

Part IV

การออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งาน ภายในถ้ำ

โครงข่ายระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ Part IV

เนื้อหา	หน้า
1. บทนำ.....	3
2. กรอบความคิดในการออกแบบเครื่องรับส่งวิทยุระบบดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำ.....	6
3. ทฤษฎี หลักการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง.....	8
4. การทดสอบเบื้องต้นของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	18
5. การออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	20
5.1 การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01.....	21
5.2 การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย.....	33
5.3 สรุปผลการทดสอบ.....	72
6. ระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	74
6.1 ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ.....	74
6.2 การดำเนินงานวิจัยการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ.....	76
6.3 ผลการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ.....	92
6.4 สรุปผลการทดสอบ.....	113
7. การพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	115
7.1 แนวทางในการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	115
7.2 การพัฒนาสายอากาศสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	122
7.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	128
7.4 ผลการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ.....	130
7.5 ผลการทดสอบเชิงคุณภาพในระยะทาง 50 เมตร ระหว่างค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง (Latency) สำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	138
7.6 ผลการทดสอบโดยการใช้สายนำสัญญาณมาประยุกต์ใช้ร่วมงานกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล.....	150
7.7 สรุปผลการทดสอบ.....	155
8. สรุปผลการวิจัยและสร้างโครงข่ายสื่อสารระบบดิจิทัล.....	156
9. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม.....	159

ระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเจริญรุดหน้าไปรวดเร็วมาก ทำให้มีเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบสำหรับการสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้อัตราการส่งข้อมูลต่ำจำนวนมาก โดยในตารางที่ 1 ได้แสดงเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถออกแบบให้มีการสื่อสารไร้สายแบบมัลติฮอป (Multi-Hop) และใช้โทโพโลยีแบบตาข่าย (Mesh topology) ดังนั้นการสื่อสารระหว่างโหนดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile node) หรือโหนดอื่น ๆ ในเครือข่ายจะใช้รูปแบบการสื่อสารไร้สายแบบมัลติฮอปหรือการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปถึงโหนดปลายทางโดยการส่งผ่านโหนดประสานงาน (Coordinator node) ที่อยู่ในเส้นทาง ซึ่งโหนดระหว่างเส้นทางเหล่านั้นจะทำการส่งต่อ (Forward) ข้อมูลดังกล่าวไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงโหนดปลายทางได้สำเร็จ

เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยเสียงแบบไร้สาย ที่ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะการใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัล (Mobile phone) ที่ใช้ในการสื่อสารสองทาง (Two-way communication) ผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้คลื่นวิทยุในการติดต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยผ่านสถานีฐาน (Base station) เริ่มตั้งแต่โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ GSM หรือระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 2G โดยมีเทคโนโลยีการเข้าถึงช่องสัญญาณของผู้ใช้เป็นลักษณะเชิงผสมระหว่าง FDMA (Frequency division multiple access) และ TDMA (Time division multiple access) ในการเพิ่มช่องทางการสื่อสาร ทำให้รองรับปริมาณผู้ใช้งานที่มากขึ้นได้ และในยุคต่อมา ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 2G ได้รับการพัฒนาเป็นระบบ 3G และ 3.5G ตามลำดับ ซึ่งจะเน้นการสื่อสารทั้งการพูดคุยแบบเสียงตามปกติ (Voice) และการรับส่งข้อมูล (Data) โดยในส่วนของ การรับส่งข้อมูลทำให้ระบบ 3G นั้นมีความแตกต่างไปจากระบบเก่า 2G ที่มีพื้นฐานในการพูดคุยแบบเสียงตามปกติอยู่มาก เนื่องจากเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถรองรับกับการรับส่งข้อมูลโดยตรง ทำให้มีช่องความถี่และขนาดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าจึงส่งผลให้การรับส่งข้อมูลหรือการใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นมีความเร็วมากขึ้นแบบก้าวกระโดด มีประสิทธิภาพการใช้งานด้านมัลติมีเดียที่ดีขึ้นและยังมีความเสถียรที่ดีกว่าระบบ 2G เดิม ทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G มีความสามารถครบถ้วนทั้งในด้านของการสื่อสารด้วยเสียงและข้อมูลรวมถึงวีดิทัศน์ ปัจจุบันเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานกันทั่วไปและใช้เทคโนโลยี 4G LTE (Long term evolution) ซึ่งมีการพัฒนาในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล สามารถทำการรับส่งได้เร็วขึ้นถึง 100 Mbps สามารถรองรับการถ่ายทอดสด (Live) บนแพลตฟอร์มของเครือข่ายสังคม (Social media) ต่าง ๆ ได้อย่างราบรื่นและทันท่วงทีสำหรับรายงานสถานการณ์หรือข่าวต่าง ๆ และมีการพัฒนาต่อยอดเป็น 4.5G หรือเรียกว่า LTE-A หรือ LTE Advance ทำให้มีความสามารถสูงกว่า LTE เดิมมาก โดยระบบมีความสามารถในการรวมคลื่นความถี่หลากหลายคลื่นความถี่จึงทำให้มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลมากขึ้น โดยสามารถทำความเร็วได้มากที่สุดถึง 300 Mbps ทำให้เครือข่ายดังกล่าวสามารถรองรับการใช้งานในบริเวณที่ผู้ใช้งานหนาแน่นและเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานในพื้นที่นั้น ๆ ได้อีกด้วย รวมถึงเป็นการเตรียมตัวสู่ยุค 5G ในอนาคต

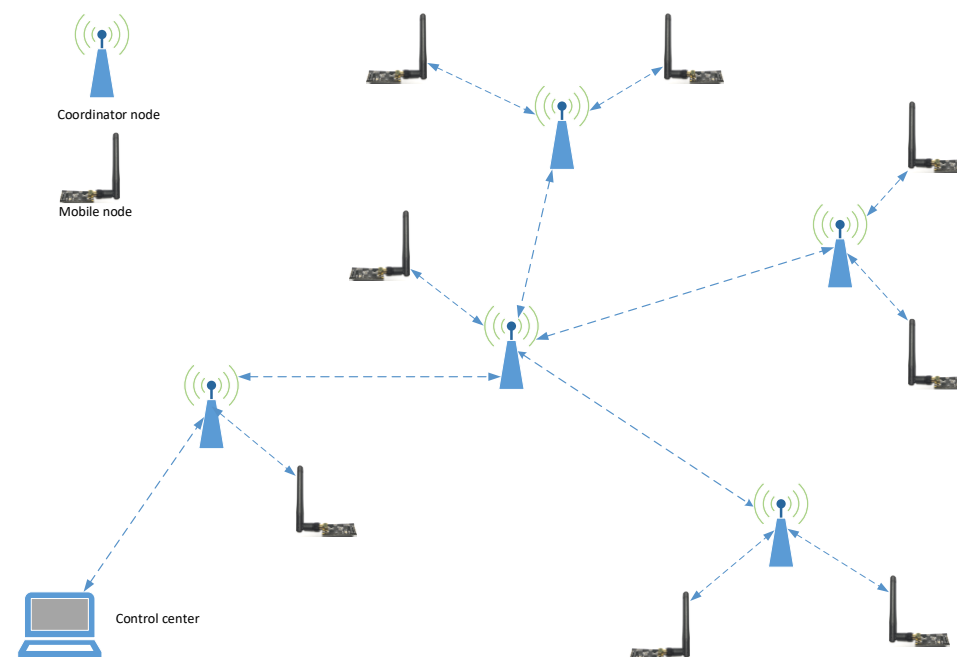
โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลอีกเทคโนโลยีหนึ่งคือ วอยซ์โอเวอร์ไอพี (Voice over Internet protocol, VoIP) หรือโทรศัพท์ดิจิทัล (Digital phone) เป็นการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet) หรือโครงข่ายอื่น ๆ ที่ใช้อินเทอร์เน็ตโพรโทคอล (Internet protocol) โดยข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณเสียงแบบดิจิทัลจะถูกตัดแบ่งเป็นแพ็คเกจ (Packet data) วิ่งผ่านไปบนเครือข่ายที่ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลทั่วไปแทนการใช่วงจรเฉพาะตามวิธีการสื่อสารในระบบโทรศัพท์แบบดั้งเดิม (Circuit switching telephone networks) ข้อดีของวอยซ์โอเวอร์ไอพีคือ สามารถใช้โครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถให้บริการโทรศัพท์ได้ในอัตราค่าบริการที่ถูกลงมาก ส่วนจุดด้อยของวอยซ์โอเวอร์ไอพีคือ ในบางกรณีคุณภาพเสียงอาจจะไม่ดีเท่าโทรศัพท์แบบปกติ และอาจจะมีการหน่วงเวลา (Delay) หรือการที่สัญญาณเสียงเดินทางมาช้ากว่าปกติ อาจจะเนื่องจากความคับคั่งบนเครือข่าย (Network congestion) รวมทั้งจะไม่สามารถใช้งานโทรศัพท์แบบวอยซ์โอเวอร์ไอพีได้เมื่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตล่มหรือไฟดับ เป็นต้น

การพัฒนาเทคนิคการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความท้าทายสูงมาก เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งในด้านของอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล ความสามารถในการประมวลผลของหน่วยประมวลผลหลัก ขนาดของหน่วยความจำที่มีจำกัดและแหล่งพลังงานที่ใช้ โดยเทคโนโลยีที่จะสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาการสตรีมมิ่งเสียง (Audio streaming) ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือ Bluetooth 5.0, nRF24L01, Wi-Fi และ ZigBee ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz (Industries, Science, and Medical; ISM Band) เนื่องจากมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงเพียงพอต่อการส่งข้อมูลเสียงแม้จะมีระยะทางในการส่งข้อมูลไม่สูงมาก แต่เมื่อนำมาสร้างเครือข่ายที่ใช้โทโพลยีแบบตาข่ายก็จะสามารถทำการสื่อสารให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการได้ ส่วนเทคโนโลยี Lora มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ต่ำเกินไปแม้จะมีระยะทางในการส่งข้อมูลที่ไกลมากกว่าก็ตาม แผนภาพของการส่งข้อมูลเสียงแบบสตรีมมิ่งในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแสดงในรูปที่ 1

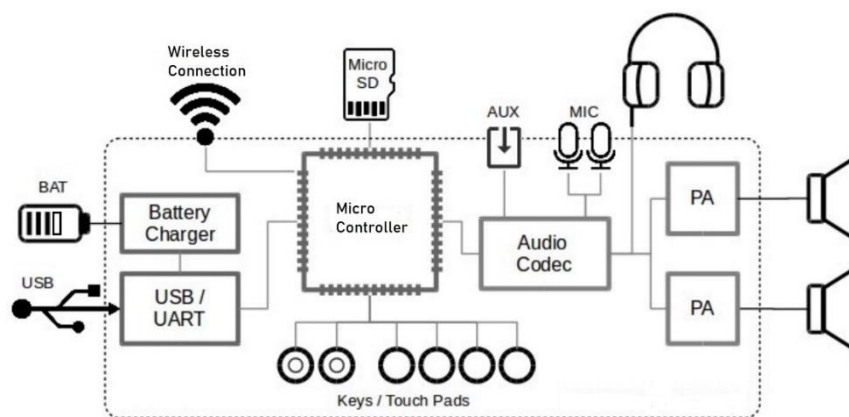
ตารางที่ 1 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการใช้งานในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

Technologies	Distance	Bit rate	Frequency band	License
Bluetooth 4.0	100 m	1 Mbps	2.4 GHz, ISM	Unlicensed
Bluetooth 5.0	350 m	1-3 Mbps	2.4 GHz, ISM	Unlicensed
IEEE 802.15.4 (ZigBee)	10-75 m	20-250 kbps	2.4 GHz, ISM	Unlicensed
nRF24L01	600 m	2 Mbps	2.4 GHz, ISM	Unlicensed
Lora	22 km	290 bps-50 kbps	915 MHz, ISM	Unlicensed
Wi-Fi IEEE 802.11g	100 m	6-54 Mbps	2.4 GHz, ISM	Unlicensed



รูปที่ 1 แผนภาพการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

องค์ประกอบหลักของระบบการส่งข้อมูลแบบสตรีมมิงเสียงบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแสดงในรูปที่ 1 โดยโนดที่เคลื่อนที่ได้ จะมีวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ประกอบด้วย ระบบสมองกลฝังตัวที่มีโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital conversion, ADC) เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากไมโครโฟนเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนทำการเข้ารหัสข้อมูลด้วยตัวเข้ารหัสเสียง (Audio codec) และส่งออก (Transmission) ไปยังปลายทางผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สาย และเมื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับ (Receiver) ข้อมูลกลับเข้ามาในระบบ โมดูลถอดรหัสสัญญาณดิจิทัลและโมดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Digital to analog conversion, DAC) ก็จะงานในลักษณะย้อนกลับกับขั้นตอนการส่ง ทำให้ได้สัญญาณทางไฟฟ้าเป็นอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณและส่งออกไปยังลำโพงหรือหูฟังต่อไป ในการทำงานดังกล่าวจะมีระบบสมองกลฝังตัวทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด รวมถึงการจัดการในด้านการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีจำกัดเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ยาวนานที่สุด ระบบการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2. กรอบความคิดในการออกแบบเครื่องรับส่งวิทยุระบบดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำ

จากการทบทวนงานวิจัยที่นำเสนอในวารสาร [1] นักวิจัยได้นำเสนอระบบการสื่อสารไร้สายในถ้ำที่เรียกว่า In-Cave wireless communication system (ICWCS) ระบบดังกล่าวใช้หลักการออกแบบการทำงานที่คล้ายกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ (Cellular mobile phone networks) โดยประกอบด้วยโนดหลัก (Backbone node) เป็นโนดที่อยู่กับที่โดยใช้การยึดติดกับผนังถ้ำและมีโนดย่อยที่สามารถเคลื่อนที่หรือพกพาติดตัวได้เรียกว่าโนดเคลื่อนที่ (Mobile node หรือ cellular node) ซึ่งเป็นโนดย่อยสำหรับใช้ติดต่อสื่อสารกันได้โดยผ่านทางโนดหลักที่วางไว้ตามเส้นทางของการเคลื่อนที่ที่ได้วางแผนไว้ล่วงหน้า

ในบทความที่ [2] นำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าการส่งสัญญาณเสียงแบบไร้สายหลายฮอป (Multihop) ผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks) ในเหมืองแร่ โดยนักวิจัยได้ทำการออกแบบระบบสื่อสารที่มีการใช้คลื่นความถี่วิทยุ 2 ระบบ (Dual radio system) ที่เรียกว่าโนดสื่อสาร FireFly ใช้ชิพ CC2420 ที่มีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ย่านความถี่ 2.4 GHz ในการสื่อสารข้อมูลเสียงและใช้การจัดการช่องสัญญาณสำหรับการรับส่งด้วยการแบ่งช่องสัญญาณในทางเวลาเพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูลด้วย TDMA (Time-division multiple access) ขณะเดียวกันก็มีการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุแบบ AM (Amplitude modulation) เพื่อใช้ในการซิงค์สัญญาณในทางเวลาแบบ GTS (Global time synchronization) แต่ละโนดสื่อสารมีการควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้การเข้ารหัสสัญญาณเสียงด้วยเทคนิค ADPCM (Adaptive differential pulse code modulation) ก่อนที่จะทำการรับส่งผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยพบว่า FireFly สามารถทำการรับส่งได้ทีละระดับหนึ่งเมื่อประเมินคุณภาพด้วย MOS scale และระดับคุณภาพของสัญญาณเสียงจะลดลงเมื่อจำนวนฮอปของการสื่อสารเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแพ็คเกจข้อมูลจะมีการสูญหายและความล่าช้าในการนำส่งแพ็คเกจข้อมูล (Latency) จะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีบทความที่นำเสนอระบบการสื่อสารด้วยอุปกรณ์ ZigBee ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ย่านความถี่ 2.4 GHz [3] ซึ่งเป็นการสื่อสารที่ใช้พลังงานต่ำและมีความเร็วต่ำที่ออกแบบสำหรับการ

