รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

Spurious Emission Monitoring Systems from FM Radio Stations Research and Development Project

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา

และคณะ

กันยายน 2563

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา

สัญญารับทุนเลขที่ B2-2-13/58

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

Spurious Emission Monitoring Systems from FM Radio Stations Research and Development Project

คณะวิจัย

1.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา	นักวิจัยหัวหน้าโครงการ
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์	นักวิจัยร่วม
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	นักวิจัยร่วม
4.	นายสมเกียรติ แก้วไชยะ	นักวิจัยร่วม
5.	นายสุวัฒ ศรีทองคำ	นักวิจัยร่วม
6.	นายมานะ ลัทธวนิชพันธ์	นักวิจัยร่วม
7.	ดร.กิตติ วงศ์ถาวราวัฒน์	นักวิจัยร่วม
8.	ดร.พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์	นักวิจัยร่วม
9.	ดร. สิทธิชัย เด่นตรี	นักวิจัยร่วม

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

(สำนักงาน กสทช.)

กันยายน 2563

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง
กันยายน 2563

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง เป็นโครงการที่จัดทำขึ้นเพื่อลดการรบกวนกิจการการควบคุมการจราจรทางอากาศ โดยการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการรบกวนในย่านความถี่กิจการวิทยุการบินและกิจการเคลื่อนที่ทางการบินในเส้นทางบินพาณิชย์ ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่บนเสาส่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยใช้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรน (Drone) เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อวัดหาความผิดปกติของระบบสายอากาศที่ได้ทำการติดตั้งพร้อมทั้งหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับลดการแพร่คลื่นในทิศทางที่ขึ้นด้านบน โดยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนและระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่วิจัยและพัฒนา มีการทำงานบนระบบปฏิบัติการ Android บนมือถือ ซึ่งสามารถทำงานได้ตามความต้องการ โดยที่โดรนสามารถบินรอบสายอากาศเพื่อทำการเก็บข้อมูลความแรงของสัญญาณในแต่ละมุมของสายอากาศและแสดงผลการทดสอบในรูปแบบ 3 มิติได้อย่างอัตโนมัติ

2. ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอม โดยใช้เครื่องรับวิทยุขนาดเล็ก (SDR USB receiver) ที่สามารถควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้ ทำให้มีราคาถูก ซึ่งได้มีการนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปทดสอบติดตั้งใช้งานกับสถานีวิทยุของผู้ทดลองประกอบกิจการจำนวน 10 สถานี พบว่าสามารถตรวจสอบค่าการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีวิทยุในแถบความถี่วิทยุการบิน (108 – 137 MHz) พร้อมแจ้งเตือนผ่านทาง Application Line หากว่ามีค่าระดับการแพร่แปลกปลอมเกินกว่าที่ กสทช. กำหนด

3. ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems) มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวกับเครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่ง 500 วัตต์ เพื่อตรวจสอบสถานะต่าง ๆ ของเครื่องส่งอาทิเช่น กำลังส่งออกอากาศ (Forward Power) กำลังสะท้อนกลับ (Reflected Power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง อุณหภูมิของห้องและสถานะการทำงานของ

เครื่องส่งเป็นต้น ระบบสามารถรายงานผลผ่านทาง Application Blynk บนมือถือ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้ามาตรวจสอบสถานะของเครื่องส่งได้ตลอดเวลาและตรวจสอบได้ว่าเครื่องส่งวิทยุมีความผิดปกติหรือไม่ หากเกิดความผิดปกติของเครื่องส่ง ระบบจะทำการแจ้งเตือนและปิดเครื่องอัตโนมัติก่อนที่ตัวเครื่องส่งจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพ

โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ออกอากาศด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาดกำลังส่ง 500 วัตต์ ด้วยเสาสูง 60 เมตร มีการออกอากาศที่มีระดับการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนดของ กสทช. (ระดับไม่น้อยกว่า 80 dBc) เพื่อเป็นสถานีวิทยุที่ใช้สำหรับการทดสอบทั้ง 3 ระบบข้างต้น โดยที่ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียงและระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงถูกนำมาติดตั้งที่สถานีส่งแห่งนี้และได้ทำการเปิดใช้งานทั้ง 2 ระบบพร้อมกัน ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงจะถูกนำมาทดสอบ เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียงดังกล่าว พร้อมทั้งหารูปแบบที่เหมาะสมในการติดตั้งสายอากาศเพื่อลดการแพร่คลื่นในทิศทางที่ขึ้นด้านบน

คณะผู้วิจัยได้จัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการแก่ผู้ที่สนใจ เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย และสร้างความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับโครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง อีกทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปปรับใช้กับสถานีวิทยุอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้จัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการจำนวน 2 ครั้ง โดยได้รับการตอบรับจากผู้ที่สนใจเป็นอย่างดีและมีผู้เข้าร่วมการอบรมทั้งหมด 106 ท่าน ซึ่งการจัดการอบรมสามารถผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา

กันยายน 2563

กิจการกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากคุณภาพระบบเสียง ความสะดวก สบายในการรับฟัง ตลอดจนเครื่องรับที่มีราคาไม่สูง ในประเทศไทยมีสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มที่ได้รับใบอนุญาตจำนวนมากกว่า 300 สถานี และที่เป็นผู้ทดลองประกอบกิจการอีกกว่า 3000 สถานี เนื่องจากย่านความถี่ของกิจการกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มอยู่ติดกับย่านกิจการวิทยุการบิน ดังนั้นหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบกระจายเสียง ก็อาจจะส่งผลให้มีการรบกวนไปถึงย่านกิจการวิทยุการบินได้ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องป้องกันและแก้ไขการรบกวนอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้เกิดผลร้ายแรงที่อาจจะตามมา

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ประกอบด้วยงานวิจัย 3 ส่วน คือ **ระบบการวัดแบบรูป (radiation pattern) ของสายอากาศ** โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะสามารถวัดแบบรูปการแพร่พลังงานของสายอากาศที่สนใจ ที่ความถี่ต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อลดการแพร่คลื่นในย่านกิจการการบินของสายอากาศ ที่อาจจะมีทิศทางชี้ขึ้นฟ้าไปหาเครื่องบิน

ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอม (spurious emission monitoring systems) เป็นระบบที่คอยเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่มีราคาถูก ผู้ทดลองประกอบกิจการสามารถซื้อหามาติดตั้งประจำสถานีได้ โดยระบบจะคอยเฝ้าระวังตลอดเวลา และจะเตือนผ่านระบบอินเทอร์เน็ตในทันทีที่มีการรบกวน

ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (radio station monitoring systems) เป็นระบบการเฝ้าระวังติดตามข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญได้แก่ กำลังส่ง (forward power) กำลังสะท้อน (reflect power) อุณหภูมิเครื่องส่ง (transmitter temperature) และอุณหภูมิห้อง (room temperature) ทั้งนี้หากพารามิเตอร์ที่กล่าวมานี้มีการเปลี่ยนแปลงไปมากอาจจะส่งผลให้เครื่องส่งทำงานผิดพลาดจนเกิดมีการแพร่แปลกปลอมตามมา ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถตั้งระดับการยอมรับได้เช่น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ก็ให้ทำการแจ้งเตือน แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ก็ให้เปิดเครื่องส่งทันที

ซึ่งทั้ง 3 ระบบนี้ จะช่วยป้องกันและแจ้งเตือน เมื่อเกิดมีการแพร่แปลกปลอม เพื่อให้สามารถดำเนินการจัดการกับปัญหาได้อย่างรวดรวด เป็นการแก้ปัญหาเชิงรุก โดยที่เจ้าของสถานีเป็นผู้สมัครใจป้องกันตัวเอง ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สิน ตลอดจนเป็นการใช้ทรัพยากรคลื่นวิทยุให้เกิดประโยชน์สูงสุด

Spurious Emission Monitoring Systems from FM Radio Stations

Research and Development Project

Asst. Prof. Dr. Rangsan Tongta

September 2020

Analog FM broadcasting is still popular in Thailand. There are more than 300 licensed stations and 3000 more probation stations. Since the broadcast band is right next to the aeronautical band, any spurious emission from broadcast band may easily fall into aeronautical band. Preventing and finding spurious emission is needed, since it involves large public safety.

The spurious emission monitoring systems from FM radio stations research and development project consists of 3 major parts. Antenna radiation pattern measurement using unmanned aerial vehicles is to use drones to measure radiation pattern from FM stations in order to suppress unwanted radiation to the sky.

Spurious monitoring system is used for spectrum monitor. It uses a low-cost SDR receiver to monitor aeronautical band for spurious emission that may generated form the transmitter. If any spurious signals fall above preset threshold levels, the monitoring systems will alarm the owner via internet for quick response.

Radio station monitoring system looks for major technical parameters, i.e., forward and reflected power, room and transmitter temperature. Again, if those parameters changed more than preset threshold the owner may get warning or shut down the transmitter automatically.

These 3 systems will be combined to prevent and quick warning for any unwanted spurious emission. It is a self-volunteer system for active prevention for safe sky and maximum frequency usage.

สารบัญ

หน้า

บทสรุปผู้บริหาร .... ก

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

สารบัญ .... จ

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มา และความสำคัญของโครงการ 1

1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ทฤษฎี และแนวความคิด 3

2.1.1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Pattern Measurement System) 5

2.1.2. ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุ-กระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) 7

2.1.3. ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems) 7

2.2 ข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง 7

2.2.1. ประเภทการรบกวนวิทยุทางการบินอันเนื่องมาจากสถานีวิทยุ-กระจายเสียงเอฟเอ็ม 7

2.3 ย่านความถี่วิทยุ 8

2.4 แหล่งกำเนินความถี่วิทยุสำหรับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง 10

2.5 กำลังงานของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง 10

2.6 บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field Regions) 11

2.7 ระดับกำลังและความหนาแน่นกำลัง (Power Levels and Power Density) 12

2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) 13

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.8.1. โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 14
2.8.2. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ทิศทาง และออมนิไดเรคชั่นนอล 15
2.8.3. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก 16
2.9 อัตราขยายสายอากาศ 17
2.10 โพลาไรเซชัน (Polarization) 18
2.11 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ 19
2.11.1. คลื่นดิน (Ground Wave) 20
2.11.2. คลื่นอากาศ หรือ คลื่นโดยตรง (Direct Wave) 21
2.11.3. คลื่นฟ้า (Sky Wave) 22
2.12 ข้อกำหนดระดับการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง 23
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย 24
3.1 บทนำ 24
3.2 ขอบเขตการดำเนินงาน 25
3.3 ผลผลิตสำคัญ 26
3.4 แผนปฏิบัติการโครงการ 27
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ 29
4.1 บทนำ 29
4.2 ผลการดำเนินงานระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) 29
4.2.1. การทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในเบื้องต้น 35
4.2.2. การทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับโดรน และอุปกรณ์ภาคพื้นดิน 44
4.2.3. การทดสอบระยะเวลาแบตเตอรี่ของโดรน 46
4.2.4. พัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดไฟล์ทการบินของโดรนและทดสอบใช้งานโปรแกรมร่วมกับโดรน 49

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.5. การออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นร่วมกับโดรน 58

4.2.6. การทดลองระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง 61

4.2.7. การวิจัย พัฒนา และปรับปรุงระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 67

4.2.8. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการไฟล์ทการบินของโดรน (เวอร์ชั่น 2) 68

4.2.9. พัฒนาระบบตรวจสอบระดับแบตเตอรี่สำรองของเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก 73

4.2.10. การทดลองโปรแกรมไฟล์ทการบินสำหรับระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้พัฒนา ปรับปรุง ร่วมกับสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง 75

4.2.11. การทดสอบระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณสถานีวิทยุกระจายเสียง 78

4.2.12. สรุปงานวิจัย 83

4.3 ผลการดำเนินงานระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) 84

4.3.1. องค์ประกอบของอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวน 84

4.3.2. การกำหนดค่าความแรงสัญญาณและระยะเวลาในการวัดสำหรับการแจ้งเตือนเมื่อมีสัญญาณแปลกปลอม 96

4.3.3. ผลการทดสอบระบบการวัดและเฝ้าระวัง 96

4.4 ผลการดำเนินงานระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุ-กระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems) 108

4.4.1. ออกแบบระบบการออกอากาศ 108

4.4.2. ออกแบบอุปกรณ์ Directional Coupler 110

4.4.3. การเพิ่มประสิทธิภาพ Directional Coupler ด้วยวงจร Band Pass Filter ที่สามารถลดทอนความถี่วิทยุการบินได้ 112

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.4. ผลการทดสอบ Directional Coupler 113

4.4.5. อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ 116

4.4.6. บอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์ ESP32 116

4.4.7. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 120

4.4.8. การติดตั้งโปรแกรม Arduino IDE และการใช้งานบอร์ด ESP32 122

4.4.9. การใช้งานแอพพลิเคชั่น Blynk 128

4.4.10. อุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุ-กระจายเสียง 134

4.4.11. ทดสอบระบบออกอากาศในห้องปฏิบัติการ 135

4.4.12. การแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องส่งวิทยุผ่าน Internet of things (IoT) 143

4.4.13. ทดสอบใช้งานจริงกับเครื่องส่งวิทยุฯ ที่สถานีวิทยุกระจายเสียง-มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 148

4.4.14. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ 151

4.4.15. สรุปผลการทดสอบ 151

4.5 ดำเนินการสร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีเสาอากาศสูง 60 เมตร 152

4.6 ทดสอบอุปกรณ์ทั้ง 3 ระบบกับสถานีวิทยุกระจายเสียงที่สร้างขึ้น 155

4.7 คุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ 156

4.8 จัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการ 169

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 172

5.1 สรุปผลการวิจัย 172

5.2 สรุปผลการวิจัยระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) . 173

5.3 สรุปผลการวิจัยระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) 173

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 สรุปผลการวิจัยระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุ-
กระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems).....174

5.5 สรุปคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ.....175

เอกสารอ้างอิง.....176

ภาคผนวก.....178

ภาคผนวก ก รายละเอียดการสร้างสถานีส่งวิทยุกระจายเสียง.....178

ภาคผนวก ข รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแพร่กระจายคลื่นรบกวนสำหรับ
สถานีส่งวิทยุกระจายเสียง.....195

ภาคผนวก ค รายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์ Directional Coupler และแบบวงจร
อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง.....211

ภาคผนวก ง รายละเอียดการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและการประชาสัมพันธ์
โครงการ.....217

ภาคผนวก จ เอกสารประชาสัมพันธ์และคู่มือการใช้งานฉบับย่อ.....228

ภาคผนวก ฉ เอกสารแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ.....245

ภาคผนวก ฌ บทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ
ระดับชาติ/นานาชาติ.....253

ประวัติผู้วิจัย.....263

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สเปกตรัมของความถี่วิทยุ 8
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของบอร์ด Raspberry Pi 85
ตารางที่ 4.2 แสดงคณสมบัติของบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT 119
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความแรงสัญญาณของเครื่องส่งวิทยุ 138
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนและการปิดเครื่องอัตโนมัติ 146
ตารางที่ 4.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ 151

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงสถิติการรบกวนในแต่ละปี สำหรับปี 2560 นับถึงสิ้นมิถุนายน (ข้อมูลจาก บวท.) [4] 3
รูปที่ 2.2 แสดงระยะทางจากสถานีที่มีการแพร่แปลกปลอมที่ความถี่ 114.25MHz (บนขวา) จนถึงจุดที่รับสัญญาณได้ (ล่างซ้าย) บนภูเขาที่สูงประมาณ 200 เมตร จากระดับพื้นดินปกติ [5] 4
รูปที่ 2.3 โดรนวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง และสายอากาศชนิด Isotropic [6-9] 5
รูปที่ 2.4 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง 6
รูปที่ 2.5 ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง [6-10].. 6
รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศ [14-15] 11
รูปที่ 2.7 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [14] 14
รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น [14] 15
รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทาง [14] 16
รูปที่ 2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบออมนิไดเรคชั่นนอล [14] 16
รูปที่ 2.11 แบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด [14] 17
รูปที่ 2.12 การหมุนของระนาบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโพลาไรเซชันวงรี ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $z = 0$ [14] 19
รูปที่ 2.13 เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไปจากสถานี [16] 20
รูปที่ 2.14 ลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ [16] 20
รูปที่ 2.15 การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่างๆ [17] 21
รูปที่ 2.16 การเดินทางของคลื่นอากาศ [16] 22
รูปที่ 2.17 การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า [16] 22
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดย UAV [31] 31
รูปที่ 4.2 ระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นและการแสดงผลการทดสอบด้วยโดรน [32] 32
รูปที่ 4.3 แผนผังการทำงาน การติดตั้งสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและการแสดงผลการทดสอบ [33] 32

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียง 34
รูปที่ 4.5 เสาส่งสัญญาณจำลองสำหรับการทดสอบการทดสอบการวัดแบบรูป-การแพร่กระจายคลื่น 36
รูปที่ 4.6 สายอากาศโมโพลสำหรับการจำลองการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 36
รูปที่ 4.7 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม RSA306 USB Real Time Spectrum Analyzer 37
รูปที่ 4.8 เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 37
รูปที่ 4.9 แบตเตอรี่สำรองสำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก.... 38
รูปที่ 4.10 ตัวกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย 38
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสายอากาศในบริเวณการสื่อสารต่างๆ 39
รูปที่ 4.12 จำลองการติดตั้งระบบการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 41
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในห้องปฏิบัติการ 42
รูปที่ 4.14 ผลการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมที่ทำการพัฒนาในห้องปฏิบัติการ 42
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง 43
รูปที่ 4.16 การทดสอบระบบสื่อสารและผลการทดสอบระหว่างคอมพิวเตอร์พกพา และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 45
รูปที่ 4.17 ภาพหน้าจอแสดงผลเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสารของคอมพิวเตอร์พกพา และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 45
รูปที่ 4.18 โดรน Matrice 600 Pro สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 47
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายการทดลองเพื่อทดสอบระเวลาการทำงานของแบตเตอรี่โดรนเมื่อไม่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนักและบรรทุกโหลดน้ำหนัก 47
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่โดรนเมื่อไม่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนักและบรรทุกโหลดน้ำหนัก 48
รูปที่ 4.21 การจำลองการบินของโดรนในโปรแกรม DJI Simulator 50
รูปที่ 4.22 วิธีการตั้งค่าในโปรแกรมกำหนดไฟล์ทการบิน 51
รูปที่ 4.23 หน้าจอแสดงตำแหน่งไฟล์ทการบินของโดรน โดยกำหนดตำแหน่งตามค่าที่ได้ทำการตั้งค่า เข้าไปในโปรแกรมที่พัฒนา 52

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24 ผลการจำลองการบินของโดรนไปยังตำแหน่งที่กำหนดบนโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของ DJI และโปรแกรมสร้างเส้นทางการบินของโดรน (Way Point) บนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 53
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองการบินของโดรนไปยังตำแหน่งที่กำหนดบนโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของ DJI และโปรแกรมสร้างเส้นทางการบินของโดรน (Way Point)บน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (ต่อ) 54
รูปที่ 4.26 เสาส่งสัญญาณจำลองความสูง 6 เมตร 56
รูปที่ 4.27 รูปถ่ายการทดลองสำหรับการทดสอบโปรแกรมไฟล์ทบินร่วมกับโดรน 56
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายการทดสอบโปรแกรมไฟล์ทบินร่วมกับโดรนโดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของโดรนเมื่อทำการบินด้วยโปรแกรมไฟล์ทบินโดรนที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น 57
รูปที่ 4.29 สายอากาศแบบมีทิศทางที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศ ภาครับสัญญาณในโครงการวิจัย 58
รูปที่ 4.30 ภาพร่างการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 60
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นร่วมกับโดรน Matrice 600 Pro 60
รูปที่ 4.32 สายอากาศไดโพลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง 62
รูปที่ 4.33 แบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ [42] 62
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายการจำลองพื้นที่ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลอง 64
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงจุดเลเซอร์เพื่อใช้ในการยืนยันตำแหน่งของโดรนขณะบินทำการทดสอบ 65
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณ วิทยุกระจายเสียงจำลอง 66
รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณจำลอง 67
รูปที่ 4.38 หน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินโดรนบนมือถือ 69
รูปที่ 4.39 วิธีการตั้งค่าจุดศูนย์กลางการทดสอบและรายละเอียดในการทดสอบ 69
รูปที่ 4.40 วิธีการกำหนดจุดเริ่มต้นในการทดสอบและการสร้าง way point 70

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.41 วิธีการเชื่อมต่อโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินบมือถือกับโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมบนเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก 71
รูปที่ 4.42 วิธีการโหลด waypoint ไปยังโดรน และการแสดงผลการโหลด waypoint.............. 71
รูปที่ 4.43 วิธีการกดปุ่มเริ่มบินให้กับโดรนและหน้าจอแสดงผลการเก็บข้อมูลเมื่อโดรนทำการเก็บข้อมูล.. 72
รูปที่ 4.44 หน้าจอการแสดงผลการเก็บบันทึกข้อมูลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระบบปฏิบัติการ Android 72
รูปที่ 4.45 ระบบตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรอง.. 73
รูปที่ 4.46 การทดสอบระบบการตรวจวัดระดับแบตเตอรี่สำรอง... 74
รูปที่ 4.47 ผลการทดสอบการวัดระดับแรงกันของแบตเตอรี่สำรอง สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก 75
รูปที่ 4.48 หน้าจอแสดงระดับแบตเตอรี่สำรอง 75
รูปที่ 4.49 การทดลองโปรแกรมไฟล์ทการบินสำหรับระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้พัฒนา ปรับปรุง ร่วมกับสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง 76
รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล 77
รูปที่ 4.51 ควบคุมการบินโดรนเปลี่ยนตำแหน่งไปยังองศาต่างๆ 78
รูปที่ 4.52 ควบคุมการบินโดรนโดยปรับระดับความสูงต่าง ๆ.. 78
รูปที่ 4.53 สถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ทำการทดสอบ... 79
รูปที่ 4.54 คุณสมบัติของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.. 80
รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สถานีส่งสัญญาณวิทยุ-กระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 81
รูปที่ 4.56 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.. 82
รูปที่ 4.57 กราฟ 3 มิติแสดงความแรงที่มีการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 83
รูปที่ 4.58 อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวัง.. 84
รูปที่ 4.59 บอร์ด Raspberry Pi Model B.. 85

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.60 ส่วนประกอบของ Raspberry Pi 87
รูปที่ 4.61 อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเริ่มต้นกับ Raspberry Pi 88
รูปที่ 4.62 LCD Screens ที่ต่ออยู่กับ Raspberry Pi 89
รูปที่ 4.63 หน้าเว็ปไซด์ดาวน์โหลดซอฟท์แวร์ระบบปฏิบัติการของ Raspberry Pi 89
รูปที่ 4.64 อุปกรณ์รับสัญญาณ DVB-T SDR+DAB+FM 90
รูปที่ 4.65 หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนวิทยุการบิน 91
รูปที่ 4.66 ส่วนประกอบของหน้าจอแสดงผล 91
รูปที่ 4.67 หน้าการตั้งค่าที่ 1 (Page1) 92
รูปที่ 4.68 หน้าการตั้งค่าที่ 2 (Page2) 93
รูปที่ 4.69 หน้าจอแสดงผลเริ่มต้นเมื่อเปิดอุปกรณ์ 94
รูปที่ 4.70 การตั้งค่าอุปกรณ์ก่อนทำการรับสัญญาณวิทยุ FM ความถี่ 103.25 MHz 94
รูปที่ 4.71 หน้าจอแสดงผลความถี่ 103.25 MHz ที่รับได้ 95
รูปที่ 4.72 หน้าจอแสดงผลการค้นหาสัญญาณรบกวนวิทยุการบินพบสัญญาณแปลกปลอมที่ความถี่ 115.2 MHz 95
รูปที่ 4.73 แบบจำลองการทำงานของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 109
รูปที่ 4.74 องค์ประกอบของอุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 109
รูปที่ 4.75 แบบจำลอง Directional Coupler 110
รูปที่ 4.76 วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นสัญญาณไฟกระแสตรง (DC) 111
รูปที่ 4.77 การออกแบบ Directional Coupler โดยใช้โปรแกรม CST 111
รูปที่ 4.78 การออกแบบ Directional Coupler ที่เพิ่มวงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz 112
รูปที่ 4.79 วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบที่มีวงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz 113
รูปที่ 4.80 แสดงผลการทดสอบ Transmission (S21) วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบ 114
รูปที่ 4.81 แสดงผลการทดสอบ Reflected power (S11) วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบ 114

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.82 ย่านความถี่วิทยุสำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศ 115
รูปที่ 4.83 DHT11 Temperature and Humidity Sensor Module 116
รูปที่ 4.84 บอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT 118
รูปที่ 4.85 ปุ่มควบคุมการทำงานของบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT 119
รูปที่ 4.86 องค์ประกอบของระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 120
รูปที่ 4.87 แผนผังวงจรระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 121
รูปที่ 4.88 แบบจำลอง 3 มิติของบอร์ดควบคุมของระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 121
รูปที่ 4.89 เว็บไซต์ https://www.arduino.cc/ 122
รูปที่ 4.90 เลือกดาวน์โหลด Arduino IDE 122
รูปที่ 4.91 การติดตั้ง Arduino core for ESP32 123
รูปที่ 4.92 หน้าต่างแสดงการดาวน์โหลดซอฟแวร์ต่าง ๆ สำหรับ ESP32 123
รูปที่ 4.93 โปรแกรม Arduino IDE ที่พร้อมใช้งานกับบอร์ด ESP32 124
รูปที่ 4.94 เลือกโค้ดโปรแกรมไฟกระพริบเพื่อเป็น File ตัวอย่าง 125
รูปที่ 4.95 เลือกบอร์ด NodeMCU-32S 125
รูปที่ 4.96 เลือกพอร์ตที่จะทำการอัพโหลดโปรแกรม 126
รูปที่ 4.97 แสดงการอัพโหลดโปรแกรมของ ESP32 126
รูปที่ 4.98 การเปิด Library Manager 127
รูปที่ 4.99 ทำการค้นหา Library ที่ต้องการ 127
รูปที่ 4.100 ติดตั้ง Library สำเร็จ 128
รูปที่ 4.101 ข้อมูลรายงานการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชั่น Blynk 128
รูปที่ 4.102 รูปแสดงแอพพลิเคชั่น Blynk ใน Android และ IOS 129
รูปที่ 4.103 รูปแสดงการสร้างผู้ใช้งานใหม่ 130
รูปที่ 4.104 รูปแสดงการสร้างโปรเจคใหม่ 130
รูปที่ 4.105 รูปแสดงตัวอย่างอีเมล์ที่ได้รับการ Blynk Serve 131
รูปที่ 4.106 เพิ่มวิทเจ็ตของแอพพลีเคชั่น Blynk 131
รูปที่ 4.107 หน้าต่างแอฟหลังจากใส่วิตเจ็ต 132
รูปที่ 4.108 การตั้งค่าวิตเจ็ต 132

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.109 การตั้งค่าวิตเจ็ต (2) 133
รูปที่ 4.110 เพิ่มไลบรารี่ Blynk ในโปรแกรม Arduino IDE..... 133
รูปที่ 4.111 ดาวน์โหลดไลบรารี่ Blynk 134
รูปที่ 4.112 แสดงอุปกรณ์ระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง 134
รูปที่ 4.113 แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิค ของสถานีวิทยุกระจายเสียง..... 135
รูปที่ 4.114 แผนผังของผู้ควบคุมของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง..... 135
รูปที่ 4.115 การทดลองติดตั้ง Directional Coupler 136
รูปที่ 4.116 เครื่องส่งวิทยุที่ต่อกับ Directional Coupler..... 136
รูปที่ 4.117 ตำแหน่งของ Forward power และ Reflected power..... 137
รูปที่ 4.118 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Forward power และ DC Voltage 138
รูปที่ 4.119 การติดตั้งอุปกรณ์ของระบบ 139
รูปที่ 4.120 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 140
รูปที่ 4.121 ทดสอบระบบออกอากาศ..... 140
รูปที่ 4.122 ทดสอบ Output power ของเครื่องส่งวิทยุด้วยกำลังส่งสูงสุด (467 วัตต์) 141
รูปที่ 4.123 ทดสอบ Output power ของเครื่องส่งวิทยุด้วยกำลังส่งสูงสุด (202 วัตต์) 142
รูปที่ 4.124 ทดสอบการวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ 143
รูปที่ 4.125 ทดสอบการวัดอุณหภูมิห้อง 143
รูปที่ 4.126 การรายงานข้อมูลและการสั่งการของระบบ 144
รูปที่ 4.127 หน้าต่างของ Application ของระบบสั่งการเครื่องส่งวิทยุ..... 144
รูปที่ 4.128 หน้าแอปพลิเคชันระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ เมื่อแสดงผลย้อนหลัง..... 145
รูปที่ 4.129 ผลการแจ้งเตือนเมื่อกำลังส่งมากกว่า 250 วัตต์ 146
รูปที่ 4.130 ผลการแจ้งเตือนและปิดเครื่องอัตโนมัติเมื่อกำลังส่งมากกว่า 300 วัตต์ 146
รูปที่ 4.131 ทดสอบการสั่งปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk..... 147
รูปที่ 4.132 ทดสอบการสั่งเปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk 147
รูปที่ 4.133 สถานีวิทยุกระจายเสียงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 148
รูปที่ 4.134 ติดตั้งระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ กับสถานีวิทยุกระจายเสียงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 149

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.135 ระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ แสดงสถานะของเครื่องส่งวิทยุ เมื่อทดสอบใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียง 149
รูปที่ 4.136 ระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ แสดงสถานะอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ เมื่อทดสอบใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียง 150
รูปที่ 4.137 แสดงตัวอย่างข้อความของ Application Line ที่ส่งมาจากระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ 150
รูปที่ 4.138 สถานที่ติดตั้งสถานีวิทยุกระจายเสียง 152
รูปที่ 4.139 แสดงการเจาะเสาเข็มเพื่อสร้างจุดยึดสริงของเสาส่งสัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียง 152
รูปที่ 4.140 แสดงการเจาะเสาเข็มเพื่อสร้างฐานเสาส่งสัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียง 153
รูปที่ 4.141 หลุมสำหรับสร้างฐานเสาส่งสัญญาณ 153
รูปที่ 4.142 เทคอนกรีตบริเวณฐานเสาส่งสัญญาณ 154
รูปที่ 4.143 เสาอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่สร้างสำเร็จแล้ว 154
รูปที่ 4.144 ทดสอบออกอากาศกระจายเสียงด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์ 155
รูปที่ 4.145 ทดสอบอุปกรณ์ภายในสถานีวิทยุที่ออกอากาศกระจายเสียง ด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์ 156
รูปที่ 4.146 ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียง ที่ออกอากาศกระจายเสียงด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์ 156
รูปที่ 4.147 สถานีวิทยุกระจายเสียงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ความถี่ 99.50 MHz) 157
รูปที่ 4.148 เครื่องส่งและระบบสายอากาศ ของวิทยุสถานีวิทยุกระจายเสียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ความถี่ 99.50 MHz) 158
รูปที่ 4.149 ผลการทดสอบสัญญาณแปลกปลอม RIM ของเครื่องส่งวิทยุของสถานีสาธิตต้นแบบ 158
รูปที่ 4.150 การแผ่กำลังของคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นแบบแผ่รอบตัวในระนาบเดี่ยว 159
รูปที่ 4.151 คุณสมบัติของสายอากาศของสถานีสาธิตต้นแบบ 160
รูปที่ 4.152 แบบจำลองเสาส่งวิทยุของสถานีสาธิต และผลการจำลองการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติของสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 8 ต้น 161
รูปที่ 4.153 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติของสายอากาศ แบบแถวลำดับจำนวน 8 ต้น 161

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.154 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต (ด้านหน้าของสายอากาศ คือ มุม 0 องศา)....... 162

รูปที่ 4.155 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต ทดสอบที่ความถี่ 131 MHz....... 163

รูปที่ 4.156 อัตราขยายของความถี่ Intermodulation ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 0.85λ....... 163

รูปที่ 4.157 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 0.85λ....... 164

รูปที่ 4.158 กราฟแสดงอัตราขยายของความถี่ Intermodulation....... 165

รูปที่ 4.159 กราฟแสดงอัตราขยายของความถี่วิทยุกระจายเสียง (98 MHz)....... 166

รูปที่ 4.160 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับจาก 214 cm (0.7λ) ทดสอบที่ความถี่ 131 MHz....... 166

รูปที่ 1.1 ภาพทีมงานในการดำเนินงานปรับระยะสายอากาศแถวลำดับ....... 165

รูปที่ 4.162 ผลการวัด S11 ของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต ที่ผ่านการปรับระยะห่างสายอากาศแถวลำดับมาเป็น 214 cm หรือ (0.7λ)....... 167

รูปที่ 4.163 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 214 cm (0.7λ)....... 168

รูปที่ 4.164 ผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation ก่อนและหลังปรับระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ....... 168

รูปที่ 4.165 ภาพบรรยายกาศการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ ในวันที่ 28 ตุลาคม 2562 ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี....... 169

รูปที่ 4.166 ภาพบรรยากาศการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ ในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2562 ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาส สโมสรทหารบก ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานครฯ....... 170

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญของโครงการ

สัญญาณรบกวนอันเป็นผลมาจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ไม่เหมาะสม ก่อให้เกิดการรบกวนการใช้งานกิจการวิทยุการบิน ซึ่งใช้งานในกิจการนำทางการบินในย่าน 108 MHz – 117.975 MHz และกิจการเคลื่อนที่ทางการบินในเส้นทางบินพาณิชย์ในย่าน 117.975 MHz - 137 MHz จะส่งผลต่อความปลอดภัยสาธารณะต่อผู้ใช้บริการทางการบิน และผู้ประกอบการทางการบินพาณิชย์ อาจนำไปสู่ความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและชื่อเสียงของประเทศอีกด้วย มาตรการต่างๆที่สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) ประกอบด้วยมาตรฐานเครื่องส่งสถานีวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม [1] ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการส่งกระจายเสียงได้รับการตรวจมาตรฐานเพื่อป้องกันการแพร่แปลกปลอมไปรบกวนในกิจการทางการบิน [2-3] เป็นการคัดกรองเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงให้ได้รับการแก้ไขเป็นที่เรียบร้อยก่อนนำไปใช้งาน การติดตั้งสายอากาศที่ไม่ได้มาตรฐานมีผลทำให้การแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงไม่เป็นไปตามคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศที่ระบุมาจากผู้ผลิต การแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงแทนที่จะแพร่มาครอบคลุมพื้นที่การให้บริการประชาชนอย่างถูกต้องแต่กลับแพร่กระจายคลื่นขึ้นท้องฟ้า ทำให้สัญญาณรบกวนกระทบต่อวิทยุการบินมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) ที่จะทำการตรวจสอบการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีที่มีการติดตั้งใช้งานแล้ว ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) จึงมีความจำเป็นในการเฝ้าระวังการออกอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง หากมีการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)สามารถส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตให้ผู้เกี่ยวข้องทราบและให้แก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว เครื่องส่งวิทยุก็คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อาจจะชำรุดเสียหายหรือทำงานผิดปกติได้ในระหว่างการใช้งาน ดังนั้นการป้องกันเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เครื่องส่งทำงานจนอุปกรณ์เองชำรุดก็เป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง และหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นก็ควรมีรายงานให้ผู้เกี่ยวข้องทราบทันที การตรวจวัดกำลังสะท้อนกลับ (Reflected Power) การตรวจวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งและอุณหภูมิห้อง ในลักษณะต่อเนื่องและทำการเตือนทันทีที่พบสิ่งผิดปกติ จะเป็นผลดีอย่างยิ่งต่อการป้องกันเครื่องส่งก่อนที่จะชำรุดเสียหายจนไปสร้างปัญหารบกวนกิจการการบินได้

1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ

1) ศึกษาและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ (Antenna Pattern) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง ที่มีผลต่อการรบกวนวิทยุทางการบิน โดยการใช้เครื่องมือวัดทั้งในภาคพื้นดินและบนอากาศผ่านการใช้โดรน (Drone) หรือ อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle)
2) ศึกษาและพัฒนาระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวัง (Measuring and Monitoring System) สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอม (Spurious Emission) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง
3) ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าระวังพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น กำลังส่งออกอากาศ กำลังสะท้อนกลับ อุณหภูมิของเครื่องส่ง ในลักษณะที่แยกต่างหากออกมาจากเครื่องส่ง สามารถนำไปใช้ร่วมกับเครื่องส่งใดก็ได้ มีระบบส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องรับทราบ
4) สถานีสาธิตต้นแบบ โดยนำเอาอุปกรณ์ในข้อ 2) และ 3) มาติดตั้งใช้งานจริง และมีการตรวจสอบระบบสายอากาศจากระบบในข้อ 1)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สายอากาศที่เกิดจากการติดตั้งที่ไม่ถูกวิธี หรือมีความบกพร่อง ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะสร้างปัญหาจะได้รับการตรวจพบก่อนที่จะสร้างผลกระทบด้านการรบกวนวิทยุการบิน โดยการใช้เครื่องมือวัดทั้งในภาคพื้นดิน และบนอากาศผ่านการใช้โดรน (Drone) หรืออากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle)
2) ได้ระบบ/อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอม (Spurious Emission) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถระบุต้นตอของปัญหาได้อย่างรวดเร็ว
3) อุปกรณ์การออกอากาศทั้งระบบจะได้รับการเฝ้าระวังผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต รวมทั้งปิด-เปิดเครื่องส่งโดยอัตโนมัติหรือตามความต้องการ ดังนั้นหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นก็จะได้รับการแก้ไขได้ทันท่วงทีก่อนที่ถึงจุดชำรุดเสียหายทำให้เครื่องส่งมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และลดการรบกวนที่อาจจะเกิดขณะที่เครื่องส่งไม่ปกติ
4) สถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ ที่มีการนำเอาทุกข้อที่กล่าวมาข้างต้นมาใช้งานจริง สามารถออกอากาศโดยมีการแพร่แปลกปลอมเป็นไปเป็นตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด

บทที่ 2
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี และแนวความคิด

การรบกวนวิทยุการบินก่อให้เกิดความเสี่ยงของการบินของประเทศไทย ซึ่งจะสร้างผลกระทบด้านความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยทางด้านการบินของประเทศ การรบกวนวิทยุการบินโดยส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม โดยเฉพาะจากสถานีวิทยุชุมชนที่มีการแพร่คลื่นแปลกปลอมไปรบกวนในย่านความถี่วิทยุการบิน (เช่น 108 - 137 MHz) จากสถิติของการรบกวนวิทยุการบินในรอบ 13 ปี

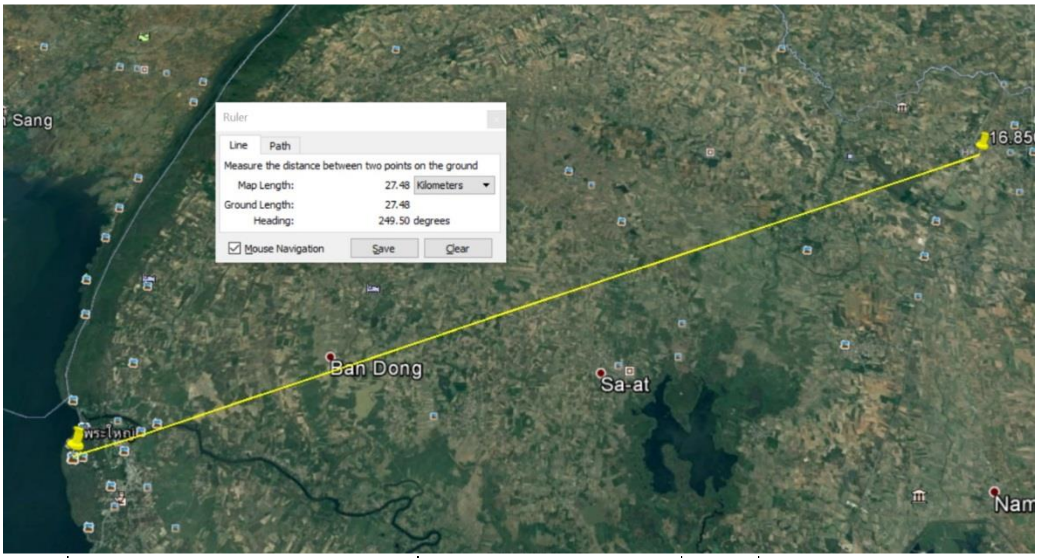
รูปที่ 2.1 แสดงสถิติการรบกวนในแต่ละปี สำหรับปี 2560
นับถึงสิ้นมิถุนายน (ข้อมูลจาก บวท.) [4]

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 ได้มีการบกวนวิทยุการบินที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปีซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุชุมชนที่มีเครื่องส่งและการติดตั้งของสถานีที่ไม่ได้มาตรฐาน สร้างคลื่นแปลกปลอมออกมารบกวนวิทยุการบินอย่างรุนแรงต่อเนื่อง ทาง สำนักงาน กสทช. มีมาตรการแก้ไขโดยออกประกาศกำหนดเครื่องส่งของสถานีวิทยุชุมชนทุกสถานีต้องผ่านการตรวจสอบมาตรฐานทางเทคนิคเสียก่อน จะเห็นได้ว่าสถิติการรบกวนวิทยุการบินมีแนวโน้มที่ลดลงตั้งแต่ปี 2556 แต่อย่างไรก็ตามสถิติการรบกวนของปีล่าสุดยังอยู่ในระดับที่สูง การที่เครื่องส่งมีมาตรฐานได้ช่วยแก้ปัญหาการรบกวนได้ระดับหนึ่ง แต่เมื่อเครื่องส่งไปติดตั้งใช้งานจริงในสถานีซึ่งบางครั้ง การติดตั้งระบบส่งสายส่ง สายอากาศยังไม่ได้มาตรฐาน หรือ มีการใช้งานที่ปราศจากการดูแลรักษาที่ถูกต้องทำให้ระบบกระจายเสียงวิทยุเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วก่อนเวลาอันควร สิ่งเหล่านี้มีส่วนในการสร้างการแพร่แปลกปลอมที่ไปรบกวนวิทยุการ

บินเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการสร้างการแพร่แปลกปลอมแบบ Intermodulation ซึ่งเกิดจากการผสมคลื่นวิทยุของสถานีตัวเองกับสถานีข้างเคียง เนื่องจากจำนวนสถานีวิทยุชุมชนมีมากถึง 6000 สถานีทั่วประเทศ และมีการตั้งสถานีกระจุกตัวในบางพื้นที่ ซึ่งก่อให้เกิดการรบกวนแบบ Intermodulation เกิดขึ้นได้ง่ายและมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นสถิติการรบกวนจึงยังคงอยู่ในระดับที่สูง

เมื่อมีเหตุการณ์การรบกวนวิทยุการบินเกิดขึ้น ทาง บริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด (บวท.) จะได้รับแจ้งมาจากนักบินโดยระบุตำแหน่งของการรบกวนรวมถึงความถี่ที่ถูกรบกวน ซึ่งจะถูกนับเป็นสถิติการรบกวนเป็น 1 ครั้ง และจะนับทุกๆ ครั้งที่นักบินประสบเจอการรบกวน (ถึงแม้ว่าจะมีสาเหตุมาจากเพียงหนึ่งสถานีวิทยุกระจายเสียงก็ตาม) บวท. จะรวบรวมสถิติการรบกวนในแต่ละความถี่ ในทุกเส้นทางที่ให้บริการแก่นักบิน เป็นสถิติการรบกวนประจำเดือน และประจำปี เพื่อแจ้งแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องต่อไป ดังนั้นเหตุการณ์การรบกวนวิทยุการบินที่อาจจะเกิดจากสถานีวิทยุเพียงสถานีเดียว แต่ได้สร้างจำนวนครั้งของการรบกวนได้มากตามจำนวนเที่ยวบินที่ได้รับผลกระทบในบริเวณพื้นที่นั้น

จากผลการศึกษาภาคสนามพบว่า ถึงแม้จะมีการแพร่แปลกปลอมที่สามารถรับได้ที่ระยะไกลถึงกว่า 27 กิโลเมตร ดังรูปที่ 2.2 (รับบนภูเขาสูงประมาณ 200 เมตร) แต่เมื่อทำการรับสัญญาณที่บนพื้นราบปกติของสถานีเดียวกัน กลับพบว่าต้องเข้าใกล้สถานีในระยะประมาณ 5 กิโลเมตรจึงจะเริ่มรับสัญญาณการแพร่แปลกปลอมได้ ดังนั้นการหาสถานีที่ทำการรบกวนจึงเป็นเรื่องที่ยากและใช้ทั้งเวลาและทรัพยากรในการตรวจหามาก ดังนั้นการมีมาตรการในการป้องกันการแพร่แปลกปลอมจึงเป็นหนทางดีกว่าการที่รอให้เกิดปัญหาการรบกวนแล้วค่อยดำเนินการแก้ไข



รูปที่ 2.2 แสดงระยะทางจากสถานีที่มีการแพร่แปลกปลอมที่ความถี่ 114.25MHz (บนขวา) จนถึงจุดที่รับสัญญาณได้ (ล่างซ้าย) บนภูเขาที่สูงประมาณ 200 เมตรจากระดับพื้นดินปกติ [5]

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้แบ่งการวิจัยและพัฒนาออกเป็นสามส่วนหลักคือ

1) ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems)
2) ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)
3) ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)

งานและกิจกรรมของงานวิจัยทั้ง 3 ส่วนหลักนี้เป็นอิสระต่อกันโดยสิ้นเชิง การกำหนดเวลาเพื่อมาใช้งานร่วมกันนั้นก็เพียงเพื่อยืนยันว่าระบบสามารถอยู่ด้วยกันได้เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะนำมาใช้ด้วยกัน แต่ละส่วนสามารถพัฒนาและทดสอบให้แล้วเสร็จสมบูรณ์ได้ในตัวเอง การแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วนดังกล่าวนี้ จะช่วยให้การวิจัยและพัฒนาสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ ถึงแม้ดูเหมือนว่าเวลาที่นำมาทดสอบร่วมกันจะเป็นระยะเวลาสั้นๆ ก็ตาม

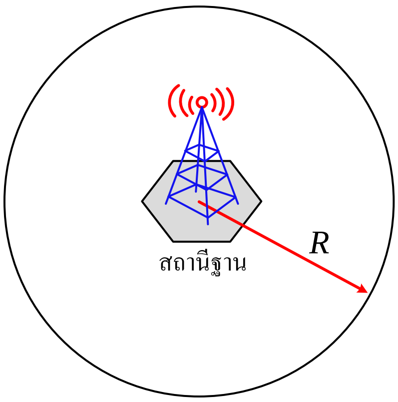
2.1.1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Pattern Measurement System)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อวิจัยและพัฒนาระบบและวิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่บนเสาส่งของสถานีวิทยุกระจายโดยใช้โดรน (Drone) หรืออากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Arial Vehicle) เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีรูปแบบที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากผู้ผลิตหรือไม่

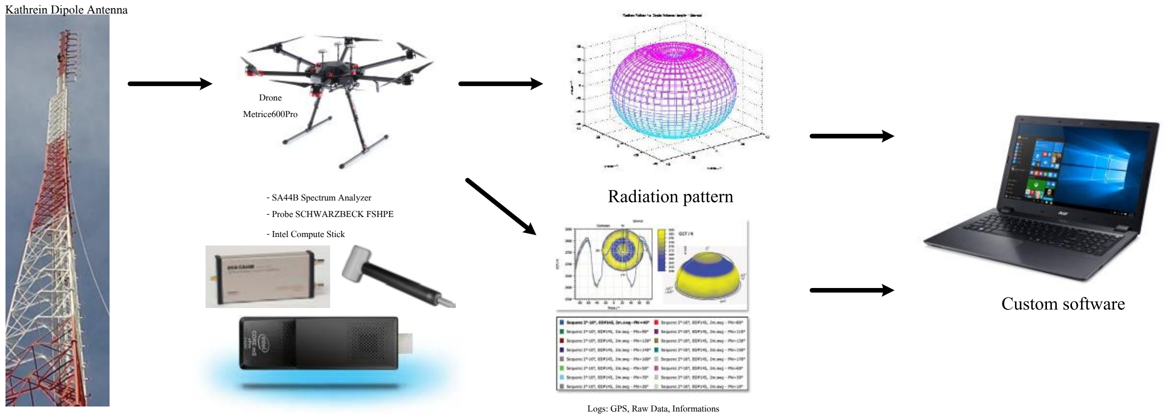
เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบไปด้วย โดรนหรืออากาศยานไร้คนขับ เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer) สายอากาศตรวจวัดชนิด Isotropic หรือ Tri-axial Antenna ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สายนำสัญญาณ คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก และโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการวัด [6-10, 20-25]

รูปที่ 2.3 โดรนวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่นสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง และสายอากาศชนิด Isotropic [6-9]

ในการวัดจะทำการบินโดรนวนรอบสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงตามแนวรัศมี R ที่มีค่ามากกว่าสนามระยะไกล (Far Field) ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้จะดำเนินงานวิจัยในส่วนของเส้นทางของการบินของโดรน หรือ Flight Path เพื่อให้การวัดที่มีประสิทธิภาพโดยได้รับค่าที่ถูกต้องและใช้ระยะเวลาในการวัดที่สั้น ข้อมูลความแรงของสัญญาณ (Field Strength) จะถูกวิเคราะห์และสร้างภาพ Antenna Pattern ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ดังในรูป 2.5



รูปที่ 2.4 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง



รูปที่ 2.5 ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง [6-10]

ในขั้นแรกจะทำการวัด Antenna Pattern ของสายอากาศมาตรฐานที่มีการติดตั้งอย่างถูกต้อง และทราบค่า Antenna Pattern จากบริษัทผู้ผลิต และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ และดำเนินการปรับปรุงอุปกรณ์วัดสัญญาณและเส้นทางการบินให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่า Antenna Pattern จากบริษัทผู้ผลิต หลังจากนั้นจะดำเนินการทดลองภาคสนามในการวัด Antenna Pattern ของสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงจริง ที่หลากหลายที่ตั้ง หลากหลายชนิดของสายอากาศ เพื่อค้นหาปัญหาและอุปสรรคในการปฏิบัติจริงเพื่อนำมาปรับปรุงระบบและวิธีการวัดต่อไป

2.1.2. ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมที่จะถูกนำไปติดตั้งที่สถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อดำเนินการตรวจสอบค่าการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีวิทยุในแถบความถี่วิทยุการบิน (108 – 137 MHz) ว่ามีค่าระดับการแพร่แปลกปลอมเกินกว่าที่ กสทช. กำหนดหรือไม่ ซึ่งจะมีการรายงานข้อมูลจากด้านหน้าของอุปกรณ์ ในกรณีที่เกิดมีปัญหาการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงเกิดขึ้นเกินกว่าค่าที่กำหนด อุปกรณ์นี้จะสามารถแจ้งเตือนผู้ที่เกี่ยวข้องรับทราบผ่านทางอินเทอร์เน็ตหรือ SMS เพื่อดำเนินการแก้ไขต่อไป

2.1.3. ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อตรวจสอบสถานะของสายส่ง สภาพแวดล้อมภายในสถานีส่ง พารามิเตอร์ที่จะทำการเฝ้าติดตามได้แก่ กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) และอุณหภูมิของห้อง (room temp) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะบอกว่าเครื่องส่งทำงานในสภาพแวดล้อมที่ปกติหรือไม่ หากไม่ปกติจะได้รีบทำการแก้ไขก่อนที่ตัวเครื่องจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพอันเป็นต้นเหตุของการแพร่แปลกปลอม นอกจากนี้ต้นแบบนี้ยังสามารถสั่งการเปิดปิดเครื่องส่งผ่านอินเทอร์เน็ตได้

2.2 ข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. ประเภทการรบกวนวิทยุทางการบินอันเนื่องมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม

การรบกวนประเภท A1 เกิดจากการปล่อยสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ลงในแถบความถี่กิจการการบินจากเครื่องส่งสัญญาณกระจายเสียง โดยที่เครื่องส่งหนึ่งสถานีหรือหลายสถานีอาจทำให้เกิดการรบกวนต่อชิ้นส่วนที่ใช้งานในแถบความถี่กิจการการบิน

การรบกวนประเภท A2 เกิดจากการปล่อยสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ลงในแถบความถี่กิจการการบินจากเครื่องส่งสัญญาณกระจายเสียง โดยที่สัญญาณที่ส่งจากสถานีมีการรบกวนต่อส่วนประกอบ non-negligible ในแถบความถี่กิจการการบิน จะเกิดขึ้นเฉพาะในเครื่องส่งสัญญาณกระจายเสียงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ 108 MHz และจะรบกวนเฉพาะกับบริการ ILS localizer / VOR ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ 108 MHz เท่านั้น

การรบกวนประเภท B1 เกิดจากผลของตัวรับสัญญาณของกิจการการบินรับสัญญาณที่เกิดจากเครื่องส่งที่ส่งสัญญาณนอกแถบความถี่กิจการการบิน โดยที่รับสัญญาณความถี่ของอีกสถานีส่งเข้ามาในเครื่องส่งของอีกสถานีหนึ่ง จะทำให้เกิดการผสมกันระหว่างคลื่นทำให้เกิดความถี่ใหม่เกิดขึ้นในอุปกรณ์รวมสัญญาณที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องส่งวิทยุ คลื่นความถี่ที่ผสมขึ้นใหม่ในเครื่องส่งจะมีความถี่แตกต่างไปจากความถี่เดิม โดยที่

$$f_{intermod} = 2f_1 - f_2$$ กรณี 2 สัญญาณ

$$f_{intermod} = f_1 + f_2 - f_3$$ กรณี 3 สัญญาณ

เมื่อ $f_{intermod}$ คือ ความถี่ที่เกิดจากการผสมสัญญาณ

f_1, f_2, f_3 คือความถี่ที่ส่งออก

การรบกวนประเภท B2 เกิดจากผลของตัวรับสัญญาณของกิจการการบินรับสัญญาณที่เกิดจากเครื่องส่งที่ส่งสัญญาณนอกแถบความถี่กิจการการบิน โดยที่จะทำให้ลดประสิทธิภาพของชิ้นส่วน RF ภาครับของตัวรับสัญญาณในกิจการการบินหรือเกิดการโอเวอร์โหลด โดยมาจากเครื่องส่งตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป

2.3 ย่านความถี่วิทยุ

ในการใช้งานคลื่นวิทยุสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการพิจารณาเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน คือ ย่านความถี่ ซึ่งได้มีการจัดสรรไว้เป็นกลุ่มดังในตารางที่ 2-1 แสดงสเปกตรัมของความถี่วิทยุ

ตารางที่ 2-1 สเปกตรัมของความถี่วิทยุ

ชื่อย่านความถี่	ITU ย่านที่	ความถี่ ความยาวคลื่น	ตัวอย่างการใช้งาน
ELF (Extremely Low Frequency)	1	3 - 30 Hz 100,000 กิโลเมตร – 10,000 กิโลเมตร	การสื่อสารกับเรือดำน้ำ
SLF (Super Low Frequency)	2	30 - 300 Hz 10,000 กิโลเมตร – 1,000 กิโลเมตร	การสื่อสารกับเรือดำน้ำ
ULF (Ultra Low Frequency)	3	300 - 3000 Hz 1000 กิโลเมตร – 100 กิโลเมตร	การสื่อสารในเหมือง
VLF (Very Low Frequency)	4	3 - 30 kHz 100 กิโลเมตร – 10 กิโลเมตร	การสื่อสารใต้น้ำ, Avalanche Beacons, ระบบติดตามอัตราการเต้นของหัวใจแบบไร้สาย, ธรณีฟิสิกส์ (Geophysics)
LF (Low Frequency)	5	30 – 300 kHz 10 กิโลเมตร - 1 กิโลเมตร	วิทยุนำร่อง, สัญญาณเวลา, ออกอากาศวิทยุ AM คลื่นยาว

ชื่อย่านความถี่	ITU ย่านที่	ความถี่ ความยาวคลื่น	ตัวอย่างการใช้งาน
MF (Medium Frequency)	6	300 – 3000 kHz 1 กิโลเมตร - 100 เมตร	ส่งกระจายเสียงวิทยุ AM คลื่นความยาวกลาง
HF (High Frequency)	7	3-30 MHz 100 เมตร - 10 เมตร	วิทยุคลื่นสั้น, วิทยุสมัครเล่น และ การสื่อสารทางการบินที่ระยะข้ามเส้นขอบฟ้า
VHF (Very High Frequency)	8	30-300 MHz 10 เมตร - 1 เมตร	ส่งกระจายเสียงวิทยุ FM, ส่งสัญญาณออกอากาศโทรทัศน์ (บังคับได้ตั้งแต่ช่อง 1 ถึงช่อง 12 หรือบางกรณีส่งได้ถึงช่อง 13) และ การสื่อสารแบบแนวตรงไม่โดนบดบัง (Line-of-Sight) จากพื้นสู่อากาศ และจากอากาศสู่อากาศ,วิทยุสมัครเล่น
UHF (Ultra High Frequency)	9	300-3000 MHz 1 เมตร – 10 เซนติเมตร	ส่งสัญญาณออกอากาศโทรทัศน์ (บังคับได้ตั้งแต่ช่อง 13 ถึงช่อง 84) ,โทรศัพท์เคลื่อนที่, Tablet PC, Laptop Computer , Wireless LAN, บลูทูธ, และวิทยุสองทาง เช่น วิทยุ FRS
SHF (Super High Frequency)	10	3-30 GHz 10 – 1 เซนติเมตร	อุปกรณ์ไมโครเวฟ, Wireless LAN, เรดาห์สมัยใหม่
EHF (Extremely High Frequency)	11	30-300 GHz 1 เซนติเมตร - 1 มิลลิเมตร	ดาราศาสตร์วิทยุ, High-speed Microwave Radio Relay
Submillimeter Wave	12	ความถี่สูงกว่า 300 GHz < 1 มิลลิเมตร	

คลื่นวิทยุ (อังกฤษ: Radio waves) หรือ เรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า คลื่นพาหะ Carrier Wave เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่วิทยุบนเส้นสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นวิทยุไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ใช้ในการสื่อสารมี 2 ระบบคือ A.M. และ F.M. ความถี่ของคลื่น หมายถึง จำนวนรอบของการเปลี่ยนแปลงของคลื่น ในเวลา 1 นาที คลื่นเสียงมีความถี่ช่วงที่หูของคนรับฟังได้ คือ ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตถึง 20 กิโลเฮิรตรซ์ (1 kHz =1,000 Hz) ส่วนคลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง อาจมีตั้งแต่ 3 kHz ไปจนถึง 300 GHz (1 GHz = พันล้าน Hz) คลื่นวิทยุแต่ละช่วงความถี่จะถูกกำหนดให้ใช้งานด้านต่างๆ ตามความเหมาะสม

ระบบ เอฟเอ็ม (FM) เป็นการผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulation) คือคลื่นวิทยุที่ผสมกับคลื่นเสียงแล้ว จะมีความถี่ไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงไปตามคลื่นเสียง แต่ความสูงของคลื่นยังคงเดิม วิทยุ FM ส่งด้วยความถี่ 88 -108 MHz ในประเทศไทยมีจำนวนกว่า 100 สถานี กระจายอยู่ตามจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ ส่งได้ในระยะประมาณไม่เกินประมาณ 150 กิโลเมตร ปัจจุบันนิยมส่งในแบบ สเตอริโอ ที่เรียกว่าระบบ FM Stereo Multiplex ซึ่งเครื่องรับวิทยุสามารถแยกสัญญาณแอกเป็น 2 ข้าง คือ สัญญาณสำหรับลำโพงด้านซ้าย (L) และสัญญาณสำหรับลำโพงขวา (R)

2.4 แหล่งกำเนินความถี่วิทยุสำหรับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง

แหล่งกำเนิดความถี่สำหรับเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงต้องเป็นไปตามแผนความถี่วิทยุ กิจการกระจายเสียงหรือตามที่คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติประกาศกำหนด ต้องปล่อยสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนด และควบคุมไม่ให้มีสัญญาณนอกแบนออกไปรบกวนกิจการอื่นๆในแถบความถี่ข้างเคียง ลักษณะของแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุนั้นจะเป็นการส่งคลื่นความถี่ออกมาจากเครื่องส่งผ่านสายนำสัญญาณส่งไปยังสายอากาศแล้วจึงถูกเปลี่ยนจากคลื่นไฟฟ้าไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออกไปยังอากาศ โดยที่สายอากาศจะถูกติดตั้งบนเสาสูงหรือบนตึก แหล่งกำเนิดคลื่นเหล่านี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันโดยสามาร ถที่จะพิจารณาตามคุณลักษณะต่างๆ เครื่องกำเนิดสัญญาณทำหน้าที่เป็นตัวให้กำเนิดสัญญาณชนิดต่างๆขึ้นมา เช่น สัญญาณไซน์(Sine wave) สัญญาณสี่เหลี่ยม(Square wave) สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle wave) และสัญญาณฟันเลื่อย (Saw tooth wave) เป็นต้น เพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานเรียกชื่อแตกต่างกันตามค่าความถี่และชนิดของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นมา ที่พบว่ามีการใช้งานแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่เสียง (Audio Frequency : AF generator)
2) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency :RF generator)
3) ฟังก์ชันเจนเนอร์เรเตอร์ (Function generator)
4) พัลซ์เจนเนอร์เรเตอร์ (Pulse generator)
5) สวีฟเจนเนอร์เรเตอร์ (Sweep generator)

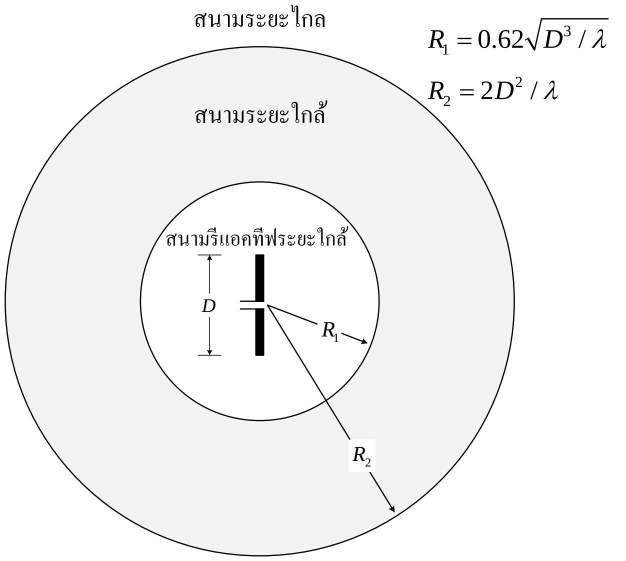
2.5 กำลังงานของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง

ในการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) นั้นสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดระยะทางการสื่อสาร คือ กำลังงานของเครื่องส่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะกำหนดด้วยกำลังคลื่นพาห์ (Carrier Power) โดยกำลังคลื่นพาห์ หมายถึง กำลังเฉลี่ย (Average Power) ที่ส่งไปโหลดเทียม (Dummy Load) ในขณะที่ไม่มีการกล้ำสัญญาณ (Modulation) มีหน่วยวัดเป็น วัตต์ (Watts) หรือ dBm โดยที่สามารถวัดกำลังงานก่อนออกจากเครื่องส่งที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมให้เป็นไปตามข้อกำหนดของประกาศ กสทช. และคำนวณหากำลังที่ส่งออกหน้าสายอากาศเพื่อวิเคราะห์กำลังที่แพร่กระจายออกไปในอากาศตามระยะต่างๆ ได้

กำลังส่งที่กำหนดหมายถึง กำลังคลื่นพาห์ (Carrier Power) ของเครื่องส่งที่ต้องส่งไปยังขั้วต่อสายอากาศ โดยกำลังคลื่นพาห์ที่วัดได้จากการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน ± 0.5 dB ของกำลังส่งที่กำหนด ตามประกาศ กสทช. เรื่องมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง

2.6 บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field Regions)

บริเวณต่าง ๆ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่จากสายอากาศ โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ว่างรอบตัวสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive Near-field Region) บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ (Radiating Near-field Region หรือ Fresnel Region) และบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล (Far-field Region)



รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศ [14-15]

บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารีแอคทีฟระยะใกล้ถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ที่อยู่ใกล้ชิดล้อมรอบตัวสายอากาศซึ่งเป็นพื้นที่ที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้ารีแอคทีฟกระจายตัวอยู่ สำหรับสายอากาศส่วนใหญ่ขอบนอกของพื้นที่นี้จะอยู่บริเวณที่มีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารีแอคทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล โดยมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามมุมต่างๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณนี้อาจจะไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะทางอยู่ในช่วง $0.62\sqrt{D^3/\lambda} \le R \le 2D^2\lambda$

บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศซึ่งการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

การแพร่คลื่นบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ ความแรงของสนามไฟฟ้า $(\bar{E})$ มีหน่วยเป็น V/m และความแรงของสนามแม่เหล็ก $(\bar{H})$ มีหน่วยเป็น A/m มีความสัมพันธ์โดย

$$\frac{\bar{E}}{\bar{H}} = \eta \tag{1}$$

ความหนาแน่นกำลัง (S) มีหน่วยเป็น W/m^2 คือ

$$S = \frac{\bar{E}}{\bar{H}} = \left|\bar{H}\right|^2 \eta \tag{2}$$

เมื่อ η คือค่าความต้านทานภายใน (Intrinsic impedance) ค่า η อาจจะเปลี่ยนแปลงกับระยะทางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ แต่ในระยะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไกลจะเกิดคลื่นระนาบ (Plane wave) อย่างเด่นชัด เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและจะมีการแพร่ในทิศทางตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave : TEM) ในอัตราส่วนของความแรงสนามไฟฟ้ากับความแรงของสนามแม่เหล็ก คือค่าคงที่ในพื้นที่ใดๆ และในพื้นที่อากาศซึ่งเท่ากับ

$$\frac{\bar{E}}{\bar{H}} = \eta = 377\Omega \tag{3}$$

2.7 ระดับกำลังและความหนาแน่นกำลัง (Power Levels and Power Density)

กำลังที่แพร่ออกมามักจะอยู่หน่วยเดซิเบลที่เทียบกับระดับกำลังที่ 1 mW (dBm) หรือ 1 W (dBm) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทแหล่งกำเนิด โดยทั่วไปสายอากาศแผ่กำลังตั้งแต่ต่ำกว่า 1 W หรือ 0 (dBm) (เช่น เครื่องส่งแบบพกพา) ไปจนถึง 100 kW หรือ 50 dBm หรือสูงกว่า (เช่น เรดาร์ เครื่องส่ง VLF) ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและเกิดประสิทธิผล จะต้องเรียนรู้กำลังที่แผ่ออกมาก่อนจะทำการวัด

สำหรับสายอากาศประเภทที่มีอุปกรณ์สะท้อนคลื่น (Reflector) เช่น จานแบบพาราโบลิก ความหนาแน่นกำลังสูงสุด (ภายในลำคลื่นของสายอากาศ) ในระยะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้สามารถประมาณได้โดย

$$S = 4\frac{P_a}{A} \tag{4}$$

โดยที่ S คือความหนาแน่นกำลัง

P_a คือกำลังที่เข้าไปในสายอากาศ

A คือพื้นที่บริเวณปากช่อง (Aperture) ของสายอากาศ

ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไกล ความหนาแน่นกำลังบนแกนของสายอากาศ สามารถคำนวณได้จาก

$$S = \frac{P_a G}{A\pi r^2} \tag{5}$$

โดยที่ r คือระยะทางจากสายอากาศ

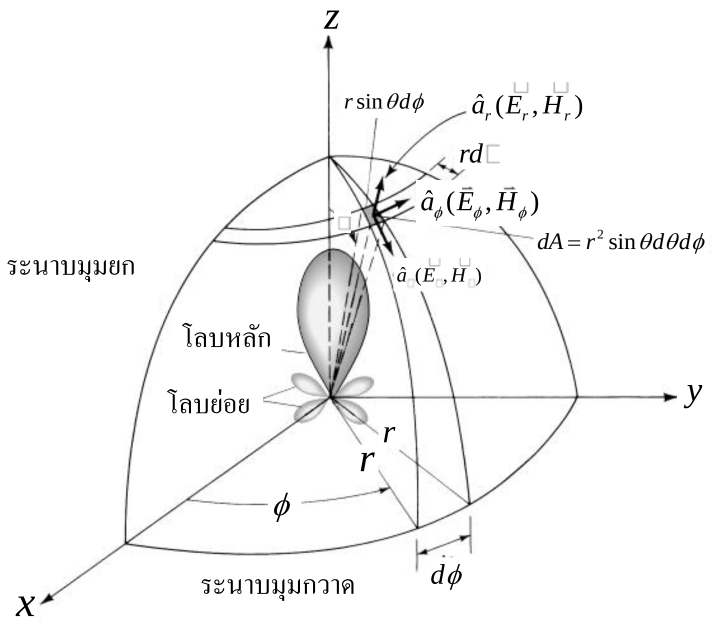
G คืออัตราขยายเชิงทิศทาง (Directive gain) ของสายอากาศ

2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์หาสัญญาณรบกวนในกิจการการบินโดยที่สัญญาณที่ส่งออกของสถานีส่งวิทยุไปยังเครื่องรับที่อยู่ภาคพื้นดินต้องมีแบบรูปการแพร่การจายคลื่นชี้ทิศทางไปยังภาคพื้นดิน และต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่ชี้ทิศขึ้นฟ้าหรือมีกำลังงานส่วนน้อยที่มีทิศขึ้นฟ้า ที่จะทำให้ไปรบกวนความถี่ในกิจการการบินได้ ซึ่งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะใช้สายอากาศภาครับต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมติดตั้งอยู่บนตัวโดรน ทดสอบที่เสาส่งวิทยุกระจายเสียงรอบทิศทางและในแนวตั้งเป็นทางกระบอกเพื่อยืนยันการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวและเปรียบเทียบกับการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม

โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือแสดงในรูปแบบกราฟิกของคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระบบพิกัด (Space Coordinate) ซึ่งส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะถูกกำหนดในรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล (Far-field Region) ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะหมายรวมถึงความหนาแน่นกำลังงานฟลักซ์ (Power Flux Density) ความเข้มการแพร่กระจายคลื่น ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะอยู่ในรูปแบบของการกระจายกำลังงานแบบ 2 หรือ 3 มิติ ที่เป็นฟังก์ชันของจุดสังเกตไปตามเส้นทางหรือพื้นผิวที่มีรัศมีคงที่ดังรูปที่ 2.7 แสดงระบบพิกัดที่ใช้สำหรับแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ส่วนเส้นของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่รัศมีคงที่จะเรียกว่า แบบรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า(Field Pattern) ในอีกแง่หนึ่งกราฟของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกำลังงานตามแนวรัศมีคงที่เรียกว่า แบบรูปของกำลังงาน (Power Pattern)

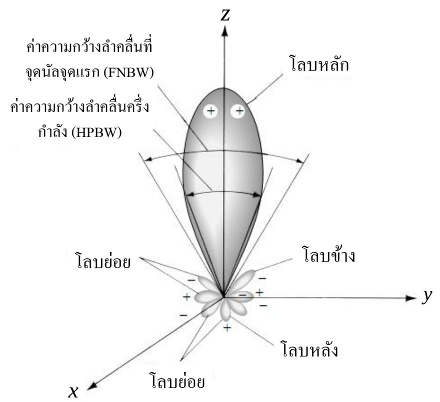
บ่อยครั้งที่แบบรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและกำลังงานถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วยค่าที่มากที่สุดและกลายมาเป็นค่านอร์มัลไลซ์ของแบบรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและกำลังงาน



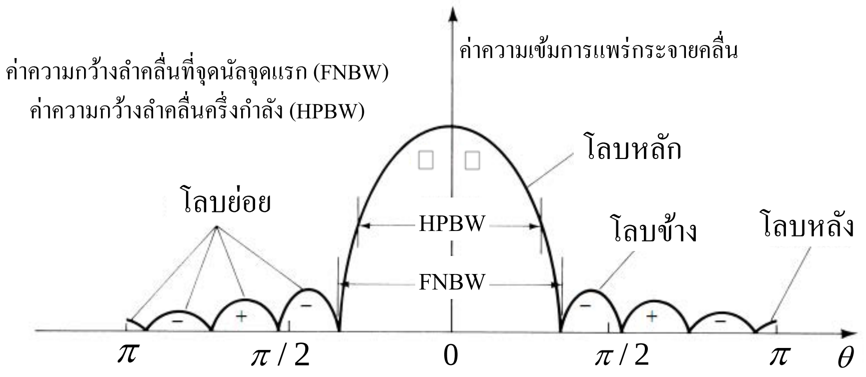
รูปที่ 2.7 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [14]

2.8.1. โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น โลบหลัก (Main Lobe) โลบย่อย (Minor Lobe) โลบ ข้าง (Side Lobe) และโลบหลัง (Back Lobe) ดังรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตรในแบบ 3 มิติ และโลบต่างๆ



(ก) โลบต่างๆ และความกว้างลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ [14]



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายกำลังงานคลื่นในรูปกราฟแบบเชิงเส้น

รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น [14]

โลบหลัก คือ คือโลบของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีโลบหลักอยู่ในทิศทาง $q = 0$ แต่สำหรับสายอากาศบางชนิดหรือสายอากาศที่สามารถแยกลำคลื่นได้ (Split Beam Antenna) อาจจะมีมากกว่า หนึ่งโลบหลัก ซึ่งจะกล่าวต่อไป

โลบย่อย คือ โลบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโลบหลัก

โลบข้าง คือ โลบใดๆ ที่ชี้ไปในทิศทางใดๆ ยกเว้นโลบที่เราสนใจ ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงโลบที่อยู่ข้างโลบหลัก เมื่อพิจารณาในพิกัดครึ่งทรงกลมในทิศทางของโลบหลัก

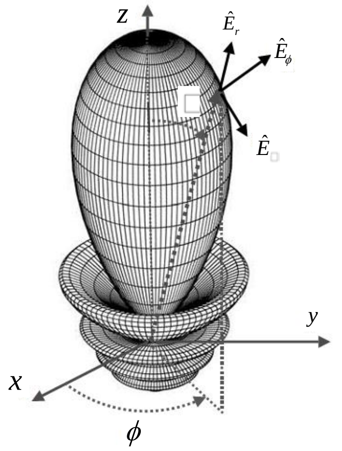
โลบหลัง คือ โลบที่อยู่ในครึ่งทรงกลมตรงข้ามกับโลบหลัก

ซึ่งปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในโลบที่กำลังพิจารณาต่อความหนาแน่นพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของโลบข้าง (Side Lobe Ratio) หรือระดับของโลบข้าง (Side Lobe Level : SLL) โดยทั่วไปมักจะต้องการให้ระดับของโลบข้างน้อยกว่า -20 dB

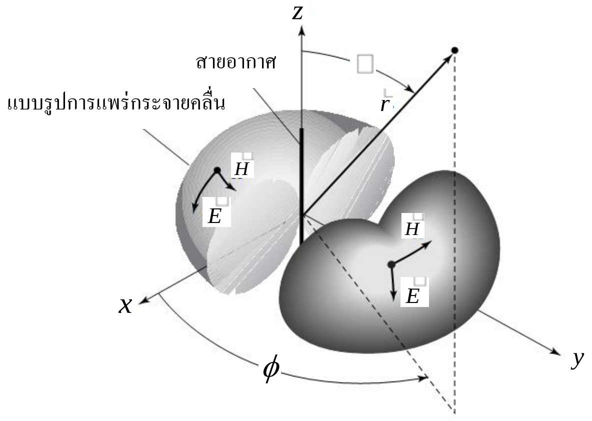
2.8.2. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ทิศทาง และออมนิไดเรคชั่นนอล

ตัวแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นในอุดมคติ โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นที่เท่ากันในทุกทิศทางยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point Source) ซึ่งเป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่อย่างไรก็ตามการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางนั้นได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อบอกคุณสมบัติการชี้ทิศทางของสายอากาศจริง

สายอากาศแบบทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเฉพาะบางทิศทาง ซึ่งอาจจะพิจารณาในกรณีที่สายอากาศมีคุณสมบัติการชี้ทิศทางในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi), \theta = \pi/2$] แต่เป็นแบบทิศทางในระนาบมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi$ = ค่าคงที่] แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะนี้จะถูกเรียกว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบออมนิไดเรคชั่นนอล (Omni-directional Pattern) ซึ่งเป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทาง



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทาง [14]

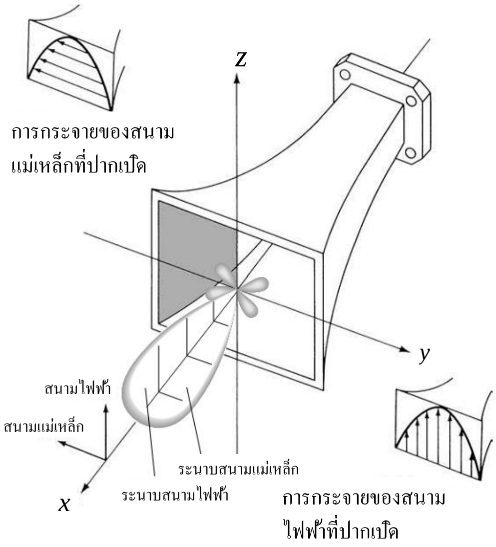


รูปที่ 2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบออมนิไดเรคชั่นนอล [14]

2.8.3. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก

สำหรับสายอากาศที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linear Polarized) ประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นมักจะถูกอธิบายในรูปแบบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern) ของระนาบสนามไฟฟ้า (*E*-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (*H*-plane) ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจาย

คลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละระนาบ โดยมีระนาบ *xz* (ระนาบมุมยก ; $\phi = 0$) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าและมีระนาบ *xy* (ระนาบมุมกวาด, $\theta = \frac{\pi}{2}$) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก



รูปที่ 2.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก
ของสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด [14]

2.9 อัตราขยายสายอากาศ

สิ่งที่ใช้แสดงคุณสมบัติของสายอากาศอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราขยาย (Gain) ถึงแม้ว่าจะมีความหมายคล้ายและสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง แต่มันพิจารณารวมไปถึงประสิทธิภาพของสายอากาศดังนั้น อัตราขยาย (ในทิศทางที่พิจารณา) ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งคูณกับ 4π เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดอัตราการขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังนั้น

$$Gain = 4\pi \frac{\text{Radiation Intensity}}{\text{Total Input (Accepted) Power}} = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{in}} \quad \text{(ไม่มีหน่วย)} \qquad (6)$$

ในหลายๆ กรณีเรามักจะใช้คำว่าอัตราการขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงาน (Power Gain) ในทิศทางที่พิจารณาต่ออัตราการขยายกำลังของสายอากาศอ้างอิงในทิศทางที่ใช้อ้างอิง พิจารณาที่กำลังงานด้านอินพุตมีค่าเท่ากันสำหรับสายอากาศทั้งคู่ โดยทั่วไปสายอากาศที่ใช้อ้างอิงมักจะใช้สายอากาศไดโพล สายอากาศฮอร์น หรือสายอากาศใดๆ ที่สามารถคำนวณและรู้อัตราการขยาย แต่อย่างไรก็ตามถ้าสายอากาศอ้างอิงเป็นแบบรอบทิศทางที่ไม่มีการสูญเสียดังนั้น

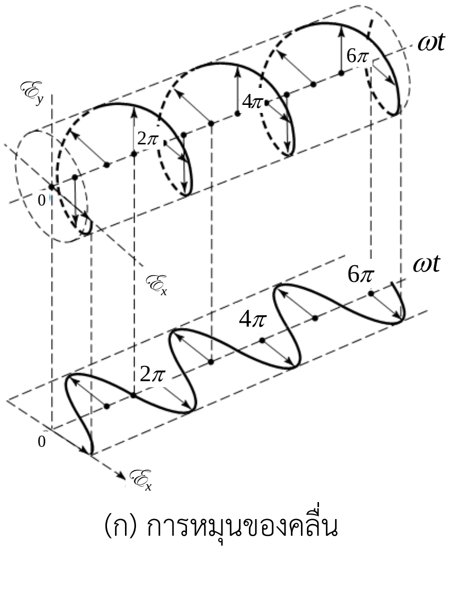
$$G = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{in}\,(\text{Lossless Isotropic Source})} \qquad \text{(ไม่มีหน่วย)} \qquad (7)$$

เมื่อไม่มีการกำหนดทิศทางอัตราการขยายกำลังงานมักจะถูกพิจารณาในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด

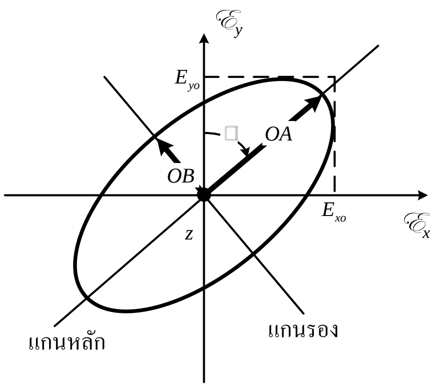
2.10 โพลาไรเซชัน (Polarization)

โพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่พิจารณาถูกกำหนดให้เป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้นเมื่อเป็นสายอากาศส่ง เมื่อไม่มีการกำหนดทิศทางที่แน่นอนการพิจารณาโพลาไรเซชันจะพิจารณาในทิศทางที่มีค่าอัตราการขยายมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติโพลาไรเซชันของพลังงานที่แพร่กระจายจะแปรเปลี่ยนไปตามทิศทางที่ทดสอบได้จากกึ่งกลางของสายอากาศ ดังนั้นในส่วนต่างๆ ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกันก็อาจจะมีโพลาไรเซชันที่แตกต่างกันด้วย

โพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจาย คือ รูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปที่อธิบายด้วยทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาไรเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำได้โดยการมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไปดังแสดงในรูป



(ก) การหมุนของคลื่น



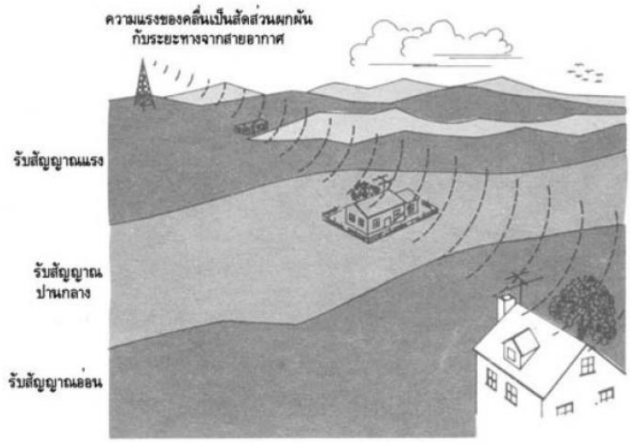
(ข) โพลาไรเซชันวงรี

รูปที่ 2.12 การหมุนของระนาบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโพลาไรเซชันวงรี
ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $z = 0$ [14]

โพลาไรเซชันสามารถจำแนกออกได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้คือ โพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization) โพลาไรเซชันวงกลม (Circular Polarization) และโพลาไรเซชันวงรี (Elliptical Polarization) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่พิจารณาแสดงถึงสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในพื้นที่ว่างชี้เป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่า โพลาไรเซชันเชิงเส้น แต่ถ้ายอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรีจะเรียกสนามแบบนั้นว่าเป็น โพลาไรเซชันวงรี ทั้งโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นและโพลาไรเซชันแบบวงกลมเป็นกรณีพิเศษของโพลาไรเซชันแบบวงรี ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า โพลาไรเซชันวงรีนั้นกลายมาเป็นเส้นตรงหรือหมุนเป็นวงกลมได้ตามลำดับ ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาคือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นว่ามีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise : CW) จะเรียกว่าเป็น โพลาไรเซชันมือขวา (Right-hand Polarization) ในขณะเดียวกันหากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise : CCW) จะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันมือซ้าย (Left-hand Polarization) [15]

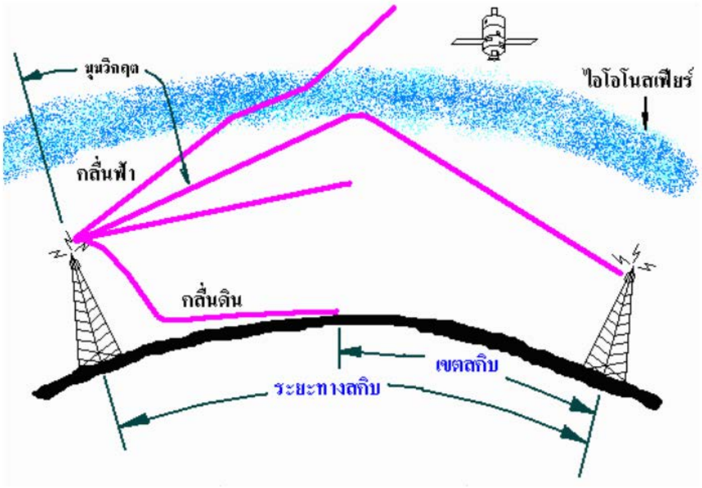
2.11 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่กระจายออกไปในทุกทิศทาง คลื่นวิทยุเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปได้ด้วยความเร็วแสง อย่างไรก็ดี คลื่นวิทยุที่มีความถี่ไม่เท่ากันก็มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นไม่เท่ากัน ในพื้นที่ที่ไกลออกไปจากสถานีส่งคลื่นวิทยุก็มีความแรงลดลง สัญญาณจึงอ่อนลง ดังในรูปที่ 2.13 ฉะนั้นเครื่องรับที่อยู่ใกล้เครื่องส่งมากกว่าย่อมรับสัญญาณได้แรงและคุณภาพของสัญญาณดีกว่าเครื่องรับที่อยู่ห่างออกไปจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.13 เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไปจากสถานี [16]

เรานิยมแบ่งชนิดของคลื่นตามลักษณะการเดินทาง เช่น คลื่นดิน คลื่นอากาศ คลื่นฟ้า การเดินทางของคลื่นเหล่านี้แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง การใช้ประโยชน์คลื่นวิทยุเหล่านี้ จึงต้องเลือกความถี่และการเดินทางของคลื่นให้เหมาะสม เพื่อให้คลื่นวิทยุสามารถเดินทางเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโดยมีการลดทอนน้อยที่สุด รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุจากเครื่องส่งไปเครื่องรับ

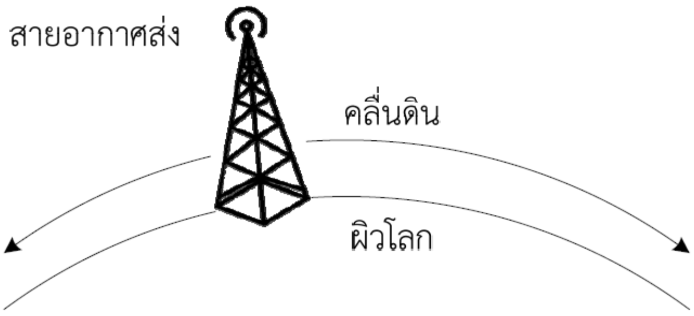


รูปที่ 2.14 ลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุ [16]

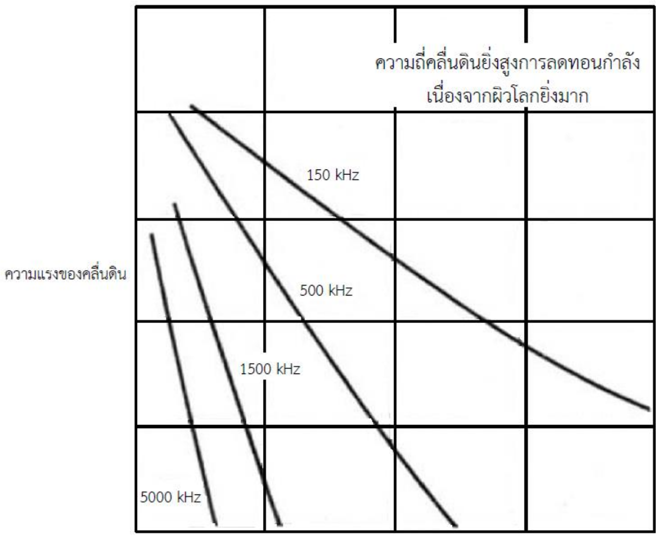
2.11.1. คลื่นดิน (Ground Wave)

คลื่นดินเป็นคลื่นวิทยุที่เดินทางไปบนผิวโลก บางครั้งเรียกว่าคลื่นผิว (Surface Wave) เราสามารถใช้คลื่นดินติดต่อสื่อสารกันในย่านความถี่ และปกติ คลื่นดินที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าจะเดินทางไปได้ไกลกว่าและจะเดินทางไปได้ไกลกว่าขอบฟ้า ดังรูปที่ 2.15 สำหรับคลื่นดินที่มีความถี่สูงขึ้นไปจะเดินทางไปได้ไม่ไกลเพราะถูกลดทอนมาก เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศหรือสิ่งกีดขวางเหตุผลก็คือเมื่อความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นจะสั้นลง วัตถุที่ใหญ่ขึ้น เช่น ภูเขา จึงมีผลต่อการกระจายคลื่น ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 30 kHz ความยาวคลื่นจะเท่ากับ 10000 เมตร หรือ 6.2 ไมล์ เมื่อเทียบกับขนาดของภูเขาแล้วยังมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น ฉะนั้นการลดทอนคลื่นดินที่

