษย์เพื่อที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาสู่ข้อมูลที่ออกไป ส่วนการเรียนรู้โดยไม่มีผู้ช่วยสอน (Unsupervised) นั้น อัลกอริทึมจะตรวจสอบเฉพาะข้อมูลที่ป้อนเข้ามาเท่านั้น โดยปราศจากการให้ผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้น เมื่อทำนายผลลัพธ์จากชุดข้อมูลจำนวนมากได้มากเท่าไรก็จะยิ่งแสดงความสามารถในการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) มากเท่านั้น

2. การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เป็นขอบเขตของการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งการเรียนรู้เชิงลึกเป็นเทคนิคในการสร้างปัญญาประดิษฐ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมหรือข่ายงานประสาทเทียมหลาย ๆ ชั้นเลียนแบบระบบเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ (Neural Network) ซึ่งโครงข่ายนี้เรียกว่า “โครงข่ายประสาทเทียม” (Artificial Neural Networks - ANN)

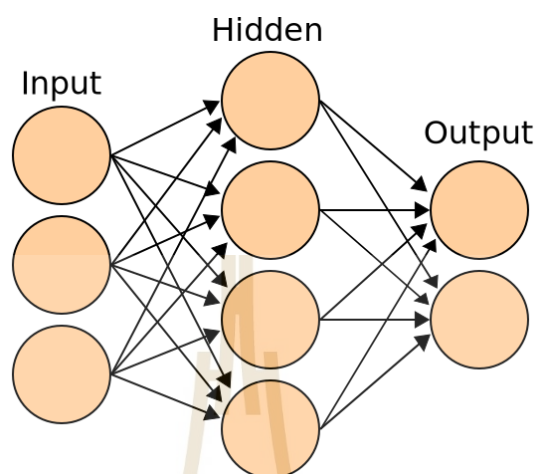
## 2.11 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN)

โครงข่ายประสาทเทียม คือระบบคอมพิวเตอร์จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่จำลองการทำงานของระบบประสาทในสมองของมนุษย์ โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ที่จะทำงานที่มอบหมายจากการเรียนรู้ผ่านตัวอย่าง โดยโครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยโหนดและเส้นเชื่อมระหว่างโหนด โดยแบ่งชั้นในการทำงาน ชั้นดังนี้ 3

1. ชั้นอินพุต (Input Layer) คือชั้นที่รับข้อมูลเข้ามาในโครงข่ายประสาท โดยชั้นนี้มีเพียงหนึ่งชั้นเท่านั้นละจำนวนโหนดจะมีเท่ากับจำนวนคุณลักษณะ (Attribute) ของชุดข้อมูล

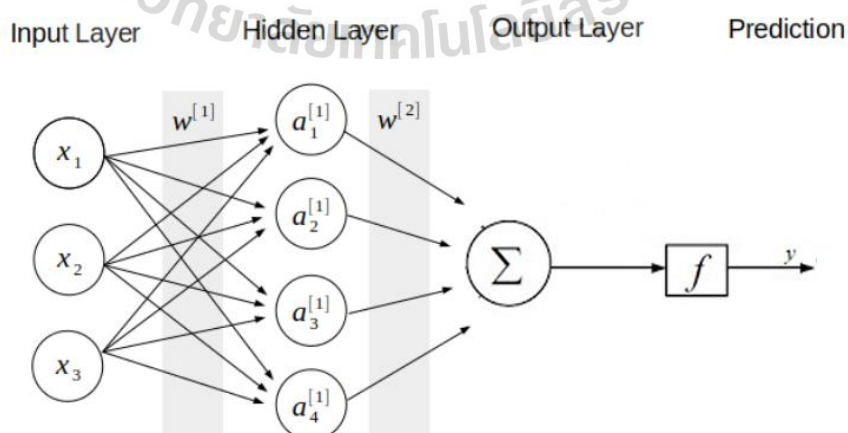
2. ชั้นซ่อน (Hidden Layer) คือชั้นที่รับข้อมูลต่อมาจากชั้นอินพุตหรือชั้นซ่อนก่อนหน้า โดยในชั้นนี้มีการทำงานเปรียบเสมือนส่วนที่เรียนรู้ ซึ่งในชั้นนี้สามารถมีจำนวนชั้นที่ซ่อนกันได้มากกว่าหนึ่ง

3. ชั้นเอาต์พุต (Output Layer) คือชั้นผลลัพธ์ที่ได้จากชั้นซ่อน จำนวนของโหนดในชั้นนี้ ขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่ต้องการจำแนก



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม

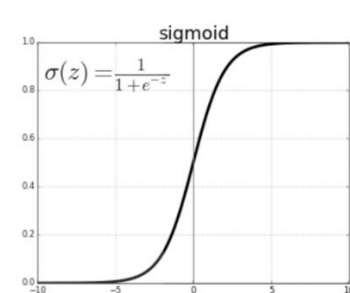
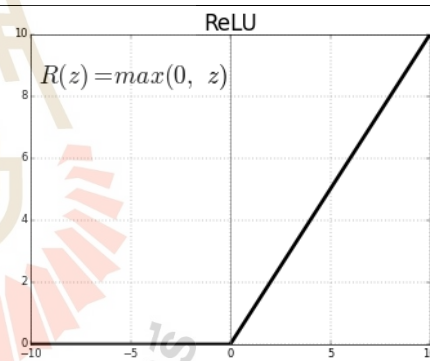
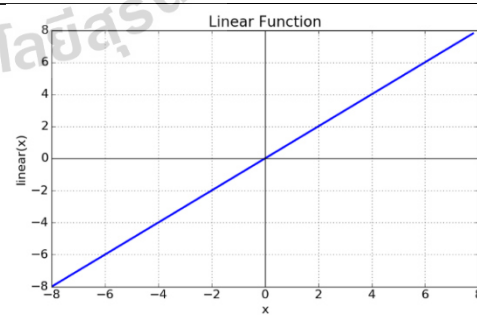
จากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมที่ภายในมีการเชื่อมต่อระหว่างกันทั้ง 3 ระดับคือ ชั้นอินพุตหนึ่งชั้น จำนวน 3 โหนด ชั้นซ่อนหนึ่งชั้น จำนวน 4 โหนดและชั้นเอาต์พุตหนึ่งชั้น จำนวน 2 โหนด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมในตัวอย่างนี้จะมีอินพุต 3 ค่าเข้ามาในโครงข่าย  $X(n)$  และแต่ละอินพุตจะถูกคูณด้วยค่าน้ำหนัก (Weight) จากนั้นจะถูกนำมารวมและส่งผ่านฟังก์ชัน (Transfer Function) เพื่อหาเอาต์พุต ซึ่งแสดงได้ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยแบบหลายอินพุต

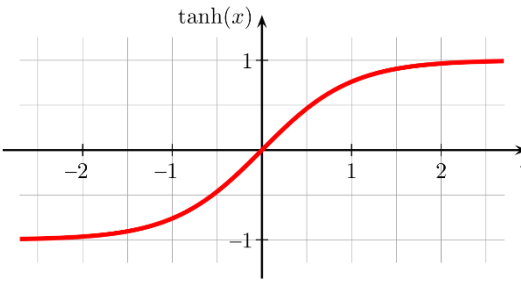
ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ในการส่งผ่าน เพื่อหาเอาต์พุตนั้นเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Activation Function) โดยเป็นฟังก์ชันที่รับผลรวมการประมวลผลทั้งหมดจากทุกอินพุตและเป็นตัวกำหนดค่าของผลลัพธ์ ซึ่งสามารถเป็นฟังก์ชันในทางคณิตศาสตร์ใดก็ได้ และสามารถเลือกฟังก์ชันได้ตามความเหมาะสม ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนมีหลายแบบด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างฟังก์ชันถ่ายโอนและลักษณะกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่าง ๆ

	ฟังก์ชัน	กราฟ
1	<p>Sigmoid Function โดยมีสมการดังนี้</p> $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$	 <p>The graph shows the Sigmoid function, labeled 'sigmoid', with the equation <math>\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}</math>. The x-axis ranges from -10 to 10, and the y-axis ranges from 0.0 to 1.0. The curve is an S-shape, starting near 0 for negative x and approaching 1 for positive x.</p>
2	<p>Rectified Linear Unit Function (ReLU Function) โดยมีสมการดังนี้</p> $f(x) = \max(0, x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq 0 \\ x & \text{for } x > 0 \end{cases}$	 <p>The graph shows the Rectified Linear Unit (ReLU) function, labeled 'ReLU', with the equation <math>R(z) = \max(0, z)</math>. The x-axis ranges from -10 to 10, and the y-axis ranges from 0 to 10. The function is zero for all negative x and increases linearly with a slope of 1 for all positive x.</p>
3	<p>Linear Function โดยมีสมการดังนี้</p> $f(x) = x$	 <p>The graph shows the Linear Function, labeled 'Linear Function', with the equation <math>\text{linear}(x) = x</math>. The x-axis ranges from -8 to 8, and the y-axis ranges from -8 to 8. The function is a straight line passing through the origin (0,0) with a slope of 1.</p>



ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างฟังก์ชันถ่ายโอนและลักษณะกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่าง ๆ (ต่อ)

	ฟังก์ชัน	กราฟ
4	<p>Tanh or Hyperbolic Tangent Function โดยมีสมการดังนี้</p> $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

## 2.12 มาตรการประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม

มาตรการประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำมีดังนี้

### 2.12.1 ตารางวัดความถูกต้องหรือเมตริกซ์วัดประสิทธิภาพ (Confusion Matrix)

คือตารางที่แสดงผลลัพธ์ในการวัดที่ได้จากการฝึกฝนหรือการจำแนกข้อมูล โดยเทียบระหว่างผลลัพธ์จริงและผลลัพธ์ในการทำนาย ดังรูปที่ 2.10 แสดงเมตริกซ์ขนาด 2x2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่จำแนกข้อมูล 2 คลาส คือคลาสบวก (Positive Class) และคลาสลบ (Negative Class)

		Actual Values	
		Positive (1)	Negative (0)
Predicted Values	Positive (1)	TP	FP
	Negative (0)	FN	TN

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเมตริกซ์วัดประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 2.10 ค่าที่ได้จากเมตริกชี้วัดประสิทธิภาพ ในกรณีที่มีข้อมูล 2 คลาส สามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณีได้ดังนี้

True Positive (TP) คือ ผลที่ทำนายว่า “จริง” แล้วตรงกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น “จริง”

True Negative (TN) คือ ผลที่ทำนายว่า “ไม่จริง” แล้วตรงกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น “ไม่จริง”

False Positive (FP) คือ ผลที่ทำนายว่า “ไม่จริง” แต่ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น “จริง”

False Negative (FN) คือ ผลที่ทำนายว่า “จริง” แต่ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น “ไม่จริง”

### 2.12.2 ค่าความแม่นยำในการจำแนกข้อมูล (Accuracy)

คือค่าความแม่นยำในการจำแนกข้อมูลว่าถูกต้องอยู่ในระดับใด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.1)

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2.1)$$

### 2.12.3 ค่าความแม่นยำ (Precision)

คือค่าที่วัดความแม่นยำของข้อมูล โดยพิจารณาแยกทีละคลาส ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.2)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.2)$$

### 2.12.4 ความผิดพลาด (Error)

คือค่าความแตกต่างของค่าจริงกับผลที่ได้จากการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$Error = \text{ค่าจากข้อมูลจริง} - \text{ค่าที่ได้จากการทำนาย} \quad (2.3)$$

### 2.12.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error - MAE)

คือการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดด้วยค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยยิ่งน้อยนั้นแสดงว่าการทำนายมีความแม่นยำมาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Error| \quad (2.4)$$

### 2.12.3 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error-MSE)

คือการหาค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด ที่ยกกำลังสอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยยิ่งน้อยนั้นแสดงว่าการทำนายมีความแม่นยำมาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Error)^2 \quad (2.5)$$

### 2.13 ปรัชญ์นวัตรกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.3 ปรัชญ์นวัตรกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2010	นายกัณวัฒน์ ไชยรัศมี ดรคุณบัว ชัชชัย .	ระบบติดตามและระบุ ตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่ โล่ง โดยใช้เครือข่ายตรวจจับ ไร้สาย (Zigbee)	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่ โล่งโดยใช้ GPS ในการระบุ ตำแหน่งและส่งข้อมูลผ่าน Zigbee
2010	นายอรุณ บุรีรัมย์	การศึกษาการหาวิถีของ ยานพาหนะโดยใช้ระบบ ดาวเทียมนำหน	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมิน ถึงค่าพิกัดให้ใช้งานได้ (Availability) ของยานพาหนะใน ระบบดาวเทียม ระบบต่าง ๆ เช่น GPS, GPS / INS และ GPS / GLONASS เป็นต้น เพื่อให้ทราบ ถึงผลกระทบที่ลดความถูกต้องใน การระบุตำแหน่ง

ตารางที่ 2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2012	ดร ชัยพร. เกษมภาตะพันธ์	ระบบติดตามตรวจสอบ ตำแหน่งและเส้นทางรถยนต์	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออุปกรณ์ที่ สามารถติดตามและตรวจสอบ ตำแหน่งของรถแบบ Realtime โดย ใช้ระบบดาวเทียม GPS และแสดง ตำแหน่งผ่านแอปพลิเคชัน
2013	นายมูหัมมัด มันศรีทธา	การประยุกต์ใช้โครงข่าย เซนเซอร์ไร้สาย ตามมาตรฐาน ZigBee / IEEE802.15.4 สำหรับระบบ กันทางรถไฟ	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้ โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มาพัฒนา ระบบกันทางรางรถไฟแบบ อัตโนมัติ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ZigBee ในการส่งข้อมูลของระบบกันทาง รถไฟ
2014	นายสุขสันต์ ชัยยะวงศ์	การประเมินค่าความถูกต้อง ของระบบ GPS / GLONASS /COMPASS ใน การหา ตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว และ สถิติ กรณีศึกษาในเขต กรุงเทพมหานคร	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมิน ความถูกต้องทางตำแหน่งของ ระบบดาวเทียมต่าง ๆ เช่น GPS, GLONASS เป็นต้น
2015	นายฉัตร สิทธิวงค์กุล	การพัฒนาต้นแบบโมดและ ส่วนต่อประสานโปรแกรม ประยุกต์สำหรับงานเครือข่าย เซนเซอร์ไร้สาย	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการนำ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ZigBee มาใช้เป็นตัวส่งข้อมูลที่ได้จาก เซ็นเซอร์ โดยมี Raspberry Pi เป็น เกตเวย์ในการส่งข้อมูลไป ฐานข้อมูล

ตารางที่ 2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2015	นายชาญสิทธิ์ อินทสุก และนาย สมชาติ จิรวิภากร	การทำนายความต้องการ พลังงานไฟฟ้า ภาคอุตสาหกรรมรายเดือน ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โครงข่ายประสาท เทียมและ ระบบอนุมานฟัซซี่ โครงข่ายปรับตัวได้	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการ ทำนายความต้องการพลังงาน ไฟฟ้าภาคอุตสาหกรรมแบบราย เดือนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ด้วยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) และวิธีระบบอนุมานฟัซซี่ โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro - Fuzzy Inference Systems: ANFIS) ซึ่งวิธีการ ANN ให้ผล การทำนายที่ดีกว่า ANFIS
2016	Arghya P. Saikia Thengal, Naman Rastogi, Abhilash Medhi	Parameter sensing and object tracking using global positioning system	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการนำ Arduino มาประยุกต์ใช้ในการ ติดตามตำแหน่ง GPS โดยใช้การ ส่งข้อมูลแบบ GSM ในการส่ง ตำแหน่ง และแสดงตำแหน่งของ ยานพาหนะที่ติดตั้งอุปกรณ์ ใน รูปแบบแผนที่
2016	นายเกรียงศักดิ์ พรหมภักดิ์	ระบบติดตามวัตถุที่สามารถ บันทึกพิกัด GPS ของวัตถุ ผ่านทางเครือข่าย GPRS ไป ยังเว็บไซต์ Google Docs Spreadsheet	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบ ติดตามวัตถุด้วยโมดูล GPS และ ใช้โมดูล GPRS ในการส่งพิกัด ของวัตถุไปยัง Google Docs Spreadsheet และแสดงพิกัด ทั้งหมดผ่าน Google Map

ตารางที่ 2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2017	นายกฤษฎี วิทิศานต์	การพัฒนาต้นแบบโครงข่าย เซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการ ทำเกษตรแม่นยำในเรือน เพาะปลูก	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการนำ โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมาทำ เกษตร โดยเซ็นเซอร์ต่าง ๆ สำหรับ วัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และมี Raspberry pi เป็นส่วนประมวลผล หลักและเกตเวย์ในส่งข้อมูลที่ได้ออกไป เก็บไว้ที่คลาวด์เซิร์ฟเวอร์
2017	Edy Winarno, Wiwien Hadikurniawati	Location Based Service for Presence System Using Haversine Method	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการระบุ ตำแหน่ง GPS โดยใช้วิธีการของฮาร์ ซิน ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะนำตำแหน่ง ตำแหน่งสองตำแหน่งเพื่อหา ระยะห่างระหว่างตำแหน่งทั้งสอง
2017	Mayuresh Desai, Arati Phadke	Internet of Things based vehicle monitoring system	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการนำ เทคโนโลยี IoT มาทำการติดตาม ตำแหน่ง GPS ความเร็วของรถ อุณหภูมิของรถ ซึ่งข้อมูลจะถูกเก็บ ไว้ที่ฐานข้อมูลแบบตามเวลาจริง และข้อมูลที่เป็นตำแหน่งจะถูก แสดงผ่าน Google map
2018	Wu-Jeng Li, Chiaming Yen, You-Sheng Lin, Shu-Chu Tung, and ShihMiao Huang	JustIoT Internet of Things based on the Firebase Real- time Database	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้ ฐานข้อมูลแบบตามเวลาจริงของ Google Firebase ในการเก็บข้อมูล ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สร้างเว็บแอป พลิเคชันมือถือที่พัฒนาขึ้นเอง โดย ใช้ชื่อ JustIoT โดยทำหน้าที่ควบคุม อุปกรณ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2018	Swapnil Hattarge, Akshay Kekre, Ashwin Kothari	LoRaWAN based GPS tracking of city-buses for smart public transport system	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในการส่ง ตำแหน่งของยานพาหนะ ซึ่งการส่งข้อมูลในวิทยานิพนธ์เลือกใช้คือ LoRaWAN ที่มีหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลไปพื้นฐานข้อมูล และมีการติดตามตำแหน่งผ่านแอปพลิเคชัน
2019	Sundar Anand, Annie Johnson, Priyanka Mathikshara	Real-time GPS tracking using serverless architecture and ARM processor	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการติดตามตำแหน่ง GPS แบบตามเวลาจริงโดยใช้ serverless ซึ่งตำแหน่ง GPS จะถูกแสดงผ่านเว็บไซต์
2019	นายจิตติวัชร สมุหศิลป์	การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์ อัตโนมัติสนับสนุนการ จัดการไฟฟ้าดับโดยใช้ เทคโนโลยี LoRaWAN	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการนำเทคโนโลยี LoRaWAN มาใช้ในการส่งค่าหรือสถานะของระบบจัดการไฟฟ้า
2019	นายณรวัฒน์ สุขะไท	ระบบควบคุมไฟฟ้าแสง สว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้ การสื่อสารแบบเครือข่าย	วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารแบบเครือข่าย LoRaWAN ในการควบคุมการส่องสว่างของไฟถนนในช่วงเวลากลางคืน เพื่อลดใช้ไฟฟ้าให้น้อยลงจากปกติ

## 2.14 กล่าวสรุป

ทฤษฎีความรู้พื้นฐาน หลักการที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งพิธีศรัทธากรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นทฤษฎีความรู้พื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการส่งข้อมูล บริการเครือข่ายประมวลผลแบบกลุ่มเมฆที่ใช้เป็นฐานข้อมูลในการเก็บผลในการตรวจสอบ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตาม GPS การใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลORA และการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN) มาประยุกต์ใช้





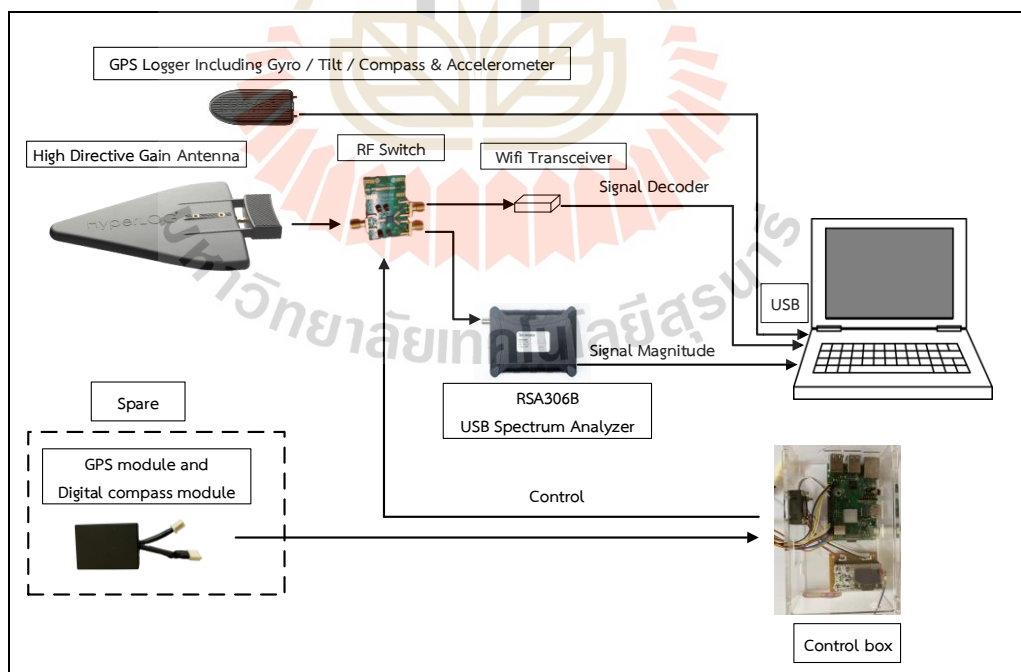
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบเครื่องข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยจะกล่าวถึงการออกแบบระบบเครื่องข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในการติดตาม GPS การออกแบบการส่งตำแหน่ง GPS และทิศทางการหมุนของสายอากาศไปเก็บที่ฐานข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ และการออกแบบซอฟต์แวร์