ใช้งานแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยนักวิจัยทำการศึกษาการสื่อสารในรูปแบบ Full-duplex voice over IP (VoIP) และ Half-duplex push-to-talk (PTT) โดยพบว่าเมื่อมีการเชื่อมต่อโดยตรงสามารถทำการสนทนาด้วยการสื่อสารแบบ VoIP และ PTT ได้ประมาณ 3 และ 17 คู่สนทนาตามลำดับ แต่เมื่อทำการเชื่อมต่อผ่าน โหนดรีเลย์ (Relay node) หรือเราเตอร์โนด (Router node) การสนทนาดังกล่าวจะสามารถทำได้หรือมีคุณภาพเสียงที่ยอมรับได้เมื่อทำการเชื่อมต่อด้วยจำนวนฮอปของการสื่อสารเท่ากับ 2 เนื่องจากมีการสูญหายแพ็คเกจข้อมูล การล่าช้า (Delay) ของข้อมูลและมีการรบกวนแบบจitter (Jitter) เพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนฮอปมากขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีบทความงานวิจัยที่ได้นำเสนอการเปรียบเทียบอุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย 2 โมดูลคือ ZigBee และ nRF24L01+ ที่นิยมใช้ในการส่งข้อมูลเสียงในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย [4] โดยอุปกรณ์ดังกล่าวใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific, and Medical) Band โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลโดยประเมินจากค่า Throughput หรือจำนวน Transaction/Request ที่ถูกสร้างขึ้นหรือทำงานได้ในช่วงเวลาการทดสอบหนึ่ง ๆ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้สำหรับบ่งชี้ว่าระบบมีความสามารถในการจัดการงานได้จำนวนเท่าไรในแต่ละหนึ่งหน่วยเวลานั้น ๆ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ทำการประเมินจากค่า Payload และอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลบนโทโปโลยี (Topology) ของเครือข่ายแบบเดียวกัน โดยพบว่าอุปกรณ์ nRF24L01+ มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงกว่าและมีค่า Throughput ที่ดีกว่าอุปกรณ์ ZigBee อย่างไรก็ตาม ZigBee ก็มีข้อดีตรงที่มีความสามารถในการประหยัดพลังงานที่ดีกว่า และในบทความที่ [5] มีการนำเสนอการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการพัฒนาและออกแบบขึ้นเพื่อการสื่อสารไร้สายทั้งแบบความเร็วต่ำและความเร็วสูง และบางเทคโนโลยีถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการสร้างเครือข่ายสื่อสารหลักสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในรูปแบบที่นิยมเรียกกันว่าอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) โดยบทความนำเสนอการประยุกต์ใช้งานในด้านเมืองอัจฉริยะ (Smart city) เช่น ZigBee, Bluetooth, Lora, Wi-Fi, WiMax, 4G และ 5G เป็นต้น โดยให้รายละเอียดของเทคโนโลยีต่าง ๆ ทั้งในด้านของอัตราเร็วในการส่งข้อมูล ความถี่ใช้งานระยะทางในการส่งข้อมูล รวมถึงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานเทคโนโลยีเหล่านั้นในสถานการณ์ต่าง ๆ

แนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบสื่อสารต้นแบบสำหรับใช้งานในย่านความถี่ระบบโครงข่ายสื่อสารต้นแบบระบบดิจิทัลความถี่สูง ทางคณะผู้วิจัยได้วางกรอบความคิดในการใช้ระบบโครงข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับการใช้งานหลังจากที่พนักงานหรือเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องได้เข้าไปปฏิบัติหน้าที่ภายในถ้ำได้แล้ว จากนั้นจึงมีการนำระบบสื่อสารดังกล่าวเข้าไปติดตั้งเพื่อให้การสื่อสารภายในถ้ำสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้นำเสนอระบบโครงข่ายสื่อสารต้นแบบระบบดิจิทัลความถี่สูงที่มีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบาและติดตั้งง่าย เพื่อใช้พกติดตัวกับผู้ปฏิบัติหน้าที่ภายในถ้ำเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มทำงานที่อยู่ในแต่ละโหนดด้วยระยะหวังผลระดับปานกลางไม่เกิน 50 เมตร จากแนวคิดในการใช้เทคโนโลยีลักษณะนี้จะทำให้อุปกรณ์สื่อสารต้นแบบสามารถใช้งานในย่านความถี่ UHF ได้ กำลังส่งต่ำไม่เกิน 1 วัตต์ ทำให้ขนาดของสายอากาศและตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัด ราคาไม่แพง สามารถผลิตเป็นจำนวนมากได้ แต่ละลูกข่ายใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำและสามารถออกแบบให้ทำงานด้วยระบบดิจิทัลได้ ทั้งนี้ได้มีผู้วิจัยจำนวนหนึ่ง

ได้ทำการวิจัยพัฒนาและนำเสนอบทความวิจัยด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวออกมาบ้างแล้ว จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาพัฒนาให้เหมาะสมกับบริบทและผู้ใช้งานในประเทศไทยต่อไป

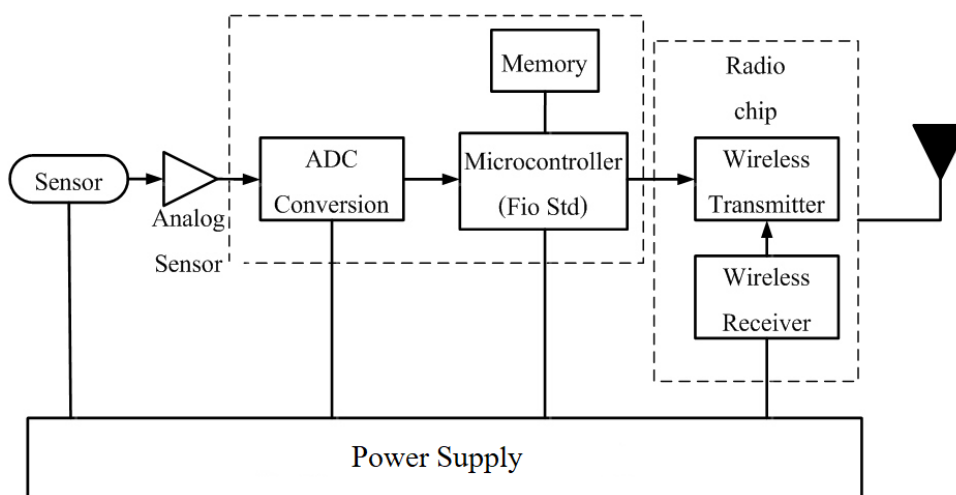
จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมในฐานข้อมูลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำหลักการพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านั้นนำมาปรับเปลี่ยนหรือต่อยอดให้ใช้ได้กับโครงการวิจัยนี้ ทำให้ได้กรอบความคิดในการออกแบบระบบเครื่องรับส่งวิทยุระบบดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารภายในถ้าที่สามารถจะออกแบบและสร้างได้จริงตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ในหัวข้อต่อไปผู้วิจัยจะนำเสนอทฤษฎีและหลักการพื้นฐานในเชิงวิศวกรรมโทรคมนาคมและระบบดิจิทัล เพื่อนำมาพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารทางเสียงในระบบดิจิทัลความถี่สูงให้กับโครงการวิจัยต่อไป

3. ทฤษฎี หลักการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอ ทฤษฎี หลักการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยจะได้กล่าวถึงระบบสมองกลฝังตัว เครื่องข่ายเช่นเซอร์ไร้สาย ดัชนีบ่งชี้ของความแรงของสัญญาณวิทยุที่ตัวรับสามารถรับได้ (Received Signal Strength Indicator; RSSI) และเทคโนโลยีที่ใช้ในการบีบอัดสัญญาณเสียงที่ใช้งานบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต

3.1 ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system)

ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) เปรียบเสมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) หรือคอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) ที่คนส่วนใหญ่รู้จักและใช้งานทุกวันนี้ แต่ระบบสมองกลฝังตัวจะเป็นการย่อเครื่องคอมพิวเตอร์ให้เล็กลงโดยเหลือเพียงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและมีขีดความสามารถน้อยกว่า วัตถุประสงค์หลักของการใช้งานระบบสมองกลฝังตัวคือ การใช้ควบคุมการทำงาน อุปกรณ์ที่ต้องการให้สามารถทำงานได้เองแบบอัตโนมัติเสมือนว่ามีสมองกลฝังตัวอยู่ภายใน ทั้งอุปกรณ์พื้นฐานในชีวิตประจำวัน เช่น หม้อหุงข้าว เครื่องซักผ้า ตู้เย็น (รุ่นอัจฉริยะ) โทรศัพท์มือถือ กล้องดิจิทัล โทรทัศน์ หรืออาจจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน เช่น ระบบควบคุมการจ่ายน้ำมันหรือก๊าซในรถยนต์ อากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น ในปัจจุบันพบว่าระบบสมองกลฝังตัวได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมต่าง ๆ เนื่องจากมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำระบบสมองกลฝังตัวมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและการส่งข้อมูลเสียงเพื่อการติดต่อสื่อสารให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านของการใช้งานแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในแต่ละช่องสัญญาณและการจัดการในด้านพลังงาน ระบบสมองกลฝังตัวในการประยุกต์ใช้ในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบสมองกลฝังตัวในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

3.2 เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network)

การสื่อสารผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks, WSN) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นขึ้นสำหรับการสื่อสารที่ใช้อัตราการส่งข้อมูลต่ำแต่สามารถสร้างเครือข่ายสื่อสารได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นเครือข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สาย (Wireless personal area network, WPAN) โดยมีแอปพลิเคชันรองรับจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ระบบเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ต้องการการเชื่อมต่อแบบไร้สายเพื่อลดความยุ่งยากในขั้นตอนการติดตั้ง ระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้าน ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายตรวจจับก๊าซพิษหรือของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบติดตามตรวจสอบรถบรรทุกภายในเหมืองแร่ ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ ระบบเฝ้าระวังการเกิดภัยพิบัติต่าง ๆ เช่น การเกิดน้ำท่วม ดินถล่มและไฟป่า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายยังมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งในด้านของอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล ความสามารถในการประมวลผลของหน่วยประมวลผลหลัก ขนาดของหน่วยความจำที่มีจำกัดและการจัดการในด้านพลังงาน ทั้งนี้เพื่อให้เครือข่ายดังกล่าวสามารถใช้งานได้ยาวนานที่สุด

อุปกรณ์ที่มีความจำเป็นและสำคัญต่อการพัฒนาโครงข่ายระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในย่านความถี่ 2.4 GHz ที่ใช้หลักการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย Raspberry Pi 3 Model B ซึ่งมีหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวในการควบคุมการสื่อสารด้วยเสียงที่ทำงานเปรียบเสมือนแม่ข่าย บอร์ดประมวลผลสัญญาณเสียง ReSpeaker 2-Mics Pi HAT เป็นบอร์ดประมวลผลสัญญาณเสียงที่มีอุปกรณ์ ADC และ DAC พร้อมวงจรขยายสัญญาณเสียงสำหรับการใช้งานกับไมโครโฟน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างโครงข่ายไร้สายประกอบด้วย อุปกรณ์โครงข่าย 4G Router TP-LINK ซึ่งเป็นอุปกรณ์เราเตอร์สำหรับใช้ในการสร้างโครงข่ายไร้สายในระบบ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังจะได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย Wireless-N USB Adapter หรือ Wi-Fi Receiver แบบ USB ที่มีสายอากาศขนาดเล็กสำหรับใช้กับ Raspberry Pi 3 Model B เพื่อการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไร้สายดังกล่าว

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

3.3 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC)

Analog to Digital Converter (ADC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อที่จะนำไปประมวลผล ซึ่งเป็นกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่สัญญาณแปรผันต่อเนื่อง ถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยที่ไม่มีการสูญเสียข้อมูล ลักษณะของข้อมูลอนาล็อกกับข้อมูลดิจิทัลจะมีความแตกต่างกัน คือข้อมูลอนาล็อกจะเป็นตัวเลขที่เป็นเลขยกกำลังของ 2 เช่น 2 4 8 16 เป็นต้น ส่วนลักษณะของข้อมูลดิจิทัลจะมีอยู่ 2 สถานะคือ 0 และ 1 เรียกว่า เลขไบนารี (Binary number) สำหรับฮาร์ดแวร์ของ Arduino Nano จะเป็น ADC ขนาด 10 บิต ซึ่งหมายความว่า สามารถตรวจสอบระดับสัญญาณแอนะล็อกได้ทั้งหมด $1024 (2^{10})$ ระดับ Arduino Nano ใช้เทคนิคการแปลง ADC โดยใช้เทคนิคการซาร์จตัวเก็บประจุ จากนั้นจับเวลาที่ตัวเก็บประจุคายประจุผ่านตัวต้านทาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบจำนวนของรอบนาฬิกาที่ตัวเก็บประจุคายประจุจนหมด จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจะถูกส่งกลับเมื่อ ADC เสร็จสมบูรณ์

Digital to Analog Converter (DAC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าที่ปกติมี 2 ระดับ (0,1) ให้เป็นสัญญาณที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่จำกัดสถานะหรือที่เรียกว่าสัญญาณ แอนะล็อก Arduino Nano ใช้เทคนิคการแปลง DAC โดยใช้ Pulse Width Modulation (PWM) เป็นเทคนิคที่จะทำการปรับสถานะของ (0,1) สลับกันไปมาด้วยคาบเวลาหนึ่ง ค่าที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสัญญาณในช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะจาก 1 เป็น 0

3.4 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Receive Signal Strength Indicator (RSSI) เป็นค่าที่ใช้บอกความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับ ในเทอมของพลังงาน มีหน่วยการวัดเป็น dBm (Decibels milliwatt) โดยค่า RSSI จะแปรผันตรงกับค่าความแรงของสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ RSSI เป็นดัชนีบ่งชี้ของความแรงของสัญญาณวิทยุที่ตัวรับสามารถรับได้ โดยค่าความแรงของสัญญาณมีหน่วยเป็น dBm ซึ่งอ้างอิงที่ระดับ Milliwatt ซึ่งค่า 1 Milliwatt จะมีค่าเท่ากับ 0 dBm สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$x = 10 \log_{10} \frac{P}{1mW} \quad (1)$$

$$P = 1 mW \times 10^{\frac{x}{10}} \quad (2)$$

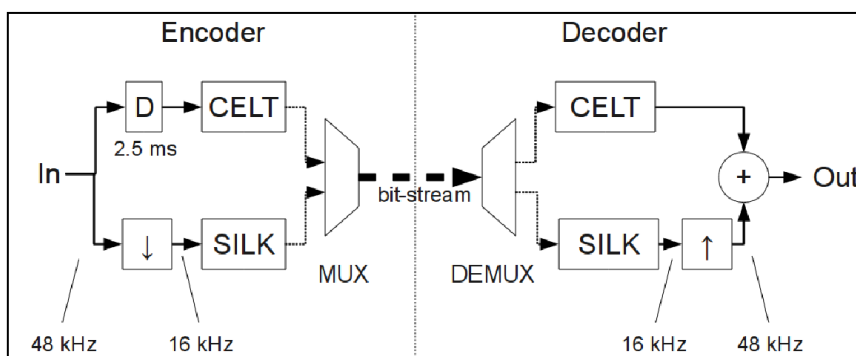
โดย x คือระดับ RSSI มีหน่วยเป็น dBm
 P คือกำลังงาน มีหน่วยเป็น Milliwatt

โดยส่วนใหญ่ระดับความแรงของสัญญาณวิทยุจะมีค่าต่ำกว่าศูนย์ซึ่งจะมีค่าเป็นลบ เช่น ระดับ -20 dBm ระดับ -70 dBm เป็นต้น