ความถี่นี้จะมีน้อย แต่ที่ความถี่ 3 MHz ความยาวคลื่นจะเป็น 100 เมตร วัตถุที่ใหญ่กว่าความยาวคลื่น เช่น ต้นไม้ เนินเขา อาคาร บ้านเรือน จะเริ่มมีผลในการลดทอนคลื่นดิน



การเดินทางของคลื่นดิน [17]



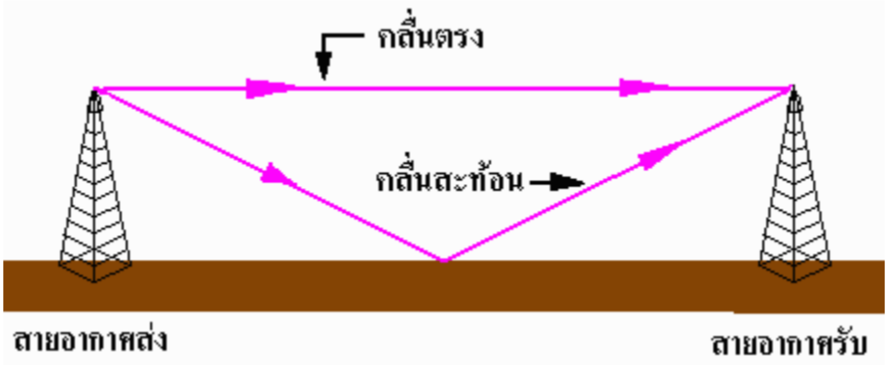
รูปที่ 2.15 การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่างๆ [17]

วิธีการที่จะทำให้คลื่นดินสามารถแพร่ไปได้ไกลมากยิ่งขึ้น ทำได้โดยการแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งในกรณีที่เราแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาไรเซชั่นแนวราบ สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นขนานกับผิวโลก ฉะนั้นคลื่นดินจะเสมือนถูกลัดวงจร (ดูดกลืนด้วยความนำไฟฟ้า) ของผิวโลก อย่างไรก็ดี เราใช้คลื่นดินได้เฉพาะย่านความถี่ LF และ MF เท่านั้น ด้วยเหตุผลนี้ สายอากาศที่มีความยาวในย่านความถี่นี้ จะสร้างได้ยากมากเพราะมีขนาดใหญ่โตมโหฬาร ฉะนั้นเราจึงไม่ค่อยนิยมสื่อสารกันในย่านความถี่ LF แต่สำหรับย่านความถี่ MF สามารถติดต่อสื่อสารได้โดยคลื่นดินเพราะขนาดสายอากาศในย่านความถี่นี้มีขนาดใหญ่มาก

2.11.2. คลื่นอากาศ หรือ คลื่นโดยตรง (Direct Wave)

เมื่อความถี่ของคลื่นวิทยุสูงกว่า 4.5 MHz คลื่นดินเริ่มจะไปได้เพียงไม่กี่กิโลเมตรและเมื่อความถี่สูงขึ้นไปในย่าน VHF และ UHF คลื่นอากาศจะไปได้ไกลกว่าคลื่นดิน การติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้ สายอากาศจะต้องอยู่ในระยะสายตา เพราะคลื่นอากาศเดินทางโดยตรงจากสายอากาศเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ บางครั้งจึง

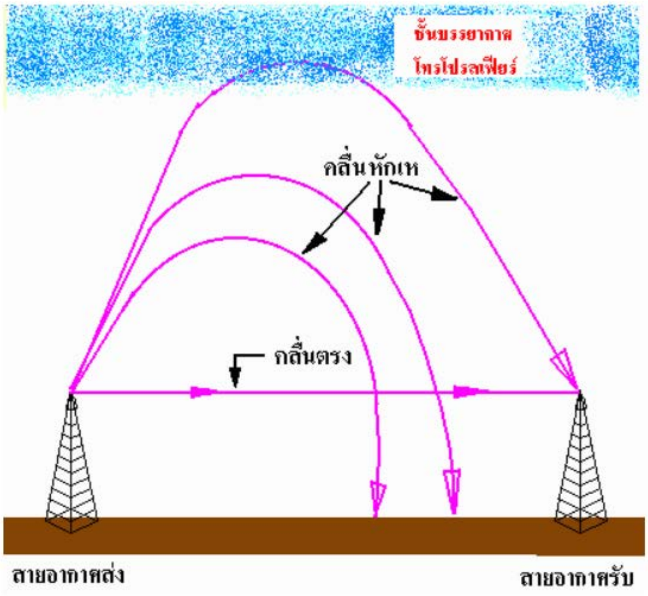
เรียกว่าคลื่นโดยตรง (Direct Wave) จากรูปที่ 2.16 คลื่นอากาศจะถูกจำกัดให้มีรัศมีการติดต่ออยู่ไม่เกินระยะสายตา ฉะนั้น ถ้าเราต้องการขยายการติดต่อสื่อสารให้ไกลขึ้น วิธีง่ายๆ ก็คือ ต้องเพิ่มความสูงของสายอากาศการติดต่อโดยคลื่นอากาศอีกแบบหนึ่งได้แก่ การติดต่อผ่านดาวเทียมหรือเครื่องบิน วิธีนี้ทำให้ความสูงของสายอากาศต้องเพิ่มขึ้นมาก รัศมีการติดต่อก็จะไปได้ไกลขึ้นในย่านความถี่ VHF และ UHF หรือความถี่ที่สูงกว่านี้ เรานิยมสื่อสารกันโดยใช้คลื่นอากาศ



รูปที่ 2.16 การเดินทางของคลื่นอากาศ [16]

2.11.3. คลื่นฟ้า (Sky Wave)

เหนือพื้นโลกขึ้นไปประมาณ 50-400 กิโลเมตร การแพร่รังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์จะทำให้อนุภาพของก๊าซในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ่มโลกแตกตัวเป็นไอออน (Ionize) เกิดประจุบวกและประจุลบ รวมทั้งอิเล็กตรอนอิสระมากมาย ชั้นบรรยากาศที่โดนรังสีและเกิดไอออนนี้ เรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)



รูปที่ 2.17 การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า [16]

2.12 ข้อกำหนดระดับการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง

1) สถานที่ตั้งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในพื้นที่ปลอดการรบกวนการใช้คลื่นความถี่ของท่าอากาศยาน โดยกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต่ำกว่ากำลังคลื่นพาห์อย่างน้อย 80 dBc
2) สถานที่ตั้งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในพื้นที่ภายในรัศมีตั้งแต่ 0-50 กิโลเมตร จากจุดพิกัดระบบควบคุมจราจรทางอากาศของท่าอากาศยานหรือจุดพิกัดของสถานีควบคุมจราจรทางอากาศ โดยกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต่ำกว่ากำลังคลื่นพาห์อย่างน้อย 75 dBc
3) สถานที่ตั้งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในพื้นที่ที่สถานีวิทยุกระจายเสียงตั้งอยู่ห่างระหว่างกันไม่เกิน 1 กิโลเมตร โดยกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต่ำกว่ากำลังคลื่นพาห์อย่างน้อย 70 dBc

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 บทนำ

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงแบ่งการวิจัยและพัฒนาออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาระบบและวิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่บนเสาส่งของสถานีวิทยุกระจายโดยใช้โดรน (Drone) หรืออากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Arial Vehicle) เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีรูปแบบที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากผู้ผลิตหรือไม่

2. ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) มุ่งเน้นที่จะพัฒนาอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมซึ่งจะถูกนำไปติดตั้งที่สถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อดำเนินการตรวจสอบค่าการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีวิทยุในแถบความถี่วิทยุการบิน (108 – 137 MHz) ว่ามีค่าระดับการแพร่แปลกปลอมเกินกว่าที่ กสทช. กำหนด

3. ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems) มุ่งเน้นในการพัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อตรวจสอบสถานะของสายส่ง สภาพแวดล้อมภายในสถานีส่ง พารามิเตอร์ที่จะทำการเฝ้าติดตามได้แก่ กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) และอุณหภูมิของห้อง (room temp) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะบอกว่าเครื่องส่งทำงานในสภาพแวดล้อมที่ปกติหรือไม่ หากไม่ปกติจะได้รีบทำการแก้ไขก่อนที่ตัวเครื่องจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพ อันเป็นต้นเหตุของการแพร่แปลกปลอม นอกจากนี้ต้นแบบนี้ยังสามารถสั่งการเปิดปิดเครื่องส่งผ่านอินเทอร์เน็ตได้

การวิจัยและพัฒนาทั้ง 3 ส่วนหลักนี้เป็นอิสระต่อกันโดยสิ้นเชิง การกำหนดเวลาเพื่อมาใช้งานร่วมกันนั้นก็เพียงเพื่อยืนยันว่าระบบสามารถอยู่ด้วยกันได้เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะนำมาใช้ด้วยกัน แต่ละส่วนสามารถพัฒนาและทดสอบให้แล้วเสร็จสมบูรณ์ได้ในตัวเอง การแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วนดังกล่าวนี้ จะช่วยให้การวิจัยและพัฒนาสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ ถึงแม้ดูเหมือนว่าเวลาที่นำมาทดสอบร่วมกันจะเป็นระยะเวลาสั้นๆ ก็ตาม

3.2 ขอบเขตการดำเนินงาน

1) ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) จัดทำแผนวิจัยและการออกแบบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ (Antenna Pattern) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง
   - วิจัยและพัฒนาวิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ (Antenna Pattern) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง
   - ทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ (Antenna Pattern) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง
2) ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)
   - วิจัยและพัฒนาระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีและรายงานผลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้
3) สถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ
   - สร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีเสาอากาศสูง 60 เมตร ด้วยเครื่องส่งขนาด 500 วัตต์ และมีการออกอากาศโดยมีระดับการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนดของ กสทช. (ระดับไม่น้อยกว่า 80 dBc)
   - พัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง ตัวอย่างเช่น กำลังส่งออกอากาศ (Forward Power) กำลังส่งสะท้อนกลับ (Reflected Power) อุณหภูมิห้อง (room temp) และอุณหภูมิเครื่องส่ง (Transmitter temp) และสามารถรายงานสถานะทางเทคนิคเหล่านี้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
   - พัฒนาระบบควบคุมการปิด-เปิดเครื่องส่งโดยอัตโนมัติหรือ ตามความต้องการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
   - ติดตั้งระบบการวัดและเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง
   - ทำการตรวจสอบ Antenna Pattern ที่ติดตั้งบนเสาอากาศโดยใช้อุปกรณ์และกระบวนการวัดที่ได้จากการวิจัยในโครงการนี้ เพื่อตรวจสอบว่า Antenna Pattern ที่สอดคล้องกับค่าจากผู้ผลิตหรือไม่
4) จัดทำเอกสารเผยแพร่ข้อมูลของงานวิจัยให้กับผู้สนใจ
5) จัดฝึกอบรมทางวิชาการให้แก่สถานีวิทยุกระจายเสียงที่เกี่ยวข้อง

3.3 ผลผลิตสำคัญ

ลำดับ	ชื่อผลผลิต	หน่วยวัด	ตัวชี้วัด (เชิงคุณภาพ/เชิงคุณภาพ)
1	ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems)	1	ได้ระบบและรูปแบบของการวัดการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ สามารถวัดได้จริง และมีความถูกต้องใกล้เคียงกับ การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศจริง
2	ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)	1	ได้ระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง ทำงานและให้ผลการเฝ้าระวังที่ถูกต้อง
3	ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)	1	อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงทำงานและให้ผลการเฝ้าติดตามที่ถูกต้อง

3.4 แผนปฏิบัติการโครงการ

แผนงาน	เดือน/ปี																							
	05/ 60	06/ 60	07/ 60	08/ 60	09/ 60	10/ 60	11/ 60	12/ 60	01/ 61	02/ 61	03/ 61	04/ 61	05/ 61	06/ 61	07/ 61	08/ 61	09/ 61	10/ 61	11/ 61	12/ 61	01/ 62	02/ 62	03/ 62	04/ 62
ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง																								
ศึกษาเทคนิคการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น																								
ศึกษาอุปกรณ์การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น																								
ศึกษาอุปกรณ์ Drone เพื่อนำมาใช้ในการวัด																								
จัดซื้ออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น																								
จัดทำโดรน และทดลองการบิน																								
พัฒนา Software การเชื่อมต่อ การสร้างรูปการแพร่กระจาย																								
การทดสอบระบบ																								
การแก้ไขปรับปรุงระบบ																								
การทดสอบระบบภาคสนาม																								
ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง																								
ศึกษาระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนฯ																								
จัดหาระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนฯ																								
ประกอบอุปกรณ์/พัฒนาการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต/ทดสอบระบบ																								
การทดสอบระบบภาคสนาม																								

แผนงาน	เดือน/ปี																							
	05/60	06/60	07/60	08/60	09/60	10/60	11/60	12/60	01/61	02/61	03/61	04/61	05/61	06/61	07/61	08/61	09/61	10/61	11/61	12/61	01/62	02/62	03/62	04/62
ระบบการออกอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ปราศจากสัญญาณรบกวน																								
สร้างสถานีส่งตามมาตรฐานของผู้ทดลองประกอบกิจการ ด้วยเสาสูง 60 เมตร																								
พัฒนาระบบรายงานพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต																								
พัฒนาระบบปิด-เปิดเครื่อง โดยผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต																								
ทดสอบระบบต่างๆ และแก้ไขให้ทำงานร่วมกันได้อย่างไม่มีปัญหา																								
การจัดทำเอกสารเผยแพร่																								
การจัดทำเอกสารเผยแพร่																								
การจัดการฝึกอบรม																								
การจัดการฝึกอบรม																								
การจัดทำและส่งมอบรายงาน																								
รายงานผลการศึกษาเบื้องต้น (Inception Report)																								
รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1																								
รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2																								
รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report)																								

บทที่ 4
ผลการดำเนินการ

4.1 บทนำ

เป้าหมายของโครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงคือ เพื่อให้ได้ระบบอันประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้ 1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Pattern Measurement System) 2. ระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring System) และ 3. อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Broadcasting Station Monitoring System) ซึ่งทางผู้วิจัยได้จัดทำทั้ง 3 ส่วนแยกอิสระกัน แต่สามารถนำมาใช้งานร่วมกันกับสถานีวิทยุกระจายเสียง FM ได้ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้สร้างสถานีวิทยุต้นแบบเพื่อที่จะนำมาทำสอบกับระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงอันประกอบด้วย 3 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งผลการดำเนินงานของทั้ง 3 ระบบมีดังต่อไปนี้

4.2 ผลการดำเนินงานระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems)

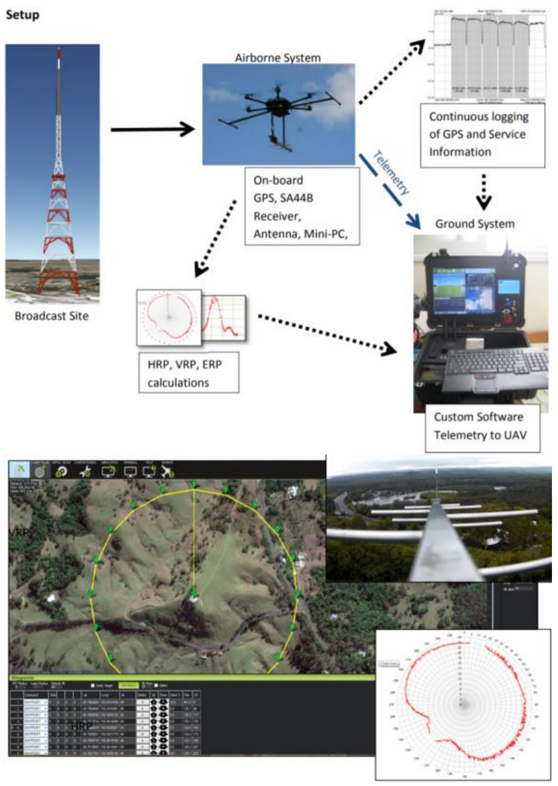
งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่คลื่นของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยสายอากาศที่ติดตั้งบนสถานีวิทยุกระจายเสียงในแต่ละพื้นที่ที่มีการใช้งานในปัจจุบันนั้น ในเบื้องต้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ผู้ปฏิบัติงานทราบ คือ เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni-Directional Radiation Pattern) และถ้าต้องการสายอากาศที่สามารถติดต่อสื่อสารหรือส่งสัญญาณได้ในระยะไกล สายอากาศควรเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง (High Gain Antenna) ซึ่งโดยปกติเลือกใช้เทคนิคแถวลำดับ (Array Antenna) ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ อย่างไรก็ตามในการติดตั้งสายอากาศในพื้นที่จริงสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนเสาส่งสัญญาณอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการติดตั้งเพื่อให้เหมาะสมต่อพื้นที่ที่ติดตั้ง ซึ่งการปรับเปลี่ยนวิธีการติดตั้งสายอากาศสามารถส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ และอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่นที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเสนอการทดสอบคุณสมบัติแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียงสามารถแสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แท้จริงเมื่อติดตั้งบนเสาส่งสถานีวิทยุ แสดงความแรงในการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมา

ประยุกต์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตั้งสายอากาศที่เป็นมาตรฐาน และสามารถใช้งานสายอากาศได้อย่างเต็มประสิทธิภาพต่อไป

โดยปกติการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั่วไป สายอากาศที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติจะถูกติดตั้งเข้ากับชุดหมุนเพื่อวิเคราะห์ความแรงการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละมุมของสายอากาศ ในขณะที่สายอากาศมาตรฐานจะถูกติดตั้งไว้กับที่ และทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field) โดยพื้นที่ที่ทดสอบจะเป็นการทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อนคลื่น (Anechoic Chamber) อย่างไรก็ตามในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง สายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงถูกติดตั้งบนเสาส่งสัญญาณที่มีระดับความสูงประมาณ 60 เมตร ซึ่งยากต่อการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนที่มีการทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณ

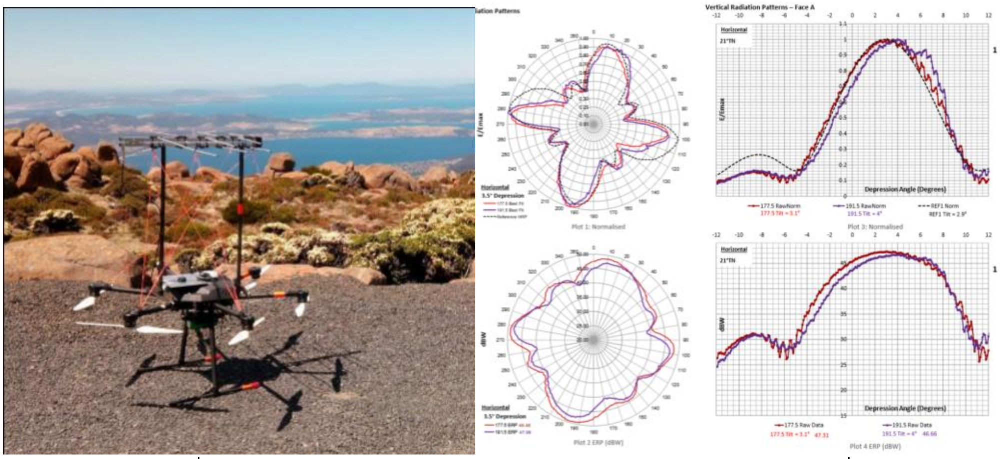
ในงานวิจัย “Full Antenna Pattern Reconstitution of Broadcast Systems using Unmanned Aerial Vehicles” โดย Jason Schreiber, RF Engineer [1] ในวิจัยได้เลือกใช้โดรนในการบินขึ้นไปเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยโดรนจะถูกติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม (Spectrum Analyzer) คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini-PC) ทำหน้าที่ในการแสดงผลจากโปรแกรมวิเคราะห์ของเครื่องสเปคตรัมและควบคุมการทำงาน และบอร์ดจีพีเอส ในขณะที่ภาคพื้นดินมีอุปกรณ์ คือ คอมพิวเตอร์พกพาที่สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อแสดงผลการทดสอบให้กับผู้ทดสอบ

ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง โดรน ทำหน้าที่นำอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขึ้นไป จากนั้น โดรนทำหน้าที่บินวนรอบเสาส่งสัญญาณ เพื่อให้สายอากาศที่ติดตั้งขึ้นไปกับโดรนรับกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายคลื่นออกมาจากสายอากาศสถานีฐานในมุมต่างๆ จากนั้นเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมทำหน้าที่วิเคราะห์ความแรงที่ได้รับมาจากสายอากาศ และแสดงผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงการเก็บผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



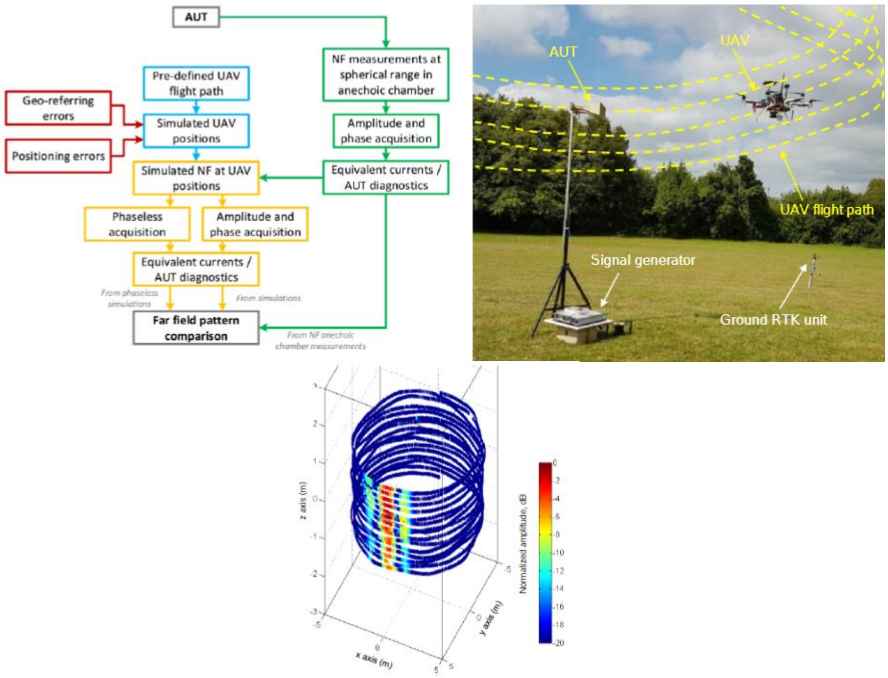
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดย UAV [31]

ในปี 2017 งานวิจัย “TV ANTENNA RECONSTITUTION” โดย SIXARMS [2] ได้ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเสาส่งสัญญาณโทรทัศน์ ในย่านความถี่วีเอชเอฟ ซึ่งสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ สามารถวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และได้ใช้โดรนติดตั้งอุปกรณ์ในการขึ้นไปทำการทดสอบ ในส่วนของสายอากาศภาครับที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรนเป็นสายอากาศแบบมีทิศทางแสดงดังรูปที่ 4.2



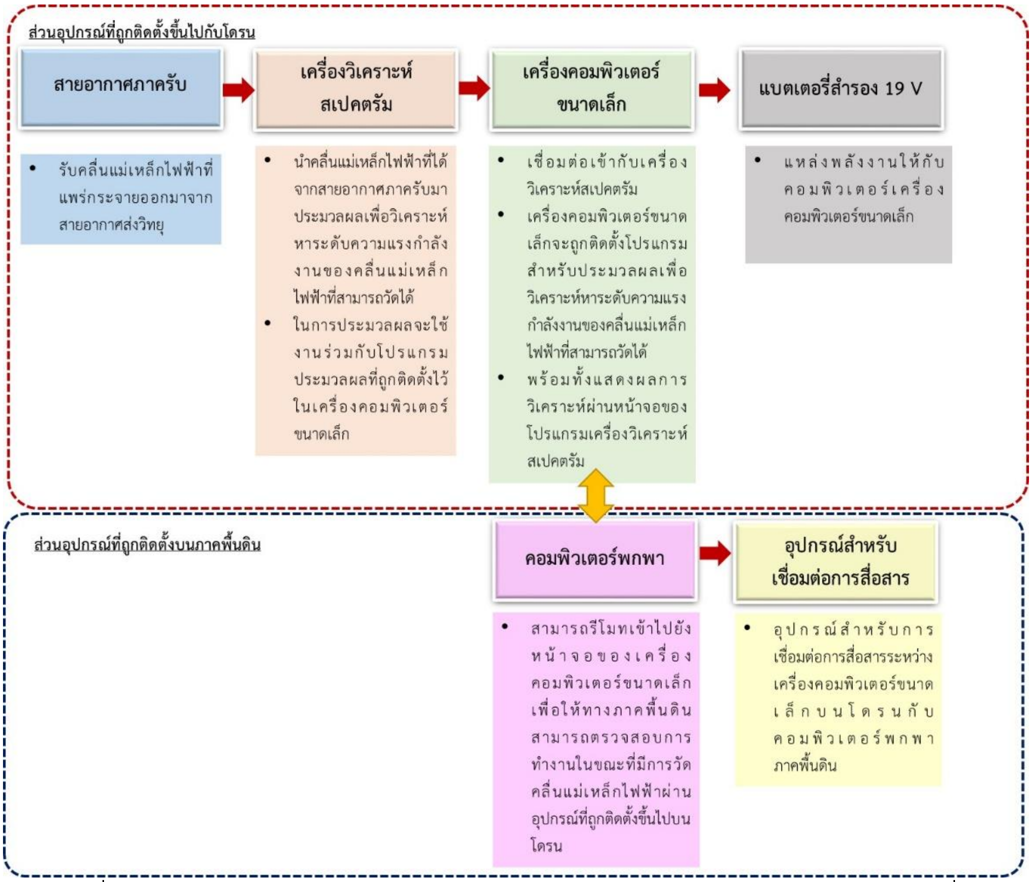
รูปที่ 4.2 ระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่น
และการแสดงผลการทดสอบด้วยโดรน [32]

ปี 2017 งานวิจัย “Antenna Diagnostics and Characterization using Unmanned Aerial Vehicles” โดย María García Fernández และคณะ ได้ทำงานวิจัยโดยการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศโดยใช้โดรนในการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบมีความน่าสนใจเนื่องจากในบทความดังกล่าวแสดงวิธีการทดสอบที่เหมาะต่อการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และในการทดสอบการวัดคุณลักษณะของสายอากาศในงานวิจัยนี้เป็นการวัดคุณสมบัติโดยไม่ได้ใช้มนุษย์ในการควบคุมการบินของโดรน โดยแสดงแผนผังในการทำงาน การติดตั้งสำหรับการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการและการแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังการทำงาน การติดตั้งสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ
และการแสดงผลการทดสอบ [33]

สำหรับผลการดำเนินโครงการในไตรมาสนี้นำเสนอการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ซึ่งในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวได้ใช้โดรนในการนำระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขึ้นไปทำการวัดความแรงกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง โดยความสูงของสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงที่คาดการณ์ไว้สำหรับการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความสูงประมาณ 60 เมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้โดรนในการนำระบบทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเพื่อทำการบินทดสอบรอบเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง อย่างไรก็ตามในการทดสอบอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรนนั้นสิ่งสำคัญในการเลือกอุปกรณ์ คือ ขนาด น้ำหนัก สมรรถนะในการใช้งานของอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโดรนมีข้อจำกัดในการบรรทุกโหลดน้ำหนักขณะทำการบิน หากต้องการบินโดรนที่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนัก โดรนจะดึงพลังงานจากแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการบินของโดรนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโดรนที่ไม่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนัก ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ที่จะติดตั้งกับโดรนจึงเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งในการทดสอบระบบดังกล่าวสามารถแบ่งอุปกรณ์สำหรับระบบทดสอบออกเป็น 2 ส่วนอุปกรณ์หลักๆ คือ 1.ส่วนของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน และ 2.ส่วนของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งอยู่บนภาคพื้นดิน โดยสามารถแสดงบล็อคไดอะแกรมการทำงานของระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งบล็อคไดอะแกรมในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 4.4 นั้น อุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรนนั้นจะประกอบด้วย สายอากาศภาครับสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก และแบตเตอรี่สำรอง 19 V ในขณะที่ส่วนอุปกรณ์ภาคพื้นดินนั้นจะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพา และอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์พกพากับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 4.4 บล็อคไดอะแกรมการทำงานของระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
จากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียง

ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงในไตรมาสนี้ นำเสนอการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเบื้องต้นโดยยังไม่มีการติดตั้งระบบร่วมกับโดรน เนื่องจากต้องการตรวจสอบความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการติดตั้งไปกับโดรนและอุปกรณ์ที่ต้องการติดตั้งบนภาคพื้นดิน นอกจากนี้การทดสอบนี้ช่วยเป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบก่อนนำระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต่อไป โดยนำเสนอในหัวข้อ 4.2.1 จากนั้นนำเสนอการทดสอบระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่ติดตั้งขึ้นไปกับโดรนกับอุปกรณ์ภาคพื้นดิน เนื่องจากในการใช้งานจริงผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ภาคพื้นดินเป็นผู้ปฏิบัติงานคอมพิวเตอร์พกพาและทำการรีโมทเข้าไปยังหน้าจอโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมที่ถูกติดตั้งในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อทำการตรวจสอบการทำงานของระบบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรวมถึงการเก็บข้อมูลผลการวัดความแรงกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมสามารถประมวลผลออกมาได้ในแต่ละมุมในหัวข้อที่ 4.2.2 จากนั้นในหัวข้อที่ 4.2.3 นำเสนอทดสอบระยะเวลาแบตเตอรี่ของโดรนเมื่อทำการบินในขณะที่ยังไม่มีโหลดน้ำหนัก กับการมีโหลดน้ำหนักว่าระยะเวลาในการทำงานของโดรนจะสามารถทำงานได้นานเท่าไหร่ ถ้าต้องมีการนำอุปกรณ์ติดตั้งร่วมกับโดรนจริงในหัวข้อที่ 4.2.4 นำเสนอการ

พัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดไฟล์ทการบินของโดรนและทดสอบการใช้งานโปรแกรมร่วมกับโดรน จากนั้นในหัวข้อที่ 4.2.5 นำเสนอการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นการนำเสนอความท้าทายในการออกแบบและแนวคิดในการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบ และในหัวข้อที่ 4.2.6 นำเสนอการทดสอบการบินโดรนที่ติดตั้งระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลอง ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ทำการบินโดรนพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบจริงและทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงโดยจำลองการทดสอบที่ระดับความสูง 6 เมตร ซึ่งการทดสอบนี้จะช่วยให้ผู้วิจัยเห็นถึงข้อบกพร่องของระบบการทดสอบ และนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาระบบต่อไป

4.2.1. การทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในเบื้องต้น

ในหัวข้อนี้นำเสนอการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเบื้องต้น โดยในการทดสอบยังไม่มีการติดตั้งระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นร่วมกับโดรน เนื่องจากต้องการตรวจสอบความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะถูกนำไปติดตั้งกับโดรนและอุปกรณ์บนภาคพื้นดิน ซึ่งผลของการทดสอบจะถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต่อไป ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในหัวข้อนี้มุ่งเน้นการทดสอบระบบการทำงานของระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยจำลองเหตุการณ์การทดสอบในเบื้องต้นภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น โดยอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการทดสอบในเบื้องต้น เป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่ภายในห้องปฏิบัติการ ในขณะเดียวกันได้ทำการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นร่วมกับโปรแกรมการพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วย โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

- **ส่วนจำลองเสาส่งสัญญาณ**

สายอากาศภาคส่งจำลอง ได้เลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางที่สามารถทำงานตั้งแต่ความถี่20 MHz ถึง200 MHz ของ Rohde & Schwarz [34] โดยสายอากาศส่งสัญญาณจำลองดังกล่าวถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณและติดตั้งบนแท่นเสาสามขาแสดงโครงสร้างของสายอากาศภาคส่งจำลองและวิธีการติดตั้งแสดงในรูปที่ 4.5

(ก) สายอากาศแบบมีทิศทาง

(ข) การติดตั้งสายอากาศภาคส่งสัญญาณ

รูปที่ 4.5 เสาส่งสัญญาณจำลองสำหรับการทดสอบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

- **ส่วนจำลองระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกติดตั้งกับโดรน**

ในส่วนการจำลองนี้อุปกรณ์ทั้งหมดที่คาดว่าจะติดตั้งขึ้นไปกับโดรนนั้นจะถูกติดตั้งไว้บนแท่นเสาที่สามารถเคลื่อนที่และปรับระดับความสูงของแท่นเสาแทนประกอบด้วย สายอากาศภาครับ ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้สายอากาศโมโนโพลครอบคลุมความถี่ 130 MHz ถึง 150 MHz อัตราขยาย 2 dBi แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบตัว ในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศส่งสัญญาณจำลอง โดยแสดงรูปสายอากาศดังกล่าวในรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 สายอากาศโมโพลสำหรับการจำลองการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

อุปกรณ์ในวิเคราะห์ความแรงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากสายอากาศ ได้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม RSA306 USB Real Time Spectrum Analyzer [33] แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยเครื่องดังกล่าวสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ 9 kHz ถึง 6.2 GHz รองรับในการวัดความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่+20 dBm ถึง -160 dBm และมีน้ำหนัก 600 กรัม โดยเครื่องดังกล่าวทำหน้าที่วิเคราะห์ความแรงของกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สายอากาศสามารถวัดได้จาก

สายอากาศส่ง สำหรับเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมดังกล่าวหากมีการนำไปใช้ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่จริงที่มีกำลังงานของเครื่องส่ง 500 W หรือประมาณ 57 dBm เมื่อนำเครื่องดังกล่าวไปใช้งานจริง ในการปฏิบัติงานผู้ปฏิบัติงานต้องทำการคำนวนหาระยะห่างที่เหมาะสมจากสูตรการคำนวณหาบริเวณสนามระยะไกล จากนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงคำนวณหา Path loss และ Link Budget ของระบบเพื่อยืนยันว่าที่ระยะห่างดังกล่าวกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับมาไม่เกินความสามารถของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม ซึ่งในส่วนของการคำนวณนี้ ผู้พัฒนาโปรแกรมได้มีการพัฒนาโปรแกรมในการคำนวณให้กับผู้ปฏิบัติการ นอกจากนี้ผู้ปฏิบัติงานควรทำการติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ให้กับเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม ซึ่งจะช่วยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมได้อย่างปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

รูปที่ 4.7 เครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม RSA306 USB Real Time Spectrum Analyzer

อุปกรณ์ในการติดตั้งโปรแกรมการประมวลผลของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม RSA306 ได้เลือกใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini-PC) [34] ดังรูปที่ 4.8 โดยการเลือกใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก จะต้องคำนึงเรื่องน้ำหนักของคอมพิวเตอร์เนื่องจากโดรนมีความสามารถในการบรรทุกน้ำหนักได้จำกัด และสิ่งที่สำคัญคือระบบคอมพิวเตอร์ต้องสามารถรองรับการทำงานของโปรแกรมประมวลผลของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมด้วย โดยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่เลือกใช้งานวิจัยนี้รองรับระบบ Core i7 หน่วยความจำของเครื่อง 8 GB ระบบปฏิบัติการ Window10 และมีน้ำหนัก 600 กรัม โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ทำงานที่ 19V/3.43A

รูปที่ 4.8 เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

แบตเตอรี่สำรอง (Power Bank) สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยแบตเตอรี่สำรองมีเอาท์พุตที่ 5V/2A, 12V/2A,

16V/3.5A, 19V/3.5A, และ 12V/300A โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก มีการใช้งานที่ 19 V น้ำหนักประมาณ 400 กรัม

รูปที่ 4.9 แบตเตอรี่สำรองสำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

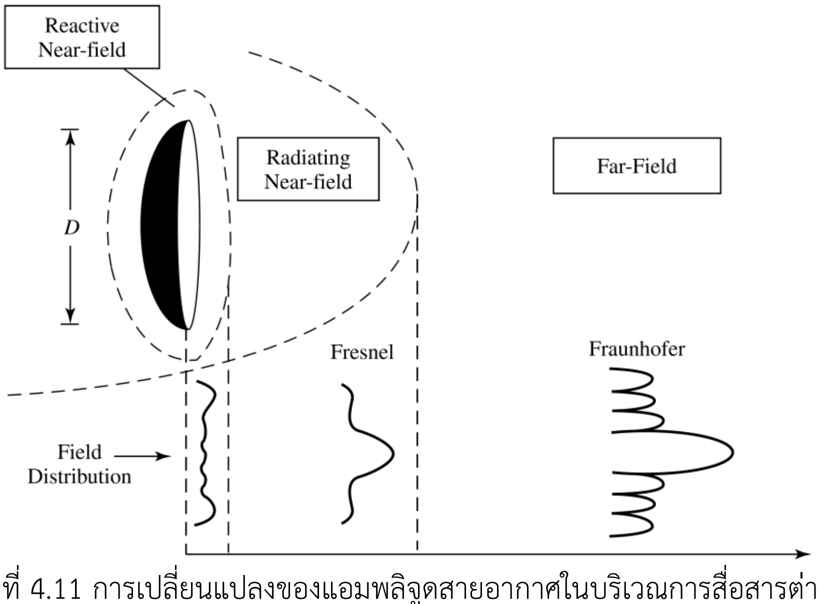
- **ส่วนจำลองระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกติดตั้งบนภาคพื้นดิน**

คอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) ทำหน้าที่แสดงผลหน้าจอโปรแกรมประมวลผลของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมให้กับผู้ปฏิบัติงานภาคพื้นดิน โดยคอมพิวเตอร์พกพาจะรีโมทหน้าจอการทำงานเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก อุปกรณ์เชื่อมต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับคอมพิวเตอร์พกพา ซึ่งอุปกรณ์นี้จะทำให้คอมพิวเตอร์พกพาบนภาคพื้นดินสามารถรีโมทหน้าจอเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้ ในงานวิจัยได้เลือกใช้ ตัวกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย (WiFi Router) ยี่ห้อ TP-link โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการสร้างเครือข่าย LAN ในการเชื่อมต่อระบบการทำงานของอุปกรณ์ที่ต้องขึ้นไปกับโดรนและภาคพื้นดินสามารถรองรับการทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz แสดงตัวกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สายในรูปที่ 4.10

รูปที่ 4.10 ตัวกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย

ในการจำลองการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและทดสอบโปรแกรมแสดงผลในเบื้องต้น ในการทดสอบอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน จะถูกติดตั้งบนแท่นเสาที่สามารถเคลื่อนที่และปรับระดับความสูงของแท่นเสาได้ โดยเปรียบเสมือนแท่นเสาดังกล่าวคือโดรนที่ทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระดับความสูงต่างๆ และสามารถเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งองศารอบเสาส่งสัญญาณจำลองโดยทำการวัดทีละ 10 องศา เริ่มตั้งแต่ 0 องศา (ด้านหน้าของสายอากาศส่ง) เคลื่อนที่ไปจนครบถึงมุมที่ 360 องศา นอกจากนี้ได้ทดลองปรับความสูงของ

แท่นจำลองโดรนให้มีระดับความสูงที่แตกต่างกันโดยพิจารณาที่ความสูง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตรตามลำดับในส่วนจำลองทางภาคพื้นดิน ผู้ปฏิบัติงานจะทำการเชื่อมต่อระบบการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อรีโมทเข้าไปยังหน้าแสดงผลโปรแกรมประมวลผลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กเพื่อที่ใช้ในการควบคุมการเก็บข้อมูลเมื่อทำการวัดแต่ละองศา โดยข้อมูลที่เก็บในแต่ละองศาจะถูกเก็บเป็นค่ากำลังงานเฉลี่ยที่มุมทดสอบซึ่งวัดได้มาจากเครื่องสเปกตรัม ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้กำหนดระยะห่างระหว่างแบบจำลองสายอากาศส่งสัญญาณกับแท่นจำลองโดรนเป็นสนามระยะไกล (*R*) สำหรับบริเวณสนามระยะไกล คือ บริเวณที่มีทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีทิศทางที่ตั้งฉากกันซึ่งกันและกัน และมีทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นในบริเวณนี้จะมีการเก็บค่ากำลังงานที่เป็นค่าจริง จึงทำให้สายอากาศในบริเวณนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นที่ชัดเจน ประกอบไปด้วย ลำคลื่นหลักและลำคลื่นรองที่สามารถแพร่กระจายแสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกลในรูปที่ 4.11 สำหรับการคำนวนหาพื้นที่สนามระยะไกลสามารถคำนวนได้จากสมการที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงระยะที่สายอากาศเริ่มมีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณสนามระยะไกลไปยังระยะอนันต์



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสายอากาศในบริเวณการสื่อสารต่างๆ

สำหรับการคำนวนหาพื้นที่สนามระยะไกลในสมการที่ 1 ในการทดสอบได้เลือกทดสอบที่ย่านความถี่ 136 MHz (เนื่องจากต้องให้สอดคล้องกับความถี่ที่สายอากาศแบบจำลองทั้งสองสามารถทำงานได้) สายอากาศมีความยาวคลื่น 2.20 เมตร ในขณะที่สายอากาศภาครับมีมิติที่ใหญ่ที่สุด 0.52 เมตร สายอากาศภาคส่งมีมิติที่ใหญ่ที่สุด คือ 0.59 เมตร ดังนั้นพื้นที่สนามระยะไกลที่ทำให้สายอากาศส่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นชัดเจนสามารถพิจารณา ได้ตั้งแต่

ระยะทาง 1.11 เมตรเป็นต้นไป ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ติดตั้งระยะห่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ระยะทาง 2 เมตร

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่พิจารณา (เมตร)

$D = D_t + D_r$; D_t คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศส่ง (เมตร)

D_r คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดสายอากาศรับ (เมตร)

ดังนั้น

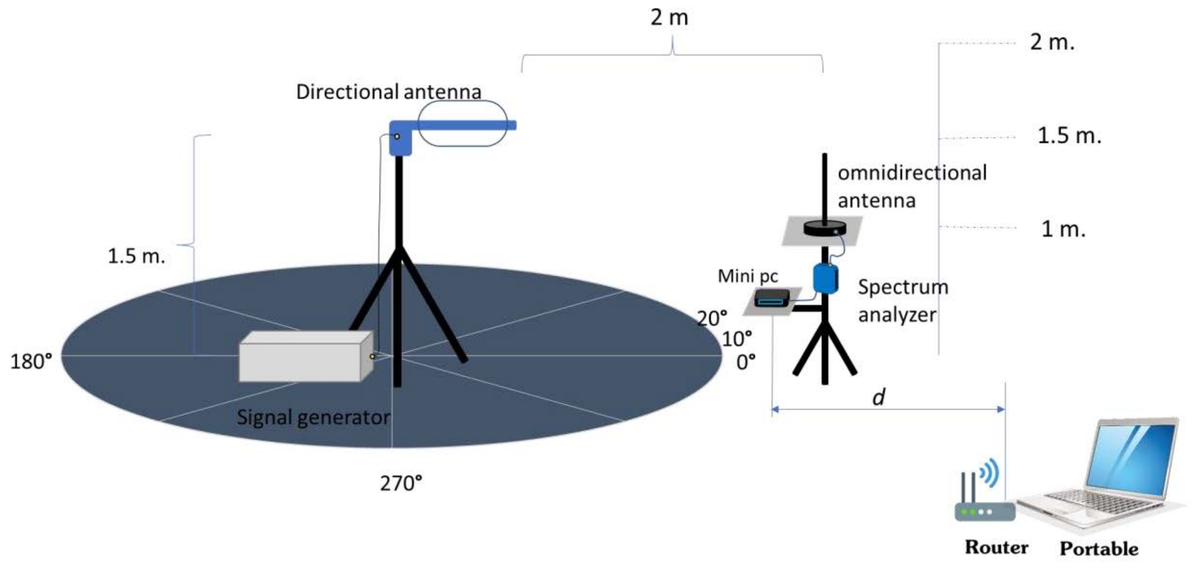
$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{(เมตร)}$$

$$R \geq \frac{2 \times (D_t + D_r)^2}{\lambda}$$

$$R \geq \frac{2 \times (0.52 + 0.59)^2}{2.2}$$

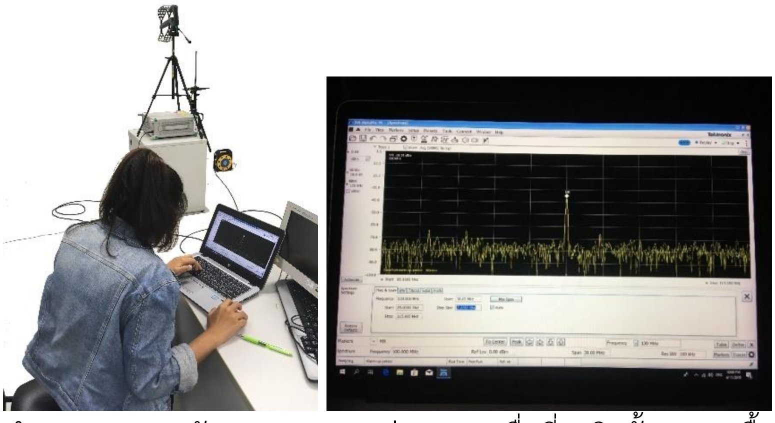
$$R \geq 1.11 \quad \text{(เมตร)}$$

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการปรับระดับความสูงและวัดมุมในแต่ละองศาเช่นกัน เพื่อนำมาวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละระดับความสูงที่แตกต่างกัน จำลองวิธีการติดตั้งในรูปที่ 4.12 และแสดงภาพถ่ายวิธีการติดตั้งสำหรับทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 4.13 จากนั้นทดลองนำข้อมูลที่วัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมาพล็อตกราฟร่วมกับโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นเป็นกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยแสดงผลการทดลองการพล็อตกราฟในรูปที่ 4.14



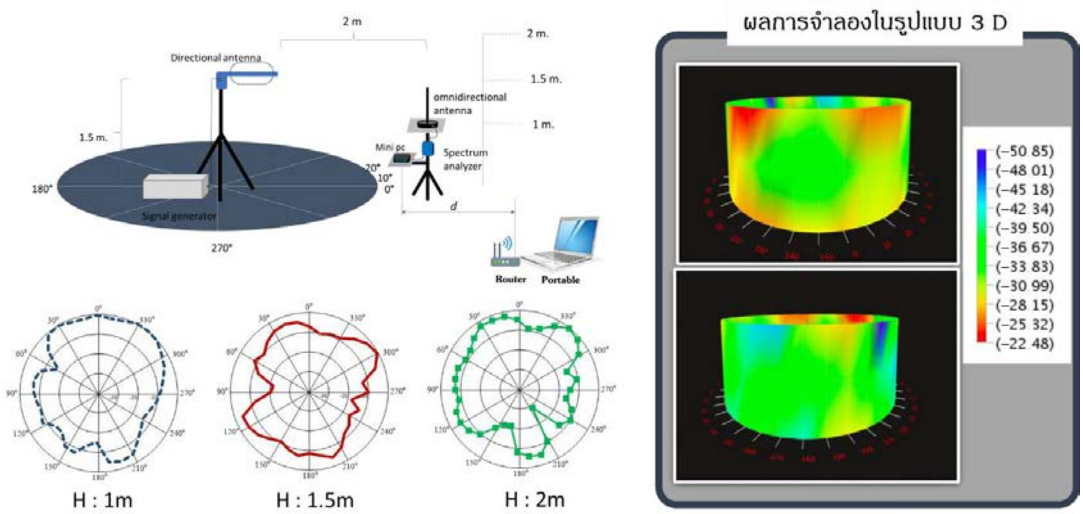
รูปที่ 4.12 จำลองการติดตั้งระบบการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(ก) จำลองระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกติดตั้งกับโดรน



(ข) จำลองระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกติดตั้งบนภาคพื้นดิน

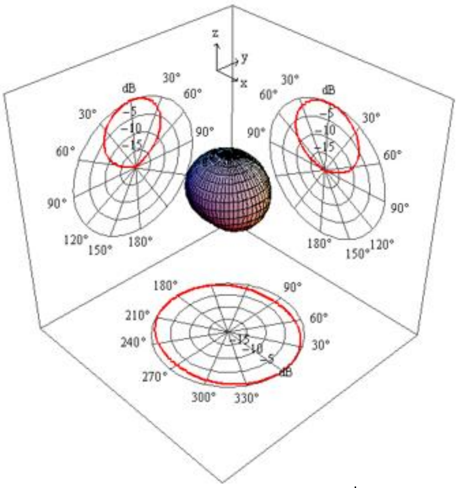
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.14 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมที่ทำการพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

จากการจำลองผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในห้องปฏิบัติที่แสดงในรูปที่ 4.14 ในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยอุปกรณ์ที่ได้เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ และเมื่อนำค่าความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถวัดได้จากสายอากาศส่งมาทำการพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าสายอากาศส่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางตามทฤษฎีนั้นได้แสดงภาพฉายในแต่ละระนาบแกนของสายอากาศ โดยระนาบแกนประกอบด้วย ระนาบแกน *xy* *xz* และ *yz* ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบมีทิศทางในหัวข้อนี้ ได้ทำการทดสอบเฉพาะในระนาบแกน *xz* โดยผลการทดสอบในรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามทฤษฎีในรูปที่ 4.15

พบว่าผลการทดสอบสอดคล้องกับผลตามทฤษฎีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบมีทิศทาง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจากสถานที่ที่ทำการทดสอบไม่ได้เป็นพื้นที่โล่งหรือเป็นห้องไร้การสะท้อนคลื่น จึงอาจทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณเมื่อทำการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง

อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้สิ่งที่มุ่งเน้นการทำการทดสอบนั้น คือ การทดสอบอุปกรณ์ของระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นว่าอุปกรณ์ต่างๆสามารถทำงานร่วมกันได้หรือไม่ มีปัญหาจากการใช้อุปกรณ์อย่างไร มีวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างไร ซึ่งสามารถสรุปปัญหาที่พบจากการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ดังต่อไปนี้

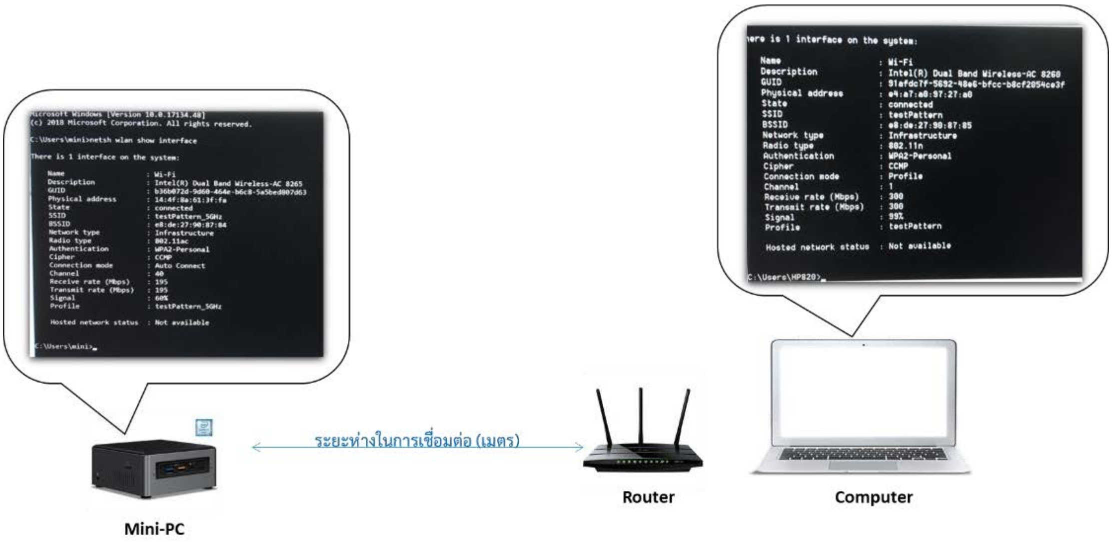
1) จากการทดสอบพบว่าคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กนั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังงานเพื่อให้สามารถใช้งานได้ โดยแหล่งจ่ายกำลังงานไม่สามารถปลั๊กไฟปกติได้ เนื่องจากในการใช้งานจริงคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กจะถูกนำไปใช้งานที่ระดับความสูงประมาณ 60 เมตร ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายกำลังงานใหม่ ที่สามารถรองรับการทำงานที่ 19V/3.48A โดยแหล่งจ่ายกำลังงานนั้นจะต้องถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน ดังนั้นการคำนึงถึงน้ำหนักของแหล่งจ่ายกำลังงานจึงเป็นเรื่องสำคัญรองลงมาจากความสามารถในการทำงาน จากปัญหาดังกล่าวจึงได้เลือกใช้แบตเตอรี่สำรองในรูปที่ 4.9 ให้กับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

2) จากการทดสอบพบว่าการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับคอมพิวเตอร์พกพา เป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ทั้งสองจำเป็นต้องมีความสเถียร โดยระบบการติดต่อสื่อสารจะต้องสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในระยะห่างประมาณ 60 เมตร ซึ่งในการทดสอบภายในห้องปฏิบัติในหัวข้อนี้ระยะห่างระหว่างคอมพิวเตอร์ทั้งสองมีระยะห่างไม่เกิน 3 เมตร ในการทดสอบจึงไม่พบปัญหาใดๆ แต่ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องมีระยะห่างที่ไกลกว่าระยะในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงนำไปสู่การทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและคอมพิวเตอร์พกพาในหัวข้อถัดไป
3) จากผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงกับแบบมีทิศทาง แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบได้เนื่องจาก Data sheet ของสายอากาศส่งที่นำมาใช้บอกแต่เพียงว่าเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง แต่ไม่ได้แสดงผลวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

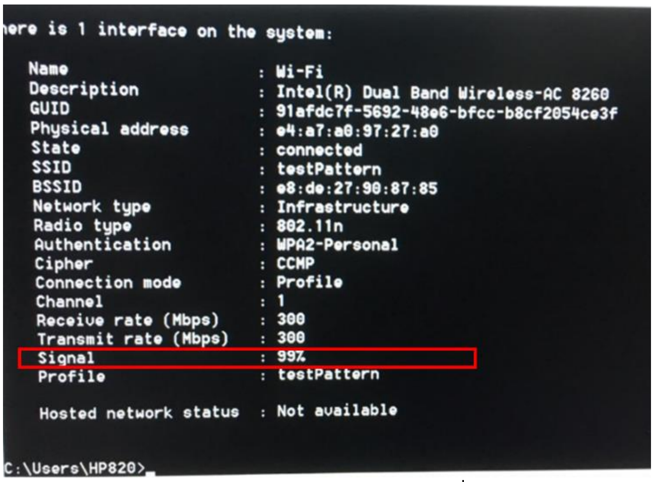
4.2.2. การทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับโดรน และอุปกรณ์ภาคพื้นดิน

จากปัญหาที่พบจากการทดสอบในเบื้องต้นจากหัวข้อที่ 4.2.1 จึงทำให้เกิดสมมติฐานการทดลองว่าถ้าหากใช้วิธีการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้งานบนภาคพื้นดิน ด้วยเทคนิคการสร้างระบบวง LAN เดียวกันโดยผ่านตัวกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย เทคนิคดังกล่าวน่าจะสามารถทำให้คอมพิวเตอร์ทั้งสองติดต่อสื่อสารและสามารถรีโมทเข้าหากันได้ในระยะห่างไม่น้อยกว่า 60 เมตร เนื่องจากในการทดสอบผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถทำการวัดได้เพื่อดูถ้าหากความผิดปกติ รวมถึงการบันทึกข้อมูลระดับความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถทำการวัดได้เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต่อไป ในการทดสอบในหัวข้อนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา และเครื่องกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สาย โดยในการทดสอบได้ทำการจำลองสถานการณ์การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับคอมพิวเตอร์พกพา โดยใช้เทคนิคการติดต่อสื่อสารด้วยเทคนิคการตั้งค่าเครื่องกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตแบบไร้สายโดยการสร้าง IP ให้อยู่ภายในวง LAN เดียวกันให้กับอุปกรณ์ทั้งสอง ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้สามารถรีโมทหน้าจอระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและคอมพิวเตอร์พกพาได้ จากนั้นในการทดสอบได้ทดลองเพิ่มระยะห่างระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อตรวจสอบว่าถ้าหากอุปกรณ์ทั้งสองมีระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบอย่างไร ซึ่งตัวชี้วัดว่าอุปกรณ์ทั้งสองมีความสามารถติดต่อสื่อสารกันได้อย่างไรนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากเปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งเปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสารจะบ่งบอกว่าถ้าหากมี

เปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสารน้อย ผลกระทบที่ตามมาคือการรีโมทเข้าหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์จะทำงานล่าช้าใช้ระยะยาวนานขึ้น หรือขณะมีการใช้งานมีความล่าช้าของภาพที่ปรากฏบนหน้าจอของคอมพิวเตอร์พกพา โดยแสดงภาพจำลองการทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับคอมพิวเตอร์พกพาในรูปที่ 4.16 ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสารสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งการดูเปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสารนั้นสามารถดูได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ในหัวข้อ Signal (ในกรอบสีแดง)



รูปที่ 4.16 การทดสอบระบบสื่อสารและผลการทดสอบระหว่างคอมพิวเตอร์พกพา
และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 4.17 ภาพหน้าจอแสดงผลเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสารของคอมพิวเตอร์พกพา
และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

จากการทดสอบการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์พกพากับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กตามในรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อคอมพิวเตอร์พกพากับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ระยะห่าง 60 เมตร (ซึ่งเป็นระยะความสูงของเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง) เปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสาร 90% และ

เมื่อทำการรีโมทเข้าไปยังหน้าของเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กผู้ปฏิบัติงานสามารถรีโมทเข้าไปยังหน้าจอได้ จากนั้นจึงทดลองเพิ่มระยะในการติดต่อสื่อสารให้มีระยะห่างของคอมพิวเตอร์ทั้งสองเป็นระยะ 100 เมตร พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสาร 60% และเมื่อทดลองรีโมทเข้าไปยังในหน้าจอของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กยังสามารถรีโมทหน้าจอได้ จากนั้นทดลองเพิ่มระยะห่างเป็น 130 เมตร พบว่าเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสารลดลงเหลือ 40% แต่ยังคงสามารถรีโมทเข้าไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้ แต่ใช้ระยะเวลาในการรีโมทเข้าไปนานกว่าสองระยะแรก ซึ่งความสามารถในการติดต่อสื่อสารดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้หากต้องการระยะในการติดต่อสื่อสารให้ไกลขึ้น ด้วยการเปลี่ยนสายอากาศของเครื่องกระจายสัญญาณอินเตอร์เน็ตให้อัตราขยายของสายอากาศที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์ในการติดต่อสื่อสารนี้บ่งบอกถึงความสามารถในการติดต่อสื่อสารหรือความสเถียรในการรีโมทเข้าหาหน้าจอของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดระดับความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศสถานีส่งสัญญาณวิทยุที่ใช้ในการพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สำหรับแนวคิดที่ได้เพิ่มเติมจากการทดลองดังกล่าว คือ การเลือกใช้ย่านความถี่ในการปล่อยสัญญาณอินเตอร์เน็ตให้คอมพิวเตอร์ทั้งสองติดต่อสื่อสารกัน ควรเลือกใช้ย่านความถี่ในการปล่อยสัญญาณไร้สาย WiFi 5 GHz เนื่องจากมีจำนวนช่องสัญญาณมากกว่า WiFi 2.4 GHz ซึ่งจำนวนช่องสัญญาณที่เยอะกว่าช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารรวดเร็วเร็วขึ้น และไม่รบกวนต่อการทำงานเมื่อมีการนำไปใช้ร่วมกับโดรน จากนั้นในการทดลองในหัวข้อ 4.2.3 นำเสนอการทดสอบระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่ของโดรน เนื่องจากโดรนที่ถูกนำมาใช้ในโครงการวิจัยจะต้องถูกติดตั้งด้วยอุปกรณ์ที่ถูกนำเสนอในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งกับโดรนนั้นจะส่งผลกระทบโดยตรงกับระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่ ถ้าอุปกรณ์มีน้ำหนักมาก ส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานได้น้อยลง

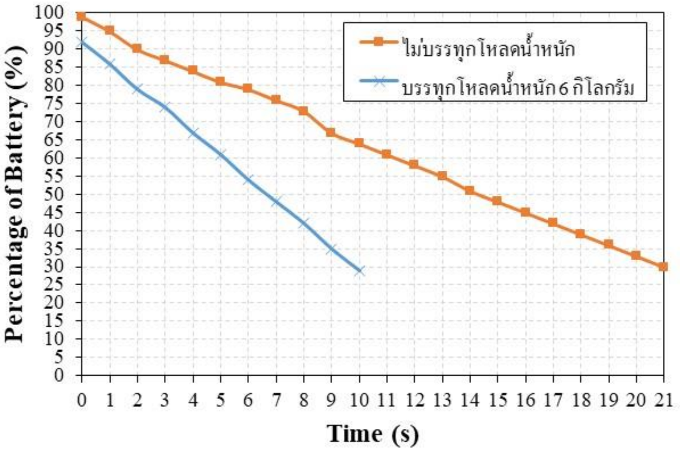
4.2.3. การทดสอบระยะเวลาแบตเตอรี่ของโดรน

ในหัวนี้เป็นทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่ของโดรน สำหรับโดรนที่เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้ คือ Matrice 600 Pro ของบริษัท DJI [37] โดยข้อมูลเฉพาะ (Specification) ของโดรน Matrice 600 Pro นั้น โดรนดังกล่าวเป็นโดรนขนาด 6 ใบพัด มีสายอากาศในการรับสัญญาณจีพีเอส 3 ตัว มีระยะเวลาในการบินประมาณ 25 นาที (หากไม่มีการบรรทุกน้ำหนัก) โดยแสดงโครงสร้างของโดรน Matrice 600 Pro ในรูปที่ 4.18 ซึ่งในนั้นต้องการทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาในการทำงานของแบตเตอรี่ระหว่างมีการไม่บรรทุกโหลดน้ำหนักกับบรรทุกโหลดน้ำหนัก โดยโดรนจะทำการบินแบบไม่บรรทุกโหลดน้ำหนักและบรรทุกโหลดน้ำหนักประมาณ 6 กิโลกรัม (น้ำหนักดังกล่าวเป็นค่าน้ำหนักของอุปกรณ์รวมโครงสร้างของชั้นวางอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาสำหรับติดตั้งร่วมกับโดรน) บินที่ระดับความสูง 6 เมตรและบินรอบเสาส่งจำลองความสูง 6 เมตร และทำการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ของ

โดรนทุกๆ 1 นาที แสดงรูปถ่ายการทดสอบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่ของโดรนในรูปที่ 4.19 จากนั้นนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ของโดรนทุกๆ 1 นาที มาทำการพล็อตกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของระดับเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ โดยในการวิเคราะห์นั้นเมื่อแบตเตอรี่ของโดรนเหลือ 30% จะหยุดทำการทดสอบทันทีเนื่องจากจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะเวลาความปลอดภัยให้กับโดรน เพราะถ้าหากทดสอบจนกระทั่งแบตเตอรี่ของโดรนเหลือน้อยกว่า 30% อาจทำให้เกิดความเสียหายกับโดรนได้ แสดงกราฟผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.18 โดรน Matrice 600 Pro สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายการทดลองเพื่อทดสอบระเวลาการทำงานของแบตเตอรี่โดรนเมื่อไม่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนักและบรรทุกโหลดน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่โดรน
เมื่อไม่มีการบรรทุกโหลดน้ำหนักและบรรทุกโหลดน้ำหนัก

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ในรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อโดรนทำการบรรทุกโหลดน้ำหนักแบตเตอรี่สามารถทำงานได้ประมาณ 10 นาที ในทางตรงกันข้ามหากไม่มีการบรรทุกน้ำหนักแบตเตอรี่สามารถทำงานได้ประมาณ 21 นาที จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่โดรนลดลงเมื่อทำการบรรทุกน้ำหนัก และมีประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลดลงประมาณ 47% เมื่อเปรียบเทียบกับโดรนที่ไม่มีการบรรทุกน้ำหนัก ซึ่งระยะเวลา 10 นาทีที่ได้จากการทดสอบนี้ถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงต่อไป เนื่องจากต้องออกแบบให้โดรนที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์วัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถวัดความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายมาจากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงแล้วนำมาพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละมุมและในแต่ละระดับความสูงให้เพียงพอต่อการใช้งานภายใน 10 นาที ซึ่งเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับงานวิจัยในโครงการวิจัยนี้ เพราะต้องคำนึงถึงน้ำหนัก แรงลม และระดับความสูงที่ต้องทำการทดลอง

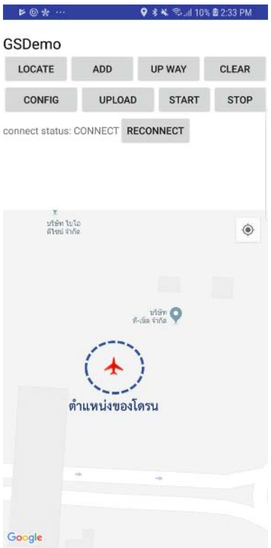
จากนั้นในหัวข้อถัดไปเป็นการนำเสนอการพัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดไฟล์ทบินของโดรน ซึ่งโปรแกรมกำหนดไฟล์ทบินนั้นเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถทำงานได้สะดวกขึ้นเมื่อมีการทำงานในพื้นที่จริง เนื่องจากในพื้นที่จริงโดรนอาจมีระยะห่างจากเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป ซึ่งการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มุมองศาต่างๆ อาจไม่สะดวกหากต้องทำจุดระบุตำแหน่งที่ภาคพื้นดินเอง ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุตำแหน่ง องศา ระยะทางและความสูงในการทดสอบให้โดรนผ่านทางโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

4.2.4. พัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดไฟล์ทการบินของโดรนและทดสอบใช้งานโปรแกรมร่วมกับโดรน

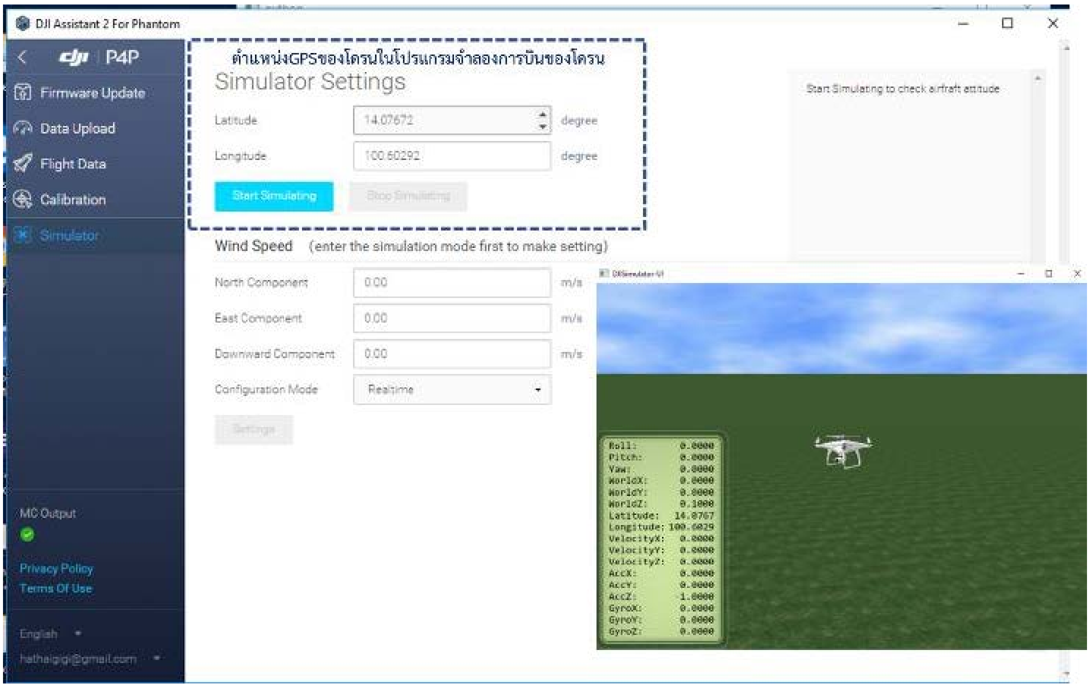
สำหรับในหัวข้อนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการกำหนดไฟล์ทการบินของโดรน เนื่องจากโปรแกรมที่มากับโดรนไม่สามารถกำหนดไฟล์ทบินในรูปแบบให้มีระยะห่างของงองศาที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงต้องทำการพัฒนาโปรแกรม โดยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นได้ทำการพัฒนาโปรแกรมบนระบบมือถือ Android ในการพัฒนานี้ในช่วงเริ่มต้นได้พัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานร่วมโดรน PHANTOM 4 ของบริษัท DJI [37] ก่อน (โดรน PHANTOM 4 เป็นโดรนที่มีอยู่ภายในห้องปฏิบัติการ) เนื่องจากโดรนดังกล่าวมีขนาดเล็กและเหมาะต่อการนำไปทดลองทำการบินในเบื้องต้น ก่อนที่จะนำโปรแกรมที่พัฒนานำไปใช้งานร่วมกับ โดรน Matrice 600 Pro ต่อไป ซึ่งในการพัฒนาโปรแกรมผู้พัฒนาโปรแกรมได้พัฒนาโปรแกรมร่วมกับโปรแกรมจำลองการทดลองบินของโดรน ซึ่งโปรแกรมจำลองการบินของโดรนเป็นของทางบริษัท DJI ที่มีการพัฒนาขึ้นให้กับผู้ปฏิบัติงานอยู่แล้ว [38] ในการพัฒนาโปรแกรมได้ตั้งโจทย์ในการพัฒนา คือ โดรนต้องสามารถบินขึ้นไปในระดับความสูง ระยะห่าง องศาในการทดสอบ ตามที่กำหนดผ่านทางโปรแกรมได้

สำหรับโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาในการกำหนดไฟล์ทในการบินของโดรนนั้น ผู้พัฒนาได้ทำการพัฒนาโปรแกรมบนระบบ Android โดยโปรแกรมจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมจำลองควบคุมการบินโดรน โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1) โปรแกรมการกำหนดไฟล์ทในการบินของโดรนจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมจำลองการควบคุมการบินของโดรน ทำให้ทราบถึงตำแหน่งจีพีเอส ของโดรนซึ่งในงานวิจัยนี้โดรนที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ตึก NECTEC ภายใน สวทช. ซึ่งมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ Latitude 14.0767 Longitude 100.6029 ซึ่งจำลองการบินของโดรนดังรูปที่ 4.21



(ก) หน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนที่พัฒนาขึ้น



(ข) โปรแกรมจำลองการควบคุมการบินของโดรน

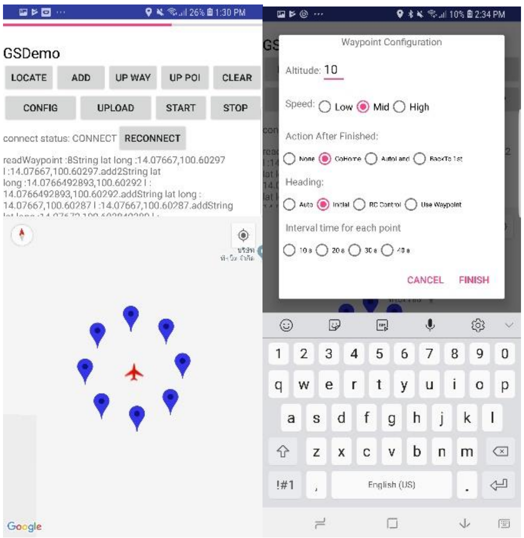
รูปที่ 4.21 การจำลองการบินของโดรนในโปรแกรม DJI Simulator

จากนั้นเมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องการกำหนดเส้นทางของไฟล์ทการบินของโดรนหรือมีการจำลองทดลองการบิน ผู้ปฏิบัติงานจะต้องทำการกำหนด

- กำหนดพิกัดตำแหน่งสถานีฐานที่ต้องการทดสอบ
- กำหนดพิกัดจุดตำแหน่งแรกว่าต้องการให้ตำแหน่งใดเป็นมุม 0 องศา
- กำหนดระยะห่างขององศาระหว่างจุด

โดยมีวิธีการตั้งค่าในโปรแกรมกำหนดไฟล์ทการบินที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 4.22 ซึ่งขั้นตอนในการตั้งค่าไฟล์ทการบินนั้นแสดงขั้นตอนการตั้งค่าในรูปที่ 4.22(ก) และแสดงหน้าจอแสดงผลบนมือถือในการตั้งค่าในรูปที่ 4.22(ข) ตามลำดับ

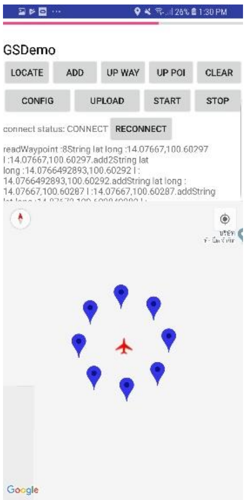
(ก) วิธีการตั้งค่าไฟล์ทการบินบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



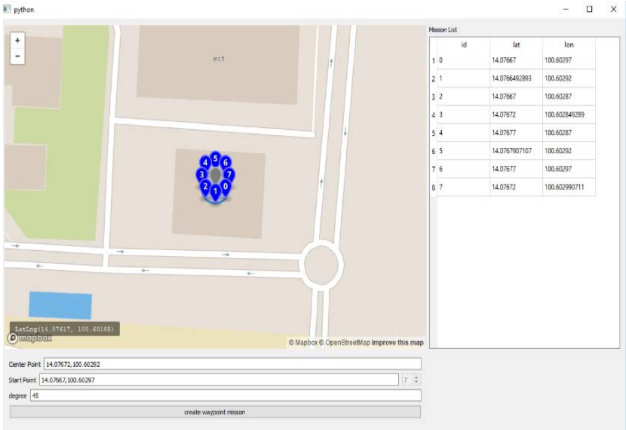
(ข) หน้าจอแสดงผลบนมือถือในการตั้งค่าระบบ

รูปที่ 4.22 วิธีการตั้งค่าในโปรแกรมกำหนดไฟล์ทการบิน

เมื่อโปรแกรมการควบคุมการบินของโดรนได้รับค่าที่ได้ทำการตั้งค่าจากขั้นตอนที่ 2 โปรแกรมจะสร้างตำแหน่งในการบิน และพิกัดในการบินของโดรนดังรูปที่ 4.23 ซึ่งพิกัดที่สร้างขึ้นแสดงเป็นรูปหยดน้ำสีน้ำเงิน โดยตำแหน่งดังกล่าวจะคิดเป็นพื้นที่วงกลมซึ่งสามารถกำหนดระยะห่างองศาได้ จากรูปตำแหน่งที่แสดงมีแต่ละตำแหน่งมีองศาต่างกัน 45 องศา



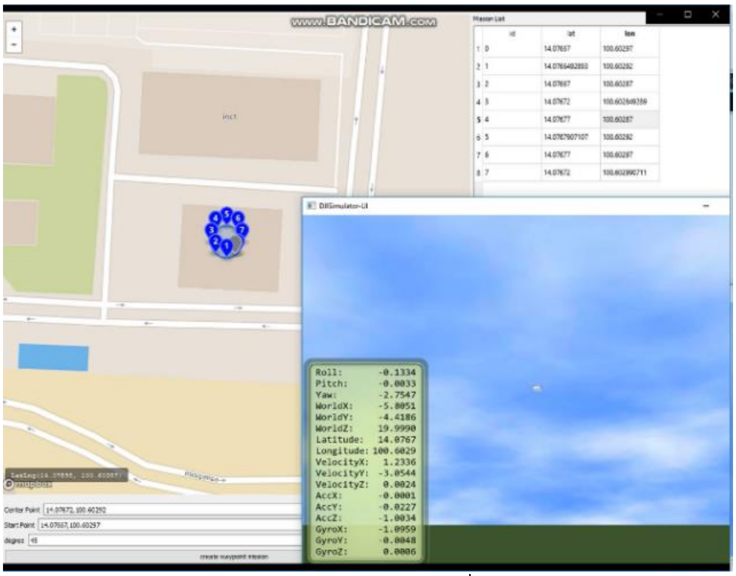
(ก) หน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนที่พัฒนาขึ้น



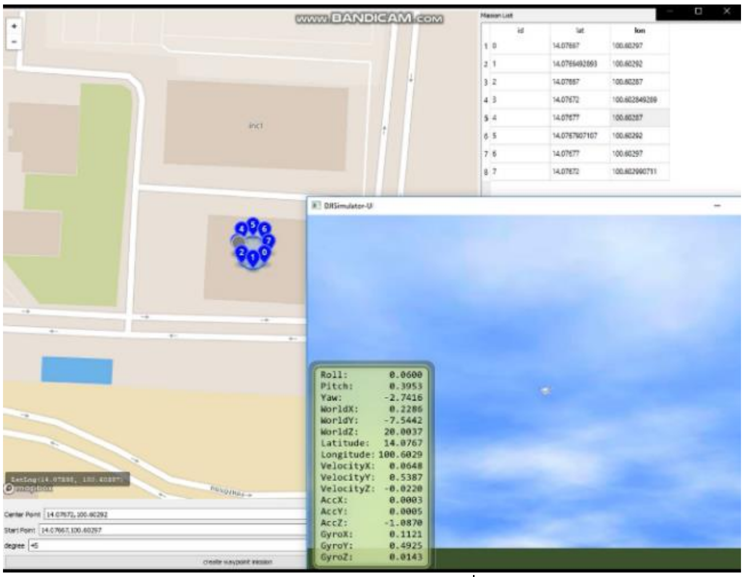
(ข) โปรแกรมสร้างเส้นทางการบินของโดรน (Way Point)บนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

รูปที่ 4.23 หน้าจอแสดงตำแหน่งไฟล์ทการบินของโดรน โดยกำหนดตำแหน่งตามค่าที่ได้ทำการตั้งค่า
เข้าไปในโปรแกรมที่พัฒนา

จากนั้นทดลองทำการบินโดรนด้วยโปรแกรมจำลองควบคุมการบินโดรนให้บินไปตามตำแหน่งต่างๆที่กำหนดจากโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าโดรนสามารถบินไปยังตำแหน่งเหล่านั้นได้หรือไม่ โดยแสดงผลการจำลองการบินโดรนดังรูปที่ 4.24 จากการจำลองเมื่อโดรนบินไปยังตำแหน่งที่กำหนด ยกตัวอย่างในรูปที่ 4.24(ก) เมื่อจำลองโดรนบินยังตำแหน่งที่ 0 รูปหยดน้ำสีน้ำเงินจะเปลี่ยนเป็นสีเทาในแผนที่บนหน้าจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ในขณะเดียวกันเมื่อโดรนบินไปยังตำแหน่งที่ 7 แสดงในรูปที่ 4.25(ก) รูปหยดน้ำสีน้ำเงินจะเปลี่ยนเป็นสีเทาในแผนที่บนหน้าจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ในขณะเดียวกันที่แอปพลิเคชันบนหน้าจอมือถือ ก็แสดงตำแหน่งของโดรนที่บินมาที่ตำแหน่งที่ 7 เป็นรูปเครื่องบินสีแดงซ้อนทับกับตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 4.25(ข)

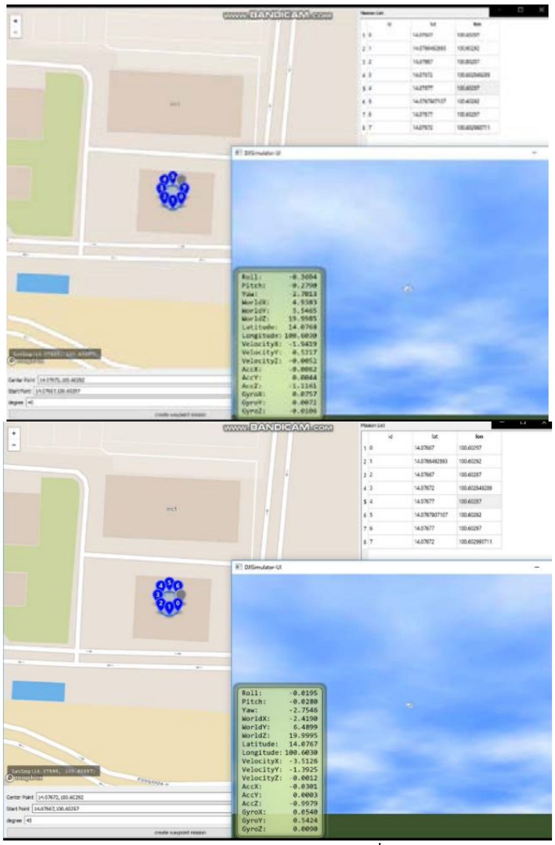


(ก) ตำแหน่งการบินที่ 0

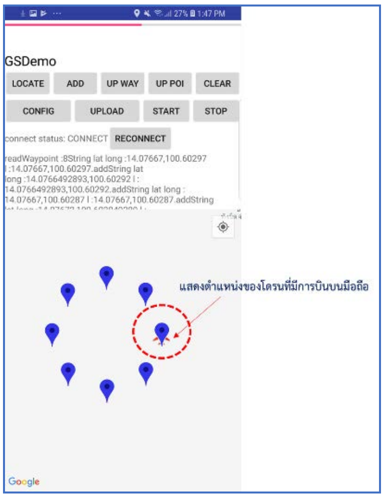


(ข) ตำแหน่งการบินที่ 3

รูปที่ 4.24 ผลการจำลองการบินของโดรนไปยังตำแหน่งที่กำหนดบนโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของ DJI และโปรแกรมสร้างเส้นทางการบินของโดรน (Way Point)บน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก



(ก) ตำแหน่งการบินที่ 7



(ข) หน้าจอแสดงตำแหน่งการบินของโดรนบนมือถือ

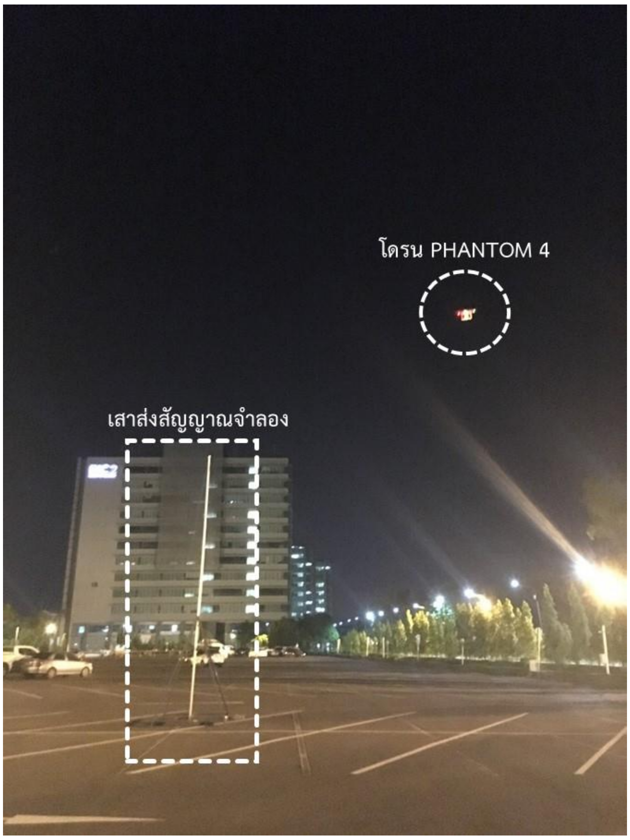
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองการบินของโดรนไปยังตำแหน่งที่กำหนดบนโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของ DJI และโปรแกรมสร้างเส้นทางการบินของโดรน (Way Point)บน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (ต่อ)

จากนั้นได้ทดสอบใช้โปรแกรมไฟล์ทการบินร่วมกับโดรน PHANTOM 4 ในการทดสอบนั้นโปรแกรมกำหนดไฟล์ทการบินจำเป็นต้องมีข้อมูลของตำแหน่งเสาส่งสัญญาณที่ต้องการให้โดรนบินรอบเสาส่ง เมื่อโปรแกรมทราบตำแหน่งที่ตั้งของเสาส่งสัญญาณ ตำแหน่งดังกล่าวถูกใช้

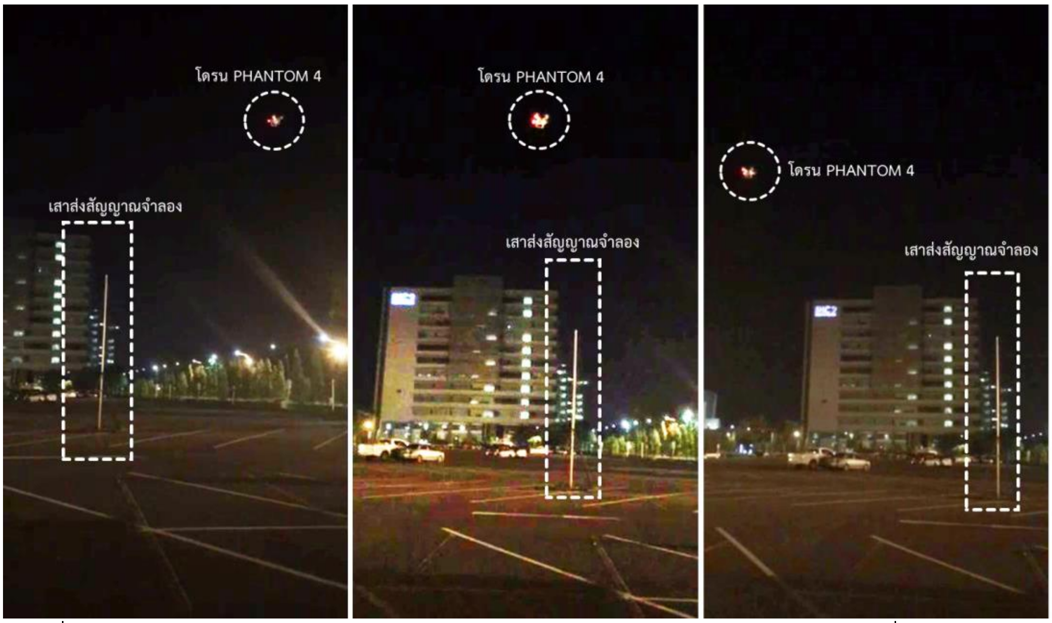
เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับผู้ปฏิบัติงานในการกำหนดระยะห่าง ความสูง และองศาในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นให้กับโดรน โดยเสาส่งสัญญาณในการทดลองการบินด้วยโปรแกรมไฟล์ทการบินนั้น ในการทดลองช่วงแรกได้ออกแบบและสร้างเสาส่งจำลองจากท่อพีวีซี ซึ่งปัญหาที่พบคือ เสาส่งจำลองที่สร้างจากท่อพีวีซีเมื่อมีระดับความสูง 6 เมตร เสาส่งสัญญาณจำลองค่อนข้างไม่แข็งแรง และเมื่อโดรนบินผ่านยิ่งส่งผลกระทบต่อเสาส่งสัญญาณจำลองดังกล่าว จากนั้นจึงทำการพัฒนาปรับปรุงให้เสาส่งสัญญาณจำลองมีความแข็งแรง และสามารถเคลื่อนย้ายเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบสถานที่ต่างๆ โดยได้ออกแบบและสร้างเสาส่งสัญญาณจำลองด้วยโครงสร้างเหล็ก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเมื่อโดรนมีการบินผ่านไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเสาส่งสัญญาณ แสดงภาพถ่ายโครงสร้างเสาส่งสัญญาณจำลองดังรูปที่ 4.26

ในการทดสอบโปรแกรมไฟล์ทบินของโดรน เสาส่งสัญญาณจำลองถูกนำไปติดตั้งที่บริเวณลานจอดรถกลางแจ้งภายใน สวทช. เมื่อทำการติดตั้งเสาส่งสัญญาณเรียบร้อย ได้เชื่อมต่อโดรน PHANTOM 4 กับโปรแกรมการกำหนดไฟล์ทบิน ในการทดสอบโดรนบินไปอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับเสาส่งสัญญาณและบันทึกค่าตำแหน่งของเสาส่งสัญญาณ จากนั้นค่าตำแหน่งที่ได้จะถูกนำมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง จากนั้นตั้งค่าระยะห่างและความสูงของโดรน ซึ่งการทดสอบได้กำหนดให้โดรนมีระยะห่างจากจุดเสาส่งสัญญาณ 6 เมตร บินที่ระดับความสูง 6 เมตร และมีระยะห่างระหว่างจุดทีละ 45 องศา ซึ่งการทดสอบการกำหนดไฟล์ทบินร่วมกับโดรนนั้น สามารถตั้งค่าให้โดรนบินอยู่กับที่ในตำแหน่งองศาต่างๆได้ โดยในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้โดรนบินอยู่กับที่เมื่อทำการเปลี่ยนในแต่ละองศาเป็นเวลา 30 วินาที แสดงภาพถ่ายการทดสอบการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟล์ทบินร่วมกับโดรน ในรูปที่ 4.27 และในรูปที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งโดรนเมื่อทำการบินด้วยโปรแกรมไฟล์ทบินโดรนที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