#### 3.2 การออกแบบระบบการติดตามโดยใช้เครื่องข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

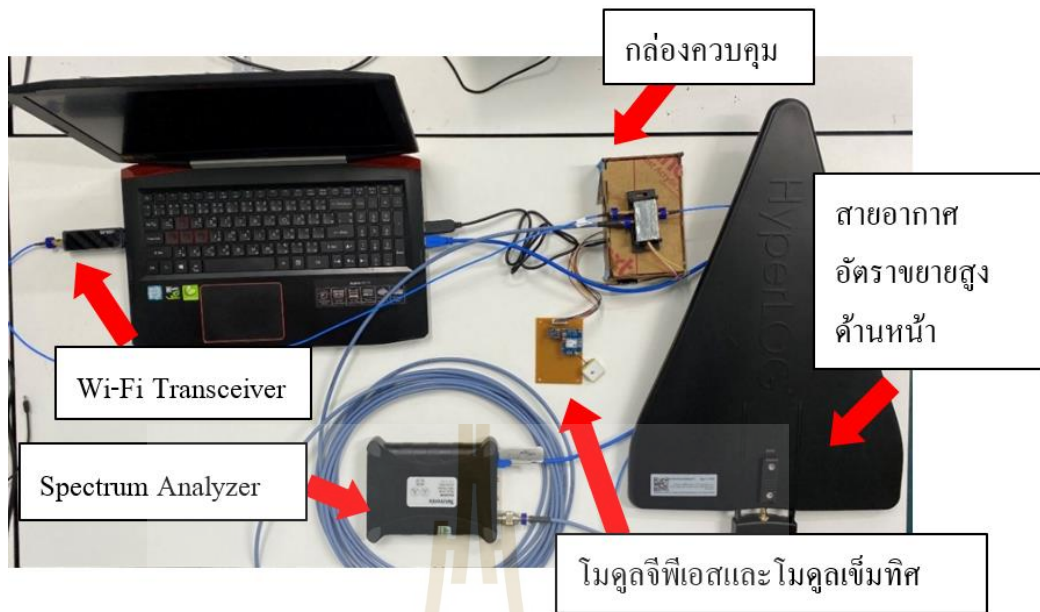


รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบทั้งหมด

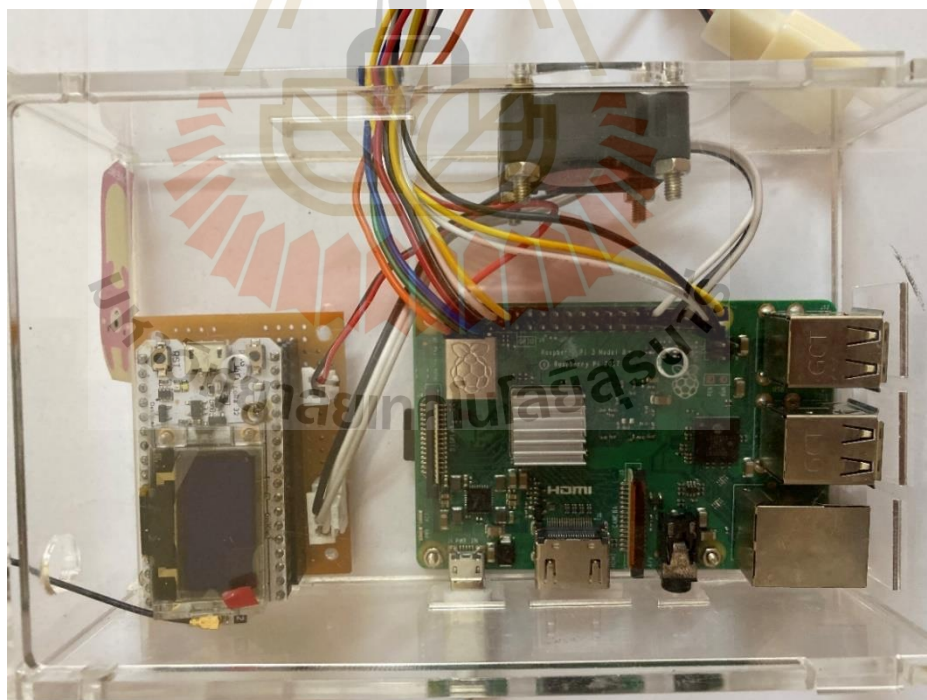
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการออกแบบระบบการติดตาม โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะออกแบบในส่วนของการติดตามตำแหน่ง GPS ของระบบสำรอง และการควบคุมการเลือกใช้งานของ RF Switch ในการเลือกอ่านข้อมูลผ่านทางอุปกรณ์ Wi-Fi Transceiver หรือเลือกอ่านผ่านทางเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่โดยการทำงานของระบบทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังนี้

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพระบบทั้งหมด โดยมีสายอากาศอัตรายายสูงด้านหน้า (High Directive Gain Antenna) ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณการใช้คลื่นความถี่จากเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำในช่วงที่กำหนด และด้านบนของสายอากาศอัตรายายสูงด้านหน้ามี GPS Logger (ระบบหลัก) โมดูล GPS และ โมดูลเชื่อมต่อที่ระบบสำรองติดตั้งอยู่ ทำหน้าที่บอกตำแหน่ง GPS และทิศทางของสายอากาศอัตรายายสูงด้านหน้าในบริเวณที่ทำการตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ซึ่งกล่องควบคุมจะนำตำแหน่ง GPS และทิศทางของสายอากาศอัตรายายสูงด้านหน้าที่รับได้ ส่งไปเก็บที่บริการเครือข่ายประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ Firebase

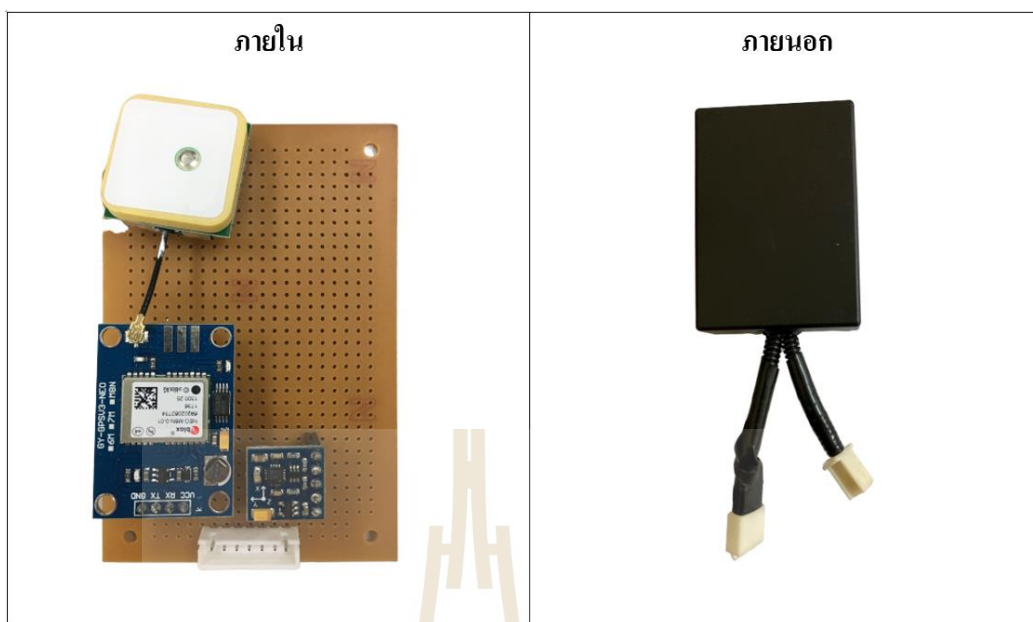
ผู้วิจัยได้ออกแบบให้กล่องควบคุมทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ที่ใช้เชื่อมต่อไปที่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต และกล่องควบคุมยังทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลในการรับตำแหน่ง GPS ทิศทางการหมุนของสายอากาศอัตรายายสูงด้านหน้า และความถี่ของ RF switch ให้สายอากาศเลือกอ่านข้อมูลที่บ่งบอกความถี่และระดับของสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ (frequency and Signal Magnitude) ผ่านทางเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่หรือเลือกที่จะอ่านข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณไวไฟที่เป็นเป้าหมาย เช่น Mac Address, access point brand, Wi-Fi channel, signal level เป็นต้น โดยผ่านทางอุปกรณ์ Wi-Fi Transceiver และภายในกล่องควบคุมมีรหัสเบอร์รีพายที่ทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลหลักและเกตเวย์หลักที่ส่งข้อมูลผ่านสายแลนเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ซึ่งทำหน้าที่เกตเวย์สำรองในกรณีที่บริเวณทดสอบไม่มีสัญญาณ 3G/4G อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม



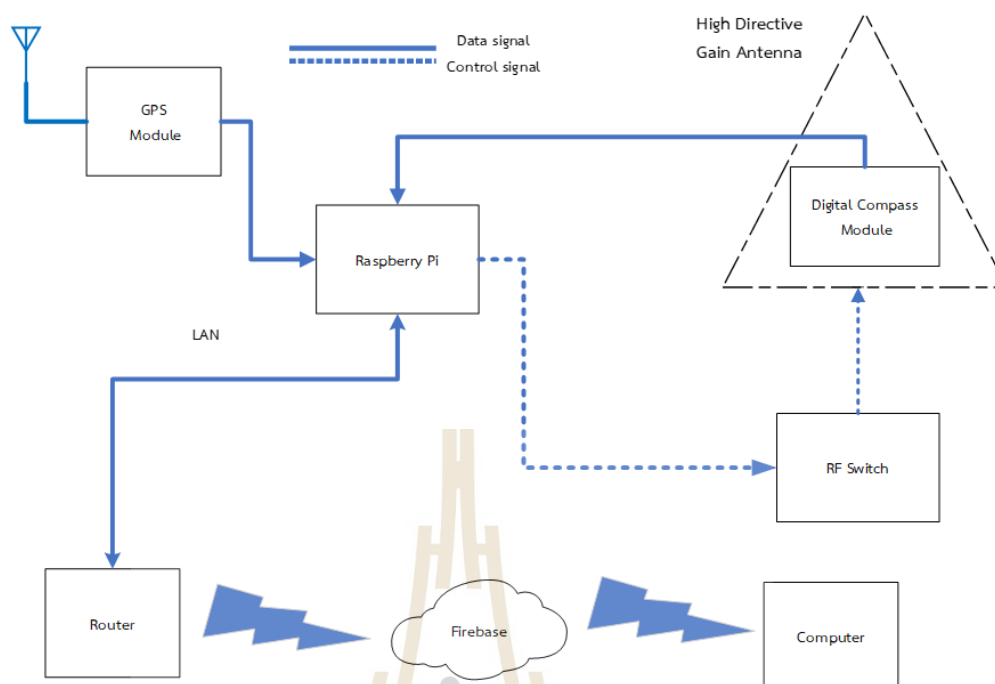
รูปที่ 3.4 โมดูล GPS และ โมดูลเชื่อมต่อซีเรียล

### 3.3 การออกแบบระบบการส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการออกแบบการส่งข้อมูลไร้สายเข้าสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ทุกสภาพแวดล้อม ผู้วิจัยจึงได้แบ่งออกระบบการส่งข้อมูลไร้สายที่เชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเป็น 2 กรณี ดังนี้

#### 3.3.1 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบ 3G/4G

จากรูปที่ 3.5 คือแผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่ตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G จะใช้สายแลนที่เชื่อมกับเราเตอร์ที่ใช้เครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G ในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต แทนการใช้ที่งานของ Wi-Fi เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่วิทยุกำลังส่ง เช่น การใช้คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ของ Wi-Fi หรือการใช้คลื่นความถี่ย่าน UHF ของโคโรน เป็นต้น เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนของคลื่นความถี่ที่ตรวจสอบ จึงทำให้ต้องใช้สายแลนแทนการใช้งาน Wi-Fi



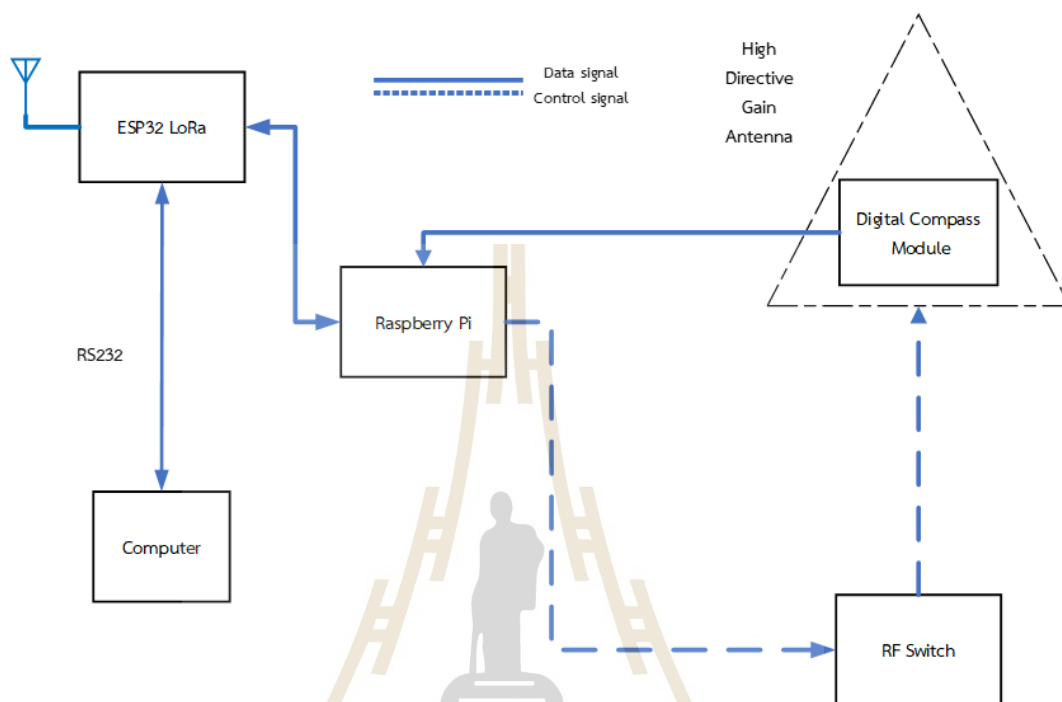
รูปที่ 3.5 แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G

ในกรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G ยานพาหนะแต่ละคันจะสามารถแยกกันทำงานได้ โดยตำแหน่ง GPS และทิศทางการหมุนของสายอากาศที่ถูกส่งไปเก็บที่ฐานข้อมูล Firebase และคอมพิวเตอร์จะดึงข้อมูลที่เก็บใน Firebase มาแสดงให้ผู้ใช้ อีกทั้งผู้ใช้ยังสามารถควบคุมการเลือกใช้งานของสายอากาศผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีราสเบอร์รี่พายในการรับคำสั่งและควบคุมการทำงานของ RF Switch ให้สายอากาศเลือกการอ่านข้อมูล

### 3.3.2 บริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบ 3G/4G

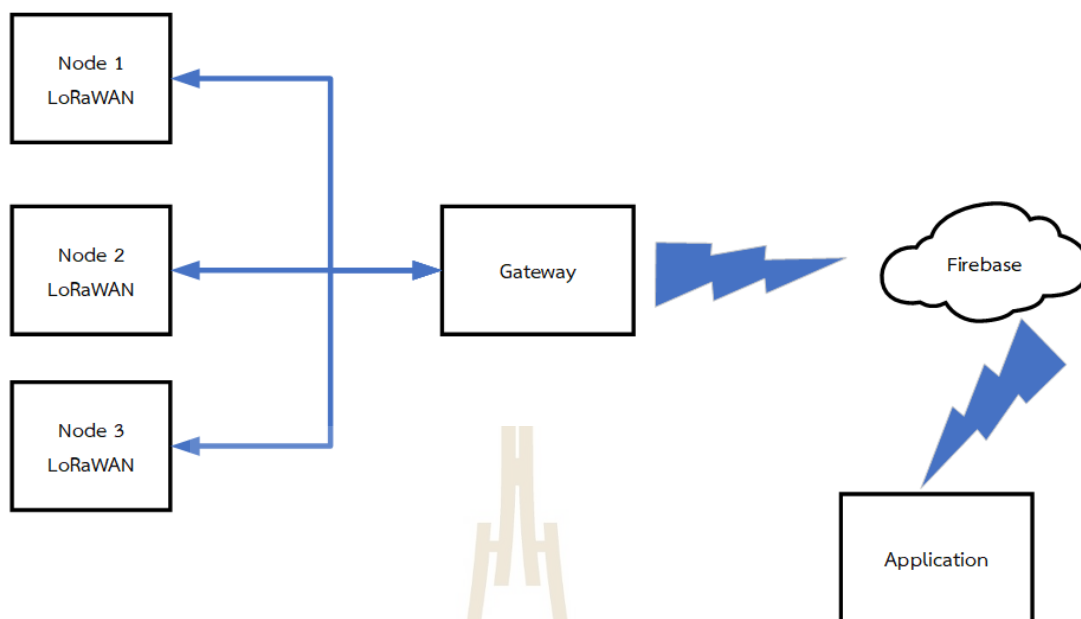
จากรูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ที่อยู่บริเวณที่ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ รับตำแหน่ง GPS และทิศทางการหมุนของสายอากาศจากราสเบอร์รี่พาย จะทำการส่งข้อมูลไปที่ ESP32 LoRa ที่อยู่ในบริเวณที่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ หลังจากนั้น ESP32 LoRa

ที่อยู่ในบริเวณที่มีสัญญาณ สัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะส่งข้อมูลให้  
 ราวสเบอร์รี่พาย ให้ราวสเบอร์รี่พายส่งข้อมูลเข้าฐานข้อมูล Firebase



รูปที่ 3.6 แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูล กรณีบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุ  
 กำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3G/4G

โดย ESP32 LoRa ที่อยู่ในบริเวณที่ไม่มีสัญญาณ 3G/4G นั้น ผู้วิจัยจะเรียกว่า โหนด LoRa  
 WAN ซึ่งแต่ละโหนดจะมีหน้าที่รับตำแหน่งของ GPS และทิศทางการบินของสายอากาศ ส่ง  
 ข้อมูลของแต่ละโหนดไปที่ฐานข้อมูลผ่าน เกตเวย์ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการออกแบบการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีลอรา

### 3.4 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ

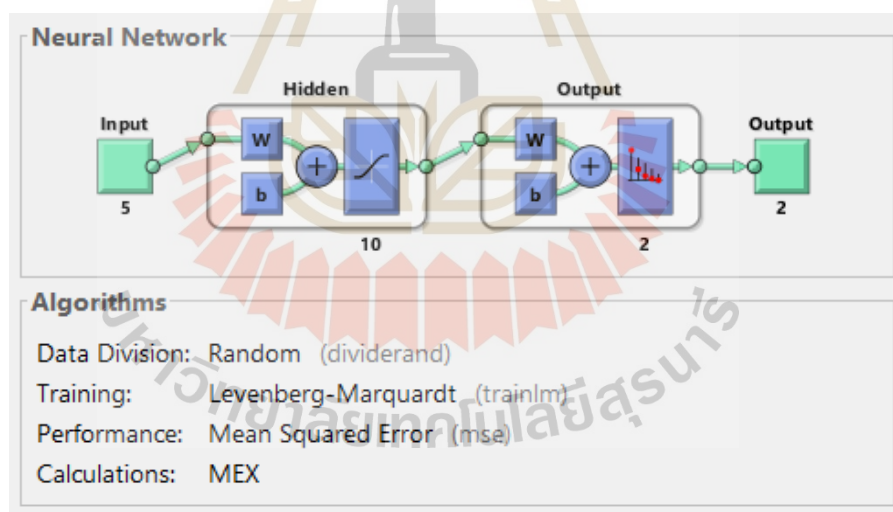
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ และตรวจสอบกำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับนั้น เกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ ผู้วิจัยจึงจำลองสถานการณ์เพื่อเก็บข้อมูลกำลังส่งของสายอากาศภาครับ โดยติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (WAVLINK WN570HAI AC600) ซึ่งทำหน้าที่แทนอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายที่ต้องการตรวจจับสัญญาณ จากนั้นทำการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ในสถานที่ต่าง ๆ ดังนี้

1. หอสุรนภา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. โรงอาหารครัวท่าน้าว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, F11)
4. อาคารศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. บริเวณโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถานที่ที่ 1 ถึงสถานที่ที่ 4 จะทำการติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายไว้ภายในอาคาร เพื่อทดสอบตรวจจับคลื่นวิทยุกำลังส่งต่ำในสภาพแวดล้อมจริง แต่ในบริเวณโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจะเป็นการเก็บข้อมูลในลักษณะที่เป็นเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of sight) เพื่อเก็บระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้สูงสุดที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่นั้น ๆ และในการเก็บข้อมูลนี้จะทดสอบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยใช้ยานพาหนะทั้ง 4 คัน และอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นวิทยุกำลังส่งต่ำแบบหิ้วถือ ทำการตรวจจับในตำแหน่ง ทิศทางเดียวกัน พร้อมทั้งบันทึกที่ระยะห่าง ค่าสูญเสียของสาย ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่

### 3.4.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม

ผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือ Shallow Neural Network ซึ่งเป็นเครื่องมือบนโปรแกรม MATLAB R2019a จากนั้นผู้วิจัยใช้อัลกอริทึม Levenberg Marquardt เพื่อฝึกฝนและทำนายข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งอัลกอริทึม Levenberg Marquardt จะใช้ฟังก์ชันในการรับผลรวมการประมวลผล (Activation Function) คือ Sigmoid Function



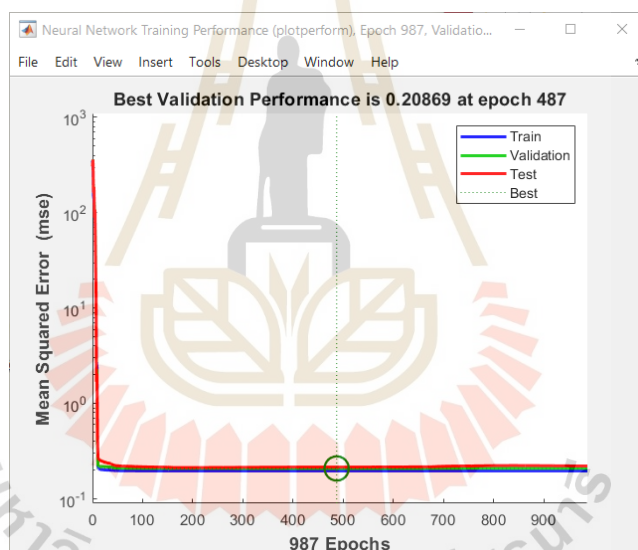
รูปที่ 3.8 แผนภาพโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพโคะแกรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบ โดยกำหนดให้มีชั้นอินพุตหนึ่งชั้น 5 โหนดโดยแต่ละโหนดคือข้อมูลความถี่ ค่าสูญเสียในอากาศ ระดับสัญญาณที่รับได้ ค่าสูญเสียในเคเบิลตามลำดับจำนวนชั้นซ่อนจำนวน 10 ชั้นและจำนวนชั้นเอาต์พุตหนึ่งชั้น 2 โหนด

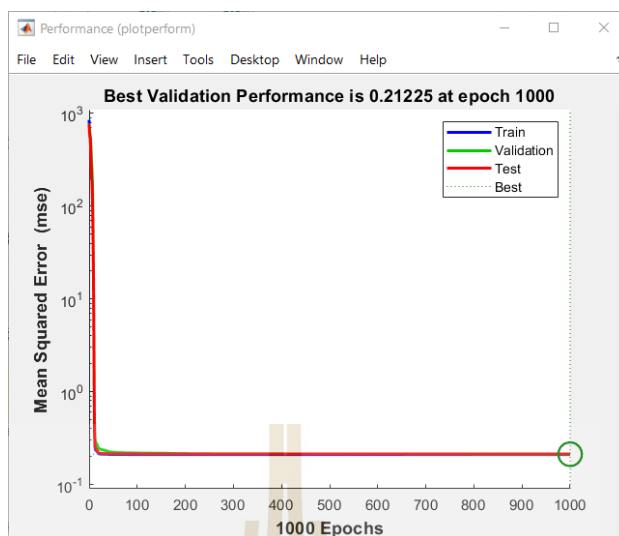


### 3.4.2 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

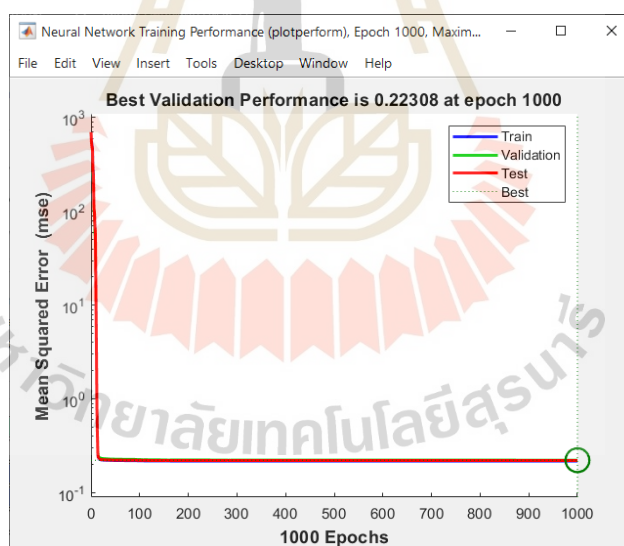
ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้อัลกอริทึม Levenberg Marquardt โดยผู้วิจัยแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ส่วนของการฝึกฝน (Training) 70% ส่วนของการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) 15% และส่วนของการทดสอบ (Test) 15% ซึ่งข้อมูลทั้งหมด จะทำการสุ่มไปที่ส่วนต่าง ๆ ข้างต้น โดยเป้าหมายคือการทำนายค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ และทำนายระดับกำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ นั้นเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดถูกสุ่มทำให้จำเป็นต้องทำการฝึกฝน หลายครั้งและปรับจำนวนชั้นซ่อน ซึ่งผลที่ทำการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมโดยนำค่าที่ดีที่สุด 8 ครั้ง ประสิทธิภาพของการฝึกฝน การตรวจสอบความถูกต้อง และการทดสอบของ โครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.16



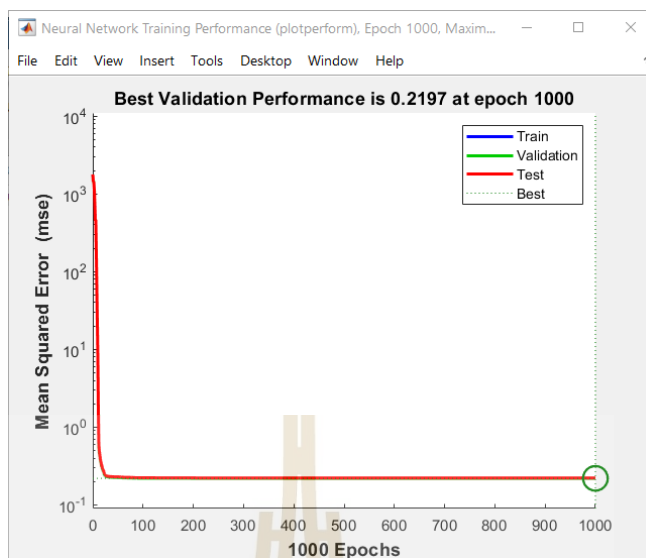
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบ (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 1