3.5 การสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย

การสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายหรือโครงข่ายอื่น ๆ ในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีการบีบอัดสัญญาณเสียงที่ออกแบบเฉพาะการใช้งานบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่เรียกว่า วอยซ์โอเวอร์ไอพี (Voice over IP; VoIP) หรือ วิโอไอพี ซึ่งทำงานได้บนอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล โดยสัญญาณเสียงจะถูกตัดแบ่งเป็นแพ็คเกจ (Package) ของข้อมูลทีวิ่งผ่านไปบนโครงข่ายที่ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลทั่วไปแทนการใช้วงจรเฉพาะตามวิธีการสื่อสารในระบบโทรศัพท์ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิม เปรียบได้กับการให้รถยนต์วิ่งแทรกกันได้ตามช่องว่างที่มีอยู่ของถนนแทนการให้รถยนต์คันเดียวจอดบนวงเวียนแบบผูกขาด ข้อดีของวอยซ์โอเวอร์ไอพีคือ สามารถใช้โครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถให้บริการการสื่อสารทางเสียงได้ในอัตราค่าบริการที่ถูกลงมาก ตัวอย่างของอัลกอริทึมและวิธีการในการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและการถอดรหัสสัญญาณเสียง (Coder decoder) หรือเรียกสั้นๆ ว่าโคเดค (Codec) เพื่อใช้กับการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย มีดังนี้

- Opus เป็นตัวแปลงสัญญาณหรือโคเดค (Codec) ที่ใช้สำหรับการพูดคุยด้วยเสียงและการส่งเพลงผ่านอินเทอร์เน็ต สามารถให้คุณภาพเสียงที่ดีเมื่อมีอัตราความผิดพลาดบิตเรตที่ต่ำ และยังมีความหน่วงเวลาที่ต่ำมาก ๆ โดยที่ Opus เป็นโคเดคที่มีการใช้ระหว่าง 2 โคเดค ได้แก่ CELT และ SILK องค์ประกอบของ Opus ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 Opus encoding and decoding process

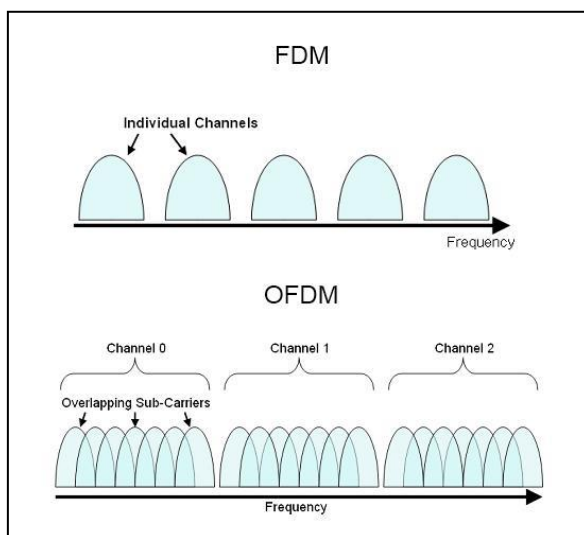
- CELT (Constrained Energy Lapped Transform) คือ รูปแบบการบีบอัดเสียงแบบยอมให้มีการสูญเสียได้ (Lossy compression) ซึ่งมีความหน่วงเวลาในการสื่อสารที่ต่ำ CELT เป็นโคเดคเอนกประสงค์แบบเต็มย่านความถี่ (Full band) โดยใช้การ Modified discrete cosine transform (MDCT) ที่ใช้สำหรับการพูดหรือดนตรีที่มีบิตเรต (Bit rate) ที่สูงสามารถปรับได้ตั้งแต่ 24 kbps (kilobit per second) ถึง 128 kbps สามารถปรับอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling rate) ได้ตั้งแต่ 32 kHz ถึง 48 kHz

- SILK คือ รูปแบบการบีบอัดเสียงที่พัฒนาโดย Skype Limited เพื่อใช้ในแอปพลิเคชัน Skype และถูกนำไปใช้ในมาตรฐานอินเทอร์เน็ต Opus โคเดค (Internet standard Opus codec) ซึ่ง SILK

สามารถใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างที่อัตรา 8 12 16 และ 24 kHz และสามารถใช้อัตราข้อมูลที่ความถี่ 6 kbps ถึง 40 kbps

3.6 Orthogonal frequency division multiplexing

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) ในระบบการส่งสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห์แบบดิจิทัลและมีการเข้ารหัสแบบดิจิทัลในความถี่หลาย ๆ คลื่นพาห์ย่อยเพื่อที่จะลดอัตราการใช้เวลาของแต่ละสัญลักษณ์ (Symbol clock rate) โดยที่ OFDM มีพื้นฐานมาจาก Frequency division multiplexing (FDM) ซึ่งสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณจะถูกส่งออกไปพร้อมกันแต่มีความถี่ที่ต่างกัน ซึ่งมักจะใช้ในการกระจายสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ ดังแสดงภาพสเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ 5 ในส่วนของ OFDM นั้นสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณจะถูกส่งออกไปในช่องของความถี่ที่เป็นอิสระต่อกันหลาย ๆ ช่อง ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วที่สูงและสามารถใช้ความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ FDM และ OFDM

3.7 บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B

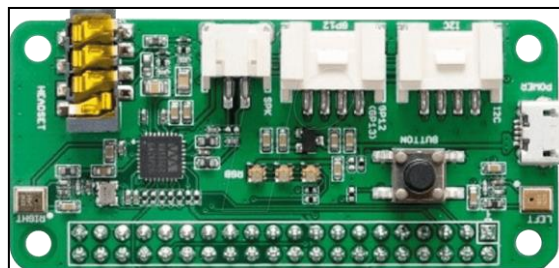
Raspberry Pi 3 Model B เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวที่ใช้ในการควบคุมการสื่อสารด้วยเสียงเปรียบเสมือนแม่ข่าย ซึ่งการสื่อสารสามารถสื่อสารได้ทั้งแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการเชื่อมต่อแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ขึ้นอยู่กับการใช้งาน Raspberry Pi 3 Model B ใช้ชิปประมวลผล BCM2837 มีความเร็วในการประมวลผล 1.2 GHz มีหน่วยความจำ RAM 1 GB และมีการติดตั้งโมดูลสื่อสารไร้สาย Bluetooth low energy (BLE) และ Wi-Fi 802.11n รวมไปถึงบอร์ดเดียวกัน บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B

3.8 บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT

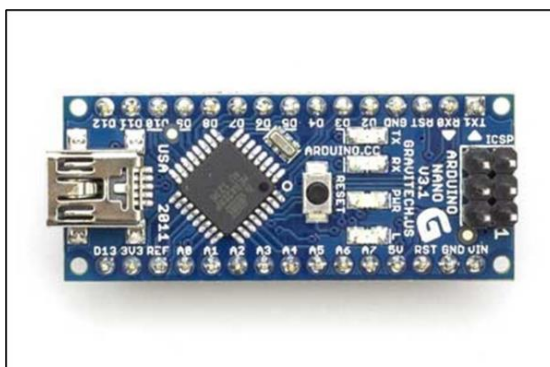
บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT เป็นบอร์ดขยายไมโครโฟนคู่ สำหรับ Raspberry pi ที่ออกแบบมาสำหรับแอปพลิเคชันด้านปัญญาประดิษฐ์และการเชื่อมต่อกับสัญญาณเสียง บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT ใช้ชิป WM8960 ทำหน้าที่เป็นโคเดกในการแปลงสัญญาณเสียงแบบสเตอริโอที่ใช้พลังงานต่ำ มีไมโครโฟนสองตัวทั้งสองด้านของบอร์ด และมีสวิตช์สำหรับใช้เป็นปุ่มกดจำนวน 1 ตำแหน่ง และยังมีเอาต์พุตสัญญาณเสียงแบบสเตอริโอขนาด 3.5 mm. หรือ JST 2.0 Speaker Out บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT

3.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano

Arduino Nano เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กที่ถูกลดขนาดให้เล็กลงจาก Arduino Uno บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano ใช้ชิปไอซีเบอร์ ATmega168 หรือเบอร์ ATmega328 และใช้โปรโตคอล UART ซึ่งมีพอร์ต Mini USB เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และมีพอร์ตดิจิทัล 14 พอร์ต โดยแยกเป็นพอร์ตที่สามารถใช้เป็นพอร์ต Pulse width modulation (PWM) และพอร์ตแอนะล็อก (Analog port) 8 พอร์ต ซึ่งบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวจะมีวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถจ่ายไฟเลี้ยงบอร์ดได้ตั้งแต่ 7V - 12V ที่พอร์ต VIN บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 บอร์ด Arduino Nano

3.10 โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

nRF24L01 เป็นโมดูลสำหรับการสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โมดูลมีขนาดเล็ก สะดวกต่อการใช้งาน โมดูลมีสายอากาศแบบรอบทิศทางมีอัตราขยาย 2.2 dBi โดยสามารถกำหนดอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลได้ 3 ค่าคือ 250 kbps, 1 Mbps และ 2 Mbps โมดูลใช้ชิป nRF24L01+m ทำงานด้วยความเร็วสูงแบบ High-speed SPI interface และใช้พลังงานต่ำ สามารถทำการสื่อสารได้ไกลมากกว่า 500 เมตรในที่โล่งแจ้ง และทำการสื่อสารได้ 100 เมตรภายในอาคาร รองรับการทำงานร่วมกับ Arduino Nano บอร์ดโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 แสดงในรูปที่ 9

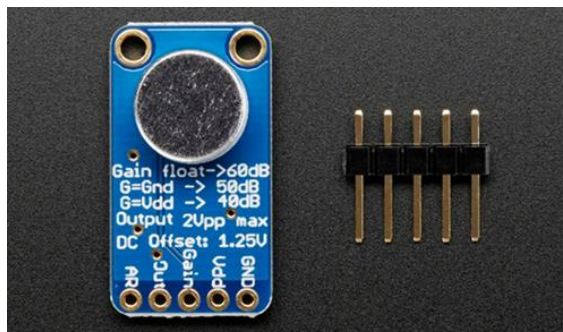


รูปที่ 9 บอร์ดโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

3.11 โมดูลไมโครโฟน

โมดูลไมโครโฟน (Microphone module) ชนิด MAX9814 สามารถรองรับเสียงในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 20 kHz และมีวงจรรขยายสัญญาณเสียงด้วยไอซี MAX9814 ซึ่งสามารถลดระดับของสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราขยายที่ 60 dB แต่สามารถปรับลดให้เหลือ 50 dB และ 40 dB ได้ด้วย

การเชื่อมต่อขาสัญญาณ Gain ของโมดูลเข้ากับขา Vcc และ Gnd ตามลำดับ โมดูลนี้สามารถให้แรงดันเอาต์พุตที่มีการขยายสัญญาณสูงสุดที่ 2 V p-p ที่ 1.25 VDC โมดูลไมโครโฟน MAX9814 แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 โมดูลไมโครโฟน MAX9814

3.12 อุปกรณ์เราเตอร์ 4G Router Wireless AC750 Dual Band

ผู้วิจัยประยุกต์ใช้ 4G Router Wireless AC750 Dual Band ยี่ห้อ TP-Link เป็นเราเตอร์ในโครงข่ายไร้สาย ซึ่งรองรับซิมการ์ด 4G LTE ความเร็วสูงสุดที่ 150 Mbps (Megabit per second) รองรับ 3G ความเร็วสูงสุดที่ 42 Mbps และรองรับมาตรฐาน Wi-Fi n/ac ความเร็วสูงสุด 733 Mbps โดยแบ่งเป็นรหัส n ความเร็ว 300 Mbps และรหัส ac ความเร็ว 433 Mbps และมีพอร์ตเชื่อมต่อ LAN จำนวน 4 ช่องแบบ 10/100 Mbps และในช่องที่ 1 สามารถเปลี่ยนเป็น WAN ได้ มีสายอากาศคู่สองย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz รองรับการทำงานผ่าน Wi-Fi พร้อมกันสูงสุด 64 ผู้ใช้งาน อุปกรณ์ 4G Router Wireless AC750 Dual Band แสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 อุปกรณ์ 4G Router Wireless AC750 Dual Band

3.13 โมดูลรับสัญญาณ Wi-Fi (Wireless-N USB Adapter)

โมดูล Wireless-N USB Adapter แสดงในรูปที่ 12 เป็นตัวรับสัญญาณ Wi-Fi ที่มีสายอากาศขนาดเล็กในย่านความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยาย 2 dB และเป็นสายอากาศรอบทิศทางสำหรับรับส่งสัญญาณรองรับมาตรฐาน IEEE802.11n/b/g CSMA/CA รองรับการทำงานที่ความปลอดภัยของ Wi-Fi แบบ WPA WPA2 WPA-PSK สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุด 300Mbps และใช้สำหรับเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi 3 Model B เพื่อให้สามารถรับสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายได้ไกลขึ้น



รูปที่ 12 โมดูลรับสัญญาณ Wireless-N USB Adapter

3.14 อุปกรณ์ TP-LINK's 2.4GHz 300Mbps 9dBi Outdoor CPE

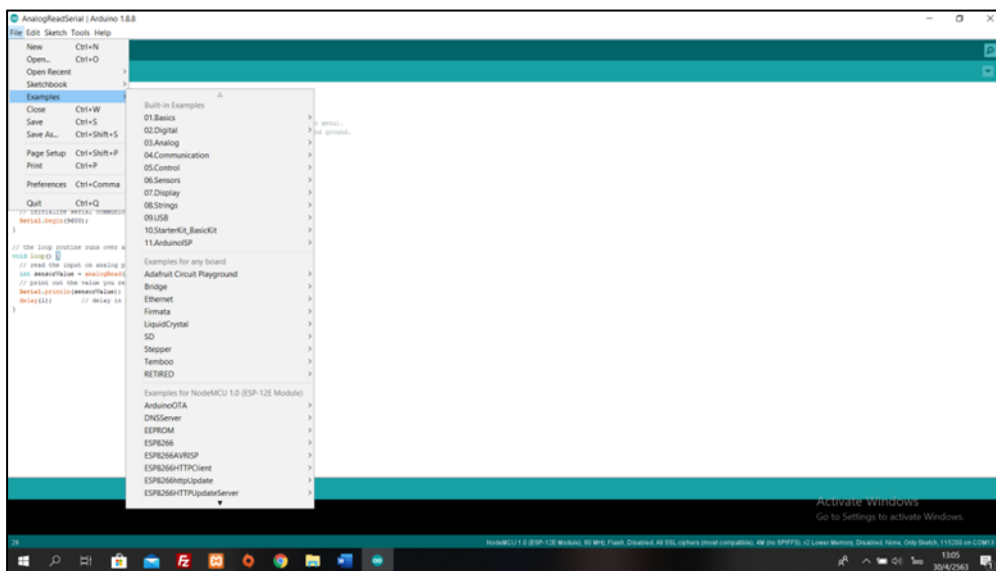
อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz 300 Mbps 9dBi Outdoor CPE เป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi ที่มีสายอากาศในย่านความถี่ 2.4 GHz ใช้สายอากาศแบบ 2 x 2 สามารถรับส่งได้ทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน สายอากาศดังกล่าวมีอัตราขยาย 9 dBi และมีกำลังส่งสูงสุดอยู่ที่ 27 dBm หรือ 500 mW ใช้เทคนิค Time division multiple access (TDMA) ในการจัดการข้อมูล รองรับการทำงานต่อโครงข่ายทั้งแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการเชื่อมต่อแบบหนึ่งจุด สู่หลายจุด มีระบบปฏิบัติการที่สามารถปรับตั้งค่าให้ทำงานเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Access point (AP) หรืออุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบต่างๆ สามารถส่งข้อมูลได้ไกลถึง 5 km ในการใช้งานกลางแจ้ง อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz แสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz

3.15 โปรแกรม Arduino IDE

Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับการเขียนและการพัฒนาโปรแกรมและอัปโหลดคำสั่งลงบอร์ด IDE (Integrated Development Environment) โดยใช้พื้นฐานภาษา C/C++ ในการเขียนโปรแกรม นอกจากนี้ Arduino IDE ยังมีระบบตัวช่วยต่าง ๆ ที่จะช่วยเหลือนักพัฒนาให้สามารถทำงานได้รวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น หน้าต่างของโปรแกรม Arduino IDE แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 โปรแกรม Arduino IDE

4. การทดสอบเบื้องต้นของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในย่านความถี่ 2.4 GHz ในฐานข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า การพัฒนาเทคนิคการสื่อสารด้วยเสียงดิจิทัลบนเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีความท้าทายสูงมาก เนื่องจากเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งในด้านของอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล ความสามารถในการประมวลผลของหน่วยประมวลผลหลัก ขนาดของหน่วยความจำที่มีจำกัดและแหล่งพลังงานที่ใช้ ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์เพื่อทำหน้าที่หลักในการสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สายจึงมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นการทดสอบความเป็นไปได้ของแนวทางการออกแบบในเบื้องต้น

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการรับส่งข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โอเพ่นซอร์สซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328P ขนาด 8 บิตมีสถาปัตยกรรมแบบ RISC และใช้กำลังงานต่ำ พัฒนาโดยบริษัท Microchip และ Arduino.cc ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno จะประกอบด้วยชุดคำสั่งสัญญาณอินพุตและชุดสัญญาณเอาต์พุตแบบแอนะล็อกและดิจิทัลที่สามารถใช้ในการเชื่อมต่อกับบอร์ดขยายและวงจรรอื่น ๆ สามารถพัฒนาโปรแกรม C/C++ ด้วยโปรแกรม Arduino IDE ผ่านสายสัญญาณแบบ USB โดยนำมาใช้เป็นบอร์ดควบคุมร่วมกับโมดูลสื่อสารในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือ nRF24L01 ซึ่งมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงเพียงพอต่อการส่งข้อมูลเสียงแม้จะมีระยะทางในการส่งข้อมูลไม่สูงมาก แต่เมื่อนำมาสร้างเครือข่ายที่ใช้โทโปโลยีที่เหมาะสมก็จะสามารถทำการสื่อสารให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการได้

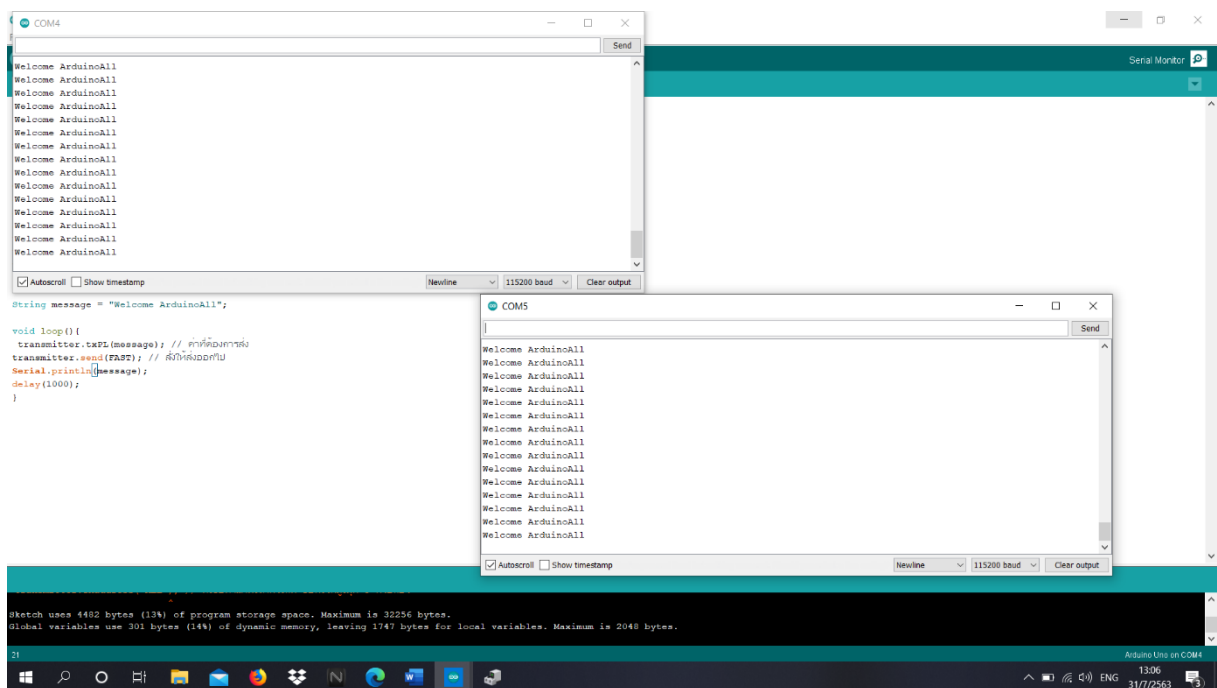
ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยต้องการทดสอบความเป็นไปได้ของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในเบื้องต้นว่าระบบสามารถทำการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้จริง ในขั้นตอนการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการจับคู่โมดูลสื่อสารไร้สายเพื่อทดสอบการส่งสัญญาณแบบไร้สายโดยใช้ข้อความสั้น ๆ โดยการนำบอร์ด Arduino UNO และโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 จำนวน 2 ชุด โดยกำหนดให้ชุดการทดสอบที่ 1 เป็นตัวส่งข้อมูลและให้ชุดการทดสอบที่ 2 เป็นตัวส่งข้อมูลและสลับกันรับส่งข้อมูลในระยะทางต่าง ๆ ดังมีแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 15 และมีผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งจากการทดสอบในเบื้องต้นพบว่า โมดูลสื่อสารไร้สายสามารถเชื่อมต่อและทำการรับส่งข้อมูลกันได้สำเร็จโดยระยะห่างที่มากที่สุดในการทดสอบคือ 110 เมตรโดยใช้สายอากาศไดโพลแบบเดิมที่มาพร้อมกับชุดทดสอบ อย่างไรก็ตามเราสามารถขยายระยะทางของการสื่อสารไร้สายดังกล่าวนี้ให้มากขึ้นได้ด้วยการใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายที่สูงขึ้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 15 บอร์ด Arduino UNO และโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 (ก) ตัวส่งและ (ข) ตัวรับ



รูปที่ 16 การรับส่งข้อมูลด้วยบอร์ด Arduino UNO และโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

5. การออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

จากผลการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่ได้รายงานไปใน Inception report หัวข้อที่ 5 พบว่า ที่ความถี่ 1,000 MHz, 2,325 MHz และ 3,000 MHz (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกหน่วยความถี่เป็น GHz) สามารถเดินทางไปในโพรงถ้ำในแนวระดับสายตา (LOS) ได้ดีกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า ในขณะที่ถูกนำไปใช้ภายนอกถ้ำซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นอากาศว่าง (Free space) ความถี่สูงกลุ่มนี้จะมีค่าการสูญเสียในอากาศว่างสูงกว่าคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า แต่ผลจากการวัดทดสอบที่ความถี่เดียวกันนี้ด้วยการส่งและรับคลื่นที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS) กลับพบว่ามียุทธศาสตร์การสูญเสียจากการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรสูงกว่าความถี่ต่ำทั้งภายในถ้ำหินปูนและหินทราย ส่งผลให้ค่ากำลังของคลื่นความถี่นี้มีค่าลดลงมากในบริเวณที่มีการส่งผ่านคลื่นแบบ NLOS และไม่สามารถเดินทางต่อไปได้ในบริเวณถัดไปที่เป็นแบบ LOS ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายวิทยุสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำในระบบดิจิทัลจึงเหมาะที่จะเลือกใช้ความถี่ในกลุ่มนี้ เนื่องจากสามารถติดตั้งโหนดหลักที่เป็นแม่ข่ายไว้ ณ ตำแหน่งที่เป็น NLOS หรือบริเวณที่เป็น L-bend ซึ่งคลื่นความถี่กลุ่มดังกล่าวมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านค่อนข้างสูงกว่าความถี่ต่ำได้ และในปัจจุบันมีอุปกรณ์ที่เป็นโมดูลสื่อสารต่างๆ ที่ความถี่กลุ่มนี้ (โดยเฉพาะที่ความถี่ 2.4 GHz และ 3.5 GHz) ผลิตออกมาจำหน่ายเป็นจำนวนมากและมีหลายระดับคุณภาพให้เลือกนำมาประยุกต์ใช้งานได้โดยง่าย ทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกที่จะออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องส่งวิทยุความถี่สูงระบบดิจิทัลที่ความถี่ 2.4 GHz ในขั้นต้นเพื่อนำไปทดสอบและรายงานความก้าวหน้าผลงานงวดที่ 2 ต่อไป

คณะผู้วิจัย ได้วางแผนทางการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการสื่อสารไร้สายสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยเสียงไว้ 2 แนวทางด้วยกัน ดังนี้

1) การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ร่วมกับระบบสมองกลฝังตัว Arduino Nano แนวทางนี้ใช้โมดูลสื่อสารสำเร็จรูป nRF24L01 โดยที่โมดูลสื่อสารดังกล่าวมีราคาค่อนข้างถูก ได้มาตรฐาน ZigBee/IEEE 802.15.4 ทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการจัดการทรัพยากรของระบบเครื่องลูกข่ายในระบบจะต้องมีไมโครโฟนและหูฟัง รวมถึงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) สำหรับเปลี่ยนสัญญาณให้สามารถสื่อสารผ่านเครือข่ายและรับฟังเสียงได้

2) การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11g, 802.11n, 802.11 ac โดยใช้อุปกรณ์เครือข่าย Wi-Fi ที่ได้มาตรฐานในการสร้างเครือข่ายสื่อสารดังกล่าว เครื่องลูกข่าย (Client) จะถูกทำการบริหารจัดการผ่านเครื่องแม่ข่าย (Server) สามารถเพิ่มจำนวนลูกข่ายสื่อสารด้วยเสียงได้มากกว่า 256 ตัว ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เครื่องลูกข่าย 2 แบบคือ ใช้เครื่องโทรศัพท์มือถือที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Android และเครื่องลูกข่ายที่ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi ซึ่งทั้งสองแบบไม่ต้องการการเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) แต่อย่างใด ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบและผลการทดสอบจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

5.1 การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

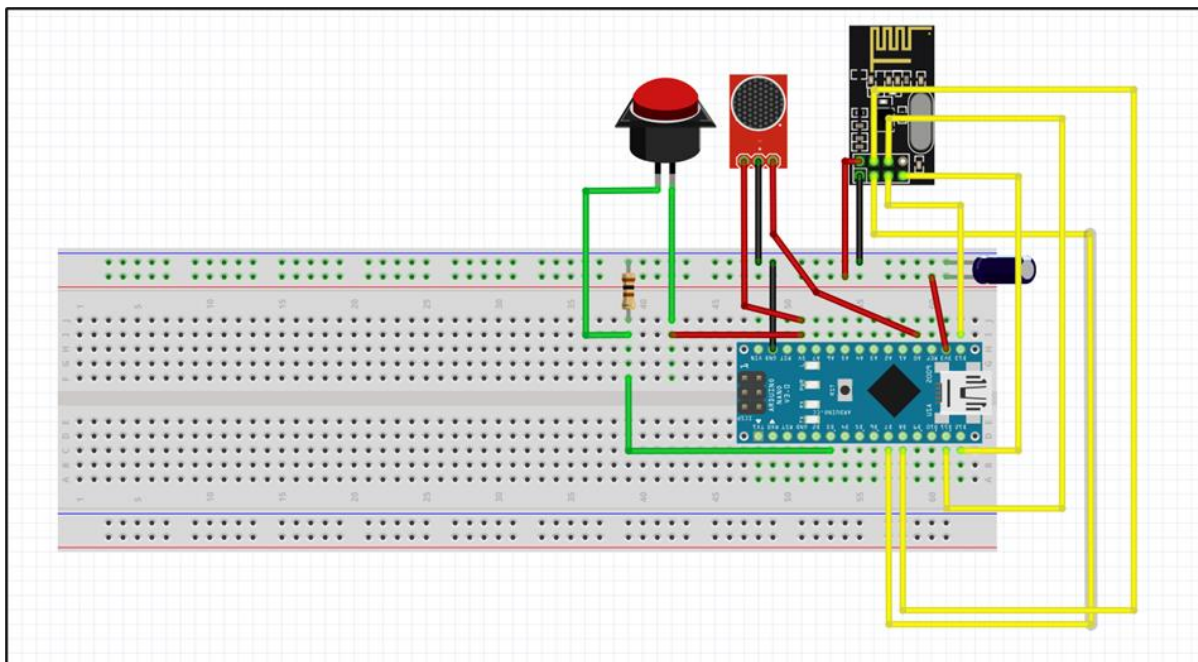
ในการเชื่อมต่อและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์โครงข่ายแบบไร้สายมีหลากหลายเทคโนโลยี ซึ่งแต่ละแบบจะมีมาตรฐานและคุณลักษณะที่แตกต่างกัน โดยแบ่งตามระยะรัศมีของโครงข่าย (Range) และความเร็วของการรับส่งข้อมูล (Throughput) ดังนี้ เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network, WLAN) เป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบไร้สายในรัศมีระยะสั้นประมาณ 100 เมตรภายในอาคาร ตามมาตรฐาน IEEE802.11 เทคโนโลยีที่เป็น WLAN ได้แก่ บลูทูธ (Bluetooth) ซิกบี (ZigBee) และอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) เป็นต้น ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอ การออกแบบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายโดยใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz และนิยมใช้งานในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

การทำงานของระบบการสื่อสารข้อมูลเสียง ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ วงจรส่งข้อมูลเสียงและวงจรรับข้อมูลเสียง โดยจะทำการส่งข้อมูลเสียงผ่านวงจรส่งข้อมูลเสียงแบบไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ไปยังวงจรรับข้อมูลเพื่อทดสอบการได้ยินของเสียงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบริเวณชั้น 3 ของอาคารสิรินธรวิศวกรรม (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดดังนี้

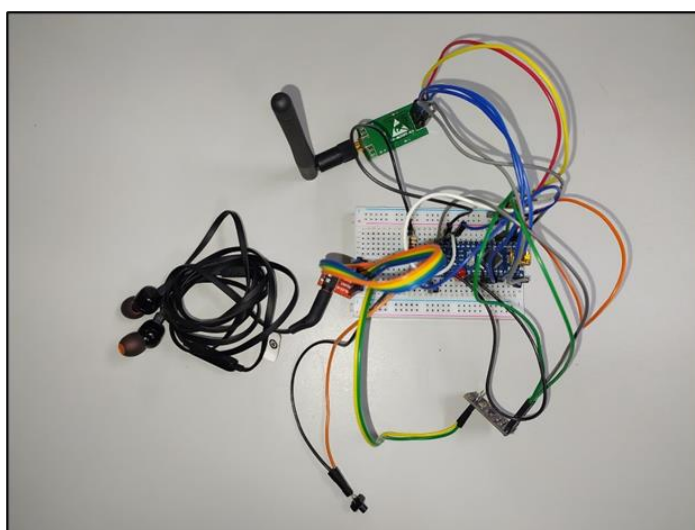
5.1.1 วงจรส่งข้อมูลเสียงที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