รูปที่ 4.26 เสาส่งสัญญาณจำลองความสูง 6 เมตร



รูปที่ 4.27 รูปถ่ายการทดลองสำหรับการทดสอบโปรแกรมไฟล์ทบินร่วมกับโดรน



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายการทดสอบโปรแกรมไฟล์ทบินร่วมกับโดรนโดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของโดรนเมื่อทำการบินด้วยโปรแกรมไฟล์ทบินโดรนที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 พบว่าโดรนสามารถบินไปยังตำแหน่งองศาที่ได้ทำการกำหนดไว้ในโปรแกรมไฟล์ทการบิน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการพัฒนาโปรแกรมกำหนดไฟล์ทบิน แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองดังกล่าวพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถควบคุมให้โดรนบินไปยังตำแหน่งองศาต่างๆได้ แต่ยังไม่สามารถควบคุมให้ด้านหน้าของโดรนหันหน้าเข้าเสาส่งสัญญาณได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่ง สายอากาศภาครับที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรนเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง ดังนั้นในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จำเป็นต้องให้ด้านหน้าของสายอากาศภาครับและด้านหน้าของโดรนหันเข้าหาสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงตลอดเวลา จากการทดสอบดังกล่าวจึงเป็นแนวทางให้กับผู้พัฒนาโปรแกรม ทำการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของโปรแกรมต่อไป นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบไฟล์ทการบินร่วมกับโดรน PHANTOM 4 การทดสอบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการควบคุมทางการบินได้ ทำให้ผู้พัฒนาโปรแกรมได้นำโปรแกรมดังกล่าวไปจำลองการบินร่วมกับโดรน Matrice 600 Pro โดยจำลองการบินในโปรแกรมจำลองการบินของ DJI ซึ่งจากการจำลองการบิน พบว่าโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับโดรน Matrice 600 Pro ได้ ดังนั้นเมื่อผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถแก้ไขจุดบกพร่องในการควบคุมการทำงานให้ด้านหน้าของโดรนหันเข้าหาเสาส่งสัญญาณได้แล้ว จะนำโปรแกรมที่ได้ทำการปรับปรุงเรียบร้อยมาทดลองบินร่วมกับโดรนต่อไป

4.2.5. การออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นร่วมกับโดรน

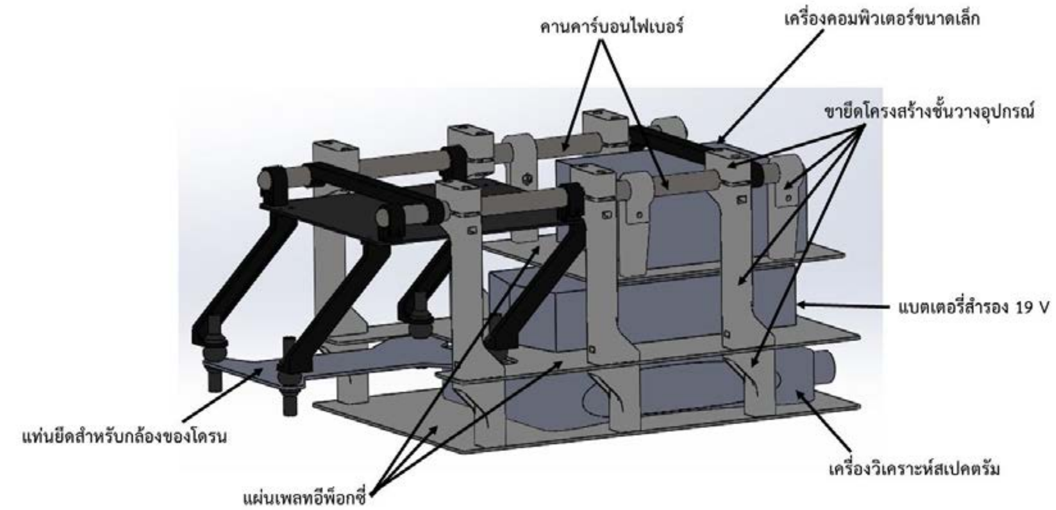
ในหัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นร่วมกับโดรน โดยอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์สปคตรัม เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก แบตเตอรี่สำรอง 19 V และสายอากาศภาครับตามลำดับ สำหรับสายอากาศภาครับนั้นจากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนในเอกสารอ้างอิงที่ 1 ถึงเอกสารอ้างอิงที่ 3 พบว่าในงานวิจัยที่มีมาก่อนใช้สายอากาศแบบมีทิศทางในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางเป็นสายอากาศภาครับ โดยสายอากาศแบบมีทิศทางที่เลือกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสายอากาศที่มีการใช้งานอยู่ภายในห้องปฏิบัติการที่ สวทช. อยู่แล้ว โดยความถี่ของสายอากาศครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 20 MHz ถึง 200 MHz ของบริษัท ของ Rohde & Schwarz ซึ่งสามารถรองรับการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวิทยุกระจายเสียงย่านความถี่ 88 MHz ถึง 108 MHz โครงสร้างของสายอากาศแบบมีทิศทางแสดงดังรูปที่ 4.28

รูปที่ 4.29 สายอากาศแบบมีทิศทางที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศภาครับสัญญาณในโครงการวิจัย

สำหรับความท้าทายในการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ คือ ในส่วนของการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์จะต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างสำหรับชั้นวางอุปกรณ์ โดยวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้จะต้องแข็งแรง ทนทาน ยืดหยุ่นต่อสภาวะการสั่นสะเทือนในขณะที่โดรนบิน และวัสดุควรมีน้ำหนักเบา ในส่วนของวิธีการติดตั้งผู้ออกแบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงพื้นที่ที่มีจำกัด การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆต้องไม่รบกวนการทำงานของโดรน การติดตั้งอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงความสมดุลน้ำหนักของโครงสร้างโดรน เพราะถ้าหากสมดุลน้ำหนักถ่ายเทไปด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ในการยกตัวของโดรนทางฝั่งที่มีน้ำหนักมากกว่าและทำให้มอเตอร์ทางฝั่งดังกล่าวทำงานหนัก และทำให้

เกิดการเสื่อมสภาพกับมอเตอร์ ในส่วนของการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับติดตั้งและจำลองการวางอุปกรณ์นั้นผู้ออกแบบใช้โปรแกรม Solidwork [39] ในการออกแบบ โดยแสดงโครงสร้างของชั้นวางอุปกรณ์และวิธีการติดตั้งอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.30 สำหรับชั้นวางอุปกรณ์นั้นได้ออกแบบคานยึดชั้นวางอุปกรณ์ใหม่ เนื่องจากคานเดิมที่มากับโครงสร้างมีความยาวไม่เพียงพอต่อการติดตั้งชั้นวางอุปกรณ์ โดยคานยึดดังกล่าวได้ออกแบบมาจากวัสดุประเภทคาร์บอนไฟเบอร์ โดยคาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีความแข็งแรงสูงต่อน้ำหนัก ดังนั้นวัสดุดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นคานยึดให้กับชั้นวางอุปกรณ์ ในส่วนของขายึดชั้นวางอุปกรณ์กับแผ่นเพลทนั้นได้ออกแบบให้มีลักษณะเฉพาะและมีขนาดที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงการวิจัยนี้เท่านั้น โดยผู้ออกแบบได้ทำการออกแบบและสร้างขายึดโครงสร้างดังกล่าว จากการพิมพ์สามมิติ (3D Print) ที่ความหนาแน่นของวัสดุ 80% โดยขายึดดังกล่าวสร้างมาจากวัสดุประเภท PLA (Polylactic Acid) ซึ่งวัสดุดังกล่าวทนทานต่อแรงดึง สามารถให้พื้นผิวชิ้นงานคุณภาพสูง ใช้ง่ายในทุกสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง และเหมาะสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานต้นแบบ ในขณะที่แผนเพลทที่ใช้เป็นที่วางอุปกรณ์นั้นได้ออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมต่อพื้นที่และเลือกใช้วัสดุประเภทอีพ็อกซี่ (Epoxy) หนา 1.6 มิลลิเมตร แผ่นเพลทประเภทอีพ็อกซี่จะมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น แข็งแรงแต่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเพลทอะคริลิค แผ่นเพลทดังกล่าวมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า และมีน้ำหนักมากกว่า สำหรับการวางอุปกรณ์ในการใช้งานอาจมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ไปจากรูปที่ได้ทำการออกแบบไว้ในรูปที่ 4.30 เพราะต้องดูความเหมาะสมในการเชื่อมต่อสายสัญญาณ สายไฟของอุปกรณ์ต่างๆ จากนั้นในรูปที่ 4.31 นำเสนอรูปถ่ายต้นแบบการติดตั้งชั้นวางอุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งในการติดตั้งนั้นได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนชั้นวางและแสดงตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศแบบมีทิศทางร่วมกับโดรน อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาในการติดตั้ง คือ ยังมีปัญหาเรื่องสมดุลน้ำหนัก ซึ่งจะต้องพิจารณาหาแนวทางแก้ไขในการปรับสมดุลน้ำหนักการติดตั้งให้เหมาะสมต่อไป

จากนั้นในหัวข้อถัดไปนำเสนอการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งในการทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะถูกติดตั้งเข้ากับโดรน Matrice 600 Pro เช่นเดียวกับในรูปที่ 4.31 และในส่วนของภาคส่งสัญญาณในการทดลองได้ใช้เสาส่งจำลองความสูง 6 เมตรที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้านี้มาประยุกต์ใช้เป็นเสาส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง โดยรายละเอียดการทดลองและผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.30 ภาพร่างการออกแบบชั้นวางอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

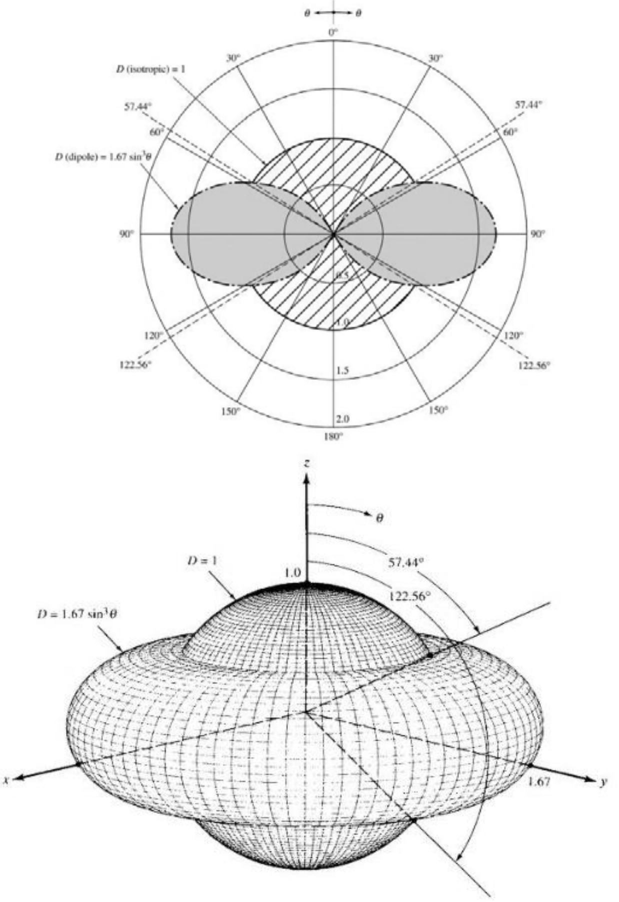
รูปที่ 4.31ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่น
ร่วมกับโดรน Matrice 600 Pro

4.2.6. การทดลองระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง

สำหรับการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลองนั้น ในการทดสอบได้จำลองสถานการณ์ว่าถ้าหากนำระบบดังกล่าวไปใช้ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจริง ระบบดังกล่าวจะสามารถทำงานได้หรือไม่ นอกจากนี้ในการทดสอบนี้ยังเป็นแนวทางได้ว่าในการนำระบบไปใช้ในการทดสอบร่วมกับสถานที่จริงปัญหาที่พบจะมีอะไรบ้าง ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางในการแก้ไขระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งในการทดสอบโดรนที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน ยังไม่ได้ทำการบินโดยใช้โปรแกรมกำหนดไฟล์ทการบินที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากเป็นการบินทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นครั้งแรก อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกติดตั้งค่อนข้างมีราคาสูง ดังนั้นการควบคุมการบินโดยผู้ปฏิบัติงานน่าจะมีความปลอดภัยมากที่สุด

ในการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองนั้น สายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองได้เลือกใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wave Length Dipole) มาตรฐาน รุ่น EMCO Model 3121 [40] แสดงดังรูปที่ 4.32 โดยสายอากาศดังกล่าวสามารถทำงานได้ตั้งแต่ย่านความถี่ 20 MHz ถึง 1000 MHz ซึ่งเหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง สำหรับสายอากาศไดโพลมาตรฐานตามทฤษฎีสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว โดยแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติในรูปที่ 4.33 เมื่อทำการพิจารณาในรูปแบบ 2 มิติ พบว่าหากพิจารณาในระนาบแกน *xz (Elevation plane;*$\phi=0$*)* คือระนาบหลักสนามไฟฟ้า กราฟ 2 มิติจะมีลักษณะเป็นรูปคล้ายเลขแปด ในขณะที่เมื่อทำการพิจารณาในระนาบ *xy (Azimuthal plane;*$\theta=\frac{\pi}{2}$*)* คือ ระนาบหลักสนามแม่เหล็ก กราฟ 2 มิติจะมีลักษณะวงกลม ดังนั้นหากผลที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้สามารถพล็อตกราฟ 2 มิติออกมาเป็นรูปเลขแปดหรือรูปวงกลมก็สามารถคาดการณ์ได้ว่าผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลที่ถูกจำลองเป็นสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงมีผลการทดสอบที่ถูกต้อง สำหรับสายอากาศไดโพลถูกติดตั้งบนเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองและเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณสร้างสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 100 MHz และมีกำลังงาน 20 dBm

รูปที่ 4.32 สายอากาศไดโพลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

ในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ [41]

ในส่วนของการจำลองพื้นที่ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น ได้ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.34 โดยกำหนดให้มีการเก็บค่าความแรงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศส่งโดยมีระยะห่างระหว่างจุดทีละ 10 องศา โดยสร้างจุดสังเกตุตำแหน่งองศาที่ต่างกันทีละ 10 องศาดังในรูปที่ 4.34 ในการทดสอบได้กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งจำลองและสายอากาศรับจากการคำนวนหาพื้นที่สนามระยะไกลของสายอากาศตามสมการที่ 2 โดยแสดงผลการคำนวนหาพื้นที่สนามระยะไกลได้ดังนี้

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{2}$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ความถี่ 100 MHz (เมตร)

$D= D_t+D_r$; D_t คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศส่ง (เมตร)

D_r คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดสายอากาศรับ (เมตร)

ดังนั้น

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{(เมตร)}$$

$$R \geq \frac{2 \times (D_t + D_r)^2}{\lambda}$$

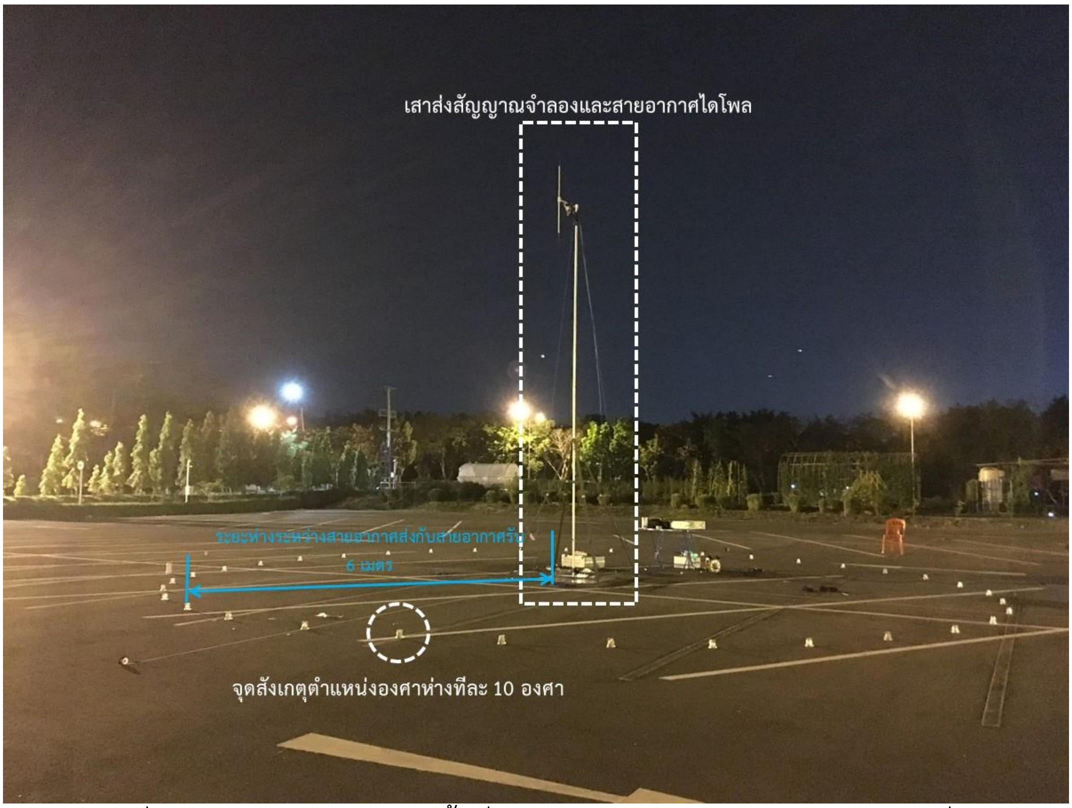
$$R \geq \frac{2 \times (1.53 + 0.59)^2}{3}$$

$$R \geq 2.99 \quad \text{(เมตร)}$$

จากผลการคำนวนสนามระยะไกลในสมการที่ 2 พบว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นที่ชัดเจน ได้ตั้งแต่ระยะห่าง 2.99 เมตรเป็นต้นไป ซึ่งในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้สายอากาศทั้งสองมีระยะห่าง 6 เมตร นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าโดรนที่ทำการทดสอบบินอยู่ในตำแหน่งองศาที่ต้องการทำการทดสอบจริง ได้ทำการติดตั้งเลเซอร์พอยเตอร์ไว้กับตัวโดรน เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบกับจุดสังเกตุองศาแสดงว่าโดรนยังอยู่ในพื้นที่ที่ต้องการทดสอบและอยู่ในตำแหน่งองศาที่ต้องการทดสอบ แสดงภาพถ่ายโดรนที่ได้ติดตั้งเลเซอร์เพื่อใช้เป็นเครื่องยืนยันความถูกต้องของตำแหน่งในรูปที่ 4.35 จากนั้นแสดงภาพถ่ายการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณจำลองที่ย่านความถี่ 100 MHz ในรูปที่ 4.36 ในการทดสอบโดรนจะถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงานไปโดยเคลื่อนไปทีละ 10 องศา และผู้ปฏิบัติอีกชุดหนึ่งคอยทำการเก็บข้อมูลความแรงของกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถวิเคราะห์มาได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม โดยผู้ปฏิบัติงานจะทำการเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ภาคพื้นดินกับเครื่องคอมพิวเตอร์

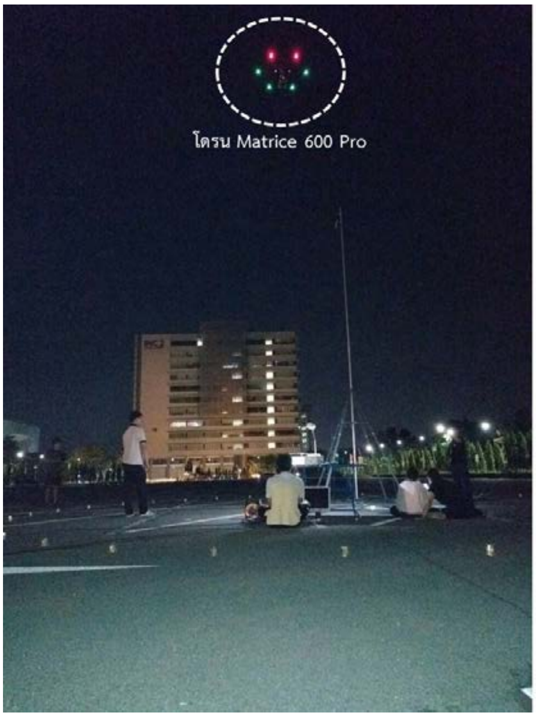
ขนาดเล็กด้วยการรีโมทหน้าจอ และเก็บค่าผลการทดสอบในแต่ละองศา แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบต่อไป สำหรับผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณได้แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.37 จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบ 2 มิติ มีลักษณะเป็นวงกลม (การทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy) ซึ่งสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีของสายอากาศไดโพล

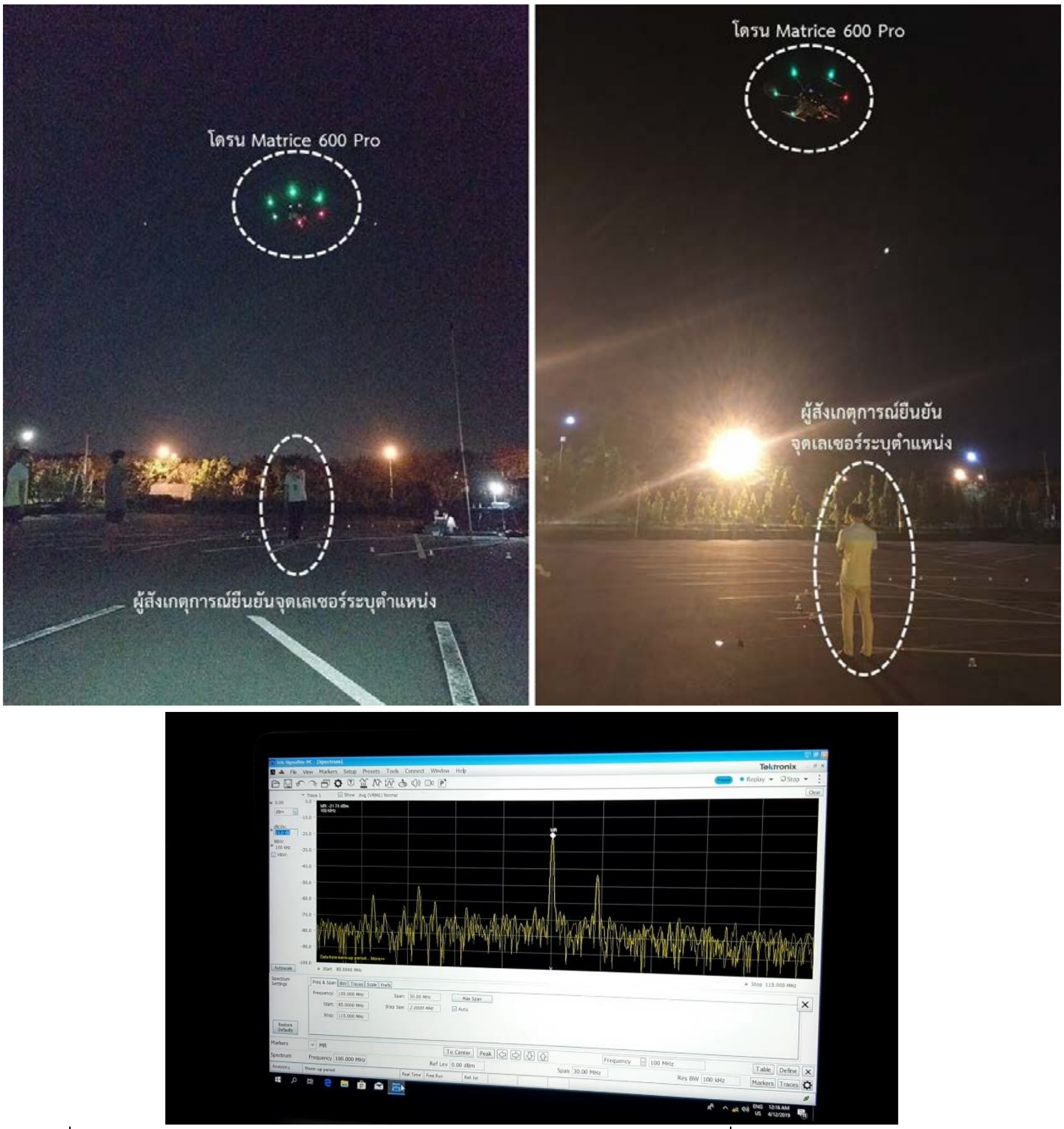
อย่างไรก็ตามในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น พบปัญหาที่ได้จากการทดสอบ คือแบตเตอรี่โดรนที่ได้ทำการจัดซื้อมาเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่สำรอง เนื่องจากแบตเตอรี่โดรนสำรองที่จัดซื้อมามีสมดุลของกระแสแต่ละก้อนไม่เท่ากัน ถ้านำมาใช้งานร่วมกันโดรนจะไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะต้องทำการติดต่อกับตัวแทนจำหน่ายโดรนที่ได้ทำการจัดซื้อมา ในส่วนแบตเตอรี่สำรอง 19 V จำเป็นต้องทำการจัดซื้อเพิ่มเนื่องจากเมื่อมีการใช้งานพร้อมกันทั้งระบบ ระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง



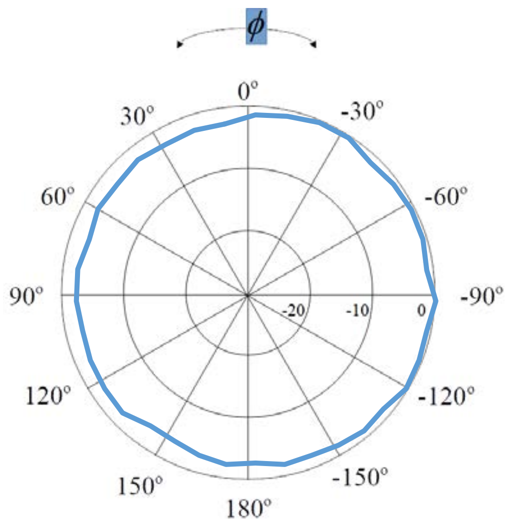
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายการจำลองพื้นที่ทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
จากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลอง

รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงจุดเลเซอร์เพื่อใช้ในการยืนยันตำแหน่งของโดรนขณะบินทำการทดสอบ





รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลอง



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณจำลอง

4.2.7. การวิจัย พัฒนา และปรับปรุงระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

หัวข้อนี้เป็นการวิจัย พัฒนา และปรับปรุงระบบการทดสอบจากปัญหาการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในหัวข้อที่ 4.2.2 โดยทางทีมวิจัยและพัฒนาพบจุดบกพร่องของโปรแกรมและระบบแบตเตอรี่สำรองของระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศและระบบดังต่อไปนี้

<u>ข้อปรับปรุง 1</u> : โปรแกรมที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนา ต้องใช้อุปกรณ์ในการตั้งค่าทางการบินและการตรวจสอบการประมวลผลต้องมีการใช้งานทั้งบนระบบปฏิบัติการบนมือถือและคอมพิวเตอร์ ส่งผลให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ทีมวิจัยและพัฒนาจึงทำการปรับปรุงให้สามารถแสดงผลการทดสอบบนหน้าจอมือถือ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

<u>ข้อปรับปรุง 2</u> : โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในเบื้องต้นนั้นสามารถควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนเฉพาะการบินเพื่อทดสอบรอบเสาสัญญาณเท่านั้น จึงมีแนวคิดพัฒนาปรับปรุงให้สามารถกำหนดไฟล์ทการบินในรูปแบบอื่นๆได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มความสะดวกต่อการใช้งานยังสามารถนำมาเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบเพื่อหาวิธีการบินอย่างไรให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด เนื่องจากปัญหาหลักของโดรน คือ ระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ระยะเวลาแบตเตอรี่ของโดรนมีระยะเวลาการใช้งานเพียง 15 นาที

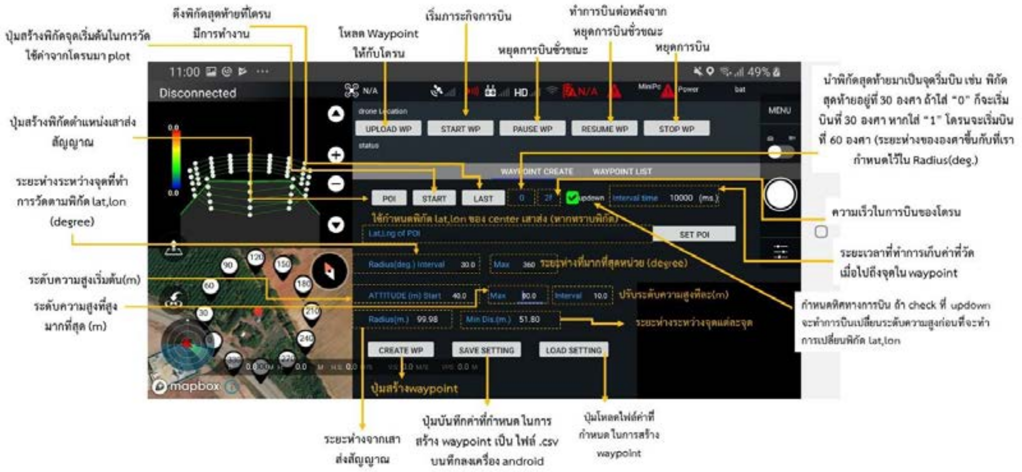
<u>ข้อปรับปรุง 3</u> : ระบบแบตเตอรี่สำรองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็กที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน จากปัญหาการทดสอบผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถทราบถึงระดับแบตเตอรี่สำรองที่ถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน ส่งผลให้ในการเก็บข้อมูลบางครั้งแบตเตอรี่สำรองหมดทำให้ไม่สามารถดึงข้อมูลจากโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมขนาดเล็กได้ ทำให้

สูญเสียทั้งเวลาและพลังงานของแบตเตอรี่โดรนที่มีจำกัด และอาจส่งผลต่อเสียหายเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็กได้

4.2.8. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการไฟล์ทการบินของโดรน (เวอร์ชั่น 2)

หัวข้อนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินให้กับโดรนสำหรับการประยุกต์ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในโครงการวิจัยนี้โดยเฉพาะ โดยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนผู้ปฏิบัติงานจะสามารถกำหนดลักษณะการบินให้กับโดรนเพื่อทำการตรวจวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปการกำหนดค่าระดับความสูงที่ต้องการวัด ระยะห่างในการวัดและมุมองศาที่ต้องการทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และสามารถเลือกกำหนดรูปแบบการวัดในการกำหนดค่าระดับความสูง แล้วปรับเปลี่ยนมุมองศาในการวัดรอบสายอากาศ หรือจะมีรูปแบบการวัดโดยการกำหนดมุมองศาที่ต้องการทำการวัดแล้วปรับเปลี่ยนระดับความสูงที่ต้องการทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยแสดงรายละเอียดของหน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนในส่วนต่างๆดังรูปที่ 4.38(ก) และรายละเอียดของปุ่มการใช้งานต่างๆบนโปรแกรม รูปที่ 4.38(ข) ตามลำดับ

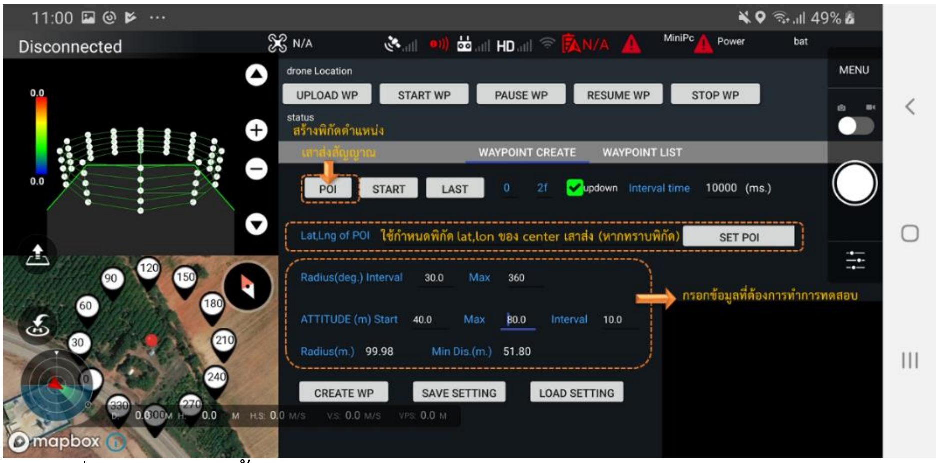
(ก) รายละเอียดส่วนการทำงานต่างๆบนหน้าจอโปรแกรมควบคุมการไฟล์ท
การบินของโดรน (เวอร์ชั่น 2)



(ข) รายละเอียดของปุ่มการใช้งานต่างๆบนหน้าจอโปรแกรม

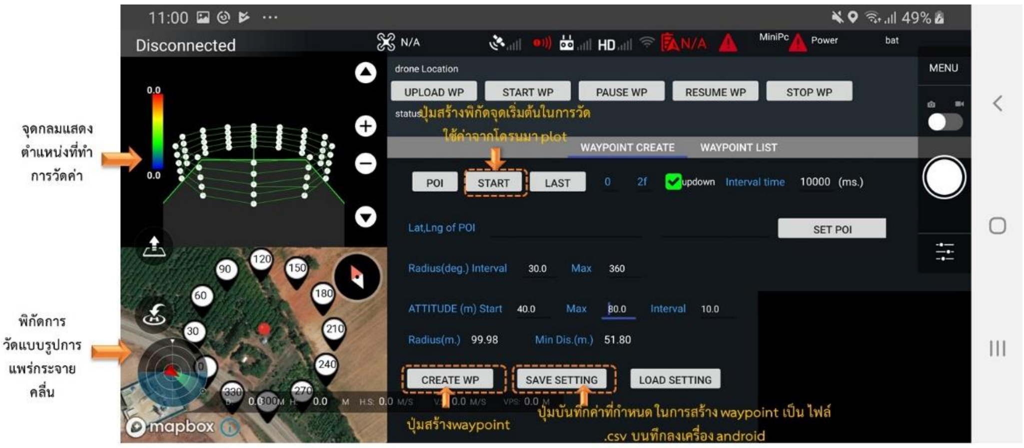
รูปที่ 4.38 หน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินโดรนบนมือถือ

จากนั้นนำเสนอวิธีการใช้งานของโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินโดรน โดยแสดงขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นดังต่อไปนี้ (โดยโปรแกรมดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับเฉพาะระบบปฏิบัติการ Android เท่านั้น) เมื่อเปิดเข้ามาหน้าโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินโดรน จะพบกับหน้าต่างของโปรแกรมจากนั้นให้ผู้ปฏิบัติงานดำเนินการใส่ค่าพิกัดของเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงที่ต้องการทำการทดสอบ โดยโปรแกรมจะยึดตำแหน่งดังกล่าว เป็นจุดศูนย์กลางในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น รวมถึงการใส่ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความสูงที่ต้องการทดสอบ องศาที่ต้องการทดสอบ โดยระยะห่างระหว่างโดรนที่ต้องการทดสอบกับเสาส่งสัญญาณที่ต้องการทดสอบ(กรอบสีเหลือง) จึงถูกคำนวนอัตโนมัติและแสดงระยะห่างให้ผู้ปฏิบัติงาน โดยแสดงวิธีการ Setting โปรแกรมดังรูปที่ 4.39



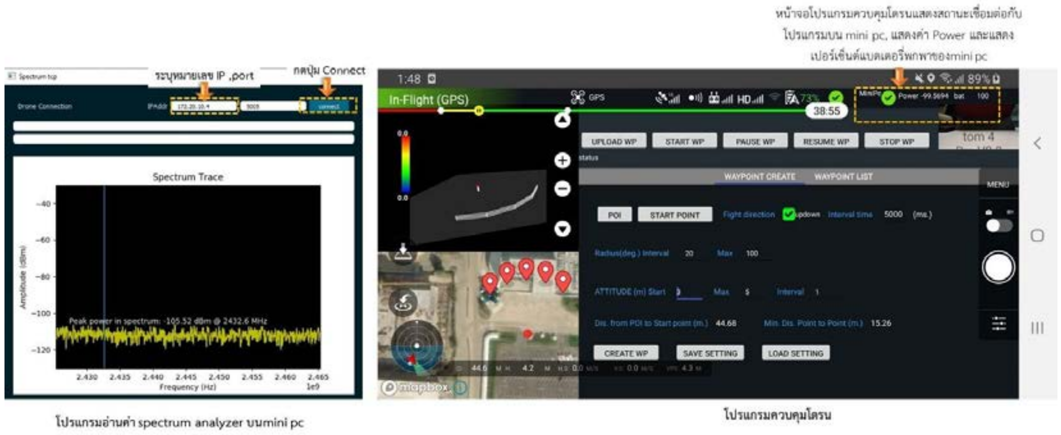
รูปที่ 4.39 วิธีการตั้งค่าจุดศูนย์กลางการทดสอบและรายละเอียดในการทดสอบ

จากนั้นโปรแกรมจะทำการกำหนดจุดตามที่ผู้ปฏิบัติงานได้กรอกข้อมูลเข้าไปในระบบ แต่โปรแกรมจะยังไม่ได้กำหนดจุดเริ่มต้นในการทดสอบว่าจะให้ตำแหน่งใดเป็นมุมองศาที่ 0 เพื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบสายอากาศของเสาส่งสัญญาณ ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานต้องเข้าไปกำหนดจุดที่ 0 องศาให้กับโปรแกรมโดยกดที่ปุ่ม “START” เมื่อสร้างพิกัดการบินเริ่มต้นให้กับโดรนเรียบร้อยให้ผู้ปฏิบัติงานกดปุ่ม “CREATE WP” จากนั้นให้ผู้ปฏิบัติงานกดปุ่ม “SAVE SETTING” เพื่อเป็นการเก็บข้อมูลการตั้งค่าเพื่อนำไปใช้ในครั้งถัดไป หากมีการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดิม เมื่อทำการกดปุ่ม “CREATE WP” จะสามารถสังเกตุทางด้านซ้ายมือของหน้าจอ ว่ามีการแสดงพิกัดบนแผนที่และจุดที่ทำการวัดในรูปแบบ 3D แสดงดังรูปที่ 4.40



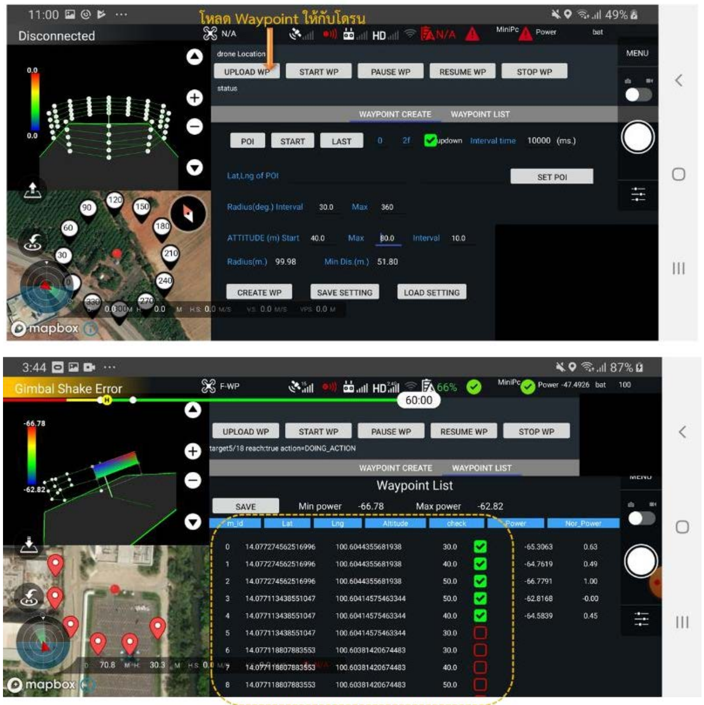
รูปที่ 4.40 วิธีการกำหนดจุดเริ่มต้นในการทดสอบและการสร้าง way point

จากนั้นผู้ปฏิบัติงานทำการเชื่อมต่อโปรแกรมการอ่านค่ากับโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมบนเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก เพื่อส่งค่าที่อ่านได้จากไปยังโปรแกรมควบคุมโดรน โดยผู้ปฏิบัติงานทำการระบุหมายเลข IP ,port โปรแกรมควบคุมโดรน จากนั้นทำการกดปุ่ม “Connect” เมื่อมีการเชื่อมต่อเรียบร้อยด้านบนหน้าจอควบคุมไฟล์ทการบินจะแสดงสถานะเชื่อมต่อกับโปรแกรมบน Mini pc โดยแสดงค่า Power ที่สามารถอ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม และแสดงเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่พกพาของเครื่องคอมพิวเตอร์พกพา แสดงดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 วิธีการเชื่อมต่อโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินมือถือกับโปรแกรม
ของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมบนเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก

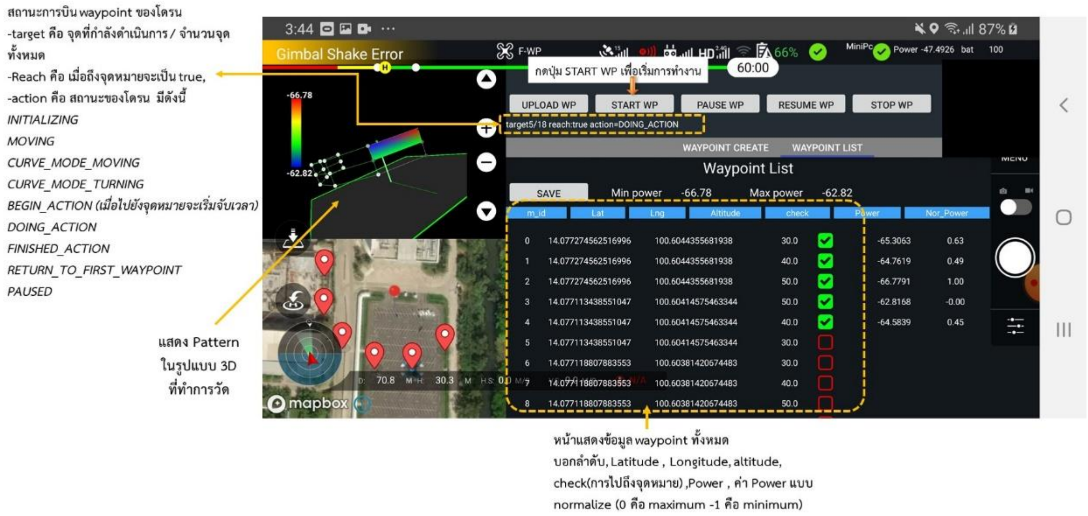
จากนั้นกดปุ่ม “UPLOAD WT” ไปยังโดรน เมื่อเสร็จแล้วจะแจ้งเตือนว่า Waypoint Upload Successfully โดยหน้าจอจะแสดงข้อมูล waypoint ทั้งหมดบอกลำดับ, Latitude , Longitude, Altitude แสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 วิธีการโหลด waypoint ไปยังโดรน และการแสดงผลการโหลด waypoint

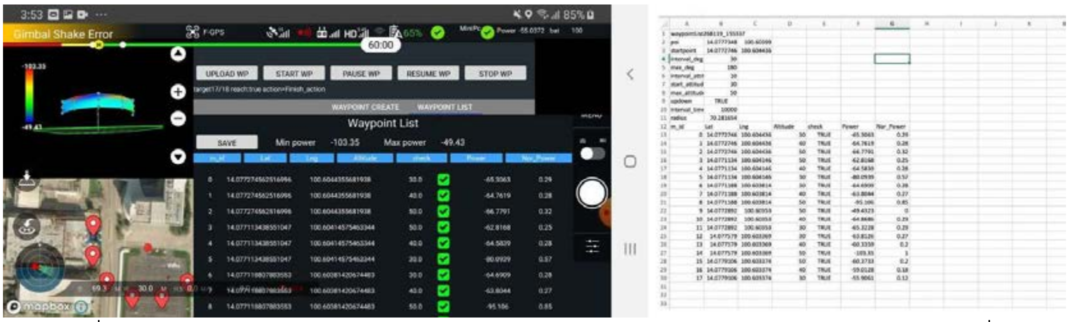
กดปุ่ม “START WP” เพื่อให้โดรนเริ่มบินไปตามจุดใน waypoint ที่ได้ทำการกำหนดไว้ เมื่อโดรนบินไปยังตำแหน่งที่ได้ทำการกำหนดไว้ โดรนจะเริ่มต้นทำการเก็บค่าความแรงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณ เมื่อโดรนทำการเก็บค่า ณ ตำแหน่งที่กำหนดเสร็จ

เรียบร้อยจะมีเครื่องหมาย ถูกสีเขียวขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเก็บข้อมูล ณ จุดนั้นเรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 วิธีการกดปุ่มเริ่มบินให้กับโดรนและหน้าจอแสดงผลการเก็บข้อมูล
เมื่อโดรนทำการเก็บข้อมูล

เมื่อทำการวัดเสร็จแล้ว จะบันทึกไฟล์เก็บข้อมูลไฟล์ทการบินและข้อมูลการวัดความแรงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีฐานลงในบนมือถือพกพาระบบปฏิบัติการ Android โดยแสดงหน้าจอแสดงการเก็บข้อมูลบนระบบ Android ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 หน้าจอการแสดงผลการเก็บบันทึกข้อมูลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระบบปฏิบัติการ Android

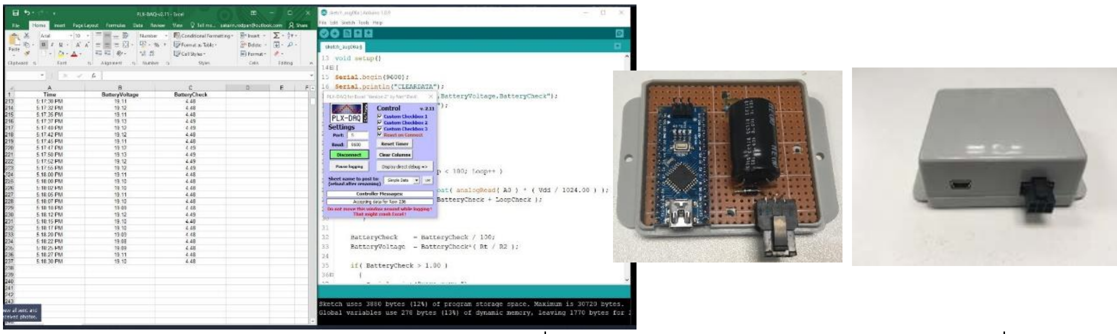
การปรับปรุงโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนที่นำเสนอ สามารถควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนเฉพาะการบินได้หลากหลายรูปแบบ โดยสามารถกำหนดให้โดรนมีการบินเปลี่ยนระดับความสูงแต่มีมุมองศาที่ต้องการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มุมเดียวกัน ในขณะเดียวกันหากต้องการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวของสายอากาศสถานีฐาน ก็สามารถกำหนดให้โดรนมีไฟล์ทการบินแบบเปลี่ยนมุมองศาการวัดแต่ระดับความสูงเท่าเดิมได้ นอกจากนี้โปรแกรมไฟล์ทที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตั้งค่าผ่านมือถือได้โดยตรง สามารถแสดงผลการวัด

ในรูปแบบ 3 มิติ แบบ Real Time ทำให้ผู้ปฏิบัติงาน และทำการเก็บข้อมูลที่ทำการวัดได้ไว้ในเครื่องมือถือ ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานมีความสะดวก รวดเร็ว ต่อการใช้งานเพิ่มขึ้น สำหรับในหัวข้อถัดไปเป็นนำเสนอการปรับปรุงระบบตรวจสอบระดับแบตเตอรี่สำรองซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก

4.2.9. พัฒนาระบบตรวจสอบระดับแบตเตอรี่สำรองของเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก

สำหรับระบบดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาแบตเตอรี่สำรองหมด ส่งผลให้ไม่สามารถดึงข้อมูลจากโปรแกรมของเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมขนาดเล็กได้ในขณะทำการ โดยทีมวิจัยและพัฒนาได้ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการตรวจเช็คระดับแบตเตอรี่สำรองและนำข้อมูลดังกล่าวเชื่อมต่อเข้ากับหน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสังเกตระดับแรงดันของแบตเตอรี่สำรอง หากแบตเตอรี่มีระดับแรงดับที่ลดลงจะเป็นการเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ก่อนทำการขึ้นบินและเก็บข้อมูล ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายทางด้านเวลา ด้านการเก็บข้อมูลให้กับผู้ปฏิบัติงาน

ในการพัฒนาระบบตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรอง ทีมวิจัยต้องนำแบตเตอรี่สำรองทุกตัวมาทำการวัดค่าระดับแรงดันที่ Output ออกมาจากตัวแบตเตอรี่สำรองก่อนเพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของแบตเตอรี่สำรอง โดยในการทดสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ได้ทำการเขียนโปรแกรมและสร้างวงจร Arduino เพื่อทำการตรวจสอบการทำงานของแบตเตอรี่สำรองแสดงหน้าโปรแกรมและวงจร Arduino ในรูปที่ 4.45

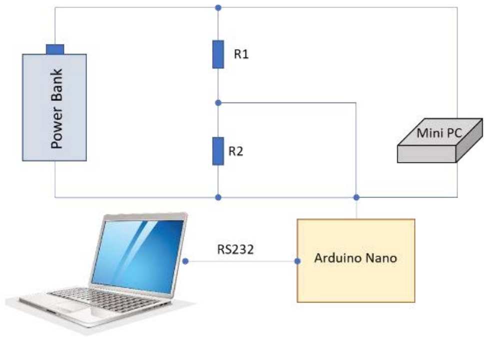


(ก) หน้าจอโปรแกรมตรวจสอบระดับแบตเตอรี่ (ข) วงจรตรวจสอบระดับแบตเตอรี่สำรอง

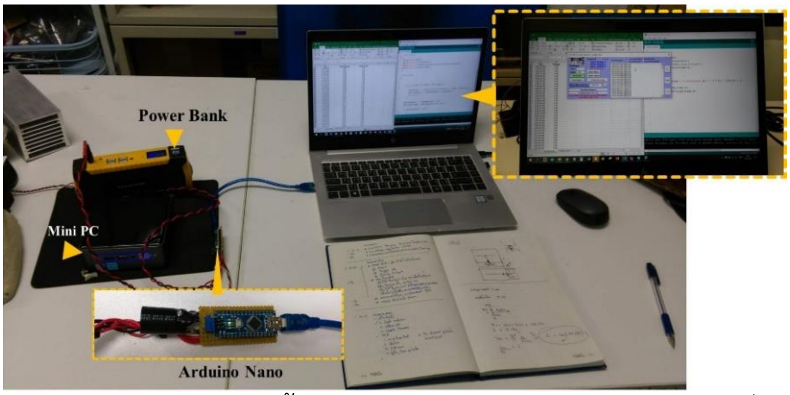
รูปที่ 4.45 ระบบตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรอง

ในการทดสอบผู้วิจัยมีแผนผังการทำงานของตรวจสอบระดับแรงดันดังรูปที่ 4.45(ก) และแสดงวิธีการติดตั้งการทดสอบการวัดระดับแบตเตอรี่ โดยผู้วิจัยทำการทดสอบการวัดระดับแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่สำรองจ่ายพลังงานให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 4.45(ข) จากการผลทดสอบการตรวจวัดระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรองแต่ละตัวในรูปที่ 4.46 พบว่า

แบตเตอรี่แต่ละตัวมีระดับแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอสามารถสังเกตได้ในกราฟ “**เส้นสีแดง**” ซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวไปแสดงผลให้กับผู้ปฏิบัติงานโดยตรง อาจส่งผลกระทบต่อการประเมินระยะเวลาในการเปลี่ยนแบตเตอรี่และเสถียรภาพการทำงานของแบตเตอรี่สำรอง ดังนั้นจึงต้องทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมให้ระดับการทำงานของแบตเตอรี่ให้มีแรงดันที่สม่ำเสมอก่อน โดยแบตเตอรี่แต่ละตัวจะถูกเขียนโปรแกรมควบคุมระดับการทำงานดังแสดงในกราฟ “**เส้นสีดำ**” จากนั้นจึงทำการแบ่งระดับแรงดันเพื่อนำไปแปลงเป็นระดับเปอร์เซ็นต์สำหรับการใช้งานแบตเตอรี่ต่อไป โดยระบบตรวจสอบระดับแบตเตอรี่จะถูกติดตั้งขึ้นไปกับโดรน และส่งค่าระดับเปอร์เซ็นต์การทำงานแสดงผลบนหน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบิน โดยแสดงตำแหน่งการแสดงผลดังรูปที่ 4.47

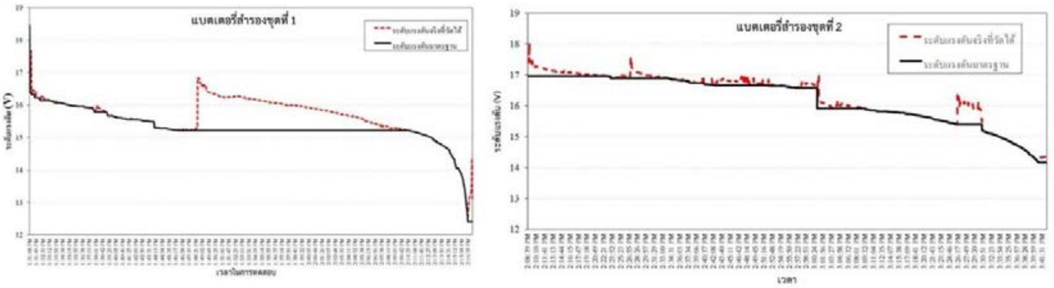


(ก) แผนผังการทำงานของตรวจสอบระดับแรงดัน

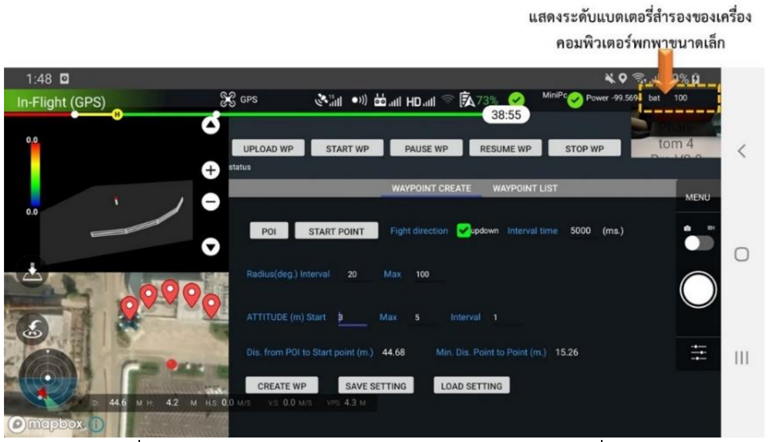


(ข) วิธีการติดตั้งการทดสอบการวัดระดับแรงดันแบตเตอรี่

รูปที่ 4.46 การทดสอบระบบการตรวจวัดระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรอง



รูปที่ 4.47 ผลการทดสอบการวัดระดับแรงดันของแบตเตอรี่สำรอง
สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก



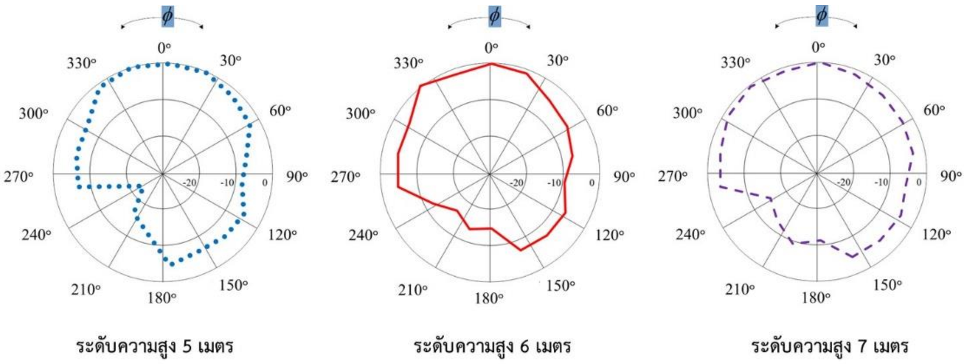
รูปที่ 4.48 หน้าจอแสดงระดับแรงดันแบตเตอรี่สำรอง

4.2.10. การทดลองโปรแกรมไฟล์ทการบินสำหรับระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้พัฒนา ปรับปรุง ร่วมกับสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง

ในการทดสอบระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองนั้น สายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงจำลองได้เลือกใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wave Length Dipole) มาตรฐาน รุ่น EMCO Model 3121 ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัวโดยระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นที่ชัดเจน ได้ตั้งแต่ระยะห่าง 2.99 เมตรเป็นต้นไป สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 ซึ่งในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้สายอากาศทั้งสองมีระยะห่าง 6 เมตร โดยกำหนดให้โดรนมีการบินในลักษณะเปลี่ยนระดับความสูง ณ องศาเดียวกัน โดยโดรนมีการเปลี่ยนระดับการบินตั้งแต่ความสูง 5 เมตร ถึง 7 เมตร และทำการบินเก็บข้อมูลทีละ 20 องศา นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าโดรนที่ทำการทดสอบบินอยู่ในตำแหน่งองศาที่ต้องการทำการทดสอบจริง ได้ทำการติดตั้งเลเซอร์พอยเตอร์ไว้กับตัวโดรน เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบกับจุดสังเกตองศาแสดงว่าโดรนยังอยู่ในพื้นที่ที่ต้องการทดสอบและอยู่ในตำแหน่งองศาที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในการบินของโดรนในการทดสอบในหัวข้อนี้ จะเป็นการบินโดรน

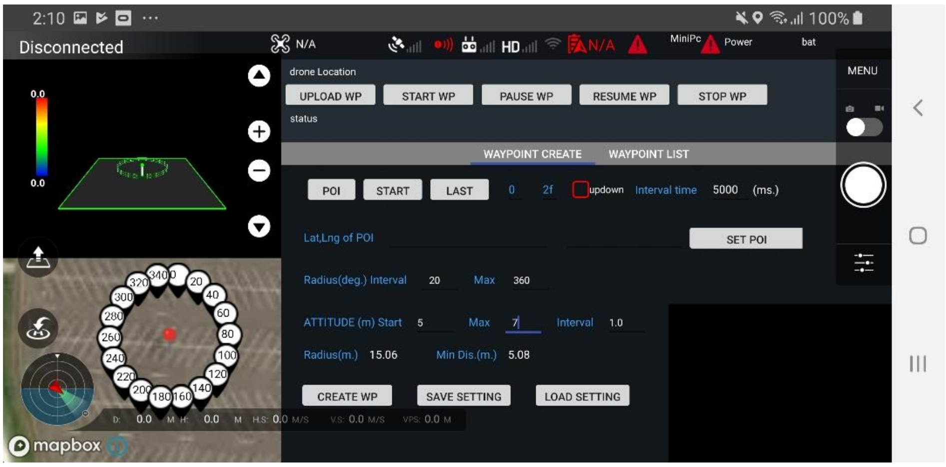
แบบอัตโนมัติที่ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินที่ปรับปรุงขึ้นแสดงภาพถ่ายการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศส่งสัญญาณจำลองที่ย่านความถี่ 100 MHz ในรูปที่ 4.49 โดยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินโดรนจะทำการเก็บข้อมูลความแรงของกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัม และแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.50

รูปที่ 4.49 การทดลองโปรแกรมไฟล์ทการบินสำหรับระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้พัฒนา ปรับปรุง ร่วมกับสายอากาศส่งวิทยุกระจายเสียงจำลอง



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล

จากรูปที่ 4.50 แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลสถานีฐานจำลอง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบคล้ายรอบตัว และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในหัวข้อที่ 2.3.6 พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่สอดคล้องกันในช่วงองศาที่ 180 องศา ถึง 260 องศา โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงองศาดังกล่าวในการทดสอบในหัวข้อนี้ มีการสะท้อนของแบบรูปการแพร่กระจายเข้าไปด้านใน เมื่อวิเคราะห์หาสาเหตุความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ พบว่า ณ ช่วงองศาที่สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสะท้อนเข้ามาด้านในเป็นตำแหน่งองศาที่มีรถยนต์จอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ทำการทดสอบ จึงส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีระดับความสูงที่เพิ่มมากขึ้น สามารถสังเกตพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ณ องศาดังกล่าวมีการสะท้อนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลดลง ในส่วนของโปรแกรมควบคุมการไฟล์ทการบินของโดรน (เวอร์ชั่น 2) โปรแกรมสามารถทำการควบคุมให้โดรนทำการบินได้ตามคำสั่ง และทำการเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติ โดยแสดงภาพถ่ายหน้าโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินและการทดสอบไฟล์ทการบินโดรนตามคำสั่งของโปรแกรมดังรูปที่ 4.51



(ก) หน้าจอโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบิน

รูปที่ 4.51 ควบคุมการบินโดรนเปลี่ยนตำแหน่งไปยังองศาต่างๆ

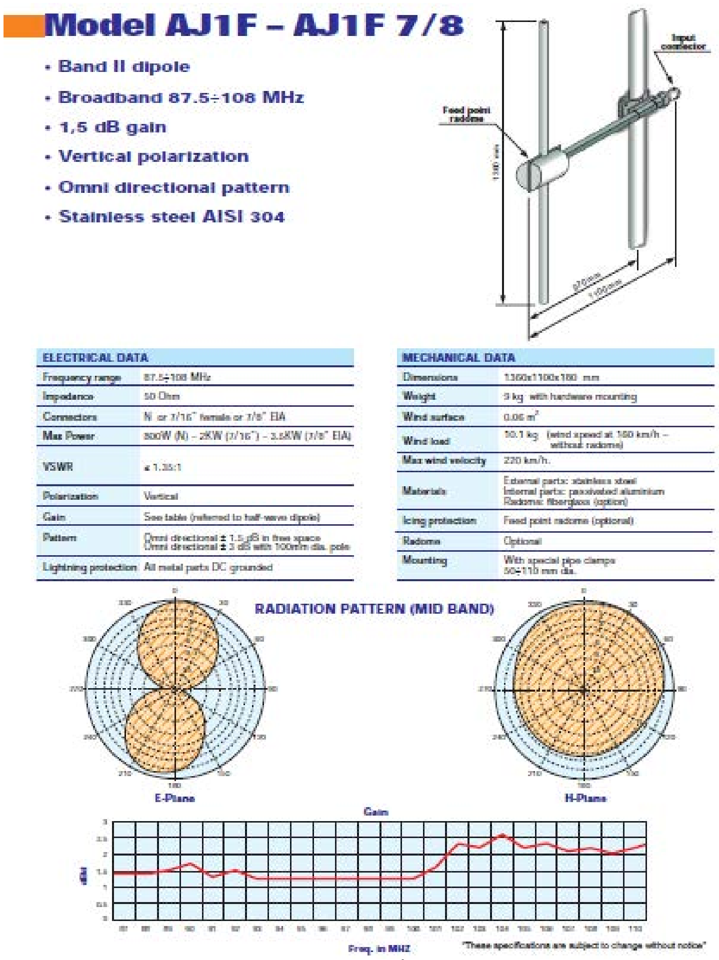
รูปที่ 4.52 ควบคุมการบินโดรนโดยปรับระดับความสูงต่าง ๆ

4.2.11. การทดสอบระบบการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณสถานีวิทยุกระจายเสียง

หัวข้อนี้นำเสนอการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณสถานีวิทยุกระจายเสียงด้วยอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนที่ได้วิจัยและพัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบ ณ สถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 4.53 โดยเสาส่งสัญญาณวิทยุกระจายติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ 8 เบย์ ความสูง 60 เมตร กำลังงาน 500 วัตต์ และมีการแพร่กระจายคลื่นความถี่ 99.5 MHz

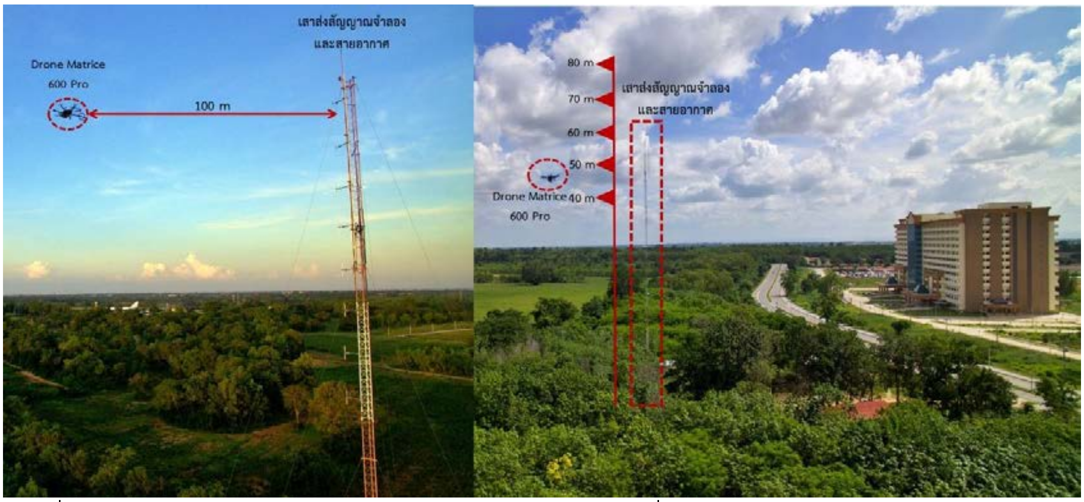
รูปที่ 4.53 สถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ทำการทดสอบ

โดยสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ของบริษัท R.V.R. โมเดล ACP0 [42] โดยสายอากาศดังกล่าวสามารถทำงานครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 87.5 MHz ถึง 108 MHz โพลาไรซ์วงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวแสดงดังรูปที่ 4.54 อย่างไรก็ตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่นำเสนอใน Data Sheet เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่วัดจากสายอากาศเพียงต้นเดียว ยังไม่มีการนำเสนอแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อนำสายอากาศดังกล่าวมาทำการเชื่อมต่อแบบแถวลำดับ (Array Antenna) และยังไม่มีการนำเสนอผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อนำสายอากาศติดตั้งบนเสาส่งสัญญาณ



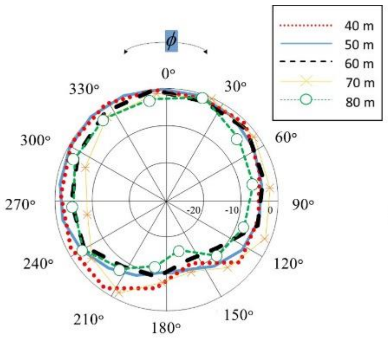
รูปที่ 4.54 คุณสมบัติของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยผู้ปฏิบัติงานจะใช้โปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินในการกำหนดรูปแบบการบิน โดยผู้ปฏิบัติงานจะกำหนดที่ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีส่งจากสัญญาณด้วยตำแหน่งจีพีเอส จากนั้นทำการสร้างเส้นทางการบิน (Way Point) และกำหนดองศาที่ต้องการทำการทดสอบด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนมือถือ Smart Phone ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยวิธีการการตั้งค่าสามารถดำเนินการได้ตามหัวข้อที่ 4.2.8 ในการทดสอบสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนโดรนและสายอากาศของสถานีฐานมีระยะห่าง 100 เมตร โดยโดรนที่ถูกทำการทดสอบทำการบินวนรอบสายอากาศของสถานีฐานทีละ 20 องศา ในขณะที่โดรนบินในระดับความสูงต่างๆ ตั้งแต่ 40 เมตร ถึง 80 เมตร เพื่อบันทึกค่าความแรงสัญญาณในแต่ละองศารอบสายอากาศ ซึ่งโดรนจะทำการบินและเก็บข้อมูลอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 4.55

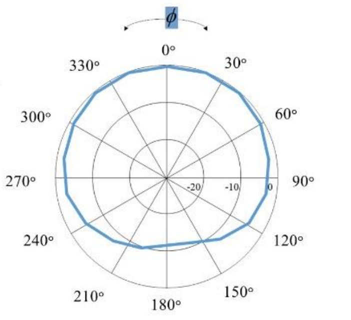


รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

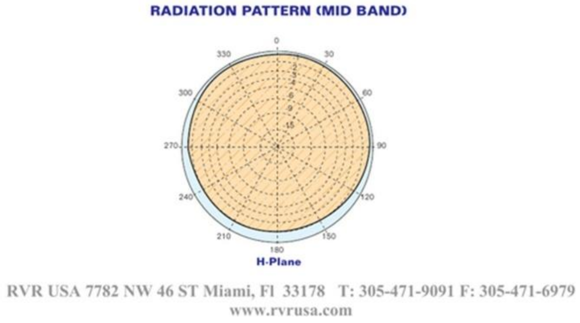
จากการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง พบว่าโปรแกรมที่ได้วิจัยและพัฒนาขึ้นสามารถทำการเก็บข้อมูลความแรงสัญญาณและสามารถบินได้ตามข้อกำหนดของโปรแกรม โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว ซึ่งสอดคล้องกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากทางผู้ผลิต แสดงดังรูปที่ 4.56 โดยสายอากาศส่งสัญญาณสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half–Power Beamwidth : HPBW) 160 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to Back Ratio) 10 dB



ผลการทดสอบ ณ ระดับความสูง 40-80 เมตร
(สายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง)



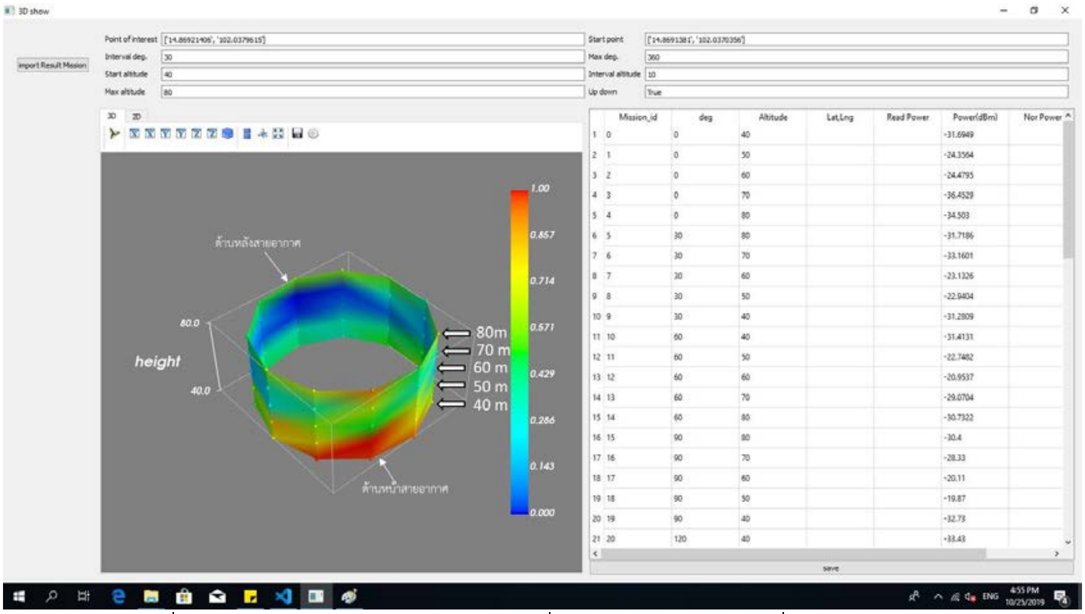
ผลการทดสอบ ณ ความสูง 50 เมตร
(ตำแหน่งตรงกลางของสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง)



แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมาตรฐานตามผู้ผลิต

รูปที่ 4.56 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นอกจากนี้โปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียงมาพล็อตกราฟ 3 มิติ โดยกราฟ 3 มิติดังกล่าว สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าความแรงที่มีการแพร่กระจายคลื่นในระดับความสูงต่างๆ เป็นอย่างไร และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการหรือไม่ โดยแสดงกราฟ 3 มิติที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 4.57 ซึ่งสังเกตพบว่าที่ระดับความสูง 40 เมตร ถึง 60 เมตร สายอากาศมีความแรงที่มีการแพร่กระจายคลื่นออกมา แต่เมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 70 เมตร ถึง 80 เมตร ซึ่งสูงเกินระดับความสูงของสายอากาศที่ติดตั้งบนเสาส่งสถานีฐานไม่พบความแรงการแพร่กระจายคลื่นออกมาจากสายอากาศส่งสัญญาณ กล่าวได้ว่าสายอากาศ ณ สถานีฐานวิทยุกระจายเสียงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีการติดตั้งที่ตรงตามมาตรฐาน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่รบกวนต่อการทำงานระบบอื่น



รูปที่ 4.57กราฟ 3 มิติแสดงความแรงที่มีการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

4.2.12. สรุปงานวิจัย

สำหรับการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยใช้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่สถานีฐานว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอย่างไร มีทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นแบบใด และสายอากาศมีแนวโน้มในการแพร่กระจายคลื่นที่จะสามารถรบกวนการทำงานของระบบอื่นหรือไม่ โดยในการวิจัยและพัฒนา ทีมวิจัยได้ทำการออกแบบระบบเพื่อติดตั้งขึ้นไปกับโดรนเพื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ติดตั้งขึ้นไปกับโดรน เนื่องจากน้ำหนักของอุปกรณ์มีผลต่อระยะเวลาการบินของโดรน จากการทดสอบพบว่าเมื่อโดรนถูกติดตั้งด้วยอุปกรณ์โดรนมีระยะเวลาในการบินประมาณ 15 นาที จากนั้นทีมวิจัยได้ทำการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนและเก็บข้อมูลอัตโนมัติในขณะทำการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ณ สถานีวิทยุกระจายเสียง

จากการทดสอบพบว่าระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยใช้โดรนที่ถูกวิจัยและพัฒนา สามารถทำงานได้โดยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนและระบบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำงานได้ตามความต้องการของผู้ปฏิบัติงาน โดรนสามารถเคลื่อนที่ไปยังมุมองศาและระดับความสูง รวมถึงทำการเก็บข้อมูลอัตโนมัติ รวมถึงสามารถแสดงผลการทดสอบในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงความแรงในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ ทำให้สังเกตุการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมีการเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ CSV เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานนำข้อมูลไปใช้ในการพล็อตกราฟ 2 มิติ หรือใช้ในงานอื่นๆ โดยโปรแกรมที่วิจัยและพัฒนา มีการทำงานบน

ระบบปฏิบัติการ Android บนมือ นอกจากนี้จากผลการทดสอบสถานีวิทยุกระจายเสียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าสถานีดังกล่าวมีการติดตั้งสายอากาศที่ตรงตามมาตรฐาน และไม่มีการแพร่กระจายคลื่นรบกวนต่อการทำงานระบบอื่น

4.3 ผลการดำเนินงานระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)

ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) ของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำหน้าที่ตรวจสอบการแพร่กระจายคลื่นสำหรับสถานีวิทยุที่ได้รับอนุญาตและทำการออกอากาศไปแล้ว โดยจะติดตั้งที่สถานีวิทยุเพื่อตรวจสอบว่าสถานีดังกล่าวมีสัญญาณที่จะไปรบกวนวิทยุการบินหรือไม่ หากมีสัญญาณแปลกปลอมใดๆ ที่เกิดจากสถานี จะแสดงความถี่และความแรงของสัญญาณรบกวนนั้นที่หน้าจอ LCD ของอุปกรณ์โดยทันที

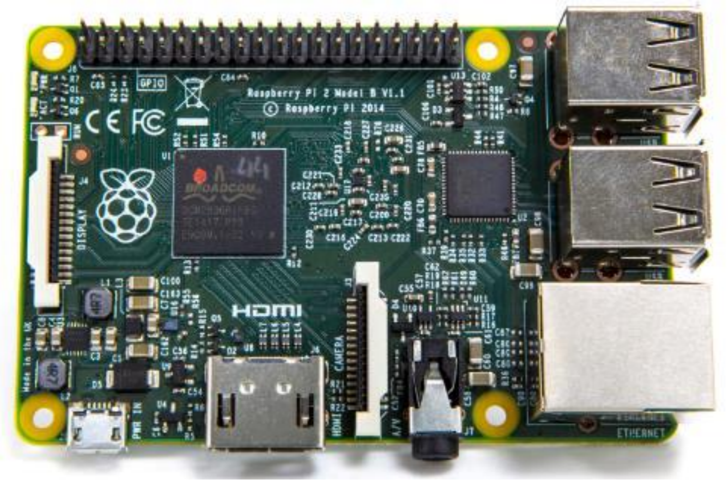
4.3.1. องค์ประกอบของอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวน

อุปกรณ์มีส่วนประมวลผลหลักคือ บอร์ด Raspberry Pi และมีอุปกรณ์รับสัญญาณคือ DVB-T+DAB+FM ที่สามารถรับสัญญาณวิทยุ FM และสัญญาณวิทยุการบินได้ในตัวเดียวกัน ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์มีดังนี้

รูปที่ 4.58 อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวัง

- **บอร์ด Raspberry Pi**

บอร์ด Raspberry Pi คือ บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถเชื่อมต่อกับจอมอนิเตอร์ คีย์บอร์ด และเมาส์ได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำโครงงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ การเขียนโปรแกรม หรือเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะขนาดเล็ก ไม่ว่าจะเป็นการทำงาน Spreadsheet Word Processing ท่องอินเทอร์เน็ต ส่งอีเมล หรือเล่นเกมส์ อีกทั้งยังสามารถเล่นไฟล์วีดีโอความละเอียดสูง (High-Definition) ได้อีกด้วยบอร์ด Raspberry Pi รองรับระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux Operating System) ได้หลายระบบ เช่น Raspbian (Debian) Pidora (Fedora) และ Arch Linux เป็นต้น โดยติดตั้งบน SD Card บอร์ด Raspberry Pi นี้ถูกออกแบบมาให้มี CPU GPU และ RAM อยู่ภายในชิปเดียวกัน มีจุดเชื่อมต่อ GPIO ให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.59 บอร์ด Raspberry Pi Model B

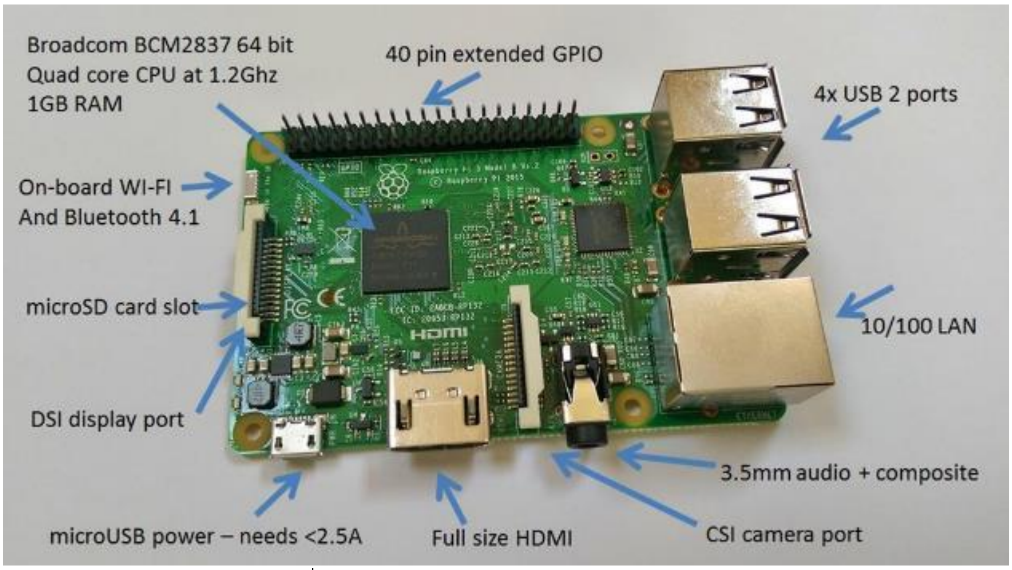
- **คุณสมบัติทางเทคนิคของบอร์ด Raspberry Pi**

บอร์ด Raspberry Pi ปัจจุบันมีด้วยกัน 2 โมเดล คือ โมเดล A และ โมเดล B ซึ่งทั้ง 2 โมเดลมีคุณสมบัติทางเทคนิคที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงบางส่วน รายละเอียดดังตาราง

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางเทคนิคของบอร์ด Raspberry Pi

	โมเดล A	โมเดล B (Revision 2)
System on a chip (SoC)	Broadcom BCM2835 (CPU, GPU, DSP, SDRAMandSingle USB Port)	
CPU	900MHz ARM1176JZF-S core (ARM11 family, ARMv6 instruction set)	
GPU	Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz OpenGL ES 2.0 (24 GFLOPS)	

	โมเดล A	โมเดล B (Revision 2)
	MPEG-2 and VC-1, 1080p 30 h.264/MPEG-4 AVC high-profile decoder andencoder	
Memory (SDRAM)	256 MB (Shared with GPU)	512 MB (Shared with GPU)
USB 2.0 Ports	1(direct form BCM2835)	2 (via the build in integrated 3-port USB hub)
Video Input	A CSI input connector allows for the connection of RPF designed camera module (ออกแบบมาให้เชื่อมต่อกับ Raspberry Pi Camera Module โดยเฉพาะ)	
Video Outputs	Composite RCA (PAL and NTSC), HDMI (rev 1.3 & 1.4), raw LCD Panels via DSI 14 HDMI resolutions from 640x350 to 1920x1200 plus various PAL and NTSC standards. (มีทั้งสองแบบ คือ แบบ RCA และแบบ HDMI)	
Audio Outputs	3.5 mm jack, HDMI, and as of revision 2 boards, I^2S audio (also potentially for audio input)	
Onboard storage	SD/ MMC/ SDIO card slot (3.3V card power support only)	
Onboard network	None	10/100 Ethernet (8P8C) USB adapter on the third port of the USB hub
Low-level peripheralsLow-level peripherals	8 x GPIO, UART, I^2C Bus, SPI Bus with two chip selects, I^2S audio +3.3V, +5V, Ground	
Power ratings	300 mA (1.5 W)	700 mA (3.5 W)
Power source	5 Volt via Micro USB or GPIO header	
Size	85.60 mm x 53. Mm (3.370 inch x 2.125 inch)	
Weight	45 g. (1.6 oz.)	