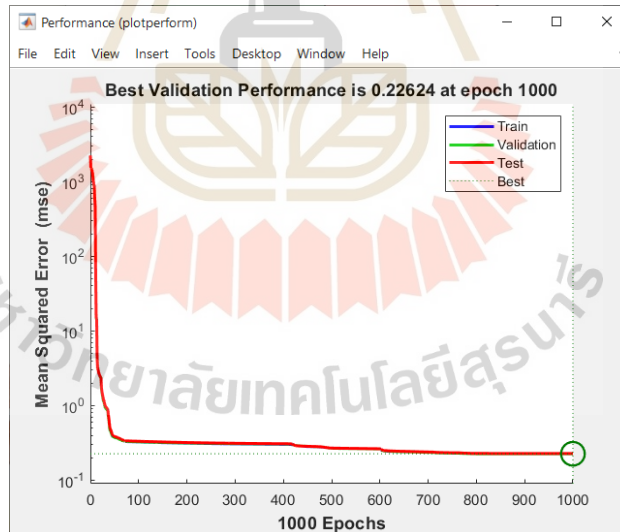
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 2



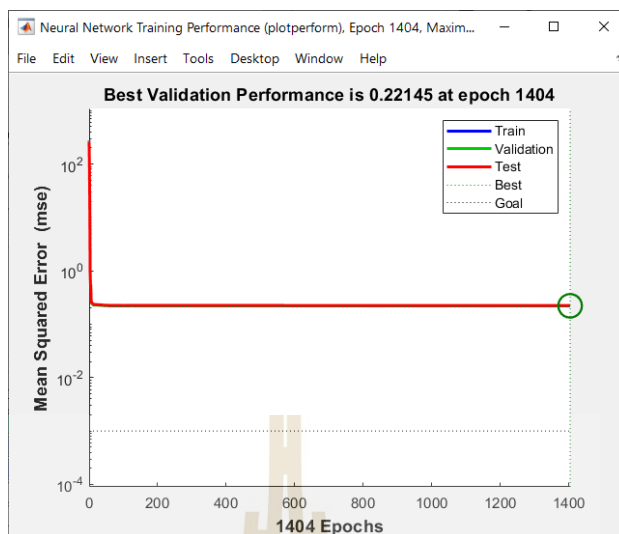
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 3



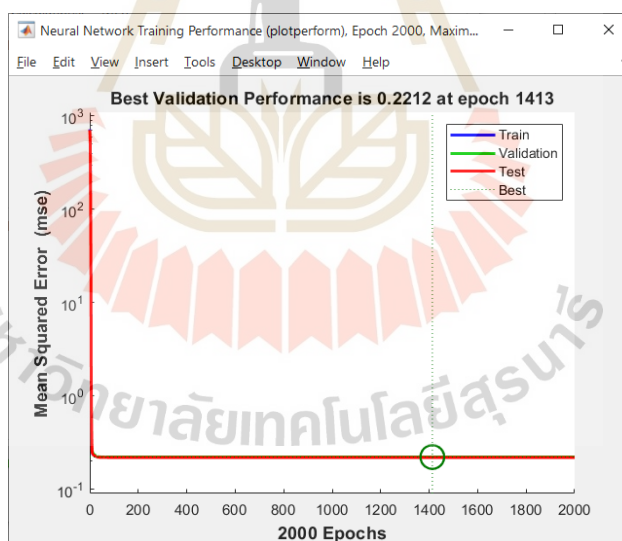
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 4



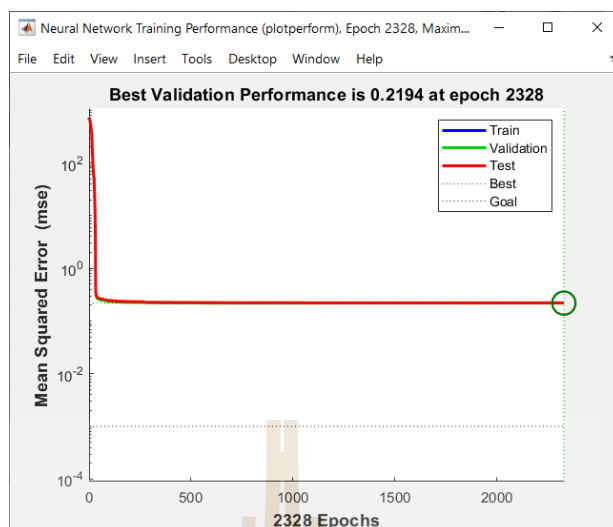
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 5



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 6

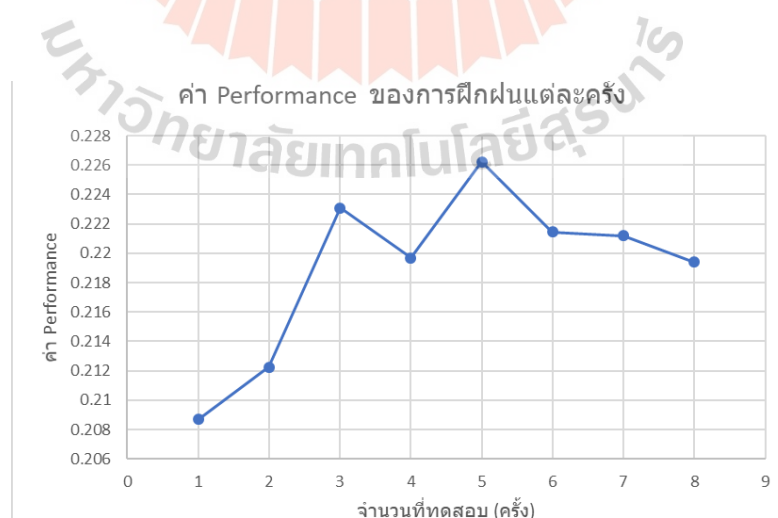


รูปที่ 3.15 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 7



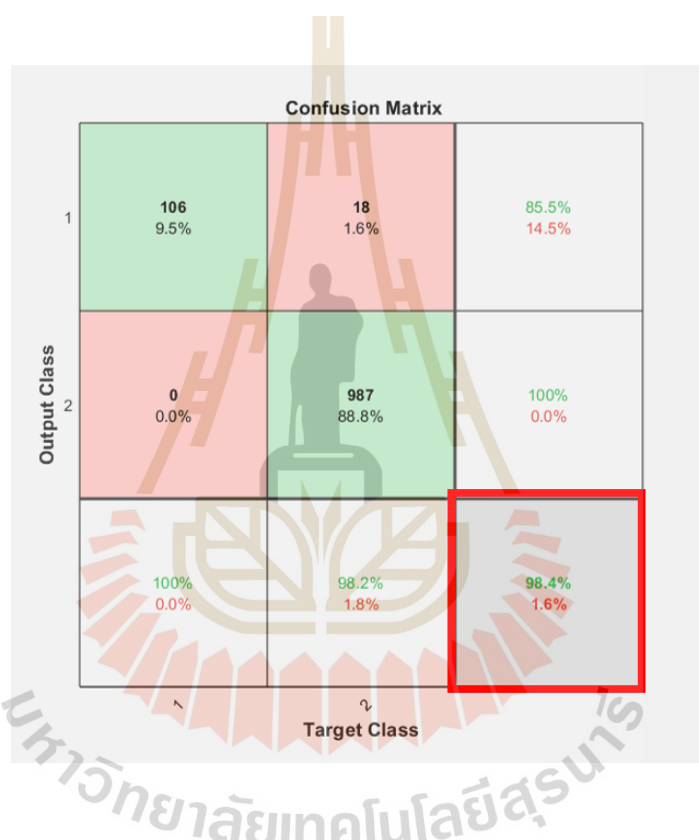
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการฝึกฝน (Training) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และการทดสอบ (Test) ครั้งที่ 8

จากรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.16 จะสังเกตเห็นว่าผลของการฝึกฝน (Train) การทดสอบ (Test) และการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) เส้นกราฟแสดงผลไปในแนวโน้มเดียวกัน แต่ช่วงของการตรวจสอบความถูกต้องมีค่านี้อย่างน้อยมาก ๆ อาจเกิดจากชุดข้อมูลในการฝึกฝนนั้นซับซ้อนมากเกินไปหรือชุดข้อมูลในการตรวจสอบง่ายเกินไป ซึ่งผลที่ได้ของการฝึกฝนจากรูปที่ 3.9 - 3.16 สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่า Performance ของการฝึกฝนแต่ละครั้งได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงค่า Performance ของการฝึกฝนแต่ละครั้ง

จากรูปที่ 3.17 ค่า Performance ที่เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดสินใจสิ้นสุดการฝึกสอน โดยค่า Performance ของการตรวจสอบความถูกต้องที่เลือกใช้คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เมื่อสังเกตจากรูปที่ 3.17 ค่า Performance ที่น้อยที่สุด 3 ลำดับคือการฝึกฝนครั้งที่ 5 ครั้งที่ 3 ครั้งที่ 6 ตามลำดับ ซึ่งในการฝึกฝนครั้งที่ 5 และครั้งที่ 3 มีรอบ(Epoch)ในการฝึกฝน 1000 ครั้ง และครั้งที่ 6 มีรอบในการฝึกฝน 1404 ครั้ง ทำให้สามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่า Performance ลดลงถึงค่าหนึ่ง หากเพิ่มรอบในการฝึกฝนที่มากกว่า 1000 ครั้ง ค่า Performance ไม่ได้มีค่าลดลงมาก และผลที่ได้ของการฝึกฝนทั้ง 8 ครั้ง มีตารางวัดความถูกต้องเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตารางวัดความถูกต้อง (Accuracy) ของผลการทำนาย

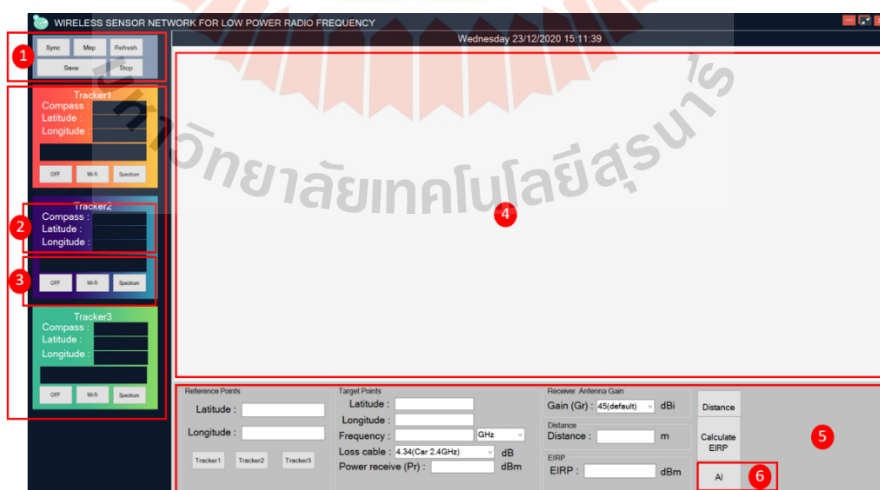
จากรูป 3.18 แสดงเมทริกซ์คอนฟิวชัน (Confusion Matrix) ขนาด 2x2 ซึ่งมีชุดข้อมูลทั้งหมด ชุดโดยเอาต์พุตคลาส 1111(Output Class) และทาร์เกตคลาส (Target Class)ประกอบไปด้วยชุดที่ค่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด ชุดและชุด 124 ที่ค่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศไม่เกินกว่าที่กฎหมายกำหนด ชุด ซึ่งกำหนด 987 ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของอัลกอริทึมมีค่า 2 และ 1 เป็นกลุ่มเป้าหมาย 98.4 ความถูกต้องอยู่ที่% และผิดพลาดไปเพียง 1.6% ซึ่งค่าที่ผิดพลาดจากการทำนายของโครงข่าย

ประสาทยุติวมในลุ่มเป้ำหมายที่ นั้นคือชุดข้อมูลที 1ค้ำก้ำงประสัทธิผลทีแผ่ออกมจาก สยอากาศนั้นมค้ำอยู่ระหว่งค้ำทีเกดควักหมายก้ำหนดและค้ำทีไม่เกนควักทีกหมายก้ำหนด

ชุดข้อมูลทีค้ำก้ำงประสัทธิผลทีแผ่ออกมจากสยอากาศไม่เกนควักทีกหมายก้ำหนดม ชุดข้อมูลทีน้อยเน่องจกอุปกรณ์กระจยสัณญาณอินเตอร์เน็ตไร้สยทีมจ้ำหน่ยอยู่ในปัจจุบันนั้น มกหมายบงค้ำบให้ผลิตอุปกรณ์กระจยสัณญาณอินเตอร์เน็ตไร้สยทีมค้ำก้ำงส่งไม่เกนควักที กหมายก้ำหนด ผู้วิจัยจิงแก้ปัญหโดยใช้อุปกรณ์กระจยสัณญาณอินเตอร์เน็ตไร้สยทีมค้ำก้ำงส่ง มกทีสุดทีหำได้ และทำการตรวจวัดระดับค้ำก้ำงของสัณญาณทีรับได้ทีระยะห่่งจกแหล่งก้ำเนดค ลื่นควมถึในระยะต่ง ๆ เพ้อหำโอกศทีอุปกรณ์ทีกระจยสัณญาณอินเตอร์เน็ตไร้สयरบควน สัณญาณ

### 3.5 การออกแบบซอฟต์แวร์

ในห้วข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการออกแบบซอฟต์แวร์เพ้อใช้ในการติดตมขณพหณะทีติด อุปกรณ์ตรวจสอบสัณญาณควมถึวิทยุค้ำก้ำงต่ำ และสมรถค้ำนวนค้ำก้ำงแผ่คลื่นประสัทธิผล (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) ทีมการแผ่ออกมจกแหล่งก้ำเนดค ลื่นทีเป้นเป้ำหมาย เพ้อใช้ในการศีกษและทำนยค้ำก้ำงแผ่คลื่นควมถึวิทยุนั้น ว่ามโอกาสเกนควักทีกหมาย ก้ำหนดหรือไม่ โดยใช้โครงข่ยประสัทธิม ในรูปที 3.19 แสดงตัวอย่างหน้าจของซอฟต์แวร์ โดยแสดงรายละเอียดคั่งตอไปนี้



รูปที 3.19 ตัวอย่างหน้าจซอฟต์แวร์การติดตมขณพหณะทีติดอุปกรณ์ ตรวจสอบสัณญาณควมถึวิทยุค้ำก้ำงต่ำ

- หมายเลข 1 เป็นส่วนของเครื่องมือต่าง ๆ เช่น ปุ่มที่ใช้เชื่อมต่อข้อมูลกับฐานข้อมูลออนไลน์ ปุ่มบันทึกตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศของยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบ สัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ ปุ่มที่แสดงตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศมาแสดงในรูปแบบของแผนที่ เป็นต้น
- หมายเลข 2 เป็นส่วนที่แสดงตำแหน่ง และทิศทางของสายอากาศของยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำแต่ละคัน
- หมายเลข 3 เป็นส่วนที่แสดงสถานะและควบคุมการทำงานของ RF Switch ของยานพาหนะแต่ละคัน
- หมายเลข 4 เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลในรูปแบบของแผนที่ ผ่าน Google map
- หมายเลข 5 เป็นส่วนที่ใช้คำนวณหาค่าระยะทาง และค่ากำลังแผ่คลื่นประสิทธิผล
- หมายเลข 6 เป็นส่วนการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะทำนายค่ากำลังแผ่คลื่นประสิทธิผลที่ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่นั้น เกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ สำหรับส่วนการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียมนี้ จะมีซอฟต์แวร์แยกออกมาจากซอฟต์แวร์หลัก ซึ่งสามารถทำงานแบบออนไลน์ได้ ซอฟต์แวร์ส่วนการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 3.20

The image shows a software interface window titled "GUI\_AI\_ver1". Inside the window, there is a section labeled "Data" containing several input fields: "Frequency (GHz) :", "Distance (m) :", "Power receive (Pr) :", and "Loss cable :". Below these fields is a "Calculate" button. At the bottom of the window, there is an output field labeled "EIRP (dB) :". The window has standard Windows-style title bar controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างหน้าจอซอฟต์แวร์การทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียม



ซอฟต์แวร์ที่ออกแบบนั้นมีความสามารถดังนี้

- ระบุตำแหน่งของยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ
- ระบุทิศทางการหมุนของสายอากาศ
- สามารถแสดงรายละเอียด ละติจูด ลองจิจูด ทิศทาง วัน เวลา แบบตามเวลาจริง
- ควบคุมการใช้งานของ RF Switch
- คำนวณค่ากำลังแผ่คลื่นประสิทธิผล โดยเทียบกับตำแหน่งของยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำแต่ละคัน
- สามารถทำนายค่ากำลังแผ่คลื่นประสิทธิผลนั้นมีโอกาสเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด
- สามารถบันทึกตำแหน่งของยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ ทิศทางการหมุนของสายอากาศ และค่ากำลังแผ่คลื่นประสิทธิผล

หลักการการทำงานของซอฟต์แวร์นี้จะนำข้อมูลต่าง ๆ ในฐานข้อมูล Firebase ที่บอร์ดราสเบอร์รี่พาย ส่งมาเก็บไว้แบบตามเวลาจริง เช่น ละติจูด ลองจิจูด ทิศทางของสายอากาศของยานพาหนะแต่ละคัน เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นจะนำมาแสดงทั้งในลักษณะตัวเลขและตำแหน่งในรูปแบบแผนที่ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเลือกใช้งานของ RF Switch ในการเลือกอ่านข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณไวไฟที่เป็นเป้าหมายผ่านทางอุปกรณ์ Wi-Fi Transceiver ผ่านโปรแกรม Wi-Fi Analyzer ของรถแต่ละคัน หรือเลือกอ่านข้อมูลที่บ่งบอกความถี่และระดับของสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ ผ่านทางเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่โดยระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่อ่านได้จากโปรแกรม Signalvu-pc ซึ่งในการอ่านค่าจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ จะถูกนำมาหาค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ และนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ทำนายผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศและทำนายระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่นั้นมีโอกาสเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ ซึ่งตำแหน่งของยานพาหนะที่ติดตั้งอุปกรณ์ ทิศทางของสายอากาศ ตำแหน่งที่คาดการณ์ว่าเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูล Firebase

### 3.6 กล่าวสรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ในการติดตาม GPS สำหรับระบบตรวจจับคลื่นวิทยุกำลังส่งต่ำ โดยอธิบายกระบวนการในการทำงานการติดตาม GPS และการรับส่งข้อมูลของระบบตรวจจับคลื่นวิทยุกำลังส่งต่ำ ทั้งในกรณีรับส่งข้อมูลในบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำมีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ และบริเวณที่การตรวจสอบคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ไม่มีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโทรศัพท์เคลื่อนที่ อีกทั้งยังนำเสนอการออกแบบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ทิศทางของเสาอากาศ เพื่อใช้ในการตรวจสอบการทำงานของยานพาหนะที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ และทำนายผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากเสาอากาศ พร้อมทั้งทำนายระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่นั้นมีโอกาสมากกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ผู้วิจัยนำเสนอผลการทดสอบการทำงานของระบบต่าง ๆ เช่น การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ GPS การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานทิศทางการหมุนของสายอากาศ การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา การทดสอบการทำงานของ RF Switch การทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล ผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ เทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม และผลการทดสอบซอฟต์แวร์

#### 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ GPS

ทดสอบรับตำแหน่ง GPS ของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบพกพา Garmin รุ่น eTrex 10 และโมดูลรับสัญญาณ GPS Ublox Neo M8N ในตำแหน่งเดียวกัน 10 ตำแหน่ง และนำตำแหน่งที่รับได้จากทั้งสองมาเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน โดยใช้สูตรตรีโกณมิติทรงกลมของโคไซน์ ดังสมการ (4.1)

$$d = R \cos^{-1} \left( \left( \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \right) + \left( \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\lambda_2 - \lambda_1) \right) \right) \quad (4.1)$$

โดย	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง
	$R$	คือ รัศมีของโลก (ค่าเฉลี่ยรัศมี = 6,371 km)
	$\varphi_1$	คือ ละติจูดของตำแหน่งที่ 1
	$\varphi_2$	คือ ละติจูดของตำแหน่งที่ 2
	$\lambda_1$	คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ 1
	$\lambda_2$	คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบโดยใช้สมการที่ (4.1) ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณของระยะห่างของตำแหน่งทั้งสอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้รับจากโมดูลรับสัญญาณ GPS Ublox Neo M8N  
เทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมพกพา Garmin รุ่น eTrex 10

ลำดับที่	Garmin รุ่น eTrex 10			Ublox Neo M8N			ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
	จำนวนดาวเทียมที่รับได้	ละติจูด	ลองจิจูด	จำนวนดาวเทียมที่รับได้	ละติจูด	ลองจิจูด	
1	17	14.87420	102.0184	12	14.87420	102.01841	0.7886
2	17	14.87337	102.0187	12	14.87336	102.01869	2.3885
3	17	14.87371	102.0189	12	14.87370	102.01894	2.1355
4	17	14.87423	102.0196	12	14.87420	102.01959	3.8923
5	17	14.87374	102.0202	12	14.87375	102.02021	3.5812
6	17	14.87330	102.0205	12	14.87330	102.02048	2.8034
7	17	14.87206	102.0197	12	14.87207	102.01975	1.5857
8	17	14.87266	102.0195	12	14.87269	102.01956	3.5585
9	17	14.87296	102.0197	12	14.87294	102.01972	3.0645
10	17	14.87370	102.0204	12	14.87370	102.02043	2.0406

จากตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้รับจากโมดูลรับสัญญาณ GPS Ublox Neo M8N เทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมพกพา Garmin รุ่น eTrex 10 พบว่าเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมพกพา Garmin รุ่น eTrex 10 รับสัญญาณจากดาวเทียมได้มากกว่าโมดูลรับสัญญาณ GPS Ublox Neo M8N ณ เวลาที่ทดสอบจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความคลาดเคลื่อนยังอยู่ในช่วงที่สามารถรับได้

#### 4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานทิศทางการหมุนของสายอากาศ

การทดสอบการทำงานการหมุนของสายอากาศจะเป็นการทดสอบโมดูลเข็มทิศดิจิทัลที่จับบอกลังทิศทางการหมุนของสายอากาศ โมดูลเข็มทิศดิจิทัลจะเปรียบเทียบกับเข็มทิศดิจิทัลจากเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger โดยค่าความคลาดเคลื่อนของโมดูลเข็มทิศดิจิทัลเมื่อเทียบกับเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger จะทดสอบวัดทิศทางของเข็มทิศทดสอบเพิ่มครั้งละ 10 องศา ตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบทิศทางที่ได้รับจากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลเทียบกับเข็มทิศดิจิทัลจาก  
เครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger

ลำดับที่	Aaronia GPS Logger	โมดูลเข็มทิศดิจิทัล	ค่าความคลาดเคลื่อน (องศา)
1	10°	5°	5°
2	20°	20°	0°
3	30°	30°	0°
4	40°	40°	0°
5	50°	50°	0°
6	60°	62°	2°
7	70°	73°	3°
8	80°	83°	3°
9	90°	92°	2°
10	100°	104°	4°
11	110°	113°	3°
12	120°	123°	3°
13	130°	133°	3°
14	140°	143°	3°
15	150°	150°	0°
16	160°	161°	1°
17	170°	171°	1°
18	180°	181°	1°
19	190°	190°	0°
20	200°	198°	2°
21	210°	207°	3°
22	220°	217°	3°
23	230°	224°	6°
24	240°	233°	7°
25	250°	246°	4°