วงจรนี้ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano โมดูลไมโครโฟน และโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ดังแสดงแผนภาพวงจรดังกล่าวในรูปที่ 17 โดยวงจรนี้จะมีการใช้งานร่วมกับไมโครโฟนและชุดหูฟัง เพื่อใช้ในการรับสัญญาณเสียงจากผู้ทดสอบใช้งาน จึงจำเป็นต้องทดสอบการทำงานของไมโครโฟนดังกล่าวก่อนการใช้งานจริง ผู้วิจัยได้นำไมโครโฟนมาเชื่อมต่อกับเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อวิเคราะห์รูปสัญญาณ ความถี่ของเสียงพูดและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไมโครโฟนจากหูฟังมาเชื่อมต่อกับ Jack Breakout 3.5 mm. จากนั้นเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณและสายกราวด์กับโมดูลไมโครโฟนสุดท้ายทำการต่อวงจรส่งข้อมูลเสียงดังแสดงในรูปที่ 18

หลักการการทำงาน เมื่อกดสวิตช์เพื่อเริ่มการทำงานของวงจรส่งข้อมูลเสียง ไมโครโฟนจากหูฟังจะรับสัญญาณเสียงจากผู้วิจัย จากนั้นโมดูลไมโครโฟนจะทำการปรับปรุงคุณภาพเสียงก่อนที่จะส่งสัญญาณเสียงไปยัง Arduino Nano เพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ต่อมาจึงส่งสัญญาณไปที่ nRF24L01 เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สายไปยังวงจรรับข้อมูลเสียง



รูปที่ 17 แผนภาพวงจรส่งข้อมูลเสียง

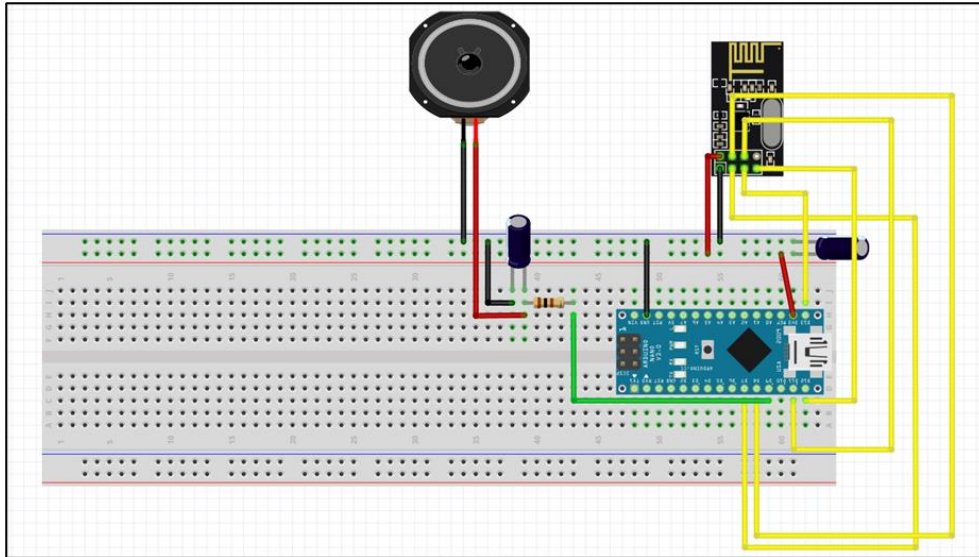


รูปที่ 18 การเชื่อมต่อวงจรส่งข้อมูลเสียง

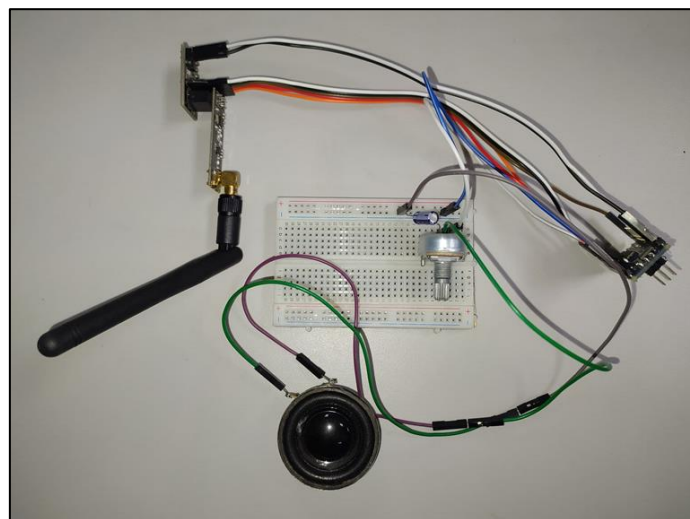
5.1.2 วงจรรับข้อมูลเสียงที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

วงจรนี้ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano ลำโพง และโมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ซึ่งผู้วิจัยได้เชื่อมต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) โดยใช้ตัวเก็บประจุ 0.1 uF และตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ซึ่งทำหน้าที่กรองความถี่จาก Arduino Nano ก่อนที่ข้อมูลจะส่งออกไปที่ลำโพง เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน โดยได้กำหนดค่าความถี่ตัดขาด (Cut-off frequency) ไว้ที่ความถี่ประมาณ 1.5 kHz ซึ่งแสดงแผนภาพวงจรดังในรูปที่ 19

การทำงานของวงจรรับข้อมูลเสียง Arduino Nano ได้ถูกเขียนโปรแกรมให้รอรับข้อมูลจากวงจรส่งข้อมูลเสียงตลอดเวลา เมื่อวงจรได้รับข้อมูลเสียงจากโมดูล nRF24L01 แล้ว Arduino Nano จะทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC) ผ่านพอร์ต PWM (Pulse Width Modulation) สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จะถูกกรองด้วยตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่านและส่งออกไปที่ลำโพง ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 แผนภาพวงจรรับข้อมูลเสียง

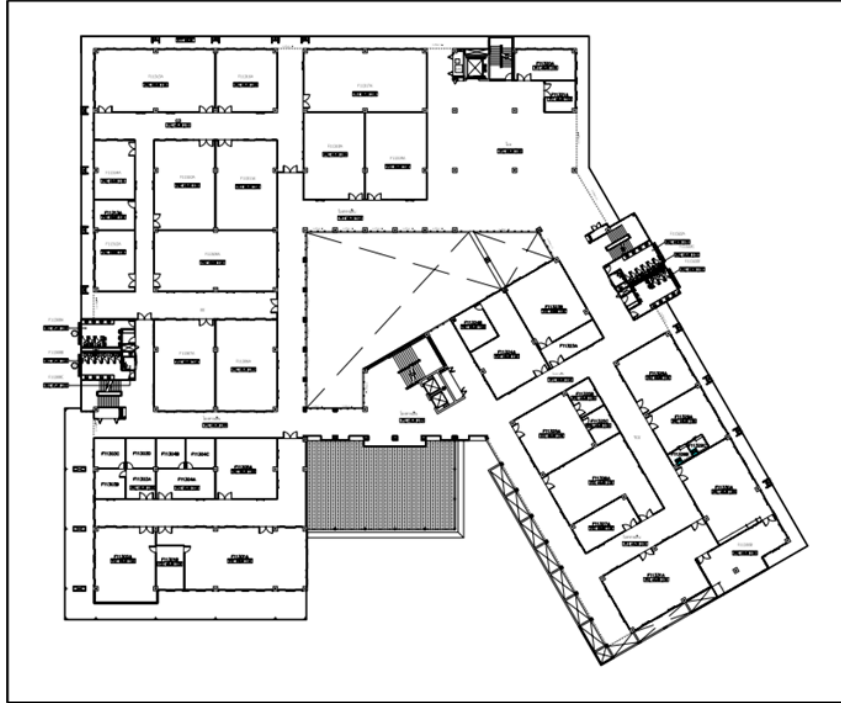


รูปที่ 20 การเชื่อมต่อวงจรรับข้อมูลเสียง

5.1.3 แผนการทดสอบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายในการรับส่งข้อมูลเสียงภายในอาคารสิรินธร วิศวกรรม (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีแผนผังอาคารดังแสดงในรูปที่ 21 และด้านบนของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 22 โดยนำวงจรส่งข้อมูลเสียงไปวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นส่งสัญญาณเสียงผ่านไมโครโฟน ของวงจรส่งข้อมูลเสียง แล้ววัดระดับเสียงที่สามารถได้ยินจากวงจรรับข้อมูลเสียง ทำการบันทึกผลระดับการได้ โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

ยินเสียง ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้ต่อวงจรรับข้อมูลจำนวน 5 วงจร จากนั้นเชื่อมต่อวงจรรับข้อมูลกับวงจรส่งข้อมูลเสียง 1 วงจรก่อนเพื่อฟังเสียงที่รับได้ และเพิ่มการเชื่อมต่อของวงจรรับข้อมูลเสียงครั้งละ 1 วงจร จนกระทั่งมีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายครบทั้ง 5 วงจร ซึ่งเสมือนกับว่ามีผู้ใช้งานจำนวน 5 คน



รูปที่ 21 รูปแผนผังภายใน F11 ชั้นที่ 3



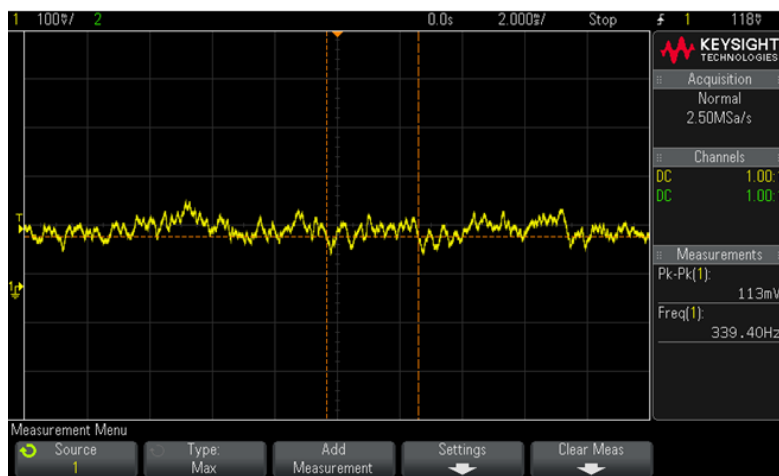
รูปที่ 22 รูปจากด้านบนของอาคาร F11

5.1.4 ผลการทดสอบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายที่ใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

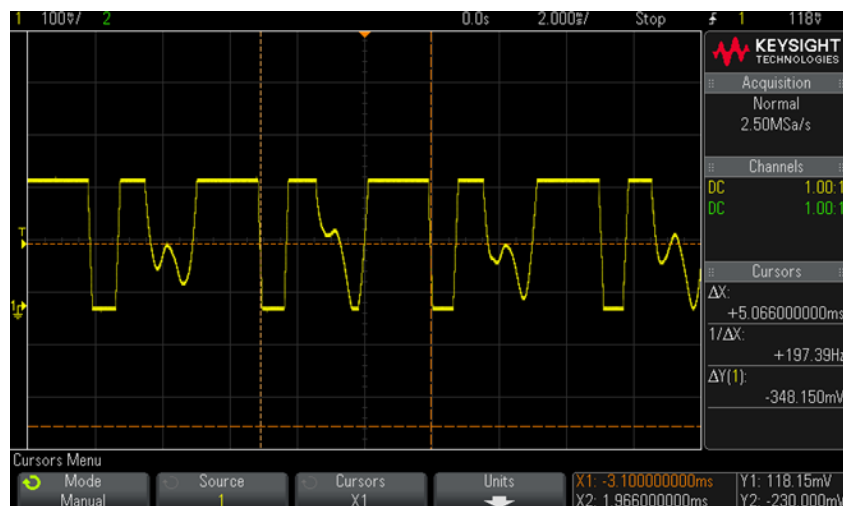
1) ผลการทดสอบวงจรส่งข้อมูลเสียง

ในวงจรส่งข้อมูลเสียงผู้วิจัยได้นำเครื่องออสซิลโลสโคปมาเชื่อมต่อกับขาเอาต์พุตของไมโครโฟน เพื่อดูรูปสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับก่อนที่จะส่งสัญญาณข้อมูลเสียงไปยังวงจรรับข้อมูลเสียง ในขั้นตอนแรกผู้วิจัยทำการวัดสัญญาณเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงในขณะที่ยังไม่ได้พูด โดยจะเห็นได้ว่าไมโครโฟนสามารถรับเสียงจากรอบข้างได้พอสมควร จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมได้ดังแสดงในรูปที่ 23

ในขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยได้ทำการพูดคำว่า “ฮัลโหล” แล้วดูรูปสัญญาณจากเครื่องออสซิลโลสโคป จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณเสียงที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณต่อเนื่องและในหนึ่งลูกคลื่นมีความถี่ 197.39 Hz ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 23 รูปสัญญาณในขณะที่ยังไม่พูด



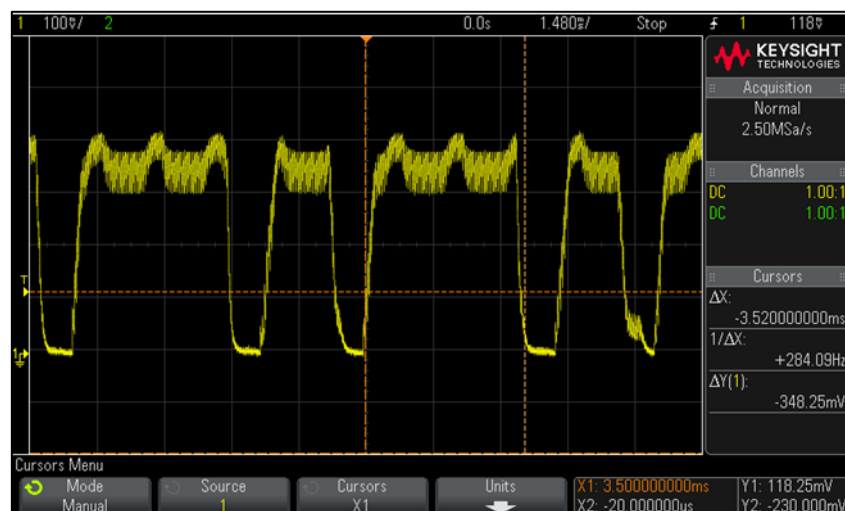
รูปที่ 24 รูปสัญญาณเสียงขณะพูด

2) ผลการทดสอบวงจรรับข้อมูลเสียง

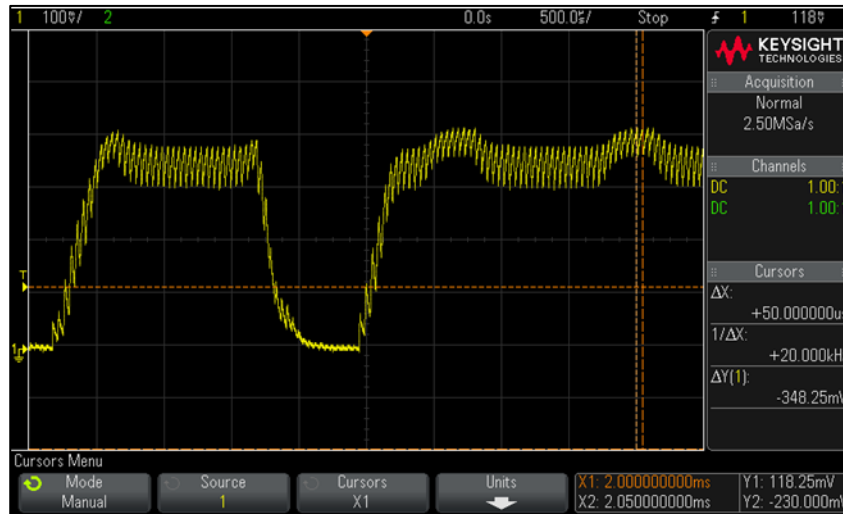
ในการรับข้อมูลเสียง ผู้วิจัยได้นำเครื่องออสซิลโลสโคปเข้าไปแทนที่ลำโพงของวงจรรับข้อมูลเสียง เพื่อทำการดูค่าสัญญาณเสียงที่ได้รับมาจากวงจรส่งข้อมูลเสียง โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะสัญญาณเสียงที่รับได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ แต่มีลักษณะของเส้นกราฟที่ใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งมีสาเหตุมาจาก การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของพอร์ต PWM ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการพูดคำว่า “ฮัลโหล” แล้วดูรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียงมีลักษณะแตกต่างจากรูปที่ 24 ซึ่งเป็นรูปสัญญาณต้นฉบับแต่มีความถี่ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการขยายรูปสัญญาณ จะเห็นได้ว่ามีความถี่สูงอยู่บนสัญญาณเสียง ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากพอร์ต PWM ดังแสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 25 รูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียงในขณะที่ยังไม่พูด