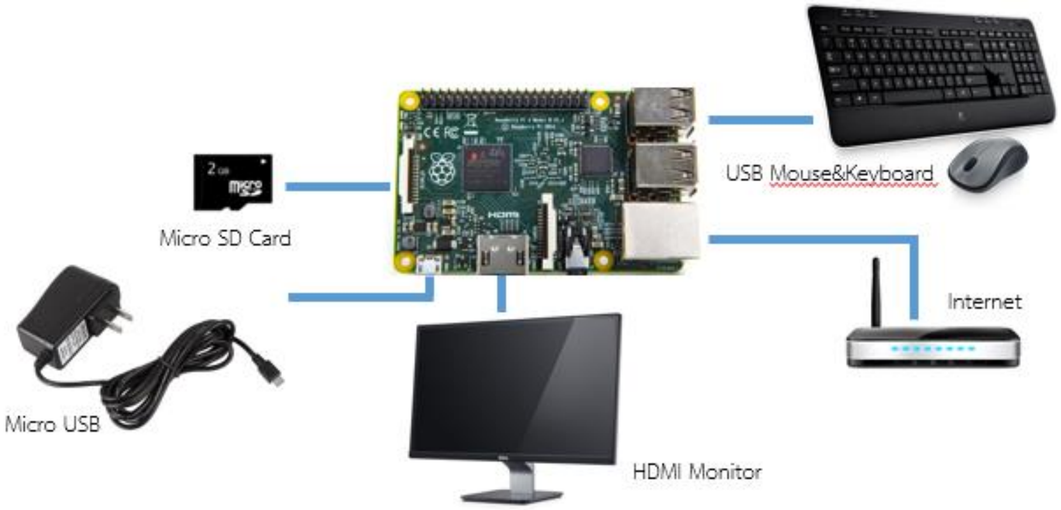


รูปที่ 4.60 ส่วนประกอบของ Raspberry Pi

อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเริ่มต้นกับ Raspberry Pi เป็นครั้งแรก จำเป็นต้องมีเริ่มต้นอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- USB Power Adapter (5V, 1A)
- สาย Micro USB
- Micro SD Card (อย่างน้อย 4 GB, Class 4)
- สาย HDMI
- สาย Ethernet หรือ WIFI USB dongle
- หน้าจอที่พอร์ต HDMI
- USB Mouse, USB Keyboard
- คอมพิวเตอร์
- Card Reader หรือ SD card Adapter

- **การเปิดใช้งาน Raspberry Pi**

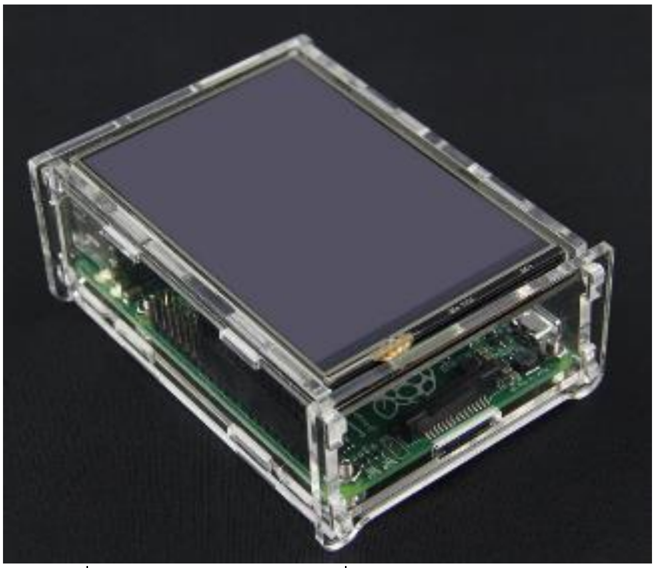


รูปที่ 4.61 อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเริ่มต้นกับ Raspberry Pi

หลังจากที่เราได้ทำการลงระบบปฏิบัติการลง Micro SD card แล้ว เราก็มาทำขั้นตอนในการเปิดใช้งาน Raspberry Pi กัน ด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ใส่ Micro SD card เข้าไปที่ช่องใส่ ที่ Raspberry Pi (ด้านหลัง)
- เสียบ USB Mouse, USB Keyboard
- เสียบสาย Ethernet หรือ WIFI USB dongle
- เสียบสาย HDMI ให้ Raspberry Pi กับหน้าจอ
- เสียบสาย Micro USB เข้ากับ USB Power Adapter และทำการจ่ายไฟ

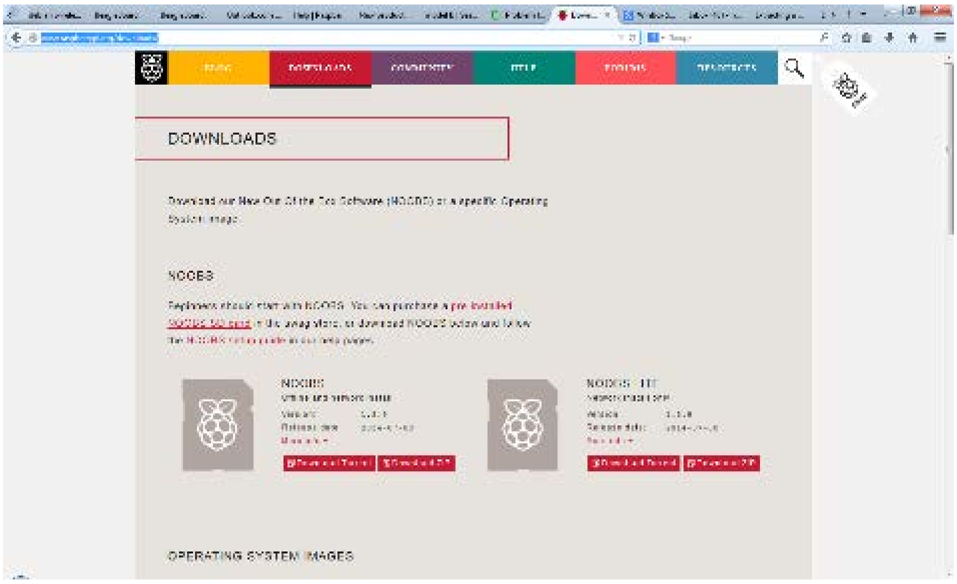
หรือหากต้องการใช้งานนอกสถานที่ก็สามารถใช้งาน LCD ที่สามารถต่อเข้ากับ Raspberry Pi ได้ ซึ่งจะสะดวกต่อการนำไปใช้งานเป็นอย่างมาก LCD Screens ที่ต่ออยู่กับ Raspberry Pi จะแสดงดังภาพ



รูปที่ 4.62 LCD Screens ที่ต่ออยู่กับ Raspberry Pi

สามารถดาวน์โหลดระบบปฏิบัติการได้ที่

http://www.raspberrypi.org/downloads/



รูปที่ 4.63 หน้าเว็ปไซด์ดาวน์โหลดซอฟท์แวร์ระบบปฏิบัติการของ Raspberry Pi

- **ตัวรับสัญญาณวิทยุ**

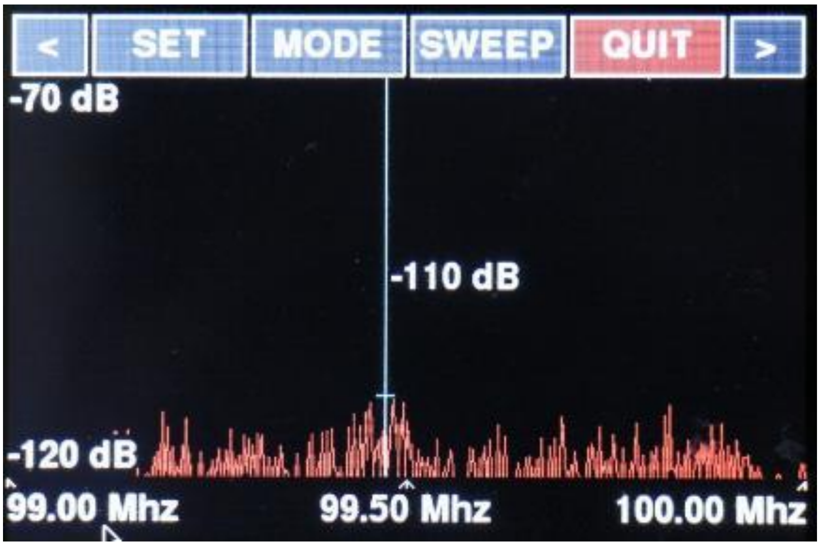
ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุ คือ DAB+FM+DVB-T ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ดูทีวีดิจิตอล ในระบบ DVB-T อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้รับสัญญาณวิทยุผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ภายในตัวอุปกรณ์จะถูกประมวลผลสัญญาณด้วยระบบ Software Defined Radio หรือ SDR ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปแบบการรับสัญญาณคลื่นวิทยุได้ด้วยการตั้งค่าโปรแกรม โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณชุดเดียวกัน คุณสมบัติของอุปกรณ์ DAB+FM+DVB-T มีดังนี้

1. เชื่อมต่อโดยพอร์ต USB 2.0 ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้
2. สามารถรับ DVB-T SDR+DAB+FM HDTV TV และ Tuner Receiver
3. รองรับความถี่ 25MHz-1700MHz
4. Bandwidth ในการรับสัญญาณ 2 MHz
5. รองรับการ Modulate แบบ AM, FM, SSB, CW, DATA, ADSB และ DMR

รูปที่ 4.64 อุปกรณ์รับสัญญาณ DVB-T SDR+DAB+FM

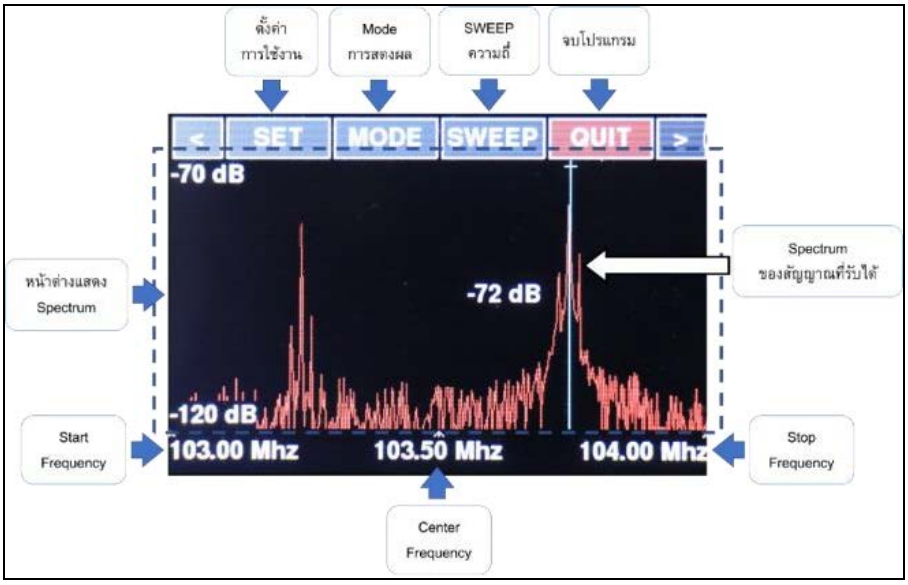
- **การใช้งานอุปกรณ์**

อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนวิทยุการบินมีขนาดกระทัดรัด ติดตั้งและใช้งานง่าย เมื่อเปิดอุปกรณ์และรอจนกว่าอุปกรณ์จะพร้อมใช้งาน ซึ่งจะพบหน้าต่างโปรแกรมที่แสดงการทำงานต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 4.65 หน้าจอแสดงผลของอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนวิทยุการบิน

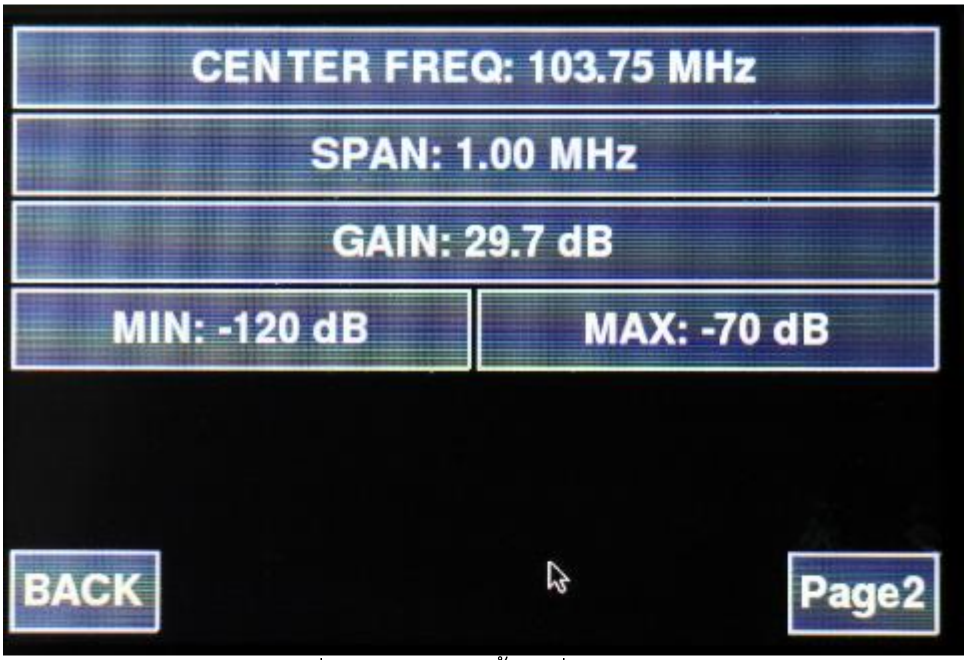
เมื่ออุปกรณ์พร้อมใช้งานที่หน้าจอ LCD จะแสดง Spectrum ของสัญญาณที่รับได้ โดยความแรงของสัญญาณจะปรากฏที่หน้าจอ LCD ด้วย นอกจากนั้นที่หน้าจอของอุปกรณ์ยังสามารถเลือกการตั้งค่าการใช้งาน เปลี่ยนการแสดงผลเป็นโหมดอื่น สแกนหาความถี่ เป็นต้น



รูปที่ 4.66 ส่วนประกอบของหน้าจอแสดงผล

หากต้องการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ก็สามารถทำได้โดยการคลิกเข้าไปที่ปุ่ม SET โดยเมื่อเข้าไปแล้วจะประกอบด้วย 2 หน้า ได้แก่ หน้าการตั้งค่าที่ 1 (Page1) จะแสดงการตั้งค่าหน้าจอแสดงผล ซึ่งสามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ดังนี้

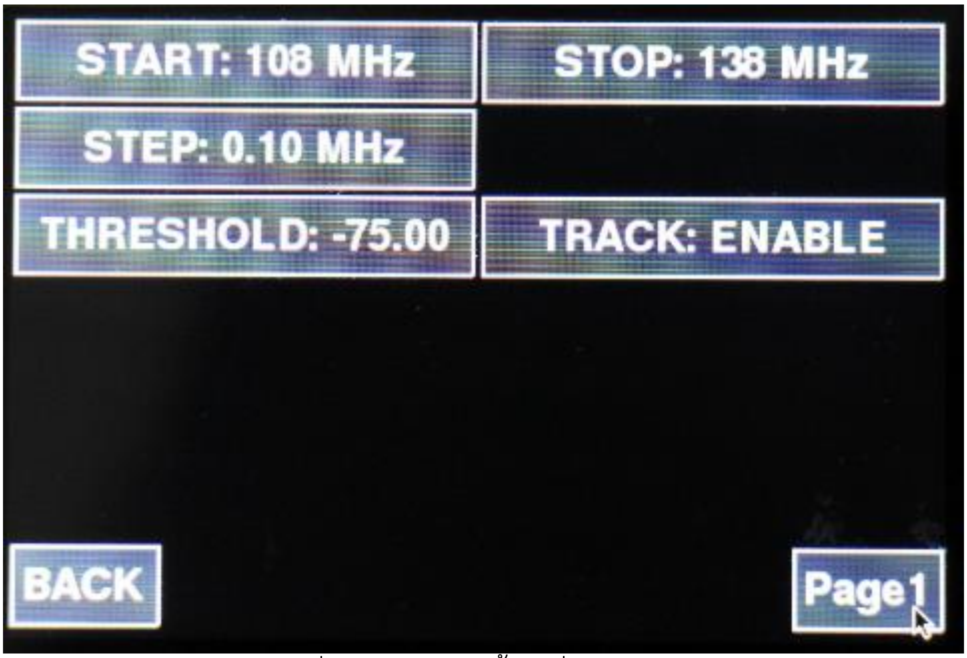
- CENTER FREQUENCY คือ ความถี่กลางที่ต้องการวัด ตั้งความถี่ได้ตั้งแต่ 25 MHz ถึง 1.7 GHz
- SPAN คือ ช่วงความถี่ที่แสดงบนหน้าจอ สามารถแสดงช่วงความถี่ได้สูงสุด 2 MHz
- GAIN คือ อัตราขยายสัญญาณ
- MAX คือ กำหนดให้ความแรงของสัญญาณที่ขอบบนสุดของหน้าจอมีค่าเท่ากับ MAX
- MIN คือ กำหนดให้ความแรงของสัญญาณที่ขอบล่างสุดของหน้าจอมีค่าเท่ากับ MIN



รูปที่ 4.67 หน้าการตั้งค่าที่ 1 (Page1)

หน้าการตั้งค่าที่ 2 (Page2) จะแสดงการตั้งค่าการสแกนหาความถี่แปลกปลอม โดยสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- START คือ ความถี่เริ่มต้นในการสแกนหาความถี่แปลกปลอม
- STOP คือ ความถี่สุดท้ายในการสแกนหาความถี่แปลกปลอม
- STEP คือ ความละเอียดในการสแกน
- THRESHOLD คือ ค่าขีดจำกัดของความแรงสัญญาณที่รับได้ อุปกรณ์จะหยุดเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้เกิน THRESHOLD
- TRACK คือ เปิด-ปิด ฟังก์ชัน แสดงความถี่ที่มีความแรงสูงสุดในหน้าจอแสดงผลในขณะนั้น



รูปที่ 4.68 หน้าการตั้งค่าที่ 2 (Page2)

- **การใช้งานและการทดสอบ**

การใช้งานอุปกรณ์ให้ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์รับสัญญาณ (DVB-T+DAB+FM) เข้าที่พอร์ต USB ของบอร์ด Raspberry Pi จากนั้นต่อแหล่งจ่ายไฟ 5VDC และเปิดอุปกรณ์ จะเห็นข้อความแสดงที่หน้าจอดังภาพ รอจนกว่าระบบจะดำเนินการเสร็จสิ้น และปรากฏหน้าต่าง Spectrum ขึ้นมา

รูปที่ 4.69 หน้าจอแสดงผลเริ่มต้นเมื่อเปิดอุปกรณ์

ทางผู้วิจัยได้ทดลองรับสัญญาณจากสถานีวิทยุ FM ที่ความถี่ 103.25 MHz เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ก่อนนำไปหาสัญญาณรบกวน ผลการทดสอบแสดงดังรูป ที่หน้าจอ Spectrum จะแสดงความถี่ 103.25 MHz มีความแรง –83dBm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สามารถรับสัญญาณและนำมาแสดงที่หน้าจอได้

รูปที่ 4.70 การตั้งค่าอุปกรณ์ก่อนทำการรับสัญญาณวิทยุ FM ความถี่ 103.25 MHz

รูปที่ 4.71 หน้าจอแสดงผลความถี่ 103.25 MHz ที่รับได้

จากนั้นได้ทดลองค้นหาสัญญาณรบกวนวิทยุการบิน โดยที่ตั้งค่าให้อุปกรณ์ค้นหาในย่านความถี่วิทยุการบิน (108 - 138 MHz) ตั้งค่า THRESHOLD ที่ -85 dBm ซึ่งผลการทดสอบพบความถี่แปลกปลอมที่ความถี่ 115.20 MHz มีความแรง -84 dBm

รูปที่ 4.72 หน้าจอแสดงผลการค้นหาสัญญาณรบกวนวิทยุการบิน
พบสัญญาณแปลกปลอมที่ความถี่ 115.2 MHz

จากการทดสอบแสดงเห็นว่าระบบ/อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับสัญญาณในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงระบบ FM และย่านวิทยุการบินได้ นอกจากนั้นยังสามารถค้นหาความถี่แปลกปลอมในย่านความถี่วิทยุการบิน สามารถแสดงความถี่และความแรงของสัญญาณแปลกปลอมที่ค้นหาเจอผ่านทางหน้าจอ LCD ได้

4.3.2. การกำหนดค่าความแรงสัญญาณและระยะเวลาในการวัดสำหรับการแจ้งเตือนเมื่อมีสัญญาณแปลกปลอม

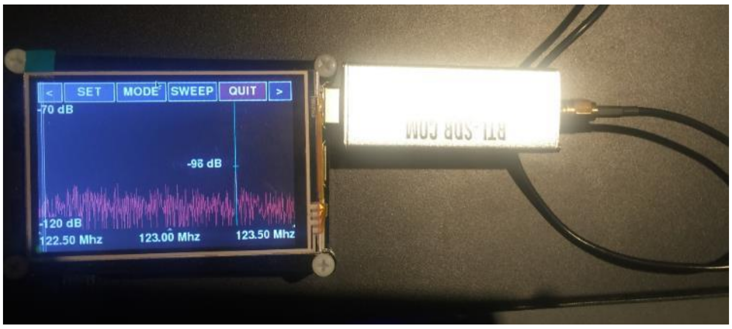
อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงได้มีการกำหนดค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำ (THRESHOLD) คือ -85 dBm และระยะเวลาในการตรวจสอบที่ 10 วินาที เป็นค่าเริ่มต้นของอปุกรณ์ (Default) หากมีสัญญาณแปลกปลอมที่มีความแรงมากกว่า -85 dBm และตรวจสอบพบอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 10 วินาที ระบบจะทำการแจ้งเตือนในทันที การกำหนดค่าดังกล่าวเป็นการกำหนดค่าจากทดลองใช้งานและตรวจสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐาน อีกทั้งระดับสัญญาณรบกวนต่ำที่สุด (Noise floor) ของอุปกรณ์รับสัญญาณ (DVB-T+DAB+FM) อยู่ที่ประมาณ -100 dBm ดังนั้นการกำหนดค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ -85 dBm ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับสัญญาณรบกวนต่ำที่สุดอยู่ 15 dB เป็นการกำหนดค่าความแรงที่เหมาะสม ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำได้ ซึ่งควรจะต้องกำหนดค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ให้มีค่ามากว่าระดับสัญญาณรบกวนต่ำที่สุดประมาณ 15 dB

การกำหนดระยะเวลาในการตรวจสอบ เป็นวิธีการวิเคราะห์และตรวจสอบสัญญาณที่รับได้ว่าเป็นสัญญาณของการสื่อสารในยย่านความถี่วิทยุการบินจริงหรือเป็นสัญญาณแพร่แปลกปลอมที่เกิดขึ้นจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสื่อสารระหว่างหอบังคับการบินกับนักบินจะมีการสื่อสารเป็นข้อความเสียงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ความยาวไม่เกิน 10 วินาที ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่อุปกรณ์จะสามารถตรวจพบความถี่ที่กำลังสื่อสารอยู่ในขณะนั้น แต่หากเป็นสัญญาณแพร่แปลกปลอมที่ออกจากสถานีวิทยุ จะมีการแพร่สัญญาณออกมาตลอดเวลา ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ใช้ระยะเวลาที่ตรวจพบสัญญาณเป็นตัวพิจารณาสัญญาณรบกวนที่อุปกรณ์รับได้ โดยที่หากมีการตรวจพบสัญญาณเป็นเวลามากกว่า 10 วินาที จึงจะถือว่าสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะได้ทำการแจ้งเตือนให้ผู้เกี่ยวข้องได้รับทราบต่อไป

4.3.3. ผลการทดสอบระบบการวัดและเฝ้าระวัง

จากผลการทดสอบระบบ/อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงในห้องปฏิบัติการซึ่งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นทางทางผู้วิจัยจึงได้นำอุปกรณ์ดังกล่าวไปทดสอบการทำงานจริงที่สถานีวิทยุจำนวนทั้งหมด 10 สถานี เพื่อเก็บข้อมูลและดูประสิทธิภาพการทำงานในสถานการณ์จริง โดยผลการติดตั้งและทดสอบระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวัง(Measuring and Monitoring System) สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอม(Spurious Emission) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง จำนวนทั้งหมด 10 สถานีมีดังต่อไปนี้

- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ FM 98.750 MHz (รหัสสถานี 11520072) จังหวัดสงขลา พิกัด Lat 7.034993 Long 100.503744**



- **สถานีวิทยุกระจายเสียง มทร. ศรีวิชัย FM 97.500 MHz (รหัสสถานี 11520082) จังหวัดสงขลา พิกัด Lat 7.200475 Long 100.600200**

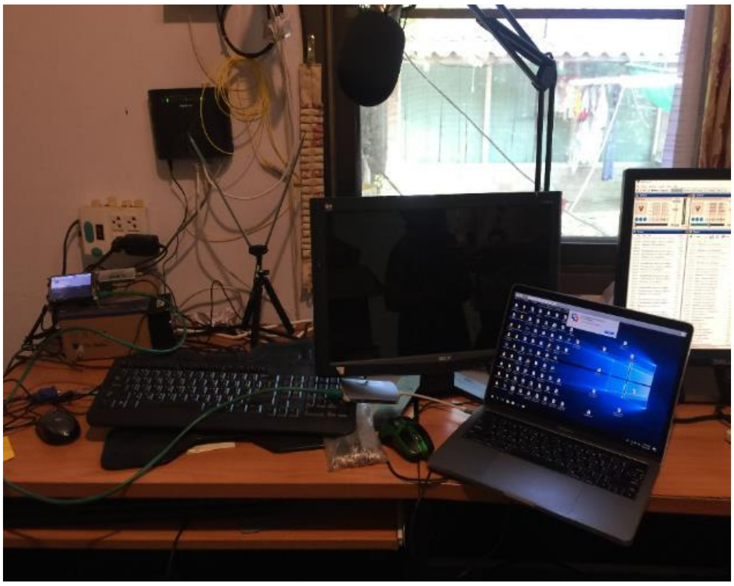
- **สถานีวิทยุกระจายเสียงคริสเตียนอุดรธานี FM 100.000 MHz (รหัสสถานี 06520036) จังหวัดอุดรธานี พิกัด Lat 17.481073 Long 102.79748**

- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวัดโพธิ์ชัยศรี FM 101.750 MHz (รหัสสถานี 06520090) จังหวัดอุดรธานี พิกัด Lat 17.680008 Long 102.424883**

06:54
Interference monitor (20)
Fm 101.75mhz แม่ชี วัดโพธิ์ชัยศรี บ้านเผือ joined the group.
LINE Notify
RTLSDR:
Frequency
135.399999987
Amplitude
-44.5288894145
For 10 Sec
FM 101.75 MHz
วัดโพธิ์ชัยศรี
จ.อุดรธานี
LATITUDE:
17.68008
LONGITUDE:
102.424883
รหัสสถานี:
06520090
17:13

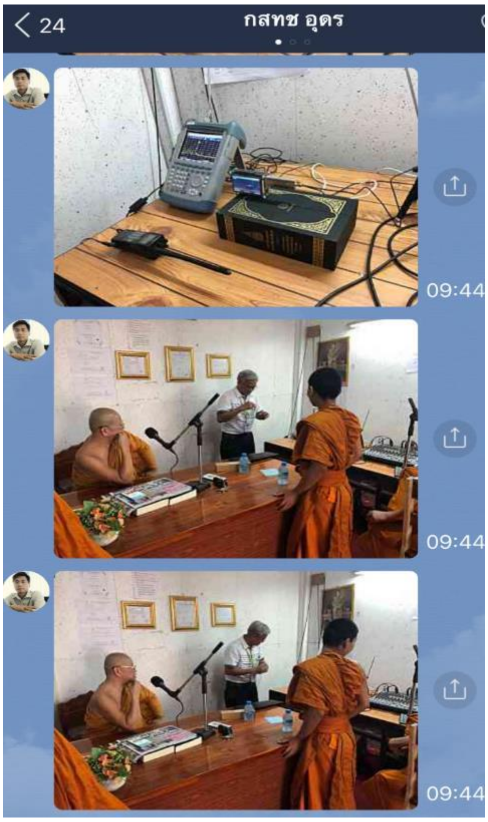
กสทช.

- **สถานีวิทยุกระจายสมัชชามวลชนตอง ๘ เรดิโอ FM 96.750 MHz (รหัสสถานี 04520026) จังหวัดหนองบัวลำภู พิกัด Lat 16.972014 Long 102.266376**



- **สถานีวิทยุกระจายเสียงเพื่อความมั่นคงภายในราชอาณาจักร FM 88.500MHz (รหัสสถานี 04520043) จังหวัดหนองบัวลำภู พิกัด Lat 17.367056 Long 102.26892**

- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวัดพระธาตุราษฎร์บำรุง FM 106.250 MHz (รหัสสถานี 06520252) จังหวัดหนองคาย พิกัด Lat 17.841009 Long 102.751655**



- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวัดโพธิ์ชัย FM 97.750 MHz (รหัสสถานี 06520215) จังหวัดหนองคาย พิกัด Lat 17.884148 Long 102.757648**

- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวัดศรีอุดมวงศ์ FM 101.750 MHz (รหัสสถานี 0619135127) จังหวัดเลย พิกัด Lat 17.306715 Long 101.771550**

- **สถานีวิทยุกระจายเสียงวิทยาลัยเทคนิคเลย FM 107.250 MHz (รหัสสถานี 04520318) จังหวัดเลย พิกัด Lat 17.473501 Long 101.729561**

4.4 ผลการดำเนินงานระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)

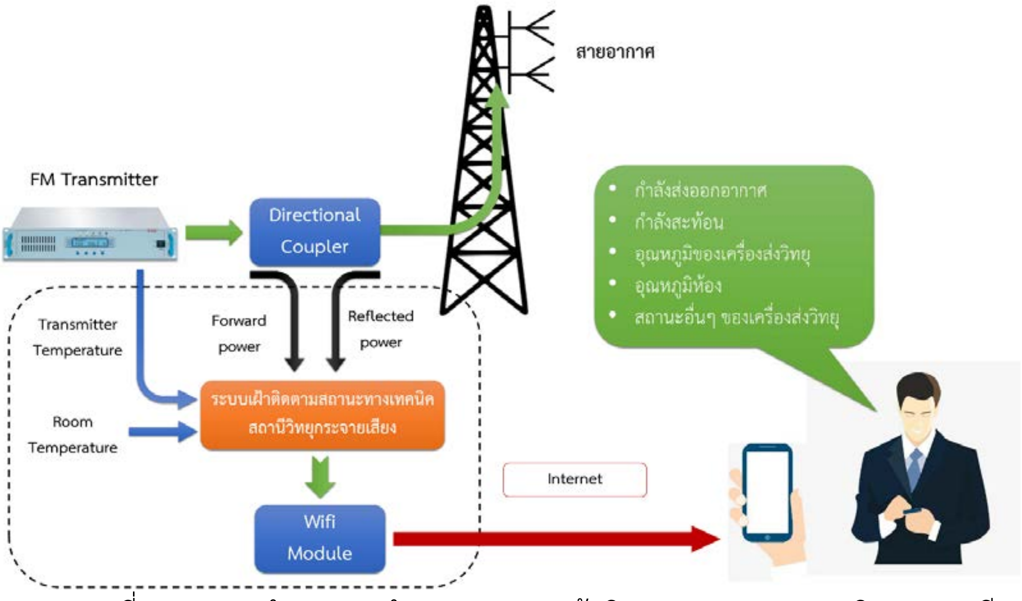
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาอุปกรณ์พร้อมนำมาทดสอบใช้งานกับระบบการออกอากาศ ซึ่งจะเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อตรวจสอบสถานะของสายส่ง สภาพแวดล้อมภายในสถานีส่ง พารามิเตอร์ที่จะทำการเฝ้าติดตามได้แก่ กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) และอุณหภูมิของห้อง (room temp) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะบงชี้ว่าเครื่องส่งทำงานในสภาพแวดล้อมที่ปกติหรือไม่ มีระบบส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านระบบอินเตอร์เน็ต และหากมีความผิดปกติกับเครื่องส่งวิทยุเกิดขึ้นจะมีรายงานให้ผู้เกี่ยวข้องทราบทันที จะได้รีบทำการแก้ไขก่อนที่ตัวเครื่องจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพ อันเป็นต้นเหตุของการแพร่แปลกปลอม นอกจากนี้อุปกรณ์ยังสามารถสั่งการเปิด-ปิดเครื่องส่งวิทยุผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้ตามที่ต้องการ ด้วยอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงทำให้เครื่องส่งมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น สามารถตรวจสอบและดูแลเครื่องส่งวิทยุได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น และลดการรบกวนวิทยุการบินที่อาจจะเกิดขณะที่เครื่องส่งไม่ปกติ

4.4.1. ออกแบบระบบการออกอากาศ

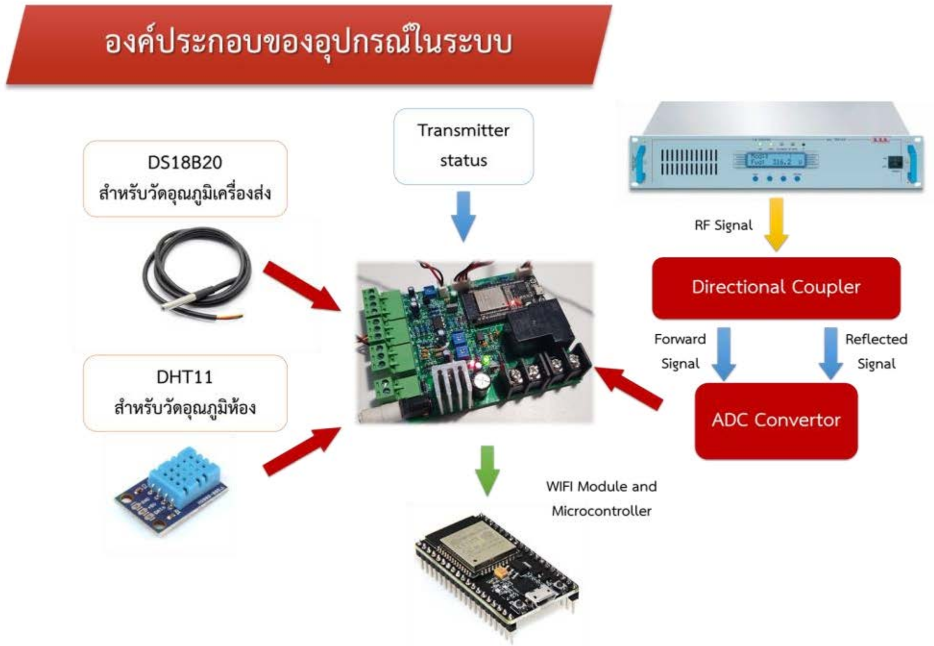
ส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง (Internet of Things) โดยระบบสามารถทำการเฝ้าติดตาม กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) อุณหภูมิของห้อง (room temp) และสถานะการทำงานของเครื่อง (transmitter status) พร้อมทั้งส่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาแสดงกับผู้ใช้งานได้ อีกทั้งยังสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเกินหรือต่ำกว่าที่กำหนด

Voltage Standing Wave Ration หรือ VSWR เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจและเฝ้าติดตามของเครื่องส่งวิทยุ VSWR นั้นเป็นอัตราส่วนของแรงดันของความสูญเสียระหว่าง กำลังส่งออกอากาศที่ส่งออกไปเปรียบเทียบกับกำลังสะท้อนกลับมา ซึ่งค่า VSWR ที่ดีควรจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 (ไม่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ) แต่ถ้าหากค่า VSWR ของเครื่องส่งวิทยุมีค่าสูงขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่ามีกำลังที่ส่งออกไปแล้วสะท้อนกลับมามากขึ้น และในบางครั้งอาจจะทำให้เครื่องส่งวิทยุเกิดความเสียหายหรือสร้างสัญญาณรบกวนออกไปได้ โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่ยอมรับได้จะไม่เกิน ค่า VSWR ที่สูงเกิดจากสาเหตุหลายประการ อาทิเช่น อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ สายนำสัญญาณ และเครื่องส่งวิทยุ มีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดความไม่เมตช์ (mismatch) ซึ่งจะก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของทั้ง 3 ส่วนควรจะต้องมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม แต่หากมีการใช้งานในระยะเวลานาน อาจจะทำให้คุณภาพของอุปกรณ์ลดลงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปได้ นอกจากนั้นยังอาจจะเกิดจากอุปกรณ์ประเภทขั้วต่อ

สายนำสัญญาณ การติดตั้งที่ไม่ได้คุณภาพ เมื่อเกิดสภาพอากาศที่มีฝนตก ทำให้นำสามารถซึมเข้าที่บริเวณขั้วต่อต่างๆ เหล่านี้ได้ ซึ่งก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า VSWR ของเครื่องส่งวิทยุมีค่าสูงได้เช่นกัน ดังนั้นเจ้าของสถานีวิทยุฯ ควรที่จะมีการตรวจสอบค่า VSWR ของสถานีวิทยุตนเองอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.73 แบบจำลองการทำงานของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

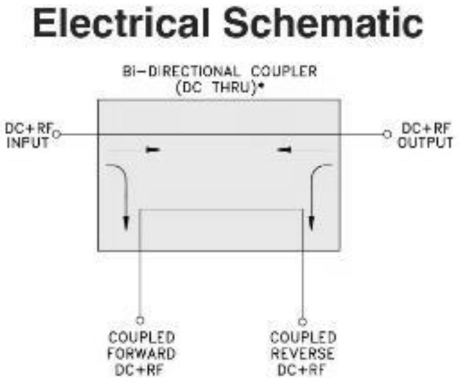


รูปที่ 4.74 องค์ประกอบของอุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงคือบอร์ดควบคุม ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิในการวัดค่าอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ อุปกรณ์ Directional Coupler จะทำหน้าที่วัดกำลังส่งและกำลังสะท้องของเครื่องส่งวิทยุในขณะกำลังออกอากาศส่งไปยังบอร์ดควบคุมเพื่อใช้ในการประมวลผล บอร์ดควบคุมเลือกใช้งานบอร์ด ESP32 ในการประมวลผลและสามารถเชื่อมต่อ WIFI เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านทางอินเตอร์เน็ตไปยังผู้ใช้งานได้

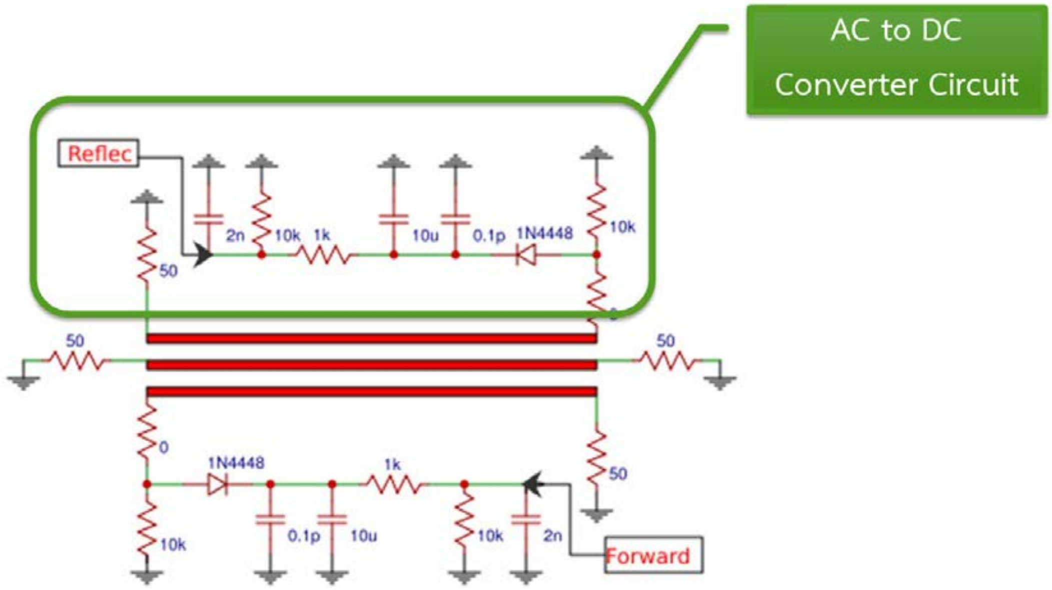
4.4.2. ออกแบบอุปกรณ์ Directional Coupler

ในการวัดสัญญาณ Output power ของเครื่องส่งวิทยุในขณะที่เครื่องส่งวิทยุกำลังออกอากาศอยู่เป็นพารามิเตอร์ที่เราให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งการวัดค่า Output power สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ Directional Coupler ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดึงสัญญาณบางส่วน (Coupling) ของเครื่องส่งวิทยุที่จะส่งผ่านไปยังสายอากาศเพื่อนำมาวิเคราะห์หากำลังส่งออกอากาศ (Output power) ของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง ในขณะเดียวกันก็ยังสามารถดึงเอาสัญญาณ (coupling) ที่ย้อนกลับเข้ามาที่เครื่องส่ง ฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์หากำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) ของสายอากาศ ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.75 แบบจำลอง Directional Coupler

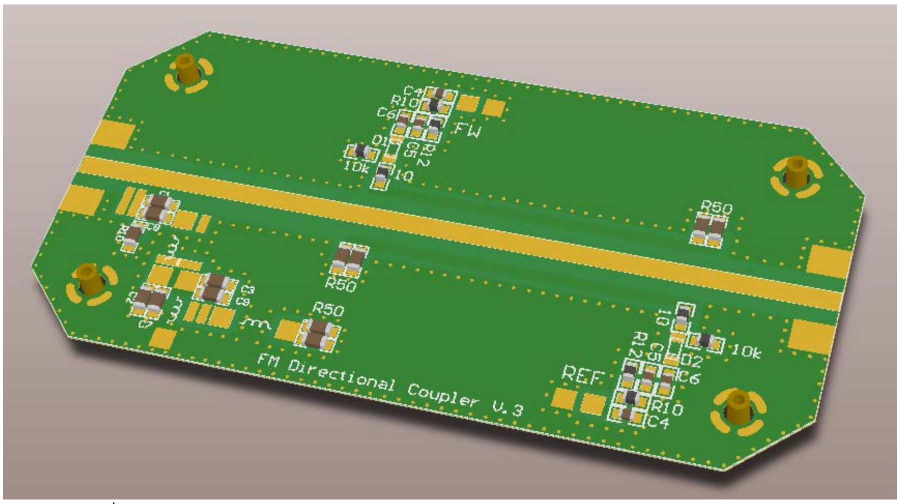
เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก Directional Coupler เป็นสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RF Frequency) เพื่อให้ง่ายต่อการนำมาวิเคราะห์หากำลังส่งออกกาศ จึงจำเป็นจะต้องเปลี่ยนสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุให้เป็นสัญญาณไฟกระแสตรง (DC) ด้วยวงจรดังแสดงในภาพ



รูปที่ 4.76 วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นสัญญาณไฟกระแสตรง (DC)

ทางผู้วิจัยได้การออกแบบ Directional Coupler โดยใช้โปรแกรม CST ซึ่งสัญญาณ coupling ออกมาจาก Directional Coupler นั้นเป็นสัญญาณกระแสสลับและจะต้องมีวงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสตรง เพื่อให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอ่านค่าได้ ซึ่งจะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์การคำนวณและเปรียบเทียบแรงดันกระแสตรงกับสัญญาณ Output ที่ออกไปได้

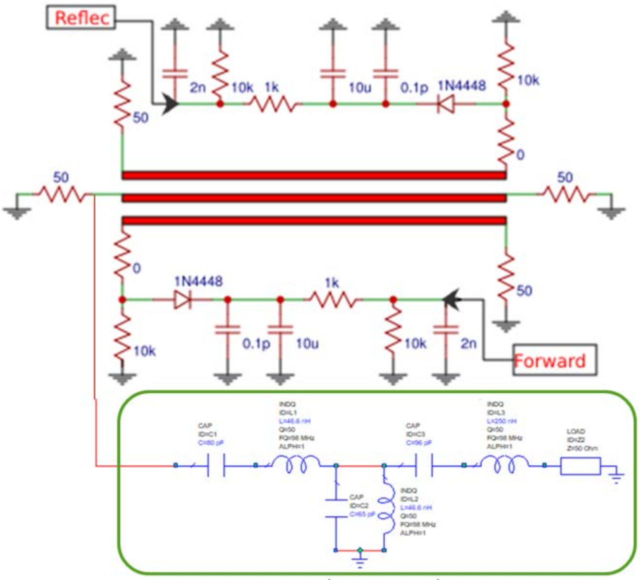
จากวงจรแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการ coupling สัญญาณความถี่วิทยุผ่าน Directional Coupler แล้วนั้น สัญญาณดังกล่าวจะผ่านวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นโดยผ่านไดโอดและตัวเก็บประจุ และส่งสัญญาณที่ได้ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทลเลอร์เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังส่งออกอากาศ (Output power) และกำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) ต่อไป



รูปที่ 4.77 การออกแบบ Directional Coupler โดยใช้โปรแกรม CST

4.4.3. การเพิ่มประสิทธิภาพ Directional Coupler ด้วยวงจร Band Pass Filter ที่สามารถลดทอนความถี่วิทยุการบินได้

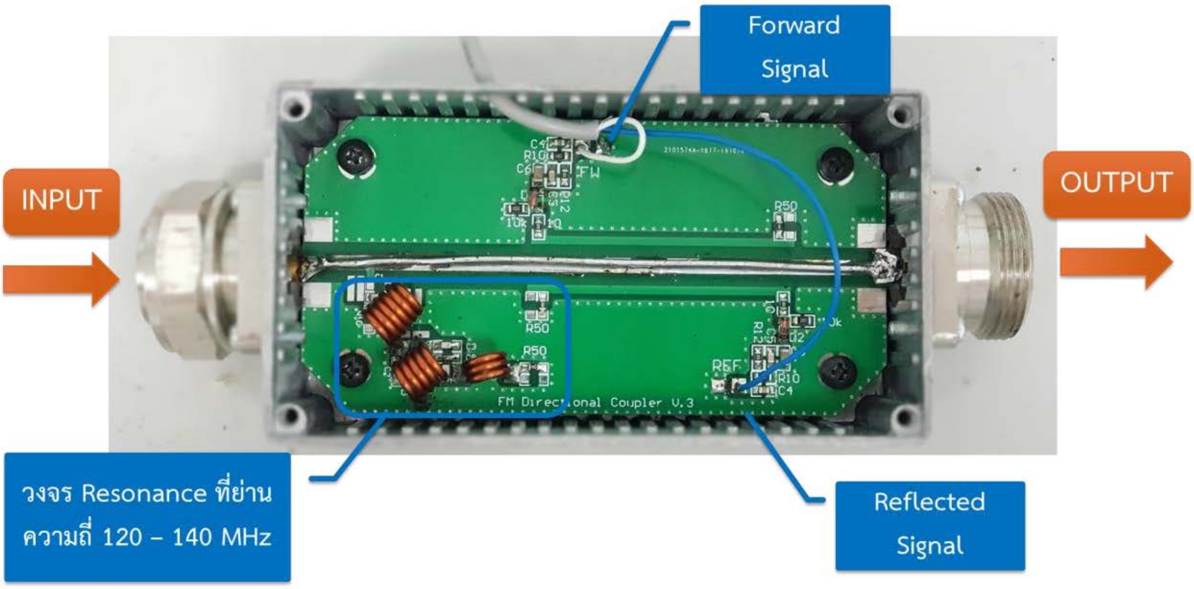
เพื่อให้อุปกรณ์ Directional Coupler ทำหน้าที่ดึงสัญญาณบางส่วน (Coupling) ของเครื่องส่งวิทยุที่จะส่งผ่านไปยังสายอากาศโดยที่ไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนวิทยุการบินได้เลย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนา อุปกรณ์ Directional Coupler ที่สามารถลดทอนสัญญาณย่านความถี่วิทยุการบินได้ ด้วยการเพิ่มวงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz เพื่อดึงเอาสัญญาณให้ย่านความถี่ดังกล่าวจากเครื่องส่งวิทยุ (ในกรณีที่เครื่องส่งวิทยุสร้างสัญญาณรบกวนวิทยุการบิน) ไปกำจัดทิ้งด้วยโหลดตัวต้านทาน 50 โอห์ม



วงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz

รูปที่ 4.78 การออกแบบ Directional Coupler ที่เพิ่มวงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz

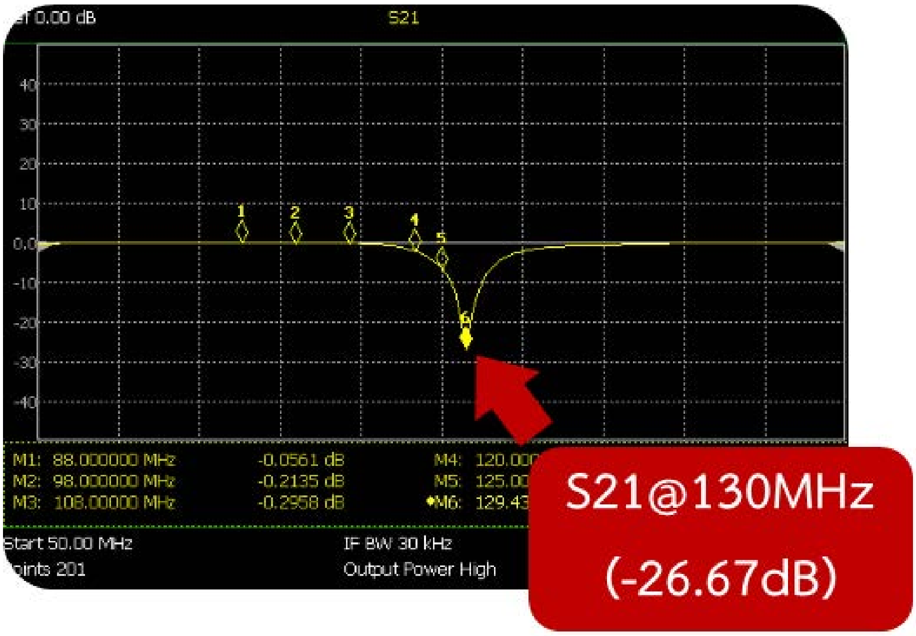
การสร้างอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ จะสร้างจากวัสดุแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) ชนิด FR-4 ที่มีขนาดความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ทั่วไปและง่ายต่อการสร้างชิ้นงาน ส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าของแผ่น PCB คือ วัสดุทองแดง ดังนั้นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ประกอบด้วย ด้านบน คือ รูปแบบของลายวงจรที่เป็นทองแดงของวงจรแบ่ง/รวมสัญญาณตามที่ได้ออกแบบ ส่วนตรงกลาง คือ พลาสติกชนิด FR-4 และด้านล่างสุด คือ ทองแดงที่ทำหน้าที่เป็น Ground Plane



รูปที่ 4.79 วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบที่มีวงจร Resonance
ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz

4.4.4. ผลการทดสอบ Directional Coupler

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการวัดคุณสมบัติและทดสอบของชิ้นงานวงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบ ซึ่งได้อธิบายวิธีการออกแบบและสร้างชิ้นงานไว้ในหัวข้อ 4.3.3 ชิ้นงานดังกล่าวจะนำเข้าห้องปฏิบัติการและทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์วงจรข่าย (Network Analyzer) เพื่อทดสอบคุณสมบัติว่าเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ ซึ่งจะวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ Reflected power, Transmission, Insertion loss เป็นต้น



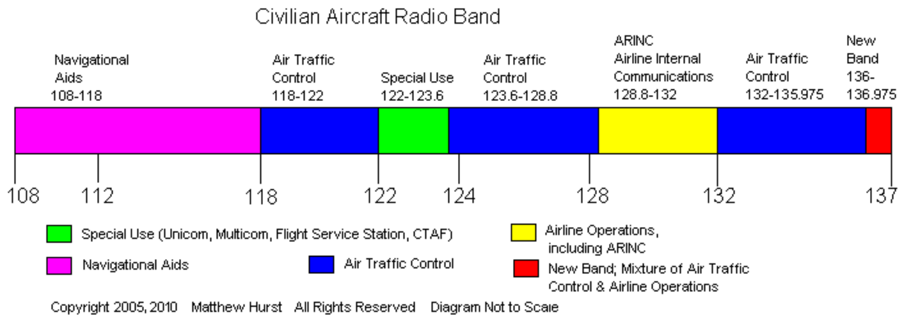
รูปที่ 4.80 แสดงผลการทดสอบ Transmission (S21) วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบ

รูปที่ 4.81 แสดงผลการทดสอบ Reflected power (S11) วงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบ

ผลการทดสอบวงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบด้วยเครื่อง Network Analyzer ให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST นั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflected power) หรือ S11 ที่ความถี่ 88 -108 MHz มีค่าต่ำกว่า -20dB และมีค่าดีที่สุดที่ ความถี่ 98 MHz มีค่า S11 เท่ากับ -63 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถนำมาใช้งานในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง FM ได้

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ Directional Coupler ด้วยการเพิ่มวงจร Resonance ที่ย่านความถี่ 120 – 140 MHz เพื่อให้สามารถลดทอนสัญญาณย่านความถี่วิทยุการบินได้หากมีสัญญาณดังกล่าวแพร่ออกมาจากเครื่องส่งวิทยุที่กำลังออกอากาศในขณะนั้น โดยผลการทดสอบ Directional Coupler ที่มีวงจร Resonance พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission) หรือ S21 ในย่านความถี่วิทยุ FM (88-108 MHz) มีค่าประมาณ 0.1 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่น้อยมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการนำ Directional Coupler ไปใช้งานในย่านความถี่วิทยุ FM

การรบกวนในย่านความถี่วิทยุการบินในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อการ (Communication) ระหว่างนักบินกับหอบังคับการบิน ซึ่งจากรูปที่ 4.82 จะพบว่าความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารเริ่มตั้งแต่ความถี่ 118 MHz ไปจนถึงความถี่ 137 MHz ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวงจร Resonance ที่ความถี่ 128 MHz โดยที่มีแบนด์วิดของวงจรประมาณ 20 MHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 128 MHz เป็นความถี่ที่มีความเหมาะสม เนื่องจากว่า หากลดความถี่ Resonance ต่ำลง จะทำให้ช่วงความถี่สูงของย่านวิทยุกระจายเสียงได้รับผลกระทบจากวงจร Resonance ซึ่งทำให้เอาต์พุตที่ออกไปยังสายอากาศมีค่าลดลง แต่หากเพิ่มความถี่ Resonance ให้สูงขึ้น จะทำให้ไม่สามารถลดทอนสัญญาณแปลกปลอมได้ หากสัญญาณแปลกปลอมนั้นเกิดขึ้นในช่วงความถี่ต้นแบนด์ของความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างนักบินกับหอบังคับการบิน ผลการทดสอบ Directional Coupler ที่มีวงจร Resonance พบว่าที่ความถี่ 130 MHz สามารถลดทอนสัญญาณได้มากกว่า -26 dB แสดงให้เห็นว่าหากเครื่องส่งวิทยุมีการสร้างสัญญาณรบกวนย่านวิทยุการบินออกมาก วงจร Directional Coupler สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้ระดับหนึ่งก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณออกไปภายนอก

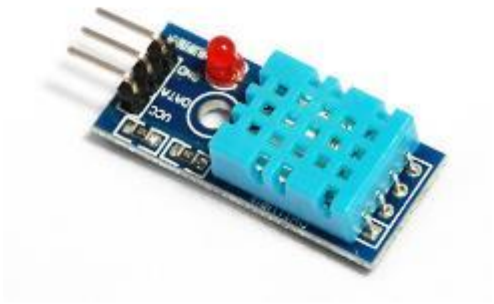


รูปที่ 4.82 ย่านความถี่วิทยุสำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศ

4.4.5. อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ

อุปกรณ์ DHT11 Humidity and Temperature Sensor ใช้สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นสำหรับระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยจะใช้งาน 2 ตัว ตัวที่ 1 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ และตัวที่ 2 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิห้อง โมดูลวัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT11 Temperature and Humidity Sensor Module) เป็นโมดูลที่สามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นบริเวณรอบๆทั่วไปหรือในห้องหรือประยุกต์ใช้งานอื่นเช่น Testing, Inspection Equipment, Automatic Control, Data Logger, Weather Station, Humidity Regulator ขึ้นอยู่กับการเขียนโปรแกรมและการต่อใช้งานภายนอก ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน มีความน่าเชื่อถือ ราคาถูก การตอบสนองที่รวดเร็ว และความแม่นยำในการวัดค่าสูง สามารถใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไปได้ ในโมดูลประกอบไปด้วย ส่วนวัดความชื้นแบบ Resistive type และส่วนวัดอุณหภูมิแบบ NTC ให้สัญญาณเอาต์พุตแบบ Digital Output, การตรวจวัดคงที่กับ DHT11 Sensor, ย่านวัดอุณหภูมิ 0-50 องศาเซลเซียส, ย่านวัดความชื้น 20-90% RH, ง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน เซ็นเซอร์ DHT11 มีคุณสมบัติดังนี้

- ใช้แรงดันไฟเลี้ยง +3 V ถึง +5.5 V และกระแสไฟฟ้า 2.5 mA
- วัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ 20 ถึง 80% RH ความผิดพลาด ±5% RH และมีความละเอียดในการวัด 1% ขนาดของข้อมูล 8 บิต
- วัดอุณหภูมิได้ 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส ความผิดพลาด ±2 องศาเซลเซียส ความละเอียดในการวัด 1 องศาเซลเซียส ขนาดของข้อมูล 8 บิต
- อัตราการสุ่มวัด 1 ครั้งต่อวินาที
- ความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในการวัด 6 ถึง 30 วินาที



รูปที่ 4.83 DHT11 Temperature and Humidity Sensor Module

4.4.6. บอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์ ESP32

บอร์ด Node32s เป็นบอร์ดที่นำ SoC อย่าง ESP32 ของบริษัท Espressif มาออกแบบเป็นบอร์ดพัฒนา โดย ESP32 เป็นไอซีที่พัฒนาเพิ่มเติมจาก ESP8266 ที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากมันเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาถูก และ มี WIFI ติดมาด้วย แถมยังใช้ Arduino

เขียนโปรแกรมได้ด้วย แต่สำหรับ ESP32 ตัวใหม่นี้ ยังเพิ่มความสามารถเข้าไปอีก มีการเชื่อมต่อ Bluetooth Low-Energy (BLE, BT4.0, Bluetooth Smart) รวมถึงยังมี GPIO ถึง 30 ขา โดยตัวไอซี ESP32 มีสเปคโดยละเอียด ดังนี้

- ซีพียูใช้สถาปัตยกรรม Tensilica LX6 แบบ 2 แกนสมอง สัญญาณนาฬิกา 240MHz
- มีแรมในตัว 512KB
- รองรับการเชื่อมต่อรอมภายนอกสูงสุด 16MB
- มาพร้อมกับ WiFi มาตรฐาน 802.11 b/g/n รองรับการใช้งานทั้งในโหมด Station softAP และ Wi-Fi direct
- มีบลูทูธในตัว รองรับการใช้งานในโหมด 2.0 และโหมด 4.0 BLE
- ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 2.6V ถึง 3V
- ทำงานได้ที่อุณหภูมิ -40°C ถึง 125°C

นอกจากนี้ ESP32 ยังมีเซ็นเซอร์ต่าง ๆ มาในตัวด้วย ดังนี้

- วงจรกรองสัญญาณรบกวนในวงจรขยายสัญญาณ
- เซ็นเซอร์แม่เหล็ก
- เซ็นเซอร์สัมผัส (Capacitive touch) รองรับ 10 ช่อง
- รองรับการเชื่อมต่อคลิสตอล 32.768kHz สำหรับใช้กับส่วนวงจรนับเวลาโดยเฉพาะ

ขาใช้งานต่าง ๆ ของ ESP32 รองรับการเชื่อมต่อบัสต่าง ๆ ดังนี้

- มี GPIO จำนวน 32 ช่อง
- รองรับ UART จำนวน 3 ช่อง
- รองรับ SPI จำนวน 3 ช่อง
- รองรับ I^2C จำนวน 2 ช่อง
- รองรับ ADC จำนวน 12 ช่อง
- รองรับ DAC จำนวน 2 ช่อง
- รองรับ I^2S จำนวน 2 ช่อง
- รองรับ PWM / Timer ทุกช่อง
- รองรับการเชื่อมต่อกับ SD-Card

นอกจากนี้ ESP32 ยังรองรับฟังก์ชั่นเกี่ยวกับความปลอดภัยต่าง ๆ ดังนี้

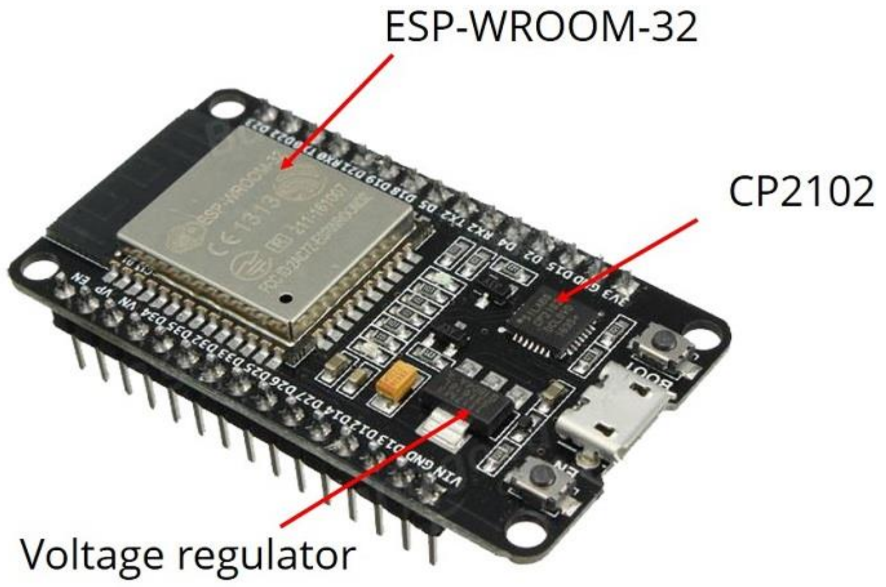
- รองรับการเข้ารหัส WiFi แบบ WEP และ WPA/WPA2 PSK/Enterprise
- มีวงจรเข้ารหัส AES / SHA2 / Elliptical Curve Cryptography / RSA-4096 ในตัว

ในด้านประสิทธิ์ภาพการใช้งาน ตัว ESP32 สามารถทำงานได้ดี โดย

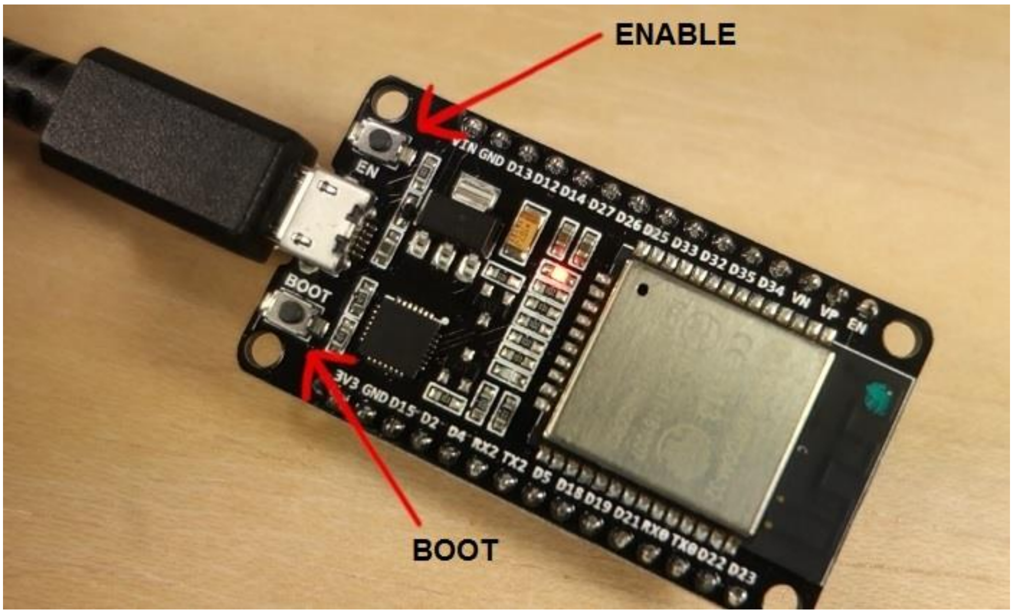
- รับ – ส่ง ข้อมูลได้ความเร็วสูงสุดที่ 150Mbps เมื่อเชื่อมต่อแบบ 11n HT40 ได้ความเร็วสูงสุด 72Mbps เมื่อเชื่อมต่อแบบ 11n HT20 ได้ความเร็วสูงสุดที่ 54Mbps เมื่อเชื่อมต่อแบบ 11g และได้ความเร็วสูงสุดที่ 11Mbps เมื่อเชื่อมต่อแบบ 11b
- เมื่อใช้การเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอล UDP จะสามารถรับ – ส่งข้อมูลได้ที่ความเร็ว 135Mbps
- ในโหมด Sleep ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 2.5uA

คุณสมบัติ ฟีเจอร์ของบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT

ตัวบอร์ดมาพร้อมกับชิฟ ESP-WROOM-32 มีวงจรเรกูเลตรับไฟได้ที่ 3.7-12V ปรับแรงดันให้คงที่ 3.3V เพื่อจ่ายไฟให้กับชิฟ ESP32 มีภาคของวงจร USB TTL ใช้ชิฟ CP2102 สำหรับติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ตอนอัพโหลดโคด/Serial Monitor ผ่านทางสาย Micro USB ดังรูป



รูปที่ 4.84 บอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT



รูปที่ 4.85 ปุ่มควบคุมการทำงานของบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT

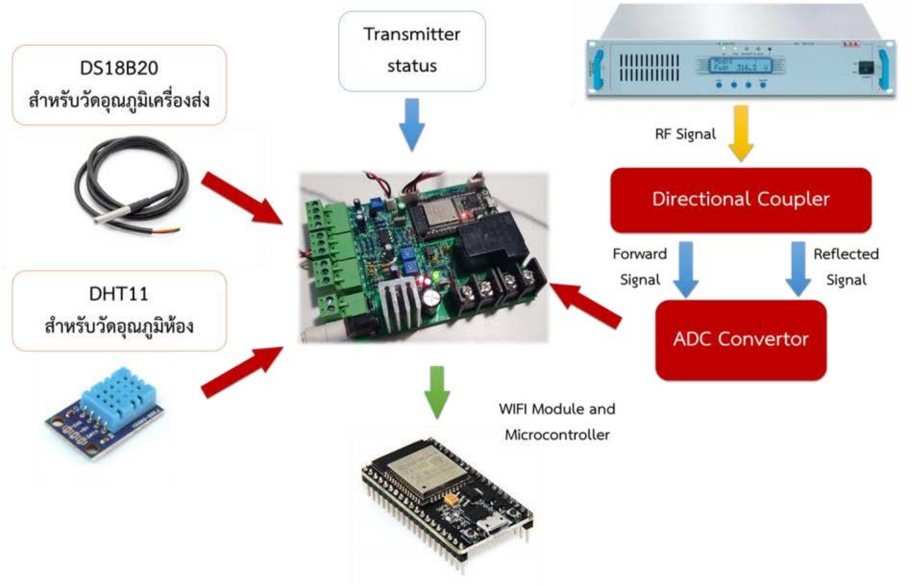
เมื่อกดปุ่ม ENABLE วงจรจะ RESET ถ้าจะอัพโหลดโคดต้องเข้าโหมด flash ก่อน โดยกดปุ่ม BOOT ค้างไว้ กดและปล่อยปุ่ม ENABLE แล้วปล่อยปุ่ม BOOT

ตารางที่ 4-2 แสดงคุณสมบัติของบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT

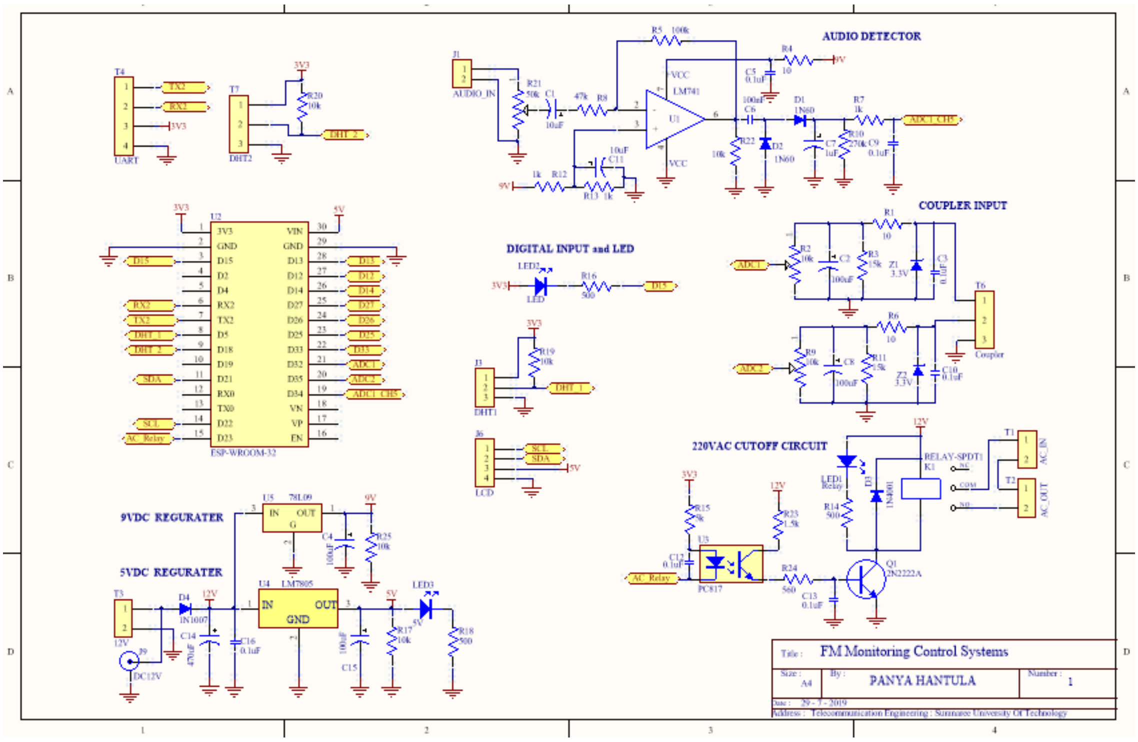
Specifications - ESP32 DEVKIT V1 DOIT	
Number of cores	2 (Dual core)
Wi-Fi	2.4 GHz up to 150 Mbit/s
Bluetooth	BLE (Bluetooth Low Energy) and legacy Bluetooth
Architecture	32 bits
Clock frequency	Up to 240 MHz
RAM	512 KB
Pins	30
Peripherals	Capacitive touch, ADCs (analog-to-digital converter), DACs (digital-to-analog converter), I²C (Inter-Integrated Circuit), UART (universal asynchronous receiver/transmitter), CAN 2.0 (Controller Area Network), SPI (Serial Peripheral Interface), I²S (Integrated Inter-IC Sound), RMII (Reduced Media-Independent Interface), PWM (pulse width modulation), and more.

4.4.7. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

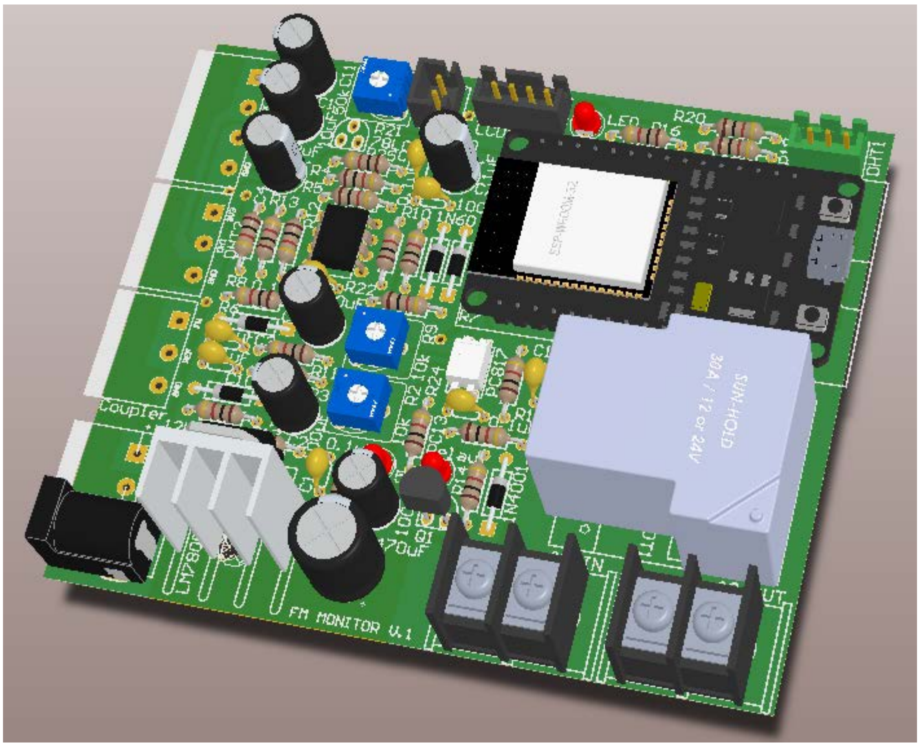
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยมีองค์ประกอบดังรูปที่ 4.86 ซึ่งมีบอร์ด Arduino ESP32 DOIT DEVKIT เป็นตัวควบคุมการทำงานหลัก ซึ่งจะออกแบบให้เป็นวงจรสำเร็จรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที บอร์ดที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับ Directional Coupler เพื่อทำการอ่านค่ากำลังส่งออกอากาศ กำลังสะท้อนกลับ นอกจากนั้นยังสามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ DHT11 และDS18B20 ซึ่งจะทำการวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งและอุณหภูมิของห้อง สุดท้ายบอร์ดที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุและแสดงผลทางหน้าจอ LCD ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.86 องค์ประกอบของระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



รูปที่ 4.87 แผนผังวงจรระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



รูปที่ 4.88 แบบจำลอง 3 มิติของบอร์ดควบคุมของระบบการเฝ้าติดตาม
สถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

4.4.8. การติดตั้งโปรแกรม Arduino IDE และการใช้งานบอร์ด ESP32

ในการพัฒนาโปรแกรมบอร์ด ESP32 เพื่อให้สามารถเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคและควบคุมของสถานีวิทยุกระจายเสียงได้ สามารถพัฒนาโปรแกรมผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งมีวิธีการใช้งานดังต่อไปนี้

- การติดตั้งโปรแกรม Arduino IDE

  เข้าไปที่เว็บไซต์ https://www.arduino.cc/ เลือกเมนู SOFTWARE

รูปที่ 4.89 เว็บไซต์ https://www.arduino.cc/

เลื่อนไปที่หัวข้อ Download the Arduino IDE จากนั้นเลือกดาวน์โหลดตาม OS ที่ต้องการ

รูปที่ 4.90 เลือกดาวน์โหลด Arduino IDE

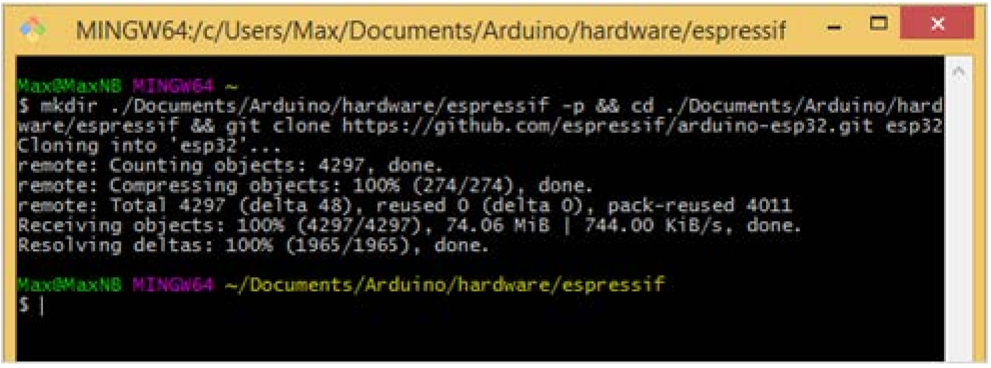
เมื่อดาวน์โหลดเสร็จแล้ว ให้เปิดไฟล์ติดตั้งโปรแกรมขึ้นมา จะพบหน้ารายละเอียดข้อตกลงการใช้งานโปรแกรม Arduino IDE ให้เรียบร้อย

- การติดตั้ง Arduino core for ESP32

ก่อนอื่น ต้องติดตั้งโปรแกรม Git ก่อน ให้เข้าไปที่หน้าเว็บ https://git-scm.com/download/win จะมีไฟล์ขึ้นมาให้ดาวน์โหลดอัตโนมัติ จะมีรายละเอียดเงื่อนไขการใช้งานโปรแกรมขึ้นมา และทำการติดตั้งให้เรียบร้อย เมื่อทำการติดตั้งโปรแกรมเป็นที่เรียบร้อยแล้วให้เรียกโปรแกรม Git Bash ขึ้นมาใช้งานจะมีหน้าต่าง Bash ขึ้นมา ให้พิมพ์ชุดคำสั่งต่อไปนี้ (พิมพ์ติดกัน ไม่เว้นบรรทัด) จากนั้นกดปุ่ม Enter

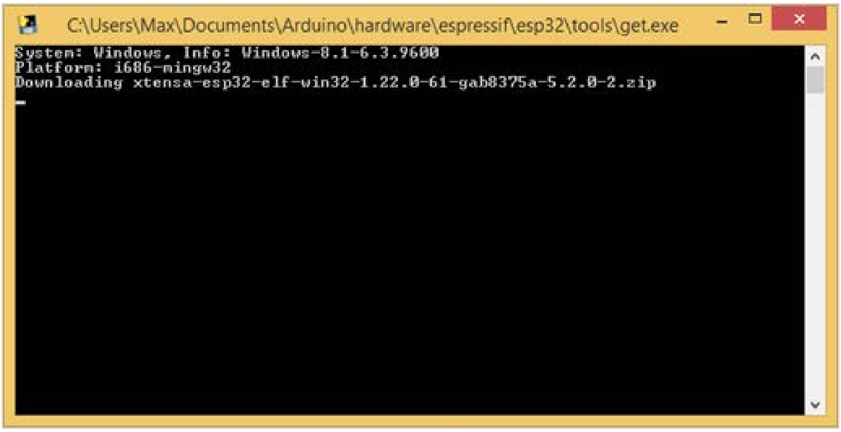
```
mkdir ./Documents/Arduino/hardware/espressif -p && cd
./Documents/Arduino/hardware/espressif && git clone
https://github.com/espressif/arduino-esp32.git esp32
```

เมื่อเสร็จแล้ว จะแสดงข้อความดังรูป



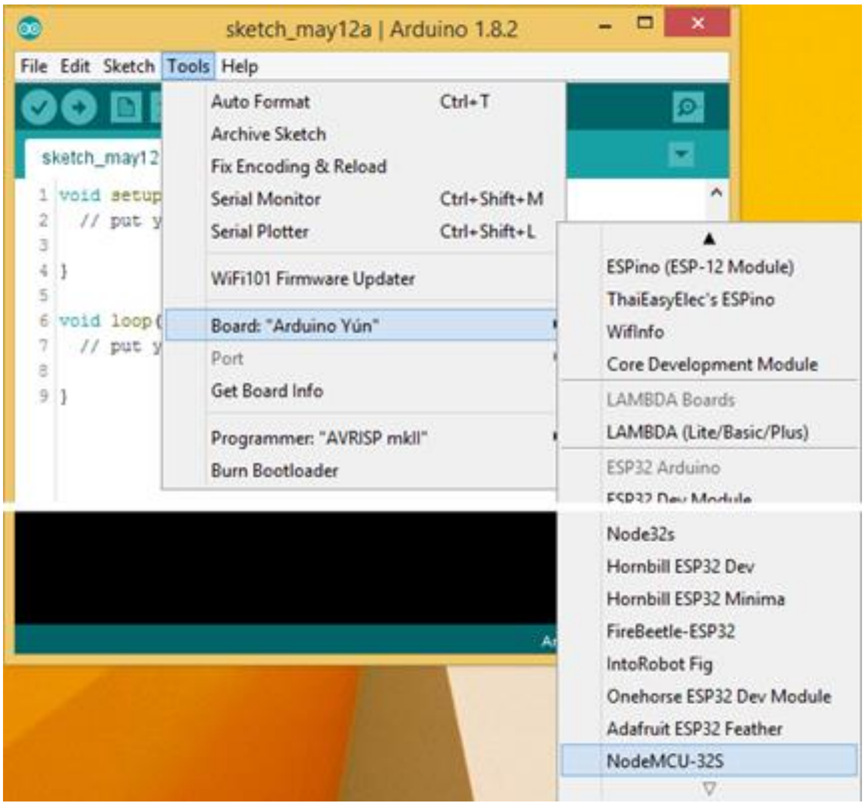
รูปที่ 4.91 การติดตั้ง Arduino core for ESP32

เข้าไปที่ Documents\Arduino\hardware\espressif\esp32\tools ดับเบิลคลิกเปิดไฟล์ get.exe ซึ่งโปรแกรมจะดาวน์โหลดซอฟแวร์ต่าง ๆ มาลง รอจนกว่าหน้าต่างนี้จะปิดไป



รูปที่ 4.92 หน้าต่างแสดงการดาวน์โหลดซอฟแวร์ต่าง ๆ สำหรับ ESP32

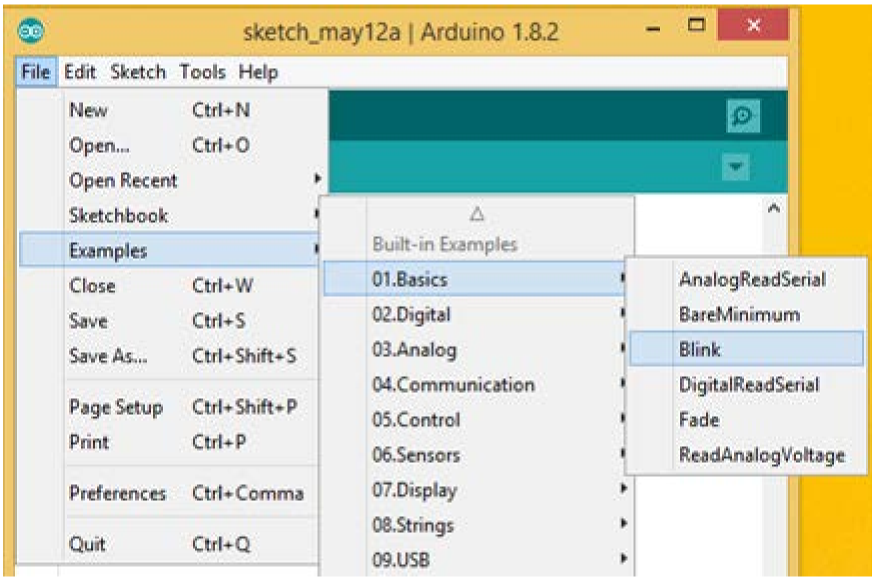
เมื่อทำการดาวน์โหลดซอฟแวร์ต่าง ๆ สำหรับ ESP32 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการเปิดโปรแกรม Arduino IDE ขึ้นมา กดไปที่เมนู Tool > Board หากมีบอร์ด NodeMCU-32S ขึ้นมาให้เลือก ถือว่าติดตั้งสำเร็จแล้ว



รูปที่ 4.93 โปรแกรม Arduino IDE ที่พร้อมใช้งานกับบอร์ด ESP32

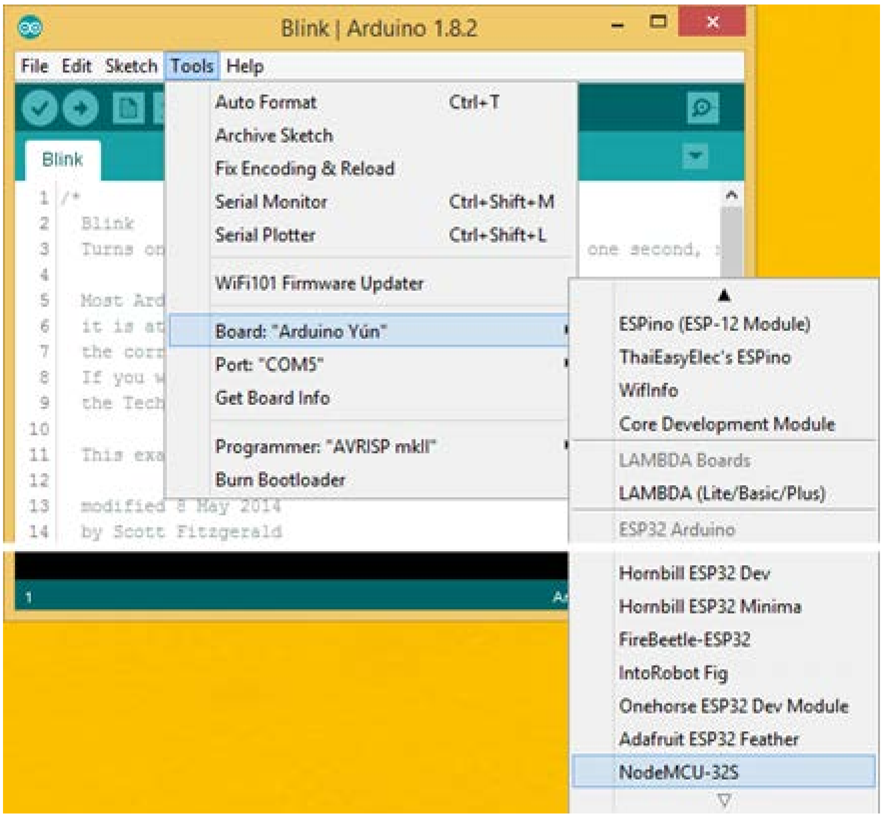
- ทดสอบอัพโหลดโปรแกรม

เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ ให้นำบอร์ด NodeMCU-32S เสียบเข้ากับคอมพิวเตอร์ หากมีการสแกนหาไดร์เวอร์ ให้รอจนติดตั้งไดร์เวอร์เสร็จ ก่อนที่โปรแกรม Arduino กดไปที่เมนู File > 01.Basics เลือก Blink โค้ดโปรแกรมไฟกระพริบจะเปิดขึ้นมา



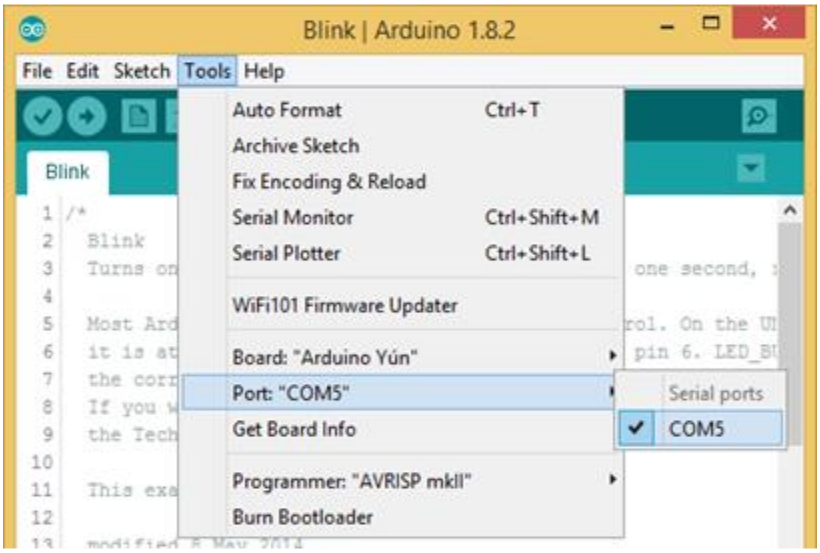
รูปที่ 4.94 เลือกโค้ดโปรแกรมไฟกระพริบเพื่อเป็น File ตัวอย่าง

จากนั้นกดไปที่ Tools > Board เลือก NodeMCU-32S



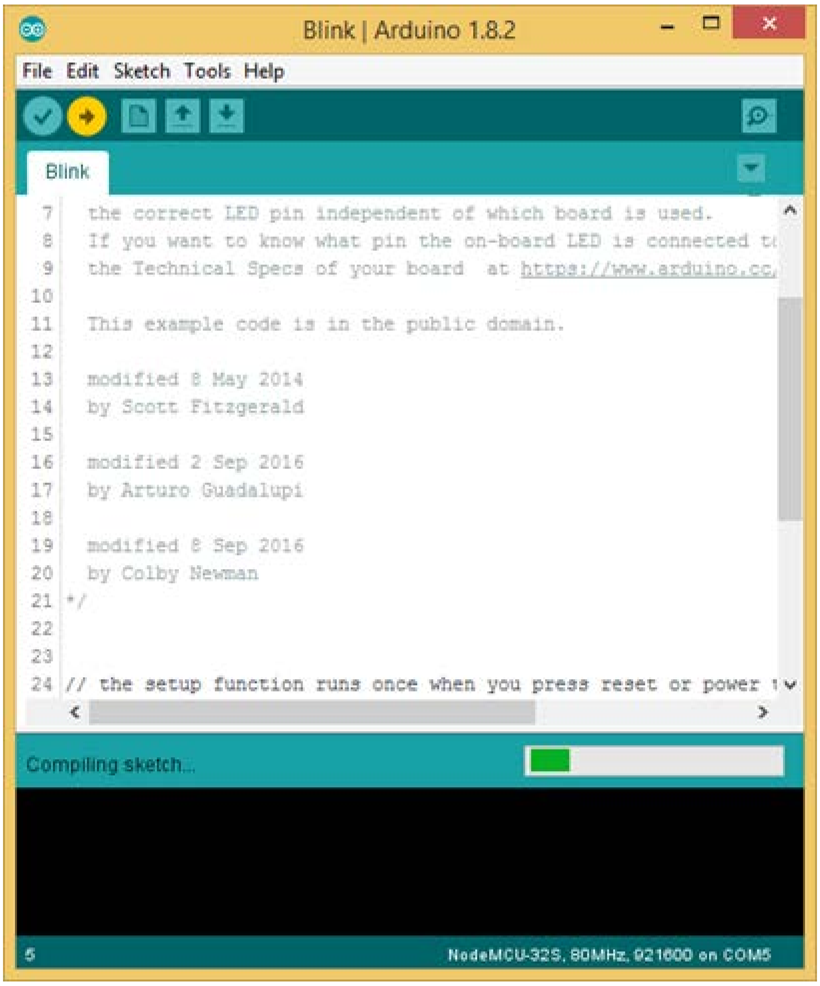
รูปที่ 4.95 เลือกบอร์ด NodeMCU-32S

กดไปที่ Tool > Port แล้วเลือกพอร์ตที่ปรากฏ (กรณีใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี COM Port ให้เลือกตัวอื่นที่ไม่ใช่ COM1)



รูปที่ 4.96 เลือกพอร์ตที่จะทำการอัพโหลดโปรแกรม

กดปุ่ม Edit > Upload และรอจนกว่าจะอัพโหลดโปรแกรมสำเร็จ

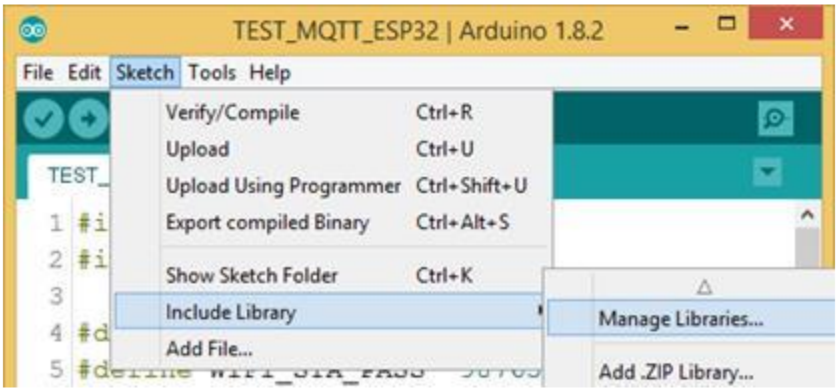


รูปที่ 4.97 แสดงการอัพโหลดโปรแกรมของ ESP32

- การติดตั้งไลบารี่

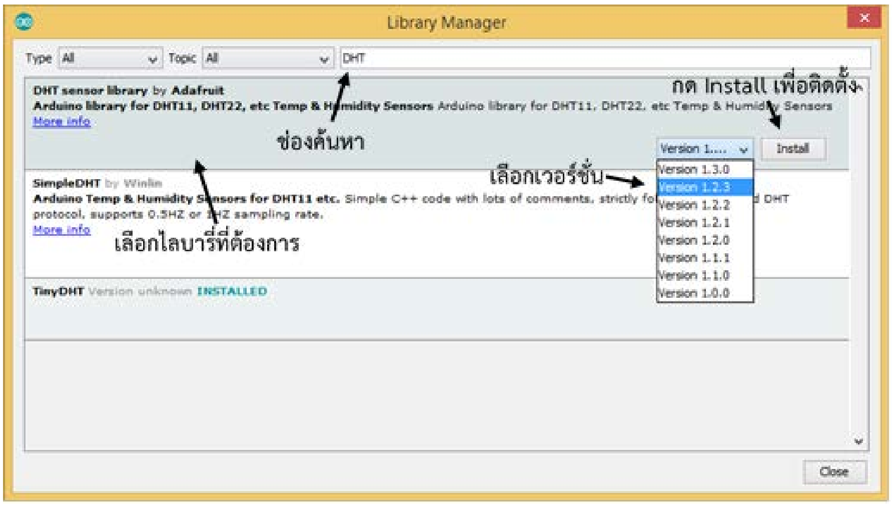
ไลบารี่ คือชุดโค้ดโปรแกรมที่มีผู้อื่นเขียนไว้เพื่ออำนวยความสะดวกในการเขียนโค้ด และลดความยุ่งยากในการพัฒนางาน การใช้งานอุปกรณ์ต่อร่วมต่าง ๆ มักต้องมีการติดตั้งไลบารี่เพิ่มเติม ซึ่งการติดตั้งไลบารี่สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

ใช้ Library Manager – เป็นส่วนที่มีมาในโปรแกรม Arduino IDE เพื่ออำนวยความสะดวกในการติดตั้งไลบารี่ โดยในส่วนนี้สามารถติดตั้งไลบารี่ที่ดัง ๆ หรือมีการใช้งานจำนวนมากได้ การเปิด Library Manager ขึ้นมาใช้งานให้กดไปที่ Sketch > Include Library > Manage Libraries



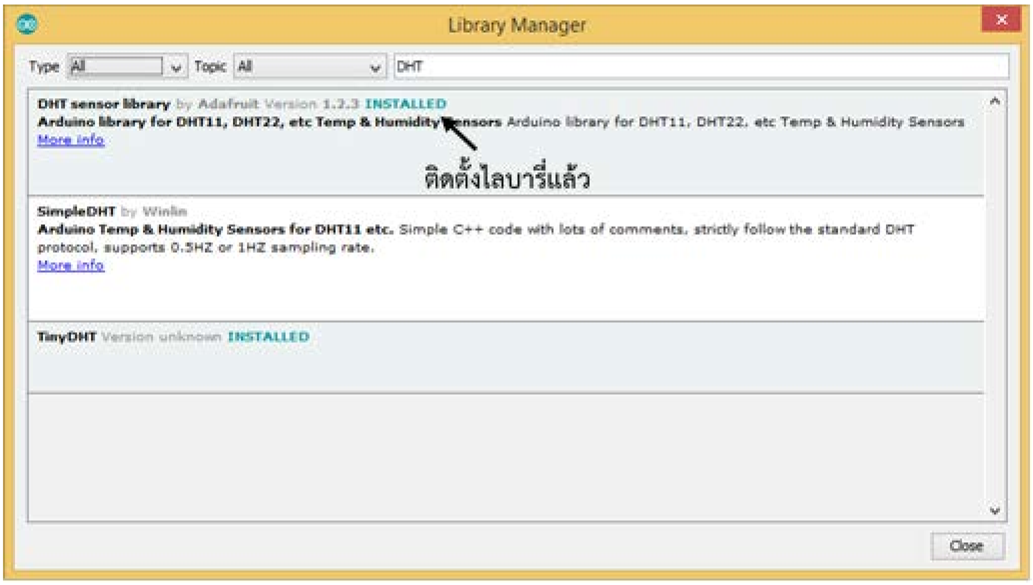
รูปที่ 4.98 การเปิด Library Manager

หลังจากนั้นโปรแกรมจะไปดาวน์โหลดรายชื่อไลบารี่ทั้งหมดมาให้ หลังจากโหลดเสร็จแล้วสามารถพิมพ์ชื่อไลบารี่ที่ต้องการติดตั้ง เลือกเวอร์ชั่นที่ต้องการติดตั้ง แล้วกดปุ่ม Install เพื่อติดตั้งได้เลย