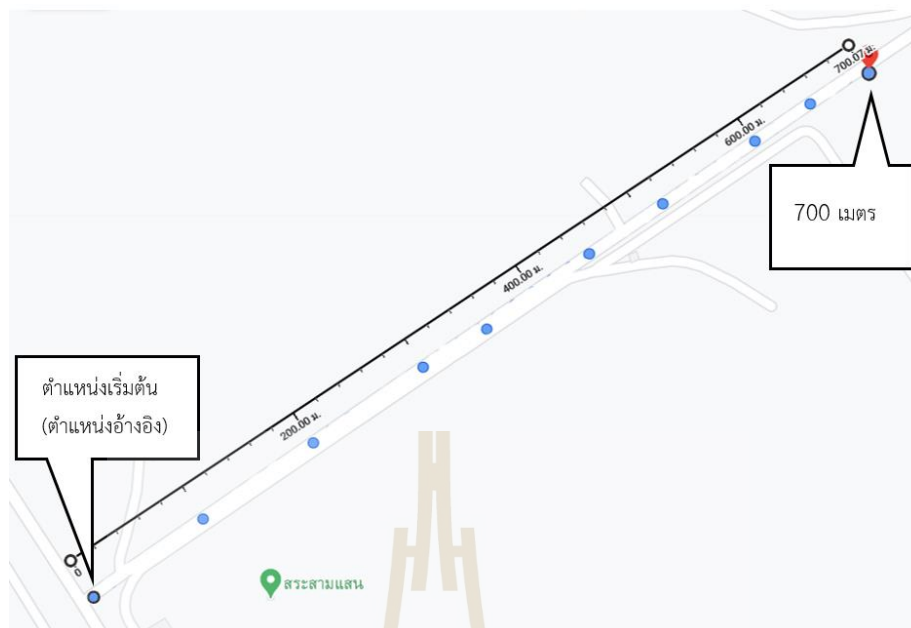
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบทิศทางที่ได้รับจากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลเทียบกับเข็มทิศดิจิทัลจากเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger (ต่อ)

ลำดับที่	Aaronia GPS Logger	โมดูลเข็มทิศดิจิทัล	ค่าความคลาดเคลื่อน (องศา)
26	260°	255°	5°
27	270°	264°	6°
28	280°	276°	4°
29	290°	282°	8°
30	300°	292°	8°
31	310°	303°	7°
32	320°	312°	8°
33	330°	324°	6°
34	340°	337°	3°
35	350°	348°	2°
36	360° หรือ 0°	355°	5°

จากตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบโดยหมุนโมดูลเข็มทิศดิจิทัลและเข็มทิศดิจิทัลจากเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger พร้อม ๆ กันจนครบ 360 องศา พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของโมดูลเข็มทิศดิจิทัลเมื่อเทียบกับเข็มทิศดิจิทัลจากเครื่องรับสัญญาณ Aaronia GPS Logger มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.361 องศา

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา

การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอราเป็นการทดสอบเพื่อหาระยะทางที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ที่ใช้สายอากาศที่มีอัตราการขยาย 3 dB และความถี่ 915 MHz ในการรับส่งข้อมูล ว่าส่งได้ระยะทางมากที่สุดเท่าไร และระดับความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSSI) มีค่าเท่าไร โดยการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบบริเวณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง เพื่อให้ได้ระยะที่หวังผลมากที่สุด ตำแหน่งและระยะทางทั้งหมดในการทดสอบการรับส่งข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงตำแหน่งและระยะทางทั้งหมดในการทดสอบการรับส่งข้อมูล

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูล GPS โดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	RSSI (dBm)
1	0	14.878514	102.007366	-5
2	110	14.879125	102.008216	-112
3	220	14.879777	102.009119	-112
4	320	14.880171	102.009847	-111
5	350	14.880390	102.010224	-113
6	450	14.880824	102.010903	-115
7	520	14.881156	102.011408	-118
8	600	14.881435	102.011917	-118
9	650	14.881787	102.012361	-120
10	700	14.882047	102.012779	-121

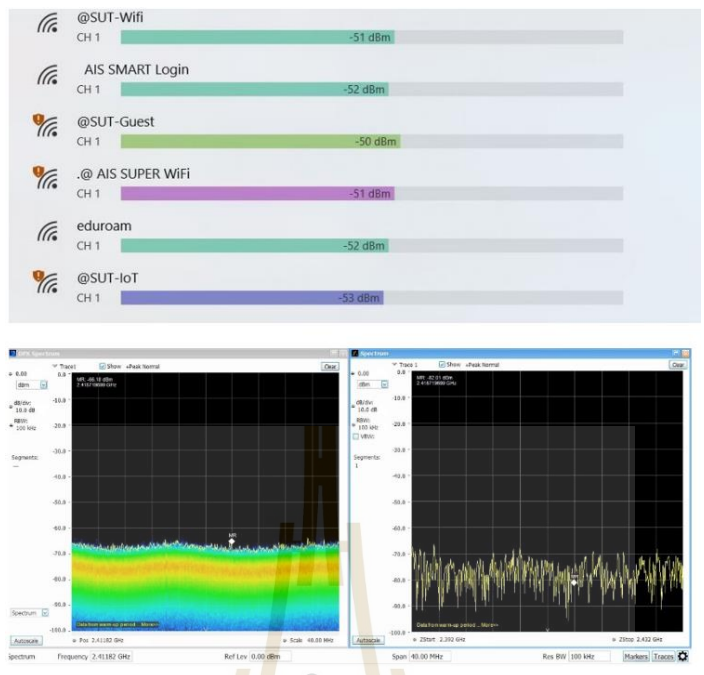
จากตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูล GPS โดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา ที่ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ตำแหน่ง โดยลำดับที่ 1 คือตำแหน่ง GPS เริ่มต้น ซึ่งใช้ในการอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งทั้งหมด ส่วนลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 10 คือตำแหน่งที่ได้จากโมดูล GPS ที่เคลื่อนที่ไปในระยะทางต่าง ๆ ส่งข้อมูลให้ตัวรับที่อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งระยะทางที่หวังผลในการรับส่งข้อมูลมากที่สุดคือ 700 เมตร ถ้าเกินกว่านี้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ไม่สามารถรับส่งข้อมูลกันได้ และจากการทดสอบพบว่าระยะ 0 ถึง 600 เมตรเป็นช่วงที่มีการส่งข้อมูลโดยใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 10 วินาที ตามระยะห่างของระยะทาง หากเกินระยะ 600 เมตร เวลาในการรับส่งข้อมูลจะใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 90 วินาที

#### 4.5 การทดสอบการควบคุม RF Switch

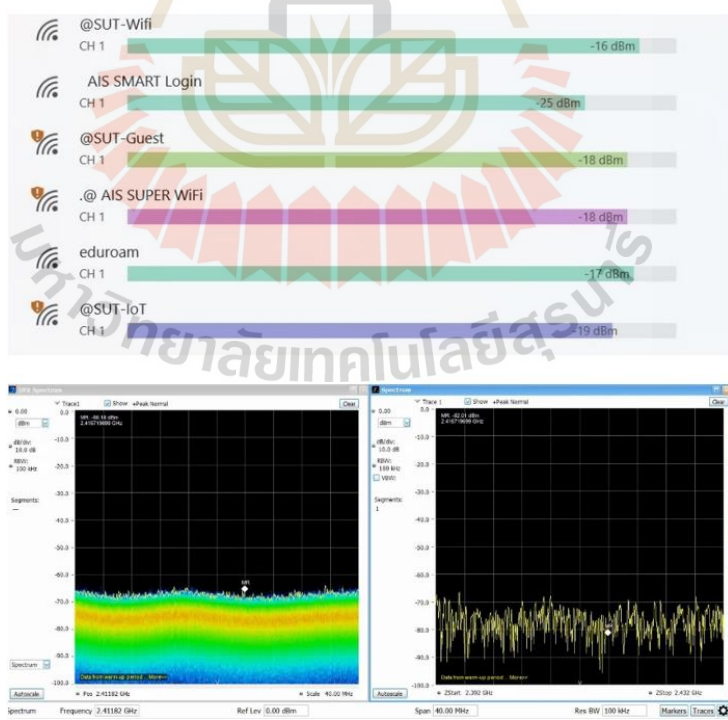
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบควบคุม RF Switch การควบคุมการทำงานของ RF Switch จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมตำแหน่งการเลือกสัญญาณ ในการทดสอบการควบคุม RF Switch แบ่งได้เป็น 3 กรณีดังนี้

1. กรณีก่อนเปิดใช้งาน RF Switch ซึ่งแสดงระดับความแรงของสัญญาณเครือข่ายไร้สายที่วัดได้จากสายอากาศมาตรฐานที่ติดมากับคอมพิวเตอร์และเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ที่ยังไม่ได้เปิดใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.2
2. กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย ซึ่งระดับความแรงของสัญญาณเครือข่ายไร้สายที่วัดได้จากสายอากาศอัตราขยายสูงด้านหน้ามีความแรงของสัญญาณเครือข่ายไร้สายมากกว่า สายอากาศที่ติดมากับคอมพิวเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมยังไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากยังไม่ได้ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4.3
3. กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านค่าจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ ซึ่งระดับความแรงของสัญญาณเครือข่ายไร้สายจะเหมือนในกรณีแรก แต่สเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ จะเกิดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.4

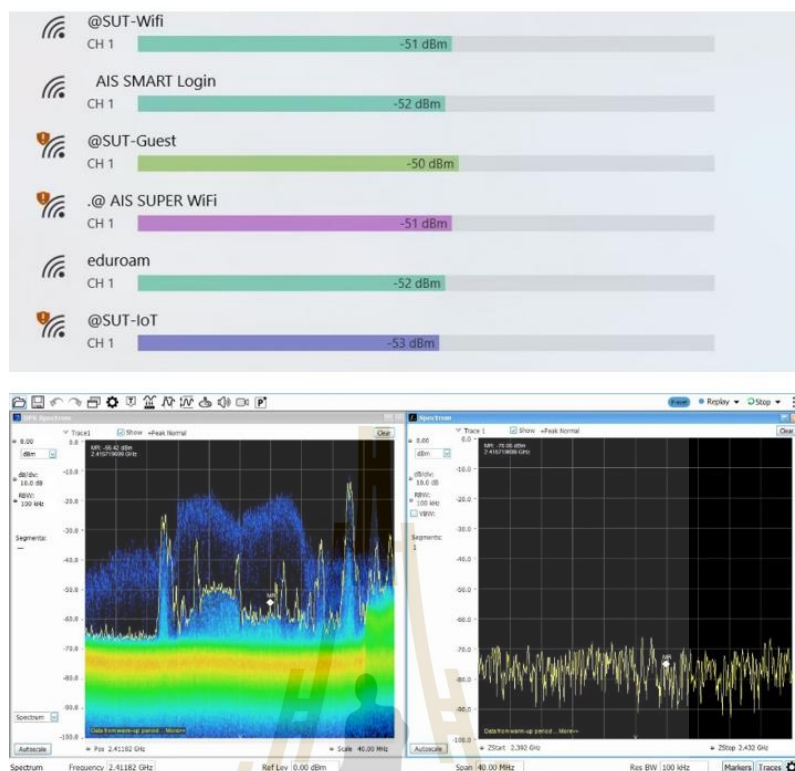




รูปที่ 4.2 กรณีก่อนใช้ RF Switch



รูปที่ 4.3 กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 4.4 กรณีเลือกการใช้งานเป็นการอ่านค่าจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่

ผลการทดสอบการควบคุมเลือกการทำงานของ RF Switch ที่เลือกใช้งานเป็นการอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย สามารถอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สายได้แรงกว่าการอ่านรายละเอียดสัญญาณเครือข่ายไร้สายที่ติดอยู่ในคอมพิวเตอร์ปกติ และยังสามารถเปลี่ยนโหมดเป็นการอ่านจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ สำหรับการใช้งานโหมดจะอ่านจากเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่จะแสดงสเปกตรัมที่โปรแกรม Signalvu-PC โดยทดสอบพบว่า การควบคุมการเลือกใช้งานของ RF Switch สามารถเลือกใช้งานได้ตามต้องการ

#### 4.6 การทดสอบการส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม

การส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม (Serial Communication) เป็นการรับส่งข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไปที่คอมพิวเตอร์ผ่านสาย RS232 หรือสาย USB ที่แปลงสัญญาณ TTL (Transistor-Transistor Logic) และ UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ที่เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อข้อมูลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ แปลงเป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อข้อมูลแบบ RS232 เข้าสู่คอมพิวเตอร์

เนื่องจากระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ จำเป็นต้องมีสัญญาณ 3G/4G หากบริเวณนั้นไม่มีสัญญาณ 3G/4G ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ใช้การส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรมแทน โดยรูปที่ 4.5 คือตำแหน่ง GPS และทิศทางการหมุนของสายอากาศที่บอร์ดราสเบอร์รี่ พาย อ่านได้จากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลและโมดูล GPS ก่อนทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ไปที่คอมพิวเตอร์ ผ่านสาย RS232 แสดงดังรูปที่ 4.6

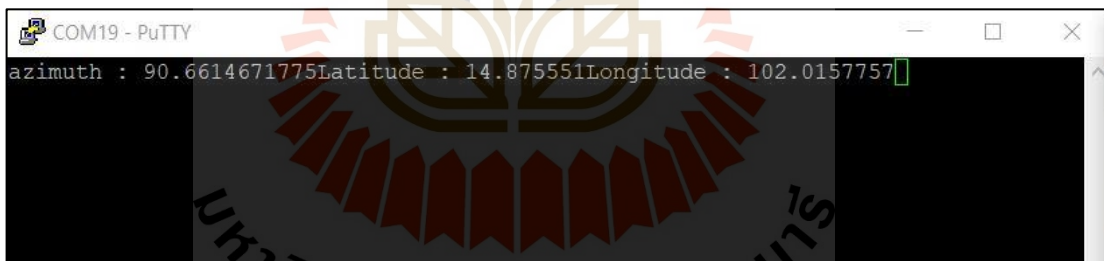


```

192.168.0.51 - Remote Desktop Connection
geany_run_script_SBZ2E0.sh
File Edit Tabs Help
-----Data to USB-----
azimuth : 90.6614671775
Latitude : 14.875551
Longitude : 102.0157757

```

รูปที่ 4.5 ค่าที่บอร์ด Raspberry Pi อ่านได้จากโมดูลเข็มทิศดิจิทัลและโมดูล GPS



```

COM19 - PuTTY
azimuth : 90.6614671775Latitude : 14.875551Longitude : 102.0157757

```

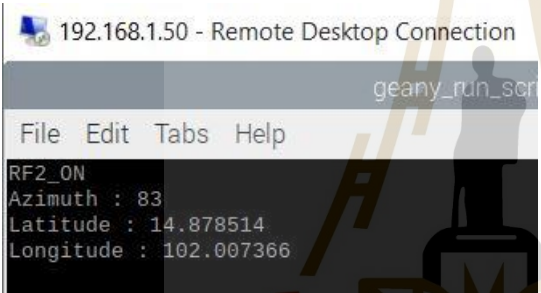
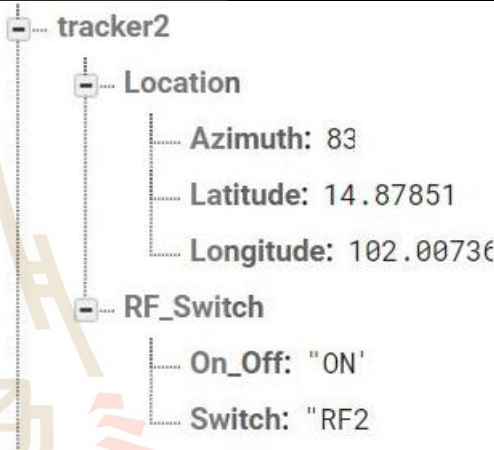
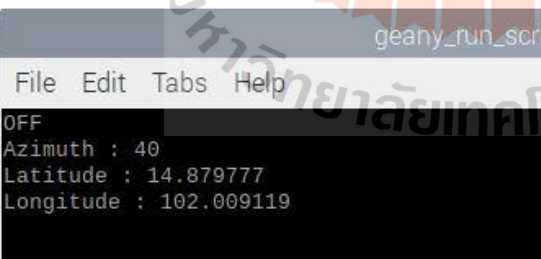
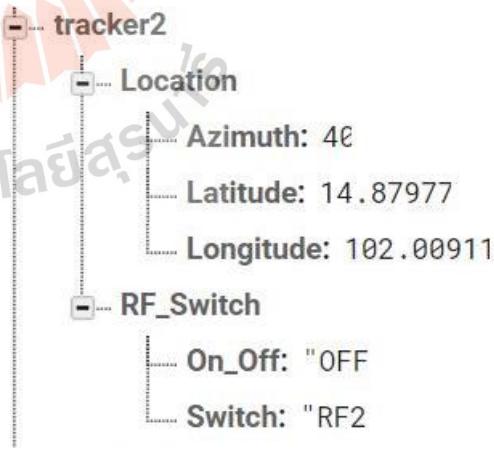
รูปที่ 4.6 ค่าที่คอมพิวเตอร์รับได้ผ่านสาย RS232

จากการทดสอบพบว่า การส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรมเพื่อใช้งานในระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ บริเวณการตรวจสอบไม่มีสัญญาณ 3G/4G สามารถส่งข้อมูลได้ โดยข้อมูลที่บอร์ดราสเบอร์รี่ พาย ในรูปที่ 4.5 สามารถส่งข้อมูลผ่านสาย RS232 ไปที่คอมพิวเตอร์ในรูปที่ 4.6 ซึ่งข้อมูลก่อนส่งจะถูกแบ่งเป็น ชุดข้อมูลของทิศทาง การหมุนของสายอากาศ ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดตามลำดับ จะถูกรวมเป็นชุดข้อมูลใหญ่หนึ่งชุด และส่งข้อมูลไปที่คอมพิวเตอร์ ทำให้ค่าที่ได้รับถูกแสดงเป็นข้อความที่ต่อกัน

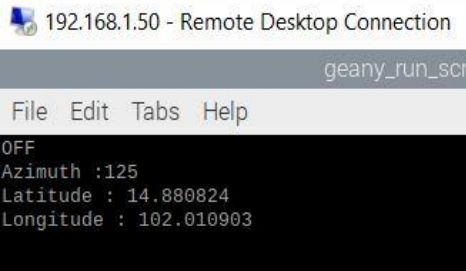
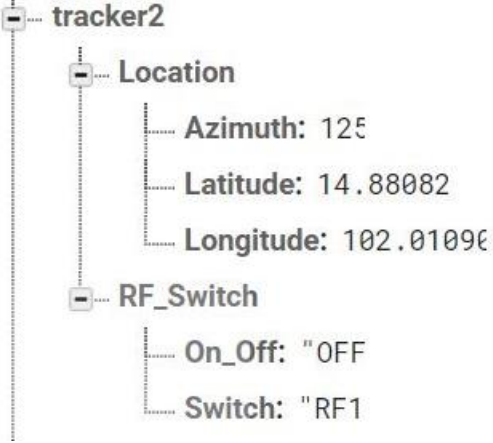
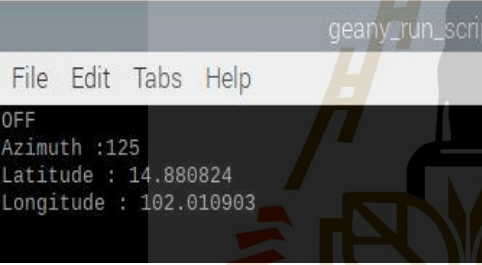
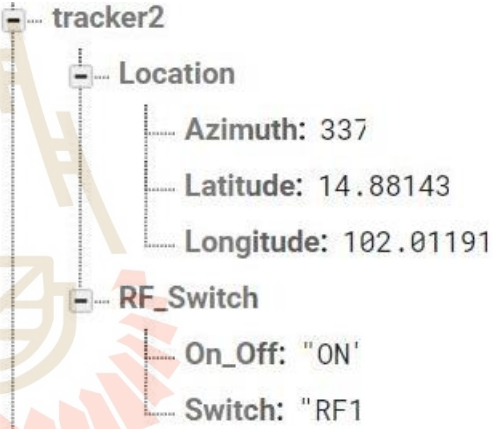
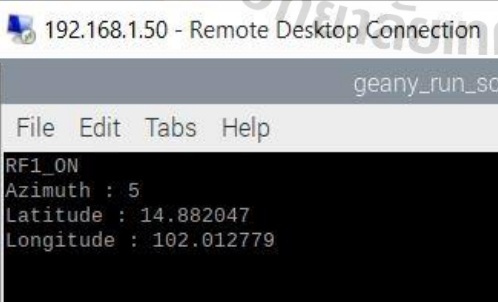
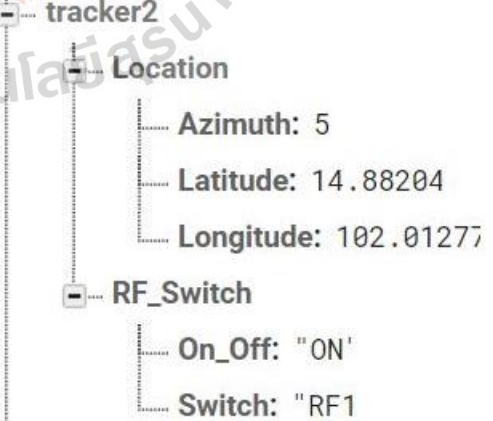
#### 4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล

การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และฐานข้อมูล Firebase โดยข้อมูลที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รับมาจากฐานข้อมูล Firebase คือคำสั่งในการควบคุมการทำงานของ RF Switch และข้อมูลที่ส่งจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล Firebase คือ ตำแหน่ง GPS และทิศทางของเข็มทิศดิจิทัล แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล

ข้อมูลในภายในรหัสเบอรี่พาย	ข้อมูลในฐานข้อมูล Firebase
 <p>(1)</p>	 <p>(2)</p>
 <p>(3)</p>	 <p>(4)</p>

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล (ต่อ)

ข้อมูลในภายในรหัสเบอร์รี พาย	ข้อมูลในฐานข้อมูล Firebase
 <p>(5)</p>	 <p>(6)</p>
 <p>(7)</p>	 <p>(8)</p>
 <p>(9)</p>	 <p>(10)</p>

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล Firebase โดยตารางที่ 4.4 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ฝั่ง คือ

1. ฝั่งทางด้านซ้าย (1,3,5,7,9) คือข้อมูลที่ได้รับและส่งในภายในราสเบอร์รี่ พาย ในบรรทัดแรกเป็นการรับคำสั่งในการควบคุม RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase เมื่อรับคำสั่งในการควบคุม RF Switch เสร็จสิ้น จะทำการส่งทิศทางของสายอากาศ และตำแหน่ง GPS ตามลำดับ 2. ฝั่งทางด้านขวา (2,4,6,8,10) คือข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล Firebase ซึ่งในฐานข้อมูล Firebase จะเก็บทิศทางของสายอากาศ ตำแหน่ง GPS และคำสั่งในการควบคุม RF Switch แยกตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ โดยผลการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการส่งข้อมูลของยานพาหนะ ลำดับที่

2 ข้อมูลทิศทางของสายอากาศ ตำแหน่ง GPS และคำสั่งในการควบคุม RF Switch นั้นจะอยู่ในไฟล์ที่ชื่อว่า Tracker2 สำหรับคำสั่งในการควบคุม RF Switch จะควบคุมผ่านแอปพลิเคชันที่เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล Firebase โดย คำสั่งการควบคุม RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 คำสั่งการควบคุม RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase

คำสั่งการควบคุม RF Switch บนฐานข้อมูล Firebase		การทำงานภายในราสเบอร์รี่ พาย ในการ ควบคุม RF Switch
คำสั่งปิดเปิด- การใช้งาน	คำสั่งเลือกการอ่านข้อมูล	
OFF	RF1	ปิดการทำงาน แสดงข้อความ OFF
OFF	RF2	ปิดการทำงาน แสดงข้อความ OFF
ON	RF1	เปิดการทำงาน เลือกใช้สัญญาณของ RF1 แสดงข้อความ RF1_ON
ON	RF2	เปิดการทำงาน เลือกใช้สัญญาณของ RF2 แสดงข้อความ RF2_ON

จากตารางที่ 4.5 คำสั่งการควบคุม RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase จะมีหลักการทำงานแบ่งเป็น 3 กรณีคือ

1. คำสั่งปิด-เปิด การใช้งานเป็น “OFF” และคำสั่งเลือกการอ่านข้อมูลจะเป็น “RF1” หรือ “RF2” ราสเบอร์รี่ พาย จะปิดการทำงานของ RF Switch

2. คำสั่งปิด-เปิด การใช้งานเป็น “ON” และคำสั่งเลือกการอ่านข้อมูลจะเป็น “RF1” ราชเบอร์รี่ พาย จะเปิดการทำงานของ RF Switch และเลือกช่องทางการอ่านข้อมูลที่ “RF1”