รูปที่ 26 รูปสัญญาณเสียงที่รับได้ขณะพูด



รูปที่ 27 รูปการขยายขนาดรูปสัญญาณเสียงที่ได้รับจากวงจรส่งข้อมูลเสียง

3) ผลการทดสอบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายในอาคาร

หัวข้อนี้จะนำเสนอ ผลการทดสอบวงจรเครื่องวิทยุสื่อสารไร้สายในการรับส่งข้อมูลเสียงภายในอาคารสิรินธรวิศวะพัฒนา (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตามแผนผังของอาคารดังแสดงในรูปที่ 21 โดยในการทดสอบสัญญาณผู้วิจัยได้มีการกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling rate) ไว้ที่ 2.4 kHz และกำหนดอัตราการส่งข้อมูล (Bit rate) ไว้ที่ 1 Mbps เพื่อคุณภาพของเสียงที่ดี รวมถึงการกำหนดระดับการได้ยินเสียงเป็นสัญลักษณ์สีและตัวเลขดังตารางที่ 2 โดยในการวัดระดับการได้ยินเสียงภายในอาคาร ผู้วิจัยได้ทำการเดินวัดสัญญาณตามระยะทางของ 4 เส้นทาง โดยจะหยุดฟังเสียงทุก ๆ 5 เมตร ซึ่งมีระดับการได้ยินเสียงดังแสดงในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 6

ตารางที่ 2 กำหนดระดับการได้ยินเสียง

ระดับการได้ยินเสียง	ตัวเลข	สี
ไม่ได้ยิน	0	●
พอใช้	1	●
ดี	2	●
ดีมาก	3	●
กำหนดจุดเริ่มต้นเป็นสัญลักษณ์		◆

ตารางที่ 3 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 1

ระยะทาง	ระดับการได้ยินเสียง			
	0	1	2	3
5				●
10				●
15				●
20				●
25				●
30				●
31				
40			●	
45			●	
50			●	
55			●	
60		●		
65		●		
70		●		
75		●		
80		●		



รูปที่ 28 การวัดระยะทางเส้นทางที่ 1

ตารางที่ 4 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 2

ระยะทาง	ระดับการได้ยินเสียง			
	0	1	2	3
5				●
10				●
15				●
20			●	
25		●		
30		●		
35		●		
40		●		
45	●			
50	●			



รูปที่ 29 การวัดระยะทางเส้นทางที่ 2

ตารางที่ 5 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 3

ระยะทาง	ระดับการได้ยินเสียง			
	0	1	2	3
5				●
10				●
15				●
20				●
25			●	
30			●	
35		●		
40		●		
45	●			
50	●			
55	●			
60	●			
65		●		
70			●	



รูปที่ 30 การวัดระยะทางเส้นทางที่ 3

ตารางที่ 6 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 4

ระยะทาง	ระดับการได้ยินเสียง			
	0	1	2	3
5				●
10				●
15				●
20				●
25				●
30				●
35				●
40			●	
45			●	
50			●	
55			●	
60		●		
65		●		
70	●			
75	●			



รูปที่ 31 การวัดระยะทางเส้นทางที่ 4

เมื่อนำผลการทดสอบการวัดระดับการได้ยินเสียงทั้ง 4 เส้นทางมาประกอบกัน จะเห็นได้ว่าเสียงจะเริ่มขาดหายที่ระยะทางประมาณ 40 เมตร ในเส้นทางที่ตรงและยาวที่สุดคือเส้นทางที่ 1 แต่เสียงก็ยังสามารรถได้ยินอยู่บ้างที่ระยะทางประมาณ 80 เมตร และเสียงจะขาดหายไปเมื่อเดินไปที่มุมตึกที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่บังอยู่ดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 ระดับการได้ยินเสียงในเส้นทางทั้งหมด

สำหรับผลการทดสอบจำนวนการเชื่อมต่อของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลเสียงในหนึ่งเครือข่ายพบว่า เมื่อทำการทดสอบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์รับส่งข้อมูลพบว่า วงจรส่งข้อมูล 1 วงจรสามารถส่งข้อมูลเสียงไปยังวงจรรับข้อมูลเสียงได้ครบทั้ง 5 วงจร แต่ระดับคุณภาพของเสียงจะลดน้อยลงเมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลจากวงจรส่งข้อมูล 1 วงจรและมีวงจรรับข้อมูล 1 วงจร

4) สรุปผลการทดลอง

ในการสังเกตรูปสัญญาณเสียงด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปพบว่า รูปสัญญาณเสียงไม่มีสัญญาณรบกวนจากวงจรเลย แต่เมื่อใช้ไมโครโฟนพบว่าสามารถรับสัญญาณเสียงรอบข้างได้ดี แต่อาจทำให้สัญญาณเสียงรอบข้างเหล่านั้นเป็นสัญญาณเสียงรบกวนได้ และเมื่อทำการส่งข้อมูลเสียงไปยังวงจรรับข้อมูลเสียงพบว่าสัญญาณเสียงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากในการประมวลผลบนบอร์ด Arduino Nano มีการขยายสัญญาณเสียงและวงจร PWM ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนตลอดเวลาแต่ก็ยังสามารรถได้ยินเสียงพูดและเข้าใจข้อความจากเสียงพูดได้ และเมื่อทำการวัดระดับการได้ยินตามเส้นทางต่าง ๆ พบว่าสามารรถได้ยินเสียงพูดชัดเจนที่ระยะไม่เกิน 40 เมตร เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นมากกว่า 40 เมตร ก็ยังสามารถได้ยินเสียงพูดอยู่แต่

เสียงพูดจะขาดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ในเส้นทางที่เป็นทางตรงและไม่มีวัตถุที่ขนาดใหญ่มาบังเส้นทางการสื่อสาร แต่ถ้าเป็นเส้นทางที่มีการเลี้ยวเบนตรงมุมตึกหรือมีวัตถุขนาดใหญ่มาบังเส้นทางการสื่อสารก็จะทำให้เสียงที่ได้ยินมีลักษณะขาดหายเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ จนบางครั้งก็ไม่สามารถได้ยินเสียงเลย แสดงว่าคลื่นความถี่ในย่านความถี่ 2.4 GHz ไม่สามารถเลี้ยวเบนได้มากนัก เนื่องจากเป็นความถี่สูงและความยาวคลื่นเพียงแค่ 0.125 เมตร จึงทำให้คลื่นไปได้ไม่ไกลมาก ส่วนในการทดลองสร้างเครือข่ายให้มีลูกข่ายเป็นเครื่องรับพบว่า สามารถสร้างเครือข่ายการเชื่อมต่อได้ทั้งหมด 6 วงจร โดยมีวงจรส่งข้อมูลเสียง 1 วงจร และมีวงจรรับข้อมูลเสียง 5 วงจร

5.2 การออกแบบวงจรเครือข่ายสื่อสารไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ การออกแบบวงจรเครือข่ายสื่อสารไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเสียงบนอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล (Voice over Internet Protocol) หรือวอยซ์โอเวอร์ไอพี (VoIP) ซึ่งเป็นการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายหรือโครงข่ายอื่น ๆ ที่ใช้อินเทอร์เน็ตโพรโทคอล ซึ่งสัญญาณเสียงจะถูกตัดแบ่งเป็นแพ็คเกจ (Package) วิ่งผ่านไปในโครงข่ายที่ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลทั่วไป แทนการใช้วงจรเฉพาะตามวิธีการสื่อสารในระบบโทรศัพท์แบบดั้งเดิม เปรียบได้กับการให้รถยนต์วิ่งแทรกกันได้ตามช่องว่างที่มีอยู่ของถนน แทนการให้รถยนต์คันเดียวจอดถนนวิงแบบผูกขาด ข้อดีของวอยซ์โอเวอร์ไอพีคือสามารถใช้โครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถให้บริการได้ในอัตราค่าบริการที่ถูกลงมาก ในการจัดการลูกข่ายสื่อสารทางเสียงผู้วิจัยประยุกต์ใช้ระบบ PABX (Private Automatic Branch Exchange) สมาร์ทโฟน (Smart phone) โปรแกรมและแอปพลิเคชัน (Application) ต่าง ๆ ในการสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สาย เช่น โปรแกรม Asterisk โปรแกรม PuTTY แอปพลิเคชัน PortSIP UC App for Android และแอปพลิเคชัน Zoiper App for Android โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ระบบ PABX (Private Automatic Branch Exchange)

PABX (Private Automatic Branch Exchange) คือ ระบบชุมสายโทรศัพท์สำนักงาน อัตโนมัติทำหน้าที่เชื่อมต่อ (Switch) ระหว่างองค์การโทรศัพท์กับโทรศัพท์ภายในอาคารแบบ Digital ISDN Trunk (Direct Inverse Dialing, DID) เป็นระบบโทรศัพท์ดิจิทัลอัตโนมัติ สำหรับใช้สายภายในสำนักงานด้วยเลขหมาย 4 หลัก และสามารถรับสายเรียกเข้าแบบต่อเข้าโดยตรงที่ไม่ต้องผ่านพนักงานรับสาย (Operator)

ตู้สาขาโทรศัพท์ PABX ปัจจุบัน แบ่งเป็น Analog PABX และ IPPBX (IPPABX) โดยในตลาดมีอยู่หลากหลายยี่ห้อทั้งจากผู้ผลิตในไทยและนำเข้าจากต่างประเทศ แต่เนื่องจากเทคโนโลยีของ Analog PABX ได้พัฒนามาถึงจุดอิ่มตัวแล้ว จึงทำให้ฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ของ PABX ในแต่ละยี่ห้อไม่แตกต่างกันมากนัก ต่างจาก IPPBX ซึ่งเป็นระบบที่ใช้การสื่อสารผ่านระบบ IP ทำให้ยังสามารถต่อยอดฟังก์ชันต่าง ๆ เพิ่มเติมได้อีกมาก

2) สมาร์ทโฟน (Smart phone)

ในการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ผู้วิจัยได้ทดลองนำโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ตโฟน (Smartphone) มาใช้ทำหน้าที่เป็นเครื่องลูกข่าย (Client) เหมือนกับ Raspberry pi 4 model B ซึ่งในการทดสอบของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้เครื่องลูกข่ายทั้งสอง

แบบคือ Samsung Galaxy A11 กับ Raspberry pi 4 model B เพื่อเปรียบเทียบว่า Raspberry pi 4 model B มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการสื่อสารทางเสียงเทียบเท่ากับ Samsung Galaxy A11 หรือไม่



รูปที่ 33 เครื่องลูกข่ายผู้ใช้งานแบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

3) โปรแกรม Asterisk

โปรแกรม Asterisk เป็น Open source software ที่ทำหน้าที่หลักเป็น Softswitch, IP-PBX หรือที่เรียกว่าตู้ชุมสายโทรศัพท์ระบบ IP ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมและจัดการบริหาร การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์โทรศัพท์ผ่านเครื่องข่าย อีกทั้งยังสามารถเพิ่มเติมประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานได้โดยง่าย ซึ่ง Asterisk สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

(1) อุปกรณ์สลับสายโทรศัพท์ (Switch) ตู้ชุมสาย

Asterisk สามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สลับสายโทรศัพท์ไม่ว่าจะเป็นระบบ IP หรือ Hybrid สามารถทำการตั้งค่าเส้นทางของการโทรศัพท์โดยตัวเอง สามารถเพิ่มเติมความสามารถต่าง ๆ ได้เช่นระบบ Voice Mail (IVR) รองรับการเชื่อมต่อกับระบบโทรศัพท์พื้นฐานไม่ว่าจะเป็นแบบ Analog หรือ Digital (ISDN)

(2) Gateway

สามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างระบบโทรศัพท์พื้นฐานกับระบบ VoIP เช่นการติดตั้งการ์ดบน Asterisk และตั้งค่าให้ทำงานเป็น Gateway เชื่อมระบบ SIP เข้ากับ ระบบ TDM (PSTN)

(3) Feature & Media Server

โปรแกรม Asterisk สามารถทำเป็นระบบตอบรับหรือระบบการประชุมทางโทรศัพท์ เพื่อให้ทำงานเข้ากับระบบโทรศัพท์ที่มีอยู่เดิมได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น

- สามารถทำเป็น IVR หรือระบบตอบรับ ให้กับตู้ชุมสาย (PABX) เดิมที่ไม่มีระบบตอบรับ
- เชื่อมเข้ากับระบบ Database เพื่อให้ Asterisk ทำหน้าที่เหมือนเป็น Operator ในการรับสายและตอบคำถามตามที่ลูกค้าต้องการโดยอัตโนมัติ
- ทำเป็น Voice Conference server เพื่อรับการประชุมทางเสียงจากหลาย ๆ จุด
- ระบบ Voice Recognition ทำงานร่วมกับ Software ภายนอกเพื่อทำให้ Asterisk สามารถที่จะตอบโต้กับผู้ใช้งานทางเสียงโดยอัตโนมัติ

- Paging server ทำงานเป็นอุปกรณ์ควบคุมระบบกระจายเสียง (PA system)

(1) Call Center

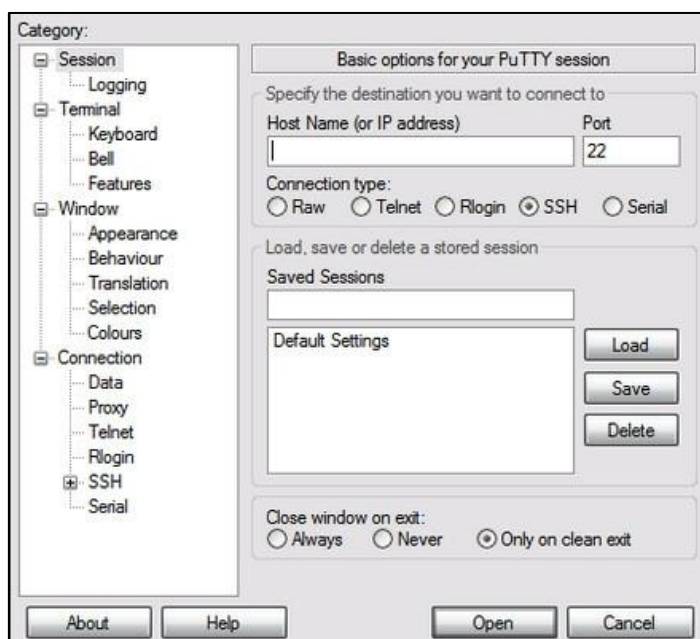
รองรับการทำงานของระบบ Call-Center อย่างเต็มรูปแบบ เช่น ACD, Queue, IVR, Skill-based routing เป็นต้น

(2) Media Conversion

รองรับการทำงานในการแปลงข้อมูลเสียงจาก Codec ไปเป็นอีก Codec ในกรณีนี้ Asterisk จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแปลงข้อมูลเสียง