รูปที่ 4.99 ทำการค้นหา Library ที่ต้องการ

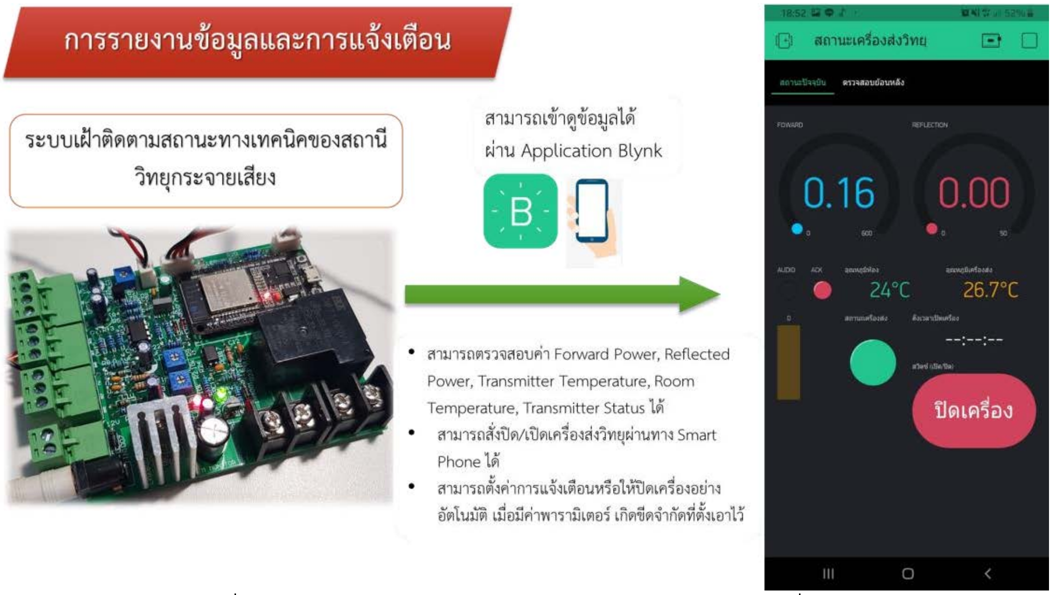
เมื่อติดตั้งไลบารี่แล้ว จะปรากฏคำว่า INSTALLED ดังรูป



รูปที่ 4.100 ติดตั้ง Library สำเร็จ

4.4.9. การใช้งานแอพพลิเคชั่น Blynk

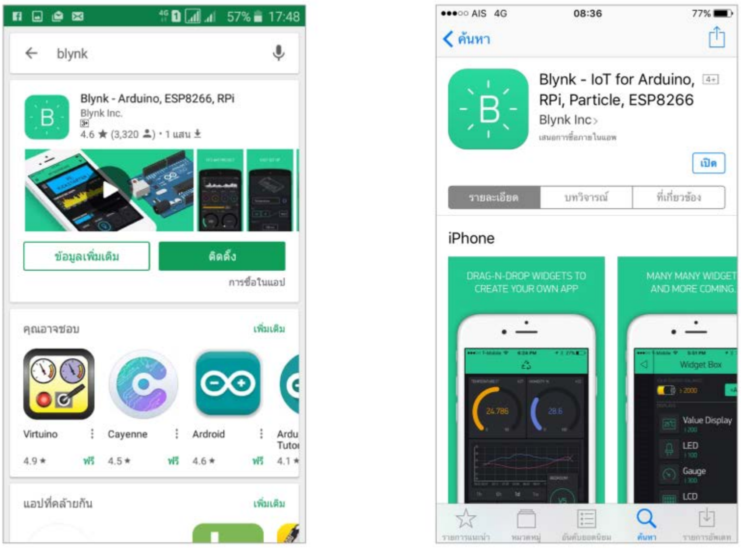
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แอพพลิเคชั่น Blynk เพื่อใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานและควบคุมเครื่องส่งวิทยุผ่านทางโทรศัพท์มือถือ ซึ่งเป็นแอพพลิเคชั่นที่ทำงานผ่านอินเตอร์เน็ต โดยสามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด ESP32 เพื่อรับและส่งข้อมูลถึงกันได้ Blynk เป็นแอพพลิเคชั่นที่เปิดให้ใช้งานฟรี ใช้งานง่าย สะดวก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่จะส่งจากบอร์ดควบคุมไปยังแอพพลิเคชั่น Blynk แสดงรูปที่ 4.101



รูปที่ 4.101 ข้อมูลรายงานการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชั่น Blynk

- การติดตั้งแอพพลิเคชั่น Blynk

แอพพลิเคชั่น Blynk รองรับการทำงานทั้ง Android และ IOS เริ่มด้วยการค้นหาชื่อ APP ให้พิมพ์คำว่า “blynk” ใน STORE ของแต่ละ OS ก็จะพบกัน BLYNK APP ทั้งนี้เวอร์ชันอาจแตกต่างกันไปบ้าง เพราะผู้พัฒนาอัพเดทรุ่นใหม่เสมอ เจอแล้วก็ให้ติดตั้งเลย

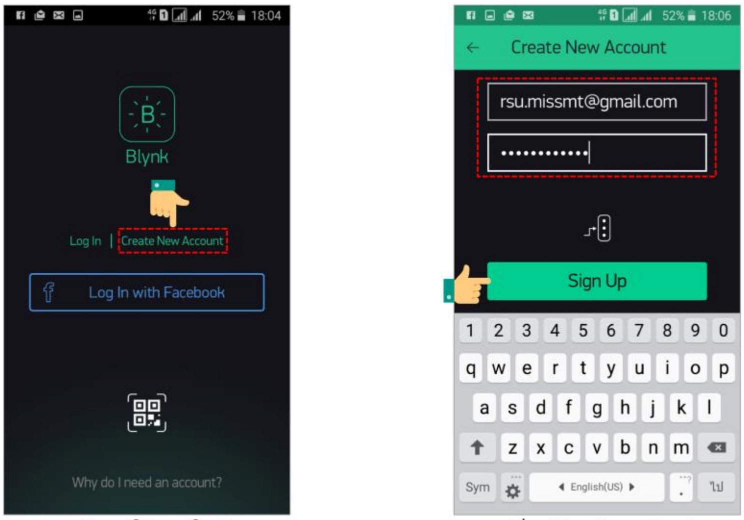


Android OS　　　　IOS

รูปที่ 4.102 รูปแสดงแอพพลิเคชั่น Blynk ใน Android และ IOS

- การลงทะเบียนใช้งาน Blynk

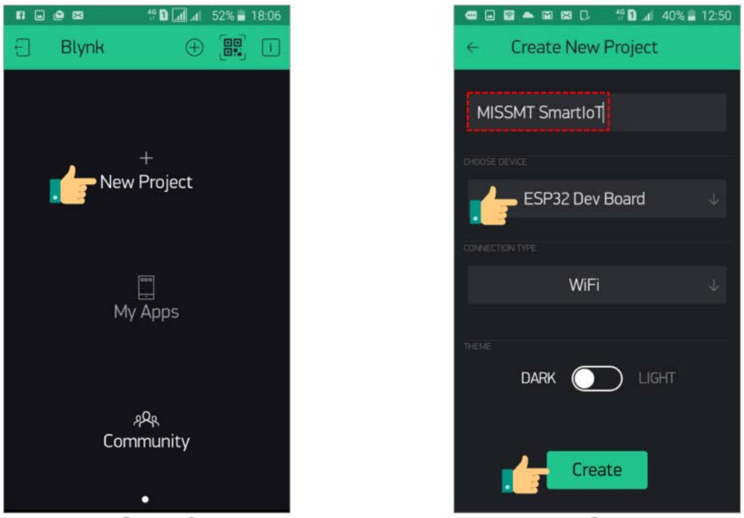
ผู้ใช้งานสามารถลงทะเบียนใช้งาน Blynk ได้จาก APP ที่ติดตั้งไว้แล้วในมือถือ ให้ผู้ใช้งานเปิด Blynk APP ขึ้นมาแล้วคลิ๊กที่ “Create New Account” แล้วใส่อีเมล์และรหัสผ่านที่ต้องการ ซึ่งระบบจะส่งรหัส TOKEN ไปให้ตามอีเมล์ดังกล่าว ตัวอย่างข้างล่างเป็นการลงทะเบียนกับ BLYNK SERVER เพียงแค่ใส่อีเมล์และรหัสผ่านจากนั้นคลิ๊กที่ปุ่ม Sign Up ก็เรียบร้อย เราจะได้ Blynk energy มาใช้งานเริ่มต้น 1,000 energy



สร้างผู้ใช้งานใหม่ ระบุที่อยู่อีเมล์และรหัสผ่าน

รูปที่ 4.103 รูปแสดงการสร้างผู้ใช้งานใหม่

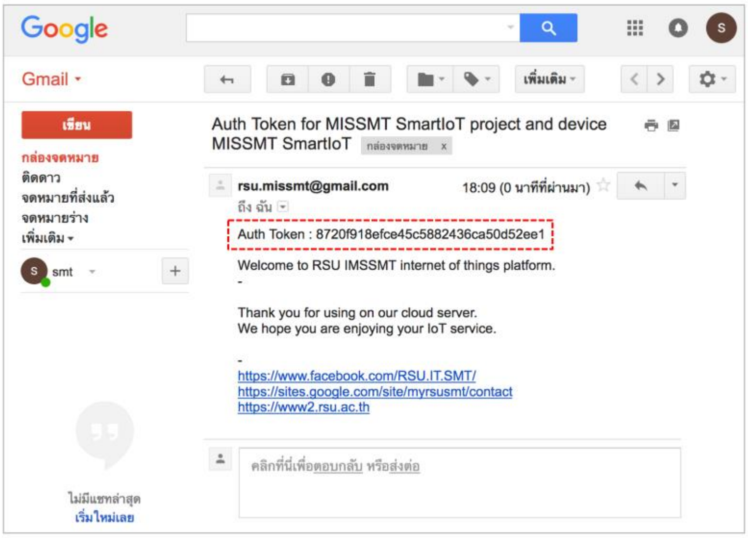
ขั้นตอนต่อจะเป็นการสร้างโปรเจคใหม่ ให้คลิ๊กที่ “New Project” แล้วใส่ชื่อโครงการให้เรียบร้อยจากตัวอย่างจะตั้งชื่อโครงการเป็น “MISSMT SmartIoT” แล้วเลือกประเภทของบอร์ดพัฒนา ผู้เขียนใช้บอร์ด ESP32 จึงเลือกเป็น “ESP32 Dev Board” จากนั้นคลิ๊กที่ปุ่ม “Create” จะเป็นสร้างโปรเจค



สร้างโปรเจคใหม่ สร้างโปรเจค

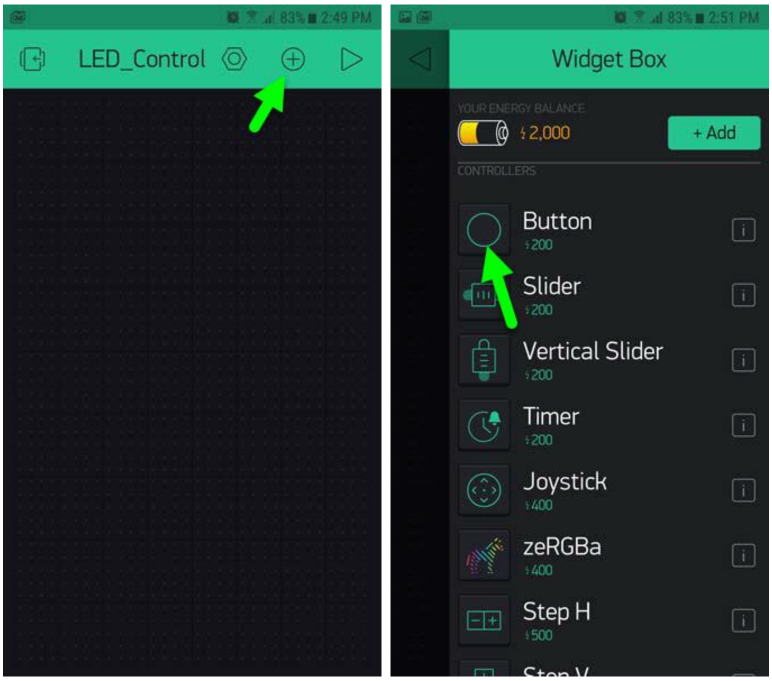
รูปที่ 4.104 รูปแสดงการสร้างโปรเจคใหม่

หลังจากที่สร้างโปรเจคเสร็จเรียบร้อย เราจะได้รับรหัส TOKEN ที่ Blynk Server ส่งมาให้ ดังแสดงในรูปด้านล่าง ซึ่งจำเป็นจะต้องนำรหัส TOKEN ไปใส่ในโปรแกรมเพื่อให้บอร์ด ESP32 เชื่อมต่อกับ Blynk ได้



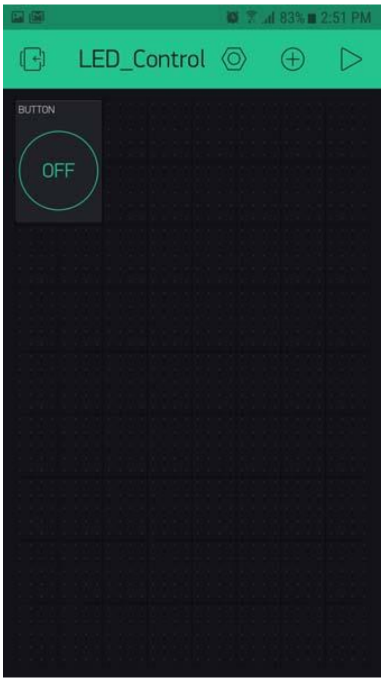
รูปที่ 4.105 รูปแสดงตัวอย่างอีเมล์ที่ได้รับจาก Blynk Serve

เมื่อต้องการเพิ่มวิทเจ็ตที่ต้องการ สามารถทำได้โดยแตะที่ปุ่มบวกดังรูป แล้วเลือกวิทเจ็ตที่ต้องการ เช่น ปุ่ม (Button) เป็นต้น



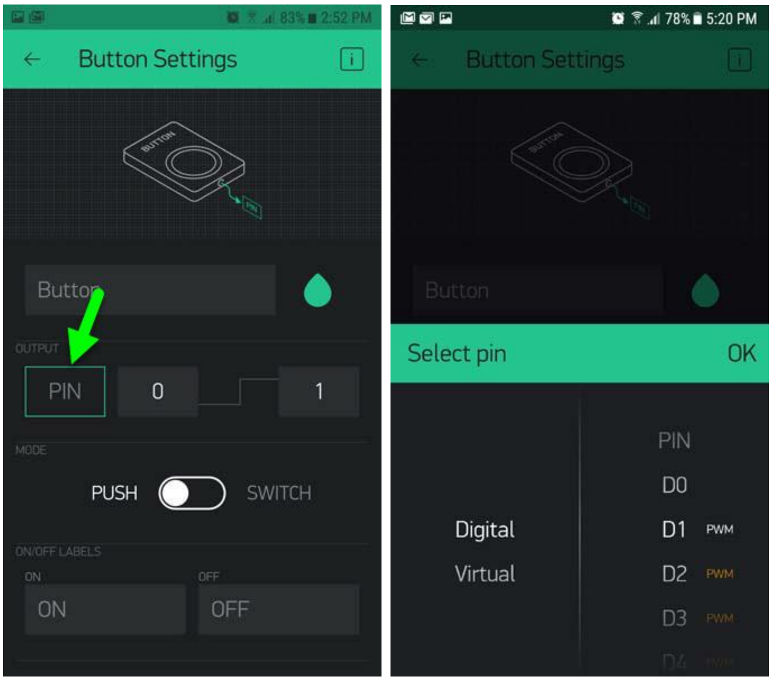
รูปที่ 4.106 เพิ่มวิทเจ็ตของแอพพลีเคชั่น Blynk

เมื่อแตะเลือกจากขั้นตอนดังรูปที่ 4.106 หน้าต่างแอพจะกลับมาเป็นดังรูป ผู้ใช้งานสามารถย้ายตำแหน่งวิตเจ็ตไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้



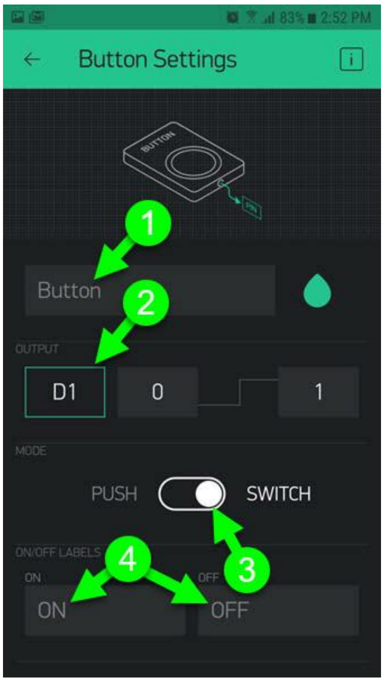
รูปที่ 4.107 หน้าต่างแอพหลังจากใส่วิตเจ็ต

แตะที่ตัววิตเจ็ตเพื่อตั้งค่าการใช้งาน งานครั้งนี้เป็นปุ่มกดดังนั้นวิตเจ็ตที่เลือกมาเป็นปุ่มสามารถแก้ไขชื่อปุ่มตามต้องการได้ แตะที่ PIN เพื่อกำหนดขาที่ต้องการใช้งาน



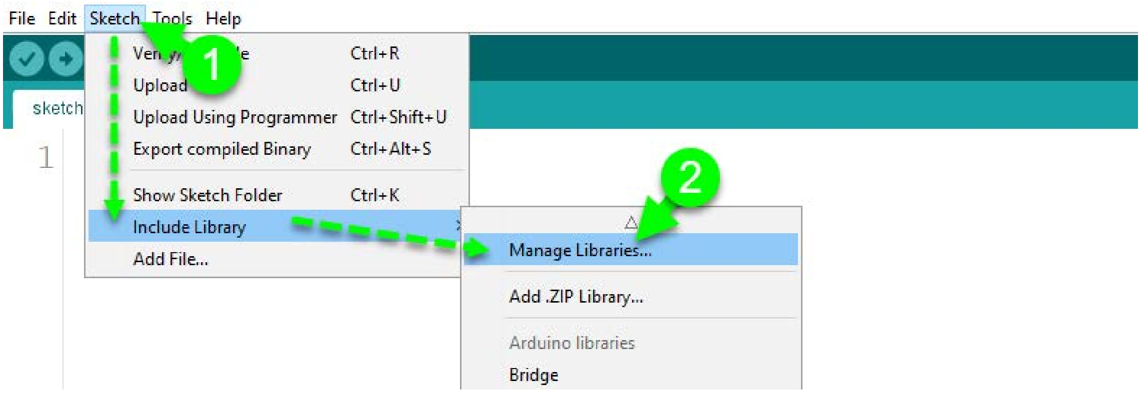
รูปที่ 4.108 การตั้งค่าวิตเจ็ต

ในตัวอย่างนี้เลือกใช้งานขาจริงแตะเลือกขา Digital และ D1 ซึ่งเป็นขาที่เชื่อมต่อกับ LED ตั้งรายละเอียดของปุ่ม (1) ตั้งชื่อปุ่มกด (2) เลือกขาพอร์ตที่ต้องการควบคุม (3) เลือกชนิดการทำงานของปุ่ม กดติดปล่อยดับเลือก PUSH กดติดกดดับเลือก SWITCH (4) กำหนดชื่อที่ต้องการให้ปรากฏที่ปุ่มเมื่อทำงานหรือหยุดทำงาน



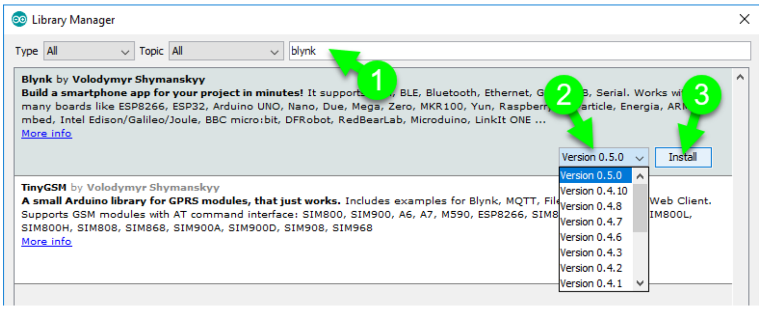
รูปที่ 4.109 การตั้งค่าวิตเจ็ต (2)

ส่วนของโค้ดโปรแกรมในบอร์ดทดลอง ต้องดำเนินการดาวน์โหลดไลบรารี่ Blynk ซึ่งสามารถทำได้ดังรูป



รูปที่ 4.110 เพิ่มไลบรารี่ Blynk ในโปรแกรม Arduino IDE

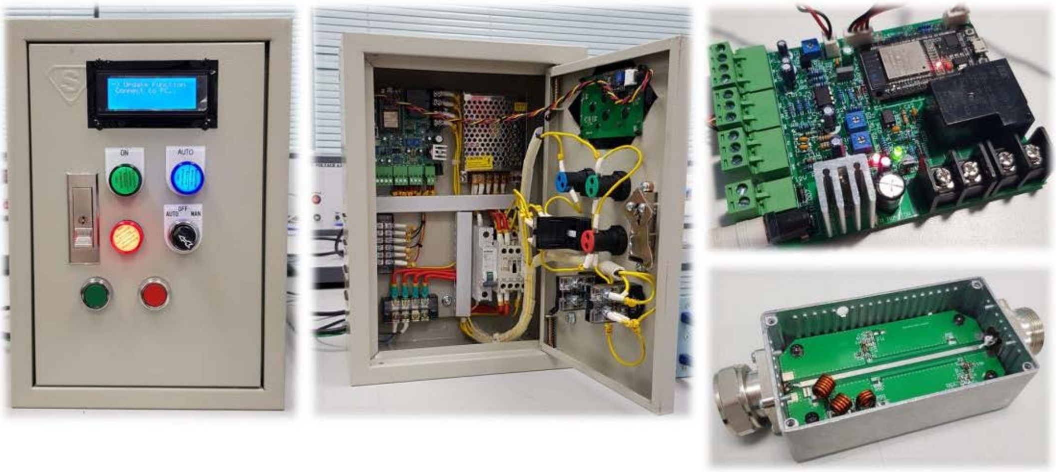
ติดตั้งไลบรารี่ (1) พิมพ์คำว่า blynk ในช่องค้นหา (2) เลือกเวอร์ชั่นล่าสุด (3) คลิกติดตั้ง



รูปที่ 4.111 ดาวน์โหลดไลบรารี่ Blynk

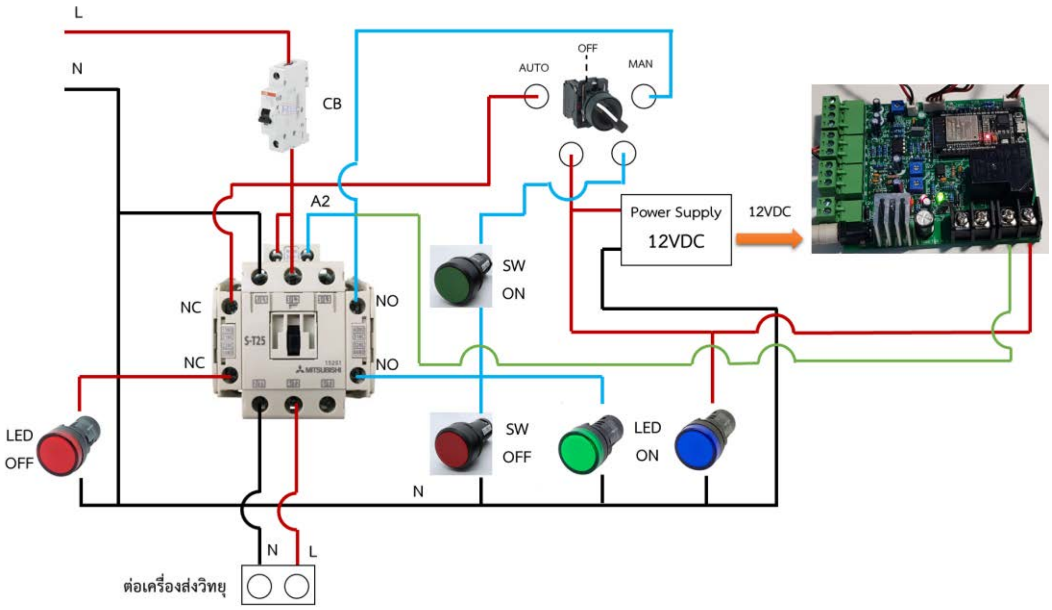
4.4.10. อุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

เครื่องต้นแบบของอุปกรณ์เฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของเครื่องวิทยุกระจายเสียงถูกติดตั้งให้อยู่ในตู้สำเร็จรูปเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ภายในตู้ควบคุมประกอบด้วยวงจรจ่ายไฟกระแสตรง 12V และวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ ด้านหน้าตู้ควบคุมมีไฟ LED แสดงสถานการณ์ทำงานของระบบ มีจอ LCD สำหรับแสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้ในปัจจุบัน ผู้ใช้งานสามารถเลือกการควบคุมได้ 2 ระบบ คือ การควบคุมแบบอัตโนมัติผ่านทาง Application บน Smart Phone และควบคุมจากสวิตช์ เปิด/ปิดที่ด้านหน้าตู้ควบคุม



รูปที่ 4.112 แสดงอุปกรณ์ระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

รูปที่ 4.113 แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิค ของสถานีวิทยุกระจายเสียง

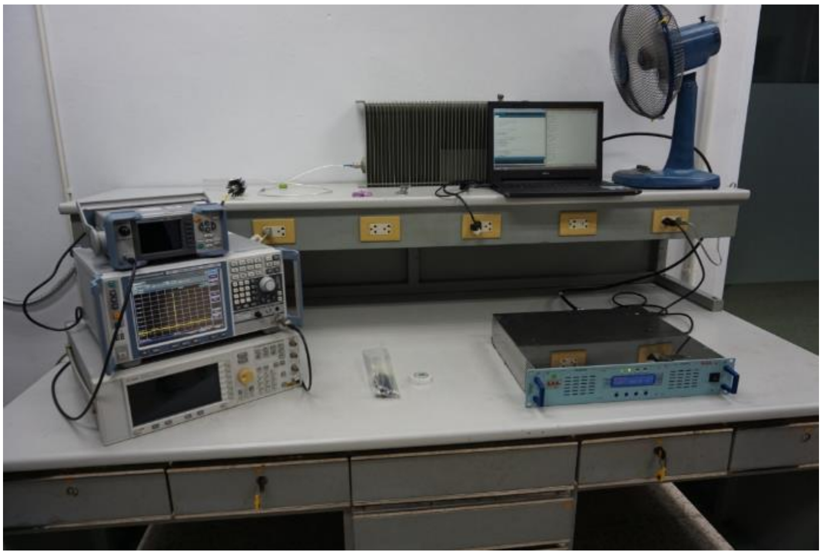


รูปที่ 4.114 แผนผังของตู้ควบคุมของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานี วิทยุกระจายเสียง

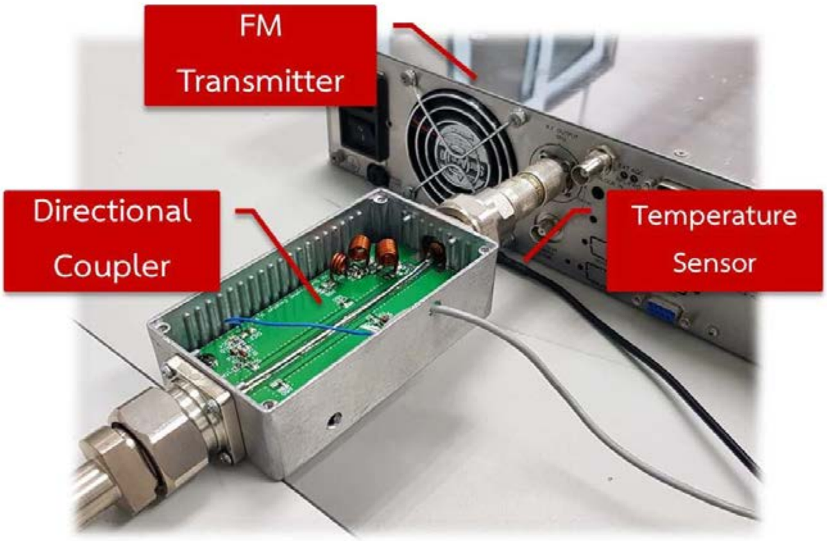
4.4.11. ทดสอบระบบออกอากาศในห้องปฏิบัติการ

จากการออกแบบระบบออกอากาศและได้สร้างอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทางผู้วิจัยได้นำมาทดสอบกับเครื่องส่งวิทยุที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกำลังส่ง 500 วัตต์ เพื่อทดสอบการทำงานและจำลองการทำงานให้เสมือนการใช้งานจริงมากที่สุด โดยในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง

ภายในประกอบด้วย ตัวกำเนิดสัญญาณวิทยุ FM (FM Exciter) วงจรขยายสัญญาณ (RF Power Amplifier) และวงจร Directional Coupler เพื่อทดสอบว่า Directional Coupler มีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณของเครื่องส่งวิทยุหรือไม่ โดยสัญญาณที่ออกจากเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงจะถูกส่งผ่าน Attenuator 70 dB ก่อนจะถูกส่งเข้าเครื่อง Spectrum Analyzer



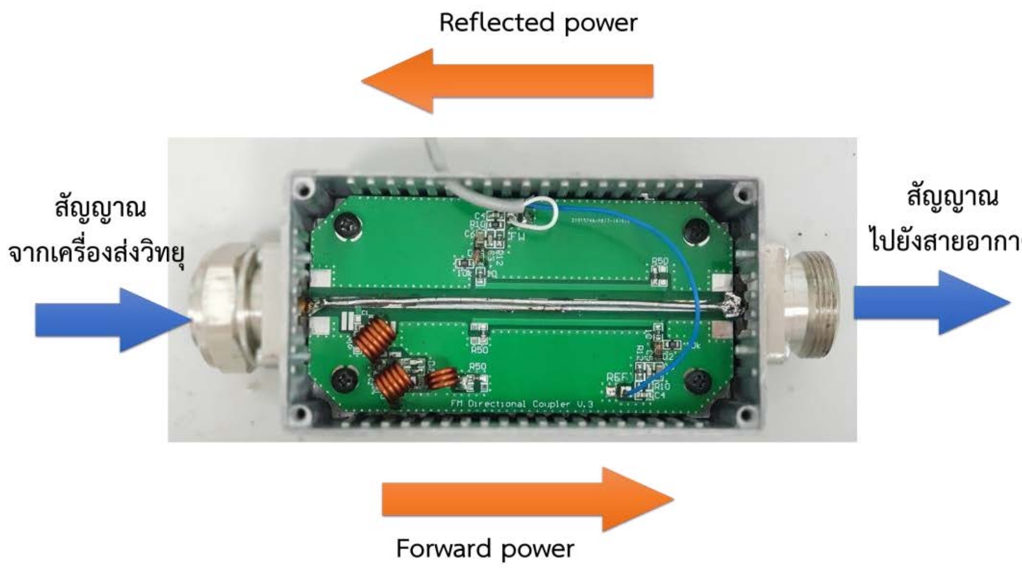
รูปที่ 4.115 การทดลองติดตั้ง Directional Coupler



รูปที่ 4.116 เครื่องส่งวิทยุที่ต่อกับ Directional Coupler

- **ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตจาก Directional Coupler ของเครื่องส่งวิทยุ**

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นเมื่อต้องการวัดค่ากำลังส่งออกอากาศ (Output power) ของเครื่องส่งวิทยุ สามารถทำได้โดยการติดตั้งวงจร Directional Coupler ไว้ที่ด้าน Output ของเครื่องส่งวิทยุ โดยเมื่อมีสัญญาณจากเครื่องส่งวิทยุป้อนไปยัง Directional Coupler จะให้ Output ของ Directional Coupler ที่เป็นสัญญาณไฟกระแสตรง (DC) ที่แปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป สัญญาณที่สามารถเดินทางผ่าน Directional Coupler ไปยังสายอากาศได้ เราจะเรียกสัญญาณนี้ว่า "Forward power" และสัญญาณที่ย้อนกลับมาจากสายอากาศผ่าน Directional Coupler กลับไปยังเครื่องส่งวิทยุเราจะเรียกสัญญาณนี้ว่า "Reflected power" ซึ่งผลการทดสอบ Directional Coupler ที่ออกแบบมีแสดงดังต่อไปนี้

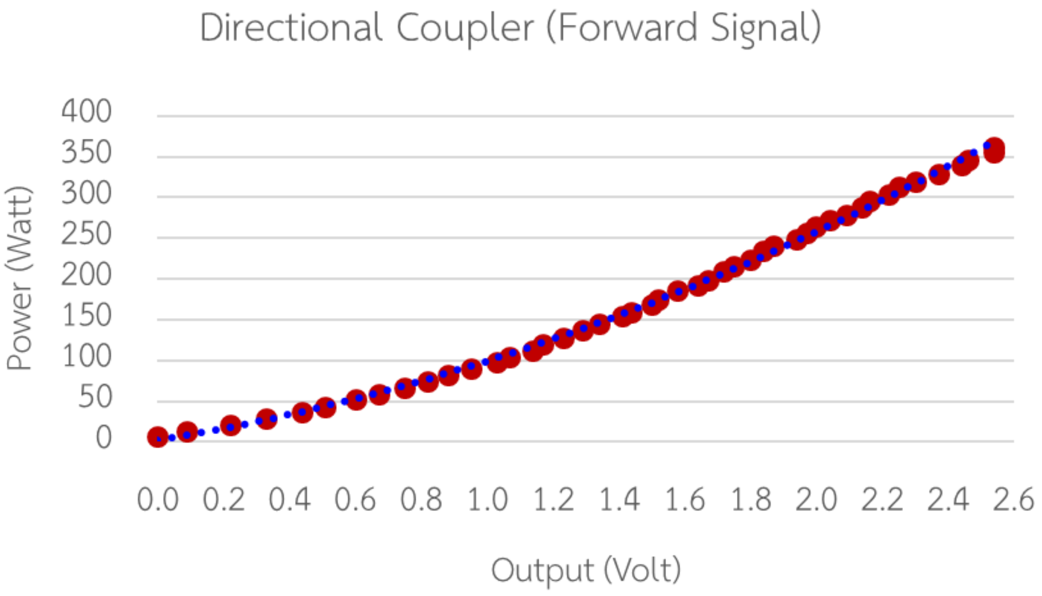


รูปที่ 4.117 ตำแหน่งของ Forward power และ Reflected power

จากการทดลองหาค่าการลดทองของ Directional Coupler เมื่อมีการส่งผ่านสัญญาณพบว่า เมื่อสัญญาณผ่านสัญญาณจากเครื่องส่งวิทยุไปยัง Dummy load และวัดสัญญาณที่สามารถส่งผ่านได้ โดยที่ Directional Coupler มีการลดทอนสัญญาณเพียง 0.02 dB เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Directional Coupler ไม่ส่งผลกระทบกับสัญญาณ Output power เครื่องส่งวิทยุที่จะส่งผ่านไปยังสายอากาศต่อไป

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบความแรงสัญญาณของเครื่องส่งวิทยุ

สถานะ	ความแรงของสัญญาณ [dBm]
ความแรงของสัญญาณ Output power ของเครื่องส่งวิทยุ ก่อน Directional Coupler	-17.60
ความแรงของสัญญาณ Output power ของเครื่องส่งวิทยุ เมื่อต่อผ่าน Directional Coupler	-17.62



รูปที่ 4.118 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Forward power และ DC Voltage

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Forward power และ DC Voltage ที่ได้จากการทดลองวัดอุปกรณ์ Directional Coupler ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น ซึ่งจะเป็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณ Input ของ Directional Coupler (คือสัญญาณ Output power จากเครื่องส่งวิทยุ) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ Output ของ Directional Coupler (สัญญาณ DC Voltage) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Forward power และ DC Voltage ของ Directional Coupler มาป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์เพื่อวิเคราะห์หาค่า Output power ของเครื่องส่งวิทยุในขณะที่กำลังออกอากาศอยู่ ทางผู้วิจัยได้สร้างตารางเทียบค่าหรือกราฟปรับเทียบ (Lookup table) ให้กับบอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์ในการหาค่า Output power ของเครื่องส่งวิทยุที่ถูกต้อง

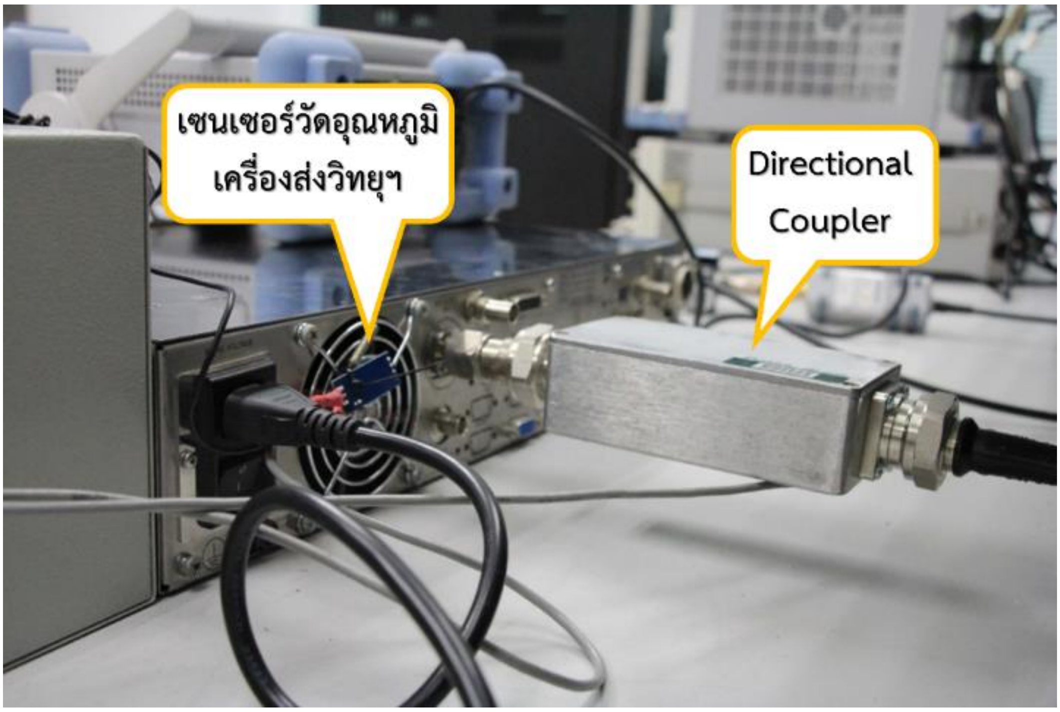
อุปกรณ์ Directional Coupler ที่มีการออกแบบและสร้างให้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกัน ทุกตัวจะที่ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Forward power และ DC Voltage ที่เหมือนกัน ดังนั้นหากนำ Directional Coupler ที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบไปใช้งานจริง ผู้ใช้งานไม่

จำเป็นที่จะต้องปรับจูนหรือสร้างตารางเทียบค่าหรือกราฟปรับเทียบ (Lookup table) ระหว่าง Forward power และ DC Voltage ใหม่ สามารถใช้ค่าการทดสอบที่ได้จากทางผู้วิจัยได้

- **การติดตั้งอุปกรณ์**

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้สามารถทำได้โดยนำ Directional Coupler ต่อที่ Output ที่อยู่ด้านหลังของของเครื่องส่งฯ และเชื่อมต่อ Directional Coupler เข้ากับบอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์เพื่อนำสัญญาณบางส่วนมาหาค่ากำลังออกอากาศของเครื่องส่งวิทยุ นอกจากนั้นภายในกล่องควบคุมประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์ที่เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 2 ตัว ตัวที่ 1 สำหรับวัดอุณหภูมิของห้องและตัวที่ 2 สำหรับวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ โดยจะวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุผ่านทางพัดลมระบายอากาศที่ด้านหลังของเครื่องส่งวิทยุ และภายในกล่องควบคุมจะประกอบด้วยวงจรตัดไฟสำหรับการควบคุมการปิด/เปิดเครื่องส่งวิทยุ

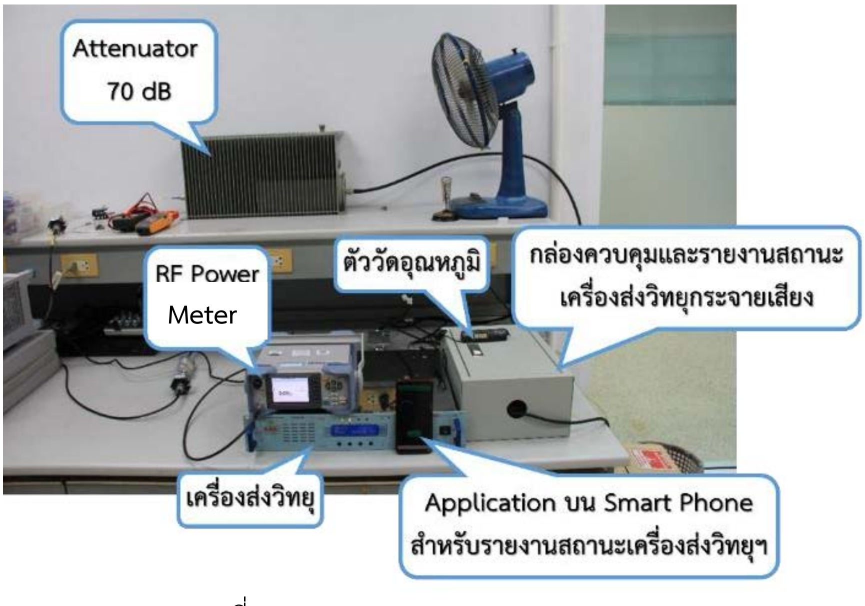
รูปที่ 4.119 การติดตั้งอุปกรณ์ของระบบ



รูปที่ 4.120 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

- **ผลการทดสอบระบบออกอากาศในห้องปฏิบัติการ**

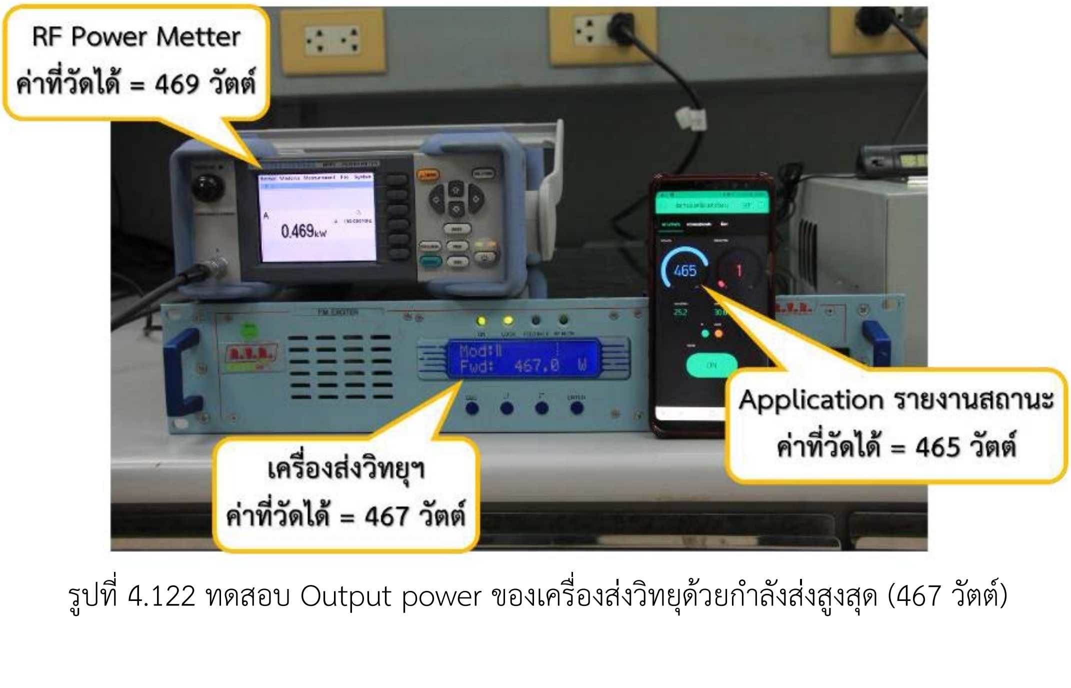
ในการทดสอบระบบออกอากาศในห้องปฏิบัติการทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการทำงานของระบบในแต่ละส่วนและจะทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากอุปกรณ์กับเครื่องมือวัด เพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยชุดทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ 70 dB และ RF Power meter เพื่อวัดกำลังออกอากาศของเครื่องส่งวิทยุฯ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบกับอุณภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์



รูปที่ 4.121 ทดสอบระบบออกอากาศ

- **ทดสอบ Output power ของเครื่องส่งวิทยุ**

ผลการทดสอบค่า Output power ของเครื่องส่งวิทยุ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการใช้งานเครื่องส่งวิทยุฯ การทดสอบจะแสดงค่าที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์การวัด 3 ตัว คือ 1. วัดค่าด้วย RF Power Meter 2. วัดค่าจากตัวเครื่องส่งวิทยุเอง และ 3. วัดค่าจากระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ ที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งวิทยุด้วยกำลังส่ง 467 วัตต์ (กำลังส่งสูงสุดของเครื่องส่งวิทยุ) เครื่อง RF Power Meter สามารถวัดความแรงได้ 469 วัตต์ และระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถวัดความแรงได้ 465 วัตต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก สามารถสรุปได้ว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ Output power ของเครื่องส่งวิทยุได้อย่างถูกต้อง กำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) คือค่าที่มีสัญญาณย้อนกลับเข้ามาที่เครื่องส่งวิทยุ ซึ่งในขณะนี้เครื่องส่งวิทยุได้ต่ออยู่กับ Dummy load 50 โอมห์ ทำให้เครื่องส่งวิทยุสามารถส่งกำลังงานไปยัง load ได้ดี (จะถือได้ว่ามีสัญญาณย้อนกลับเข้ามาที่เครื่องส่งฯ น้อยมาก) ดังนั้นที่หน้าจอ Application ของระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ จะแสดงค่ากำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) 1 วัตต์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่งออกไปเป็นไปที่กล่าวเอาไว้ข้างต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถวัดกำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 4.122 ทดสอบ Output power ของเครื่องส่งวิทยุด้วยกำลังส่งสูงสุด (467 วัตต์)

รูปที่ 4.123 ทดสอบ Output power ของเครื่องส่งวิทยุด้วยกำลังส่งสูงสุด (202 วัตต์)

- **ทดสอบวัดอุณหภูมิ**

ทางผู้วิจัยได้ทดสอบการวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุและอุณหภูมิห้องด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั่วไป เปรียบเทียบกับอุณภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์ จากรูปผลการทดสอบการวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุแสดงให้เห็นว่าเมื่อวัดอุณหภูมิด้วยตัววัดอุณหภูมิทั่วไป ค่าที่วัดได้ 31.5 องศา และเมื่อวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุด้วยตัววัดอุณหภูมิจากอุปกรณ์ ค่าที่วัดได้ 31.6 องศา จากนั้นทำการทดสอบวัดอุณหภูมิห้อง ซึ่งจากรูปผลการทดสอบการวัดอุณหภูมิของห้องแสดงให้เห็นว่าเมื่อวัดอุณหภูมิด้วยตัววัดอุณหภูมิทั่วไป ค่าที่วัดได้ 26.4 องศา และเมื่อวัดอุณหภูมิห้องด้วยตัววัดอุณหภูมิจากอุปกรณ์ ค่าที่วัดได้ 26.4 องศา จะเห็นได้ว่าผลการวัดอุณหภูมิทั้ง 2 แบบจากตัววัดอุณหภูมิทั่วไปและตัววัดอุณหภูมิจากอุปกรณ์ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันไม่เกิน 0.5 องศา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง

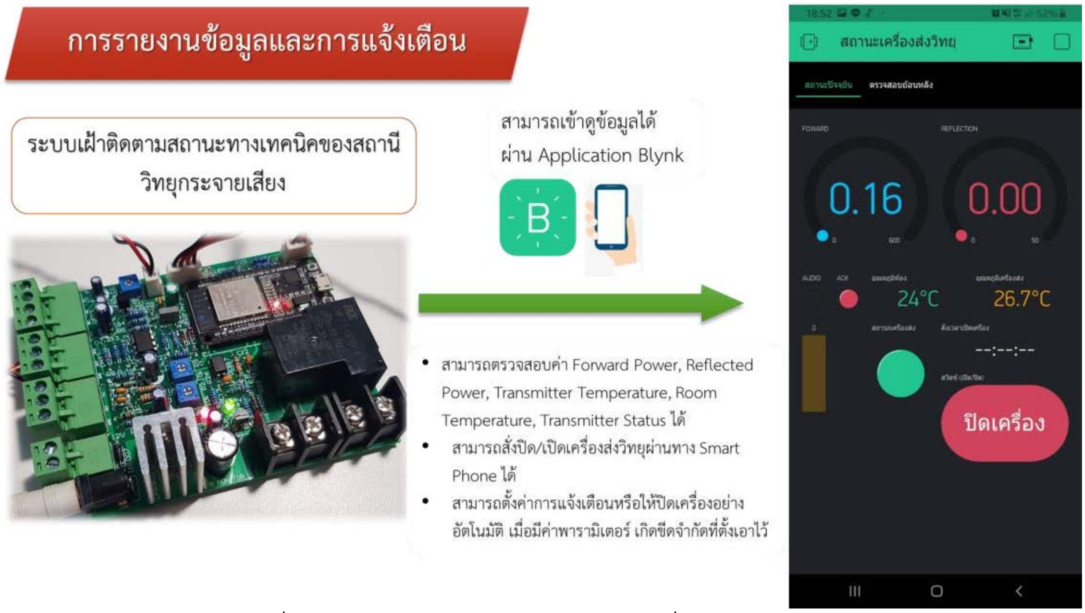
รูปที่ 4.124 ทดสอบการวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ

รูปที่ 4.125 ทดสอบการวัดอุณหภูมิห้อง

4.4.12. การแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องส่งวิทยุผ่าน Internet of things (IoT)

เมื่อสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องส่งวิทยุได้แล้ว ระบบจะสามารถแสดงค่าที่หน้าเครื่องส่งวิทยุในรูปแบบเวลาจริง (Real-time) Application Blynk โดยสามารถ Download มาที่ Smart Phone และเปิดเข้าไปใช้งานได้โดยสะดวก หน้าต่างของ Application จะประกอบด้วย 3 หน้าต่าง คือ 1. หน้าต่างแสดงสถานะของเครื่องส่งวิทยุแบบ Real-time 2. หน้าต่างสำหรับการควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ และ 3. หน้าต่างการตั้งค่า

ขีดจำกัดของเครื่องส่งวิทยุ โดยเมื่อค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเกินขีดจำกัด ระบบจะทำการแจ้งเตือนมายัง Application Line ทันที



รูปที่ 4.126 การรายงานข้อมูลและการสั่งการของระบบ

รูปที่ 4.127 หน้าต่างของ Application ของระบบสั่งการเครื่องส่งวิทยุ

รูปที่ 4.128 หน้าแอปพลิเคชันระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ เมื่อแสดงผลย้อนหลัง

การแจ้งเตือนมายังผู้ดูแลระบบเป็นอีกหนึ่งความสามารถของของระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ โดยที่เมื่อค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเกินขีดจำกัดระบบจะทำการแจ้งเตือนมายัง Application Line ให้ทราบโดยทันที ในการทดสอบการแจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อเครื่องส่งวิทยุเกิดความผิดปกติ จะทำการตั้งค่าระดับความแรงที่กำลังส่งที่ต้องการให้แจ้งเตือน โดยการทดสอบเบื้องต้นจะตั้งค่าให้มีการแจ้งเตือนเมื่อกำลังส่งมากกว่า 250 วัตต์ เป็นกำลังส่งที่สูงผิดปกติ และกำลังส่งที่มากกว่า 300 วัตต์ เป็นกำลังส่งที่สูงระดับอันตรายและจะทำการปิดเครื่องโดยอัตโนมัติ

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนและการปิดเครื่องอัตโนมัติ

กำลังส่ง (วัตต์)	มีการแจ้งเตือน	เครื่องส่งวิทยุปิดการทำงาน
200	-	-
220	-	-
240	-	-
260	✓	-
280	✓	-
300	✓	✓

การทดสอบการแจ้งเตือนและการปิดเครื่องอัตโนมัติเมื่อเครื่องส่งวิทยุเกิดความผิดปกติ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4 เมื่อค่ากำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุที่มากกว่า 250 วัตต์ พบว่ามีการแจ้งเตือนไปยังApplication Line โดยทันทีและเมื่อค่ากำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุที่มากกว่า 300 วัตต์ พบว่ามีการแจ้งเตือนและเครื่องส่งวิทยุปิดการทำงานโดยทันทีเช่นกัน

รูปที่ 4.129 ผลการแจ้งเตือนเมื่อกำลังส่งมากกว่า 250 วัตต์

รูปที่ 4.130 ผลการแจ้งเตือนและปิดเครื่องอัตโนมัติเมื่อกำลังส่งมากกว่า 300 วัตต์

ในการทดสอบจะทำการสั่งปิดและเปิดเครื่องผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ซึ่งเป็น Application ที่ทางผู้วิจัยออกแบบขึ้นเพื่อรายงานสถานะและควบคุมการทำงานเครื่องส่งวิทยุฯ ในส่วนนี้เป็นการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถสั่งปิดและเปิดเครื่องจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk ได้จริงหรือไม่

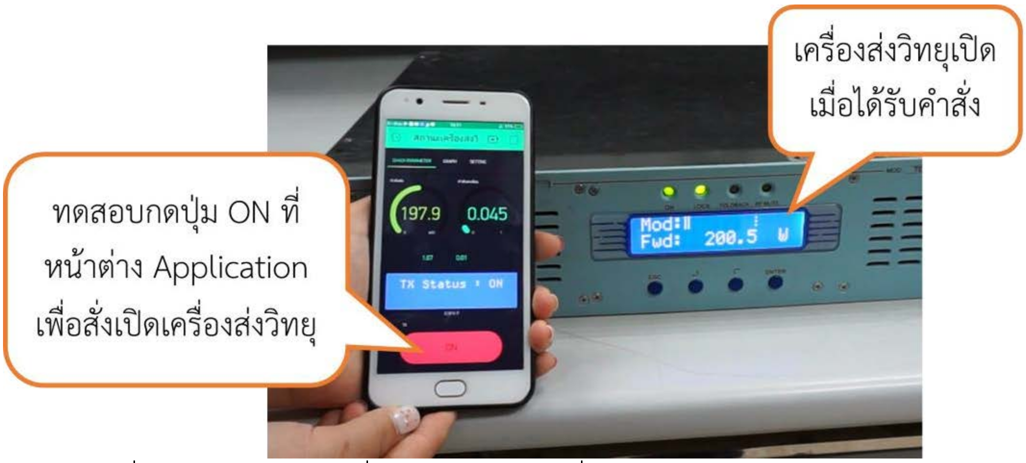
- **ทดสอบการสั่งปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk**

เมื่อกดปุ่มสั่งการปิดเครื่องส่งวิทยุ “ OFF ” ที่หน้า CHACK PARAMETER ของแอปพลิเคชัน Blynk มีผลทำให้เครื่องส่งวิทยุอยู่ในสถานะปิดการทำงาน

รูปที่ 4.131 ทดสอบการสั่งปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk

- **ทดสอบการสั่งเปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk**

เมื่อกดปุ่มสั่งการปิดเครื่องส่งวิทยุ “ ON ” ที่หน้า CHACK PARAMETER ของแอปพลิเคชัน Blynk มีผลทำให้เครื่องส่งวิทยุอยู่ในสถานะเปิดการทำงาน และพร้อมใช้งาน

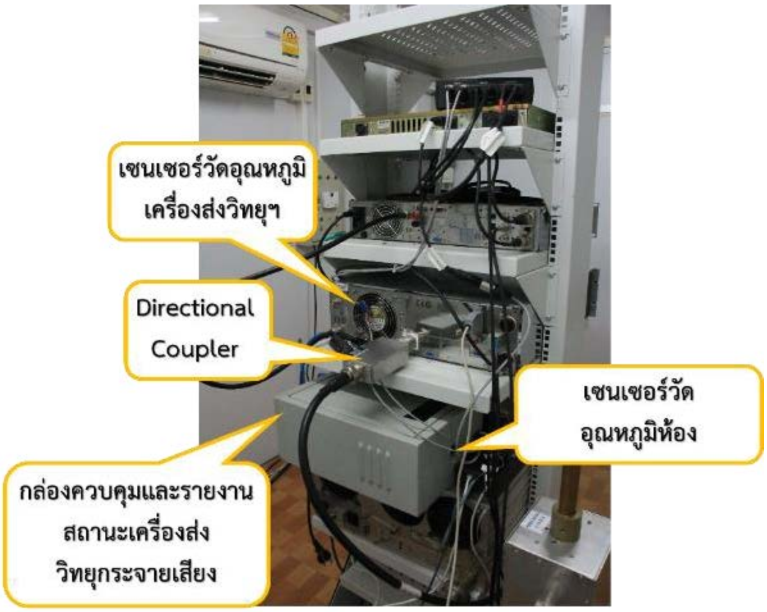


รูปที่ 4.132 ทดสอบการสั่งเปิดการทำงานเครื่องส่งวิทยุจากหน้าแอปพลิเคชัน Blynk

4.4.13. ทดสอบใช้งานจริงกับเครื่องส่งวิทยุฯ ที่สถานีวิทยุกระจายเสียงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้วิจัยได้นำระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.133 สถานีวิทยุกระจายเสียงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



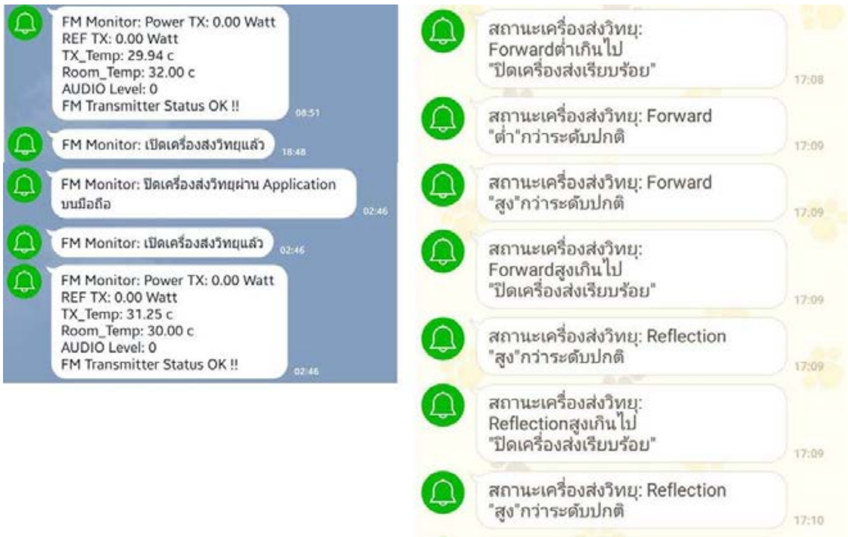
รูปที่ 4.134 ติดตั้งระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ กับสถานีวิทยุกระจายเสียง
ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-สุรนารี พบว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องส่งวิทยุฯ ของสถานีได้เป็นอย่างดี สามารถวัดค่ากำลังส่ง (forward power) ได้ 379 วัตต์ และกำลังสะท้อนกลับ (reflected power) ได้ 18 วัตต์ ใกล้เคียงกับค่าที่แสดงบนเครื่องส่งวิทยุฯ ที่กำลังใช้งานอยู่ในขณะนั้น และสามารถรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ ไปแสดงบนSmart Phone แบบ Real-time ได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 4.135 ระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ แสดงสถานะของเครื่องส่งวิทยุ
เมื่อทดสอบใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียง

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้ทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุฯ ที่กำลังออกอากาศอยู่ในขณะนั้น พบว่าเมื่อวัดอุณหภูมิด้วยตัววัดอุณหภูมิทั่วไป ค่าที่วัดได้ 34.1 องศา และเมื่อวัดอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุด้วยตัววัดอุณหภูมิจากอุปกรณ์ ค่าที่วัดได้ 34.3 องศา ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถรายงานค่าอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 4.136 ระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ แสดงสถานะอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ เมื่อทดสอบใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียง



รูปที่ 4.137 แสดงตัวอย่างข้อความของ Application Line ที่ส่งมาจากระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ

4.4.14. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ

ในการใช้งานระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ ซึ่งสามารถรายงานสถานะปัจจุบัน ควบคุมการทำงานปิด/เปิดเครื่องส่งวิทยุฯ และยังสามารถแจ้งเตือนเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งผิดปกติไป จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องส่งวิทยุฯ ในสภาพแวดล้อมปกติ สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุที่เป็นปกติได้ดังนี้

ตารางที่ 4-5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการทำงานของเครื่องส่งวิทยุ

พารามิเตอร์	สถานะ		
	ปกติ	แจ้งเตือน	อันตราย
กำลังส่งออกอากาศ (Forward power)	ต่ำกว่า 550 วัตต์	550 – 600 วัตต์	สูงกว่า 600 วัตต์
กำลังสะท้อนกลับ (Reflected power)	ต่ำกว่า 30 วัตต์	30 – 40 วัตต์	สูงกว่า 40 วัตต์
อุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุฯ (transmitter temp)	ต่ำกว่า 40 องศา	40 – 45 องศา	สูงกว่า 45 องศา
อุณหภูมิของห้อง (room temp)	ต่ำกว่า 30 องศา	30 - 35 องศา	สูงกว่า 35 องศา

ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาแสดงตามตารางที่ 4-5 เป็นพารามิเตอร์ที่พิจารณาจากคู่มือการใช้งานของเครื่องส่งวิทยุและสภาพแวดล้อมของสถานีวิทยุมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทั้งนี้หากมีการนำไปใช้งานกับสถานีวิทยุอื่น ๆ สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมของแต่ละเครื่องตามคู่มือการใช้งานและสภาพแวดล้อมแต่ละสถานี

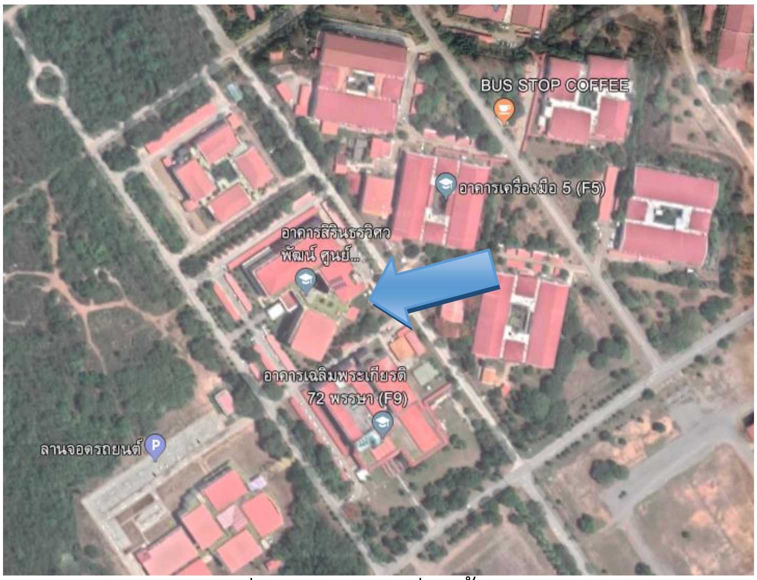
4.4.15. สรุปผลการทดสอบ

ส่วนนี้จะกล่าวถึงทดสอบระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าติดตามเครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่ง 500 วัตต์และนำมาใช้งานกับเครื่องส่งวิทยุที่กำลังออกอากาศจริง อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงสามารถเฝ้าติดตาม กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) อุณหภูมิของห้อง (room temp) และสถานการณ์ทำงานของเครื่องส่ง (Transmitter Status) ได้ ระบบสามารถรายงานพารามิเตอร์ดังกล่าวผ่านทาง Smart Phone ด้วย Application Blynk เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้ามาตรวจสอบ

สถานะของเครื่องส่งได้ตลอดเวลา และยังสามารถแจ้งเตือนเป็นข้อความผ่านทาง Application Line หรือปิดเครื่องส่งอย่างอัตโนมัติเมื่อเครื่องส่งวิทยุเกิดความผิดปกติเกินกว่าที่ตั้งเอาไว้

4.5 ดำเนินการสร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีเสาอากาศสูง 60 เมตร

เพื่อที่จะทดสอบระบบทั้ง 3 ระบบอันได้แก่ การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง และอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างสถานีวิทยุที่มีเสาอากาศสูง 60 เมตร เพื่อใช้เป็นสถานีสำหรับการทดสอบระบบดังกล่าว



รูปที่ 4.138 สถานที่ติดตั้งสถานีวิทยุกระจายเสียง

โดยที่สถานที่ที่ติดตั้งสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีเสาอากาศสูง 60 เมตร ตั้งอยู่ที่อาคารสิรินธรวิศวพัฒน์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา แสดงรายละเอียดการสร้างเสาส่งสัญญาณของสถานีวิทยุดังนี้

รูปที่ 4.139 แสดงการเจาะเสาเข็มเพื่อสร้างจุดยึดสริงของเสาส่งสัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียง

รูปที่ 4.140 แสดงการเจาะเสาเข็มเพื่อสร้างฐานเสาส่งสัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียง

รูปที่ 4.141 หลุมสำหรับสร้างฐานเสาส่งสัญญาณ

รูปที่ 4.142 เทคอนกรีตบริเวณฐานเสาส่งสัญญาณ

รูปที่ 4.143 เสาอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่สร้างสำเร็จแล้ว

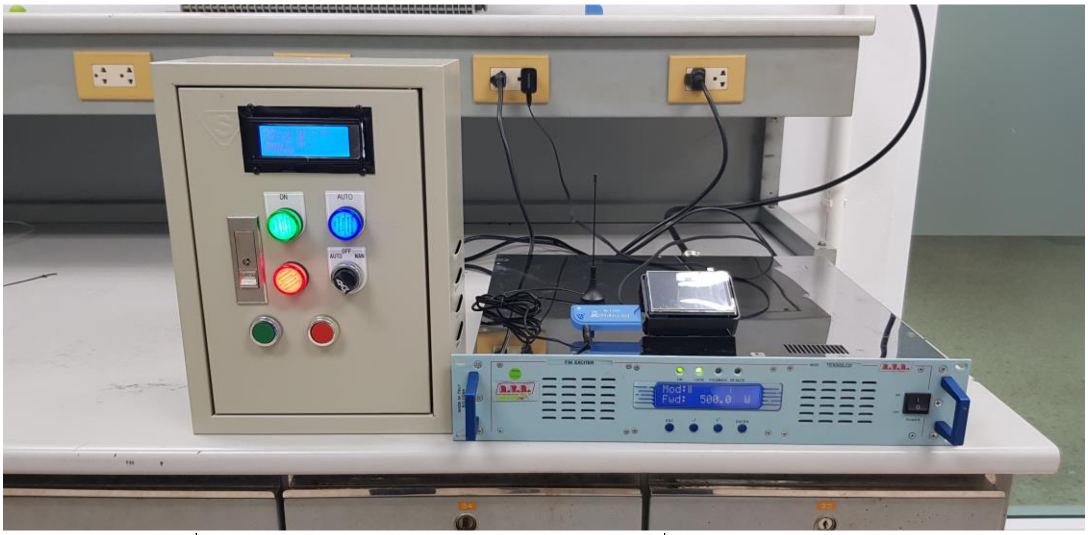
เมื่อเสาส่งสัญญาณดำเนินการสร้างเสร็จ ทางผู้วิจัยได้ติดตั้งสายอากาศสำหรับการกระจายเสียงวิทยุ FM โดยสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาณวิทยุกระจายเสียง ดังกล่าวเป็นสายอากาศโพลาไรซ์วงกลม เชื่อมต่อแบบแถวลำดับ (Array Antenna) จำนวน 4 ต้น สามารถทำงานครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 87.5 MHz ถึง 107.75 MHz

รูปที่ 4.144 ทดสอบออกอากาศกระจายเสียงด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์

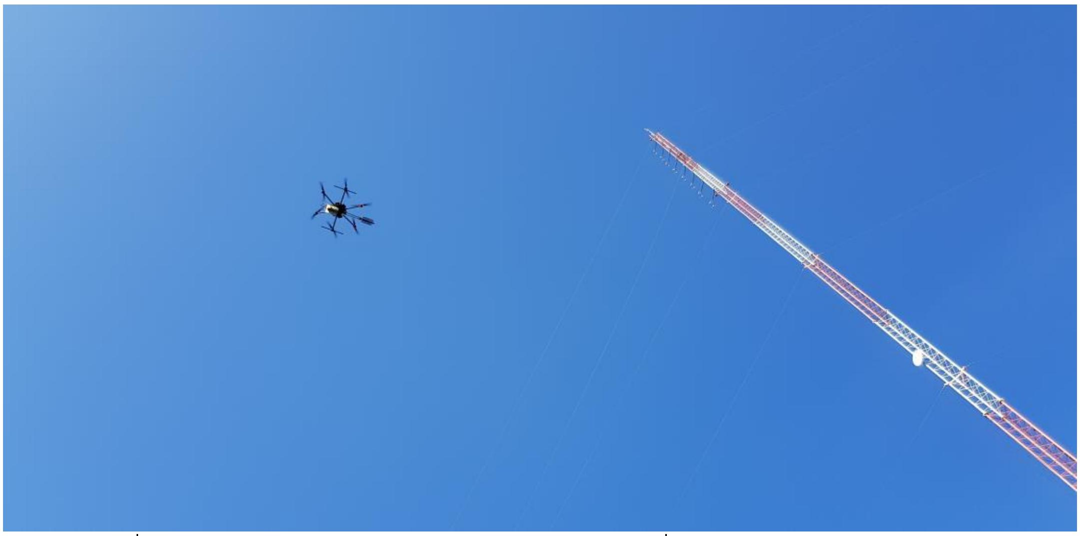
สถานีวิทยุกระจายเสียงในงานวิจัยนี้ส่งออกอากาศด้วยเครื่องส่งขนาด 500 วัตต์ ด้วยเครื่องส่งของบริษัท R.V.R. โมเดล TEX502LCD และมีการติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณผ่านแถบ (Cavity Bandpass Filter) เพื่อให้การออกอากาศมีระดับการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนดของ กสทช. (ระดับไม่น้อยกว่า 80 dBc)

4.6 ทดสอบอุปกรณ์ทั้ง 3 ระบบกับสถานีวิทยุกระจายเสียงที่สร้างขึ้น

เมื่อดำเนินการสร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ส่งออกอากาศด้วยเครื่องส่งขนาด 500 วัตต์และมีการออกอากาศมีระดับการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนดของ กสทช. (ระดับไม่น้อยกว่า 80 dBc) เสร็จสิ้น ลำดับต่อมาทางผู้วิจัยได้นำมาเป็นสถานีเพื่อใช้ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 3 ระบบ โดยที่ระบบการวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงและอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาติดตั้งที่สถานีส่ง และเปิดใช้งานทั้ง 2 ระบบพร้อม ๆ กัน เพื่อแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ระบบสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างไม่มีปัญหาใดๆ ทั้งนี้ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงก็จะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุดังกล่าวเช่นกัน



รูปที่ 4.145 ทดสอบอุปกรณ์ภายในสถานีวิทยุที่ออกอากาศกระจายเสียง
ด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์



รูปที่ 4.146 ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียง
ที่ออกอากาศกระจายเสียงด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาด 500 วัตต์

4.7 คุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ

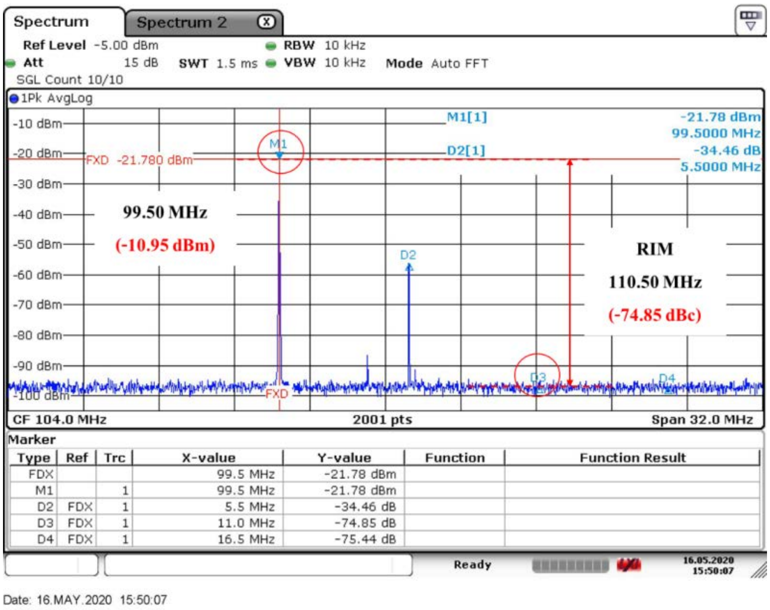
สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้มีการอนุญาตให้มีผู้ทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียงสามารถตั้งสถานีวิทยุกระจายเสียงได้ โดยมีข้อกำหนดเรื่องมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม โดยที่เครื่องส่งของสถานีวิทยุที่จะส่งออกจะต้องผ่านการตรวจมาตรฐานทางเทคนิคเสียก่อน เพื่อไม่ให้ส่งผลให้เกิดการรบกวนในย่านความถี่อื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรบกวนการสื่อสารระหว่างเครื่องบินกับสถานีควบคุมการบินภาคพื้นดิน

ถึงแม้ว่าเครื่องส่งวิทยุที่ผ่านการตรวจมาตรฐานทางเทคนิคเรียบร้อยแล้ว แต่เมื่อนำมาใช้งานจริงก็อาจจะทำให้ก่อสัญญาณรบกวนในย่านความถี่วิทยุการบินได้ ซึ่งอาจจะเกิดได้จากหลายสาเหตุ อาทิเช่น เมื่อนำเครื่องส่งที่ผ่านการตรวจมาตรฐานทางเทคนิคแล้วไปติดตั้งใช้งานจริงในสถานี ซึ่งในบางครั้งการติดตั้งระบบส่ง สายส่ง สายอากาศยังไม่ได้มาตรฐาน หรือ มีการใช้งานที่ปราศจากการดูแลรักษาที่ถูกต้องทำให้ระบบกระจายเสียงวิทยุเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วก่อนเวลาอันควร สิ่งเหล่านี้มีส่วนในการสร้างการแพร่แปลกปลอมที่ไปรบกวนวิทยุการบินเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการสร้างการแพร่แปลกปลอมแบบ Intermodulation ซึ่งเกิดจากการผสมคลื่นวิทยุของสถานีตัวเองกับสถานีข้างเคียงที่ออกอากาศในพื้นที่ใกล้กัน

โครงการวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการสร้างสถานีสาธิตต้นแบบที่ออกอากาศด้วยเครื่องส่งวิทยุที่ผ่านการตรวจมาตรฐานทางเทคนิคเรียบร้อยแล้ว ส่งออกอากาศด้วยขนาดกำลังส่ง 500 วัตต์ เสาส่งวิทยุสูง 60 เมตร สถานที่ตั้งสถานีอยู่ที่อาคารสิรินธรวิศวพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สถานีสาธิตต้นแบบได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณความถี่ผ่านแถบ (Band Pass Filter : BPF) เพื่อป้องกันไม่ให้มีสัญญาณใดๆ แพร่ปลอกปลอมออกไปรบกวนย่านความถี่อื่น โดยกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต้นแบบเป็นไปตามข้อกำหนดของ กสทช. คือ ระดับกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต่ำกว่ากำลังคลื่นพาห์อย่าง 70 dBc และภายในรัศมี 1 กิโลเมตรของถานีที่ตั้งของสถานีวิทยุกระจายเสียงไม่มีสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นตั้งอยู่

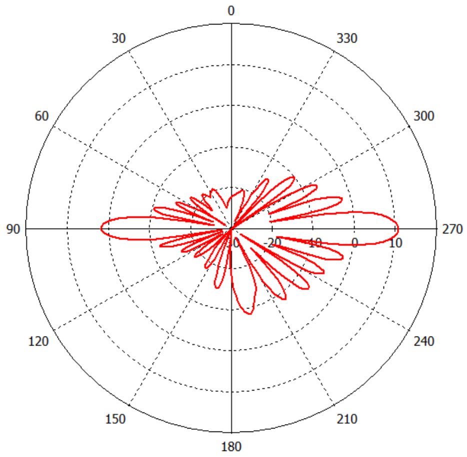
รูปที่ 4.147 สถานีวิทยุกระจายเสียงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ความถี่ 99.50 MHz)

รูปที่ 4.148 เครื่องส่งและระบบสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ความถี่ 99.50 MHz)

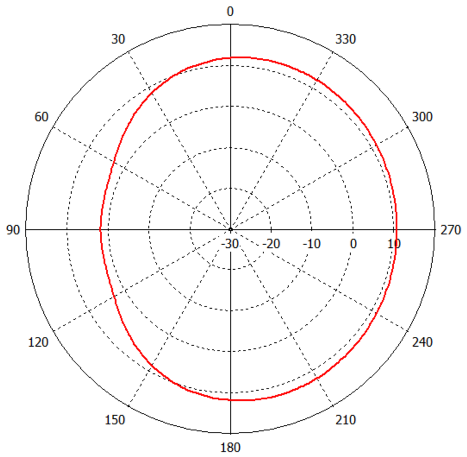


รูปที่ 4.149 ผลการทดสอบสัญญาณแปลกปลอม RIM ของเครื่องส่งวิทยุของสถานีสาธิตต้นแบบ

สำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบส่งสัญญาณก็คือ สายอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่มีการมอดูเลตในระบบ FM และอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุแล้วส่งออกอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ แต่ส่วนใหญ่ผู้ออกแบบมักเลือกชนิดของสายอากาศที่มีการแผ่กำลังของคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นแบบแผ่รอบตัวในระนาบเดี่ยว ดังแสดงในภาพเพื่อที่จะได้ส่งสัญญาณออกไปเป็นวงกว้างในทิศทางรัศมีของวงกลม



(ก) Vertical



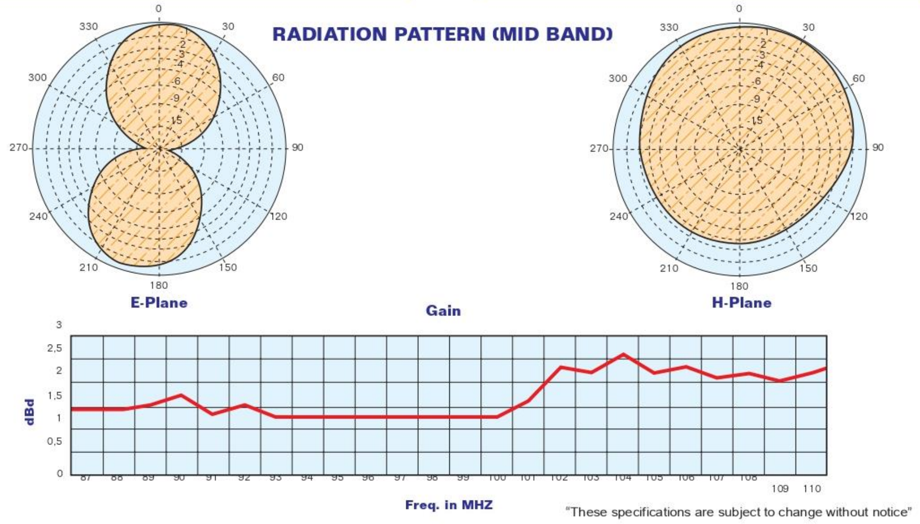
(ข) Horizontal

รูปที่ 4.150 การแผ่กำลังของคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นแบบแผ่รอบตัวในระนาบเดี่ยว

สิ่งที่ใช้แสดงคุณสมบัติของสายอากาศอีกอย่างหนึ่งก็คือ สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ ซึ่งทำให้เราสามารถพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศได้โดยการพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่สนใจ โดยทั่วไปแล้วสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มจะเป็นแบบสายอากาศแถวลำดับ (Array Antennas) กล่าวคือ การนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงใหเป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกวาองคประกอบ (element) ซึ่งการนำเอาองคประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะใหสมรรถนะของสายอากาศเพิ่มขึ้น ขอดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะทำใหสามารถเพิ่มคาสภาพเจาะจงทิศทางและคาอัตราขยายของสายอากาศได้นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนใหแต่ละองคประกอบ ซึ่งจะทำใหสามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่เราต้องการได้อีกด้วย

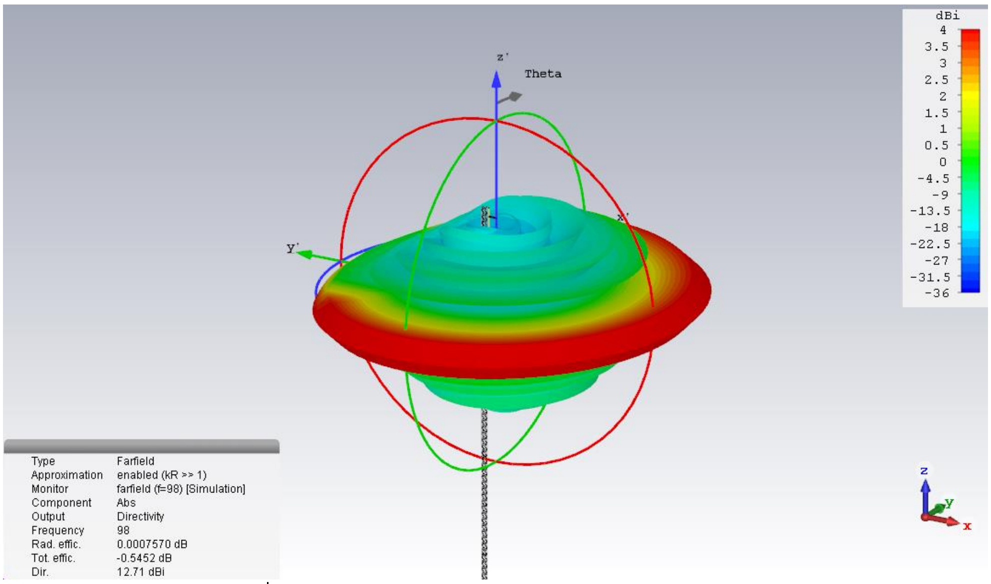
ELECTRICAL DATA	
Frequency range	87.5÷108 MHz
Impedance	50 Ohm
Connectors	N or 7/16" female or 7/8" EIA
Max Power	800W (N) – 2KW (7/16") – 3.5KW (7/8" EIA)
VSWR	≤ 1.35:1 Average
Polarization	Vertical
Gain	See table (referred to half-wave dipole)
Pattern	Omni directional ± 1.5 dB in free space Omni directional ± 3 dB with 100mm dia. pole
Lightning protection	All metal parts DC grounded

MECHANICAL DATA	
Dimensions	1360x1100x180 mm
Weight	9 kg with hardware mounting
Wind surface	0.06 m^2
Wind load	10.1 kg (wind speed at 160 km/h – without radome)
Max wind velocity	220 km/h.
Materials	External parts: stainless steel Internal parts: passivated aluminium Radome: fiberglass (option)
Icing protection	Feed point radome (optional)
Radome	Optional
Mounting	With special pipe clamps 50÷110 mm dia.