3. คำสั่งปิด-เปิด การใช้งานเป็น “ON” และคำสั่งเลือกการอ่านข้อมูลจะเป็น “RF2” ราชเบอร์รี่ พาย จะเปิดการทำงานของ RF Switch และเลือกช่องทางการอ่านข้อมูลที่ “RF2”

โดย “RF1” และ “RF2” จะเป็นการอ่านรายละเอียดของสัญญาณเครือข่ายไร้สาย และการใช้งานเป็นการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ ตามลำดับ

ผลทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล พบว่าการรับข้อมูลเพื่อใช้งานควบคุมการเลือกใช้งานของ RF Switch จากฐานข้อมูล Firebase สามารถรับข้อมูลและสั่งเลือกการทำงานของ RF Switch ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่ เช่น ทิศทางการหมุนของสายอากาศ ตำแหน่งของยานพาหนะ เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้สามารถส่งข้อมูลไปที่ฐานข้อมูลได้แบบตามเวลาจริง

#### **4.8 ผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม**

การทดสอบวัดระดับความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่โดยผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (WAVLINK WN570HA1 AC600) ที่มีกำลังส่งประมาณ 30 dBm (ตามข้อมูลของผู้ผลิต) ซึ่งทำหน้าที่แทนเครื่องวิทยุคมนาคมที่ปล่อยสัญญาณรบกวนบริเวณรอบ ๆ ซึ่งผู้วิจัยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย และตรวจสอบการรับสัญญาณที่เครื่องวิทยุคมนาคมปล่อยออกมา ในสถานการณ์ต่าง ๆ ในระยะทางที่แตกต่างกัน จากนั้นนำผลที่ได้จากการตรวจสอบมาวิเคราะห์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) และทำนายความแรงของสัญญาณนั้น มีค่าสูงกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่

การทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ เทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมในสถานการณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบภาคพื้นดิน โดยใช้รถยนต์เป็นยานพาหนะทั้ง 4 คัน ติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 2.4 GHz แสดงดังตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.9

2. ผลการทดสอบภาคพื้นดิน โดยใช้รถยนต์เป็นยานพาหนะทั้ง 4 คัน ทดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 5 GHz แสดงดังตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.13

3. ผลการทดสอบภาคพื้นดิน โดยใช้อุปกรณ์ตรวจสอบแบบหิ้วถือ ทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 2.4 GHz แสดงดังตารางที่ 4.14

4. ผลการทดสอบภาคพื้นดิน โดยใช้อุปกรณ์ตรวจสอบแบบหิ้วถือ ทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 5 GHz แสดงดังตารางที่ 4.15

5. ผลการทดสอบทางทะเล โดยใช้เรือทั้ง 3 ลำ ทดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ และติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายบนฝั่ง ซึ่งทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 2.4 GHz แสดงดังตารางที่ 4.16 ถึงตารางที่ 4.18

6. ผลการทดสอบทางทะเล โดยใช้เรือทั้ง 3 ลำ ทดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายบนฝั่ง ซึ่งทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณในย่านความถี่ 5 GHz แสดงดังตารางที่ 4.19 ถึงตารางที่ 4.21





ตารางที่ 4.1 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

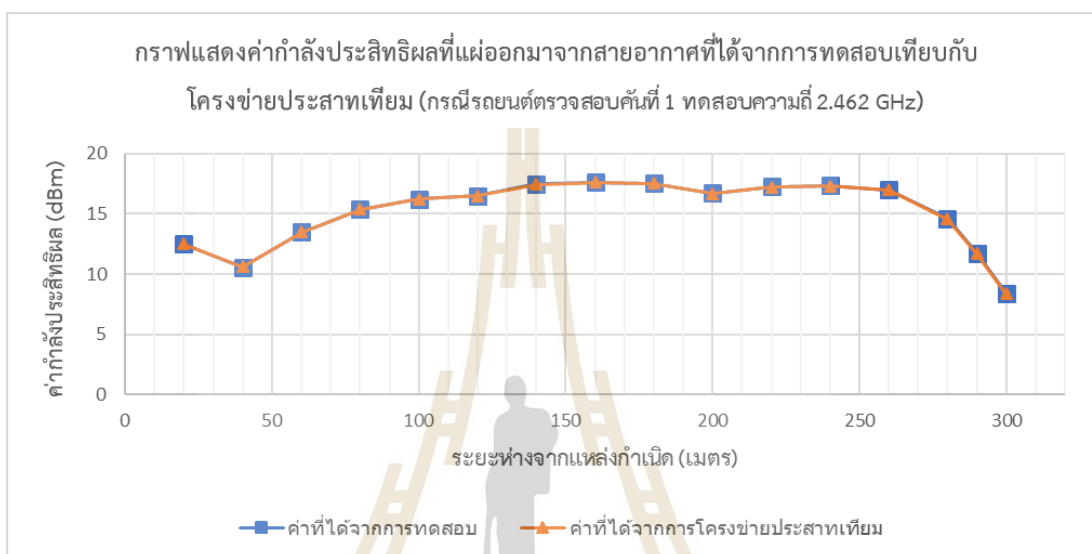
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย (q) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_T$ ANN (dBm)
20	0.00	66.30	-13.14	4.34	-53.80	12.50	12.50
40	0.00	72.32	-21.09	4.34	-61.75	10.57	10.61
60	0.00	75.84	-21.71	4.34	-62.37	13.47	13.50
80	0.00	78.34	-22.32	4.34	-62.98	15.36	15.37
100	0.00	80.28	-23.37	4.34	-64.03	16.25	16.24
120	0.00	81.86	-24.68	4.34	-65.34	16.52	16.50
140	0.00	83.20	-25.04	4.34	-65.70	17.50	17.47
160	0.00	84.36	-26.07	4.34	-66.73	17.63	17.61
180	0.00	85.38	-27.17	4.34	-67.83	17.55	17.53
200	0.00	86.30	-28.92	4.34	-69.58	16.72	16.70
220	0.00	87.12	-29.21	4.34	-69.87	17.25	17.24
240	0.00	87.88	-29.88	4.34	-70.54	17.34	17.33

ตารางที่ 4.6 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_r$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
260	0.00	88.58	-30.92	4.34	-71.58	17.00	16.98
280	0.00	89.22	-33.95	4.34	-74.61	14.61	14.59
290	0.00	89.52	-37.14	4.34	-77.80	11.72	11.70
300	0.00	89.82	-40.78	4.34	-81.44	8.38	8.35

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.462 GHz: ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.6 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 300 เมตร ทดสอบทั้งหมด 16 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.019

ตารางที่ 4.7 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
20	0.00	66.30	-14.36	4.34	-55.02	11.28	11.29
40	0.00	72.32	-21.09	4.34	-61.75	10.57	10.61
60	0.00	75.84	-22.40	4.34	-63.06	12.78	12.81
80	0.00	78.34	-23.45	4.34	-64.11	14.23	14.24
100	0.00	80.28	-24.64	4.34	-65.30	14.98	14.97
120	0.00	81.86	-25.54	4.34	-66.20	15.66	15.64
140	0.00	83.20	-26.98	4.34	-67.64	15.56	15.53
160	0.00	84.36	-27.62	4.34	-68.28	16.08	16.06
180	0.00	85.38	-28.79	4.34	-69.45	15.93	15.91
200	0.00	86.30	-30.20	4.34	-70.86	15.44	15.42
220	0.00	87.12	-30.63	4.34	-71.29	15.83	15.82
240	0.00	87.88	-31.08	4.34	-71.74	16.14	16.12
260	0.00	88.58	-33.70	4.34	-74.36	14.22	14.19
280	0.00	89.22	-40.96	4.34	-81.62	7.60	7.57

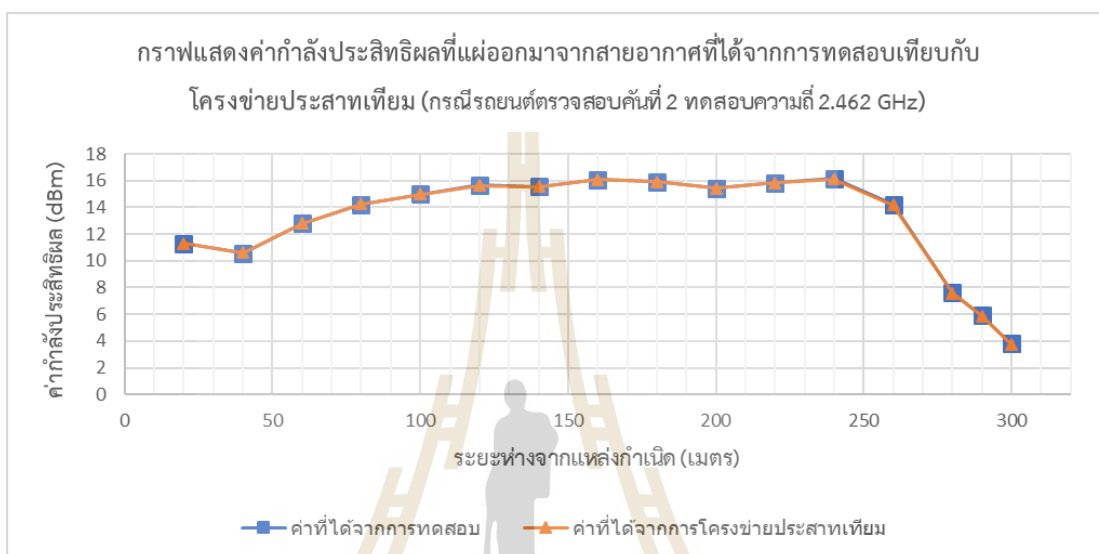
ตารางที่ 4.7 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจคลื่นที่ 2 ที่ความถี่ 2.462 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T\_ANN}$ (dBm)
290	0.00	89.52	-42.95	4.34	-83.61	5.91	5.88
300	0.00	89.82	-45.37	4.34	-86.03	3.79	3.76

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.462 GHz. ตำแหน่งที่ระยະความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi



จากตารางที่ 4.7 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 300 เมตร ทดสอบทั้งหมด 16 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.022

ตารางที่ 4.8 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
20	0.00	66.30	-13.29	4.34	-53.95	12.35	12.35
40	0.00	72.32	-21.18	4.34	-61.84	10.48	10.52
60	0.00	75.84	-22.86	4.34	-63.52	12.32	12.35
80	0.00	78.34	-23.66	4.34	-64.32	14.02	14.03
100	0.00	80.28	-25.83	4.34	-66.49	13.79	13.78
120	0.00	81.86	-26.87	4.34	-67.53	14.33	14.31
140	0.00	83.20	-27.95	4.34	-68.61	14.59	14.56
160	0.00	84.36	-28.88	4.34	-69.54	14.82	14.80
180	0.00	85.38	-29.03	4.34	-69.69	15.69	15.67
200	0.00	86.30	-29.98	4.34	-70.64	15.66	15.64
220	0.00	87.12	-30.83	4.34	-71.49	15.63	15.62
240	0.00	87.88	-31.49	4.34	-72.15	15.73	15.71
260	0.00	88.58	-36.18	4.34	-76.84	11.74	11.71
280	0.00	89.22	-43.86	4.34	-84.52	4.70	4.67

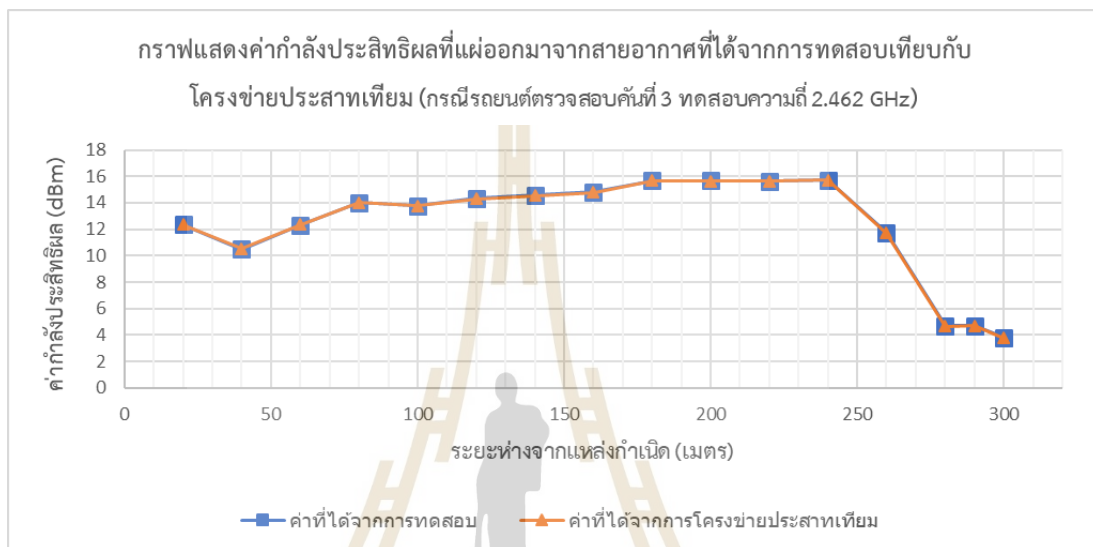
ตารางที่ 4.8 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจาก โครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
290	0.00	89.52	-44.16	4.34	-84.82	4.70	4.68
300	0.00	89.82	-45.36	4.34	-86.02	3.80	3.77

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.462 GHz ทำหมันที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi



จากตารางที่ 4.8 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 300 เมตร ทดสอบทั้งหมด 16 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.021

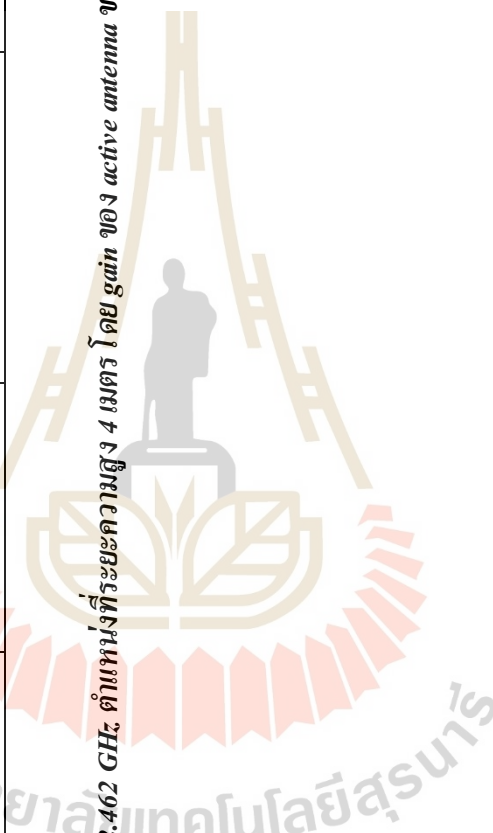
ตารางที่ 4.9 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
20	0.00	66.30	-13.64	4.34	-54.30	12.00	12.00
40	0.00	72.32	-20.43	4.34	-61.09	11.23	11.28
60	0.00	75.84	-22.46	4.34	-63.12	12.72	12.75
80	0.00	78.34	-23.29	4.34	-63.95	14.39	14.40
100	0.00	80.28	-25.20	4.34	-65.86	14.42	14.41
120	0.00	81.86	-26.01	4.34	-66.67	15.19	15.17
140	0.00	83.20	-28.46	4.34	-69.12	14.08	14.05
160	0.00	84.36	-28.94	4.34	-69.60	14.76	14.74
180	0.00	85.38	-29.42	4.34	-70.08	15.30	15.28
200	0.00	86.30	-29.87	4.34	-70.53	15.77	15.75
220	0.00	87.12	-30.13	4.34	-70.79	16.33	16.32
240	0.00	87.88	-31.24	4.34	-71.90	15.98	15.96
260	0.00	88.58	-34.34	4.34	-75.00	13.58	13.55
280	0.00	89.22	-40.33	4.34	-80.99	8.23	8.20

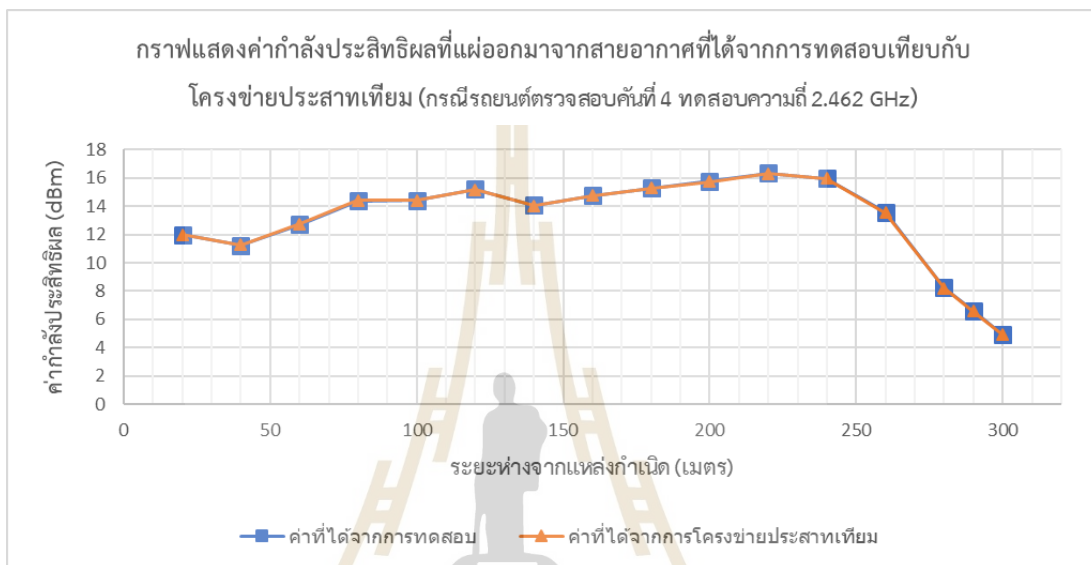
ตารางที่ 4.9 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
290	0.00	89.52	-42.24	4.34	-82.90	6.62	6.59
300	0.00	89.82	-44.23	4.34	-84.89	4.93	4.90

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.462 GHz ทำแทนที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi



จากตารางที่ 4.9 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 2.462 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 300 เมตร ทดสอบทั้งหมด 16 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.022

ตารางที่ 4.10 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจากโครงสร้างเสาที่ 1 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz

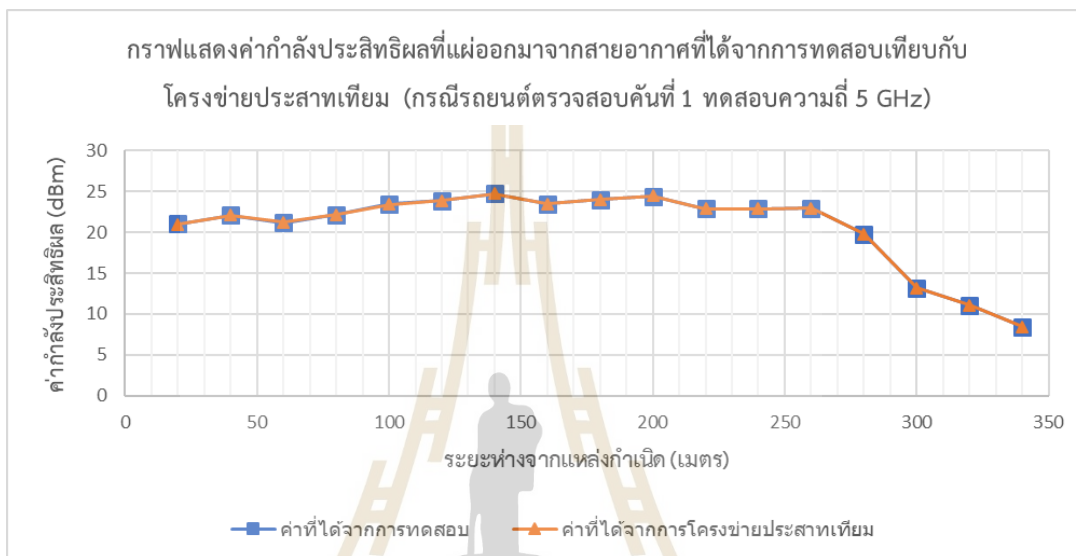
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
20	0.00	66.30	-13.64	4.34	-54.30	12.00	12.00
40	0.00	72.32	-20.43	4.34	-61.09	11.23	11.28
60	0.00	75.84	-22.46	4.34	-63.12	12.72	12.75
80	0.00	78.34	-23.29	4.34	-63.95	14.39	14.40
100	0.00	80.28	-25.20	4.34	-65.86	14.42	14.41
120	0.00	81.86	-26.01	4.34	-66.67	15.19	15.17
140	0.00	83.20	-28.46	4.34	-69.12	14.08	14.05
160	0.00	84.36	-28.94	4.34	-69.60	14.76	14.74
180	0.00	85.38	-29.42	4.34	-70.08	15.30	15.28
200	0.00	86.30	-29.87	4.34	-70.53	15.77	15.75
220	0.00	87.12	-30.13	4.34	-70.79	16.33	16.32
240	0.00	87.88	-31.24	4.34	-71.90	15.98	15.96
260	0.00	88.58	-34.34	4.34	-75.00	13.58	13.55
280	0.00	89.22	-40.33	4.34	-80.99	8.23	8.20

ตารางที่ 4.10 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRP) เทียบกับผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทยุคที่ 1 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T\_ANN}$ (dBm)
300	0.00	95.96	-44.27	6.50	-82.77	13.19	13.18
320	0.00	96.52	-46.93	6.50	-85.43	11.09	11.08
340	0.00	97.05	-50.13	6.50	-88.63	8.42	8.41

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz. ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย  $g_{gain}$  ของ  $active\ antenna$  ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.10 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 340 เมตร ทดสอบทั้งหมด 17 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.016

ตารางที่ 4.11 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
20	0.00	72.44	-15.01	6.50	-53.51	18.93	18.91
40	0.00	78.46	-17.69	6.50	-56.19	22.27	22.32
60	0.00	81.98	-20.18	6.50	-58.68	23.30	23.33
80	0.00	84.48	-22.31	6.50	-60.81	23.67	23.67
100	0.00	86.42	-23.31	6.50	-61.81	24.61	24.58
120	0.00	88.00	-24.04	6.50	-62.54	25.46	25.43
140	0.00	89.34	-27.88	6.50	-66.38	22.96	22.95
160	0.00	90.50	-28.21	6.50	-66.71	23.79	23.79
180	0.00	91.53	-28.56	6.50	-67.06	24.47	24.47
200	0.00	92.44	-30.23	6.50	-68.73	23.71	23.73
220	0.00	93.27	-32.06	6.50	-70.56	22.71	22.72
240	0.00	94.03	-32.90	6.50	-71.40	22.63	22.64
260	0.00	94.72	-33.24	6.50	-71.74	22.98	22.99
280	0.00	95.36	-38.18	6.50	-76.68	18.68	18.68

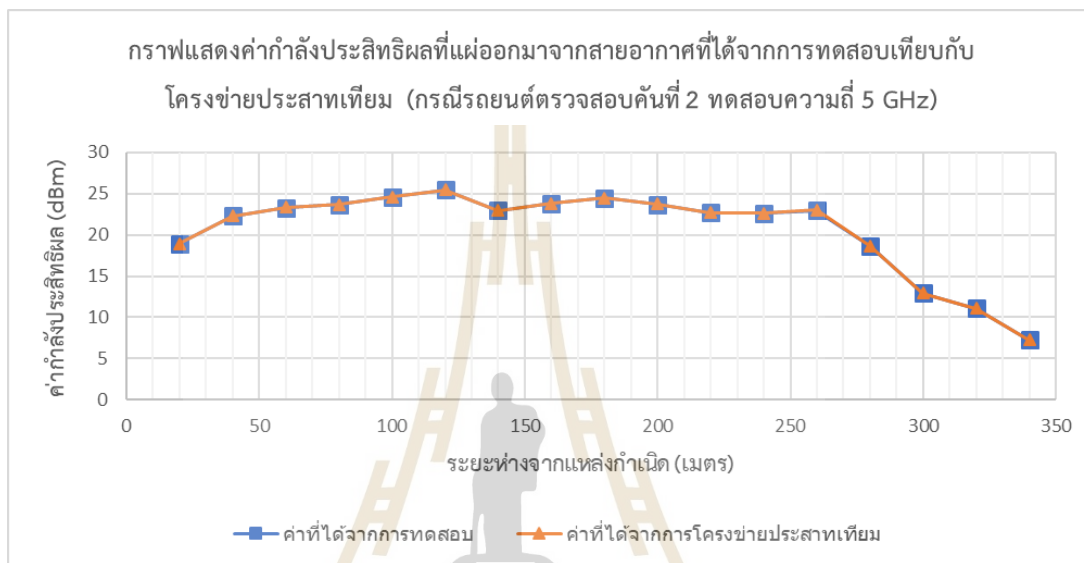


ตารางที่ 4.11 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_n$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
300	0.00	95.96	-44.52	6.50	-83.02	12.94	12.93
320	0.00	96.52	-46.91	6.50	-85.41	11.11	11.10
340	0.00	97.05	-51.29	6.50	-89.79	7.26	7.25