4) โปรแกรม PuTTY

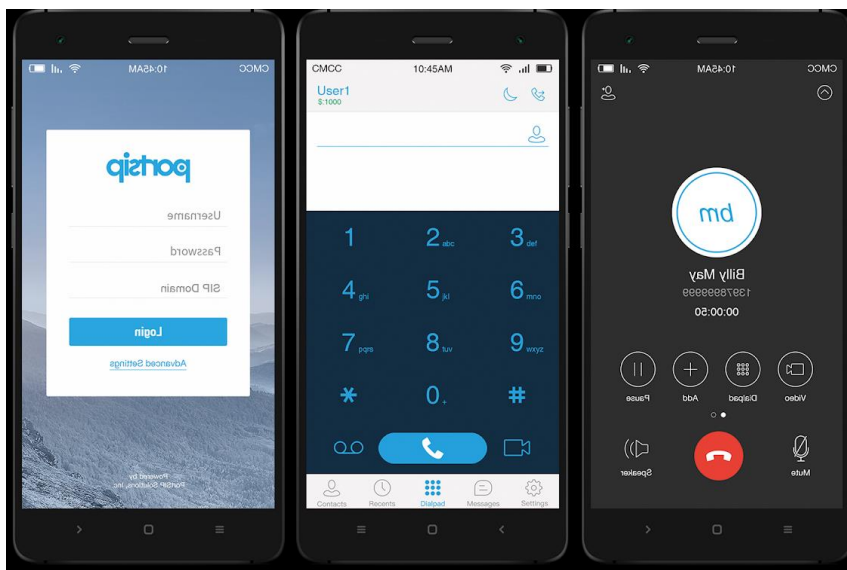
โปรแกรม PuTTY เป็นโปรแกรมสำหรับผู้ดูแลระบบ (System Administrator) ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระยะไกลหรือรีโมทจากเครื่องคอมพิวเตอร์ผู้ใช้งาน (ใช้ Windows) เข้าไปยังเครื่องแม่ข่ายที่ส่วนมากแล้วจะใช้ระบบปฏิบัติการ Linux ที่ต้องการจะเชื่อมต่อ



รูปที่ 34 หน้าต่างเข้าใช้งานโปรแกรม PuTTY

5) แอปพลิเคชัน PortSIP UC App for Android

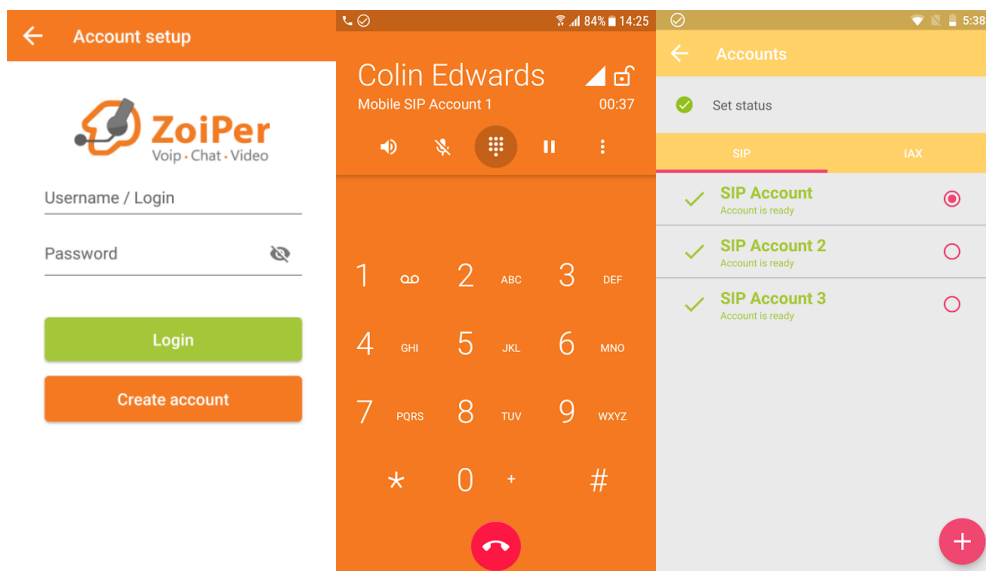
แอปพลิเคชัน PortSIP Softphone เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้โปรโตคอล SIP ในการสื่อสารบนไอพี และใช้สำหรับ Android ที่ใช้การเชื่อมต่อ Wi-Fi หรือ 4G/LTE เพื่อการโทรออกและการรับสาย ซึ่งยังสามารถทำงานร่วมกับ IPPBX ได้ปกติ



รูปที่ 35 ภาพตัวอย่างการทำงานของแอปพลิเคชัน PortSIP UC

6) แอปพลิเคชัน Zoiper App for Android

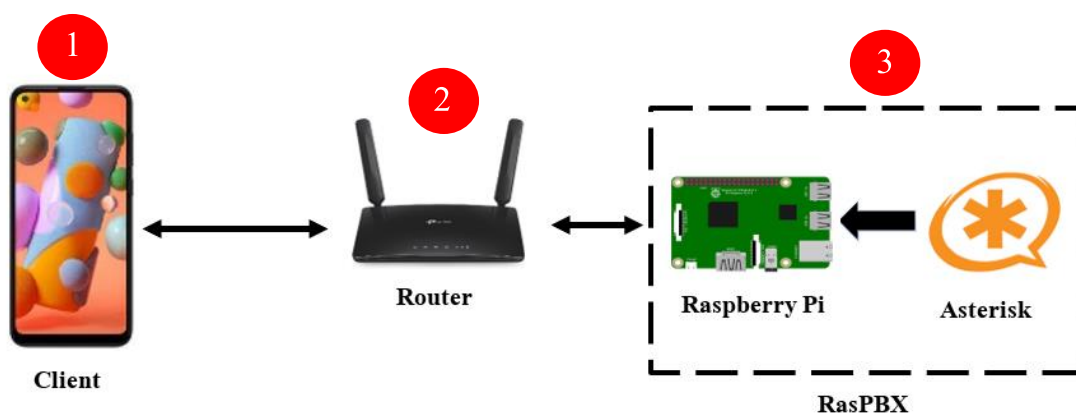
แอปพลิเคชัน Zoiper Softphone เป็นซอฟต์แวร์โทรศัพท์ที่ใช้โปรโตคอล SIP ในการสื่อสารบนไอพี เหมือนกับ PortSIP Softphone แต่ด้วยที่ PortSIP Softphone ไม่สามารถใช้งานร่วมกับ Raspberry Pi ได้ ผู้วิจัยจึงนำ Zoiper Softphone มาใช้งานร่วมกับ Raspberry Pi แทน ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันและยังสามารถติดต่อข้ามแพลตฟอร์มหรือแอปพลิเคชันได้



รูปที่ 36 ภาพตัวอย่างการทำงานของแอปพลิเคชัน Zoiper

5.2.1 แผนภาพระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

ระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้าที่ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการออกแบบในเบื้องต้นนั้น ผู้วิจัยได้วางแผนการทำงานของระบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 37 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ Samsung Galaxy A11 เป็นผู้ใช้งาน (Client) และมีรายละเอียดการทำงานขององค์ประกอบหลักในระบบ (หมายเลข 1 ถึง หมายเลข 3) และในรูปที่ 38 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ Raspberry Pi 4 Model B (หมายเลข 4) เป็นผู้ใช้งาน รายละเอียดการทำงานขององค์ประกอบหลักในระบบมีดังนี้



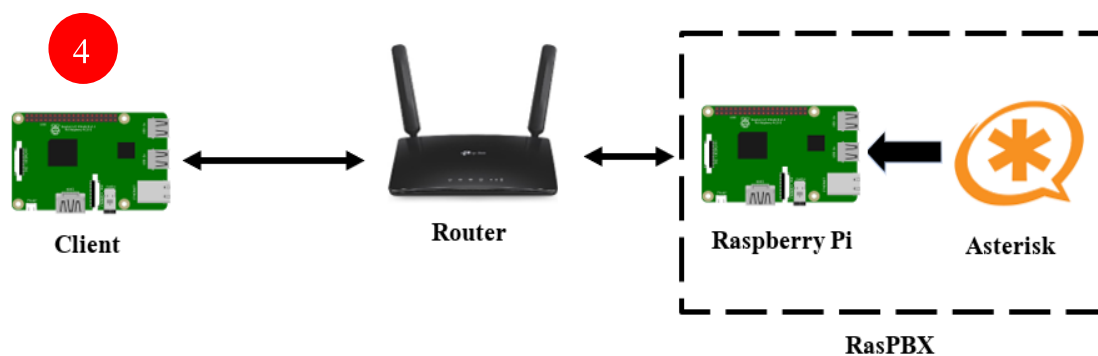
รูปที่ 37 แผนภาพของระบบที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ Samsung Galaxy A11 เป็นผู้ใช้งาน

1) การทำงานในส่วนนี้จะเป็นการทำงานร่วมกันหลัก ๆ 2 ระบบด้วยกันระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยอันดับแรกระบบฮาร์ดแวร์ของผู้ใช้งานซึ่งเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ Samsung Galaxy A11 ทำหน้าที่ในการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงไปที่เครื่องผู้ใช้งานปลายทางและการรับเสียงจากเครื่องผู้ใช้งานปลายทาง โดยสามารถทำการเชื่อมต่อกับเครือข่ายไร้สายที่ใช้คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz และสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องมีสัญญาณคลื่น 3G หรือ 4G หรือสัญญาณอินเทอร์เน็ต ซึ่งทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงประโยชน์ส่วนนี้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานภายในถ้าที่ปกติแล้วจะไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตใช้งานได้กับระบบการทำงานของ IPPBX หรือระบบชุมสายโทรศัพท์แบบไอพี ในการที่จะสามารถทำงานร่วมกันได้ จำเป็นต้องติดตั้ง PortSIP UC App บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังกล่าว

2) อุปกรณ์เราเตอร์ (Router) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless network) ที่ถูกออกแบบ โดยจะจัดการในชั้นเครือข่าย (Network layer) ที่ทำหน้าที่แจกจ่ายไอพี (Internet Protocol, IP) โดยภายในเราเตอร์จะไม่มีการใช้ Sim card 3G/4G ใด ๆ เพราะระบบที่ออกแบบขึ้นสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ต อุปกรณ์เราเตอร์จะทำหน้าที่สร้างที่อยู่ของไอพี (IP address) ให้แก่ผู้ใช้งานเพื่อเข้าใช้งานในเครือข่ายไร้สายรวมทั้งยังสร้างเส้นทางการขนส่ง (Transport layer) หรือการสื่อสารทางเสียงก็สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบที่ออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้งานภายในถ้า ระบบเครือข่ายไร้สายดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในด้านระยะทางการสื่อสารรวมถึงปัญหา

ที่อาจจะเกิดขึ้นถ้าหากนำไปใช้งานจริงภายในถ้ำ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) สำหรับทำการทวนสัญญาณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณที่ดียิ่งขึ้น

3) Raspberry Pi ทำหน้าที่เปรียบเสมือนแม่ข่ายที่คอยจัดการฟังก์ชันโทรศัพท์พื้นฐานทั้งระบบตอบรับ (Interactive voice response, IVR), ระบบประชุมสาย (Conferences) ระบบริงกรุป (Ring group) เป็นต้น โดย Raspberry Pi จะมีความแตกต่างจากเครื่องแม่ข่ายหรือตู้ชุมสายโทรศัพท์ที่รู้จักกันในกลุ่มจำพวก IPPBX เนื่องจาก Raspberry Pi มีขนาดเล็กมาก ๆ มีราคาที่ถูกมากและมีประสิทธิภาพที่เพียงพอต่อการใช้งานจริง ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงขนาดของเครื่องรับส่งที่สะดวกต่อการพกพาและง่ายต่อการติดตั้ง จึงได้เลือกใช้ Raspberry Pi 3 Model B และในที่สุดท้าย ระบบ Asterisk มีหน้าที่ทำงานเบื้องหลังของระบบแม่ข่ายหรือเป็นระบบปฏิบัติการที่ทำงานบน Raspberry Pi ทำให้เจ้าหน้าที่สะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก Asterisk สามารถจัดการผ่านหน้าเว็บเพจ (Web interface) ได้เป็นอย่างดี

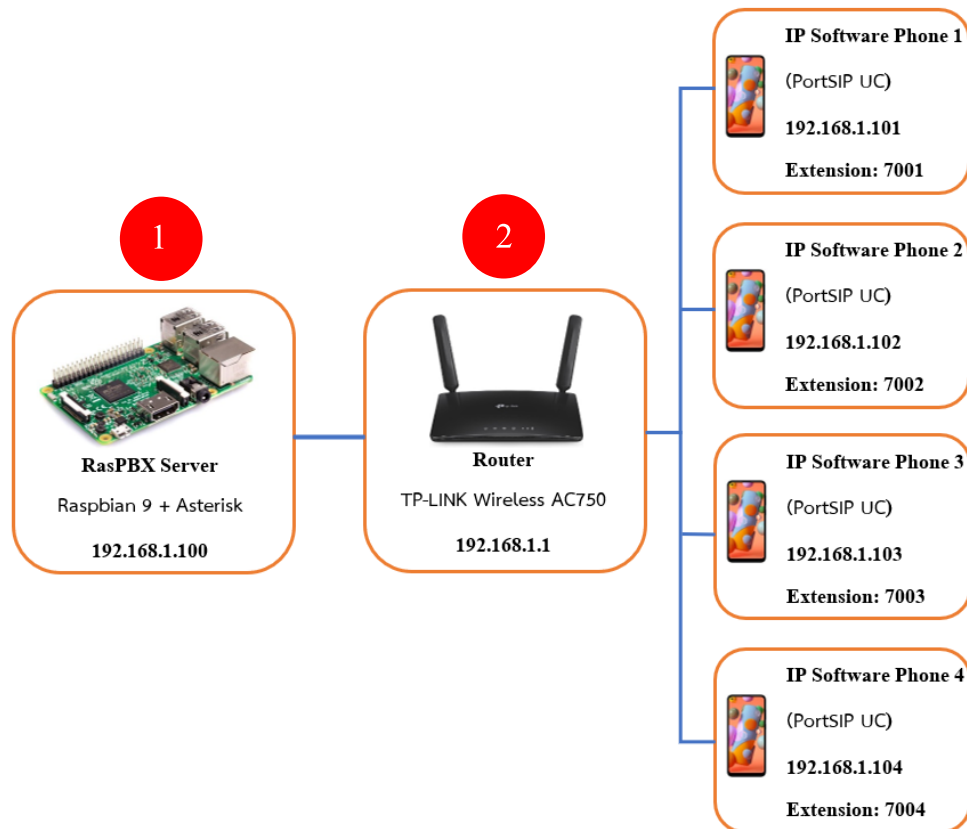


รูปที่ 38 แผนภาพโดยรวมของระบบที่ใช้ Raspberry Pi 4 Model B เป็นเครื่องผู้ใช้งาน

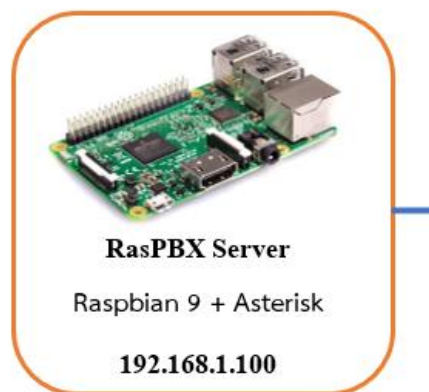
4) จากแผนภาพโดยรวมของระบบที่ใช้ Raspberry Pi 4 Model B เป็นเครื่องผู้ใช้งานตามรูปที่ 38 การทำงานในส่วนนี้จะเป็นการทำงานเหมือนกับส่วนที่ (1) แต่จะเปลี่ยนอุปกรณ์การสื่อสารจากโทรศัพท์ Samsung Galaxy A11 เป็น Raspberry Pi 4 Model ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนกันทุกประการ ในการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียง ทั้งส่งเสียงไปที่ผู้ใช้งานปลายทางและรับเสียงจากผู้ใช้งานปลายทาง

5.2.2 ระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

การออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP ดังรูปที่ 39 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกัน ได้แก่ หมายเลข (1) คือเครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP หมายเลข (2) คือ เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP หมายเลข (3) คือ เครื่องผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านระบบเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP และจะนำถุกอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.2.1, 3.2.2 และ 3.2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 39 การทำงานของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP