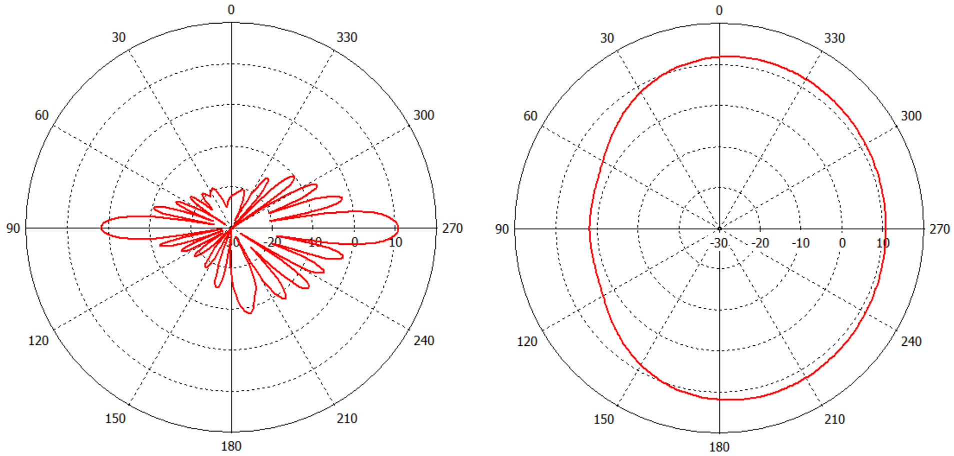


รูปที่ 4.151 คุณสมบัติของสายอากาศของสถานีสาธิตต้นแบบ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศของสถานีสาธิตต้นแบบ ซึ่งได้ทำการติดตั้งเป็นแบบสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น โดยแต่ละต้นมีระยะห่าง 2.56 เมตร (ระยะ 0.85 แลมด้าที่ความถี่ใช้งาน ตามคำแนะนำจากคู่มือการใช้งานของสายอากาศ) ก่อนทำการติดตั้งสายอากาศทางผู้วิจัยได้จำลองการทำงานของสายอากาศแถวลำดับของสถานีวิทยุสาธิตเพื่อจำลองแบบรูปการแพร่พลังงานของสายอากาศ จากผลการทดสอบพบว่า สายอากาศแถวลำดับทั้ง 8 ต้น ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง 12.71 dBi และอัตราขยาย 12.16 dB ทิศทางของโลปหลัก (Main lobe) ในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) พุ่งออกในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ (มุม 270 องศา ดังรูปที่ 4.153) และทิศทางของโลปหลัก (Main lobe) ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) พุ่งออกในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ (มุม 270 องศา ดังรูปที่ 4.153 (ก)) จากรูปการณ์แพร่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าจะเห็นว่าทิศทางของสัญญาณแพร่ออกที่ทางด้านหน้าเป็นหลัก มีส่วนน้อยที่จะมีทิศทางแพร่ขึ้นด้านบน (ด้านบนคือ มุม 0 องศา ดังรูปที่ 4.153 (ก))



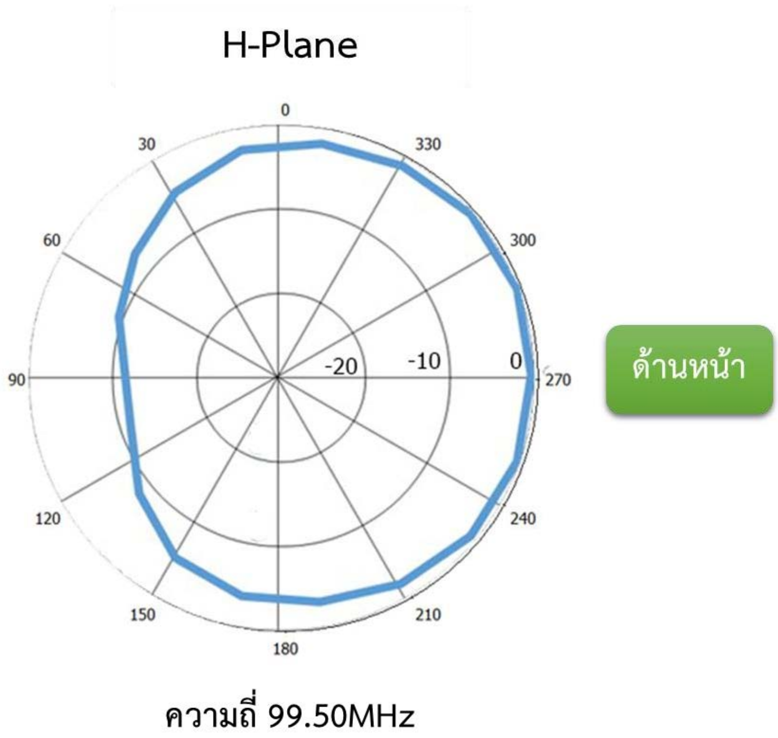
รูปที่ 4.152 แบบจำลองเสาส่งวิทยุของสถานีสาธิต
และผลการจำลองการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติของสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 8 ต้น



(ก) ระนาบ E-Plane (ข) ระนาบ H-Plane

รูปที่ 4.153 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติของสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 8 ต้น

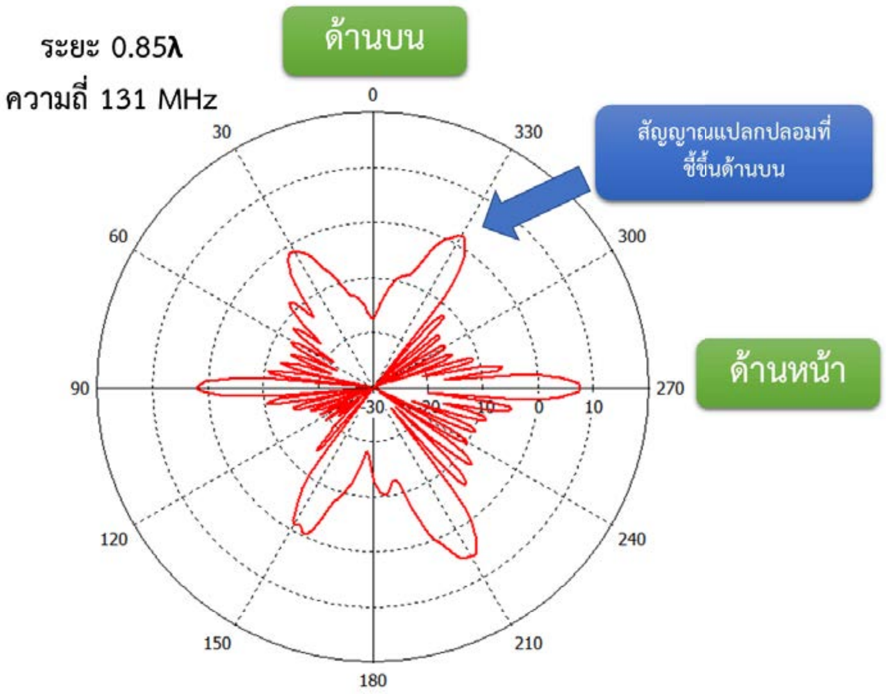
หลังจากได้ทำการติดตั้งสายอากาศเรียบร้อยแล้วทางผู้วิจัยได้ทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะใช้ตัวโดรนบินทดสอบที่เสาส่งวิทยุกระจายเสียงรอบทิศทางและในแนวตั้งเป็นทางกระบอกเพื่อยืนยันการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวของสายอากาศ



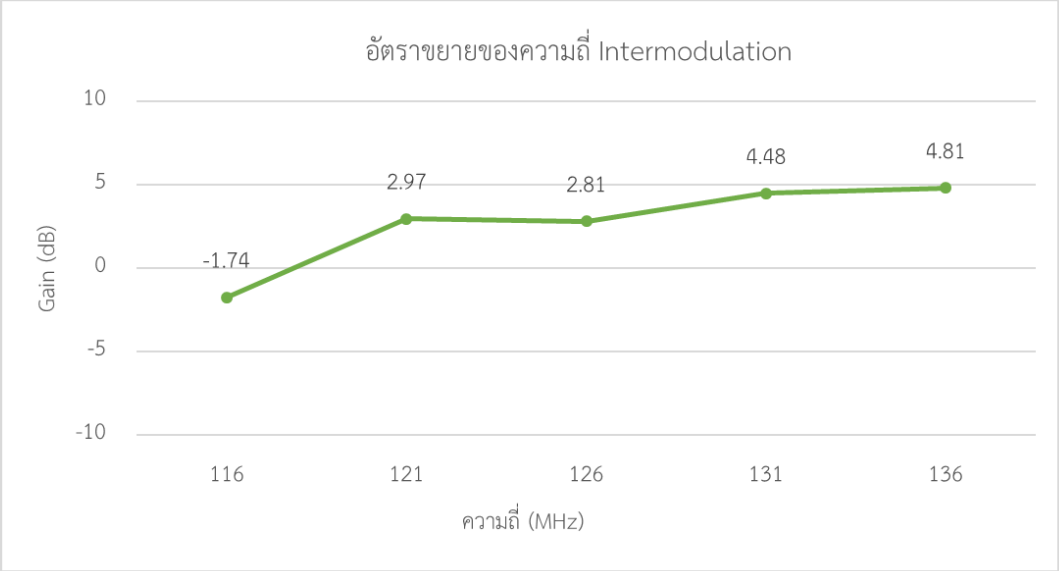
รูปที่ 4.154 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต
(ด้านหน้าของสายอากาศ คือ มุม 270 องศา)

จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศแถวลำดับสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากเมื่อวางระยะห่างของสายอากาศตามข้อแนะนำของคู่มือการใช้งานของสายอากาศ ด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศต่างกัน 10 dB สอดคล้องกับผลการจำลอง และยังแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงแพร่ขึ้นไปในทิศทางชี้ขึ้นด้านบน

ถึงแม้ว่าสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่วิทยุกระจายเสียง แต่หากมีสัญญาณแปลกปลอมออกออกไปรบกวนย่านวิทยุการบิน (108-137 MHz) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับต้นนี้จะเปลี่ยนไป ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่วิทยุการบิน เบื้องต้นทางผู้วิจัยได้จำลองแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น วางระยะห่าง 0.85 แลมด้าตามคำแนะนำจากคู่มือการใช้งานของสายอากาศ ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง ซึ่งในการจำลองทางผู้วิจัยสนใจแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในมุมเงย (angle of elevation) เท่านั้น ผลการทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองพบว่า เมื่อนำสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น วางระยะห่าง 0.85 แลมด้าไปใช้งานที่ความถี่ย่านความถี่วิทยุการบิน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่วิทยุการบินในทิศทางชี้ขึ้นได้บนมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบอย่างมากกับการรบกวนการสื่อสารของนักบินที่กำลังบินอยู่ในบริเวณนั้น เพราะสัญญาณที่แพร่ชี้ขึ้นด้านบน จะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบินที่กำลังบินอยู่บนท้องฟ้าได้ง่ายขึ้น

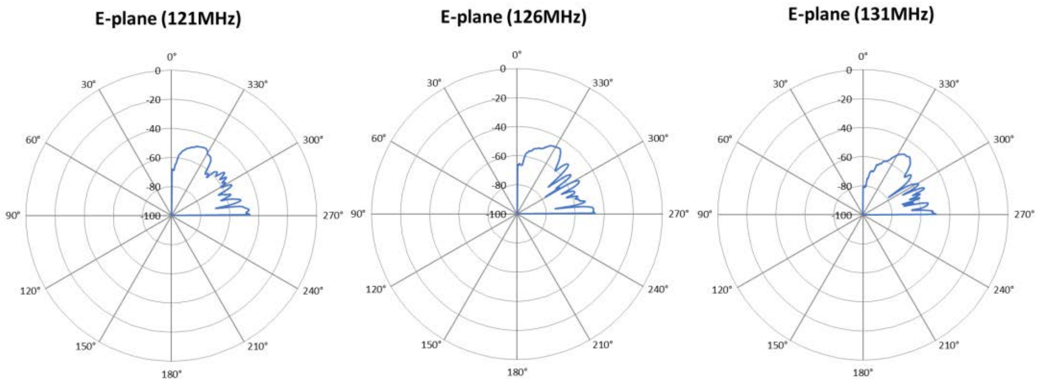


รูปที่ 4.155 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตทดสอบที่ความถี่ 131 MHz



รูปที่ 4.156 อัตราขยายของความถี่ Intermodulation ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 0.85**λ**

เพื่อสร้างสถานการณ์ที่ทำให้เกิดสัญญาณรีเวิร์สอินเตอร์มอดูเลชัน ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ออกอากาศพร้อมกัน 2 คลื่นความถี่ (ใช้เครื่องส่งวิทยุฯ จำนวน 2 เครื่อง) โดยที่สายอากาศของเครื่องส่งวิทยุฯ ทั้ง 2 เครื่องติดตั้งอยู่ที่เสาส่งสัญญาณต้นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.148 จากผลการทดสอบ รูปที่ 4.156 พบว่าเมื่อวางระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ เท่ากับ 0.85**λ** ทำให้ยิ่งความถี่ Intermodulation มีค่าสูงขึ้น อัตราขยายของสัญญาณแปลกปลอมที่ชี้ขึ้นด้านบนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย นั้นแสดงให้เห็นว่าระยะที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงอาจจะทำให้เมื่อเกิดสัญญาณแปลกปลอม จะทำให้สัญญาณแปลกปลอมนั้นขึ้นขึ้นด้านบนท้องฟ้าซึ่งอาจจะทำให้เกิดการรบกวนเครื่องบินที่กำลังบินอยู่ได้รุนแรงและรบกวนในบริเวณกว้าง ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมมุติฐานนี้ด้วยการทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ความถี่ย่านวิทยุการบิน (วัดที่ความถี่ 121 , 126 และ 131 MHz) ด้วยการป้อนสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีความแรง 15 dBm แล้วส่งออกอากาศด้วยสายอากาศแถวลำดับที่มีระยะห่างแต่ละต้น 0.85**λ** ได้ผลการทดสอบดังนี้



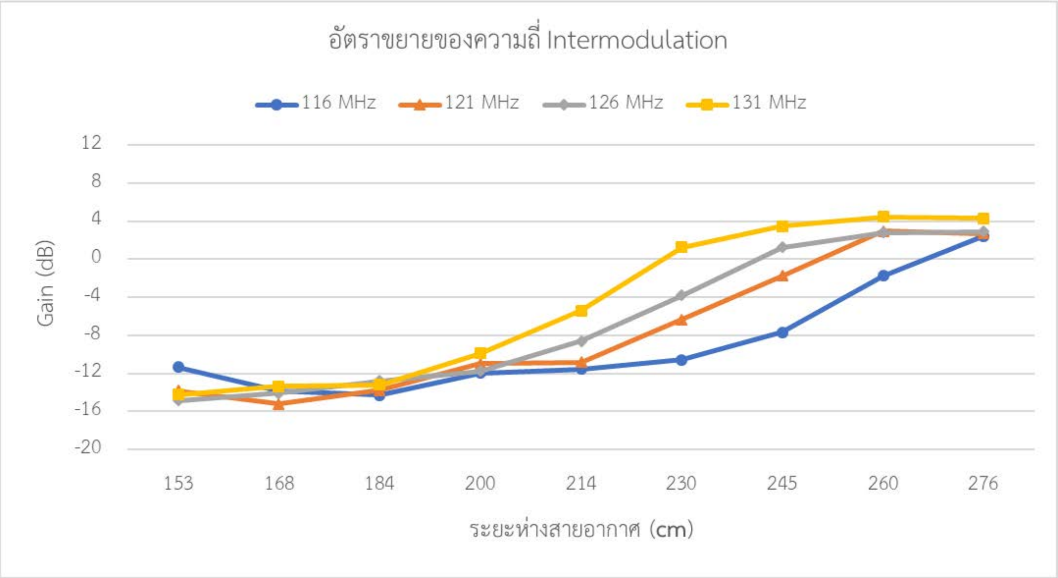
รูปที่ 4.157 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation
ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 0.85**λ**

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 0.85**λ** ในรูปที่ 4.157 เป็นผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต โดยทดสอบที่ความถี่ 121 , 126 และ 131 MHz เริ่มวัดมุมเงยตั้งแต่ 0 จนถึง 70 องศา ผลการทดสอบทั้ง 3 ความถี่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เมื่อมีสัญญาณแปลกปลอมในย่านความถี่วิทยุการบิน สัญญาณดังกล่าวแพร่ไปในทิศทางชี้ขึ้นด้านบนอย่างชัดเจน (แพร่สัญญาณสูงสุดที่มุมเงย 70 องศา) สอดคล้องกับสมมุติฐานและผลการจำลองด้วยโปรแกรม

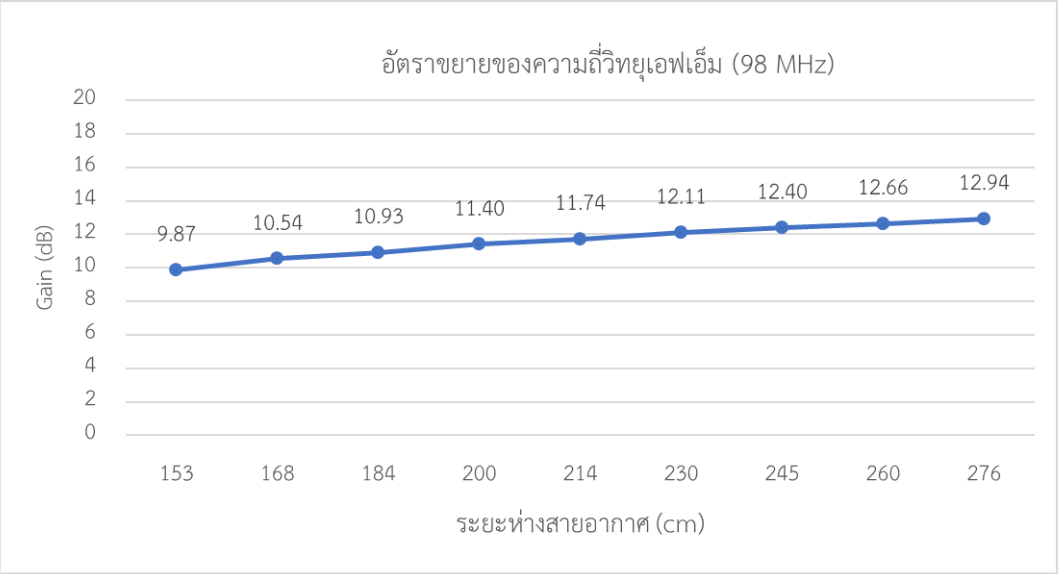
จากผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น วางระยะห่าง 0.85**λ** ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง แต่ส่งผลกระทบอย่างมาก

กับสัญญาณย่านความถี่วิทยุการบินที่จะแพร่สัญญาณชี้ขึ้นด้านบน ทำให้จะส่งสัญญาณไปรบกวนเครื่องบินที่กำลังบินอยู่บนท้องฟ้าได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ศึกษาการปรับระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยเป้าหมายเพื่อให้ได้ระยะที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงและไม่ส่งผลกระทบต่อย่านความถี่วิทยุการบินหรือมีผลกระทบน้อยที่สุด

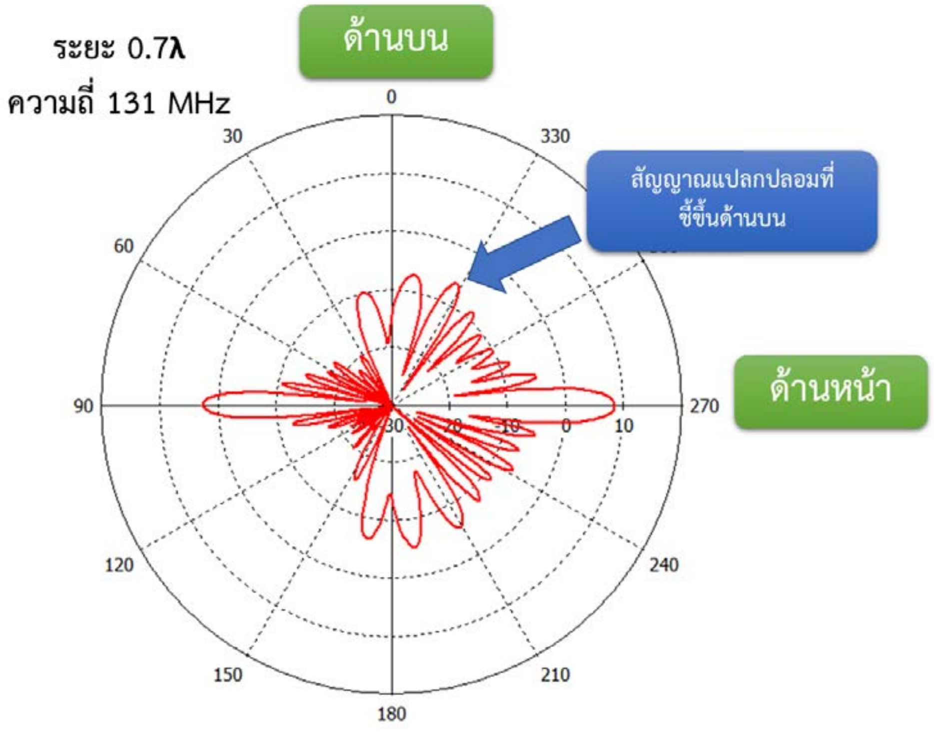
จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองผลพบว่า หากทำการลดระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับลง ทำให้อัตราขยายสัญญาณของความถี่ Intermodulation ลดลงรวมถึงอัตราขยายของความถี่วิทยุกระจายเสียงก็ลงลงด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 4.158 แสดงผลการทดสอบเมื่อปรับระยะห่างของสายอากาศแกวลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราขยายสัญญาณของย่านความถี่วิทยุการบินเริ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างสายอากาศแถวลำดับเกิน 214 cm เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 131 MHz เมื่อเปลี่ยนระยะห่างสายอากาศแถวลำดับจาก 260 cm (0.85**λ**) ลดลงเหลือ 214 cm (0.7**λ**) ทำให้ความแรงของสัญญาณ Intermodulation ที่แพร่ขึ้นด้านบนลดลง 9.88 dB ในขณะที่อัตราขยายสัญญาณของความถี่ย่านวิทยุกระจายเสียงลดลงเพียง 0.9 dB เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ถึงได้ทำการปรับระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้นใหม่ โดยให้ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นห่างกัน 214 cm



รูปที่ 4.158 กราฟแสดงอัตราขยายของความถี่ Intermodulation

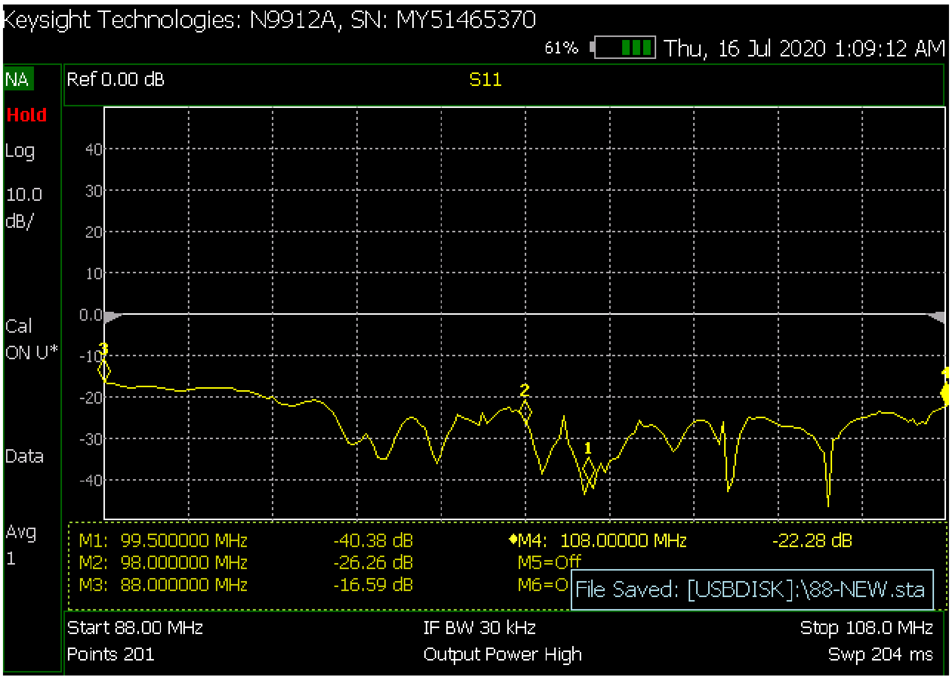


รูปที่ 4.159 กราฟแสดงอัตราขยายของความถี่วิทยุกระจายเสียง (98 MHz)



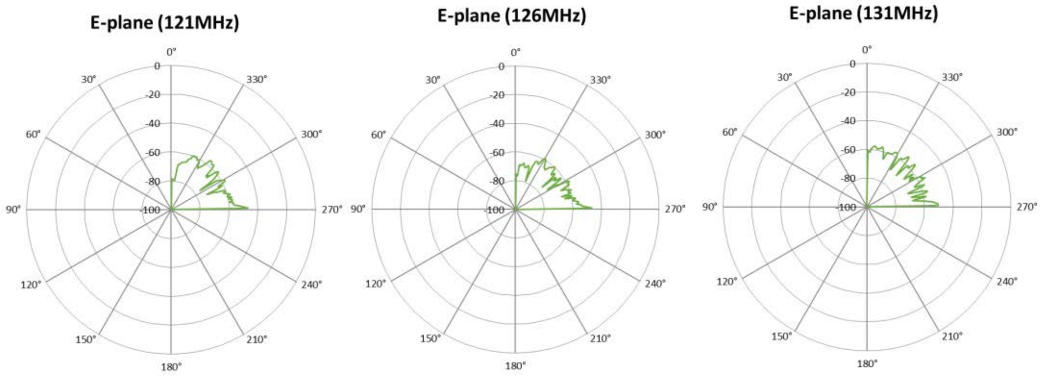
รูปที่ 4.160 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับจาก 214 cm (0.7λ) ทดสอบที่ความถี่ 131 MHz

รูปที่ 4.161 ภาพทีมงานในการดำเนินงานปรับระยะสายอากาศแถวลำดับ

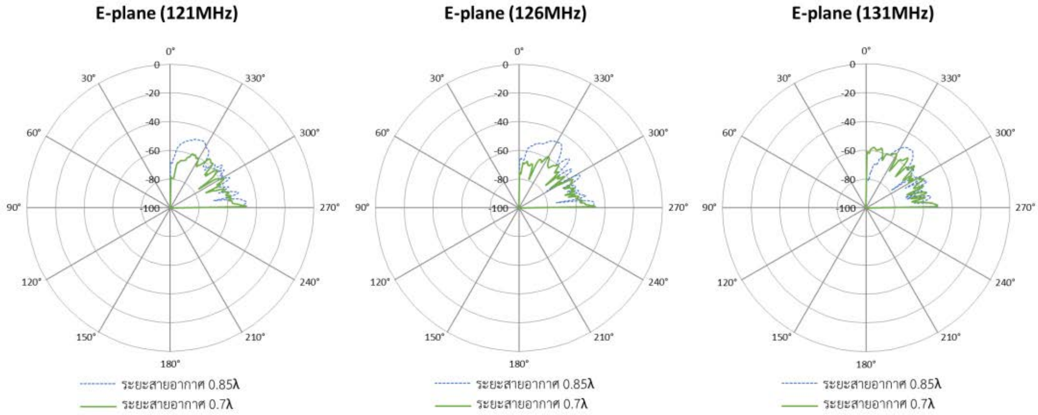


รูปที่ 4.162 ผลการวัด S11 ของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิต
ที่ผ่านการปรับระยะห่างสายอากาศแถวลำดับมาเป็น 214 cm หรือ (0.7λ)

ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตที่ผ่านการปรับระยะห่างสายอากาศแถวลำดับมาเป็น 214 cm หรือ (0.7λ) ในสภาพแวดล้อมจริง ผลการทดสอบทั้ง 3 ความถี่แสดงรูปที่ 4.163



รูปที่ 4.163 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation
ที่ระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ 214 cm (0.7**λ**)



รูปที่ 4.164 ผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของความถี่ Intermodulation
ก่อนและหลังปรับระยะห่างสายอากาศแถวลำดับ

จากผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น วางระยะห่าง 214 cm หรือ 0.7**λ** ซึ่งเป็นระยะที่ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองผล ผลการทดสอบทั้ง 3 ความถี่พบว่าสัญญาณ Intermodulation ที่แพร่สัญญาณในทิศทางชี้ขึ้นด้านบนอย่างชัดเจน (ลดลงประมาณ 10 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ ระยะห่าง 260 cm หรือ 0.85**λ** (ก่อนปรับ) สอดคล้องกับสมมุติฐานและผลการจำลองด้วยโปรแกรมก่อนหน้านี้ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้จึงสรุปผลการทดสอบว่า ระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับของสถานีวิทยุกระจายเสียงควรมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นอยู่ที่ประมาณ 214 cm ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงและไม่ส่งผลกระทบต่อย่านความถี่วิทยุการบินหรือมีผลกระทบน้อยที่สุด

4.8 จัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการ

ทางผู้วิจัยได้จัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการแก่ผู้ที่สนใจ อาทิเช่น นักศึกษา ผู้ทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง และช่างที่ทำงานด้านวิทยุกระจายเสียง เป็นต้น เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในระบบทั้ง 3 ระบบที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปปรับใช้กับสถานีวิทยุอื่นๆ ได้อย่างเหมาะสม ในโครงการวิจัยนี้ได้จัดการอบรมทั้งหมด 2 ครั้ง ได้แก่

1. การจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ “โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง” ในวันที่ 28 ตุลาคม 2562 ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อให้ความรู้และประชาสัมพันธ์โครงการแก่บุคคลที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีจำนวนผู้เข้าร่วมอบรมในครั้งนี้เป็นจำนวนทั้งหมด 71 ท่าน ซึ่งมีภาพบรรยากาศของจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการดังนี้

รูปที่ 4.165 ภาพบรรยายกาศการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ
ในวันที่ 28 ตุลาคม 2562 ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. การจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ “โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง” ในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2562 ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาส สโมสรทหารบก ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานครฯ เพื่อให้ความรู้และประชาสัมพันธ์โครงการแก่ทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง และช่างที่ทำงานด้านวิทยุกระจายเสียง โดยมีจำนวนผู้เข้าร่วมอบรมในครั้งนี้เป็นจำนวนทั้งหมด 35 ท่าน ซึ่งมีภาพบรรยากาศของจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการและประชาสัมพันธ์โครงการดังนี้

รูปที่ 4.166 ภาพบรรยากาศการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ
ในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2562 ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาส สโมสรทหารบก
ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานครฯ

การอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการทั้ง 2 ครั้ง ได้รับการตอบรับเป็นอย่างดี มีผู้เข้าร่วมการอบรมทั้งหมด 106 ท่าน และการจัดการอบรมสามารถผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง เป็นโครงการที่จัดทำขึ้นเพื่อเฝ้าระวังและตรวจวัดสัญญาณรบกวนอันเป็นผลมาจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการรบกวนการใช้งานกิจการวิทยุการบิน และกิจการเคลื่อนที่ทางการบินในเส้นทางบินพาณิชย์ในย่าน 117.975 MHz - 137 MHz จะส่งผลต่อความปลอดภัยสาธารณะต่อผู้ใช้บริการทางการบินและผู้ประกอบการทางการบินพาณิชย์ อาจนำไปสู่ความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและชื่อเสียงของประเทศ เป้าหมายของโครงการวิจัยและพัฒนานี้เพื่อให้ได้ระบบอันประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1. ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems) มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาระบบและวิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่บนเสาส่งของสถานีวิทยุกระจาย โดยใช้โดรน (Drone) หรืออากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Arial Vehicle) เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีรูปแบบที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากผู้ผลิตหรือไม่ 2. ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems) มุ่งเน้นที่จะพัฒนาอุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมซึ่งจะถูกนำไปติดตั้งที่สถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อดำเนินการตรวจสอบค่าการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีวิทยุในแถบความถี่วิทยุการบิน (108 – 137 MHz) ว่ามีค่าระดับการแพร่แปลกปลอมเกินกว่าที่ กสทช. กำหนด และ 3. ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems) มุ่งเน้นในการพัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง เพื่อตรวจสอบสถานะของสายส่งสภาพแวดล้อมภายในสถานีส่ง พารามิเตอร์ที่จะทำการเฝ้าติดตามได้แก่ กำลังส่งออกอากาศ (Forward power) กำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (Transmitter temp) และอุณหภูมิของห้อง (Room temp) พร้อมทั้งรายงานพารามิเตอร์ดังกล่าวผ่านทาง Smart Phone เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้ามาตรวจสอบสถานะของเครื่องส่งได้ตลอดเวลา อีกทั้งสามารถประมวลผลและบ่งบอกได้ว่าว่าเครื่องส่งทำงานในสภาพแวดล้อมที่ปกติหรือไม่ หากไม่ปกติจะได้รีบทำการแก้ไขก่อนที่ตัวเครื่องจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพอันเป็นต้นเหตุของการแพร่แปลกปลอมที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน โดยที่ทั้ง 3 ส่วนที่กล่าวมานั้นสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างไม่มีปัญหาใดๆ สรุปผลการดำเนินงานของทั้ง 3 ส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

5.2 สรุปผลการวิจัยระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems)

สำหรับการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยใช้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่สถานีฐานว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอย่างไร มีทิศทางในการแพร่กระจายคลื่นแบบใด และสายอากาศมีแนวโน้มในการแพร่กระจายคลื่นที่จะสามารถรบกวนการทำงานของระบบอื่นหรือไม่ โดยในการวิจัยและพัฒนา ทีมวิจัยได้ทำการออกแบบระบบเพื่อติดตั้งขึ้นไปกับโดรนเพื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ติดตั้งขึ้นไปกับโดรน เนื่องจากน้ำหนักของอุปกรณ์มีผลต่อระยะเวลาการบินของโดรน จากการทดสอบพบว่าเมื่อโดรนถูกติดตั้งด้วยอุปกรณ์โดรนมีระยะเวลาในการบินประมาณ 15 นาที จากนั้นทีมวิจัยได้ทำการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนและเก็บข้อมูลอัตโนมัติในขณะทำการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ณ สถานีวิทยุกระจายเสียง

จากการทดสอบพบว่าระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุกระจายเสียงโดยใช้โดรนที่ถูกวิจัยและพัฒนา สามารถทำงานได้โดยโปรแกรมควบคุมไฟล์ทการบินของโดรนและระบบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำงานได้ตามความต้องการของผู้ปฏิบัติงาน โดรนสามารถไปยังมุมองศาและระดับความสูง รวมถึงทำการเก็บข้อมูลอัตโนมัติ รวมถึงสามารถแสดงผลการทดสอบในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงความแรงในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ทำให้สังเกตุการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมีการเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ CSV เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานนำข้อมูลไปใช้ในการพล็อตกราฟ 2 มิติ หรือใช้ในงานอื่น ๆ โดยโปรแกรมที่วิจัยและพัฒนา มีการทำงานบนระบบปฏิบัติการ Android บนมือ นอกจากนี้จากผลการทดสอบสถานีวิทยุกระจายเสียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าสถานีดังกล่าวมีการติดตั้งสายอากาศที่ตรงตามมาตรฐาน และไม่มีการแพร่กระจายคลื่นรบกวนต่อการทำงานระบบอื่น

5.3 สรุปผลการวิจัยระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)

อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียงในสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตรวจวัดสัญญาณได้ในย่านความถี่วิทยุ FM (88-108MHz) และความถี่วิทยุการบิน (108-137MHz) สามารถแสดงความถี่และความแรงของสัญญาณแปลกปลอมที่ค้นหาเจอผ่านทางหน้าจอ LCD ได้ จากการตั้งค่าให้อุปกรณ์ค้นหาในย่านความถี่วิทยุการบิน (108 - 138 MHz) ด้วยตั้งค่า THRESHOLD ที่ -85 dBm ผลการทดสอบแสดง

พบความถี่แปลกปลอมที่ความถี่ 115.20 MHz มีความแรง -84 dBm พร้อมทั้งแจ้งเตือนผ่านทาง Application Line โดยที่ระบบจะแจ้งความถี่ที่รบกวน ความแรง ชื่อสถานีวิทยุและพิกัดตำแหน่งมาให้ทราบโดยทันที ทางผู้วิจัยจึงได้นำอุปกรณ์ดังกล่าวไปทดสอบการทำงานจริงที่สถานีวิทยุจำนวนทั้งหมด 10 สถานีที่มีการออกอากาศจริง ซึ่งผลการติดตั้งและทดสอบระบบ/อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังฯ พบว่าหากสถานีวิทยุนั้นมีการสร้างความถี่รบกวนวิทยุการบิน ระบบจะแจ้งมายัง Application Line ของทางบริษัทวิทยุการบิน เพื่อให้สามารถเข้าไปดำเนินการตรวจสอบได้ทันที

5.4 สรุปผลการวิจัยระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)

ส่วนนี้จะกล่าวถึงทดสอบระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าติดตามเครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่ง 500 วัตต์และนำมาใช้งานกับเครื่องส่งวิทยุที่กำลังออกอากาศจริง อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง สามารถเฝ้าติดตาม กำลังส่งออกอากาศ (forward power) กำลังสะท้อนกลับ (reflected power) อุณหภูมิของเครื่องส่ง (transmitter temp) อุณหภูมิของห้อง (room temp) และสถานการณ์ทำงานของเครื่องส่ง (Transmitter Status) ได้

ผลการทดสอบวงจร Directional Coupler ตัวต้นแบบด้วยเครื่อง Network Analyzer ให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST นั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflected power) หรือ S11 ที่ความถี่ 88 -108 MHz มีค่าต่ำกว่า -20dB และมีค่าดีที่สุดที่ ความถี่ 98 MHz มีค่า S11 เท่ากับ -63 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถนำมาใช้งานในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง FM ได้ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission) หรือ S21 ในย่านความถี่วิทยุ FM (88-108 MHz) มีค่าประมาณ 0.1 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่น้อยมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการนำ Directional Coupler ไปใช้งานในย่าน FM แต่ในขณะที่ย่านความถี่ของวิทยุการบิน (108-137 MHz) อุปกรณ์ Directional Coupler ตัวต้นแบบสามารถลดทอนสัญญาณได้มากกว่า -10 dB ที่ความถี่ 120 – 140 MHz แสดงให้เห็นว่าหากเครื่องส่งวิทยุมีการสร้างสัญญาณรบกวนย่านวิทยุการบินออกมาวงจร Directional Coupler สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้ระดับหนึ่งก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณออกไปภายนอก

ทดสอบระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรายงานพารามิเตอร์ดังกล่าวผ่านทาง Smart Phone ด้วย Application Blynk เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้ามาตรวจสอบสถานะของเครื่องส่งได้ตลอดเวลา และยังสามารถแจ้งเตือนเป็นข้อความผ่านทาง Application Line หรือปิดเครื่องส่งอย่างอัตโนมัติเมื่อเครื่องส่งวิทยุเกิดความผิดปกติเกินกว่าที่กำหนดเอาไว้ได้

5.5 สรุปคุณลักษณะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียงต้นแบบ

โครงการวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการสร้างสถานีสาธิตต้นแบบที่ออกอากาศด้วยเครื่องส่งวิทยุที่ผ่านการตรวจมาตรฐานทางเทคนิคเรียบร้อยแล้ว ส่งออกอากาศด้วยขนาดกำลังส่ง 500 วัตต์ เสาส่งวิทยุสูง 60 เมตร สถานที่ตั้งสถานีอยู่ที่อาคารสิรินธรวิศวพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต้นแบบเป็นไปตามข้อกำหนดของ กสทช. คือ ระดับกำลังการแพร่แปลกปลอมของสถานีต่ำกว่ากำลังคลื่นพาห์อย่าง 70 dBc สถานีสาธิตต้นแบบได้ติดตั้งสายอากาศแถวลำดับจำนวน 8 ต้น ที่วางระยะห่าง 0.85 แลมด้าตามคำแนะนำจากคู่มือการใช้งานของสายอากาศ จากผลการจำลองด้วยโปแกรมจำลองผลพบว่า สายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตต้นแบบมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง 12.71 dBi และอัตราขยาย 12.16 dB ถือได้ว่าสายอากาศแถวลำดับสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่วิทยุกระจายเสียง นอกจากนั้นผู้วิจัยได้จำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับของสถานีสาธิตเมื่อเกิดความถี่ Intermodulation แพร่ออกมาจากสถานีวิทยุ จากผลการทดสอบพบว่าระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับที่เหมาะสมกับย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง แต่ระยะดังกล่าวส่งผลเสียในย่านความถี่วิทยุการบิน กล่าวคือ เมื่อเกิดสัญญาณ Intermodulation ออกมาจากสถานีวิทยุ สัญญาณดังกล่าวจะแพร่ในทิศทางที่ชี้ขึ้นไปบนท้องฟ้า ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบอย่างมากกับการรบกวนการสื่อสารของนักบินที่กำลังบินอยู่ในบริเวณนั้น เพราะสัญญาณที่แพร่ชี้ขึ้นด้านบนจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบินที่กำลังบินอยู่บนท้องฟ้าได้ง่ายขึ้น

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาระยะห่างของสายอากาศแถวลำดับที่เหมาะสมในย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงและไม่ส่งผลกระทบต่อย่านความถี่วิทยุการบินหรือมีผลกระทบน้อยที่สุด ซึ่งได้ระยะที่เหมาะสมคือ 214 cm จากผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับในสภาพแวดล้อมจริงพบว่าสัญญาณ Intermodulation ที่แพร่สัญญาณในทิศทางชี้ขึ้นด้านบนลดลงประมาณ 10 dB เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ ระยะห่าง 260 cm หรือ 0.85λ (ก่อนปรับ) สอดคล้องกับสมมุติฐานและผลการจำลองด้วยโปรแกรมก่อนหน้านี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ประกาศ กสทช. “เรื่องมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟ.เอ็ม.”, 2560

[2] ประกาศ กสทช. “หลักเกณฑ์ป้องกันการรบกวนการใช้คลื่นความถี่ในกิจการวิทยุการบินของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับจัดสรรคลื่นความถี่”, 2559

[3] Recommendation ITU-R SM.1009-1 (10/1995) “Compatibility between the sound broadcasting service in the band of about 87-108 MHz and the aeronautical services in the band 108-137 MHz”, 1995

[4] สถิติ/ข้อมูลปัญหาและอุปสรรค จากวิทยุชุมชนรบกวนการบิน, [Online] ที่อยู่: https://www.aerothai.co.th

[5] ข้อมูลแผนที่, [Online] ที่อยู่: https://www.google.co.th/intl/th/earth/

[6] J. Schreiber, “Full Antenna Pattern Reconstitution of Broadcast Systems using Unmanned Aerial Vehicles,” Innovative drone solutions, December 2015

[7] E. Teng, “Aerial Sensing and Characterization of Three-Dimensional RF Fields”, Wireless communication, 2010

[8] Tree Axis E-Field Antenna, [Online] ที่อยู่: www.schwarzbeck.de

[9] J. Schreiber, “Antenna Pattern Reconstitution using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)”, Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2016

[10] Real-Time Spectrum Analyzer, [Online] ที่อยู่: www.SignalHound.com

[11] IEC 61566, Measurement of exposure to radio-frequency electromagnetic fields-Field strength in the frequency range 100kHz to 1GHz, 1997

[12] ANSI/IEEE C95.3, Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields – RF and Microwave, 2002

[13] Rep. ITU-R SM.2056, “Airborne evaluation/verification of antenna patterns of broadcasting stations”, (question ITUR225/1), 29 Sept 2005.

[14] Constantine A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design,” 3 rd Edition, John Wiley & Sons, 2005.

[15] John D. Kraus and Ronald J. Marhefka, “Antenna for All Aplications,” 3 rd Edition McGraw-Hill, 2001.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[16] การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ, [Online] ที่อยู่: http://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_computer/wiki/af03e/_.html

[17] การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ, [Online] ที่อยู่: www.hs8jyx.com/html/radio_propagation.html

[18] คุณสมบัติของคลื่น,[Online] ที่อยู่: http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7211-1

[19] ITU-R SM.2056-1, “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations”, 2014

[20] G. Virone et al. “Antenna Pattern Verification System Based on a Micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV)”, IEEE, Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13

[21] F. Chiabrando et al. ”Direct Photogrammetry Using UAV: Tests and First Results” -ISPRS Archives, vol. XL

[22] G. Virone et al. ”UAV-based Radiation Pattern Verification for a Small Low-Frequency Array”. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, USNCURSI National Radio Science Meeting 2014, Jul 6-12, Memphis, USA.

[23] B. Witvliet, “Airborne evaluation/verification of antenna patterns of broadcasting stations”, EMC 2006, 18th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, Poland, 2006.

[24] Rep. ITU-R SM.2056, “Airborne evaluation/verification of antenna patterns of broadcasting stations”, (question ITUR 225/1), 29 Sept 2005.

[25] M. Quigley, Provo, M.A. Goodrich, R.W.Beard, “Semi-autonomous human-UAV interfaces for fixed-wing mini-UAVs”, IROS 2004 International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004, pp. 2457– 2462.

[26] ประกาศ กสทช. “การใช้เครื่องวิทยุคมนาคมแบบสังเคราะห์ความถี่ (SYNTHESIZER) ของหน่วยงานของรัฐ”, 2554

[27] ประกาศ กสทช. “หลักเกณฑ์การอนุญาตและการกำกับดูแลให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใช้คลื่นความถี่”, 2554

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[28] ประกาศ กสทช. “การมี ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม”, 2554

[29] Jason Schreiber, “Antenna patten reconstitution using unmanned aerial vehicles (UAVs)”, IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 23-27 October, 2016.

[30] SIXARMS, “REPORT 1.1 TV ANTENNA RECONSTITUTION”, SAMPLE SITE (TV), MARCH 2017.

[31] María García Fernández et al. “Antenna Diagnostics and Characterization using Unmanned Aerial Vehicles”, IEEE Access, September, 2017.

[32] ROHDE&SCHWARZ, S.(2011). R&S®HE300 Antenna Active Directional Antenna. Retrieved December 29, 2018, [Online] ที่อยู่: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/he300-productstartpage_63493-9931.html.

[33] Tektronix, S.(2018). RSA306B USB Real Time Spectrum Analyzer Datasheet. Retrieved December 29, 2018, [Online] ที่อยู่: https://www.tek.com/datasheet/spectrum-analyzer-0.

[34] Intel, S.(2018). INTEL® NUC 7 ENTHUSIAST MINI PC - NUC7I7BNHXG. Retrieved December 29, 2018, [Online] ที่อยู่: https://www.intel.com/content/www/us/en/products/boards-kits/nuc/mini-pcs/nuc7i7bnhxg.html.

[35] dji, P.(2016). MATRICE600 PRO Quick Start Guide V1.0, pp.1-8, [Online] ที่อยู่: https://dl.djicdn.com/downloads/m600+pro/M600+Pro+Quick+Start+Guide+EN.pdf.

[36] dji, S.(2018). PHANTOM 4 SPECS. Retrieved December 29, 2018,

[37] การใช้งานอากาศยานไร้คนขับรุ่น Phantim-4, [Online] ที่อยู่: https://www.dji.com/phantom-4.

[38] dji, S.(2018). SOFTWARE : DJI Assistant 2 For Matrice V2.0.7 รองรับระบบปฏิบัติการ Window, [Online] ที่อยู่:https://www.dji.com/matrice600-pro/info.

[39] SOFTWARE : SOLIDWORK 2018.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[40] Advanced Test Equipment Rentals, P.(1981). EMCO Model 3121 dipole antenna, pp.24-25, [Online] ที่อยู่: https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/emco-ets-lindgren 3121_datasheet.pdf.

[41] Constantine A. Balanis. (2005). Antenna Theory Analysis and Design (3rd), (p.49). Canada : John Wiley&Son Inc.

[42] Telecomunicazionferrara Model ACP0 , [Online] ที่อยู่:http://www.pop22w-telecom.gr/?q=node/21

ภาคผนวก ก
รายละเอียดการสร้างสถานีส่งวิทยุกระจายเสียง

โครงการก่อสร้าง

แบบเสาส่งคลื่นสัญญาณวิทยุ สูง 60.00 เมตร

....

....

ข้อกำหนดทั่วไปของโครงสร้าง

1. น้ำหนักบรรทุกจร และแรงลมที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ

1.1 น้ำหนักบรรทุกจร

- หลังคา	50	กก./ตร.ม.
- กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100	กก./ตร.ม.
- ที่พักอาศัย	150	กก./ตร.ม.
- ที่จอดรถ	400	กก./ตร.ม.
- ห้องสมุด ห้องเก็บเอกสาร และพัสดุ	500	กก./ตร.ม.
- ถนน	400	กก./ตร.ม.

1.2 แรงลม

- ส่วนสูงของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50	กก./ตร.ม.
- ส่วนสูงของอาคารที่สูงกว่า 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	80	กก./ตร.ม.
- ส่วนสูงของอาคารที่สูงกว่า 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	120	กก./ตร.ม.
- ส่วนสูงของอาคารที่สูงกว่า 40 เมตร	160	กก./ตร.ม.

2. วัสดุ

2.1 คอนกรีต

- ให้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตทุกประเภท
- คอนกรีตทุกประเภท ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่นต้องมีกำลังอัดรูปทรงกระบอก อย่างน้อย อย่างน้อย 210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน
- คอนกรีตที่ใช้ทำฐานราก พื้น คาน และกำแพงของชั้นใต้ดิน พื้นหลังคาและถังน้ำจะต้องป้องกันการซึมน้ำ โดยใช้วัสดุผสม PLASTOCRETE-N และ WATERPROOFING MEMBRANE

2.2 เหล็กเสริมคอนกรีต

- เหล็กเส้นกลมทุกชนิดจะต้องมีกำลังดึงคลากอย่างน้อย 2,400 กก./ตร.ซม.และเป็นไปตามเหล็กชนิด SR24 ตามมาตรฐาน มอก.
- เหล็กเส้นข้ออ้อยขนาดไม่เกิน 28 มม. ต้องมีกำลังดึงคลากอย่างน้อย 3,000 กก./ตร.ซม.และเป็นไปตามเหล็กชนิด SD30 ตามมาตรฐาน มอก.
- เหล็กเส้นข้ออ้อยขนาดตั้งแต่ 32 มม.ขึ้นไป ต้องมีกำลังดึงคลากอย่างน้อย 4,000 กก./ตร.ซม. ชนิด SD40 ตามมาตรฐาน มอก.

2.3 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

- เหล็กโครงสร้างรูปพรรณทั้งหมดรวมถึงแผ่นเหล็กประกับจุดต่อ(GUSSET PLATE) ต้องเป็นเหล็กรีดร้อน ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A36 หรือมีคุณภาพเทียบเท่าที่มีกำลังคลากอย่างน้อย 2,500 กก.ตร.ซม.

2.4 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมต้องเป็นไปตาม "STRUCTURAL WELDING CODE" AWS D1.1-70 ชนิด E60XX และมีกำลังแรงดึงประลัยอย่างน้อย 4,200 กก.ตร.ซม.

2.4 สลักเกลียว

สลักเกลียวสำหรับการต่อโดยใช้สลักเกลียวต้องเป็นชนิดกำลังสูง ASTM A325 หากไม่ระบุเป็นอื่น

หมายเหตุ หลังจากก่อสร้างเสร็จแล้วเจ้าของต้องตรวจสอบ ความมั่นคงแข็งแรงของเสาวิทยุให้อยู่ในสภาพใช้งานได้อย่างปลอดภัยทุกระยะ 6 เดือน คือ

1 ความแข็งแรงของเสา รอยต่อ น็อต
2 ความตึงของลวดสลิง อุปกรณ์ยึดลวด
3 ความตั้งตรงของเสา

ถ้าอุปกรณ์ของเสาชำรุดให้เจ้าของทำการแก้ไขให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดีมีความปลอดภัย

แบบนี้เป็นลิขสิทธิ์ส่วนบุคคล ห้ามคัดลอก ทำซ้ำ ก่อนได้รับอนุญาตจากเจ้าของแบบ

PROJECT
เสาส่งสัญญาณวิทยุ 60 เมตร
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
รายการประกอบแบบ
DRAW, ASSISTANT ARCHITECT

No.	Date	Revision

Job No.
Total Drawing
Checked
Drawing No.
01

ข้อกำหนดทั่วไปของโครงสร้าง

3. ข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น มุมของทุกส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เปลือยผิวต้องปาดมุม 2 ซม.

3.2 ระยะทาบและการงอเหล็กต้องเป็นไปตามมาตรฐานการปฏิบัติของ ACI หรือ วสท.

- การต่อทาบของเหล็กข้ออ้อย ระยะทาบจะต้องไม่น้อยกว่า 40 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง
- การต่อทาบของเหล็กเส้นกลม ระยะทาบจะต้องไม่น้อยกว่า 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง
- เหล็กปลอกขนาดไม่เล็กกว่า 6 มม. ระยะเรียงต้องไม่ห่างกว่า 48 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก

4. ข้อกำหนดสำหรับกำแพงอิฐ

ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น กำแพงก่ออิฐต้องมีเสาเอ็นและทับหลังทุกระยะ 2.50 เมตร ในแนวตั้งและแนวนอนและรอบช่องเปิดทั้งหมด

เสาเอ็นและทับหลังต้องมีความหนาเท่ากับความหนาของกำแพงและความกว้างไม่น้อย 125 มม.และเสริมเหล็กเส้น 2 RB9 และRB6@ 200 สำหรับลูกตั้งและเหล็กปลอก

5. ข้อกำหนดโครงสร้างเหล็ก

- การต่อโครงสร้างทั้งหมด ต้องเป็นรอยต่อแบบชน (FULL STRENGTH BUTT WELDS) หากไม่ระบุเป็นอย่างอื่น
- รอยเชื่อมทั่วไปใช้เชื่อมพอกโดยรอบ ขนาดขาเชื่อม 2.6 มม. หากไม่ระบุเป็นอย่างอื่น
- แผ่นเหล็กเสริม GUSSET PLATE ทั่วไป ใช้ความหนา 10 มม. หากไม่ระบุเป็นอย่างอื่น

6. ข้อกำหนดงาน ANCHOR BOLT (ติดตั้งภายหลัง)

ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น งาน ANCHOR BOLT ทุกชนิดที่ติดตั้งภายหลัง ให้ใช้ HILTI HVU ADHENSIVE ANCHOR HVU CAPSULE WITH HAS ROD (GRADE 8.8 ชุบสังกะสี > 5ไมครอน)

โดยติดตั้งตามมาตรฐานของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด

7. ข้อกำหนดงาน DRILL AND GROUT

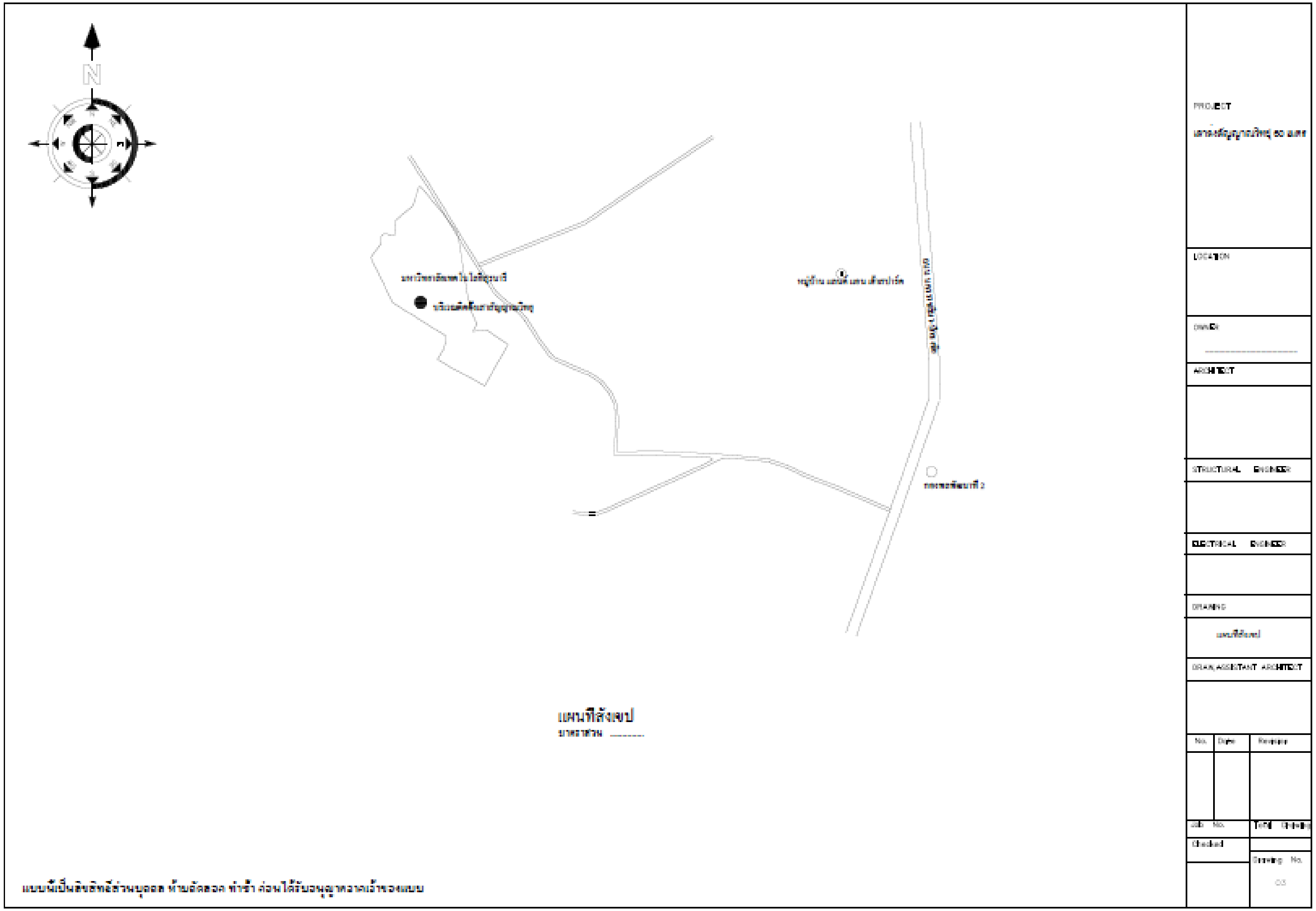
ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น งาน DRILL AND GROUT ของเหล็กทุกขนาด ใช้น้ำยาประสานคอนกรีตของ HILTI รุ่น HIT-RE 500

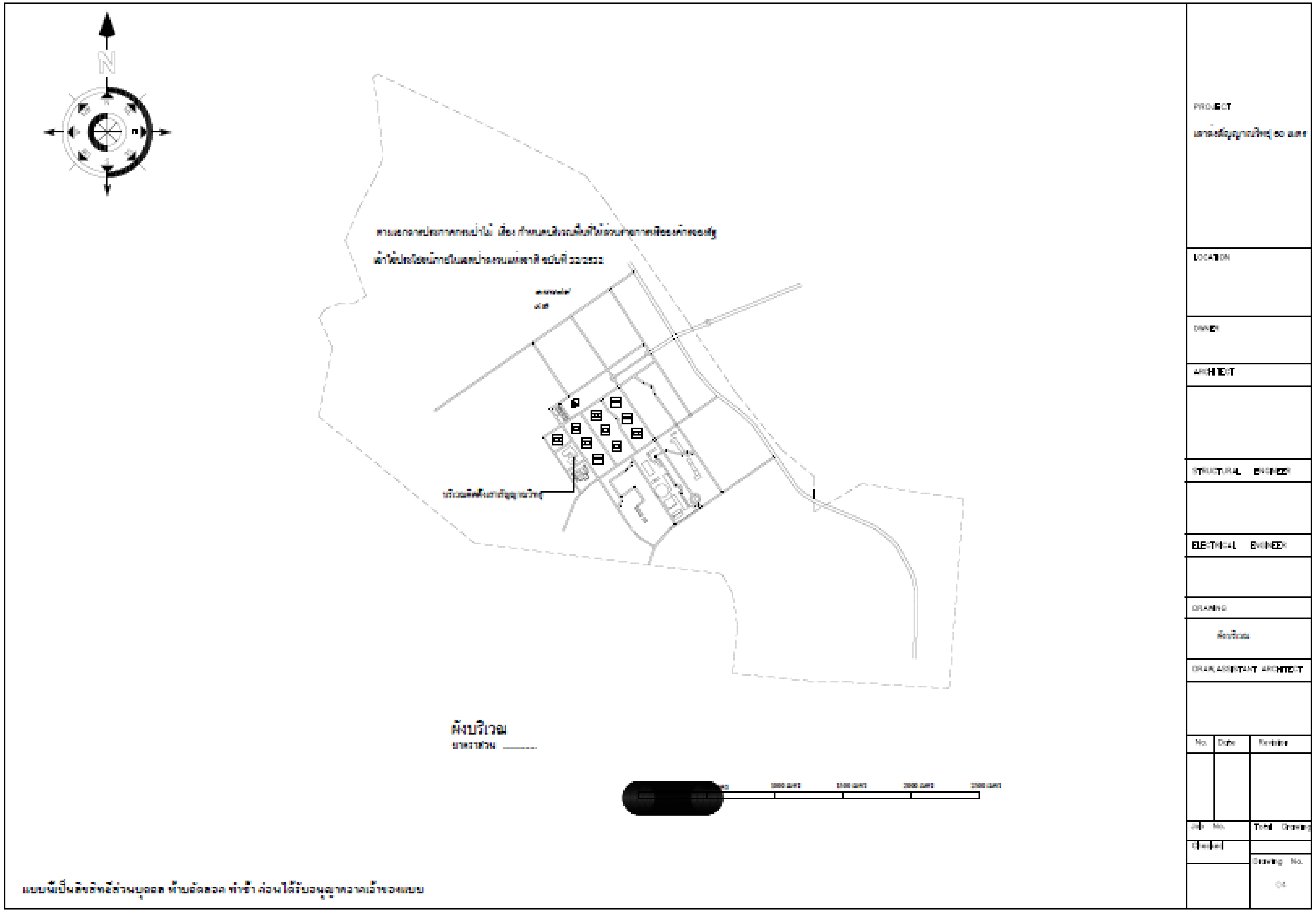
แบบนี้เป็นลิขสิทธิ์ส่วนบุคคล ห้ามคัดลอก ทำซ้ำ ก่อนได้รับอนุญาตจากเจ้าของแบบ

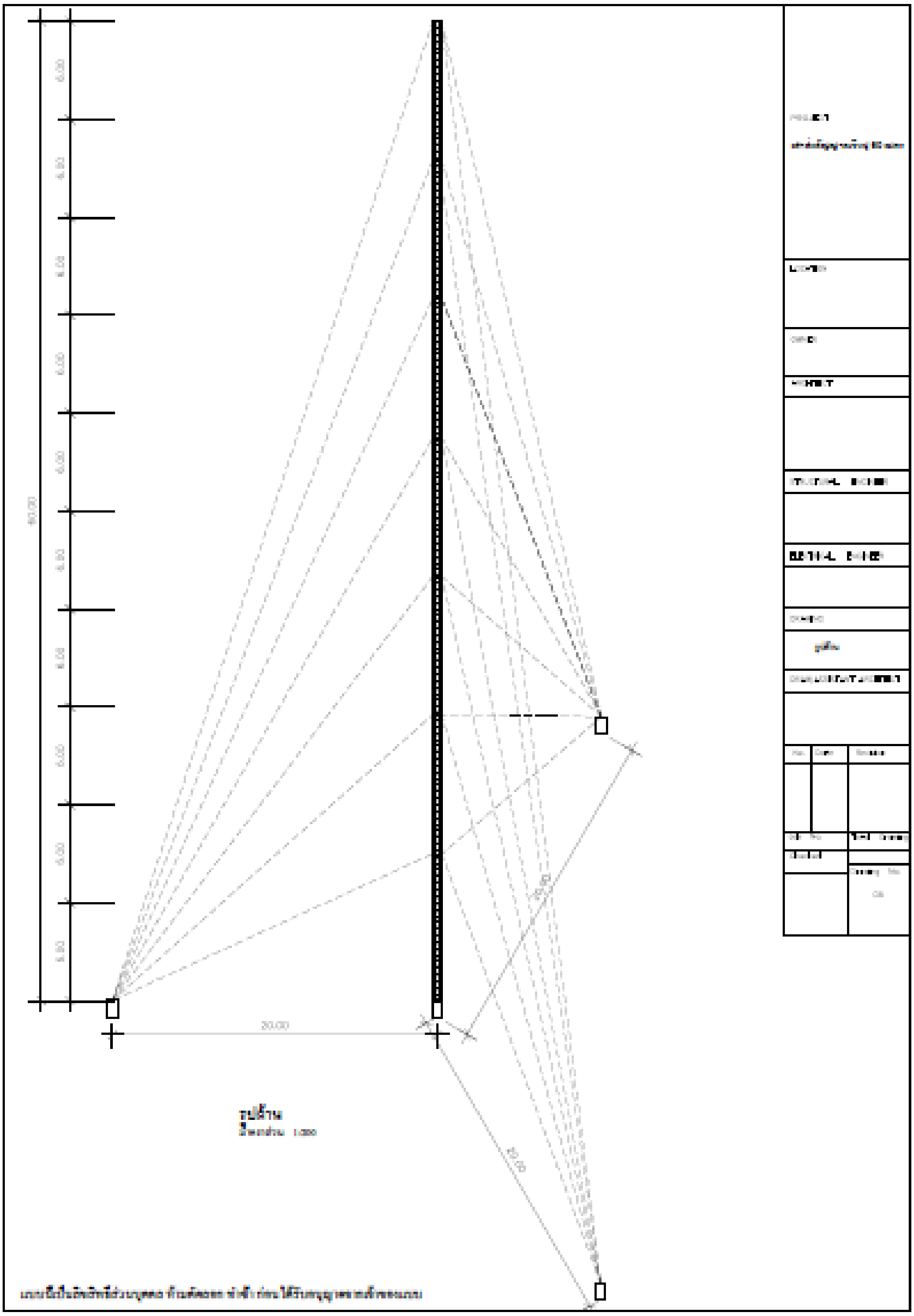
PROJECT
เสาส่งสัญญาณวิทยุ 60 เมตร
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
รายการประกอบแบบ
DRAW/ASSISTANT ARCHITECT

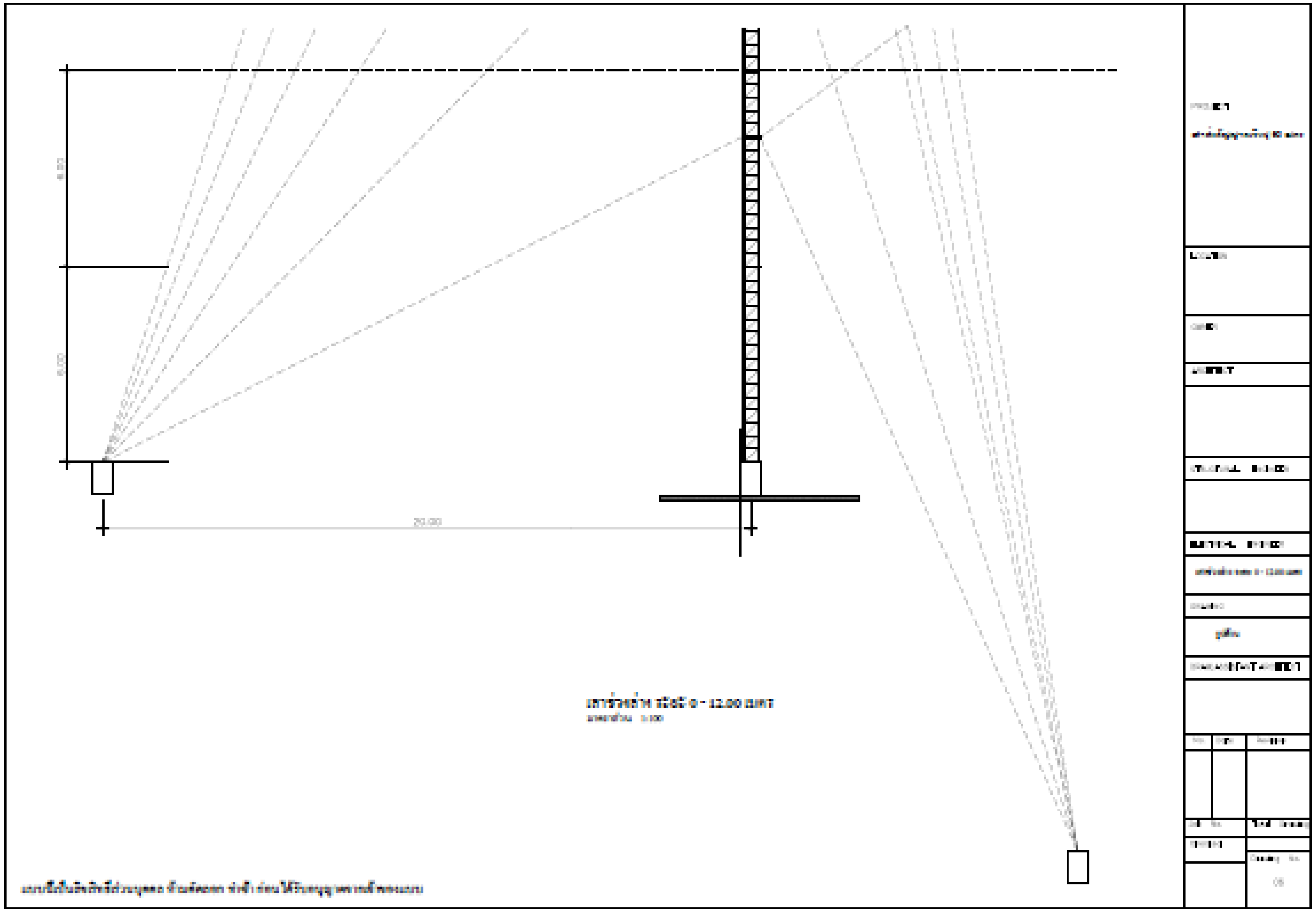
No.	Date	Revision

Job No.
Checked
Total Drawing
Drawing No.
02

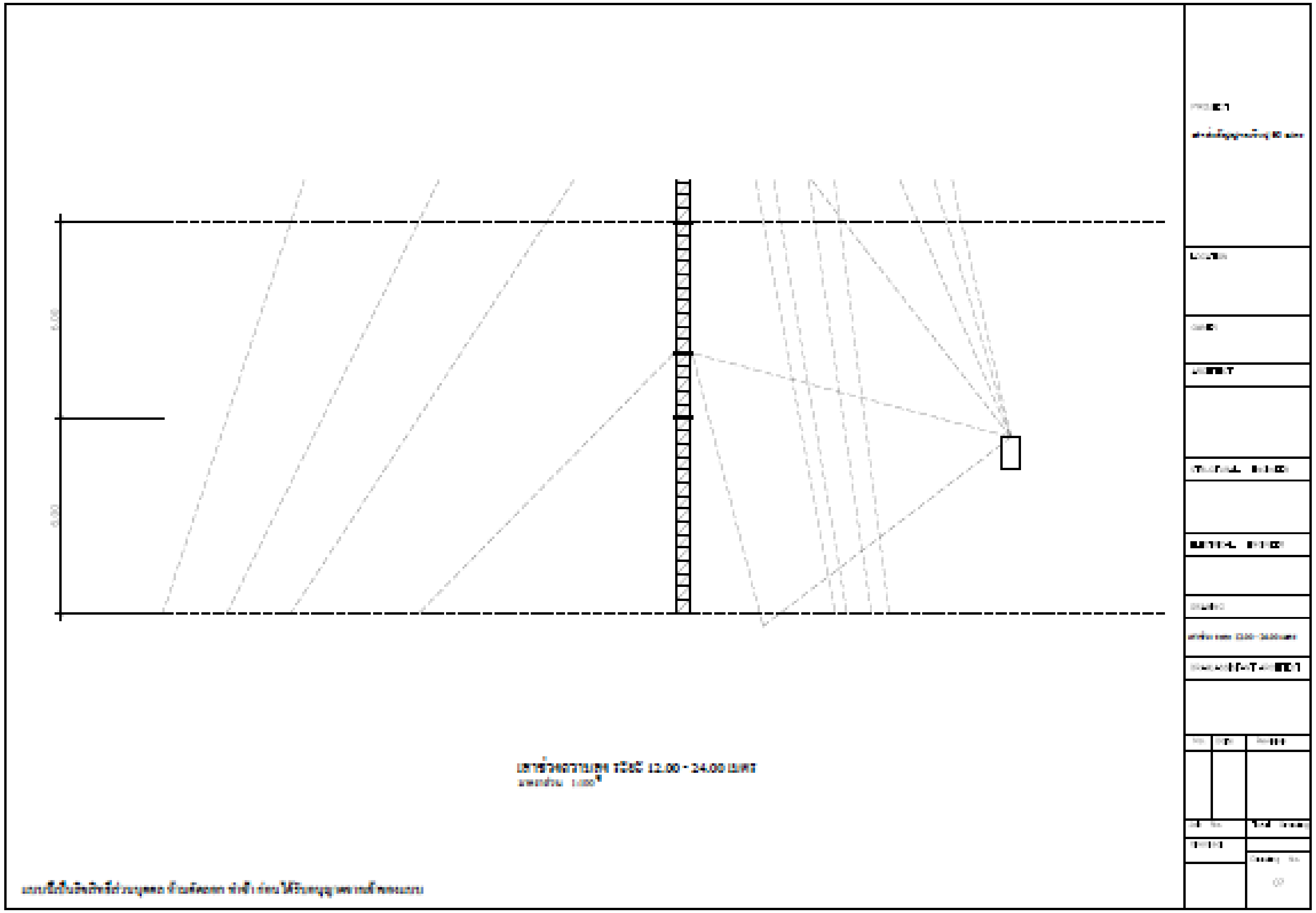

N
PROJECT
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
DRAW/ASSISTANT ARCHITECT
No.
Date
Revision
Checked
Drawing No.
03
แผนที่สังเขป

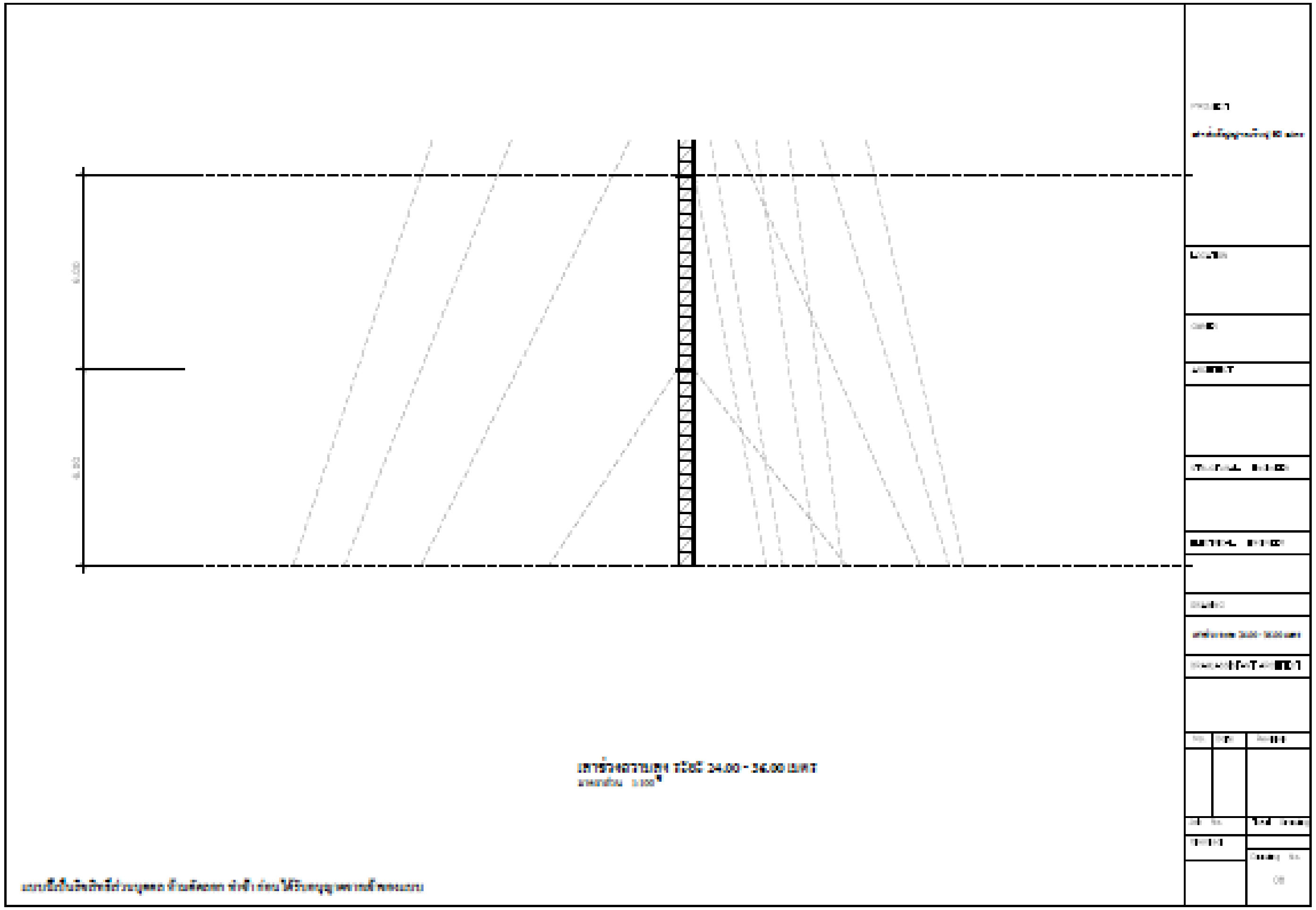

N
PROJECT
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
ผังบริเวณ
DRAW/ASSISTANT ARCHITECT
No.
Date
Revision
Job No.
Total Drawing
Checked
Drawing No.
04
ผังบริเวณ
มาตราส่วน
แบบนี้เป็นลิขสิทธิ์ส่วนบุคคล ห้ามคัดลอก ทำซ้ำ ก่อนได้รับอนุญาตจากเจ้าของแบบ