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.11 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 340 เมตร ทดสอบทั้งหมด 17 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.015

ตารางที่ 4.12 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

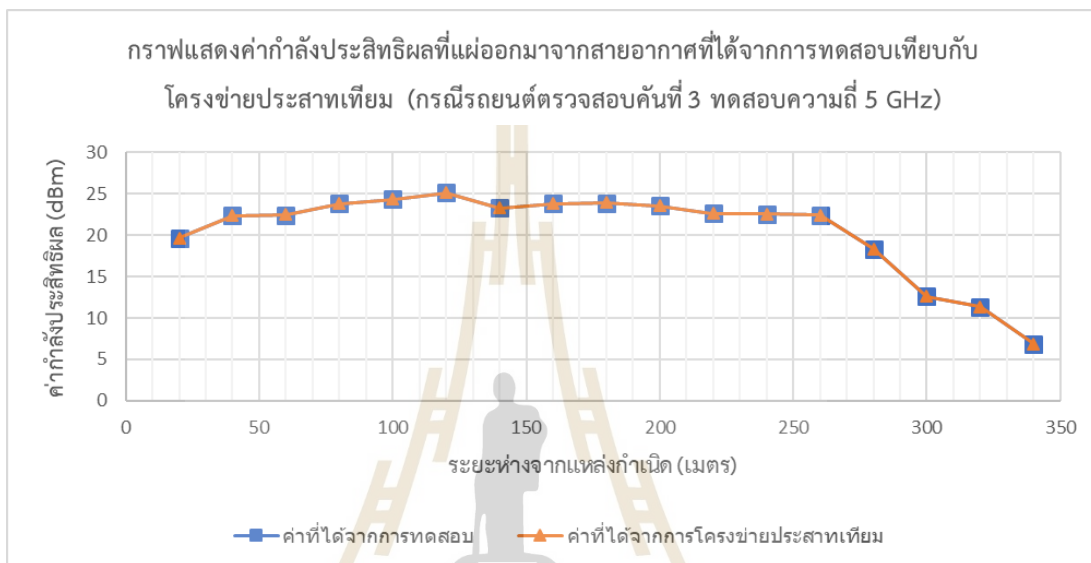
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเบี่ยง (q) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ (P <sub>r</sub> ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล (L <sub>cable</sub> ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
20	0.00	72.44	-14.25	6.50	-52.75	19.69	19.67
40	0.00	78.46	-17.61	6.50	-56.11	22.35	22.40
60	0.00	81.98	-21.04	6.50	-59.54	22.44	22.48
80	0.00	84.48	-22.16	6.50	-60.66	23.82	23.82
100	0.00	86.42	-23.56	6.50	-62.06	24.36	24.33
120	0.00	88.00	-24.35	6.50	-62.85	25.15	25.12
140	0.00	89.34	-27.56	6.50	-66.06	23.28	23.27
160	0.00	90.50	-28.21	6.50	-66.71	23.79	23.79
180	0.00	91.53	-29.12	6.50	-67.62	23.91	23.92
200	0.00	92.44	-30.39	6.50	-68.89	23.55	23.57
220	0.00	93.27	-32.16	6.50	-70.66	22.61	22.62
240	0.00	94.03	-32.95	6.50	-71.45	22.58	22.59
260	0.00	94.72	-33.79	6.50	-72.29	22.43	22.44
280	0.00	95.36	-38.51	6.50	-77.01	18.35	18.35

ตารางที่ 4.12 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_n$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
300	0.00	95.96	-44.83	6.50	-83.33	12.63	12.62
320	0.00	96.52	-46.64	6.50	-85.14	11.38	11.37
340	0.00	97.05	-51.69	6.50	-90.19	6.86	6.85

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.12 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 340 เมตร ทดสอบทั้งหมด 17 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.016

ตารางที่ 4.13 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

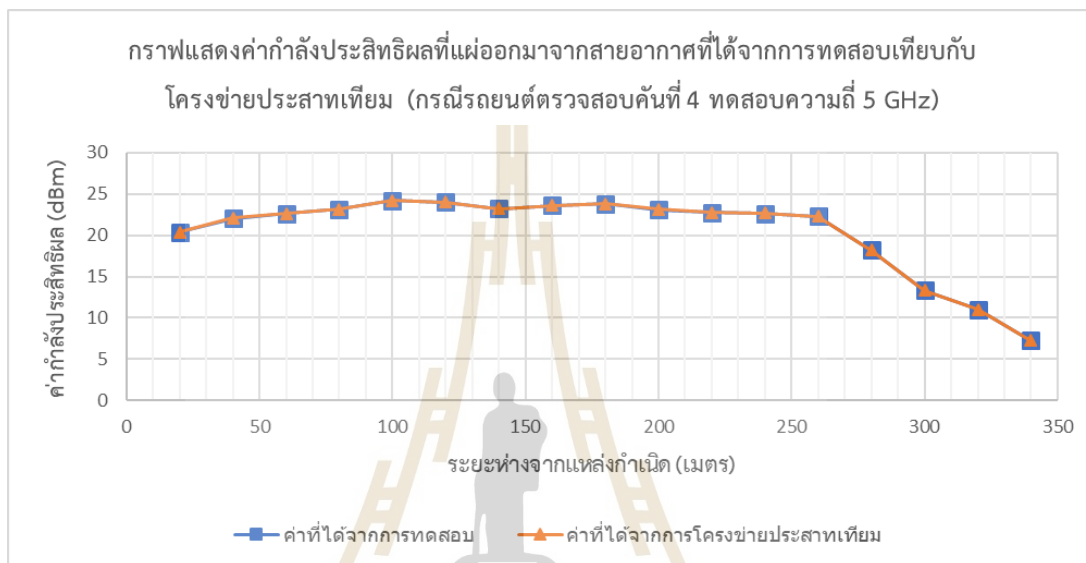
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
20	0.00	72.44	-13.54	6.50	-52.04	20.40	20.38
40	0.00	78.46	-17.92	6.50	-56.42	22.04	22.09
60	0.00	81.98	-20.87	6.50	-59.37	22.61	22.64
80	0.00	84.48	-22.82	6.50	-61.32	23.16	23.16
100	0.00	86.42	-23.69	6.50	-62.19	24.23	24.20
120	0.00	88.00	-25.47	6.50	-63.97	24.03	24.01
140	0.00	89.34	-27.61	6.50	-66.11	23.23	23.22
160	0.00	90.50	-28.40	6.50	-66.90	23.60	23.60
180	0.00	91.53	-29.24	6.50	-67.74	23.79	23.80
200	0.00	92.44	-30.83	6.50	-69.33	23.11	23.13
220	0.00	93.27	-32.04	6.50	-70.54	22.73	22.74
240	0.00	94.03	-32.88	6.50	-71.38	22.65	22.66
260	0.00	94.72	-33.91	6.50	-72.41	22.31	22.32
280	0.00	95.36	-38.63	6.50	-77.13	18.23	18.23

ตารางที่ 4.13 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_n$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
300	0.00	95.96	-44.15	6.50	-82.65	13.31	13.30
320	0.00	96.52	-47.02	6.50	-85.52	11.00	10.99
340	0.00	97.05	-51.28	6.50	-89.78	7.27	7.26

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย gain ของ active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.13 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีรถยนต์ตรวจสอบคันที่ 4 ทดสอบความถี่ 5 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 20 เมตรถึงระยะห่าง 340 เมตร ทดสอบทั้งหมด 17 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.015



ตารางที่ 4.14 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปการณ้ตรวจสอบแบบทั่วถึง ทดสอบความถี่ 2.45 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
1	0.00	40.22	6.58	1.60	-36.82	3.40	3.42
2	0.00	46.25	6.10	1.60	-37.30	8.95	8.98
3	0.00	49.77	5.80	1.60	-37.60	12.17	12.20
4	0.00	52.27	5.50	1.60	-37.90	14.37	14.40
5	0.00	54.20	5.39	1.60	-38.01	16.19	16.22
6	0.00	55.79	5.12	1.60	-38.28	17.51	18.80
7	0.00	57.13	-9.20	1.60	-52.60	4.53	4.70
8	0.00	58.29	-4.00	1.60	-47.40	10.89	10.98
9	0.00	59.31	-1.00	1.60	-44.40	14.91	14.94
10	0.00	60.22	0.00	1.60	-43.40	16.82	16.79
11	0.00	61.05	-1.00	1.60	-44.40	16.65	16.53
12	0.00	61.81	-0.30	1.60	-43.70	18.11	17.96
13	0.00	62.50	-0.35	1.60	-43.75	18.75	18.58
14	0.00	63.15	-1.27	1.60	-44.67	18.48	18.27

ตารางที่ 4.14 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปการณ้ตรวจสอบแบบที่คือ ที่ความถี่ 2.45 GHz) (ต่อ)

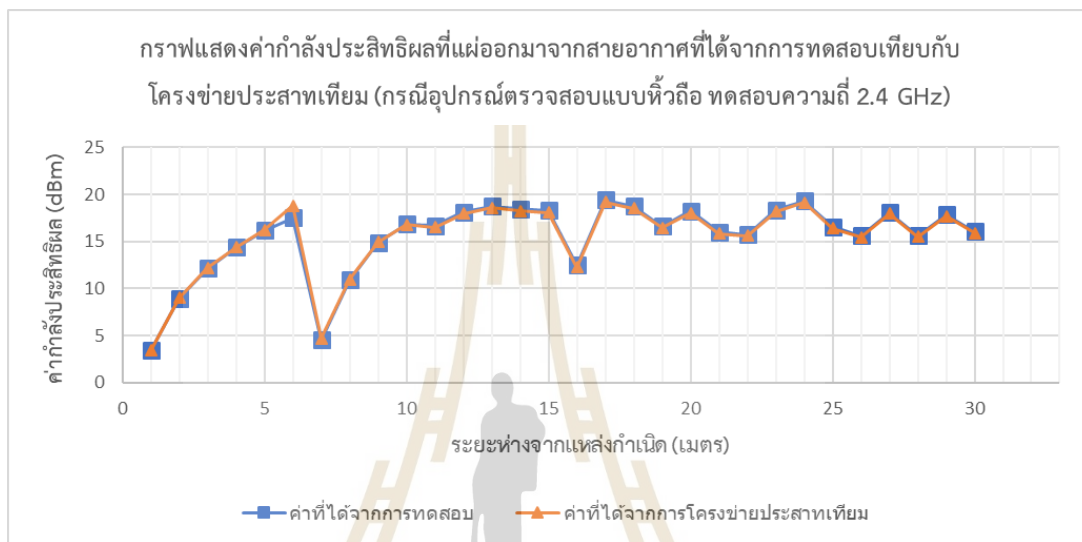
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมแยง ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
15	0.00	63.75	-2.07	1.60	-45.47	18.28	18.06
16	0.00	64.31	-8.42	1.60	-51.82	12.49	12.27
17	0.00	64.83	-2.03	1.60	-45.43	19.40	19.19
18	0.00	65.33	-3.17	1.60	-46.57	18.76	18.55
19	0.00	65.80	-5.78	1.60	-49.18	16.62	16.43
20	0.00	66.25	-4.62	1.60	-48.02	18.23	18.03
21	0.00	66.67	-7.25	1.60	-50.65	16.02	15.85
22	0.00	67.07	-7.92	1.60	-51.32	15.75	15.59
23	0.00	67.46	-5.71	1.60	-49.11	18.35	18.18
24	0.00	67.83	-5.11	1.60	-48.51	19.32	19.15
25	0.00	68.18	-8.23	1.60	-51.63	16.55	16.41
26	0.00	68.52	-9.51	1.60	-52.91	15.61	15.47
27	0.00	68.85	-7.36	1.60	-50.76	18.09	17.94
28	0.00	69.17	-10.15	1.60	-53.55	15.62	15.48

ตารางที่ 4.14 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศจากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบที่วัดที่ ความถี่ 2.45 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
29	0.00	69.47	-8.23	1.60	-51.63	17.84	17.70
30	0.00	69.77	-10.32	1.60	-53.72	16.05	15.91

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.45 GHz ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.14 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 2.4 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 2.4 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 1 เมตรถึงระยะห่าง 30 เมตรทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.172

ตารางที่ 4.15 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRP<sub>T</sub>) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบทั่วถึง ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย (α) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ (P <sub>r</sub> ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล (L <sub>cable</sub> ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
1	0.00	46.42	-5.38	2.70	-47.68	-1.26	-1.28
2	0.00	52.44	-5.44	2.70	-47.74	4.70	4.70
3	0.00	55.96	-10.95	2.70	-53.25	2.71	2.72
4	0.00	58.46	-11.25	2.70	-53.55	4.91	6.92
5	0.00	60.40	-11.70	2.70	-54.00	6.40	7.63
6	0.00	61.98	-13.60	2.70	-55.90	6.08	6.76
7	0.00	63.32	-15.94	2.70	-58.24	5.08	5.40
8	0.00	64.48	-17.85	2.70	-60.15	4.33	4.44
9	0.00	65.51	-16.32	2.70	-58.62	6.89	6.90
10	0.00	66.42	-17.86	2.70	-60.16	6.26	6.20
11	0.00	67.25	-18.98	2.70	-61.28	5.97	5.87
12	0.00	68.00	-18.99	2.70	-61.29	6.71	6.60
13	0.00	68.70	-19.94	2.70	-62.24	6.46	6.35
14	0.00	69.34	-19.38	2.70	-61.68	7.66	7.56

ตารางที่ 4.15 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถี่ ที่ความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

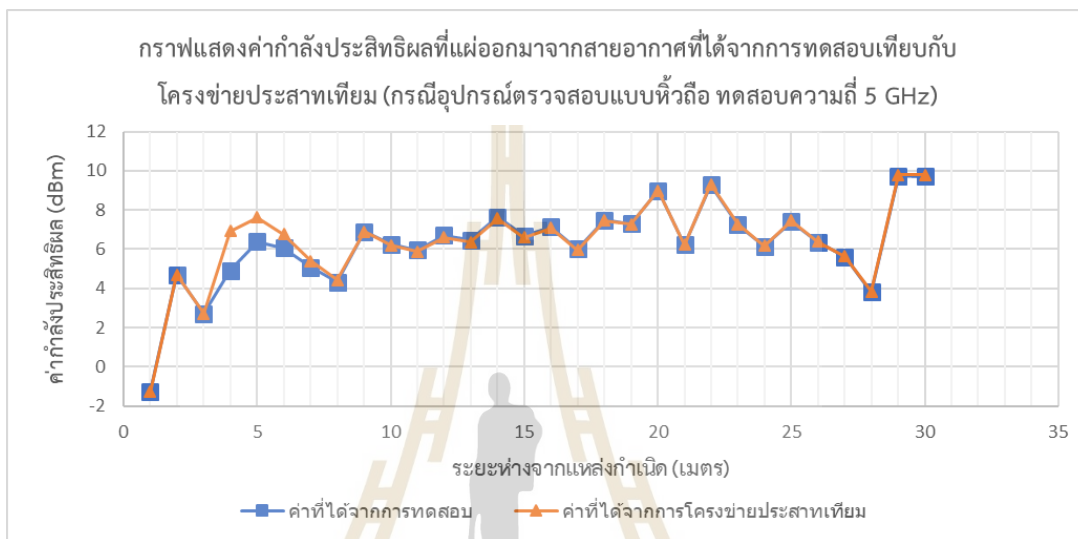
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
15	0.00	69.94	-20.95	2.70	-63.25	6.69	6.61
16	0.00	70.50	-21.05	2.70	-63.35	7.15	7.09
17	0.00	71.03	-22.73	2.70	-65.03	6.00	5.96
18	0.00	71.53	-21.75	2.70	-64.05	7.48	7.45
19	0.00	72.00	-22.41	2.70	-64.71	7.29	7.27
20	0.00	72.44	-21.14	2.70	-63.44	9.00	9.00
21	0.00	72.87	-24.35	2.70	-66.65	6.22	6.23
22	0.00	73.27	-21.69	2.70	-63.99	9.28	9.31
23	0.00	73.66	-24.11	2.70	-66.41	7.25	7.28
24	0.00	74.03	-25.59	2.70	-67.89	6.14	6.18
25	0.00	74.38	-24.67	2.70	-66.97	7.41	7.46
26	0.00	74.72	-26.07	2.70	-68.37	6.35	6.40
27	0.00	75.05	-27.14	2.70	-69.44	5.61	5.65
28	0.00	75.36	-29.25	2.70	-71.55	3.81	3.85

ตารางที่ 4.15 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบที่วัดที่ความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
29	0.00	75.67	-23.64	2.70	-65.94	9.73	9.79
30	0.00	75.96	-23.94	2.70	-66.24	9.72	9.79

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.45 GHz ตำแหน่งที่ระยะความสูง 4 เมตร โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.15 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีอุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถือ ทดสอบความถี่ 5 GHz โดยทดสอบเริ่มที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 1 เมตรถึงระยะห่าง 30 เมตรทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.184

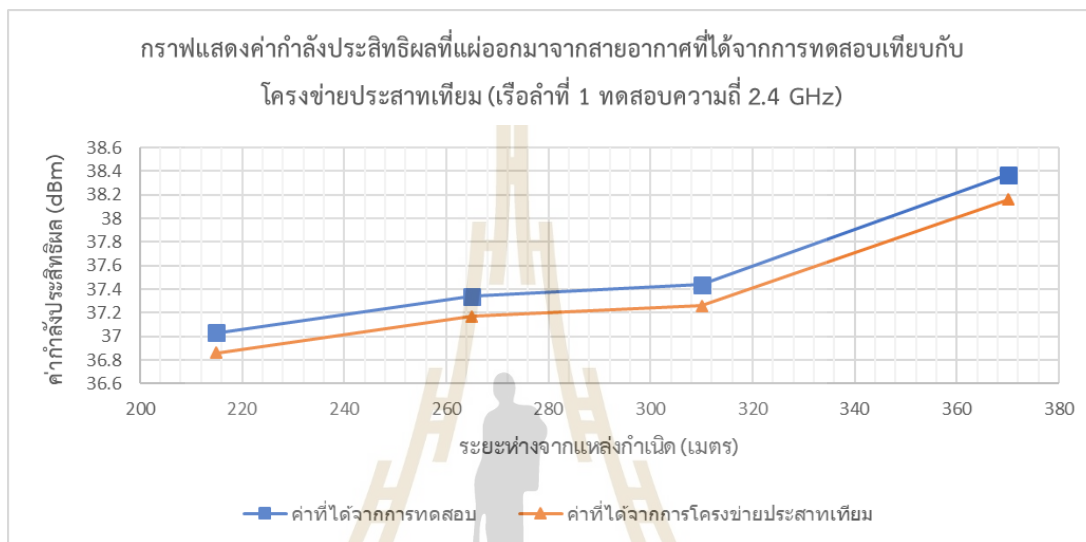


ตารางที่ 4.16 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อลค่าที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
215	0.00	86.87	-9.18	4.34	-49.84	37.03	36.86
265	0.00	88.69	-10.69	4.34	-51.35	37.34	37.17
310	0.00	90.05	-11.95	4.34	-52.61	37.44	37.26
370	0.00	91.59	-12.56	4.34	-53.22	38.37	38.16

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.16 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณีเรือดำที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรือดำที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

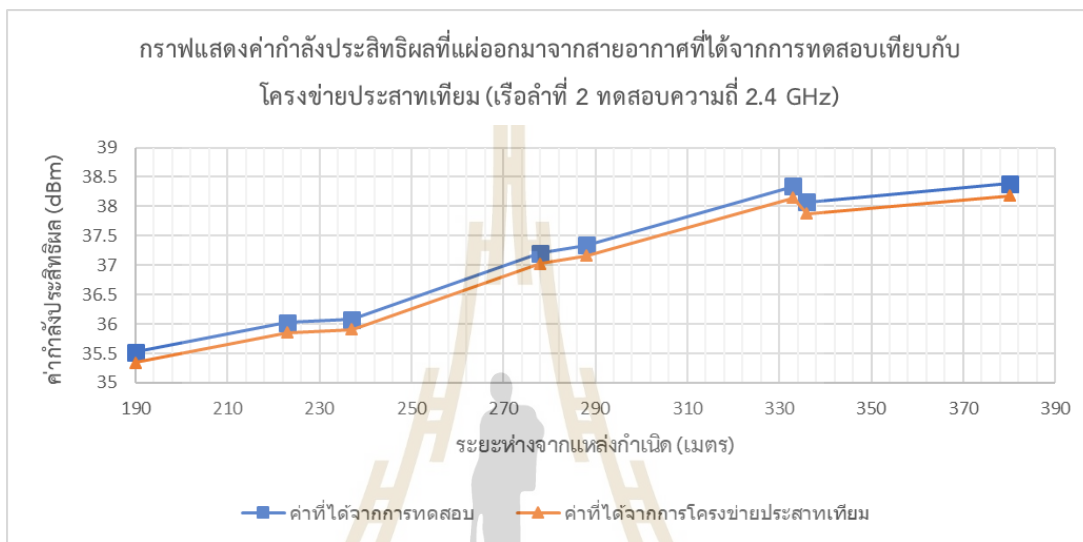
จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรือดำที่ 1 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz ทดสอบทั้งหมด 4 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.182

ตารางที่ 4.17 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_n$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	EIRP <sub>r</sub> (dBm)	EIRP <sub>t</sub> (dBm)	EIRP <sub>t-ANN</sub> (dBm)
190	0.00	85.80	-9.62	4.34	-50.28	35.52	35.34
223	0.00	87.19	-10.51	4.34	-51.17	36.02	35.85
237	0.00	87.72	-10.98	4.34	-51.64	36.08	35.91
278	0.00	89.11	-11.24	4.34	-51.90	37.21	37.03
288	0.00	89.41	-11.41	4.34	-52.07	37.34	37.16
333	0.00	90.67	-11.67	4.34	-52.33	38.34	38.15
336	0.00	90.75	-12.02	4.34	-52.68	38.07	37.88
380	0.00	91.82	-12.77	4.34	-53.43	38.39	38.18

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz: โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.17 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณีเรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

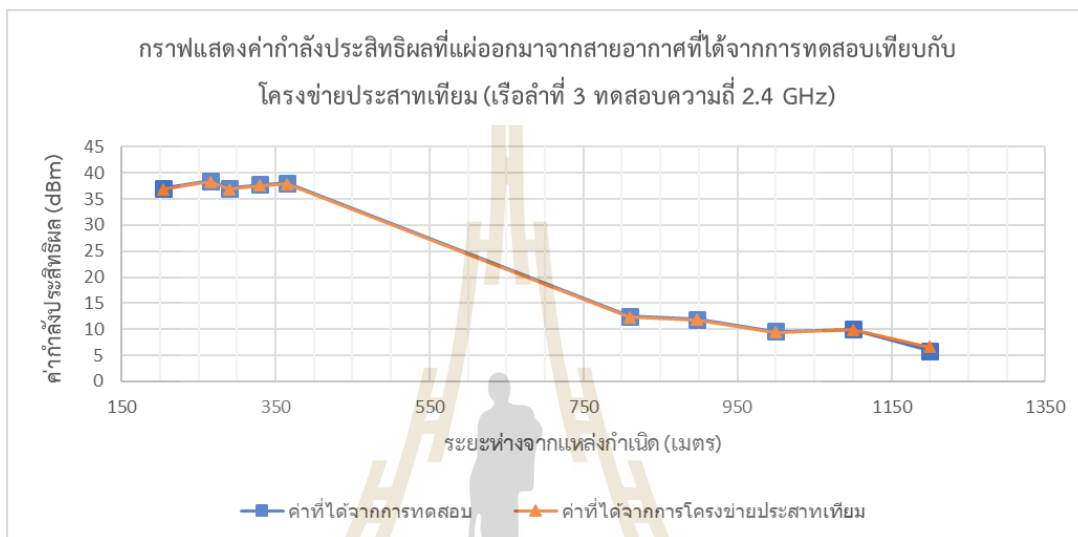
จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz ทดสอบทั้งหมด 8 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.184