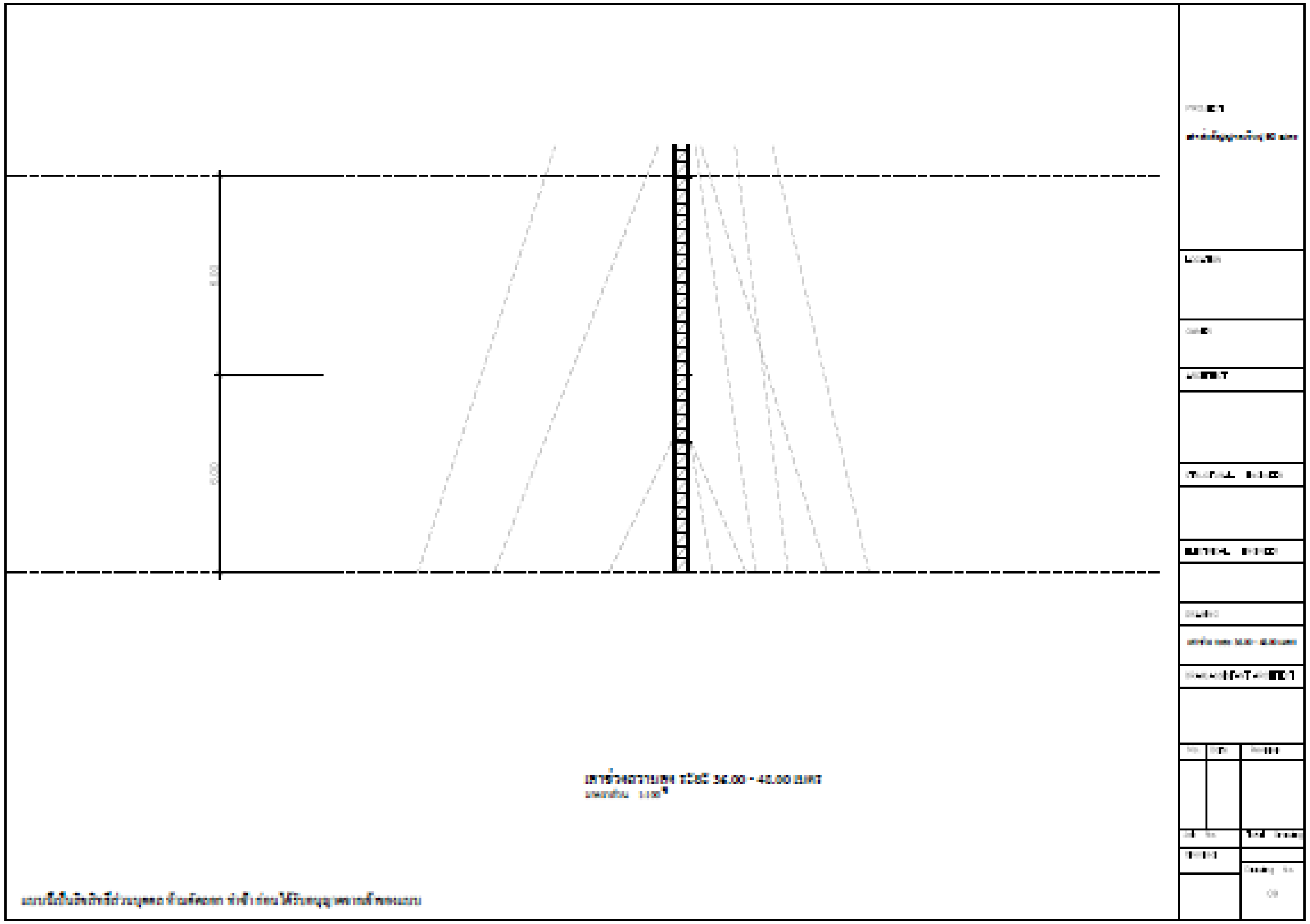


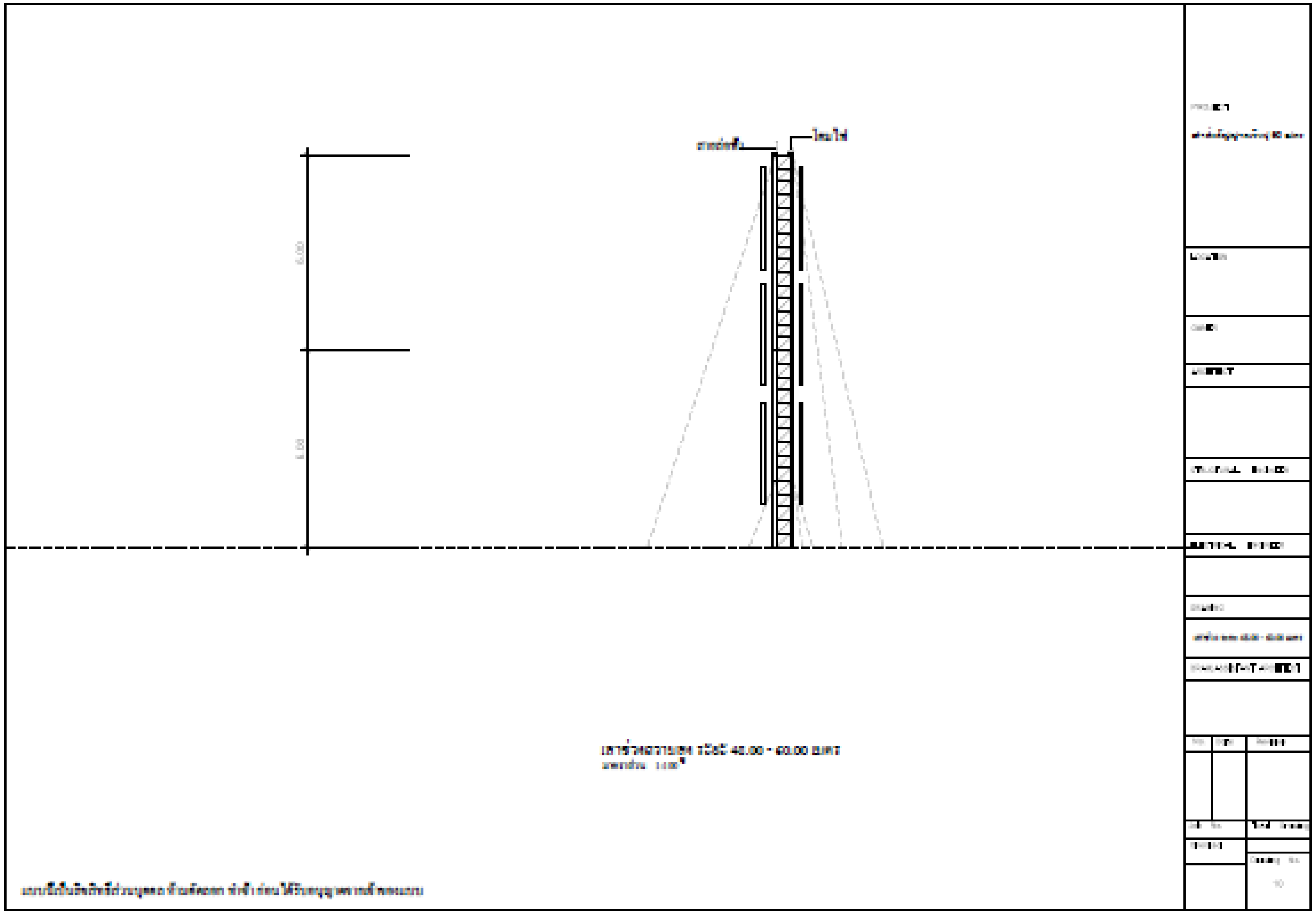


แบบ กทปส. ME-003

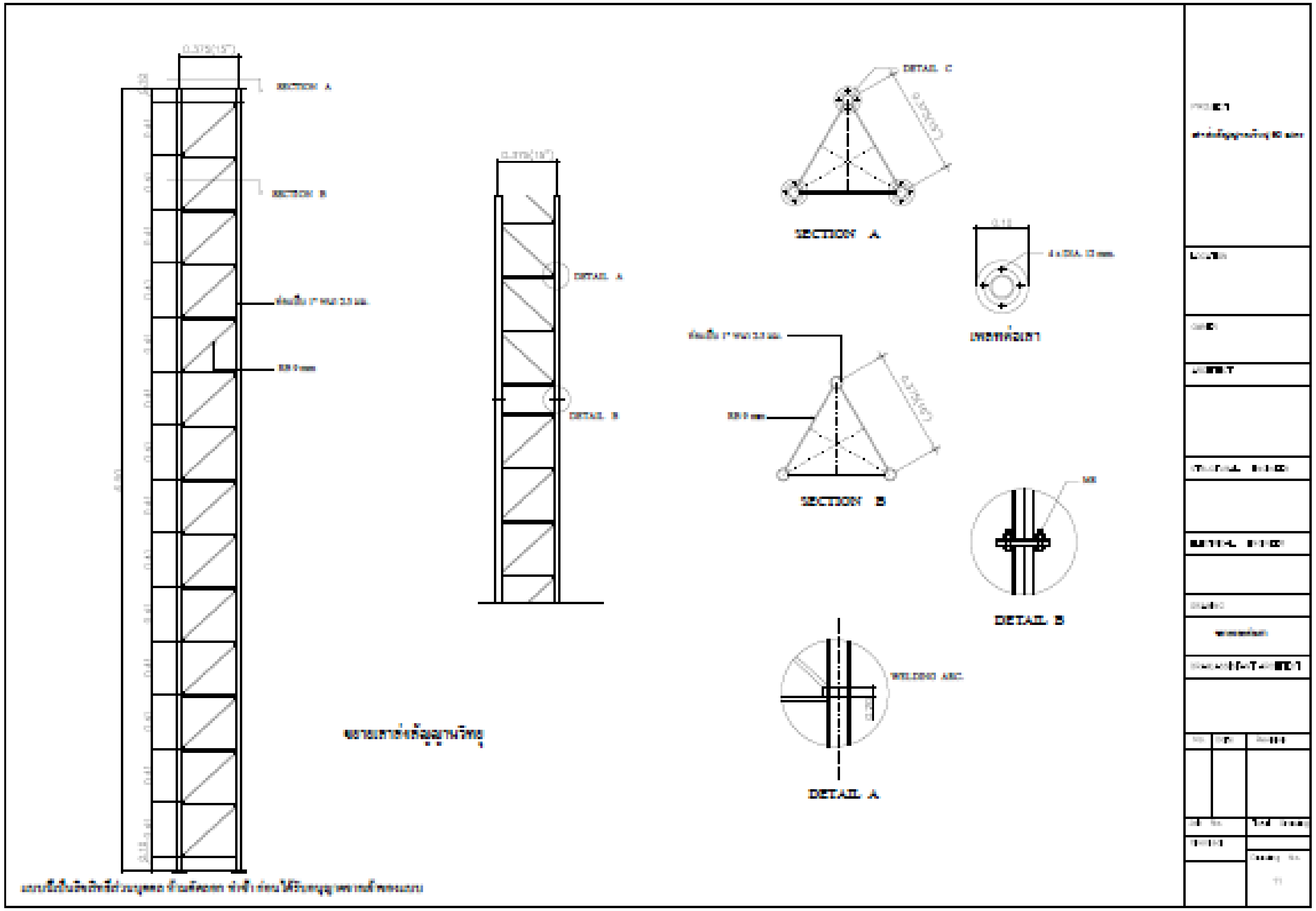


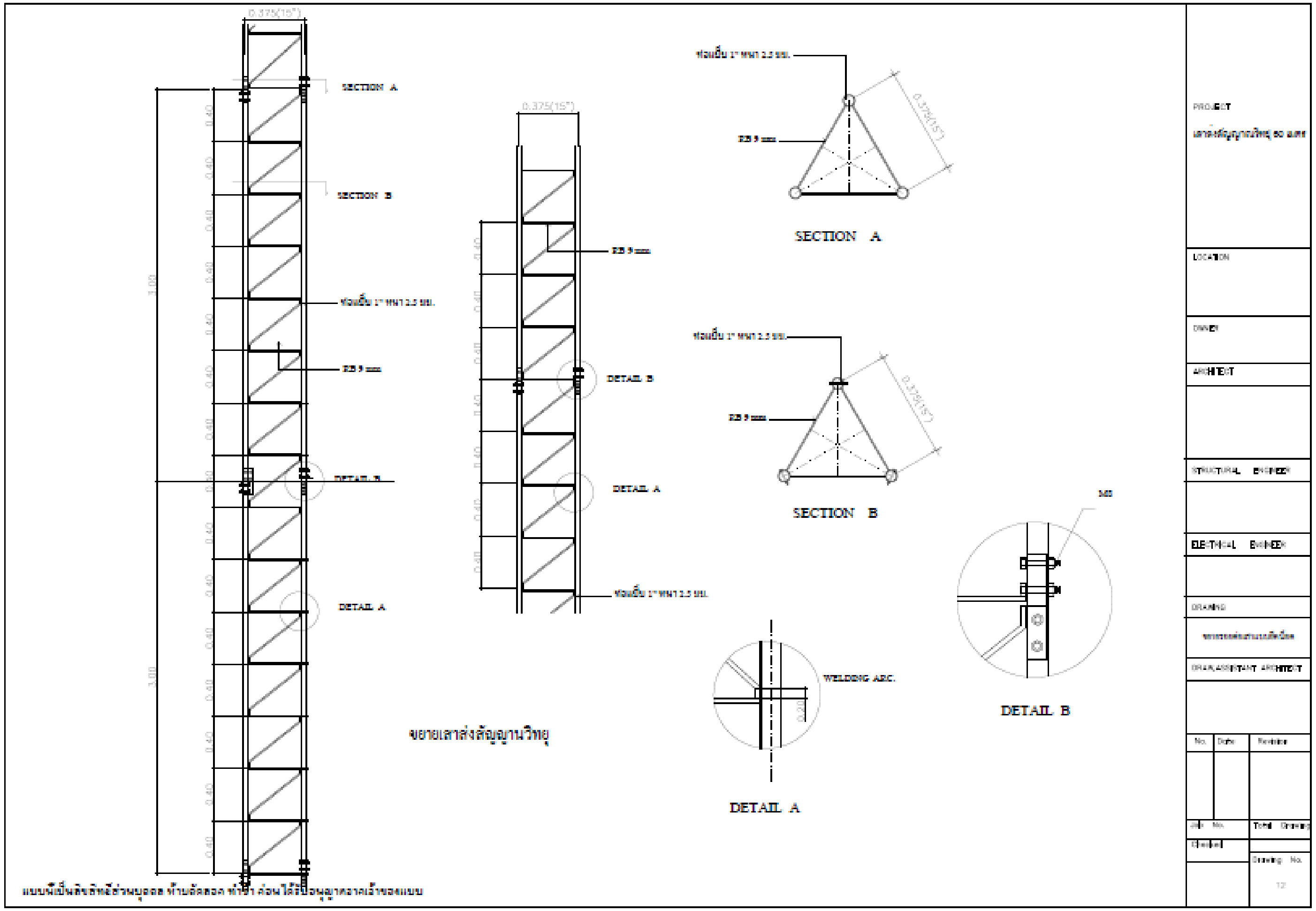


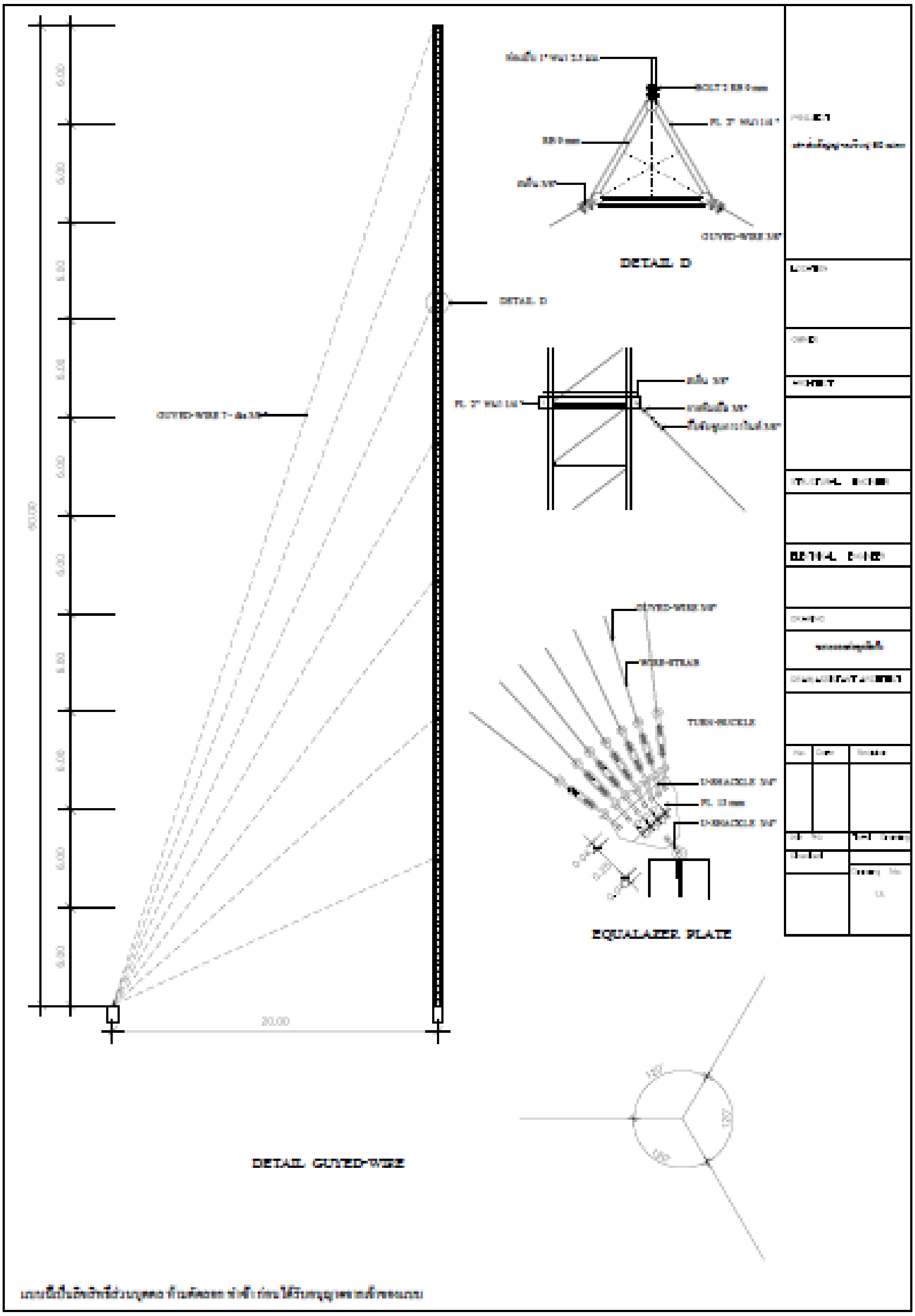




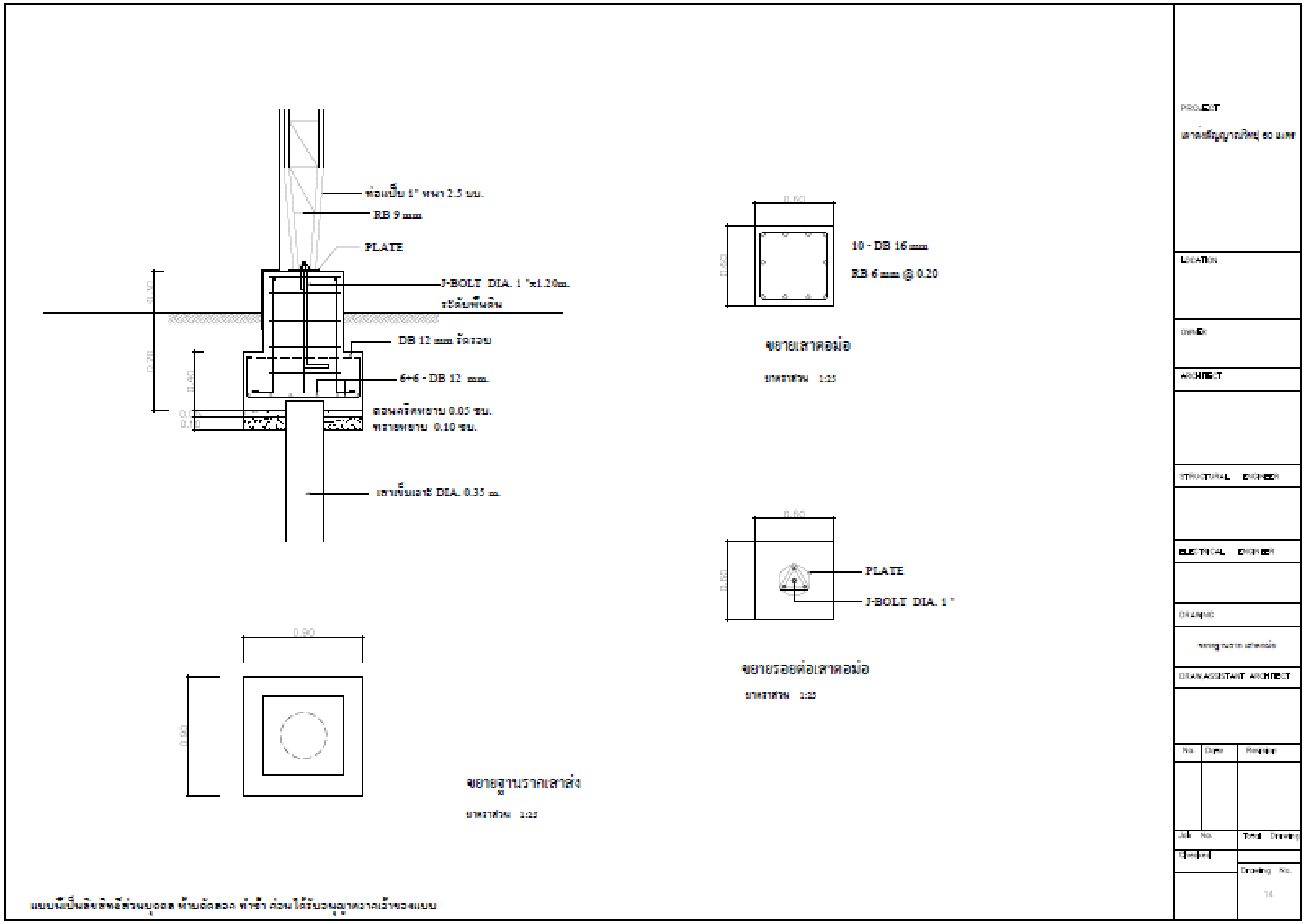
แบบ กทปส. ME-003

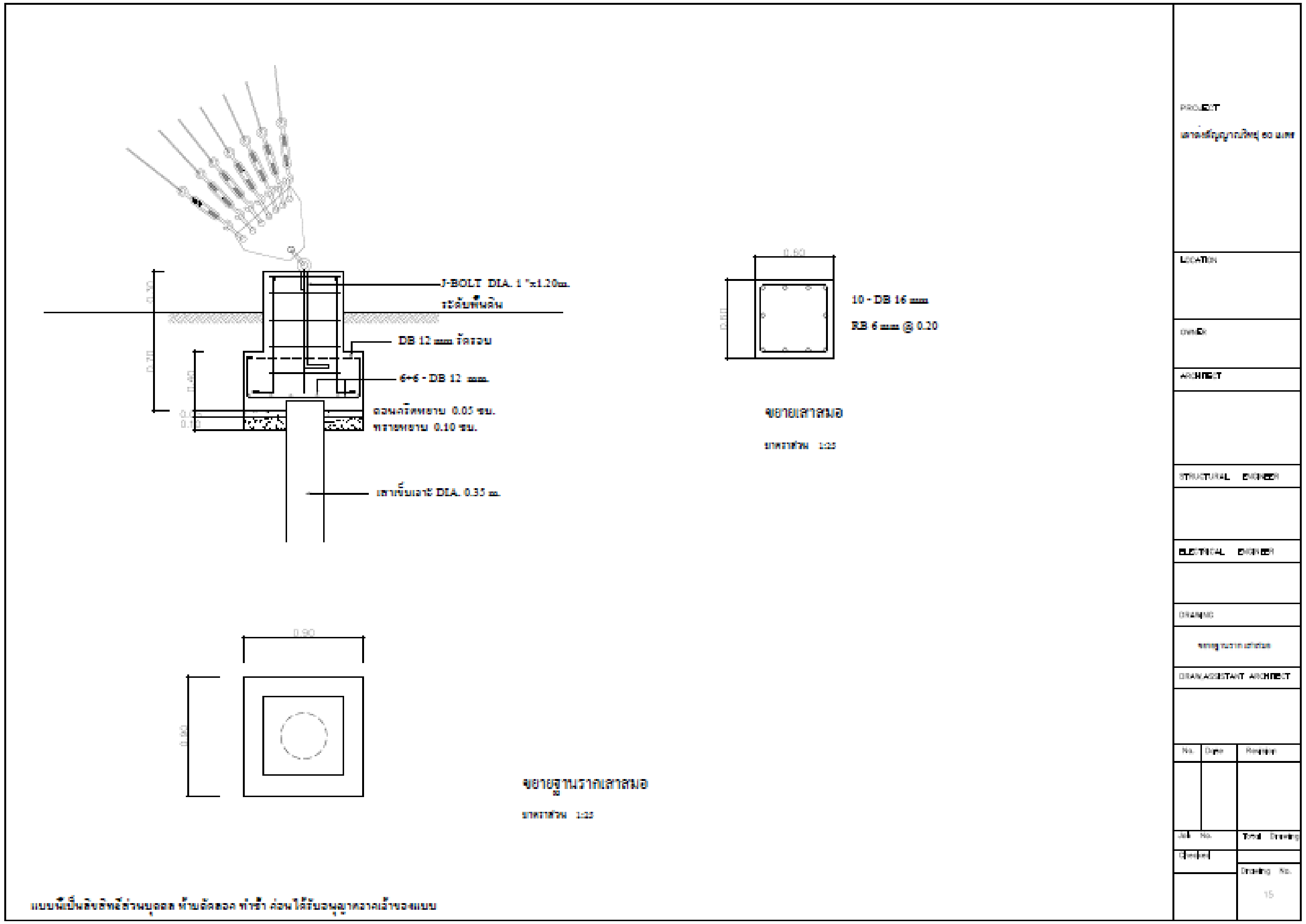

SECTION A
SECTION B
DETAIL A
DETAIL B

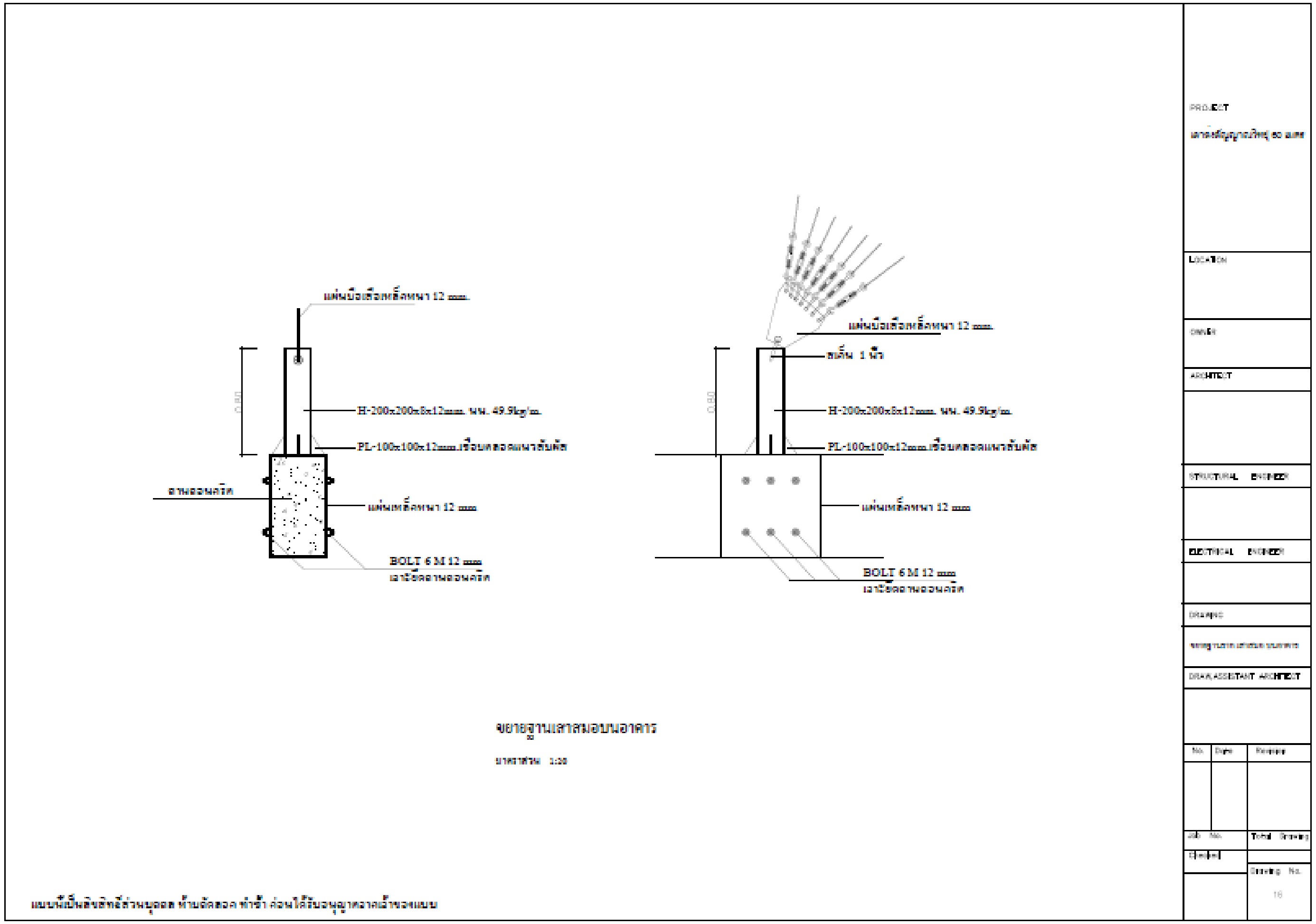

SECTION A
SECTION B
DETAIL A
DETAIL B
WELDING ARC.
ขยายเสาส่งสัญญาณวิทยุ



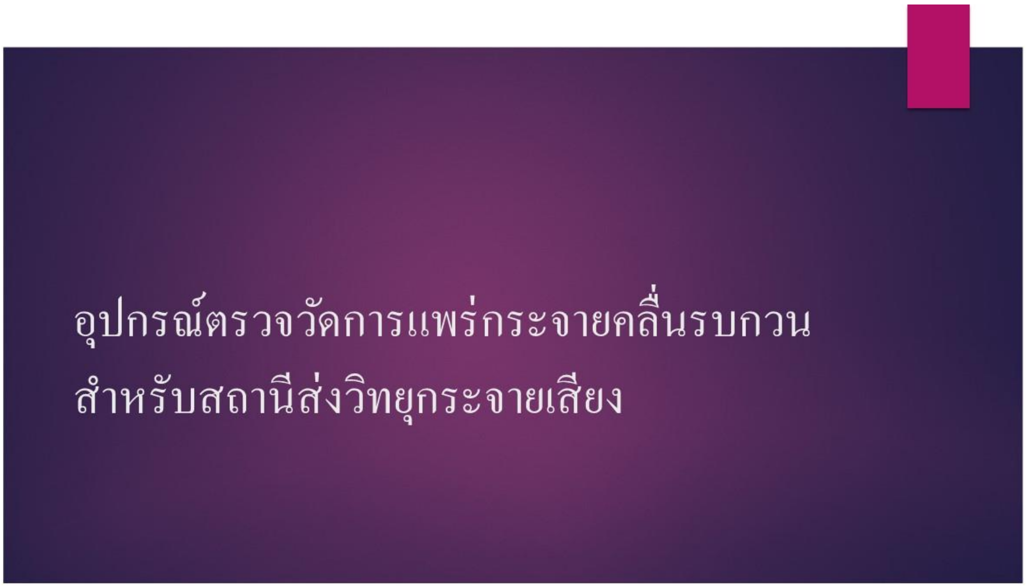
แบบ กทปส. ME-003


ท่อแป๊บ 1" หนา 2.5 มม.
RB 9 mm
PLATE
J-BOLT DIA. 1 "x1.20m.
ระดับพื้นดิน
DB 12 mm รัดรอบ
6+6 - DB 12 mm.
คอนกรีตหยาบ 0.05 ซม.
ทรายหยาบ 0.10 ซม.
เสาเข็มเจาะ DIA. 0.35 m.
ขยายฐานรากเสาส่ง
10 - DB 16 mm
RB 6 mm @ 0.20
ขยายเสาตอม่อ
PLATE
J-BOLT DIA. 1 "
ขยายรอยต่อเสาตอม่อ
PROJECT
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
DRAW/ASSISTANT ARCHITECT


J-BOLT DIA. 1 "x1.20m.
ระดับพื้นดิน
DB 12 mm รัดรอบ
6+6 - DB 12 mm.
คอนกรีตหยาบ 0.05 ซม.
ทรายหยาบ 0.10 ซม.
เสาเข็มเจาะ DIA. 0.35 m.
10 - DB 16 mm
RB 6 mm @ 0.20
ขยายเสาสมอ
มาตราส่วน 1:25
ขยายฐานรากเสาสมอ
มาตราส่วน 1:25
แบบนี้เป็นลิขสิทธิ์ส่วนบุคคล ห้ามคัดลอก ทำซ้ำ ก่อนได้รับอนุญาตจากเจ้าของแบบ
PROJECT
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
DRAW/ASSISTANT ARCHITECT
No.
Date
Revision
Job No.
Total Drawing
Checked
Drawing No.
15


H-200x200x8x12mm. นน. 49.9kg/m.
PL-100x100x12mm.
BOLT 6 M 12 mm
H-200x200x8x12mm. นน. 49.9kg/m.
PL-100x100x12mm.
BOLT 6 M 12 mm
ขยายฐานเสาสมอบนอาคาร
PROJECT
LOCATION
OWNER
ARCHITECT
STRUCTURAL ENGINEER
ELECTRICAL ENGINEER
DRAWING
DRAW ASSISTANT ARCHITECT
No. Date Revision
Job No.
Total Drawing
Drawing No.
16

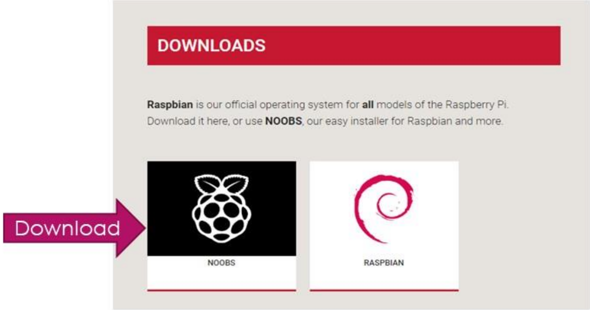
ภาคผนวก ข
รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแพร่กระจายคลื่นรบกวน สำหรับสถานีส่งวิทยุกระจายเสียง

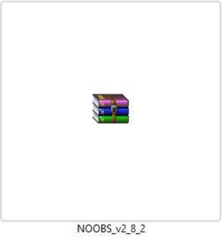

อุปกรณ์ตรวจวัดการแพร่กระจายคลื่นรบกวน
สำหรับสถานีส่งวิทยุกระจายเสียง

HARDWARE
Raspberry PI 3
Micro SD Card
5V Adapter
3.5" TFT RPI LCD Display
SDR Dongle
Micro USB

DOWNLOAD RASPBERRY PI OS

- https://www.raspberrypi.org/downloads/

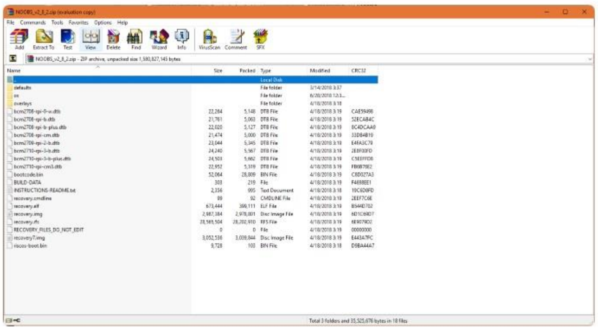




หลังจะ Download เสร็จ จะได้เป็น File Zip/RAR ให้ทำการเปิดไฟล์ขึ้นมา

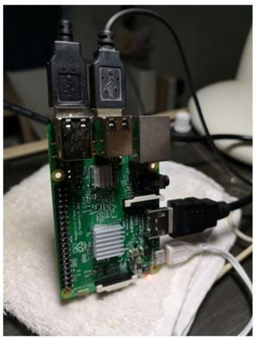
INSTALL RASPBERRY PI OS

- 1. เสียบ Micro SD Card เข้า Computer
- 2. นำไฟล์ ทั้งหมด หลังจากเปิด ไฟล์ ที่ Download มา Copy ลง Micro SD Card
- 3.ให้นำ SD card ใส่เครื่องทางด้านหลัง

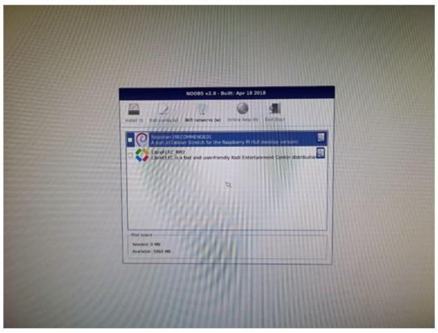


INSTALL RASPBERRY PI OS (Cont.)

- 4. นำ Mouse และ Keyboard และ สาย HDMI มาต่อกับ Raspberry PI แล้ว ไปต่อจอคอม แล้วทำการเปิดเครื่อง

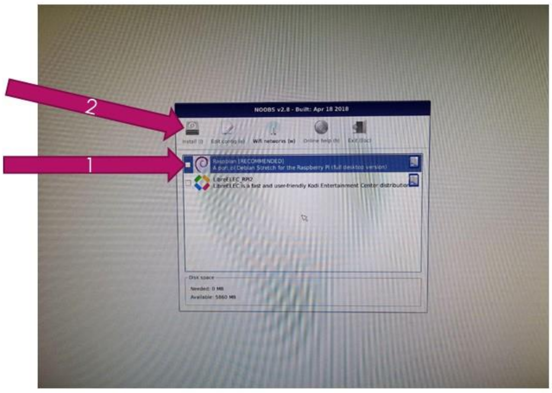


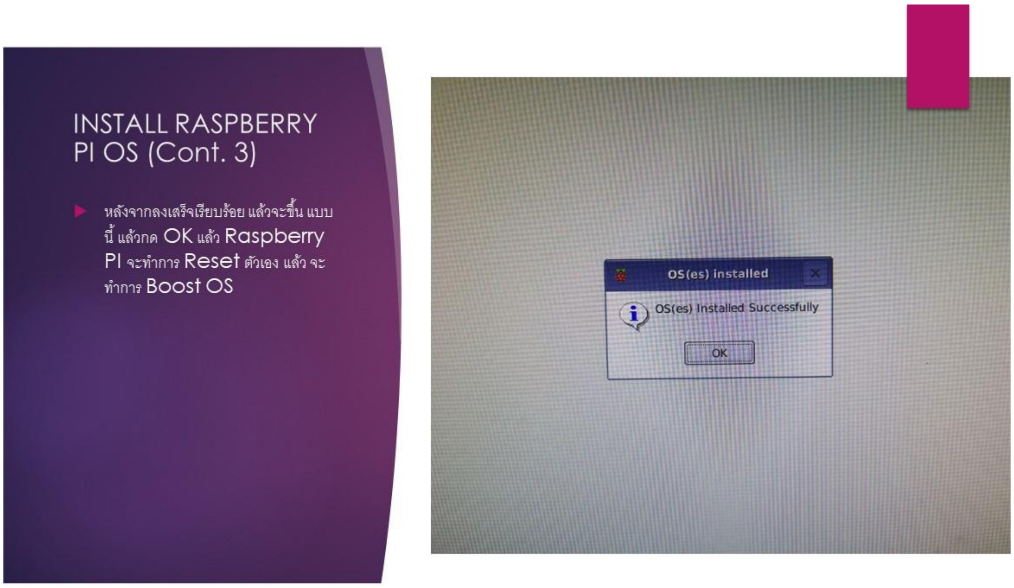
จะได้

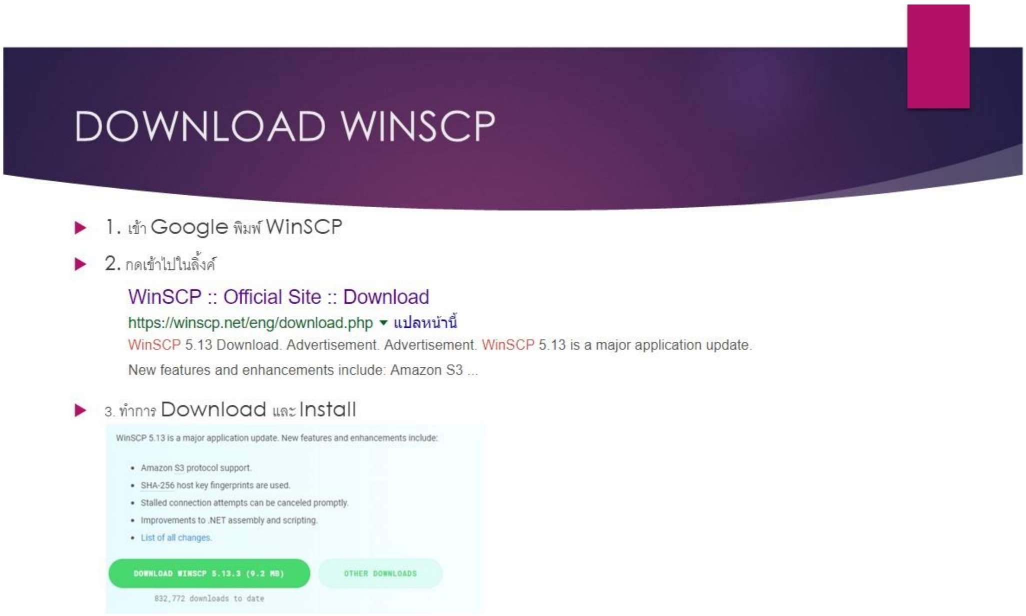


INSTALL RASPBERRY PI OS (Cont. 2)

- 5. ให้ทำการเลือก อันแรก แล้ว กด install
- 6. ถ้ามีหน้าต่างอะไรขึ้นมา ให้กด Yes แล้วรอติดตั้งระบบให้สมบูรณ์




INSTALL RASPBERRY PI OS (Cont. 3)
หลังจากลงเสร็จเรียบร้อย แล้วจะขึ้น แบบนี้ แล้วกด OK แล้ว Raspberry PI จะทำการ Reset ตัวเอง แล้ว จะทำการ Boost OS
OS(es) installed
OS(es) Installed Successfully
OK


DOWNLOAD WINSCP
1. เข้า Google พิมพ์ WinSCP
2. กดเข้าไปในลิ้งค์
WinSCP :: Official Site :: Download
https://winscp.net/eng/download.php ▾ แปลหน้านี้
WinSCP 5.13 Download. Advertisement. Advertisement. WinSCP 5.13 is a major application update.
New features and enhancements include: Amazon S3 ...
3. ทำการ Download และ Install
WinSCP 5.13 is a major application update. New features and enhancements include:
Amazon S3 protocol support.
SHA-256 host key fingerprints are used.
Stalled connection attempts can be canceled promptly.
Improvements to .NET assembly and scripting.
List of all changes.
DOWNLOAD WINSCP 5.13.3 (9.2 MB)
OTHER DOWNLOADS
832,772 downloads to date

OPEN SSH FOR WINSCP

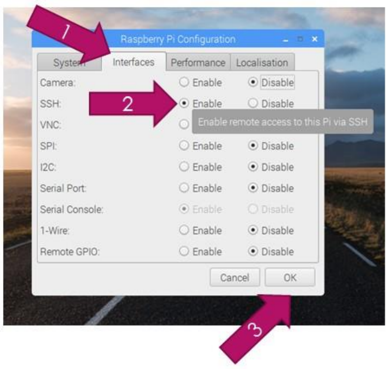
วิธีแรก ไม่ถาวรต้องทำทุกครั้งเมื่อเปิดเครื่อง

- 1. ให้ทำการเลือก รูป Raspberry
- 2. ให้ทำการเลือก Preferences
- 3. ให้ทำการเลือก Raspberry PI Configuration

OPEN SSH FOR WINSCP (Cont.)

วิธีแรก ไม่ถาวรต้องทำทุกครั้งเมื่อเปิดเครื่อง

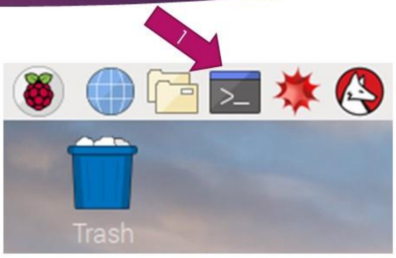
- 1. ให้ทำการเลือก Interfaces
- 2. ให้ทำการเลือก Enable
- 3. ให้ทำการเลือก OK



OPEN SSH FOR WINSCP

วิธีสอง แบบถาวร

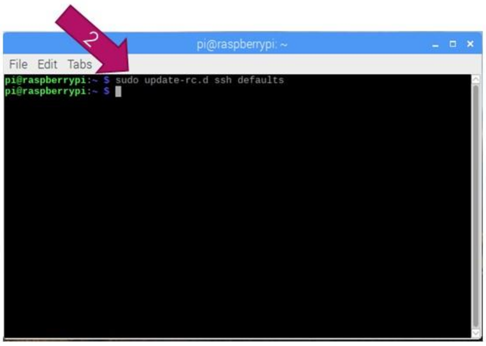
- 1. ให้ทำการเลือก Terminal



OPEN SSH FOR WINSCP (Cont.)

วิธีสอง แบบถาวร

- 2. ให้ทำการพิมพ์ sudo update-rc.d ssh defaults
- 3. ให้ทำการกด Enter

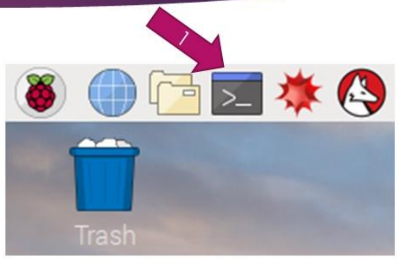


HOW TO CONNECT WIFI

- 1. ให้ทำการกด ไปที่เครื่องหมาย WIFI
- 2. ให้ทำการเลือกเครือข่ายWIFIของเรา

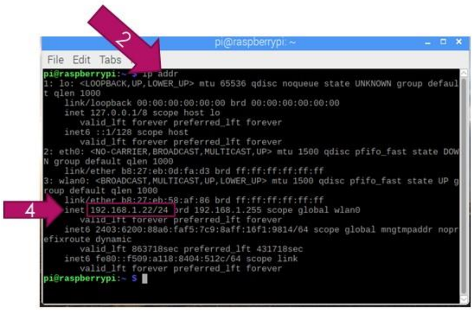
HOW TO FIND RASPBERRYPI IP-ADDRESS

- 1. ให้ทำการเลือก Terminal



HOW TO FIND RASPBERRYPI IP-ADDRESS

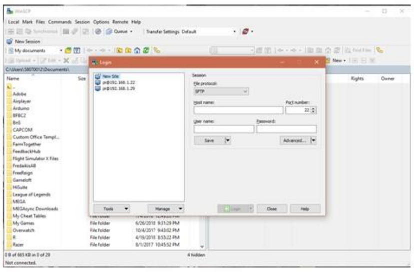
- 2. ให้ทำการพิมพ์ ip addr
- 3. ให้ทำการกด Enter
- 4.เราจะได้ IP-Address ของ Raspberry PI ของเรา

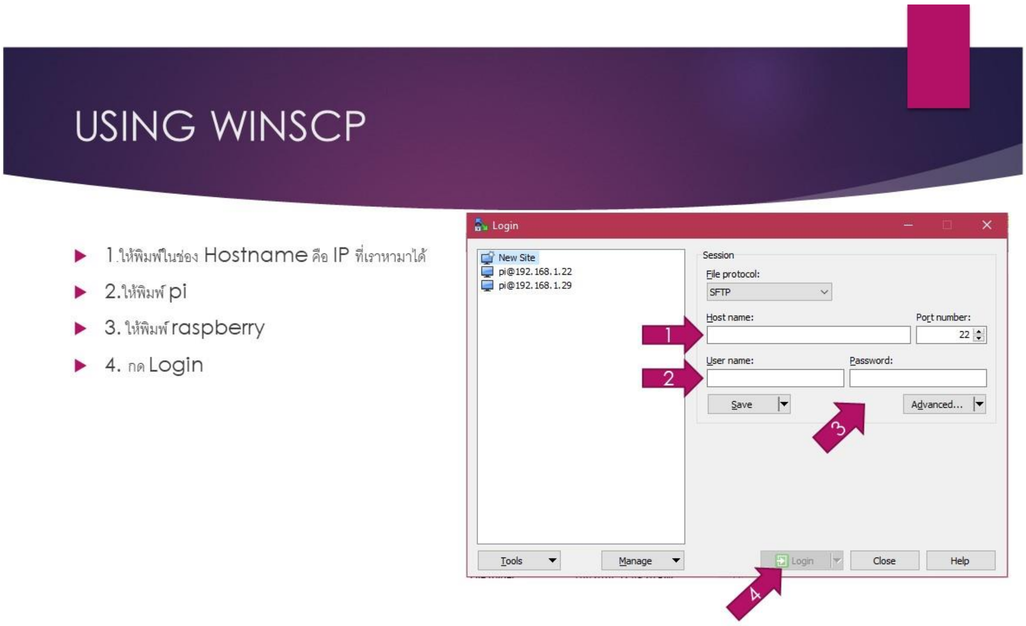


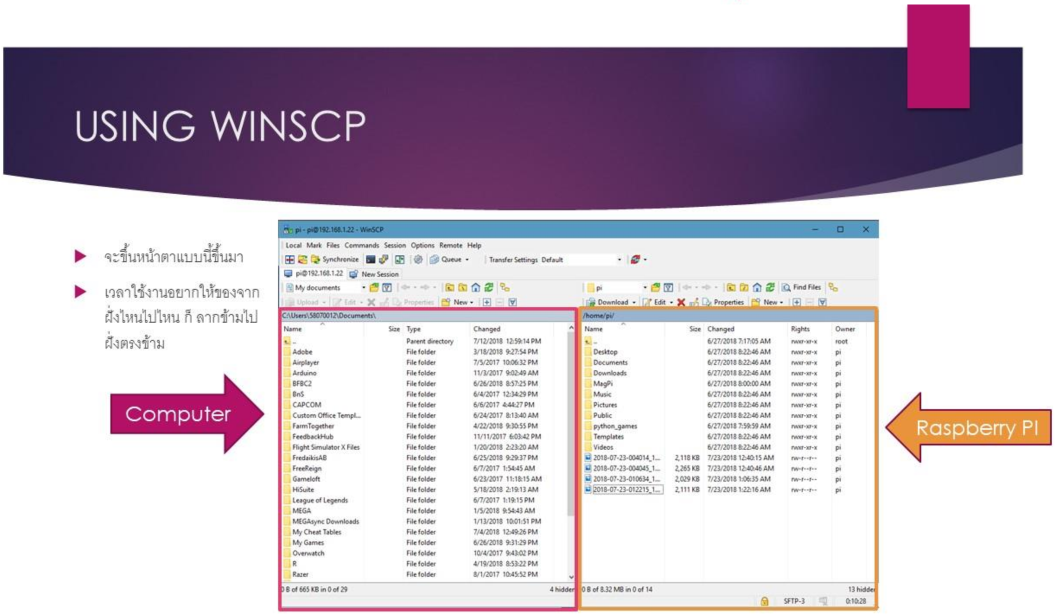
USING WINSCP

- 1. เปิดโปรแกรมโดยการ Double-Click

- จะขึ้นมาเป็นหน้าตาแบบนี้

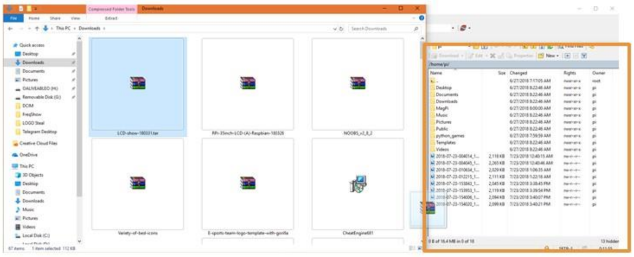



USING WINSCP
1.ให้พิมพ์ในช่อง Hostname คือ IP ที่เราหามาได้
2.ให้พิมพ์ pi
3. ให้พิมพ์ raspberry
4. กด Login
Login
New Site
pi@192.168.1.22
pi@192.168.1.29
Session
File protocol:
SFTP
Host name:
Port number:
22
User name:
Password:
Save
Advanced...
Tools
Manage
Login
Close
Help
1
2
3
4


USING WINSCP
จะขึ้นหน้าตาแบบนี้ขึ้นมา
เวลาใช้งานอยากให้ของจากฝั่งไหนไปไหน ก็ ลากข้ามไปฝั่งตรงข้าม
Computer
Raspberry PI

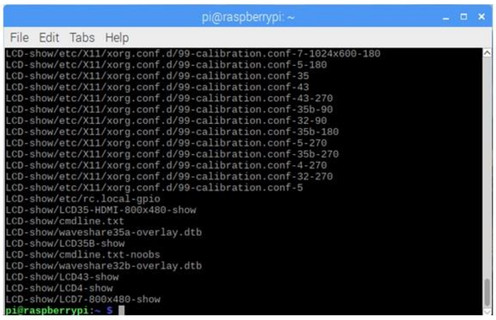
INSTALL 3.5 RPI LCD DISPLAY DRIVER

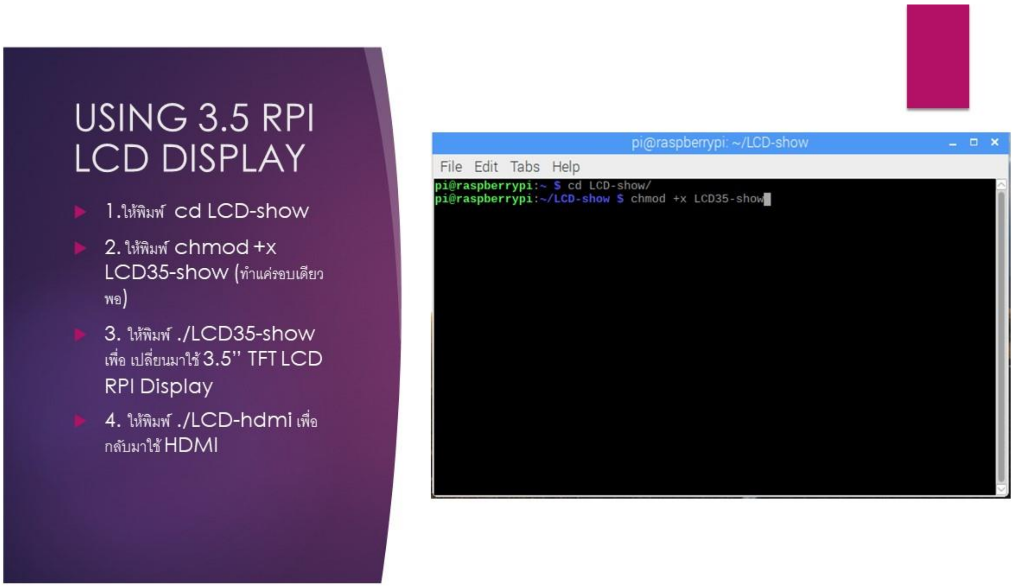
- 1. https://www.waveshare.com/wiki/3.5inch_RPi_LCD_(A)#Driver เข้าไป Download Driver ที่ ลิ้งนี้
- 2.เปิด WinSCP แล้วทำการเชื่อมต่อกับ RaspberryPI แล้วนำ Driver ที่ Download เสร็จแล้วทำไปใส่ไว้ในฝั่ง RaspberryPI โดยการลาก

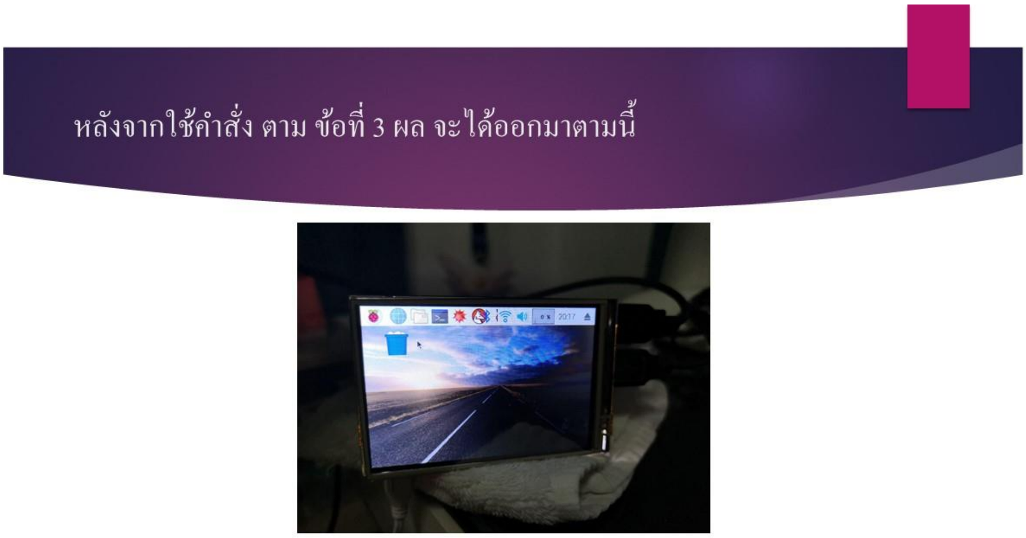


INSTALL 3.5 RPI LCD DISPLAY DRIVER (Cont.)

- 3.ให้พิมพ์ tar xvf LCD-show-*.tar.gz แล้วกด Enter จะออกมาเป็นดังรูป เป็นการลง Driver เสร็จสมบูรณ์

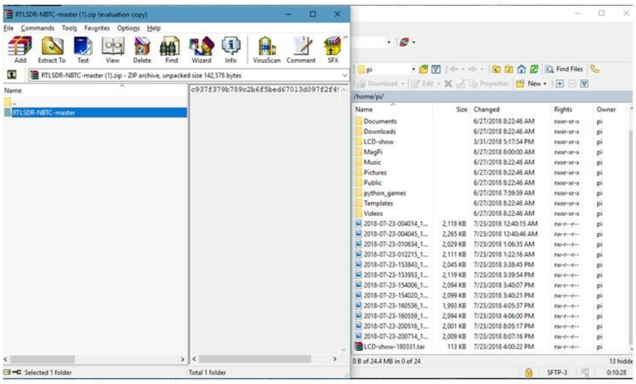



USING 3.5 RPI LCD DISPLAY
1.ให้พิมพ์ cd LCD-show
2. ให้พิมพ์ chmod +x LCD35-show (ทำแค่รอบเดียวพอ)
3. ให้พิมพ์ ./LCD35-show เพื่อ เปลี่ยนมาใช้ 3.5" TFT LCD RPI Display
4. ให้พิมพ์ ./LCD-hdmi เพื่อ กลับมาใช้ HDMI
pi@raspberrypi: ~/LCD-show
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~ $ cd LCD-show/
pi@raspberrypi:~/LCD-show $ chmod +x LCD35-show


หลังจากใช้คำสั่ง ตาม ข้อที่ 3 ผล จะได้ออกมาตามนี้

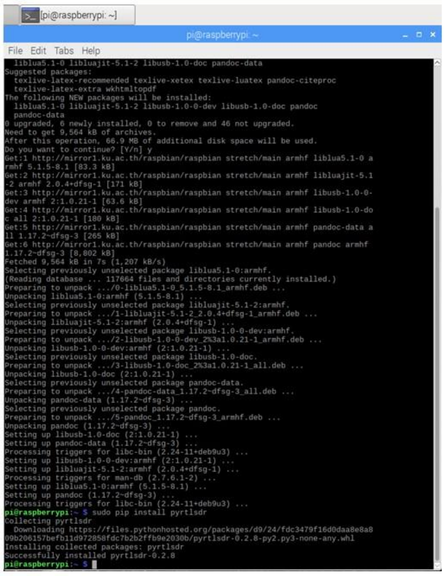
การลงโปรแกรมตรวจคลื่นรบกวน

- 1. โหลดโปรแกรมที่นี่ แล้วกดเปิดขึ้นมา
- 2. เปิดโปรแกรม WinSCP แล้วเชื่อมต่อกับ RaspberryPI
- 3. ลาก ที่เปิดขึ้นมา เข้าไปใน RaspberryPI



INSTALL PYTHON PACKET

- 1. เปิด Terminal
- 2. พิมพ์ sudo apt-get update
- 3. พิมพ์ sudo apt-get install cmake build-essential python-pip libusb-1.0-0-dev python-numpy git pandoc
- 4. ถ้ามีขึ้นให้กด Continue ให้ พิมพ์ y แล้ว กด Enter
- 5. พิมพ์ sudo pip install pyrtlsdr

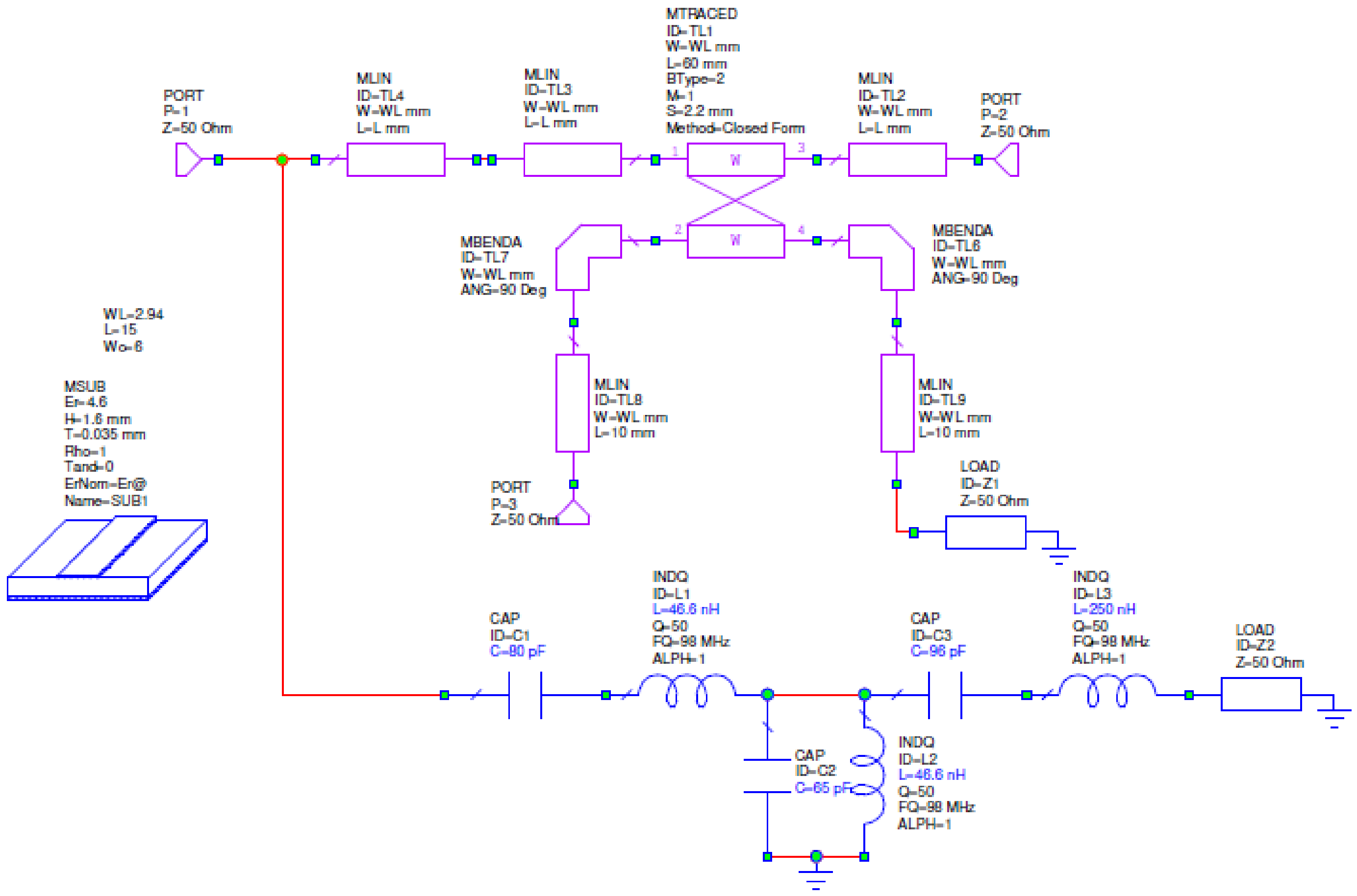


เป็นอันเสร็จสมบูรณ์

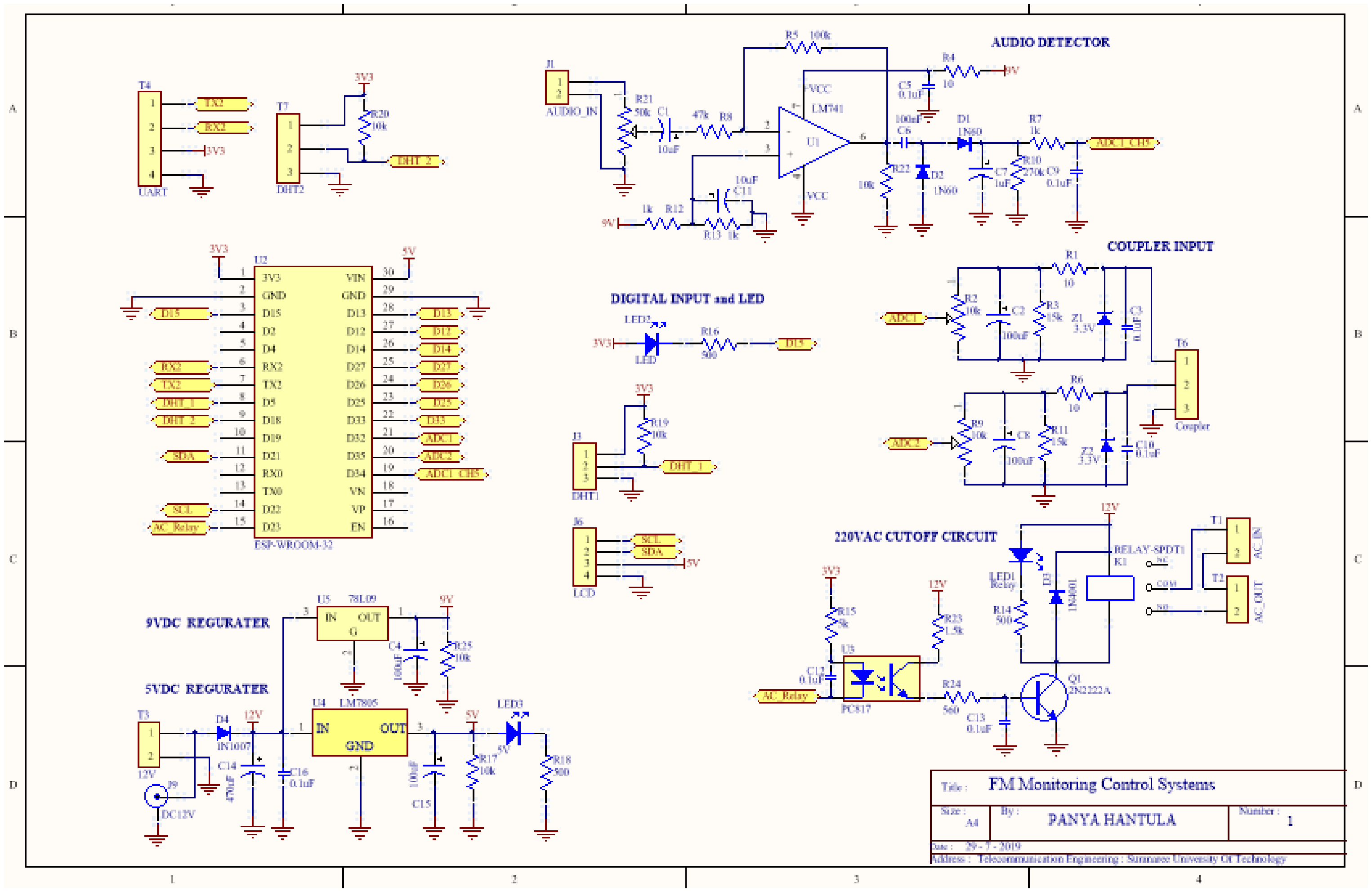
- 1. เปิด Terminal
- 2. พิมพ์ cd ~ แล้วกด Enter
- 3. พิมพ์ git clone git://git.osmocom.org/rtl-sdr.git แล้วกด Enter
- 4. พิมพ์ cd rtl-sdr แล้วกด Enter
- 5. พิมพ์ mkdir build แล้วกด Enter
- 6. พิมพ์ cd build แล้วกด Enter
- 7. พิมพ์ cmake ../ -DINSTALL_UDEV_RULES=ON –DDETACH_KERNEL_DRIVER=ON แล้วกด Enter
- 8. พิมพ์ make แล้วกด Enter
- 9. พิมพ์ sudo make install แล้วกด Enter
- 10. พิมพ์ sudo ldconfig แล้วกด Enter

วิธีเปิดโปรแกรม
1. ให้ทำการเปลี่ยนไปใช้จอ 3.5" TFT LCD RPI Display
2. ให้เสียบตัว SDR Dongle
3. ให้เปิด Terminal
4. ให้พิมพ์ cd RTLSDR-NBTC-master
5. ให้พิมพ์ sudo python freqshow.py
2
3
Trash

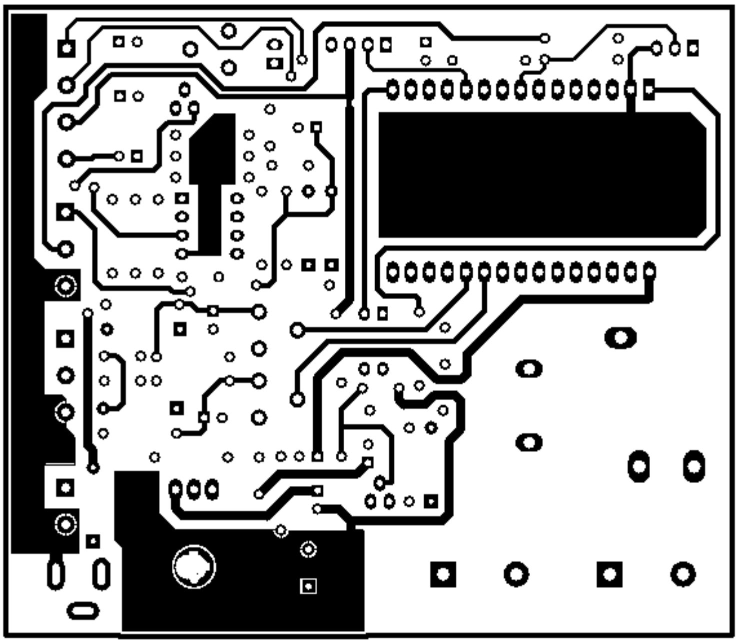
ภาคผนวก ค
รายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์ Directional Coupler และแบบวงจรอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

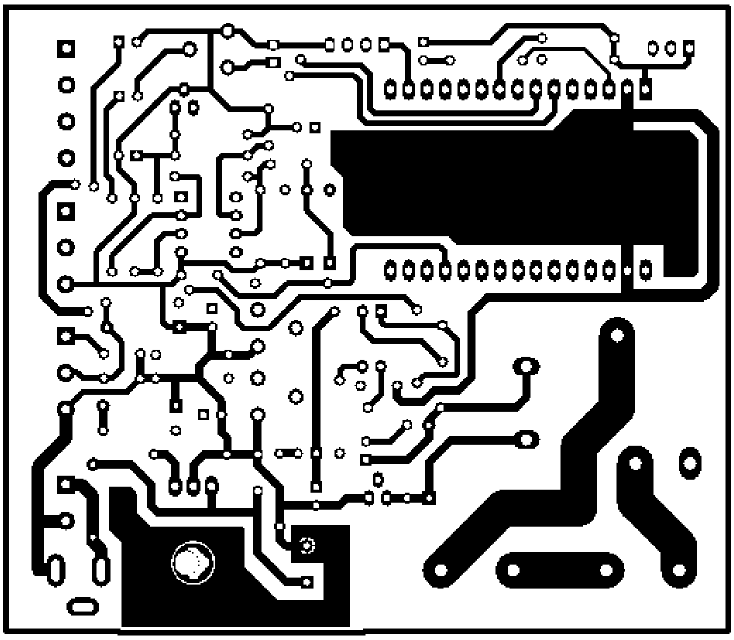


รายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์ Directional Coupler



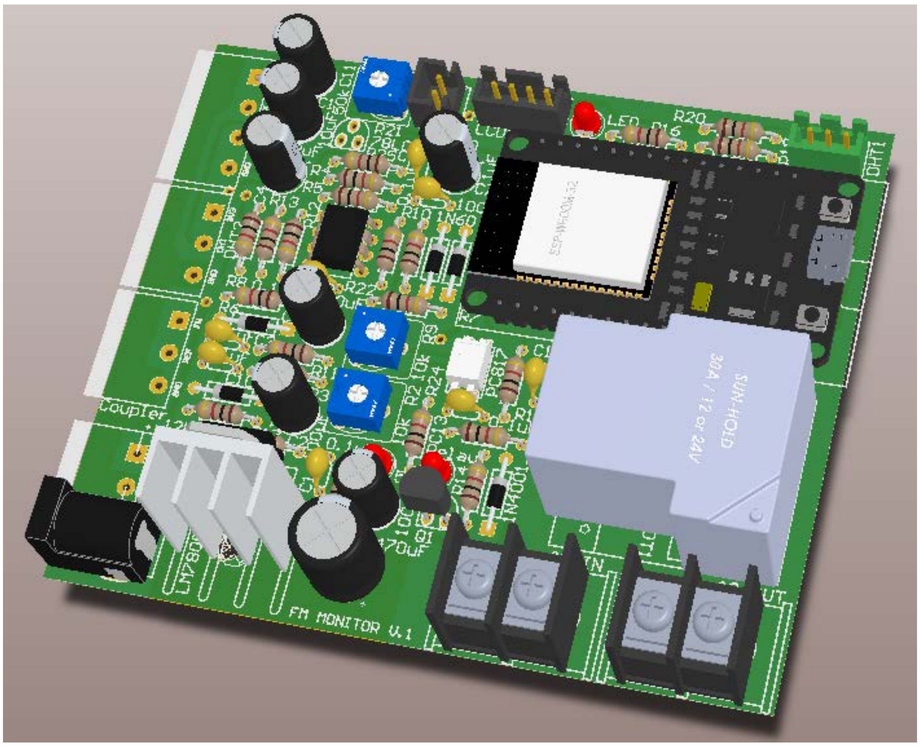
แบบวงจรอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



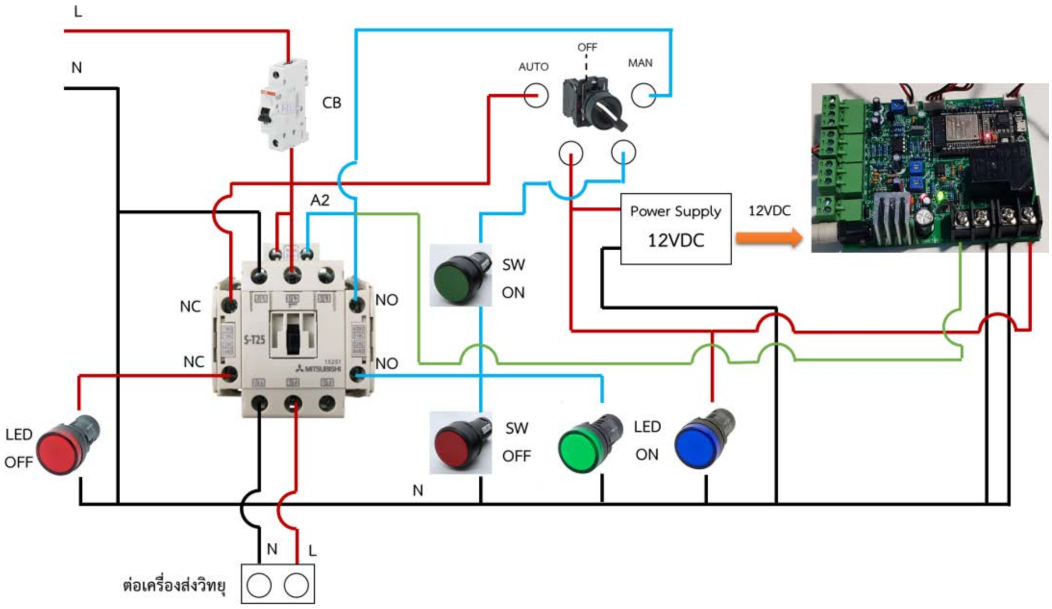


(ก) ด้านบน (Top Layer) (ข) ด้านล่าง (Bottom Layer)

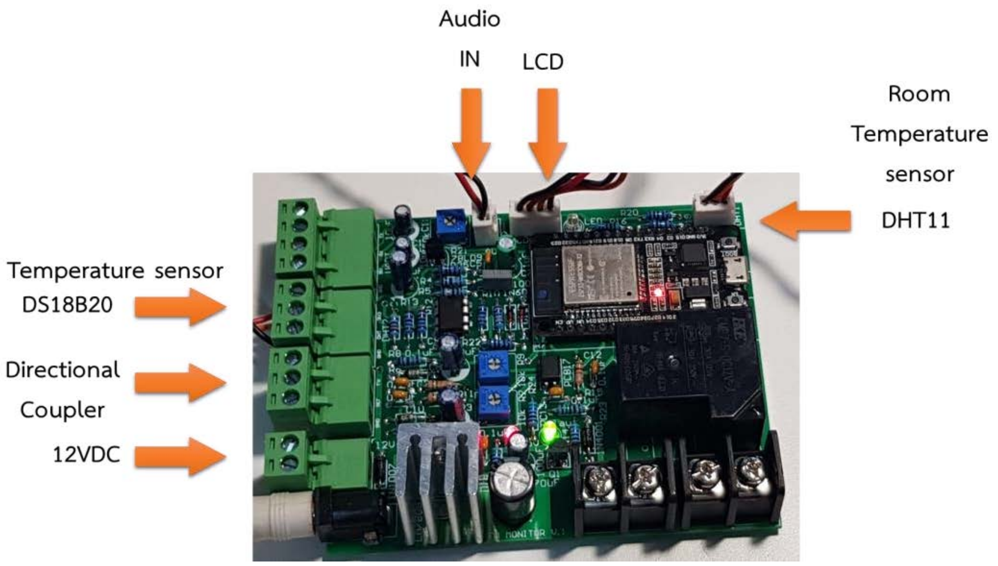
แบบลายเส้นวงจรอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



ตัวอย่างชิ้นงาน 3 มิติของอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



แผนผังของตู้ควบคุมของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง



แผนผังการต่ออุปกรณ์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

ภาคผนวก ง
รายละเอียดการจัดอบรมให้ความรู้เชิงวิชาการ
และการประชาสัมพันธ์โครงการ

กำหนดการ

อบรมเชิงวิชาการและให้ความรู้

“โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง”

ในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2562 ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาส

สโมสรทหารบก ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานครฯ

08.30 – 09.00 น.	ลงทะเบียน (ห้องผ่านฟ้าลีลาศ)
09.00 – 09.30 น.	พิธีเปิดและการบรรยายพิเศษ (ผู้แทนจากสำนักงาน กสทช.)
09.30 – 10.30 น.	ระบบการวัดแบบรูปการณ์แพร่พลังงานการกระจายคลื่นโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (ดร. กิตติ วงศ์ถาราวัฒน์ และ ดร. รัศมิทัต แผนสมบูรณ์)
10.30 – 11.00 น.	รับประทานอาหารว่าง
11.00 – 12.00 น.	อุปกรณ์สำหรับการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอม (คุณสมเกียรติ แก้วไชยะ และ คุณมานะ ลัทธวนิชพันธ์)
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 – 14.00 น.	แนวทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากงานวิจัย (ผู้แทนจากสำนักงาน กสทช.)
14.00 – 15.00 น.	อุปกรณ์ติดตามสถานะและข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียง (ผศ. ดร. รังสรรค์ ทองทา และ คุณปัญญา หันตุลา)
15.00 – 15.30 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
15.30 – 16.00 น.	สรุปปิดการอบรมเชิงวิชาการ

** หมายเหตุ: กำหนดการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม **

หลักฐานรายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมเชิงวิชาการและให้ความรู้

“โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง”

ใบลงชื่อผู้เข้ารับการอบรม-สัมมนา

ชื่อโครงการ โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญานรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานี วิทยุกระจายเสียง สนับสนุนโดยกองทุน กทปส (กสทช)

วันศุกร์ที่ 1 พฤศจิกายน 2562 เวลา 09.00 – 15.00 น.

ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาศ สโมสรทหารบก (วิภาวดี) ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานคร

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลายมือชื่อ
1	นายมานพ เจริญสะอาด	
2	นายจักรพันธ์ กังวลงาน	
3	นายทวีศักดิ์ คัมภ์บุญยอ	
4	นางสาวปณิตา คำยา	ปณิตา
5	นายธนกฤต ยมสังข์	ธนกฤต
6	นายอุดมศักดิ์ จันทร์ไชยแก้ว	อุดมศักดิ์
7	นายวิริยะ สุวิชาโน	
8	นางสาวหนึ่งฤทัย เพ็ชรรัตน์	
9	นายอัครวัฒน์ รัตนกิตติ์อังกูร	
10	นางสาวทิพสุดามณฑ์ รัตนกิตติ์อังกูร	
11	นายสมชาย วิมลจิตรสะอาด	
12	นายไกรสีห์ จันทร์ศิริฉายา	
13	นางสาวจุฑารัตน์ จันทร์ศิริฉายา	
14	นายวีระพล คนคง	
15	นายบัณฑิต รักวีรธรรม	
16	นายสุธี สุวรรณประภา	
17	นายมโน ตามกาล	Mano
18	ร.ต.ปริน วงษ์ชู	T.N.
19	พ.อ.อ.จิรชัย แก้วกมล	
20	จ.ท.ธราธิป แสงจันทร์	ธราธิป
21	นายธวัชชัย ศรีประเสริฐ	
22	นางสาวนัจภัค น้อยดำ	น้อย
23	ส.ท.สุรเดช อินทัง	ส.ท.
24	นายคฑาวุฒิ เจริญนะอาด	คฑาวุฒิ เจริญสะอาด
25	นายคมสันต์ สีดานุช	

ใบลงชื่อผู้เข้ารับการอบรม-สัมมนา

ชื่อโครงการ โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญานรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง สนับสนุนโดยกองทุน กทปส (กสทช)

วันศุกร์ที่ 1 พฤศจิกายน 2562 เวลา 09.00 – 15.00 น.

ณ ห้องผ่านฟ้าลีลาศ สโมสรทหารบก (วิภาวดี) ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพมหานคร

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลายมือชื่อ
26	นายสัณฑิชัย ลองพิชัย	
27	นายเอกนริน พลาชีวะ	[signature]
28	นางสาวพรนิภา ปทุมสูติ	[signature]
29	นางสาวอัฐภัญญา สอนชัย	[signature]
30	นายศักดิ์ทวี ศรีโกศล	[signature]
31	นายพงศ์เทพ บรรเทา	[signature]
32	นายอธิพันธ์ วงษ์สุวรรณ	[signature]
33	นายยุทพ ยาเสร็จ	[signature]
34	นายวัชระ ฉันทนาวิวัฒน์โชติ	[signature]
35	นายธนัญชัย ดอนปัน	[signature]
36	นางสาว[illegible]	[signature]
37	นายพีระพงศ์ ฟ้าเขียว	[signature]
38	[illegible]	[signature]
39		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		
50		

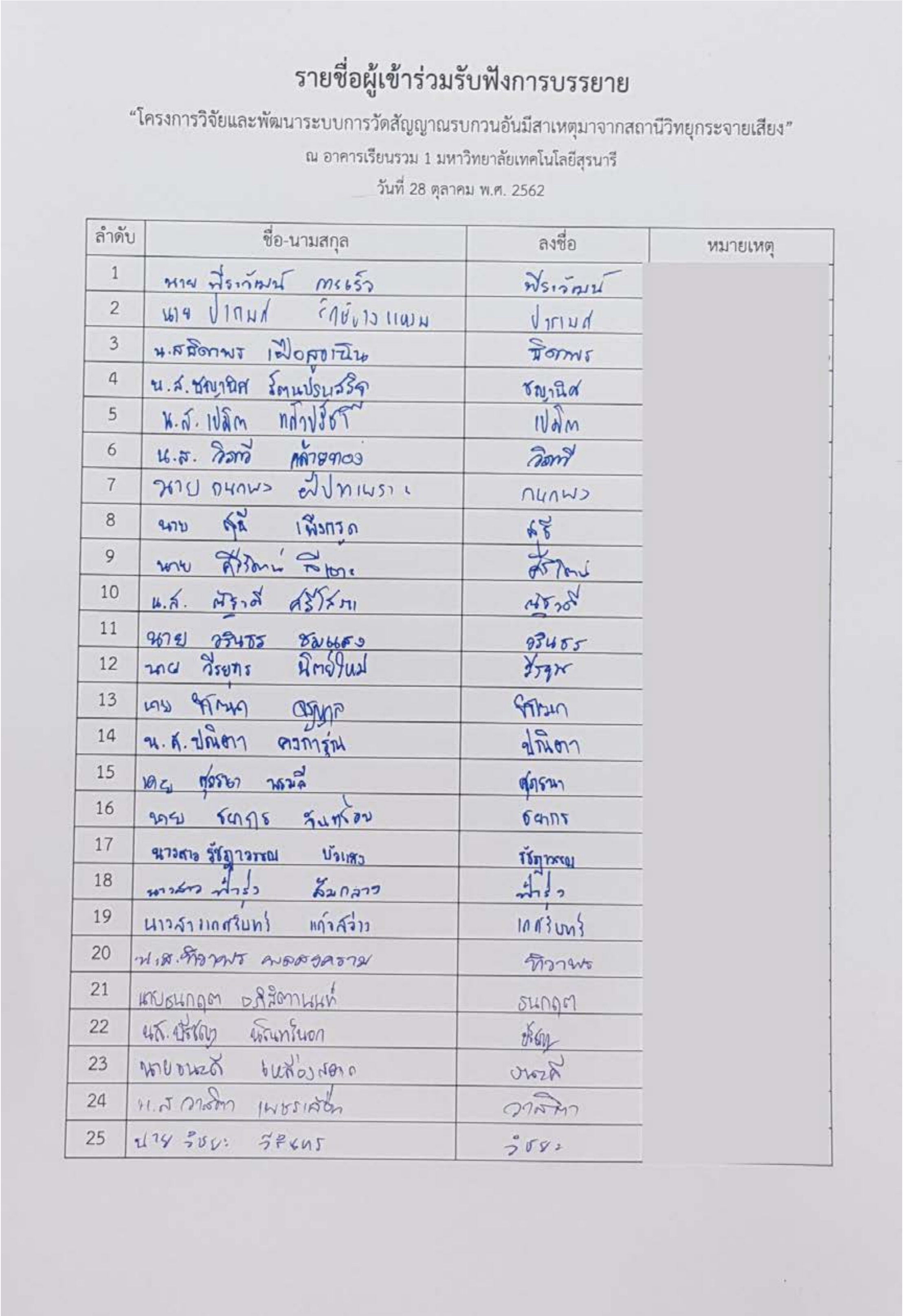
รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	นาย พีระวัฒน์ ภระเร็ว	พีระวัฒน์	
2	นาย ปาเกมส์ จักษ์บางแพม	ปาเกมส์	
3	น.ส.สุธิดาพร เปื่อยสูงเนิน	ธิดาพร	
4	น.ส.ชญานิศ รัตนประเสริฐ	ชญานิศ	
5	น.ส. เปมิกา หล้าปรีชา	เปมิกา	
6	น.ส. วิภาวี คล้ายทอง	วิภาวี	
7	นาย กนกพล ฝีปากเพราะ	กนกพล	
8	นาย สุรี เพ็งกรูด	สุรี	
9	นาย ศิริวัฒน์ ลีเทะ	ศิริวัฒน์	
10	น.ส. ณัฐวดี ศรีโสภา	ณัฐวดี	
11	นาย อรินธร ชมแสง	อรินธร	
12	นาย วีรยุทธ นิตย์ใหม่	วีรยุทธ	
13	นาย ศิโรนก อรุญกุล	ศิโรนก	
14	น.ส. ปณิตา ดวงการุณ	ปณิตา	
15	นาย สุรชา พรมลี	สุรชา	
16	นาย ธนากร จันทร์อ่อน	ธนากร	
17	นางสาว รัชฎาวรรณ บัวแสง	รัชฎาวรรณ	
18	นางสาว ลำรวย ล้อมกลาง	ลำรวย	
19	นางสาว เกศรินทร์ แก้วสว่าง	เกศรินทร์	
20	น.ส.ทิวาพร มงคลสงคราม	ทิวาพร	
21	นาย ธนกฤต อภิสิตานนท์	ธนกฤต	
22	น.ส. ปรีชญา พรินทร์นอก	ชญา	
23	นาย ธนวัต เหลืองสอาด	ธนวัต	
24	น.ส. วาสิตา เพชรเสถียร	วาสิตา	
25	นาย วิชยะ วีระนคร	วิชยะ	



รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	นาย พีระวัฒน์ กระแร้ว	พีระวัฒน์	
2	นาย ปาเกมส์ ศักดิ์บางแหม	ปาเกมส์	
3	น.ส.ธิดาพร เฝือสูงเนิน	ธิดาพร	
4	น.ส.ชญานิศ รัตนประเสริฐ	ชญานิศ	
5	น.ส. เปมิกา กล้าปรีชา	เปมิกา	
6	น.ส. วิภาวี คล้ายทอง	วิภาวี	
7	นาย กนกพล ฝั่งทะเพรา	กนกพล	
8	นาย สุธี เพ็งกรูด	สุธี	
9	นาย ศิริไทน์ [illegible]	ศิริไทน์	
10	น.ส. ณัฐวดี ศรีโสภา	ณัฐวดี	
11	นาย วรินธร ชมแสง	วรินธร	
12	นาย วีรยุทธ นิตย์ใหม่	วีรยุทธ	
13	นาย [illegible]	[illegible]	
14	น.ส. ปณิตา ดวงการุณ	ปณิตา	
15	นาย [illegible]	[illegible]	
16	นาย ธนากร จันทร์ลอย	ธนากร	
17	นางสาว รัชฎาวรรณ บัวแสง	รัชฎาวรรณ	
18	นางสาว น้ำรุ่ง สังกลาง	น้ำรุ่ง	
19	นางสาว เกศรินทร์ แก้วสว่าง	เกศรินทร์	
20	น.ส. ทิวาพร มงคลสงคราม	ทิวาพร	
21	นาย ธนกฤต ดลิสิตานนท์	ธนกฤต	
22	น.ส. ปรีชญา นิรันทร์นอก	ปรีชญา	
23	นาย ธนะดี เหลืองสะอาด	ธนะดี	
24	น.ส. วาสิตา เพชรเศษ	วาสิตา	
25	นาย วัชระ วีระนคร	วัชระ	

รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	น.ส.ศิวพร ใหญ่กลาง	ศิวพร	
2	น.ส.นิษฐกานต์ มีเนติศักดิ์	นิษฐกานต์	
3	น.ส.ศิริกร แสงสว่าง	ศิริกร	
4	นาย [illegible] [illegible]	[illegible]	
5	นาย พงศธร [illegible]	[illegible]	
6	นางสาวปนิษฐา [illegible]	ปนิษฐา	
7	นางสาว ศิศินันท์ แสนกล้า	ศิศินันท์	
8	นางสาวอภิญญา [illegible]	อภิญญา	
9	นายพาสักดิ์ สนิท	พาสักดิ์	
10	นาย[illegible] [illegible]	[illegible]	
11	นายนันทวัฒน์ [illegible]	นันทวัฒน์	
12	นายปรีชาญา [illegible]	ปรีชาญา	
13	นายเมฆินทร์ แสงหาญ	[illegible]	
14	นางสาว กรรณิการ์ [illegible]	กรรณิการ์	
15	นางสาวปรีดา [illegible]	ปรีดา	
16	นายกิตติ โชติใย	กิตติ	
17	นายนันทวัช [illegible]	[illegible]	
18	นางสาว อริศา [illegible]	อริศา	
19	นางสาว ศารียา [illegible]	ศารียา	
20	นางสาวเพ็ญพิชชา โตาชา	เพ็ญพิชชา	
21	นางสาวอัญชิดา [illegible]	อัญชิดา	
22	น.ส. ศิริพรรณ [illegible]	ศิริพรรณ	
23	น.ส. ปริยาภรณ์ [illegible]	ปริยาภรณ์	
24	น.ส.สุพรรษา [illegible]	สุพรรษา	
25	น.ส. กัญญารัตน์ [illegible]	กัญญารัตน์	

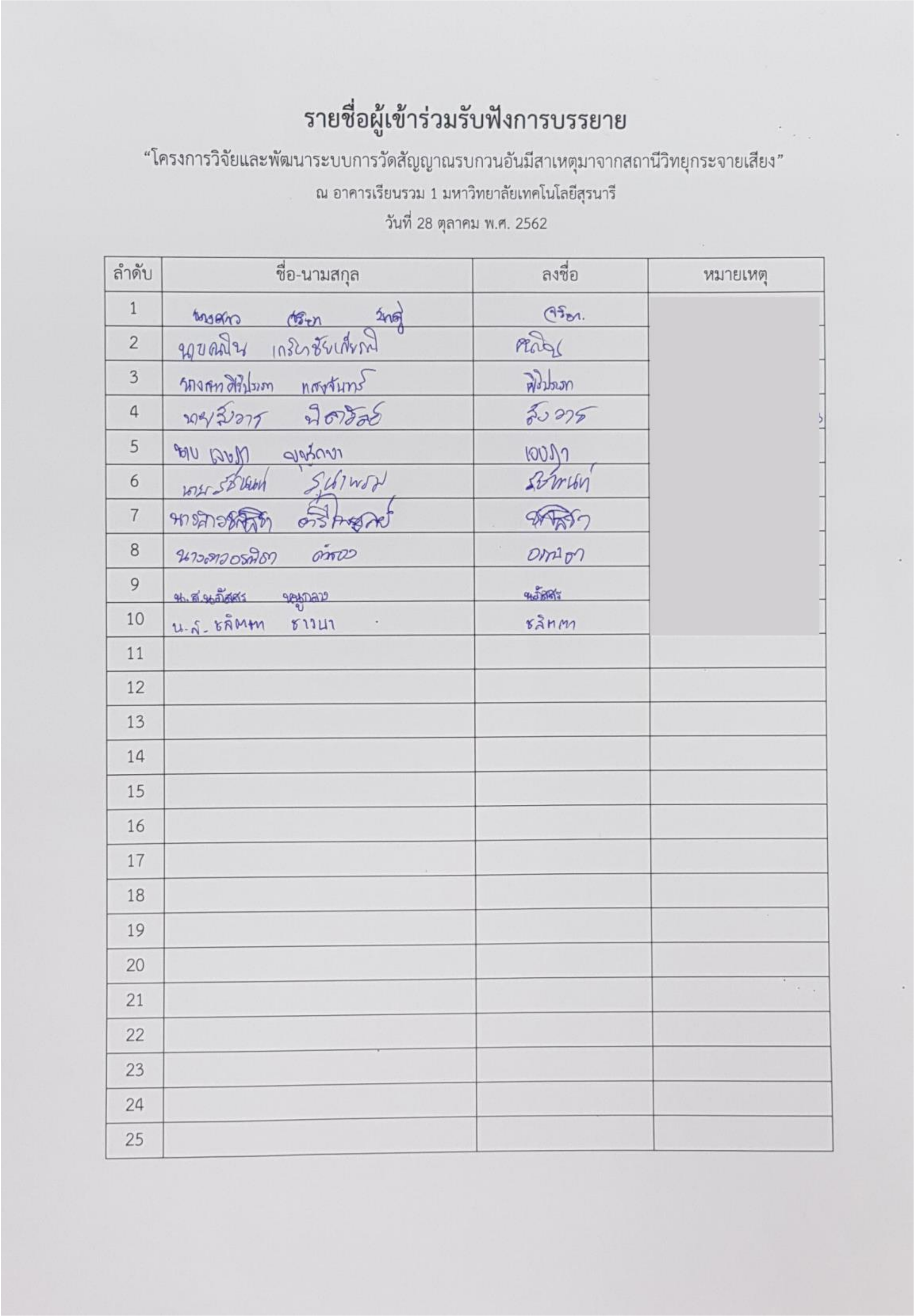
รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	น.ส.สิรพร ใหญ่กลาง	สิรพร	
2	น.ส.นิยุรกานต์ พีระเนติศักดิ์	นิยุรกานต์	
3	น.ส.ศิริกร แสงสำโรง	ศิริกร	
4	นาย [illegible]	[illegible]	
5	นาย พงศธร นะคะเอ็ด	[illegible]	
6	นางสาวปพิชญา [illegible]	ปพิชญา	
7	นางสาว สิศินันท์ แสนกล้า	สิศินันท์	
8	นางสาวอภิญญา [illegible]	อภิญญา	
9	นายพาศักดิ์ สนิท	พาศักดิ์	
10	นายเจษฎาวุฒิ เวฬุวนารักษ์	เจษฎาวุฒิ	
11	นายนันทวัฒน์ ศรีพรหม	นันทวัฒน์	
12	นายปรีชาญา [illegible]	ปรีชาญา	
13	นายเมฆินทร์ [illegible]	[illegible]	
14	นางสาว กรรณิการ์ เชียงกลาง	กรรณิการ์	
15	นางสาวปรีณา [illegible]	ปรีณา	
16	นายกิตติ โสใย	กิตติ	
17	นายนันทวัช กมลสุข	นันทวัช	
18	นางสาว อาริศา วงษ์แหวน	อาริศา	
19	นางสาว ดารีญา อึ้งเจริญ	ดารีญา	
20	นางสาวเพ็ญพิชชา โชติชา	เพ็ญพิชชา	
21	นางสาวอัญชิดา เจิมศรี	อัญชิดา	
22	น.ส. ศิริพรรณ [illegible]	ศิริพรรณ	
23	น.ส. ปรียาภรณ์ ศาสตรประทีป	ปรียาภรณ์	
24	น.ส.สุพรรษา กริชพิพัฒน์	สุพรรษา	
25	น.ส. กัญญารัตน์ โพนพลกรัง	กัญญารัตน์	



รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	นางสาว จริยา วงศ์ษู	จริยา.	
2	นายคณิน เกริกชัยเพียรกิจ	คณิน	
3	นางสาวศิริประภา หลงจันทร์	ศิริประภา	
4	นายสิงวาร พิลาศิลป์	สิงวาร	
5	นาย เลอฎา บุญรักษา	เลอฎา	
6	นายธีรนันท์ รุ่นกพรม	ธีรนันท์	
7	นางสาวชลธิชา ศรีทองสุข	ชลธิชา	
8	นางสาวอรพิดา ดำดวง	อรพิดา	
9	น.ส.นภัสสร หมูกลาง	นภัสสร	
10	น.ส. ชลิตตา ธาวนา	ชลิตตา	
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	น.ส. สุพิชญา โค้วชัย	สุพิชญา	
2	น.ส. ธิดาพร สันปักษา	ธิดาพร	
3	น.ส. กัญจนวิภา รวมใหม่	กัญจนวิภา	
4	นายไชยอนันต์ ผันสว่าง	[illegible]	
5	นายประเวศ วาเชียร	ประเวศ	
6	นายยงศักดิ์ ทัดทาน	[illegible]	
7	น.ส. วนิดา ศิริประเสริฐ	วนิดา	
8	นางสาวรุ่งฟ้า สมศิริรัตน์	รุ่งฟ้า	
9	นายชัยเดช อังสุวรรณ	ชัยเดช	
10	สุรศักดิ์ [illegible]	[illegible]	
11	วรภพ น้อยศรี	วรภพ	
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

รายชื่อผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย

"โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง"

ณ อาคารเรียนรวม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ลำดับ	ชื่อ-นามสกุล	ลงชื่อ	หมายเหตุ
1	น.ส. สุพิชชา โพธิ์วิชัย	สุพิชชา	
2	น.ส. ธิดาพร สันป่าชา	ธิดาพร	
3	น.ส. กัญจนวิภา รวมใหม่	กัญจนวิภา	
4	นายโชคอนันต์ พันสง่า	โชคอนันต์	
5	นายประเวศ วิเชียร	ประเวศ	
6	นายอดิศักดิ์ ทัดทาน	อดิศักดิ์	
7	น.ส. วนิดา ศิริประเสริฐ	วนิดา	
8	นางสาว รุ่งฟ้า สมสุริยรัตน์	รุ่งฟ้า	
9	นายธีรเดช อ่างสุวรรณ	ธีรเดช	
10	สุรสิทธิ์ [illegible]	สุรสิทธิ์	
11	วรภพ ม่วงศรี	วรภพ	
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

ภาคผนวก จ
เอกสารประชาสัมพันธ์และคู่มือการใช้งานฉบับย่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กสทช.

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวน อันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

Spurious Emission Monitoring Systems from FM Radio Stations
Research and Development Project

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ
และ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้วิจัย

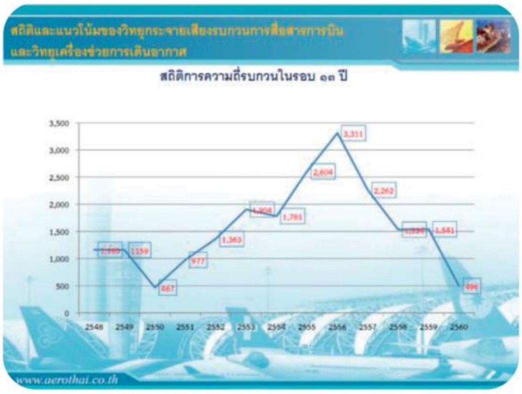
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา
และคณะ

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความสำคัญและที่มาของปัญหาของโครงการวิจัย

การรบกวนวิทยุการบินก่อให้เกิดความเสี่ยงของการบินของประเทศไทย ซึ่งจะสร้างผลกระทบด้านความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยทางด้านการบินของประเทศ การรบกวนวิทยุการบินโดยส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม โดยเฉพาะจากสถานีวิทยุชุมชนที่มีการแพร่คลื่นแปลกปลอมไปรบกวนในย่านความถี่วิทยุการบิน จากสถิติของการรบกวนวิทยุการบินในรอบ 13 ปี



แสดงสถิติการรบกวนในแต่ละปี สำหรับปี 2560 นับถึงสิ้นเดือนมิถุนายน (ข้อมูลจาก บวท.)