ตารางที่ 4.18 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายระบบ (เรื่อลค่าที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเบี่ยง (φ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ (P <sub>u</sub> ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล (L <sub>cabl</sub> ) (dB)	EIRP <sub>r</sub> (dBm)	EIRP <sub>t</sub> (dBm)	EIRP <sub>t-ANN</sub> (dBm)
205	0.00	86.46	-8.72	4.34	-49.38	37.08	36.90
265	0.00	88.69	-9.52	4.34	-50.18	38.51	38.34
290	0.00	89.47	-11.76	4.34	-52.42	37.05	36.87
330	0.00	90.60	-12.14	4.34	-52.80	37.80	37.60
365	0.00	91.47	-12.68	4.34	-53.34	38.13	37.93
810	0.00	98.40	-45.23	4.34	-85.89	12.51	12.31
898	0.00	99.29	-46.69	4.34	-87.35	11.94	11.76
1000	0.00	100.23	-49.97	4.34	-90.63	9.60	9.41
1100	0.00	101.05	-50.36	4.34	-91.02	10.03	9.86
1200	0.00	101.81	-55.31	4.34	-95.97	5.84	6.60

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.18 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณีเรือดำที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรือดำที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz)

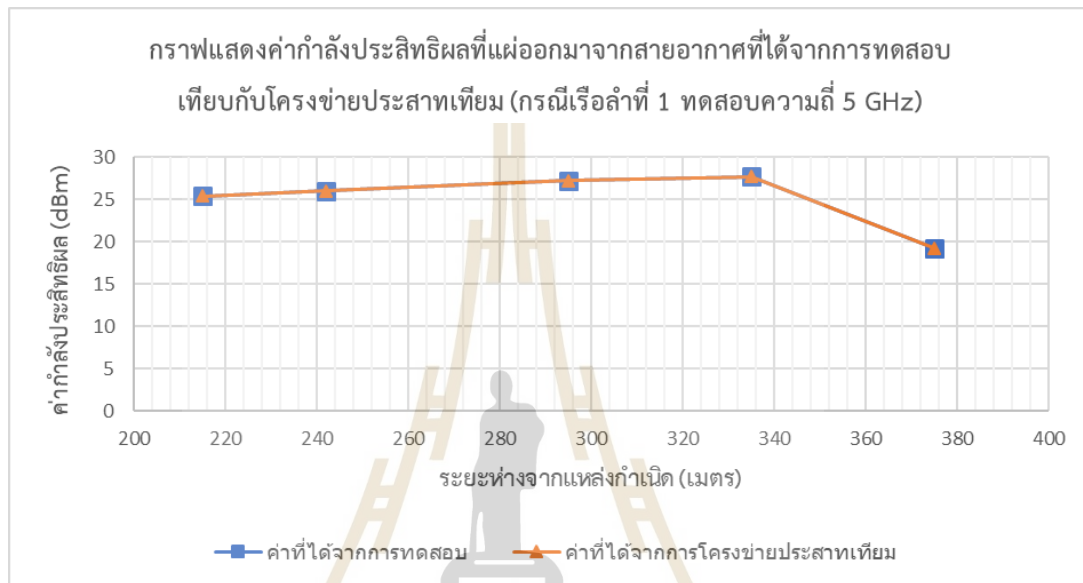
จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรือดำที่ 3 ทดสอบความถี่ 2.4 GHz ทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.243

ตารางที่ 4.19 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 1 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_{\text{av}}$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{\text{cable}}$ ) (dB)	$EIRP_R$ (dBm)	$EIRP_T$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
215	0.00	93.07	-29.19	6.50	-67.69	25.38	25.39
242	0.00	94.10	-29.61	6.50	-68.11	25.99	26.00
295	0.00	95.82	-30.15	6.50	-68.65	27.17	27.18
335	0.00	96.92	-30.76	6.50	-69.26	27.66	27.67
375	0.00	97.90	-40.14	6.50	-78.64	19.26	19.26

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.19 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีเรื่อลำที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อลำที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรื่อลำที่ 1 ทดสอบความถี่ 5 GHz ทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.008

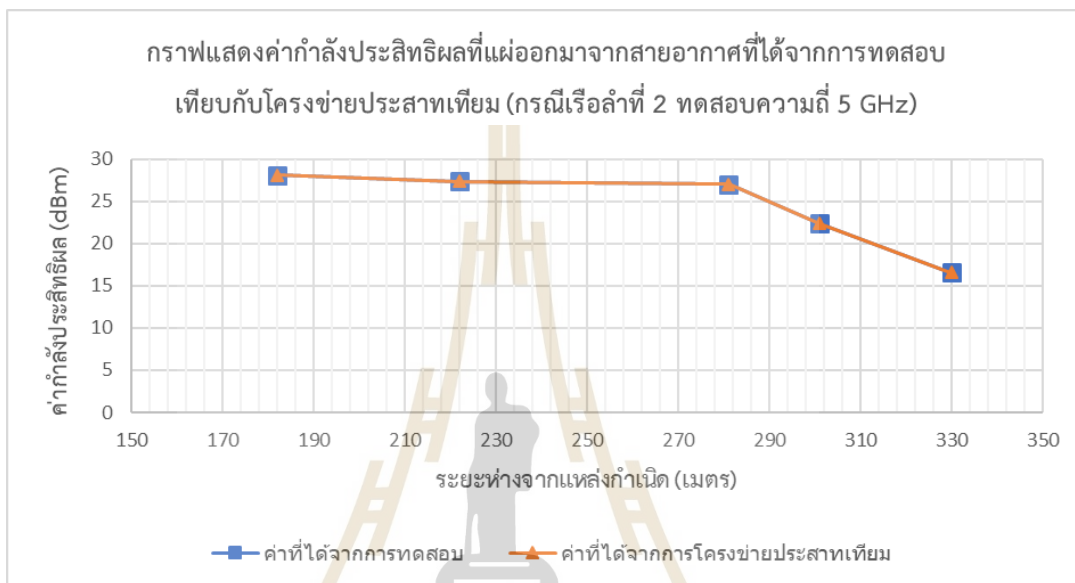


ตารางที่ 4.20 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 2 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_{\text{R}}$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{\text{cable}}$ ) (dB)	$EIRP_{\text{R}}$ (dBm)	$EIRP_{\text{T}}$ (dBm)	$EIRP_{\text{T-ANN}}$ (dBm)
182	0.00	91.62	-25.03	6.50	-63.53	28.09	28.08
222	0.00	93.35	-27.51	6.50	-66.01	27.34	27.35
281	0.00	95.39	-29.85	6.50	-68.35	27.04	27.05
301	0.00	95.99	-35.13	6.50	-73.63	22.36	22.37
330	0.00	96.79	-41.69	6.50	-80.19	16.60	16.59

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.20 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีเรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรื่อลำที่ 2 ทดสอบความถี่ 5 GHz ทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.001

ตารางที่ 4.21 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
126	0.00	88.43	-30.12	6.50	-68.62	19.81	19.80
132	0.00	88.83	-30.95	6.50	-69.45	19.38	19.38
170	0.00	91.03	-32.56	6.50	-71.06	19.97	19.98
220	0.00	93.27	-36.29	6.50	-74.79	18.48	18.48
280	0.00	95.36	-39.41	6.50	-77.91	17.45	17.45
326	0.00	96.69	-48.39	6.50	-86.89	9.80	9.79
370	0.00	97.78	-52.28	6.50	-90.78	7.00	7.00
413	0.00	98.74	-53.61	6.50	-92.11	6.63	6.63
474	0.00	99.94	-53.98	6.50	-92.48	7.46	7.47
505	0.00	100.49	-54.12	6.50	-92.62	7.87	7.89
551	0.00	101.24	-54.47	6.50	-92.97	8.27	8.29
598	0.00	101.95	-54.71	6.50	-93.21	8.74	8.76
689	0.00	103.19	-55.31	6.50	-93.81	9.38	9.38
126	0.00	88.43	-30.12	6.50	-68.62	19.81	19.80

ตารางที่ 4.21 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

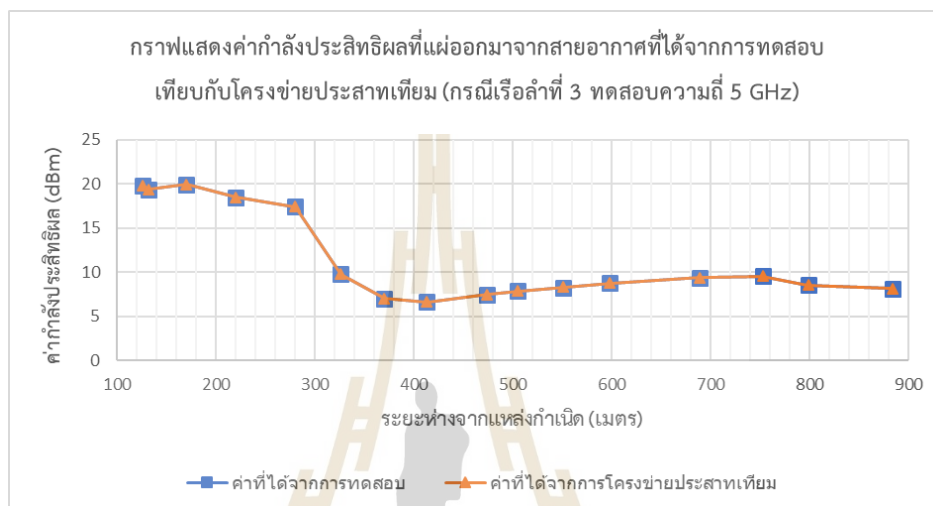
ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมเงย ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_R$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	EIRP <sub>R</sub> (dBm)	EIRP <sub>T</sub> (dBm)	EIRP <sub>T-ANN</sub> (dBm)
126	0.00	88.43	-30.12	6.50	-68.62	19.81	19.80
132	0.00	88.83	-30.95	6.50	-69.45	19.38	19.38
170	0.00	91.03	-32.56	6.50	-71.06	19.97	19.98
220	0.00	93.27	-36.29	6.50	-74.79	18.48	18.48
280	0.00	95.36	-39.41	6.50	-77.91	17.45	17.45
326	0.00	96.69	-48.39	6.50	-86.89	9.80	9.79
370	0.00	97.78	-52.28	6.50	-90.78	7.00	7.00
413	0.00	98.74	-53.61	6.50	-92.11	6.63	6.63
474	0.00	99.94	-53.98	6.50	-92.48	7.46	7.47
505	0.00	100.49	-54.12	6.50	-92.62	7.87	7.89
551	0.00	101.24	-54.47	6.50	-92.97	8.27	8.29
598	0.00	101.95	-54.71	6.50	-93.21	8.74	8.76
689	0.00	103.19	-55.31	6.50	-93.81	9.38	9.38
126	0.00	88.43	-30.12	6.50	-68.62	19.81	19.80

ตารางที่ 4.21 ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRPT) เทียบกับ ผลต่ากำลังประสิทธิภาพที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสานเทียม (เรื่อล้าที่ 3 ทดสอบความถี่ 5.0 GHz) (ต่อ)

ระยะห่าง (D) (เมตร)	มุมแยง ( $\theta$ ) (องศา)	ค่าสูญเสียในอากาศ (FSL) (dB)	ระดับสัญญาณ ( $P_r$ ) (dBm)	ค่าสูญเสียในเคเบิล ( $L_{cable}$ ) (dB)	$EIRP_r$ (dBm)	$EIRP_t$ (dBm)	$EIRP_{T-ANN}$ (dBm)
753	0.00	103.96	-55.92	6.50	-94.42	9.54	9.54
799	0.00	104.47	-57.46	6.50	-95.96	8.51	8.51
884	0.00	105.35	-58.72	6.50	-97.22	8.13	8.12

หมายเหตุ ทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 5.0 GHz โดย Gain ของ Active antenna ของภาครับเท่ากับ 45 dBi

จากตารางที่ 4.21 สามารถนำผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการวัดเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม กรณีเรื่อลำที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการทดสอบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียม (เรื่อลำที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz)

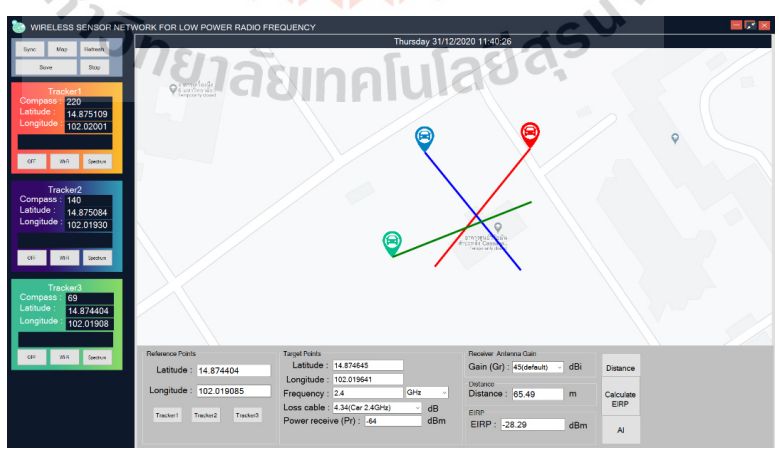
จากผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ ค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศเทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เรื่อลำที่ 3 ทดสอบความถี่ 5 GHz ทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.007

ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.8 สามารถแบ่งการวัดออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ 1.รถยนต์จำนวน 4 คันตรวจจับคลื่นความถี่ 2.4 GHz จำนวน 64 ครั้ง และ 5 GHz จำนวน 68 ครั้ง 2.อุปกรณ์ตรวจสอบแบบหิ้วถือจำนวน 1 ชุดตรวจจับคลื่นความถี่ 2.4 GHz จำนวน 30 ครั้ง และ 5 GHz จำนวน 30 ครั้ง 3.เรือจำนวน 3 ลำตรวจจับคลื่นความถี่ 2.4 GHz จำนวน 22 ครั้ง และ 5 GHz จำนวน 26 ครั้ง รวมการทดสอบทั้งหมด 240 ชุดข้อมูล สำหรับจำนวนชุดข้อมูลของเรือ ที่มีชุดข้อมูลน้อยเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดสอบ แต่ผลการทดสอบที่น้อยนั้น ไม่ส่งผลกับการเปรียบเทียบค่ากำลังประสิทธิผล ซึ่งคลื่นความถี่ 2.4 GHz ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากรยนต์ อุปกรณ์ตรวจสอบ

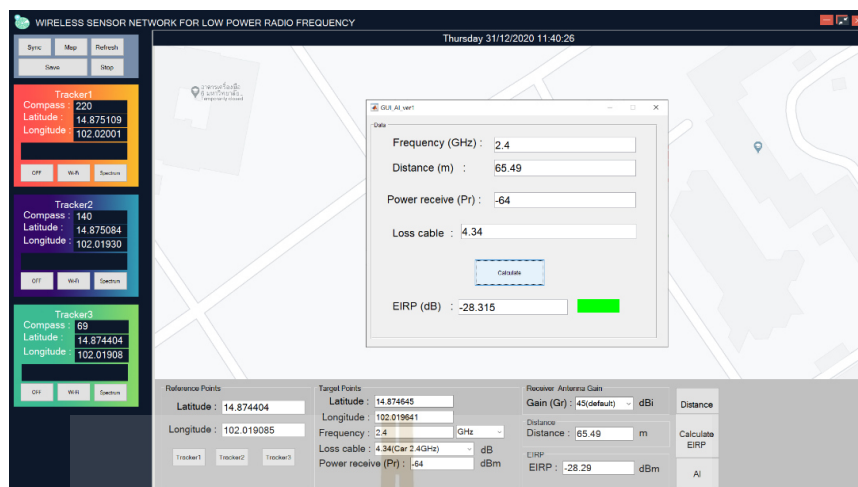
แบบหัวถั่ว และเรือคือ 0.021 0.17 และ 0.20 ตามลำดับ คลื่นความถี่ 2.4 GHz ค่าความคาดเคลื่อนที่เกิดจากรถยนต์ อุปกรณ์ตรวจสอบแบบหัวถั่ว และเรือคือ 0.015 0.184 และ 0.008 ตามลำดับ โดยระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ และค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ เทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการทำนายค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากการโครงข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาใช้จริงได้

#### 4.9 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์

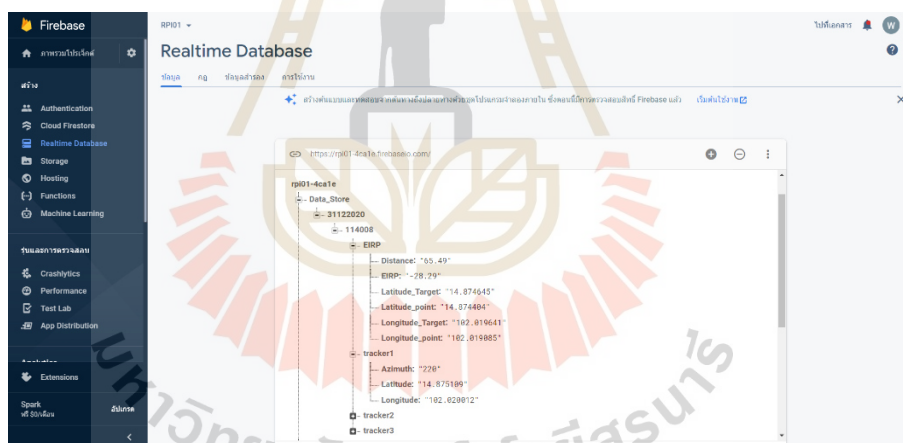
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของซอฟต์แวร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (WAVLINK WN570HA1 AC600) ภายในอาคารศูนย์วิจัยมันสำปะหลังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำหน้าที่แทนอุปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวน และติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ติดตามตำแหน่งและอุปกรณ์ที่ทำการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำภายในยานพาหนะทั้งหมด 3 คัน เมื่อเริ่มทำการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ยานพาหนะแต่ละคัน จะทำการล้อมอาคารหรือตำแหน่งที่เป็นเป้าหมาย จากนั้นจะเริ่มสแกนหาความถี่ เมื่อทำการสแกนความถี่แล้ว ยานพาหนะจะบันทึกตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศที่หัน ไปพบความถี่ที่ตรวจจับได้ รูปที่ 4.23 แสดงซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ รูปที่ 4.24 แสดงซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม และรูปที่ 4.25 แสดงฐานข้อมูล Google Firebase ซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูลกลางสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายระหว่างอุปกรณ์และซอฟต์แวร์



รูปที่ 4.23 ซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ



รูปที่ 4.24 ซอฟต์แวร์การติดตามยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุกำลังต่ำ  
ในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.25 ฐานข้อมูล Google Firebase

#### 4.10 กล่าวสรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบการทำงานของระบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ GPS เพื่อทดสอบการทำงานของโมดูล GPS เมื่อเทียบกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบพกพา โดยรับสัญญาณ GPS ที่ตำแหน่งเดียวกันและใช้สูตรตรีโกณมิติทรงกลมของโคไซน์หารระยะห่างของตำแหน่งทั้งสองตำแหน่งนั้น เพื่อให้ทราบถึง



ประสิทธิภาพการทำงานของโมดูล GPS ซึ่งจากผลการทดสอบ โมดูล GPS สามารถรับสัญญาณความถี่มันได้น้อยกว่าเครื่องรับสัญญาณความถี่มันแบบพกพา แต่ความคลาดเคลื่อนนั้นยังอยู่ในช่วงที่ผู้วิจัยสามารถรับได้

2. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของทิศทางการหมุนของสายอากาศ เพื่อทดสอบการทำงานของโมดูลเมื่อเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน ซึ่งผลการทดสอบนั้น โมดูลเข็มทิศดิจิทัลมีความถูกต้อง โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.361 องศา

3. การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบลอรา คือการทดสอบเพื่อหาระยะที่ไกลที่สุดที่สามารถรับส่งข้อมูลได้ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ที่มีสายอากาศอัตรการขยาย 3 dB และใช้ความถี่ 915 MHz ในการรับส่งข้อมูล ซึ่งระยะทางที่สามารถรับและส่งข้อมูลได้มากที่สุด 700 เมตร

4. การทดสอบการควบคุม RF Switch คือการเลือกอ่านข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของอุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณไวไฟที่เป็นเป้าหมายผ่านทางอุปกรณ์ Wi-Fi Transceiver หรือเลือกอ่านข้อมูลที่บ่งบอกความถี่และระดับของสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ ผ่านทางเครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่ โดยใช้ RF Switch ในการเลือกอ่านข้อมูล

5. การทดสอบการส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม คือการทดสอบรับส่งข้อมูลผ่านสาย RS232 ซึ่งใช้รับส่งข้อมูลในกรณีที่บริเวณที่ตรวจสอบนั้นไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต 3G/4G ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลผ่านเทคโนโลยีลอราและรับข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 LoRa ไปคอมพิวเตอร์ผ่านสาย RS232 ซึ่งผลการทดสอบนั้นสรุปได้ว่าสามารถรับข้อมูลผ่านสาย RS232 ได้

6. การทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล คือการทดสอบเพื่อตรวจสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และฐานข้อมูล Firebase โดยข้อมูลที่รับจากฐานข้อมูล Firebase ไปบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์คือคำสั่งในการเลือกอ่านข้อมูลของ RF Switch และข้อมูลที่ถูกส่งจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์คือตำแหน่งการติดตามของยานพาหนะและทิศทางการหมุนของสายอากาศ

7. ผลการทดสอบวัดระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่และผลค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ เทียบกับค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ทำการออกแบบมาเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจริงที่ไม่ได้เป็นชุดข้อมูลในการฝึกสอน ผลที่ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบสามารถทำนายค่ากำลังประสิทธิผลและทำนายระดับกำลังของ

สัญญาณที่ได้รับได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่นั้นมีโอกาสเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่เกินกว่าที่กฎหมายกำหนดได้อย่างแม่นยำ

8. ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ คือการทดสอบการทำงานของซอฟต์แวร์ เพื่อติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ทิศทางของสายอากาศ รวมถึงข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำแบบตามเวลาจริง ซึ่งผลที่ได้ซอฟต์แวร์ที่ออกแบบสามารถติดตามยานพาหนะ ทิศทางการหมุนของสายอากาศแบบตามเวลาจริงและสามารถบันทึกตำแหน่ง ทิศทาง ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับค่ากำลังประสิทธิผล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันการใช้งานคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำมีแนวโน้มการใช้งานที่สูงขึ้นเพราะคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำถูกจัดให้เป็นคลื่นความถี่ที่ไม่ต้องได้รับใบอนุญาตในการใช้งาน เนื่องจากการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน การรบกวนที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้อุปกรณ์สื่อสารบริเวณรอบ ๆ นั้นไม่สามารถใช้งานได้ อาทิเช่น สัญญาณ Wi-Fi รบกวนรถไฟฟ้า บีทีเอส ทำให้ไม่สามารถควบคุมระบบเดินรถหรือสั่งการระหว่างสถานีกับรถไฟฟ้า และส่งผลให้รถไฟฟ้าบีทีเอสชนกันได้ เป็นต้น ตัวอย่างการรบกวนข้างต้นนี้ทำให้เกิดผลกระทบทั้งผู้มาใช้บริการและผู้ให้บริการ ซึ่งการตรวจหาอุปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวนนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งที่แน่ชัด เพื่อที่จะสามารถแก้ปัญหาการรบกวนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ โดยสรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้

1. ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล สามารถรับส่งข้อมูลได้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ทางพื้นดิน ทางทะเล หรือบริเวณที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต
2. ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ สามารถติดตามตำแหน่งของยานพาหนะและทิศทางการหมุนของสายอากาศแต่ละคันแบบตามเวลาจริง
3. ซอฟต์แวร์ที่ออกแบบสามารถแสดงตำแหน่งของยานพาหนะ ทิศทางการหมุนของสายอากาศ และแสดงตำแหน่งที่คาดว่าเป็นตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ปล่อยคลื่นความถี่ที่เป็นเป้าหมาย โดยแสดงในลักษณะของแผนที่
4. ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ สามารถคำนวณหาค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ และทำนายระดับกำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับนั้นเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดหรือไม่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
5. ค่ากำลังประสิทธิผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมใกล้เคียงกับค่ากำลังประสิทธิผลที่ได้จากการวัดจริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

ผลการทดสอบระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ มีข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคตดังนี้

1. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะและทิศทางของสายอากาศแบบอัตโนมัติ แต่สำหรับข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำยังจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ที่คิดมาพร้อมกับอุปกรณ์ ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับซอฟต์แวร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น จึงแก้ปัญหาโดยอ่านข้อมูลจากตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำจากซอฟต์แวร์ที่คิดมาพร้อมกับอุปกรณ์ และบันทึกข้อมูลเหล่านั้นไปที่ซอฟต์แวร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นแทน เพื่อที่จะสามารถหาค่ากำลังประสิทธิผลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศและตำแหน่งอุปกรณ์ที่ปล่อยคลื่นความถี่เป้าหมาย พร้อมทั้งเก็บผลการตรวจจับคลื่นวิทยุกำลังส่งต่ำไว้ที่ฐานข้อมูล ดังนั้นในอนาคตนั้นการพัฒนาในซอฟต์แวร์ที่ออกแบบสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้โดยไม่ต้องอาศัยซอฟต์แวร์ที่คิดมาพร้อมกับอุปกรณ์

2. พัฒนาซอฟต์แวร์ให้สามารถแสดงตำแหน่งอุปกรณ์ที่ปล่อยคลื่นความถี่เป้าหมาย ให้แม่นยำขึ้น พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งในรูปแบบ Heatmap

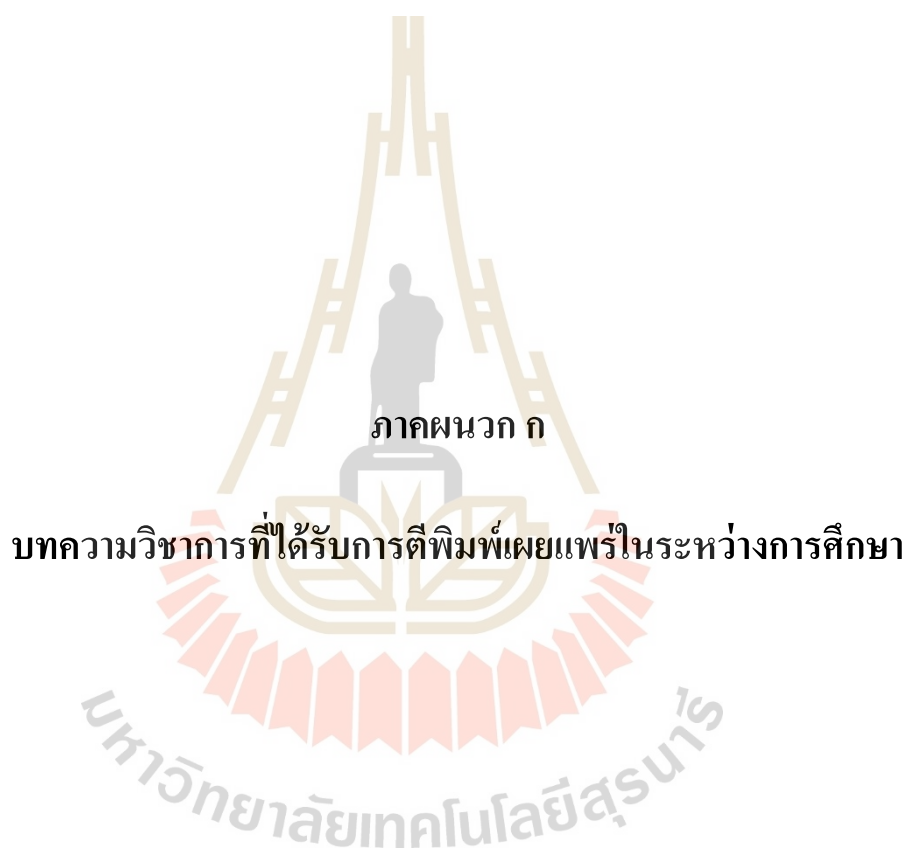
3. การตรวจจับคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำ ยังจำเป็นต้องมีผู้ใช้งานที่มีความรู้และเข้าใจทางด้านคลื่นวิทยุ อีกทั้งผู้ใช้งานต้องควบคุมการหมุนหรือการยกสายอากาศที่ใช้ในการตรวจจับเพื่อตรวจจับหาคลื่นความถี่วิทยุกำลังส่งต่ำที่เป็นเป้าหมาย ดังนั้นการพัฒนาในอนาคตถ้าหากปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการตรวจจับให้ระบบการตรวจจับเป็นแบบอัตโนมัติก็จะสามารถช่วยในเรื่องของการใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

พัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่น อัตราการรับส่งข้อมูล ความเร็วในการรับส่งข้อมูล ระยะรับส่งข้อมูล เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- [1] C. A. Bell, “**Raspberry Pi-based Sensor Nodes**” in Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi, 2013, pp. 97-144.
- [2] Raspberry Pi 3 Model B. [2017]. [Online]. available:  
<https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/Preview-raspberry-pi-512mb-model-b-plus-by-thaieasyelec.html>
- [3] Raspberry Pi 3 Model B+. [2019]. [Online]. available:  
<https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/preview-raspberry-pi-3-model-b-plus.html>
- [4] Shinde, P. A. et al. **Advanced Vehicle Monitoring and Tracking System based on Raspberry Pi**, IEEE Sponsored 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), January, 2015.
- [5] Rastogi, N. et al. **Parameter Sensing and Object Tracking using Global Positioning System**, Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED), 2016, pp. 289-293.
- [6] Desai, M. et al. **Internet of Things based vehicle monitoring system**, Fourteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), February, 2017.
- [7] Hattarge, S. et al. **LoRaWAN based GPS tracking of city-buses for smart public transport system**, First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC), 2018, pp. 265-269.
- [8] Winarno, Edy, Wiwien Hadikurniawati, and Rendy Nusa Rosso. **Location based service for presence system using haversine method**, International Conference on Innovative and Creative Information Technology (ICITech), 2017, pp.1-4.
- [9] Li, Wu-Jeng, et al. **JustIoT Internet of Things based on the Firebase real-time database**, IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial & Logistics Engineering (SMILE). 2018, pp. 43-47.

- [10] Anand, Sundar, et al. **Real-time GPS tracking using serverless architecture and ARM processor** ,11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS), 2019, pp. 541-543.
- [11] กัณวัฒน์ ไชยารัตน์ .ระบบติดตามและระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่งโดยใช้เครือข่ายตรวจสอบไร้สาย(Zigbee)การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ .11 ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น2553.
- [12] อรุณ บุรีรักษ์. การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2553.
- [13] ชัยพร เขมะภาตะพันธ์ .ระบบติดตามตรวจสอบตำแหน่งเส้นทางรถยนต์ด้วยสัญญาณดาวเทียม .PhD Thesis. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.2555.
- [14] มุหัมมัด มั่นศรีธา. การประยุกต์ใช้โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายตามมาตรฐาน ZigBee/IEEE802. 15.4 สำหรับระบบกันทางรถไฟ. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2556.
- [15] สุขสันต์ ชัยยะวงศ์. การประเมินค่าความถูกต้องของระบบ GPS/GLONASS/COMPASS ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวและสถิติกรณีศึกษาในเขตกรุงเทพมหานคร. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2557.
- [16] กฤษฏี วิทิตสานต์. การพัฒนาต้นแบบโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับการทำเกษตรแม่นยำในเรือนเพาะปลูก. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2560.
- [17] จูติ สิทธิวงศ์กุล. การพัฒนาต้นแบบโมดและส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์สำหรับงานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2558.
- [18] ชาญชลิต อินทสุก. การทำนายความต้องการพลังงานไฟฟ้าภาคอุตสาหกรรมรายเดือนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้. PhD Thesis.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2558.
- [19] เกรียงศักดิ์ พรหมศักดิ์. ระบบติดตามวัตถุที่สามารถบันทึกพิกัด GPS ของวัตถุผ่านทางเครือข่าย GPRS ไปยังเว็บไซต์ Google Docs Spreadsheet. นเรศวรวิจัยครั้งที่ .12 มหาวิทยาลัยนเรศวร.2559.
- [20] จิตติวัชร สมุหศิลป์. การพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์อัตโนมัติสนับสนุนการจัดการไฟฟ้าดับโดยใช้เทคโนโลยี LoRaWAN. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2562.
- [21] ณธวัฒน์ สุขะไท. ระบบควบคุมไฟฟ้าแสงสว่างถนนอัจฉริยะโดยใช้การสื่อสารแบบเครือข่าย. PhD Thesis. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.2562.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

EAT0020

## Design of The RF Measuring Sensor Network for Low-power Radio Frequency Transceiver Detection System

P. Kumsawat<sup>1\*</sup>, W. Pathonsuwan<sup>1</sup>, N. Sawangsawai<sup>1</sup>, T. Hoprasertwong<sup>1</sup>,  
R. Wongsan<sup>1</sup>, K. Attakitmongcol<sup>2</sup>, and A. Srikaew<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

<sup>2</sup> School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

\* Corresponding Author: prayoth@sut.ac.th

**Abstract.** This paper presents a design and development of the RF measuring sensor network for low-power RF transceiver detection system. The proposed system uses an active directional antenna and spectrum analyzer to detect interfering frequencies and power spectrum of the wireless signals. Furthermore, we apply microcontroller to control the RF switch in order to select detection methods whether using a spectrum analyser or service set identifiers using a WIFI receiver module. The microcontroller module is connected to the GPS and digital compass modules mounted on the active directional antenna for determining the position and direction of the antenna. This method is able to accurately measure the power of signal, triangulate the source of interference, and identify WIFI access points.

**Keywords:** Low-power detection system, RF measuring sensor network, radio frequency interference.

### 1. Introduction

Nowadays, the trend of using wireless devices in various areas is increasing rapidly and consequence, there is a great chance of radio frequency interference. This problem can cause a severe impact on the operation of neighboring communication devices to the point that it cannot be used. For example, the radio frequency radiation from the mobile base station interferes with the operation of the BTS train control in Bangkok. This causes the train delay and affects a lot of passengers. Therefore, having a highly accurate interference detector will help us to fix the problems quickly and efficiently. In Thailand, the National Broadcasting and Telecommunication Commission (NBTC) has a duty under the law to manage the frequency spectrum and to ensure the efficient use of the frequency spectrum in order to prevent severe frequency interference. The Office of the NBTC is responsible for monitoring and supervising the frequency usage to support all spectrum management information in Thailand. The frequency allocation can be divided into 2 types which are the frequency that must be licensed



and frequency bands that do not need a license. However, the non-licensed frequency band requires a low transmission power and does not cover any interference that may occur. If a frequency that does not require a license is requested to be inspected, the Office of NBTC needs to know the location of the frequency interference source exactly to effectively monitor the use of the frequency. However, in the event that an interference occurs and the location of the WIFI access point is unclear or they want to check the distribution of the WIFI usage in one area, it will take a long time to solve these problems.

This paper presents a design and development of the RF measuring sensor network (RFMSN) for low-power RF transceivers. This is to enable the Office of NBTC to have an effective inspection system in the future. In this work, the RF measuring sensor network based on 3G/4G mobile phone network and Lora WAN technology have been implemented. The proposed network can monitor the usage of low-power RF transceivers in the inspection areas. Furthermore, we have developed a smart tracking scheme using GPS module and digital compass. The software coding of the implementation was accomplished by using C/C++ and Python.

This paper is organized as follows. In Section 2, the literature review of tracking system and the RF measuring sensor network are given and discussed. The design and development of our radio frequency detection system for low-power RF transceivers is described in Section 3. In Section 4, the experimental results are shown. Finally, the conclusions are presented in Section 5.

## 2. Literature Review

In recent years, GPS and GSM modules are widely used in the field of vehicle tracking because of its high efficiency and easy realization [1-3]. For instance, [1] presented a vehicle tracking system with high performance GPS/GPRS. This system also has LPG gas leakage sensor and temperature sensor. If there is a problem of the LPG gas leak, it will send a warning message to mobile phone of the vehicle owners using SIM908 module. Thengal *et al.* proposed an efficient vehicle tracking system using the GPS and the GSM modules [2]. The information of vehicle location is displayed in the form of a map on a web server. Hattarge *et al.* proposed a GPS tracking on LoraWAN technology combined with an Android application for a smart transport system [3]. This system can be implemented in a real-life environment. Lora is a type of communication technology that focuses on the long-range communication and low power. Zourmand *et al.* presented a Lora technology and applied it to the Internet of Things (IoT) [4]. Lora is responsible for testable quality and efficiency of the Lora network. Yang proposed a detection and control of machine operation in various environmental condition using Lora technology [5]. National instruments presented an introduction to wireless LAN measurement [6]. For wireless LAN communication, the spectrum measurements can characterize the performance of the transmitters.

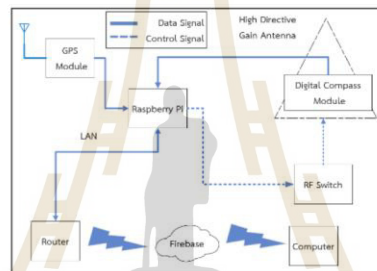
## 3. Proposed Method

This section presents the design of the RF measuring sensor network (RFMSN) which consists of the RF measuring sensor node and the RF measuring sensor gateway for installation in mobile vehicles. The main devices of the RFMSN node system include active directional antenna, spectrum analyzer, WIFI transceiver, RF switch, GPS module, and digital compass module. The RFMSN gateway is equipped with a raspberry Pi microprocessor module and a Lora module. The RFMSN gateway also has a 3G/4G mobile communication module connected to its interface board, allowing TCP/IP, USB or RS232 serial communication with the cloud computing. Furthermore, we have used a dedicated LAN connection for connecting the RFMSN gateway to laptop computer.

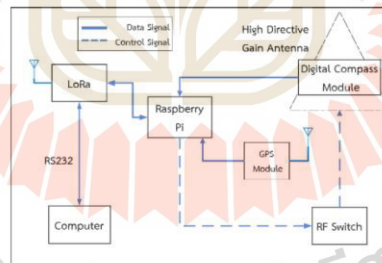
In our proposed system, an active directional antenna and spectrum analyser are applied to determine the type and frequency of interfering signal, especially for narrow band interference. Furthermore, GPS and digital compass mounted on that antenna are used to triangulate the source of the signal interference. Therefore, the designed system is able to precisely detect the source of interference signal.

The RF measuring sensor network can be used to detect frequency interferences in any areas that have been requested for inspection. If there is a 3G/4G mobile network in the inspection area, the system will send all the captured data to the Google Firebase database via the 3G/4G mobile network, which is considered as the main datalink of the proposed system. The block diagram of the communication system in this case is shown in Figure 1.

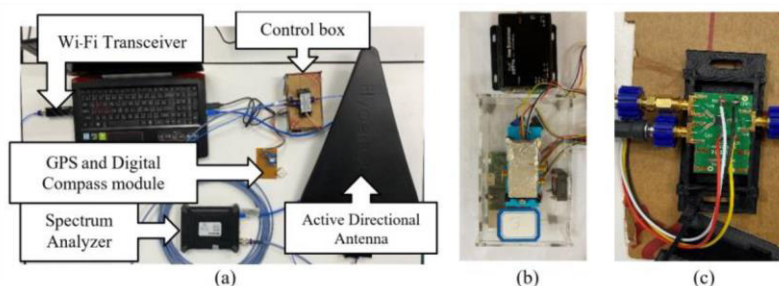
If there is no 3G/4G mobile network in the inspection area, the data transmitted from the signal detector will be sent outside that area via the supported datalink Lorawan to the RFMSN gateway that has access to the 3G/4G mobile phone network. Then, the RFMSN gateway will upload the relevant information to the Google Firebase database. In our proposed system, the range of Lorawan to achieve wireless communication is up to 3 km with a maximum data rate of 256 kbps. The block diagram of the communication system in this case is shown in Figure 2. Experimental setup and device connection are presented in Figure 3.



**Figure 1.** Block diagram of the communication system with 3G/4G mobile phone network.



**Figure 2.** Block diagram of the communication system without 3G/4G mobile phone network.



**Figure 3.** (a) Experimental setup and device connection, (b) control box and (c) RF Switch.

#### 4. Experimental Results and Discussion

In this section, some experimental results are given to demonstrate the effectiveness of the proposed wireless signal detection system. The experimental results and discussion are as follows:

##### 4.1. Testing the signal received from the WIFI transmitter

Firstly, we performed a preliminary study to see how the type of antenna would affect the performance of the detection system. The test was performed by sending the WIFI signal at the 2.4 GHz Channel 11 (2.451-2.473 GHz) using the original monopole antenna that came with the WIFI transmitter WAVLINK AC600 model, and using the Hyper LOG active directional antenna as a receiving antenna. Then, we change the transmitting antenna to Vivaldi antenna, and perform testing with the distance between the transmitter and receiver varying from 5 m to 200 m. In addition, the antenna is sent and received with horizontal polarization. The signal levels received from spectrum analyzer are shown in Table 1. From Table 1, changing the transmitting antenna from the monopole antenna to the Vivaldi antenna yields higher power level about 5 dBm

**Table 1.** Measuring result of the receiving signal from WIFI transmitter.

Distance (m)	Received power (dBm)		Effective Radiated Power (dBm)	
	Monopole Antenna	Vivaldi Antenna	Monopole Antenna	Vivaldi Antenna
5	3.5	4.0	12.5	13.0
25	-3.0	1.0	20.0	24.0
50	-10.0	-3.0	19.0	26.0
100	-23.0	-14.0	12.0	21.0
150	-28.0	-23.0	10.6	15.2
200	-31.0	-26.0	10.1	15.1

By measuring the value of received power, we can calculate the value of effective radiated power (*ERP*). To check if the *ERP* of the WIFI transmitters found meets the requirement by law, *ERP* was calculated using the Equation (1), where  $P_r$  is the power that can be received in front of the antenna,  $R$  is the distance between the WIFI receiver and the WIFI transmitter,  $G_r$  is gain of the receiver antenna (The antenna tested has gain 45 dBi) and  $\lambda$  is the wavelength.

$$ERP(dBm) = P_r(dBm) - G_r(dBi) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (1)$$

##### 4.2. Testing the RF switch controller

In our proposed system, the RF switch is installed in the RF measuring sensor network. It is used as an optional connection of the active directional antenna to the spectrum analyzer or to the WIFI transceiver. Therefore, the RF switch is controlled by a microcontroller to select the detection methods, whether to take the signal received from the antenna to analyze the frequency spectrum and signal strength or to find the SSID of the WIFI transmitter. Figure 3(c) shows the RF switch model EV1HMC8038LP4C. In this work, an RF signal received from active directional antenna is applied to the incoming transmission line of the RF switch. The Signal Vu- PC software provides users ability to analyze RF and vector signals. Furthermore, we have used WIFI analyzer software to identify nearby WIFI access points. To

validate the RF switch performance, several tests were conducted with the focus on WIFI signal strength and frequency spectrum of the wireless signal. The test results of the RF Switch are as follows:

In case of the RF switch “ON”, the received signal is pass through the spectrum analyzer. The proposed detection system can measure the magnitude of an input signal versus frequency. Figure 4 presents the spectral results of the wireless signal detection using spectrum analyzer. From the Figure 4(a), the spectrum displaying on the Signal Vu-PC program will appear and the magnitude spectrum of the signal will be higher. On the other hand, in case of the RF switch “OFF”, the received signal is pass through the WIFI transceiver. The proposed detection system cloud finds all the SSID of the WIFI access point from that signal. Figure 4 (b) presents the wireless signal detection system using WIFI transceiver. In this case, spectrum measurement results have not changed since the spectrum analyzer is not used. The results confirm that the RF switch can actually select the desired path of signal.

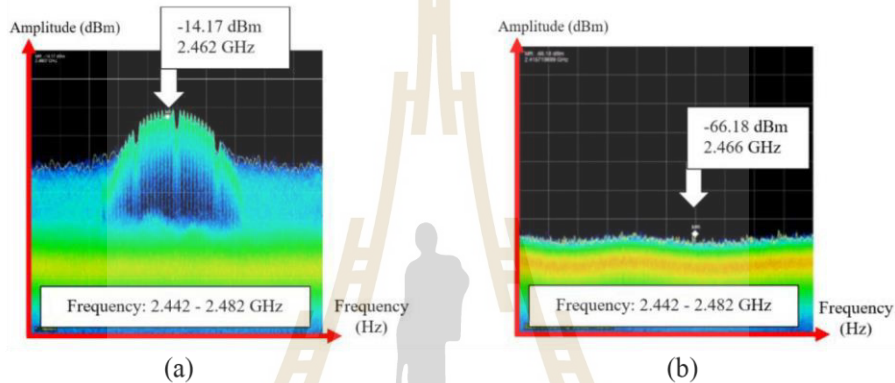


Figure 4. Spectral of the signal in question, (a) RF switch “ON” and (b) RF switch “OFF”.

4.3 Testing GPS and digital compass

GPS and digital compass serve to determine the location of the antenna, the direction of the antenna and the orientation of the antenna in three axes. In this work, GPS and digital compass are connected to the microcontroller for reading the relevant information and sending the data to the Fires base, a cloud computing database. The results of the GPS module positioning are compared with the portable satellite receiver (Garmin eTrex 10 GPS). In comparison of the coordinates of the position, there is an average error of 2.5 m which is within the acceptable range. A cloud computing database is shown in Figure 5.



Figure 5. A cloud computing database.

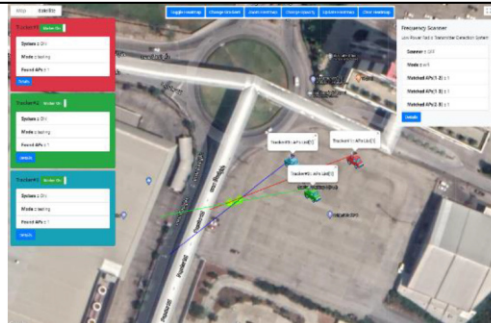


Figure 6. The location of the WIFI signal source shown on the Google map.

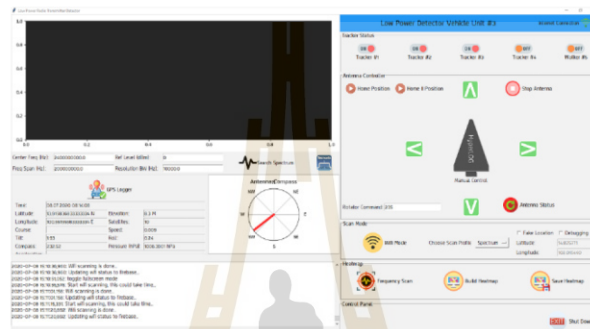


Figure 7. Radio frequency detection system GUI.

#### 4.4 Testing the radio frequency detection system for low-power RF transceivers.

The test scenario began with the installation of a high-power WIFI access point device in the building. The WIFI access point is assumed as one of the interfering sources. Then, we have used the proposed system to detect the interfering source. In this work, the active directional antenna and real-time spectrum analyzer can rapidly identify most interference sources and signal strength. Furthermore, GPS and digital compass mounted on the antenna are used to determine the position and direction of the antenna. From the principles of triangulation, it can calculate the intersection of the antenna direction to determine the location of the interfering source. Figure 6 presents the location of the WIFI access point device on the Google map. Radio frequency detection system GUI and display are also presented in Figure 7. With the user-friendly GUI of our software, this mapping allows bearing lines to be marked on the map to triangulate the source of the signal interference on the Google map. Therefore, the proposed system can enable interference hunting and easily triangulate the interfering source.

#### Conclusion

This article presents a design and development of the RF measuring sensor network for low-power RF transceivers detection system. In the proposed network, an active directional antenna and spectrum analyzer were applied to determine the type and frequency of interfering signal. The microcontroller was connected to GPS and digital compass modules for determining the position and direction of the active directional antenna. Furthermore, GPS and digital compass mounted on the active directional antenna were used to triangulate the source of the signal interference. The data communication between sensor node and gateway is based on technology used in the 3G/4G mobile phone network and LoRaWAN technology. Therefore, this method is able to accurately measure the power of wireless signal, triangulate the source

of interference, and identify user groups. The experimental results show that the designed system can precisely detect the sources of the interfering signal.

#### **Acknowledgments**

This work was supported by a grant from Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission under Grant BT2-01/2-61. The authors also would like to thank Suranaree University of Technology for all great supports.

#### **References**

- [1] Shinde P.A. and Mane, Y.B. 2015. Advanced vehicle monitoring and tracking system based on Raspberry Pi. *IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, pp.1-6.
- [2] A.P. Saikia, Thengal, N. Rastogi, A Medhi, R. Srivastava and K. Datta, 2017. Parameter sensing and object tracking using global positioning system," 2016 Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED), p. 289-293.
- [3] Hattarge, S. Kekre A. and Kothari, A. 2019. LORAWAN based GPS tracking of city-buses for smart public transport system. *First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC)*, p.265-269.
- [4] Zourmand, A. Kun Hing, A.L. Wai Hung C. and Abdul Rehman, M. 2019. Internet of Things (IoT) using Lora technology. *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, p. 324-330.
- [5] Yang, Y. 2020. Design and application of intelligent agriculture service system with Lora-based on wireless sensor network. *International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*, p.712-716.
- [6] National Instruments, "Introduction to Wireless LAN Measurements," 2019, [pdf] Available at: <[http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction\\_to\\_WLAN\\_Testing.pdf](http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf)>.



## ประวัติผู้เขียน

นายวงศธร ภาธรสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 12 เมษายน พุทธศักราช 2540 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา พ.ศ. 2558 จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2562 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้นำเสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานประชุมนานาชาติ The SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2020) ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2563