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 ได้มีการบกวนวิทยุการบินที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปีซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุชุมชนที่มีเครื่องส่งและการติดตั้งของสถานีที่ไม่ได้มาตรฐาน สร้างคลื่นแปลกปลอมออกมารบกวนวิทยุการบินอย่างรุนแรงต่อเนื่องทาง สำนักงาน กสทช. มีมาตรการแก้ไขโดยออกประกาศกำหนดเครื่องส่งของสถานีวิทยุชุมชนทุกสถานีต้องผ่านการตรวจสอบมาตรฐานทางเทคนิคเสียก่อน จะเห็นได้ว่าสถิติการรบกวนวิทยุการบินมีแนวโน้มที่ลดลงตั้งแต่ปี 2556 แต่อย่างไรก็ตามสถิติการรบกวนของปีล่าสุดยังอยู่ในระดับที่สูง

เป้าหมายของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna Pattern) ของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีผลต่อการรบกวนวิทยุทางการบิน
2. ศึกษาและพัฒนาระบบ/อุปกรณ์ต้นแบบวัดการเฝ้าระวัง (Measuring and Monitoring System) สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอม (Spurious Emission) ของสถานีวิทยุกระจายเสียง
3. ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าระวังพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ กำลังส่งออกอากาศ กำลังสะท้อนกลับ อุณหภูมิเครื่องส่ง พร้อมทั้งมีระบบส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านระบบอินเตอร์เน็ต เพื่อแสดงที่แอพพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน
4. สถานีสาธิตต้นแบบ โดยนำเอาอุปกรณ์ในข้อ 2 และ 3 มาติดตั้งใช้งานจริง และมีการตรวจสอบระบบสายอากาศจากอุปกรณ์ในข้อ 1

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณร

ระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

รายละเอียดโครงการ

โครงการวิจัยและพัฒนา **“ระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ”** เป็นระบบตรวจสอบสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น สามารถวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุฯ สามารถวัดและเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานี รวมไปถึงการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงอีกด้วย ซึ่งทั้ง 3 ระบบที่ได้กล่าวมาแล้วช่วยป้องกัน ตรวจสอบและแจ้งเตือนเมื่อเกิดการแพร่แปลกปลอมที่ไม่เหมาะสมของสถานีวิทยุกระจายเสียงจนก่อให้เกิดการรบกวนการใช้งานกิจการวิทยุการบิน เพื่อให้สามารถดำเนินการจัดการกับปัญหาได้อย่างรวดรวด เป็นการแก้ปัญหาเชิงรุก เพื่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สิน ตลอดจนเป็นการใช้ทรัพยากรคลื่นวิทยุให้เกิดประโยชน์สูงสุด

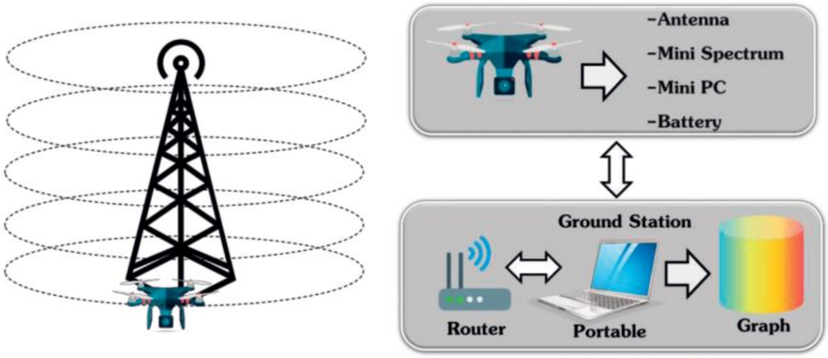
โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ออกอากาศด้วยเครื่องส่งวิทยุขนาดกำลังส่ง 500 วัตต์ ด้วยเสาสูง 60 เมตร มีการออกอากาศที่มีระดับการแพร่แปลกปลอมตามข้อกำหนดของ กสทช. (ระดับไม่น้อยกว่า 70 dBc) เพื่อเป็นสถานีสาธิตต้นแบบและใช้สำหรับการทดสอบทั้ง 3 ระบบข้างต้น

สถานีสาธิตต้นแบบของโครงการตั้งอยู่ที่
อาคารสิรินธรวิศวพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

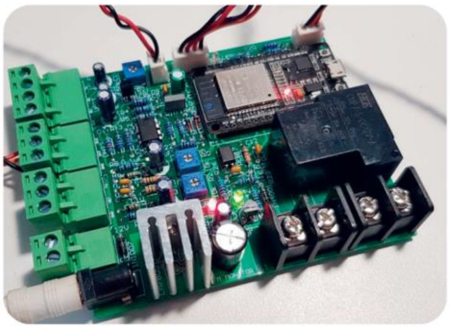
ในโครงการวิจัยนี้แบ่งการวิจัยและพัฒนาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1) ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Antenna Radiation Pattern Measurement Systems)
2) ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง (Spurious Emission Monitoring Systems)
3) ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Station Monitoring Systems)



ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง

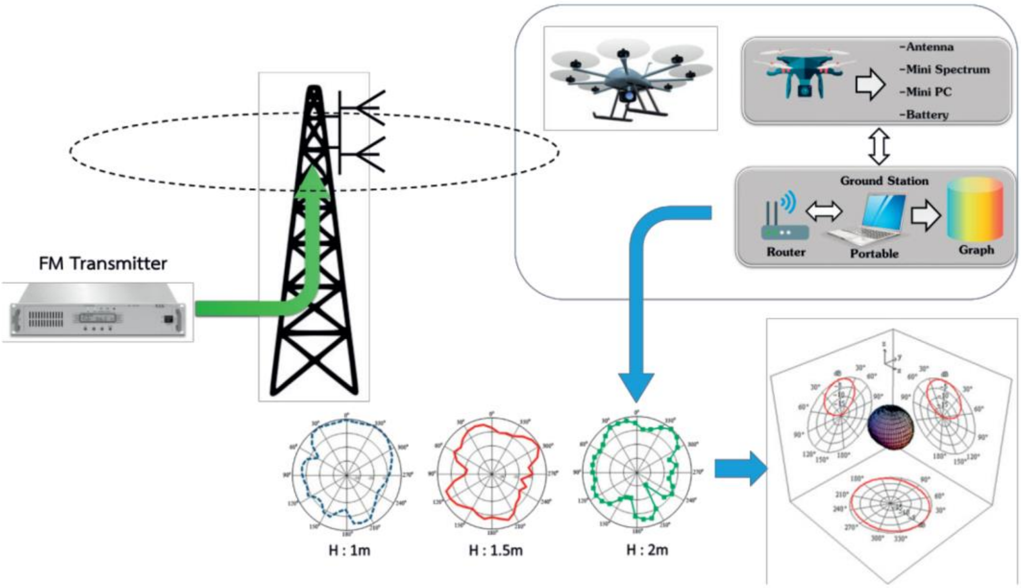
อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแพร่แปลกปลอมของสถานีวิทยุกระจายเสียง



อุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Antenna Radiation Pattern Measurement Systems

รายละเอียดโครงการ



มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่ที่บนเสาส่งของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยใช้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรน (Drone) เพื่อทำการตรวจสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสถานีวิทยุกระจายเสียง สามารถวัดหาความผิดปกติของระบบสายอากาศที่ได้ทำการติดตั้ง พร้อมทั้งหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับลดการแพร่คลื่นในทิศทางที่ขึ้นด้านบน โดยที่โดรนสามารถบินรอบสายอากาศเพื่อทำการเก็บข้อมูลความแรงของสัญญาณในแต่ละมุมของสายอากาศและแสดงผลการทดสอบในรูปแบบ 3 มิติได้

บกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง 5

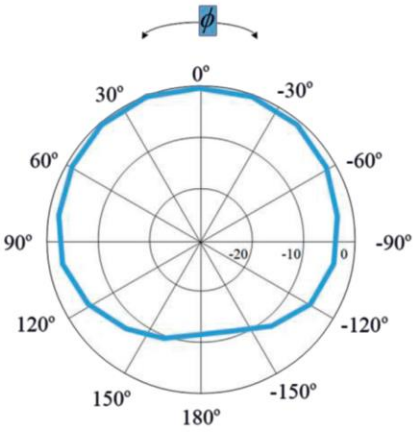
ระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Antenna Radiation Pattern Measurement Systems

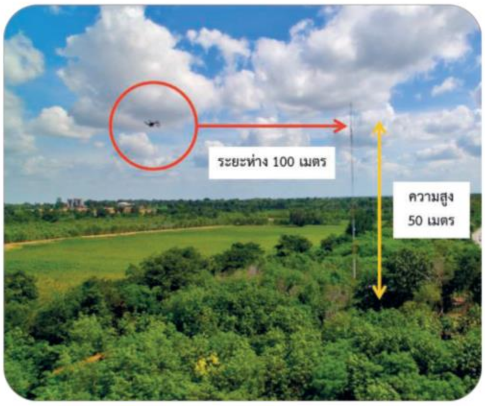
ทดสอบใช้งานจริง

ในการทดสอบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ถูกติดตั้งบนสถานีส่งสัญญาวิทยุกระจายเสียง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทางผู้วิจัยได้ทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศของสถานีวิทยุฯ ด้วยบินวัดสัญญาณรอบเสาส่งสัญญาณ บินด้วยรัศมี 100 เมตรและความสูง 50 เมตร

จากผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแถวลำดับมีความแรงที่มีการแพร่กระจายคลื่นออกมาในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ (ทิศทาง 0 องศา) นั้น แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้โดรนสามารถนำมาวัดสัญญาณได้จริง และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศก็สอดคล้องกับทฤษฎี

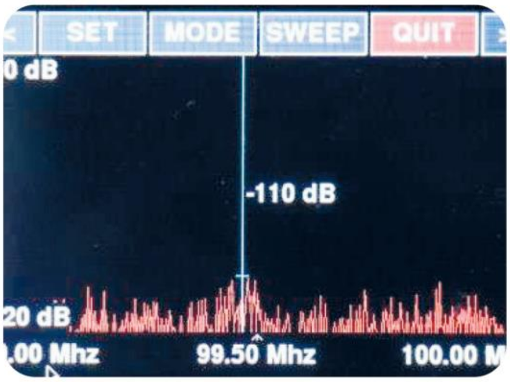
ผลการทดสอบ ณ ความสูง 50 เมตร ระยะห่าง 100 เมตรจากสถานีส่ง
(ตำแหน่งตรงกลางของสายอากาศแถวลำดับสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง)



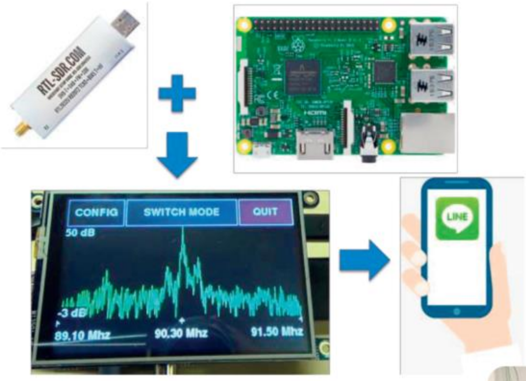


ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง
Spurious Emission Monitoring Systems

รายละเอียดโครงการ



มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอม โดยใช้เครื่องรับวิทยุขนาดเล็ก (SDR USB receiver) ที่สามารถควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้ ทำให้มีราคาถูก ซึ่งได้มีการนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปทดสอบติดตั้งใช้งานกับสถานีวิทยุของผู้ทดลองประกอบกิจการจำนวน 10 สถานี สามารถตรวจสอบค่าการแพร่แปลกปลอมที่ออกมาจากสถานีวิทยุในแถบความถี่วิทยุการบิน (108–137 MHz) พร้อมแจ้งเตือนผ่านทาง Application Line หากว่ามีค่าระดับการแพร่แปลกปลอมเกินกว่าที่ กสทช. กำหนด



อุปกรณ์การวัดและการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอม

อุปกรณ์ต้นแบบมีส่วนประมวลผลหลัก คือ บอร์ด Raspberry Pi และมีอุปกรณ์รับสัญญาณ คือ DVB-T+DAB+FM ที่สามารถรับสัญญาณวิทยุ FM และสัญญาณวิทยุการบินได้ในตัวเดียวกัน

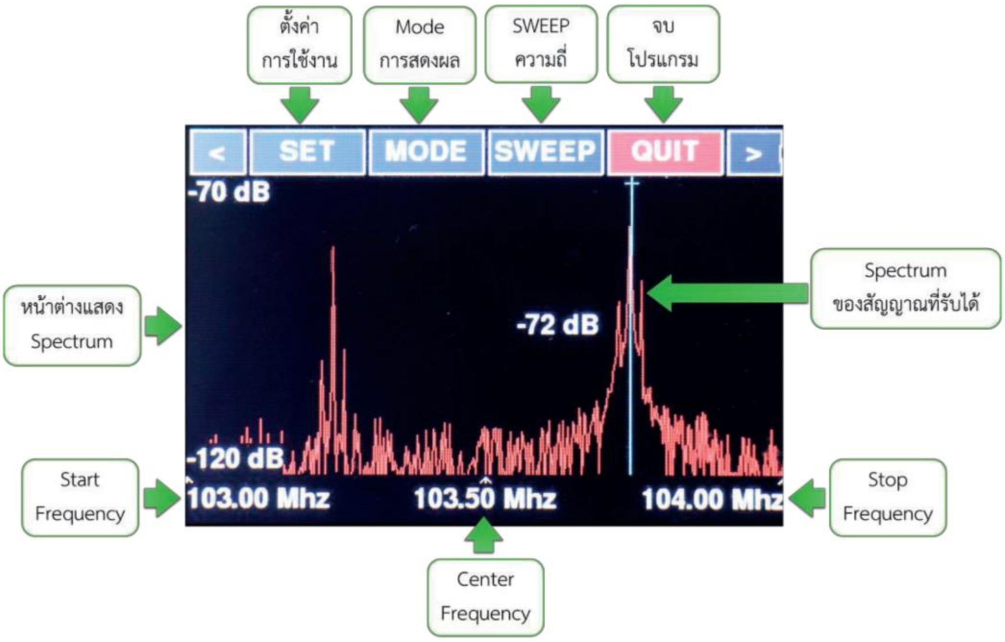
บกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง 7

ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

Spurious Emission Monitoring Systems

คู่มือการใช้งาน

อุปกรณ์วัดการเฝ้าระวังสัญญาณรบกวนวิทยุ-การบินมีขนาดกระทัดรัด ติดตั้งและใช้งานง่าย บุคคลทั่วไปสามารถติดตั้งที่สถานีวิทยุได้ด้วยตัวเอง เมื่อเปิดอุปกรณ์และรอจนกว่าอุปกรณ์จะพร้อมใช้งาน ระบบจะเริ่มตรวจสอบว่าสถานีดังกล่าวมีสัญญาณที่จะไปรบกวนวิทยุ-การบินหรือไม่ หากมีสัญญาณแปลกปลอมใดๆ เกิดจากสถานีจะแสดงความถี่และความแรงของสัญญาณรบกวนนั้นที่หน้าจอ LCD ของอุปกรณ์และพร้อมแจ้งเตือนผ่านทาง Application Lineโดยทันที



หน้าจอแสดงผล LCD ของอุปกรณ์การเฝ้าระวัง
การแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

ระบบการเฝ้าระวังการแพร่แปลกปลอมที่เกิดจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

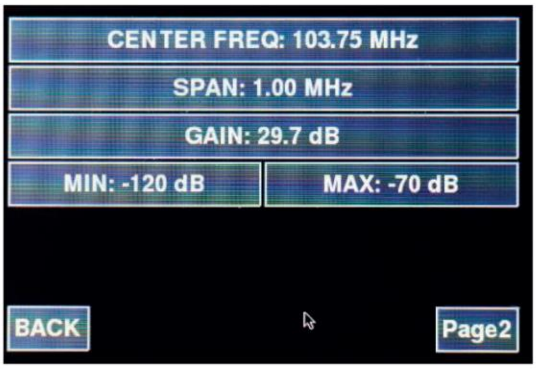
Spurious Emission Monitoring Systems

คู่มือการใช้งาน

หากต้องการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สามารถทำได้โดยการคลิกเข้าไปที่ปุ่ม SET โดยเมื่อเข้าไปแล้วจะประกอบด้วย 2 หน้า ได้แก่ หน้าการตั้งค่าที่ 1 (Page1) จะแสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของอุปกรณ์ และหน้าการตั้งค่าที่ 2 (Page2) จะแสดงการตั้งค่าการสแกนหาความถี่แปลกปลอม ซึ่งสามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ดังนี้

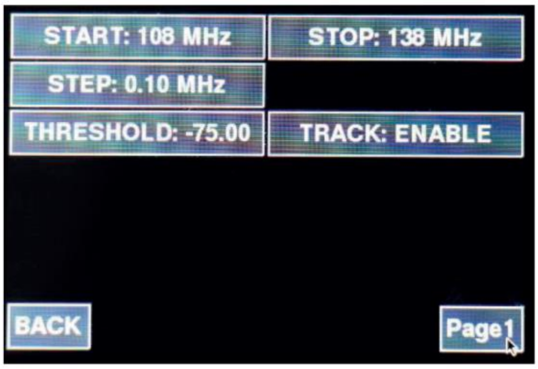
ตั้งค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของอุปกรณ์

- CENTER FREQUENCY คือ ตั้งค่าความถี่กลางที่ต้องการวัด ตั้งความถี่ได้ตั้งแต่ 25 MHz ถึง 1.7 GHz
- SPAN คือ ช่วงความถี่ที่แสดงบนหน้าจอ สามารถแสดงช่วงความถี่ได้สูงสุด 2 MHz
- GAIN คือ อัตราขยายสัญญาณ
- MAX คือ กำหนดให้ความแรงของสัญญาณที่ขอบบนสุดของหน้าจอ
- MIN คือ กำหนดให้ความแรงของสัญญาณที่ขอบล่างสุดของหน้าจอ



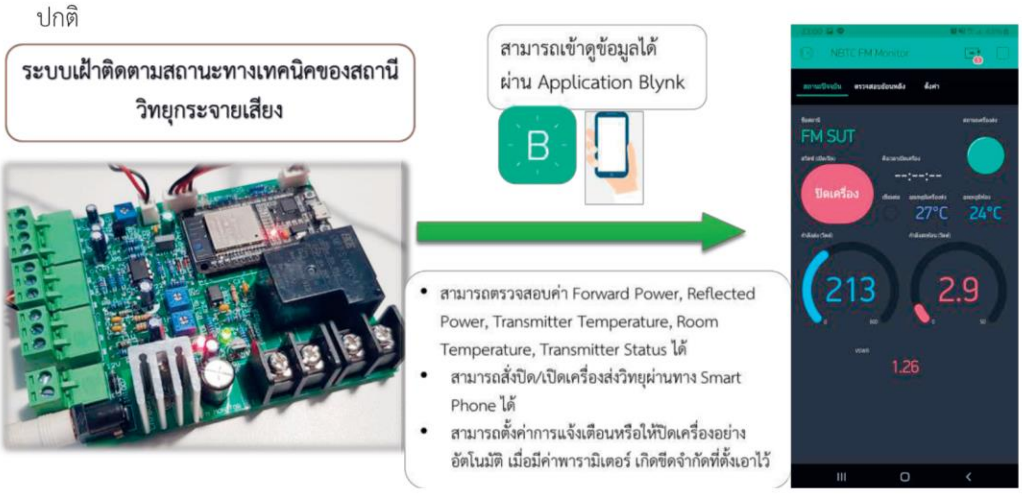
ตั้งค่าการสแกนหาความถี่แปลกปลอม

- START คือ ความถี่เริ่มต้นในการสแกนหาความถี่แปลกปลอม
- STOP คือ ความถี่สุดท้ายในการสแกนหาความถี่แปลกปลอม
- STEP คือ ความละเอียดในการสแกน
- THRESHOLD คือ ค่าขีดจำกัดของความแรงสัญญาณที่รับได้ อุปกรณ์จะหยุดเมื่อความแรงของสัญญาณที่รับได้เกิน THRESHOLD
- TRACK คือ เปิด-ปิด ฟังก์ชัน แสดงความถี่ที่มีความแรงสูงสุดในหน้าจอแสดงผลในขณะนั้น

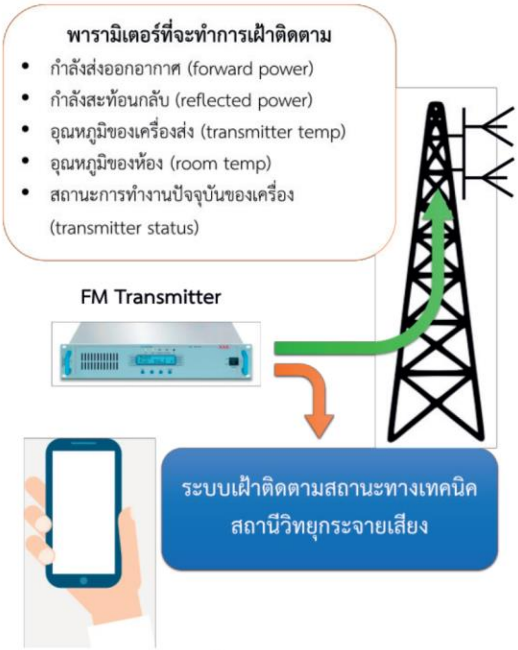


ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Radio Station Monitoring Systems

มุ่งเน้นเพื่อวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ในการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าวกับเครื่องส่งวิทยุที่มีกำลังส่ง 500 วัตต์ เพื่อตรวจสอบสถานะต่าง ๆ ของเครื่องส่ง เช่น กำลังส่งออกอากาศ กำลังสะท้อนกลับ VSWR อุณหภูมิของเครื่องส่ง อุณหภูมิของห้องและสถานการณ์ทำงานของเครื่องส่งเป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะบงชี้ว่าเครื่องส่งทำงานในสภาพแวดล้อมที่ปกติหรือไม่ พร้อมส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านระบบอินเตอร์เน็ตและหากมีความผิดปกติกับเครื่องส่งวิทยุเกิดขึ้นจะมีรายงานให้ผู้เกี่ยวข้องทราบทันที จะได้รีบทำการแก้ไขก่อนที่ตัวเครื่องจะเริ่มชำรุดหรือเสื่อมสภาพ อันเป็นต้นเหตุของการแพร่แปลกปลอม ทำให้เครื่องส่งมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น สามารถตรวจสอบและดูแลเครื่องส่งวิทยุได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น และลดการรบกวนวิทยุการบินที่อาจจะเกิดขณะที่เครื่องส่งไม่ปกติ



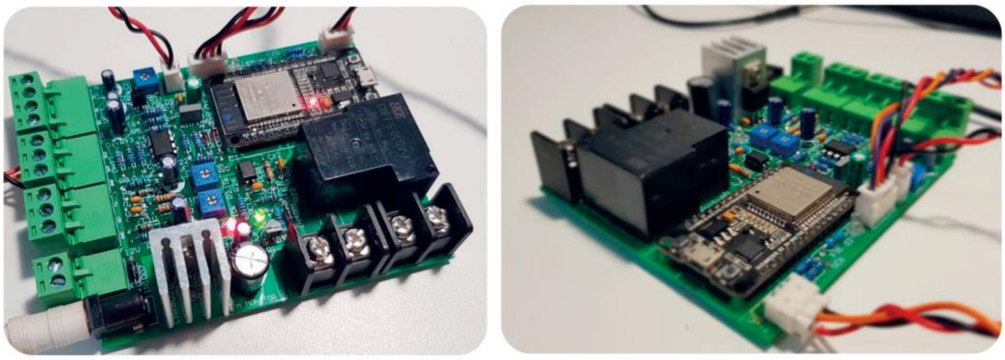
ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Radio Station Monitoring Systems



การทำงานของระบบ

รายละเอียด

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบฯ คือบอร์ดควบคุมซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิในการวัดค่าอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Directional Coupler ที่ทำหน้าที่วัดกำลังส่งและกำลังสะท้องในขณะออกอากาศ บอร์ดควบคุมในงานวิจัยนี้ใช้งานบอร์ด ESP32 ในการประมวลผล ซึ่งบอร์ดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตผ่านการเชื่อมต่อ WIFI เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปยังผู้ใช้งานได้ ระบบสามารถรายงานพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านทาง แอพพลิเคชัน Bylnk บนมือถือ สามารถเข้ามาตรวจสอบสถานะของเครื่องส่งได้ตลอดเวลา อีกทั้งหากเกิดความผิดปกติของเครื่องส่ง ระบบจะทำการแจ้งเตือนและปิดเครื่องอัตโนมัติในทันที ก่อนที่ตัวเครื่องส่งจะชำรุดเสียหาย

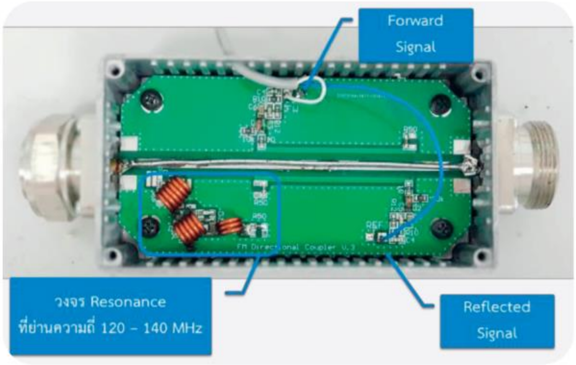


บอร์ดควบคุมของระบบการเฝ้าติดตามสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

บกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง 11

ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Radio Station Monitoring Systems

Directional Coupler

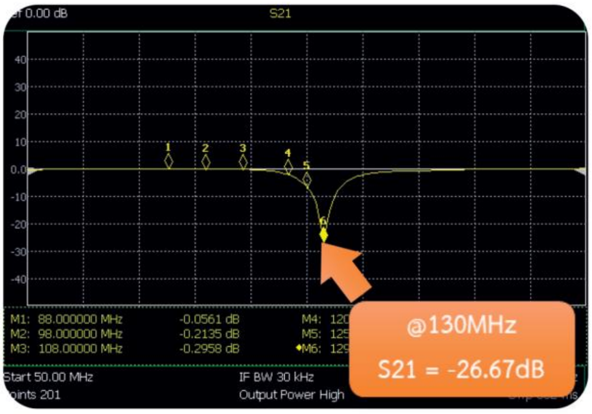


Directional Coupler ทำหน้าที่ดึงสัญญาณบางส่วนจากสัญญาณ (Coupling) ของสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุที่จะส่งผ่านไปยังสายอากาศที่ เพื่อนำวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น กำลังส่งออกอากาศ ในขณะเดียวกันก็ยังสามารถดึงเอา สัญญาณ (coupling) ที่ย้อนกลับเข้ามาที่เครื่องส่ง ฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์หากำลังสะท้อนกลับ (Reflected power) ของสายอากาศ เพื่อนำมาคำนวณค่า VSWR กำลังส่งได้อีกด้วย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบวงจร Directional Coupler ที่มีความเหมาะสมสำหรับย่านความถี่วิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม สามารถนำไปติดตั้งเพิ่มเติมกับเครื่องส่งวิทยุฯ โดยไม่จำเป็นต้องมีการแก้ไขดัดแปลงอุปกรณ์ภายในเครื่องส่ง

สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจร Directional Coupler จะให้เป็นสัญญาณไฟกระแสตรง (DC) ที่แปรผันตรงกับความแรงของสัญญาณความถี่วิทยุ (RF Frequency) ที่เดินทางจากด้านอินพุตไปยังด้านเอาต์พุต ซึ่งสามารถระบุทิศทาง ของสัญญาณที่ผ่านส่งอุปกรณ์นี้ได้

ออกแบบวงจร

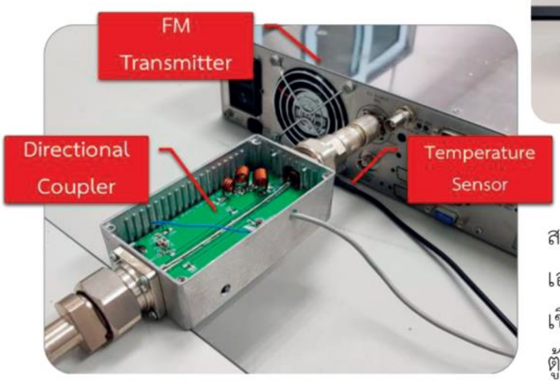


เพื่อให้การใช้งานอุปกรณ์ Directional Coupler ให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและเพิ่มวงจร Resonance ที่ย่านความถี่วิทยุการบิน (ในงานวิจัยนี้ปรับให้ความถี่กลางอยู่ที่ความถี่ 130 MHz) โดยที่วงจร Resonance จะทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณในย่านความถี่วิทยุการบินที่ออกจากเครื่องส่งฯ ไม่ให้ออกไปรบกวนย่านความถี่วิทยุการบิน (ในกรณีที่เครื่องส่งวิทยุฯ มีการสร้างสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น)

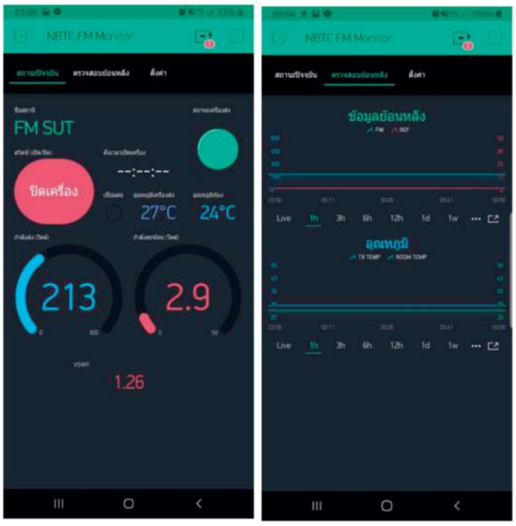
12 โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณร

ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Radio Station Monitoring Systems

คู่มือการใช้งาน



การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ สามารถทำได้โดยนำ Directional Coupler ต่อที่เอาต์พุตพอร์ตที่อยู่ด้านหลังของของเครื่องส่งฯ และเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอลโทลเลอร์ที่อยู่ภายในตู้ควบคุมเพื่ออ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รับการแจ้งเตือนจากเว็บเซอร์วิสทาง LINE ได้ที่ https://notify-bot.line.me/th/

โหลดโปรแกรม Blynk

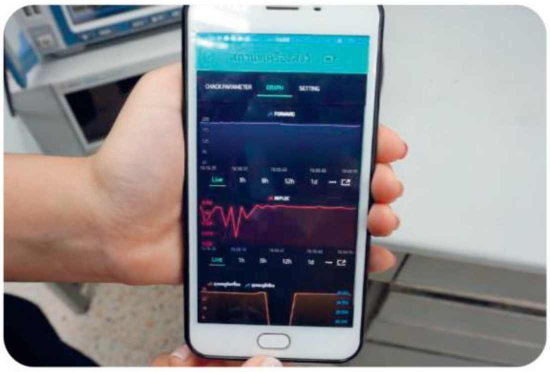
เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องส่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้งานจำเป็นต้องโหลดแอพพลิเคชัน Blynk สามารถโหลดได้ทั้งระบบ IOS และ Android และสามารถเพิ่ม Project ได้โดยการสแกน QR-Code จึงจะสามารถเข้าดูข้อมูลของระบบได้

สแกน QR-Code เพื่อเพิ่ม Project ใน แอพพลิเคชัน Blynk

บกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง 13

ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง
Radio Station Monitoring Systems

ทดสอบใช้งานจริง



ทดสอบการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ กับเครื่องส่งวิทยุที่มีการใช้งานจริง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุฯ สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง สามารถแสดงค่าที่หน้าเครื่องส่งวิทยุในรูปแบบเวลาจริง (Real-time) พร้อมกับแสดงข้อมูลที่แอพพลิเคชัน Blynk ได้ นอกจากนั้นแอพพลิเคชัน Blynk ยังมีการบันทึกข้อมูลย้อนหลังเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้ามาตรวจสอบข้อมูลการทำงานของเครื่องส่งวิทยุในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้อีกด้วย

ระบบการเฝ้าระวังสถานะทางเทคนิคของสถานีวิทยุกระจายเสียง

Radio Station Monitoring Systems

การแจ้งเตือน

หากเกิดความผิดปกติของเครื่องส่ง ระบบจะทำการแจ้งเตือนผ่านทางแอพพลิเคชัน Lineและปิดเครื่องอัตโนมัติในทันที ก่อนที่ตัวเครื่องส่งจะชำรุดเสียหาย ค่าขีดจำกัดการแจ้งเตือนและปิดเครื่องอัติโนมัติ ผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้เอง โดยมีเงื่อนไขในการตรวจสอบดังนี้

ระบบจะมีข้อความแจ้งเตือนผ่านทาง Application Line เมื่อเกิดความผิดปกติ ได้แก่

- เมื่อกำลังส่ง **"ต่ำกว่าที่กำหนด"**
- เมื่อกำลังส่ง **"สูงเกินกว่าที่กำหนด"**
- เมื่อ VSWR **"สูงเกินกว่าที่กำหนด"**
- เมื่ออุณหภูมิเครื่องส่ง **"สูงเกินกว่าที่กำหนด"**
- เมื่อ Room Temperature **"สูงเกินกว่าที่กำหนด"**

ระบบจะสั่งงานให้ปิดเครื่องส่งวิทยุทันที เมื่อค่ากำลังส่ง หรือVSRW ค่าใดค่าหนึ่ง**"สูงเกินกว่าที่กำหนด"** เอาไว้

ตัวอย่างข้อความแจ้งเตือน

กรณีแจ้งเตือน

กรณีปิดเครื่องอัตโนมัติ

บกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง 15

โครงการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสัญญาณรบกวนอันมีสาเหตุมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

Spurious Emission Monitoring Systems from FM Radio Stations Research and Development Project

คณะวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา	นักวิจัยหัวหน้าโครงการ
รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์	นักวิจัยร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	นักวิจัยร่วม
นายสมเกียรติ แก้วไชยะ	นักวิจัยร่วม
นายสุวัฒ ศรีทองคำ	นักวิจัยร่วม
นายมานะ ลัทธวนิชพันธ์	นักวิจัยร่วม
ดร.กิตติ วงศ์ถาวราวัฒน์	นักวิจัยร่วม
ดร.พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์	นักวิจัยร่วม
ดร. สิทธิชัย เด่นตรี	นักวิจัยร่วม

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ
87 ถนนพหลโยธิน ซอย 8 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400 โทร : 0 2670 8888
Call Center 1200 (โทรฟรี) E-mail : 1200@nbtc.go.th

ภาคผนวก ฉ
เอกสารแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ

คุณสมบัติสายอากาศของสถานีวิทยุสาธิตต้นแบบ

TELECOMUNICAZIONIFERRARA RVRGROUP

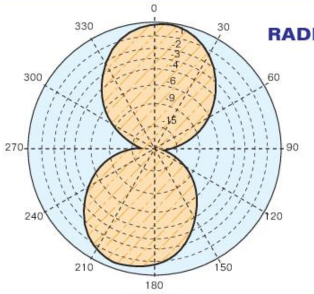
Model AJ1F – AJ1F 7/8

- **Band II dipole**
- **Broadband 87.5÷108 MHz**
- **1,5 dB gain**
- **Vertical polarization**
- **Omni directional pattern**
- **Stainless steel AISI 304**

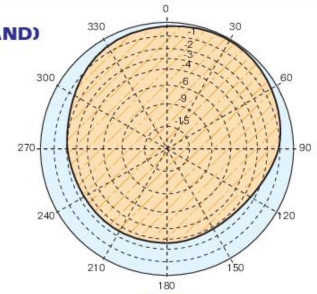
ELECTRICAL DATA	
Frequency range	87.5÷108 MHz
Impedance	50 Ohm
Connectors	N or 7/16" female or 7/8" EIA
Max Power	800W (N) – 2KW (7/16") – 3.5KW (7/8" EIA)
VSWR	≤ 1.35:1 Average
Polarization	Vertical
Gain	See table (referred to half-wave dipole)
Pattern	Omni directional ± 1.5 dB in free space Omni directional ± 3 dB with 100mm dia. pole
Lightning protection	All metal parts DC grounded

MECHANICAL DATA	
Dimensions	1360x1100x180 mm
Weight	9 kg with hardware mounting
Wind surface	0.06 m^2
Wind load	10.1 kg (wind speed at 160 km/h – without radome)
Max wind velocity	220 km/h.
Materials	External parts: stainless steel Internal parts: passivated aluminium Radome: fiberglass (option)
Icing protection	Feed point radome (optional)
Radome	Optional
Mounting	With special pipe clamps 50÷110 mm dia.

RADIATION PATTERN (MID BAND)

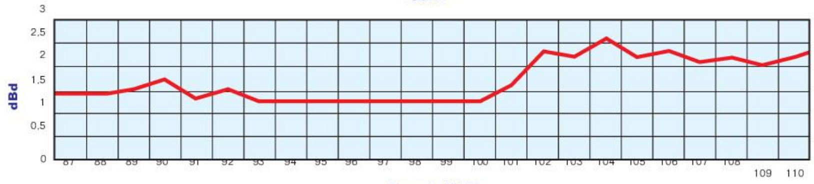


E-Plane



H-Plane

Gain



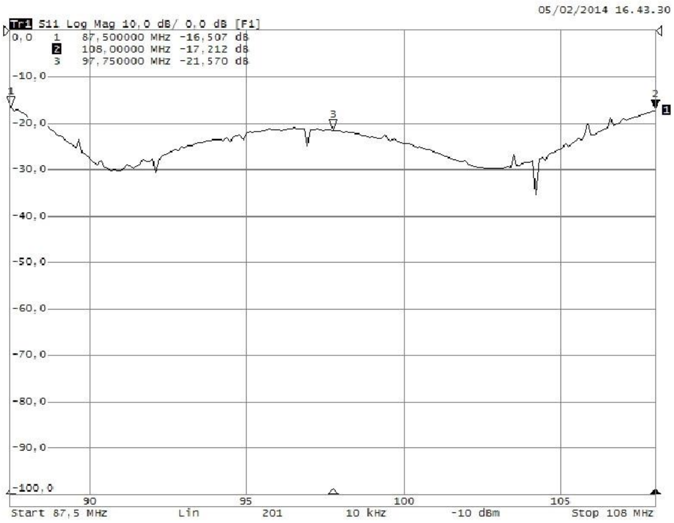
"These specifications are subject to change without notice"

Telecomunicazioni Ferrara RVR GROUP

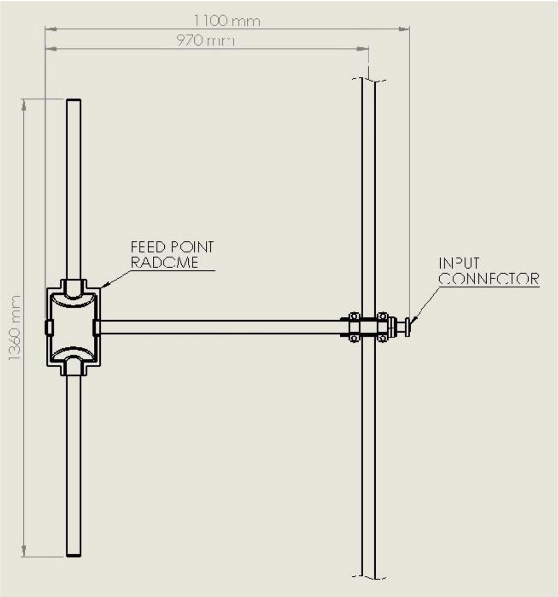
TELECOMUNICAZIONIFERRARA RVRGROUP

Model AJ1F – AJ1F 7/8

RETURN LOSS



DIMENSIONS



"These specifications are subject to change without notice"

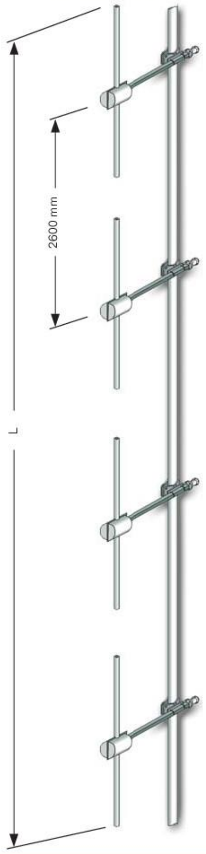
Telecomunicazioni Ferrara RVR GROUP

TELECOMUNICAZIONIFERRARA RVRGROUP

Model AJ1F – AJ1F 7/8

Radiations systems with AJ1F antenna

Omni-directional pattern



ELECTRICAL DATA	
Frequency range	87.5÷108 MHz
Impedance	50 Ohm
Connector	EIA flange according to system power rating
VSWR	≤ 1.35:1 Max
Polarization	Vertical
Gain	According to requirement
Horizontal pattern	Any type according to requirements
Vertical pattern	Null fill, beam tilt and special requirements to order
Other facilities	The antenna system can be supplied in split feed with two equal half antennas. Each half can accept full power

MECHANICAL DATA	
Height of array	Subject to number of bays (refer to table)
Total net weight	Refer to table
Wind load	Refer to table
Pressurizzable	Yes (on request)
Radome	Optional
Mounting hardware	Hot dip galvanized steel clamps
Shipping	As required

TECHNICAL DATA

Number of bays	Dipole per bay	Gain[1]		Weight[2]	Antenna height L	Wind load (v=160 km/h)	COLLINEARS SYSTEMS[3]			
		dB	times	kg	m	kg	2 KW	4 KW	6 KW	10 KW
1	1	1.5	1.4	9	1.4	10.1	AJ1F	AJ1F	-	-
2	1	4.5	2.8	18	4.0	20.2	AJ1FX22	AJ1FX24	AJ1FX26	-
4	1	7.5	5.6	36	9.2	40.4	AJ1FX42	AJ1FX44	AJ1FX46	AJ1FX410
6	1	9.3	8.4	54	14.5	60.6	AJ1FX62	AJ1FX64	-	AJ1FX610
8	1	10.5	11.3	72	20.0	80.8	AJ1FX82	AJ1FX84	AJ1FX86	AJ1FX810

1 Referred to a half wave dipole. Attenuation of connecting cables not taken into account.
2 Without mounting hardware.
3 The systems comprised: antennas, cables and splitter – for more details to see catalog – different version on request.

- Gain is provided for vertical polarization.
- When antenna is pole mounted on the top a tower the horizontally polarized radiation pattern is omni - directional.
- If the antenna is side mounted, the supporting structure will have a slight effect on the radiation pattern and VSWR.
- Vertical tower space, wind load and weight numbers given are typical. Actual values vary with the specific installation. Contact us for more details of your installation.
- Gain will be reduced if null fill, beam tilt or special wavelength spacing is provided.
- Antenna radiation aperture is the distance from the centre of the top bay to the centre of the bottom bay.
- Five ft(1.6mt) of pipe required above the top bay and below the bottom bay for to protect from pattern interference by other antennas.
- Antenna wind load is calculated for 100 Mph (160Km/h) per EIA-222-C standard.

"These specifications are subject to change without notice"

Telecomunicazioni Ferrara RVR GROUP

คุณสมบัติสายอากาศของระบบการวัดแบบรูปการณ์แพร่กระจายคลื่น

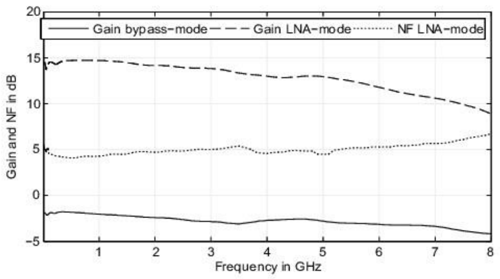
Version 02.01, August 2016

Specifications

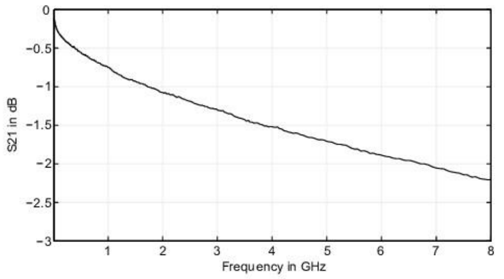
General data

RF specification of antenna modules		
Frequency range	HF antenna module	8.3 kHz to 30 MHz
	VHF antenna module	20 MHz to 200 MHz
	UWB antenna module	30 MHz to 6 GHz
	log.-periodic antenna module	450 MHz to 8 GHz
	cellular antenna module	700 MHz to 2.5 GHz
Polarization		adjustable, linear vertical or horizontal
Nominal impedance		50 Ω
VSWR		< 3.5, typ. 2.0 (except HF module)
RF specification of antenna handle		
Frequency range		8.3 kHz to 8 GHz
Nominal impedance		50 Ω
Output VSWR	1 MHz to 8 GHz	< 2.5, typ. 2.0
Output IP3	1 MHz to 8 GHz	typ. 20 dBm
Output 1 dB CP	10 MHz to 8 GHz	typ. 10 dBm
RF input power		max. 20 dBm
GPS	time to first fix (cold start, all satellites at –130 dBm)	approx. 26 s
	refresh rate	1 Hz
Electronic compass	available data	azimuth and elevation
	accuracy	typ. ±1.5° RMS for 0° elevation
	data resolution	1°
	refresh rate	5 Hz
Power supply		5 V DC ± 0.5 V (max. 500 mA)
Connectors antenna handle	RF output	QMA female
	control and supply	USB 2.0 micro AB socket
Connectors at cable set R&S®PR100 or R&S®FSH4/R&S®FSH8	RF output	N male
	control and supply	7 pin male
MTBF		250 000 h, in line with SN29500, GM, +45 °C

Antenna handle and cable set

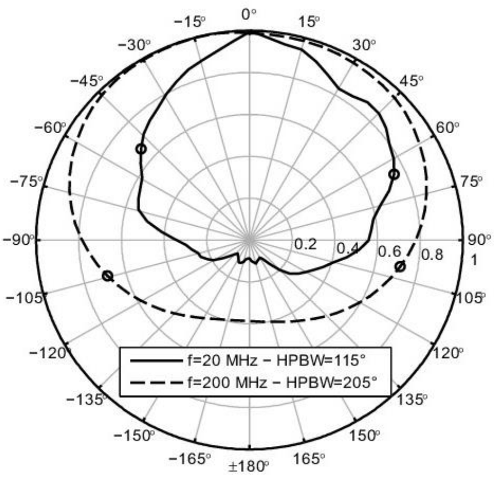


Meas. gain and noise figure of the R&S®HE400 antenna handle.

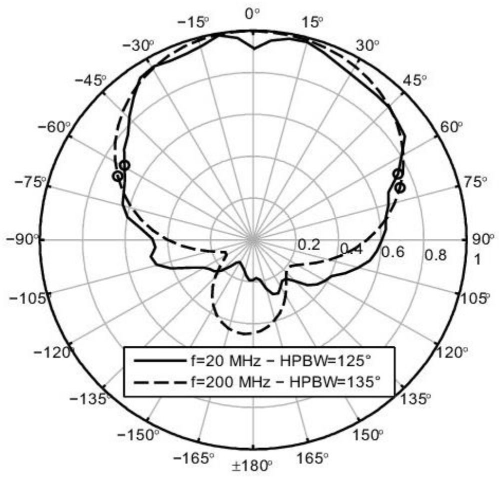


Meas. insertion-loss of the R&S®HE400-K cable set.

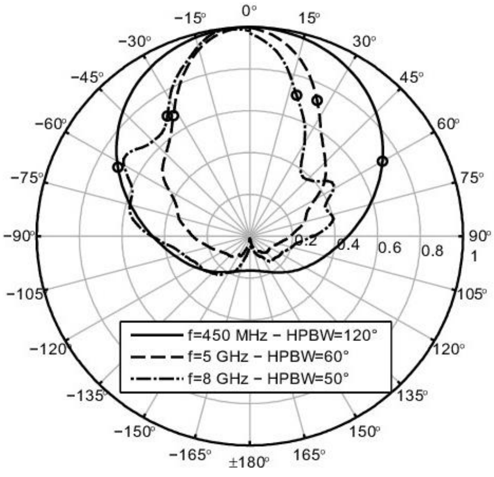
Version 02.01, August 2016



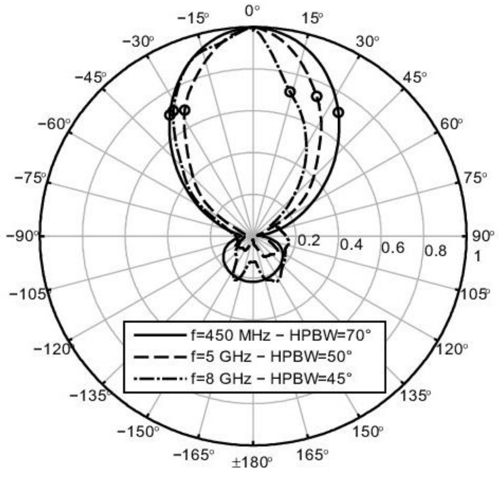
Meas. field pattern of the VHF antenna module in the H plane.



Meas. field pattern of the VHF antenna module in the E plane.



Meas. field pattern of the log.-per. antenna module in the H plane.



Meas. field pattern of the log.-per. antenna module in the E plane.

ภาคผนวก ณ

บทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ ระดับชาติ/นานาชาติ

1. Panya Hantula, Nantawat Jaiyen and Rangsan Tongta. “Real-Time Audio Similarity Comparison Algorithm” , IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD) 2017, Putrajaya, Malaysia, 13-14 December 2017.

Real-Time Audio Similarity Comparison Algorithm

Nantawat Jaiyen, Panya Hantula and Rangsan Tongta
School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.
111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima, Thailand.
E-mail: nantawat.jaiyen@gmail.com, panya_hantula@hotmail.co.th, tongta@sut.ac.th

***Abstract*— Interference in the Air Traffic Control (ATC) communication band usually comes from FM broadcast stations. To identify sources of the interference, manually scanning a receiver to compare similarity with the sound from the interference is the only method available. This paper presents a similarity comparison method that will make automatic interference identifying possible. The target audios are divided into 3 bands. A subtraction result between two audios of the same band will be decreased if the two audios are similar. To get a final result, at least 2 similar results from 3 bands will be considered positive. The experimental results show 93.42% of the right positive from 380 comparisons and 0.38% of the false positive from 3420 comparisons.**

Keywords—audio similarity comparison; real-time audio comparison; reverse intermodulation

I. INTRODUCTION

The Air Traffic Control (ATC) systems of Thailand have interfered from FM radio broadcasting. The interference causes communication problems between controllers and pilots. A frequency range used by Air Traffic Control systems is 108-137 MHz which is close to FM broadcasting, using a frequency range between 88-108 MHz. Intermodulation signals from FM broadcast stations may cause interference fall into the frequency range of Air Traffic Control systems. FM broadcast stations use a nonlinear RF power amplifier in a final stage of a transmitter. A nonlinear RF power amplifier creates intermodulation signals when two frequencies or more present at the input stage of the amplifier. When two FM broadcast stations are closely located, the output signal from one station can radiate into the other nearby station, as shown in Figure 1. The signal travels in the reverse direction until it reaches the input stage of the amplifier. This reverse signal together with station own signal creates intermodulation signals, called Reverse Intermodulation (RIM), which can be calculated from $2f_2$-f_1 and $3f_2$-$2f_1$ …[1].

Since the RIM signal is a mixed signal between two FM broadcast stations, therefore an audio of the RIM signal consists of two sounds from both FM broadcast stations. When we want to identify the sources of the RIM signal, we use two radio receivers. One receiver listens to the RIM audio while the other receiver scans all the FM broadcast band for a similar audio, as shown in Figure 2. Scanning the receiver and comparing the two audios needs to be done manually. However, comparing one sound from an FM broadcast station with two sounds from the RIM signal is very difficult and tedious work. So, automatic comparison may benefit to identify the sources of the RIM signal.

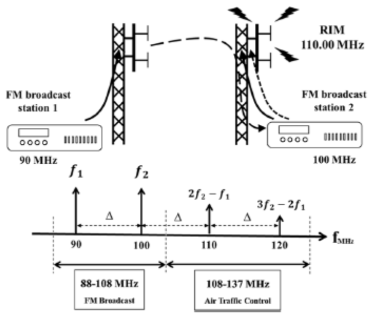


Fig. 1. Reverse Intermodulation signals from FM broadcast stations.

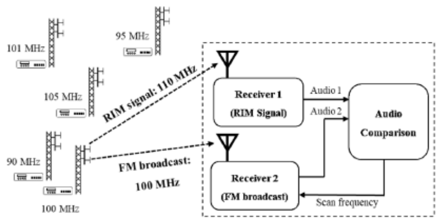


Fig. 2. Identifying the sources of the RIM signal.

The audio fingerprint algorithm [2-9] is automatic comparison which is high performance to identify individual audios. The algorithm uses the Fast Fourier Transform (FFT) to create unique fingerprints of audios that will be stored in database. The fingerprints of an unknown audio will be compared with the fingerprints from database to identify similarity. The algorithm requires a high-performance computer and long computational time. So, it is not suitable to be used in real-time receiver scanning.

This paper proposes a simple real-time audio similarity comparison algorithm. So, it requires a simple computer and short computational time. This algorithm can be used in real time with an embedded device.

978-1-5386-2126-4/17/$31.00 ©2017 IEEE

II. Audio Similarity Comparison

In this paper, we assume no time delay between two audios. Amplitude envelops of audios are specific data which benefits to audio similarity comparison. First, we extract envelops from both audios which are used to compare. Simple subtraction of two envelops will reduce a subtraction result if two envelops are similar. Otherwise, a subtraction result will be increased. Since this algorithm processes in time domain, therefore it is simple to calculate and uses short computation time.

III. Real-Time Similarity Comparison Algorithm

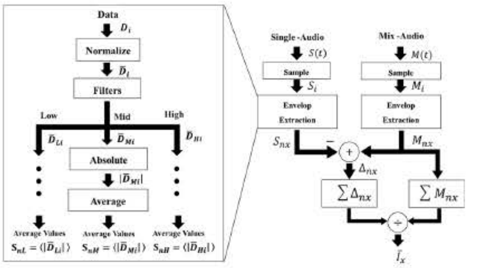


Fig. 3. Normalized subtraction results calculation.

From Figure 3, two audio signals present at the inputs, called Single-Audio ($S(t)$) and Mix-Audio ($M(t)$). A continuous signal ($S(t)$) will be sampled to a discrete signal (S_i). We use sampling rate, Fs = 44,100 Hz. We use equation (1) to normalize the Data (D_i).

$$\bar{D}_i = \frac{D_i}{\sqrt{\sum(D_i)^2}} \qquad (1)$$

Normalized data ($\bar{D}_i$) will be filtered into 3 frequency bands, low band (below 340 Hz), mid band (340 to 3,400 Hz) and high band (upper 3,400 Hz), called $\bar{D}_{ix}$. The average values (S_{nx}) are calculated from the absolute normalized data ($|\bar{D}_{ix}|$) of each band by equation (2).

$$S_{nx} = \langle|\bar{D}_{ix}|\rangle = \frac{\sum_{i=1}^{k}|\bar{D}_{ix}|}{k} \quad ; \; n = 0,1,2,\ldots \;\; k = ws \times Fs \qquad (2)$$

Where x is the index of each filter band and ws is an average window size, e.g. 1 msec. These processes are called Envelop Extraction.

The subtraction results (Δ_{nx}) of each band are calculated from the average values of Mix-Audio (M_{nx}) minus the average values of Single-Audio (S_{nx}) according to each band.

$$\Delta_{nx} = M_{nx} - S_{nx} \qquad (3)$$

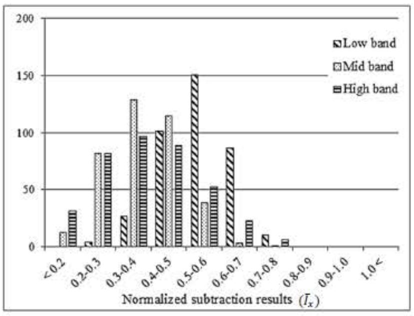
A normalized subtraction result ($\bar{I}_x$) of each band is calculated from total subtraction results (Δ_{nx}) divided by total average values of Mix-Audio (M_{nx}).

$$\bar{I}_x = \frac{\sum \Delta_{nx}}{\sum M_{nx}} \qquad (4)$$

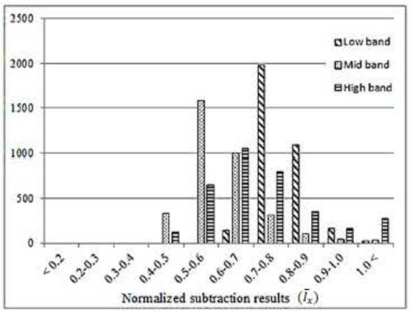
IV. Experiment Results

In this section presents experimental results from MATLAB® simulation. There are totally 20 songs to test the algorithm. We combine two songs into a file to simulate a RIM audio. There are totally 190 files of the RIM audios. Then, we use 1 of 20 songs to compare similarity with those 190 files. Therefore, each song will have 19 similar files and 171 dissimilar files. For 20 songs, there are totally 380 similar files and 3420 dissimilar files.

The normalized subtraction results of each band from similar files and 3420 dissimilar files are plotted in Figure 4(a) and 4(b) respectively.



(a) $\bar{I}_x$ from similar files



(b) $\bar{I}_x$ from dissimilar files

Fig. 4. Histogram of normalized subtraction results of each band.

TABLE I. SCORES OF THE ALGORITHM ACCORDING TO THRESHOLD VALUE

Threshold values	Right positive (%)			False positive (%)			Score		
	Low band	*Mid band*	*High band*	*Low band*	*Mid band*	*High band*	*Low band*	*Mid band*	*High band*
0.4	8.16	58.68	55.26	0.00	0.00	0.04	8.16	58.68	55.22
0.5	34.79	88.84	78.68	0.00	9.85	3.83	34.79	78.99	74.85
0.6	74.47	99.05	92.47	0.00	56.13	22.82	74.47	42.92	69.65
0.7	97.32	99.95	98.42	4.35	85.23	53.44	92.96	14.72	44.98
0.8	100.00	100.00	100.00	62.19	94.39	76.85	37.81	5.61	23.15

From Figure 4(a), the normalized subtraction results from similar files of mid band and high band are less than 0.5. Also, from Figure 4(b), the normalized subtraction results from dissimilar files of mid band and high band are more than 0.5. Therefore, using 0.5 for thresholding mid band and high band is suitable. The normalized subtraction results of low band are higher than the others. So, we use 0.7 for thresholding the low band. However, there are still some errors that we need to consider later.

From 380 comparisons of similar files, if the normalized subtraction results are less than the threshold, identifying similarity will be considered right positive. Percentages of right positive according to threshold values are shown in Table I. From 3420 comparisons of dissimilar files, if the normalized subtraction results are less than the threshold, identifying similarity will be considered false positive that a dissimilar song would be misinterpreted as a similar song. Percentages of false positive according to threshold values are also shown in Table I. The score of each band can be calculated from right positive minus false positive according to threshold values.

From Table I, threshold value 0.7 gives the maximum score at low band and threshold value 0.5 gives the maximum score at mid band and high band. Therefore, we will use these threshold values in the future.

To combine results from 3 bands, we use a similarity result, a normalized subtraction result that less than the threshold, from each band to vote for a final similarity result, as shown in Table II. From 380 comparisons of similar files, the final similarity results will be considered right positive. From 3420 comparisons of dissimilar files, the final similarity results will be considered false positive. Again, the score of a final similarity result can be calculated from right positive minus false positive. From Table II, The 2 of 3 voting gives the highest score, since the false positive is reduced significantly.

TABLE II. SCORES OF FINAL SIMILARITY RESULTS

Votes from 3 bands	Right positive (%)	False positive (%)	score
1 of 3	99.21	10.85	88.36
2 of 3	93.42	0.38	93.04
3 of 3	79.47	0.00	79.47

V. CONCLUSIONS

Intermodulation between FM broadcast stations creates interference which is mixed sounds from those stations. To identify the interference sources, we need to compare the RIM audio with the audio from each FM broadcast station. In this paper, without using any FFT calculation, the audios are divided into 3 frequency bands, low band, mid band and high band. Simple subtraction between the audios of the same band gives the indications of similarity, called normalized subtraction results. We use the threshold 0.5 for mid band and high band and the threshold 0.7 for low band. When the normalized subtraction result is less than the threshold, it indicates the similarity of the audios.

Score from each band can be calculated from the percentage of right positive finding from similar songs minus percentage of false positive finding from dissimilar songs. There are totally 380 similar songs and 3420 dissimilar songs comparisons. The scores from low band, mid band and high band are 92.96, 78.99 and 74.85 respectively. To get the final similarity result, we find that using 2 of 3 voting will give the maximum score of 93.04 with 93.42 right positive finding and 0.38 false positive.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand.

REFERENCES

[1] D. Hand and C. Eng MIET, "The RF challenges of ATC communications", Consultant Engineer - Park Air Systems Ltd.

[2] H. Jaap and K. Antonius, "A Highly Robust Audio Fingerprinting System.", International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR), Eindhoven : s.n., 2002, pp. 107-115.

[3] P. Cano, E. Batlle, T. Kalker, J. Haitsma, "A Review of Algorithms for Audio Fingerprinting", IEEE International workshop on MMSP, 2002.

[4] W. Avery and L. Chun, "An Industrial-Strength Audio Search Algorithm" ISMIR, London : Shazam Entertainment, Ltd., 2003.

[5] A. Heinrich, V. Nieuwenhuizen, C. Venter and M.J. Grobler, "The Study and Implementation of Shazam's Audio Fingerprinting Algorithm for Advertisement Identification", School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, North-West University, Potchefstroom Campus, South Africa

[6] T. Park, S.K. Beack, T. Lee, "A noise robust audio fingerprint extraction technique for mobile devices using gradient histograms", Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), 2015 IEEE 5th International Conference on, 6-9 Sept. 2015.

[7] Y. Fan and S. Feng, "A Music Identification System Based on Audio Fingerprint", Applied Computing and Information Technology/3rd Intl Conf on Computational Science/Intelligence and Applied Informatics/1st Intl Conf on Big Data, Cloud Computing, Data Science & Engineering (ACIT-CSII-BCD), 2016 4th Intl Conf on, 12-14 Dec. 2016

[8] R. Sonnleitner and G. Widmer, "Robust Quad-Based Audio Fingerprinting", IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, March 2016.

[9] S. Yao, B. Niu and J. Liu, "Audio Identification by Sampling Sub-fingerprints and Counting Matches, IEEE Transactions on Multimedia, Volume: 19, Issue: 9, Sept. 2017.

2. นันทวัฒน์ ใจเย็น , ปัญญา หันตุลา และ รังสรรค์ ทองทา. 2562. “ระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่ทำงานแบบเวลาจริงโดยอัตโนมัติ ”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON 42), มหาวิทยาลัยมหิดล ณ เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2562, หน้า CM01.

ระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่ทำงานแบบเวลาจริงโดยอัตโนมัติ

Automatic Real-time Audio Similarity Comparison Systems

นันทวัฒน์ ใจเย็น[1] ปัญญา หันตุลา[1] และ รังสรรค์ ทองทา[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 0-4422-3000 E-mail: D5740147@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่ทำงานแบบเวลาจริงโดยอัตโนมัติ เพื่อใช้สำหรับการค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุการบิน โดยการคำนวณหาผลต่างของแอมพลิจูดระหว่างเสียงจากคลื่นสัญญาณรบกวนกับเสียงของสถานีวิทยุ แล้วนำค่าผลต่างที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ (Threshold) หากเสียงทั้ง 2 เสียงมีความคล้ายกัน ผลต่างของแอมพลิจูดจะมีค่าต่ำกว่าค่า Threshold การเปรียบเทียบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่ และคำนวณหาค่าความคล้ายกันของเสียง ($\bar{I}_X$) แล้วทำการโหวต 2 ใน 3 เสียง (2 of 3 voting) จากผลการเปรียบเทียบของทั้ง 3 ย่านความถี่ อัลกอริทึมนี้สามารถทำงานในอุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded Systems) ซึ่งสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ผลทดสอบอัลกอริทึมในการค้นหาสถานีวิทยุในสถาพแวดล้อมจริงพบว่า ระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงให้ความถูกต้อง 71.33 เปอร์เซ็นต์ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในคำนวณ 51 วินาทีต่อสถานี ซึ่งระบบจะทำการค้นหาสถานีวิทยุทุกช่องความถี่อย่างอัตโนมัติและจะหยุดการค้นหาเมื่อผลการเปรียบเทียบเสียงของสถานีวิทยุนั้นมีเสียงคล้ายกับเสียงของสัญญาณรบกวน

คำสำคัญ: การเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียง, อินเตอร์มอดูเลชัน, การกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม

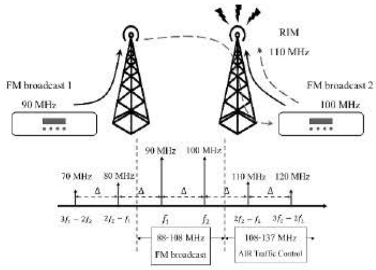
Abstract

This paper presents a real-time automatic audio similarity comparison technique for FM radio receivers. The audio similarity comparison is used to search FM broadcast stations that interferences to the Air Traffic Control (ATC) systems of Thailand. This technique uses a simple subtraction between two candidate sounds. If the sounds are similar, the subtraction results will get smaller than a threshold number. Audio sounds have wide spectral ranges, this subtraction technique divides the candidate sounds into 3 sub-bands and finds subtraction results from each band which uses to vote for final similarity. The experimental results show that the system can identify correctly at 71 .3 3 %. The algorithm can be used in embedded systems for the automatic scanning of FM receivers. The audio from interference frequency will be compared with the audio from FM broadcast frequency to identify the interferent source. If the system finds a similar sound, it will stop at that frequency, otherwise, it will automatically change the receiver frequency and repeat similarity comparison.

Keywords: Audio Similarity Comparison, Intermodulation, FM broadcast

1. บทนำ

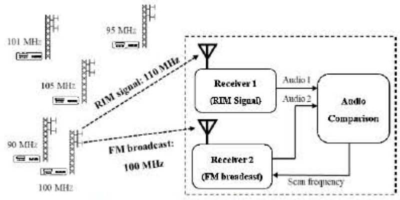
ปัญหาคลื่นความถี่วิทยุการบินได้รับการรบกวนจากคลื่นความถี่วิทยุภาคพื้นดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มเกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้งในปัจจุบัน [1] การรบกวนที่เกิดขึ้นทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างนักบินกับผู้ควบคุมจราจรทางอากาศความไม่ชัดเจนและเกิดข้อผิดพลาด อีกทั้งยังทำให้อากาศยานประสบปัญหาในการรับสัญญาณจากวิทยุเครื่องช่วยเดินอากาศ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการบอกทิศทางและแนวกึ่งกลางทางวิ่งสำหรับการนำร่องอากาศยานลงสู่สนามบิน ทำให้เกิดความเสี่ยงที่ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้



รูปที่ 1 ภาพจำลองการเกิดปรากฏการณ์ Reverse Intermodulation

โดยส่วนใหญ่แล้วการรบกวนคลื่นความถี่วิทยุการบินเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ “Reverse Intermodulation (RIM)” [1] คือ เกิดการมอดูเลตระหว่างสถานีวิทยุ 2 สถานีที่อยู่บริเวณใกล้กันทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้น ความถี่ดังกล่าวเป็นผลมาจากการผสมกันของทั้ง 2 สถานี สามารถคำนวณได้จากสมการ $2f_2$-f_1 และ $3f_2$-$2f_1$, … [2]–[3] ซึ่งอาจจะไปตกอยู่ในย่านคลื่นความถี่วิทยุการบินได้ดังแสดงในรูปที่ 1 ข่าวสารหรือเสียงที่ได้ยินจากสัญญาณ RIM ประกอบด้วยเสียงที่ผสมกันของทั้ง 2 สถานี การค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวนทำได้โดยการเปรียบเทียบเสียงของสัญญาณ RIM กับเสียงของสถานีวิทยุ เจ้าหน้าที่จะทำการสแกนความถี่วิทยุ FM ทุกช่องจนกว่าจะพบเสียงของสถานีวิทยุที่มีความใกล้เคียงกัน ในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือวัดที่มีความเหมาะสมสำหรับการค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวน จึงจำเป็นต้องอาศัยทรัพยากรบุคคลที่มีความชำนาญในการค้นหา ซึ่งใช้ระยะเวลาในการค้นหานานและสิ้นเปลืองทรัพยากรบุคคลเป็นจำนวนมาก

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีวิธีการต่าง ๆ มากมายสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณเสียง เช่น โปรแกรม Shazam's [6] ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการค้นหาชื่อเพลงผ่านระบบอินเตอร์เน็ต แต่โปรแกรมดังกล่าวไม่มีความยืดหยุ่นในการนำมาประยุกต์ใช้งานในการค้นหาสัญญาณรบกวน เพราะระบบจำเป็นต้องมีข้อมูลเพลงหลาย ๆ เพลงเก็บไว้ในฐานข้อมูลก่อน แล้วค่อยนำเสียงที่ต้องการค้นหามาวิเคราะห์แล้วเปรียบเทียบลักษณะของเสียงกับข้อมูล เพื่อให้ได้ชื่อเพลงตามที่ต้องการ

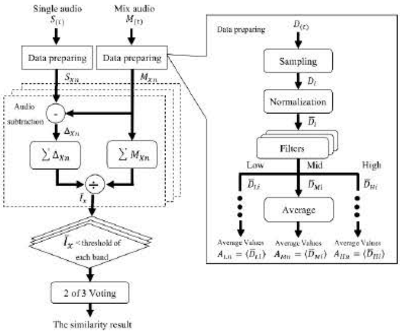


รูปที่ 2 การค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวนคลื่นความถี่วิทยุการบิน

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมอื่น ๆ พบว่า มีแนวคิดการนำระบบลายนิ้วมือเสียง (Audio Fingerprinting System) มาใช้ในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียง [4] – [9] โดยการสกัดลายนิ้วมือเสียง (Audio fingerprinting extract) ด้วยการใช้ฟังก์ชัน Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อหาลักษณะเด่นทางความถี่ที่แตกต่างกันในแต่ละสัญญาณเสียง แต่นี้มีการคำนวณที่ซับซ้อน ต้องใช้อุปกรณ์ในการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น Personal computer (PC) เป็นต้น ในบทความนี้ได้นำอัลกอริทึมในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่ทำงานแบบเวลาจริง [3] ซึ่งใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายจึงทำให้มีการใช้ทรัพยากรในการคำนวณทางคณิตศาสตร์น้อย สามารถทำงานได้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กได้ เช่น อุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded Systems) สามารถติดตั้งได้ง่ายและสามารถทำงานพร้อมกันได้หลายตัวในหลายพื้นที่ ซึ่งจะสามารถค้นหาต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวนได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ลดภาระงานและลดจำนวนของทรัพยากรบุคคลที่มีอย่างจำกัดได้

2. อัลกอริทึมในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียง

เมื่อพิจารณาสัญญาณเสียงในทางเวลา (Time-domain) พบว่า แอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณเสียงจะบ่งบอกเอกลักษณ์ได้อย่างชัดเจนในแต่ละช่วงเวลาที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงโดยการแยกขนาดของสัญญาณเสียง (Envelops) ในทางเวลาเพื่อนำมาหาผลต่าง ซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายและระยะเวลาในการคำนวณสั้น โดยสมมุติฐานคือ หากสัญญาณเสียง 2 เสียงที่นำมาเปรียบเทียบมีความคล้ายกันจะทำให้ผลต่างของแอมพลิจูดมีค่าใกล้เคียง 0 ในทางตรงกันข้ามหากเสียงที่นำมาเปรียบเทียบไม่มีความคล้ายกันผลต่างมีขนาดที่สูงขึ้น ผลการคำนวณผลต่างของแอมพลิจูดจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ (Threshold) เพื่อใช้ในกระบวนการตัดสินใจหาความคล้ายกัน (Similarly Decision)



รูปที่ 3 หลักการทำงานของอัลกอริทึมเปรียบเทียบเสียง

3. หลักการทำงาน

การทำงานของอัลกอริทึมในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ คือ 1. กระบวนการเตรียมข้อมูล (Data Preparing) ซึ่งประกอบด้วย การสุ่มสัญญาณเสียง (Audio Sampling) การปรับระดับของสัญญาณเสียง (Normalization) การกรองข้อมูลสัญญาณเสียง (Filters) และการเฉลี่ยข้อมูลสัญญาณเสียง (Average) 2. กระบวนการคำนวณผลต่างแอมพลิจูดของเสียง (Audio Subtraction) และ 3. กระบวนการตัดสินใจหาความคล้ายกัน (Similarly Decision) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่สัญญาณเสียงที่เป็นอินพุตของระบบประกอบด้วยเสียงจาก 2 แหล่งคือ เสียงจากเครื่องรับวิทยุระบบ FM ซึ่งจะเรียกสัญญาณเสียงนี้ว่าสัญญาณเสียงเดี่ยว (Single audio) หรือ $S_{(t)}$ และเสียงสัญญาณรบกวนจากเครื่องรับวิทยุการบิน ซึ่งจะเรียกสัญญาณเสียงนี้ว่าสัญญาณเสียงผสม (Mix audio) หรือ $M_{(t)}$

3.1 กระบวนการเตรียมข้อมูล (Data Preparing)

สัญญาณเสียงแบบต่อเนื่อง (Continuous signal) $D_{(t)}$ ที่เข้ามาในระบบจะถูกแบ่งเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เพียง 10 วินาทีเพื่อใช้ในการคำนวณ 1 รอบ หลังจากนั้นจะถูกทำให้อยู่ในรูปสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete signal) D_i ด้วยอัตราสุ่มตัวอย่าง (sampling rate : Fs) 44,100 Hz ระดับสัญญาณเสียงดิจิตอล 16 บิต ทำการปรับระดับของสัญญาณเสียง D_i ด้วยกระบวนการ Normalization ($\bar{D}_i$) เพื่อให้ได้พลังงานเฉลี่ยของเสียง (Average Power) มีค่าเท่ากับ 1 สามารถคำนวณค่า $\bar{D}_i$ ได้จาก [3]

$$\bar{D}_i = \frac{D_i}{\sqrt{\sum (D_i)^2}} \tag{1}$$

ข้อมูลหลังจาก Normalization ($\bar{D}_i$) จะถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 340 Hz) ย่านความถี่กลาง (ความถี่ 340 Hz ถึง 3,400 Hz) และย่านความถี่สูง (สูงกว่า 3,400 Hz) ซึ่งเรียกว่า $\bar{D}_{Xi}$ แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดในแต่ละย่านความถี่ (A_{Xn}) สามารถคำนวณได้จาก [3]

$$A_{Xn} = \langle |\bar{D}_{Xi}| \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{k} |\bar{D}_{Xi}|}{k} \;;\; n = 0,1,2,\ldots \quad k = ws \times Fs \tag{2}$$

โดยที่ X แทน ย่านความถี่ (Low , Mid , High)

ws แทน หน้าต่างรับข้อมูล (Windows size) ขนาด 1 mSec

Fs แทน อัตราการสุ่มตัวอย่าง (44,100 Hz)

3.2 กระบวนคำนวณผลต่างแอมพลิจูดของเสียง (Audio Subtraction)

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงเดียวที่ผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูลคือ S_{Xn} และข้อมูลสัญญาณเสียงผสม คือ M_{Xn} โดยที่ผลต่างของแอมพลิจูดของ 2 สัญญาณเสียง (Δ_{Xn}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความคล้ายกันของเสียง (Normalized subtraction: $\bar{I}_x$) ในแต่ละย่านความถี่ดังแสดงในสมการที่ 4 ซึ่งจะนำค่า $\bar{I}_x$ ไปพิจารณาจากค่า Normalized subtraction ($\bar{I}_X$) เพื่อตัดสินใจหาค่าความคล้ายกัน (Similarly Decision) [3]

$$\Delta_{Xn} = |M_{Xn} - S_{Xn}| \quad (3)$$

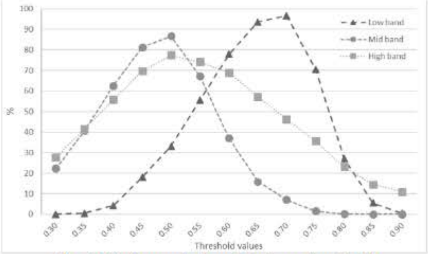
$$\bar{I}_X = \frac{\sum \Delta_{Xn}}{\sum M_{Xn}} \quad (4)$$

3.3 กระบวนการตัดสินใจหาความคล้ายกัน (Similarly Decision)

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากค่า Normalized subtraction ($\bar{I}_X$) เพื่อตัดสินใจหาค่าความคล้ายกัน (Similarly Decision) โดยที่ค่า $\bar{I}_X$ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ (Threshold) ในแต่ละย่านความถี่ ซึ่งมีการกำหนดค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป เมื่อค่า $\bar{I}_X$ ในย่านความถี่นั้นน้อยกว่าค่า Threshold แสดงให้เห็นถึงสัญญาณเสียงมีความคล้ายกัน ในกระบวนการตัดสินใจขั้นสุดท้ายจะทำการโหวต 2 ใน 3 เสียง (2 of 3 voting) จากผลการเปรียบเทียบใน 3 ย่านความถี่ หากพบว่าความคล้ายกันของเสียงอยู่มากกว่าหรือเท่ากับ 2 ย่านความถี่ จึงจะสรุปว่าทั้งสองสัญญาณเสียงมีความคล้ายกัน

4. การจำลองการทำงานบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่า Threshold ที่เหมาะสมในการตัดสินหาความคล้ายกันของเสียง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่า Threshold ที่เหมาะสมในแต่ละย่านความถี่ จากตัวอย่างไฟล์เสียงที่ใช้ทั้งหมด 20 ไฟล์เสียง (จัดอยู่ในกลุ่มเสียงเดี่ยว) มาสร้างตัวอย่างสัญญาณเสียงผสมได้ 190 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นเสียงที่มีความคล้ายกัน 19 ตัวอย่างและเสียงที่ไม่มีความคล้ายกัน 171 ตัวอย่าง

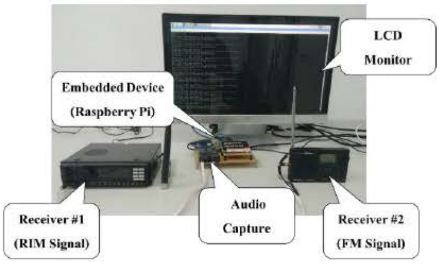


รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตัดสินใจการเปรียบเทียบเสียงที่ค่า Threshold ต่าง ๆ

จากรูปแสดงให้เห็นถึงค่าเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมในแต่ละย่านความถี่เพื่อที่จะนำไปใช้ในการพิจารณาหาความคล้ายกันของเสียง ในย่านความถี่ต่ำค่า Threshold ที่เหมาะสมคือ 0.7 มีความแม่นยำสูงสุดที่ 96.73 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความถี่กลางและย่านความถี่สูงค่า Threshold ที่เหมาะสมคือ 0.5 มีความแม่นยำสูงสุดที่ 86.75 และ 77.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งทางผู้วิจัยจึงได้ใช้ค่า Threshold ทั้ง 3 ค่าในการตัดสินใจในกระบวนการต่อไป

5. การทดสอบและวิเคราะห์ของการทำงานของอัลกอริทึมบนอุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded Systems)

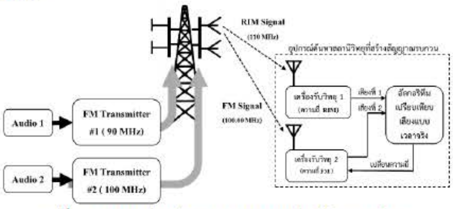
ในงานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริทึมมาประมวลผลด้วยบอร์ด Raspberry Pi ซึ่งอุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded Systems) ที่มีขนาดเล็กราคาถูก ซึ่งจะเชื่อมต่ออยู่อุปกรณ์บันทึกสัญญาณเสียง (Audio capture) จำนวน 2 ชุด เพื่อรอรับสัญญาณเสียงจากเครื่องรับวิทยุสำหรับรับความถี่ที่ถูกรบกวน (สัญญาณ RIM) และเครื่องรับวิทยุสำหรับรับสัญญาณวิทยุกระจายเสียง (สัญญาณ FM)



รูปที่ 5 อุปกรณ์ต้นแบบในการค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวน

5.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดสอบโดยใช้เครื่องส่งวิทยุที่มีขนาดกำลังส่ง 10 วัตต์จำนวน 2 เครื่อง เพื่อจำลองเป็นสถานีวิทยุ 2 สถานีที่ออกอากาศพร้อมกัน ซึ่งในแต่ละสถานีมีเสียงที่ไม่เหมือนกัน สายอากาศของเครื่องส่งทั้ง 2 ติดตั้งอยู่ใกล้เคียงกันเพื่อทำให้เกิดสัญญาณ RIM จากนั้นจะใช้อุปกรณ์สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ค้นหาสถานีวิทยุรับสัญญาณเพื่อทำสอบการประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพจำลองอุปกรณ์สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ค้นหาสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวน

5.2 การให้คะแนนผลการตัดสินความคล้ายกันของเสียง

เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียง ในแต่ละสถานีวิทยุ ทางผู้วิจัยจึงได้คิดวิธีการให้คะแนนการเปรียบเทียบแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งหากเสียงมีความคล้ายกันระบบจะให้คำตอบเป็น "Similar" หรือเป็นจริง แต่หากหากเสียงมีไม่มีความคล้ายกันระบบจะให้คำตอบเป็น "Dissimilar" หรือเป็นเท็จ ดังนั้นหากการเปรียบเทียบให้คำตอบเป็นจริง ระบบจะทำการเพิ่มคะแนนขึ้นไปเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบการคำนวณ แต่หากการเปรียบเทียบให้คำตอบเป็นเท็จ ระบบจะทำการลดคะแนนลง ระบบจะทำการตรวจสอบคะแนนเพื่อตัดสินใจว่าควรจะเปลี่ยนความถี่ของสถานีวิทยุไปยังสถานีอื่นหรือไม่ หากคะแนนของสถานีวิทยุนั้นมีค่าน้อยกว่า 0 ระบบจะเปลี่ยนไปรับความถี่วิทยุในช่องถัดไป แต่หากมีคะแนนมากกว่า 0 ระบบก็จะทำการตรวจสอบความถี่เดิมอีกครั้ง โดยจะแสดงคะแนนของสถานีนั้นให้เห็นเพิ่มความแม่นยำในการระบุสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณรบกวน

5.3 ประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม

การทดลองประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบ คือ 1.ทดลองการเปรียบเทียบเสียงที่เหมือนกัน โดยให้เครื่องรับวิทยุทั้ง 2 เครื่องรับสัญญาณจากสถานีเดียวกัน ผลการทดลองพบว่ามีความถูกต้อง 86.67 เปอร์เซ็นต์ 2.ทดลองการเปรียบเทียบเสียงจากสัญญาณ RIM (เสียงผสม) กับสัญญาณ FM (เสียงเดี่ยว) เพื่อเปรียบเทียบและค้นหาสถานีวิทยุ FM ในสภาพแวดล้อมจริง ผลการทดลองมีความถูกต้อง 71.33 เปอร์เซ็นต์ 3.ทดลองการเปรียบเทียบเสียงที่ต่างกัน โดยให้เครื่องรับวิทยุทั้ง 2 เครื่องรับสัญญาณจากสถานีคนละสถานี เพื่อทดสอบความผิดพลาดในการตัดสินใจของระบบ ผลการทดลองพบว่าความผิดพลาดในการตัดสิน 14 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบแต่ละครั้งอยู่ที่ 51 วินาทีโดยเฉลี่ย

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม
(จำนวนการทดสอบทั้งหมด 300 ครั้ง/กลุ่ม)

ประเภทการทดสอบ	จำนวนครั้งที่พบความคล้ายกันของเสียง	ร้อยละ
ทดลองการเปรียบเทียบเสียงที่เหมือนกัน	260	86.67 (ถูกต้อง)
ทดลองการเปรียบเทียบเสียงจากสัญญาณ RIM (เสียงผสม) กับสัญญาณ FM (เสียงเดี่ยว)	214	71.33 (ถูกต้อง)
ทดลองการเปรียบเทียบเสียงที่ต่างกัน	42	14.00 (ผิดพลาด)

6. สรุป

ในบทความนี้นำเสนอระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่ทำงานแบบเวลาจริงโดยอัตโนมัติ โดยการคำนวณหาผลต่างของแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงทั้ง 2 เสียงที่นำมาเปรียบเทียบกัน หากสัญญาณเสียง 2 เสียงมีความคล้ายกันจะทำให้ผลต่างของแอมพลิจูดมีค่าใกล้เคียง 0 การเปรียบเทียบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่ และคำนวณหาค่าความคล้ายกันของเสียง (Normalized subtraction: $\bar{I}_X$) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ (Threshold) ของแต่ละย่านความถี่ ค่าเกณฑ์ (Threshold) ที่เหมาะสมในการตัดสินความคล้ายกันของเสียงของย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่กลางและย่านความถี่สูง คือ 0.7 0.5 และ0.5 ตามลำดับ ในการตัดสินใจหาความคล้ายกัน (Similarly Decision) จะทำการโหวต 2 ใน 3 เสียง (2 of 3 voting) จากผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 ย่านความถี่ อุปกรณ์ระบบสมองกลฝังตัว หรือ Embedded Systems (บอร์ด Raspberry Pi) ถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลอัลกอริทึมในการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงที่คิดค้นขึ้น เมื่อทดสอบในสถาพแวดล้อมจริงพบว่าระบบการเปรียบเทียบความคล้ายกันของเสียงให้ความถูกต้อง 71.33 เปอร์เซ็นต์ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในคำนวณ 51 วินาทีต่อสถานี นอกจากนี้ระบบจะเพิ่มคะแนนของสถานีวิทยุเมื่อผลการเปรียบเทียบของสถานีวิทยุนั้นเป็นจริงและลดคะแนนลงเมื่อผลการเปรียบเทียบเป็นเท็จ หากคะแนนของสถานีวิทยุใดมีค่าสูงที่สุดแสดงว่าสถานีวิทยุนั้นเป็นสถานีวิทยุที่สร้างสัญญาณออกไปรบกวนคลื่นวิทยุการบิน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนในการทำการวิจัยจนบรรลุผลและประสมความสำเร็วด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา (2546).รายงาน โครงการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรม Reverse Intermodulation การออกอากาศของสถานีที่อยู่ใกล้กัน และแนวทางการดูแลให้เกิดการกวนกันให้น้อยของสถานีวิทยุกระจายเสียง สำหรับการทดลองประกอบกิจการกระจายเสียง

[2] David Hand C.Eng MIET, "THE RF CHALLENGES OF ATC COMMUNICATIONS", Consultant Engineer - Park Air Systems Ltd.

[3] Nantawat J., Panya H. Rangsan T, "Real-Time Audio Similarity Comparison Algorithm", 2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCOReD)

[4] P.Cano, E.Batlle, T.Kalker, J.Haitsma, "A Review of Algorithms for Audio Fingerprinting", IEEE International Workshop on MMSP, 2002.

[5] Haitsma, Jaap and Kalker, Antonius, "A Highly Robust Audio Fingerprinting System." International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR), Eindhoven: s.n., 2002, p. 107-115.

[6] Wang, Avery Li-Chun., "An Industrial-Strength Audio Search Algorithm." ISMIR, London: Shazam Entertainment, Ltd., 2003.

[7] T.Park,S.K.Beack,T.Lee, "A noise-robust audio fingerprint extraction technique for mobile devices using gradient histograms", Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), 2015 IEEE 5th International Conference on, 6-9 Sept. 2015.

[8] Reinhard Sonnleitner, Gerhard Widmer, "Robust Quad-Based Audio Fingerprinting", IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, March 2016.

[9] Shanshan Yao, Baoning Niu, Jianquan Liu, "Audio Identification by Sampling Sub-fingerprints and Counting Matches, IEEE Transactions on Multimedia, Volume: 19, Issue: 9, Sept. 2017.

3. กาญจนศิริ ศรีสอน , พัชรี พลอินทร์ และ ศุภากรณ์ สิงห์งาน “ระบบควบคุมและรายงานสถานะเครื่องส่งวิทยุ” , โครงงานศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ระบบตรวจสอบและควบคุมสถานะเครื่องส่งวิทยุเป็นระบบที่สามารถตรวจสอบสถานะเครื่องส่งวิทยุผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อให้ผู้ดูแลเครื่องส่งวิทยุสามารถทราบถึงสถานะการทำงาน ค่ากำลังส่ง กำลังสะท้อน อุณหภูมิของเครื่องส่งวิทยุ และอุณหภูมิของห้องส่ง สามารถสั่งเปิดหรือปิดการใช้งานเครื่องส่งวิทยุ โดยไม่จำเป็นต้องเดินทางไปสถานีวิทยุด้วยตนเอง หากเกิดความผิดปกติระบบจะทำการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE แต่หากเกิดความผิดปกติระดับอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งวิทยุ ระบบจะทำการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE และสั่งปิดเครื่องส่งวิทยุทันที ไม่ว่าผู้ดูแลเครื่องส่งวิทยุจะอยู่สถานที่ใดก็ตาม ซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลาในการควบคุมและอำนวยความสะดวกต่อผู้ดูแลเครื่องส่งวิทยุ อีกทั้งยังสามารถช่วยป้องกันความเสียหายของเครื่องส่งวิทยุได้อีกด้วย

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

- **ชื่อ-นามสกุล** ผศ. ดร. รังสรรค์ ทองทา
  Asst.Prof.Dr.Rangsan Tongta
- **ตำแหน่งปัจจุบัน** อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
  สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 4221 โทรสาร 0 4422 4220
E-mail: tongta@sut.ac.th

- **ประวัติการศึกษา**
  - Ph.D. (Electrical Engineering)
    ปีที่จบ 2541, Florida Institute of Technology, USA
  - M.S. (Electrical Engineering)
    ปีที่จบ 2537, Florida Institute of Technology, USA
  - วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)
    ปีที่จบ 2531, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- **สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**
  - มีความชำนาญพิเศษทางด้าน Fiber Optic Sensors โดยที่เคยเป็นผู้ช่วยวิจัยพัฒนาการประยุกต์ใช้ Fiber Optic มาใช้เป็น Traffic Sensor ที่สามารถตรวจนับ (Count) แยกประเภท (Classify) และชั่งน้ำหนักยานพาหนะโดยที่ไม่จำเป็นต้องหยุด (Weight in Motion: WIM) ได้ในขณะเดียวกัน
  - มีความชำนาญพิเศษทางด้าน Underwater Acoustic Communications โดยที่เคยเป็นผู้ช่วยวิจัยพัฒนาการสื่อสารใต้น้ำความเร็วสูง โดยใช้คลื่นความถี่เสียง
  - มีความชำนาญพิเศษทางด้านระบบวิทยุกระจายเสียง (Radio Broadcasting) โดยที่เคยเป็นวิทยากรอบรมมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง
  - มีความชำนาญพิเศษทางด้าน Reverse Intermodulation โดยที่เคยเป็นผู้วิจัยและพัฒนาตัวกรอกสัญญาณแบบผ่านแถบสำหรับการลดปัญหา Reverse Intermodulation ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย
- **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ :**
  - ผู้ช่วยวิจัย: Fiber Optic Traffic Sensors , Florida Institute of Technology, Melbourne, FL, USA.
  - ผู้ช่วยวิจัย: Underwater Acoustic Communications Harbor Branch Oceanographic Institute, Ft. Pierce, FL, USA.
  - หัวหน้าโครงการวิจัย: ความไวของตัวตรวจจับแบบวงรอบสำหรับยานพาหนะขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
  - หัวหน้าโครงการวิจัย: เครื่องควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยอัตโนมัติ (วช. 52-53)
  - รองหัวหน้าโครงการ: รีไซเคิลลำไยค้างสต๊อก ปี 46-47 (กระทรวงวิทย์ 53)
  - หัวหน้าโครงการ: โครงการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรม Reverse Intermodulation การออกอากาศของสถานีที่อยู่ใกล้กันและแนวทางการดูแลให้เกิดการกวนกันให้น้อยของสถานีวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดลองประกอบกิจการกระจายเสียง (กสทช. 56-57)

กทปส

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

(สำนักงาน กสทช.)