รูปที่ 40 เครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP

1) เครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP

จากรูปที่ 40 เครื่องแม่ข่ายทำหน้าที่จัดการ การทำงานบนระบบVoIP โดยใช้ซอฟต์แวร์ FreePBX ซึ่งมี Raspbian OS เป็นระบบปฏิบัติการหลักของตัวระบบและมี Raspberry pi 3 model B เป็นฮาร์ดแวร์ของระบบเครื่องแม่ข่าย (FreePBX Server) ที่มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการพกพาและการติดตั้ง

FreePBX ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจาก Asterisk เป็นซอฟต์แวร์แบบ Open source ที่สามารถทำหน้าที่เป็นตู้สาขาโทรศัพท์และยังสามารถจัดการระบบผ่านทางหน้าเว็บ (Web browser) ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน ง่ายต่อการดูแลระบบให้กับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบ (Administrator) และยังสามารถสนับสนุนการทำงานของอุปกรณ์ VoIP จำนวนมากพอต่อการใช้งานจริง ตลอดจนสามารถใช้โปรโตคอลได้ทั้ง SIP (Session Initiation Protocol) และ IAX2 (Inter-Asterisk eXchange 2)

การจัดการระบบผ่านทางหน้าเว็บ (Web browser) ผู้วิจัยทำการจัดการระบบในเครื่องแม่ข่าย โดยกำหนดค่าไอพีให้กับเครื่องแม่ข่ายคือ 192.168.1.100 ซึ่งเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบสามารถใช้ไอพีในการเข้าไปจัดการระบบได้ผ่านทางหน้าเว็บหรือผ่านโปรแกรมรีโมทแม่ข่าย (Remote Server)



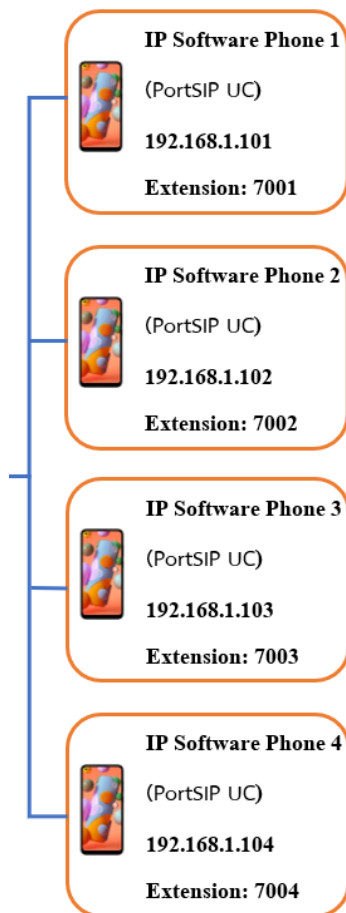
รูปที่ 41 เครื่องแม่ข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP

2) เครื่องข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบการสื่อสารทางเสียงแบบ VoIP

จากรูปที่ 41 เป็นส่วนของเครื่องข่ายท้องถิ่นโดยใช้เราเตอร์ TP-LINK Wireless AC750 ที่ทำหน้าที่ในการแจกจ่ายไอพีให้แก่ผู้ใช้งานเพื่อเข้าใช้งานในเครื่องข่ายไร้สายโดยที่ผู้วิจัยทำการตั้งค่าไอพีเกตเวย์ (IP Gateway) คือเราเตอร์เป็น 192.168.1.1 จากนั้นแจกจ่ายไอพีให้แก่เครื่องแม่ข่าย 192.168.1.100 และเครื่องผู้ใช้งานทั้ง 4 เครื่องได้แก่ 192.168.1.101, 192.168.1.102, 192.168.1.103 และ 192.168.1.104 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังสามารถสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครื่องข่ายท้องถิ่นไร้สายให้สามารถติดต่อกันได้ทั้งในระดับ Network layer และ Transport layer ซึ่งถ้าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารทางเสียงผ่านระบบ VoIP สามารถทำได้โดยใช้ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ 2.4 GHz 300 Mbps 9 dBi

Outdoor CPE ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการตั้งค่าไอพีให้แก่อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ใช้ทดสอบในระบบจำนวน 2 ตัว ได้แก่ 192.168.1.201 และ 192.168.1.202 เป็นต้น



รูปที่ 42 เครื่องผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านระบบเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP

3) เครื่องผู้ใช้งานในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านระบบเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP จากรูปที่ 42 เป็นการออกแบบหมายเลขจากระบบเครื่องแม่ข่าย ซึ่งได้ออกแบบหมายเลขภายใน (Extension) โดยใช้ตัวเลขขนาด 4 หลัก จำนวน 4 หมายเลข โดยมีดังนี้

หมายเลขภายในที่ 1 คือ หมายเลข 7001 โดยมีไอพีเพื่อเข้าใช้งานในเครือข่ายคือ 192.168.1.101 และมี SIP Domain เป็น 192.168.1.100 (ไอพีของเครื่องแม่ข่าย) และใช้ IP Softphone เป็นโปรแกรม PortSIP UC App on Android ในการสื่อสารทางเสียง

หมายเลขภายในที่ 2 คือ หมายเลข 7002 โดยมีไอพีเพื่อเข้าใช้งานในเครือข่ายคือ 192.168.1.102 และมี SIP Domain เป็น 192.168.1.100 (ไอพีของเครื่องแม่ข่าย) และใช้ IP Softphone เป็นโปรแกรม PortSIP UC App on Android ในการสื่อสารทางเสียง

หมายเลขภายในที่ 3 คือ หมายเลข 7003 โดยมีไอพีเพื่อเข้าใช้งานในเครือข่ายคือ 192.168.1.103 และมี SIP Domain เป็น 192.168.1.100 (ไอพีของเครื่องแม่ข่าย) และใช้ IP Softphone เป็นโปรแกรม PortSIP UC App on Android ในการสื่อสารทางเสียง

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

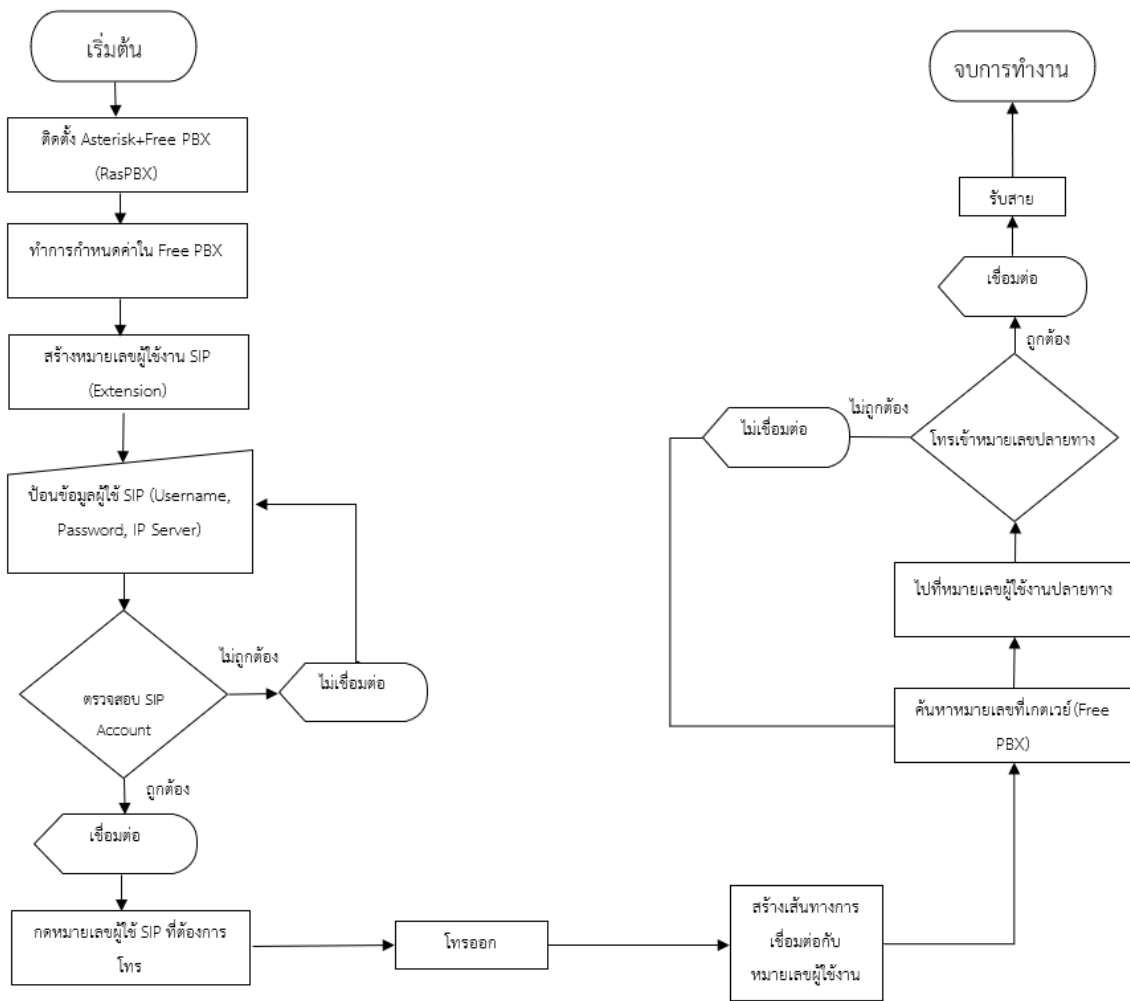
หมายเลขภายในที่ 4 คือ หมายเลข 7004 โดยมีไอพีเพื่อเข้าใช้งานในเครือข่ายคือ 192.168.1.104 และมี SIP Domain เป็น 192.168.1.100 (ไอพีของเครื่องแม่ข่าย) และใช้ IP Softphone เป็นโปรแกรม PortSIP UC App on Android ในการสื่อสารทางเสียง

5.2.3 แผนผังการทำงานของระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

จากรูปที่ 43 เป็นผังการทำงานของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านเครือข่ายไร้สายแบบ VoIP โดยจะยกตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนผู้ใช้งานต้นทางและผู้ใช้งานปลายทาง

อันดับแรกจะเริ่มต้นจากฝั่งผู้ใช้งานต้นทาง ก่อนเริ่มต้นใช้งานจำเป็นต้องติดตั้ง Asterisk และ FreePBX ลง Raspberry Pi 3 model B จากนั้นทำการสร้างหมายเลขผู้ใช้งาน Username Password และเลือกโปรโตคอล SIP หรือ PJSIP ต่อมาให้หน้าบัญชีหมายเลขมาป้อนข้อมูลในโทรศัพท์ผู้ใช้งานต้นทางผ่านโปรแกรม IP Softphone ชื่อ PortSIP UC โดยถ้าหากป้อนข้อมูลหรือกำหนดค่าหมายเลขถูกต้องตามเงื่อนไขจะสามารถเข้าใช้งานในเครือข่ายไร้สายได้ และผู้ใช้งานต้นทางจะสามารถกดหมายเลขเพื่อทำการติดต่อสื่อสารทางเสียงไปยังหมายเลขผู้ใช้ปลายทางได้

ทางฝั่งผู้ใช้งานปลายทางจะทำการรอการสื่อสารทางเสียงจากฝั่งผู้ใช้งานต้นทาง โดยเริ่มต้นจากการเชื่อมต่อเส้นทางมาที่ชุมสายทางโทรศัพท์แบบไอพี คือ Raspberry Pi 3 model B เพื่อขอเชื่อมต่อกับหมายเลขผู้ใช้ที่ต้องการติดต่อ จากนั้นเมื่อเจอหมายเลขผู้ใช้งานปลายทางที่ต้องการติดต่อเรียบร้อยแล้ว จะทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรม IP Softphone และผู้ใช้งานจะสามารถทำการรับสายเพื่อการสื่อสารทางเสียงได้



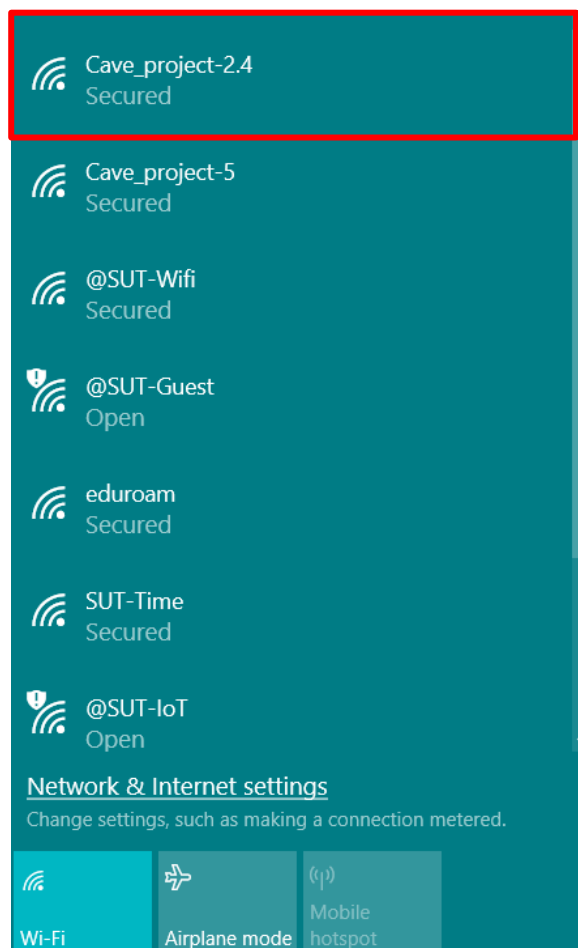
รูปที่ 43 แผนผังการทำงานของระบบการสื่อสารทางเสียง

5.2.4 วิธีดำเนินการตั้งค่าระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

ในส่วนของวิธีการดำเนินการตั้งค่าระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สายแบบ VoIP ผู้วิจัยจะนำเสนอ วิธีการเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย การนำเสนอเครื่องมือที่สำคัญผ่านหน้าเว็บของโปรแกรม FreePBX การนำเสนอวิธีการตั้งค่าหมายเลขเครื่องมือสื่อสาร (Extension) วิธีการตั้งค่าหมายเลขสำหรับการประชุมสาย (Conference) การดูแลระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโปรแกรม PuTTY และการนำเสนอเครื่องมือสื่อสารของผู้ใช้ที่มีโปรแกรม IP Softphone PortSIP UC

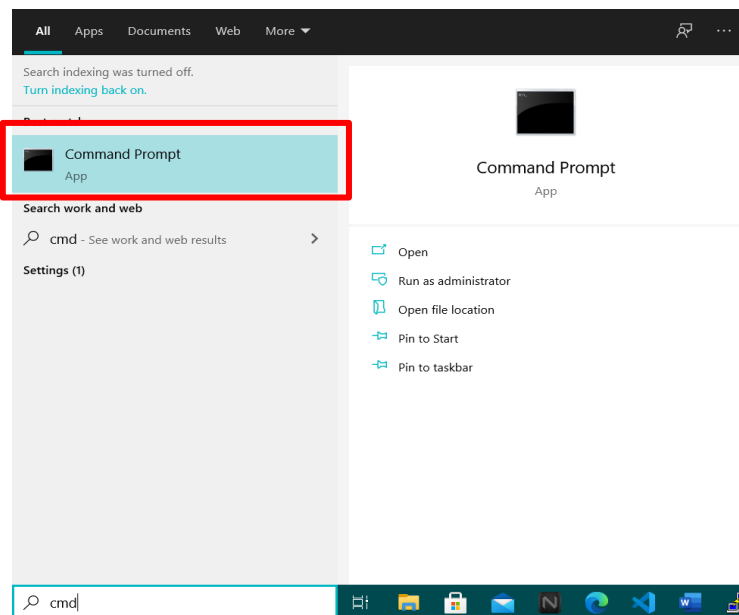
1) วิธีการเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย

1. เลือกเครือข่ายไร้สายชื่อ Cave_project-2.4 จากนั้นจะได้รับ IP Address เพื่อการเข้าใช้งานในเครือข่ายไร้สายสำหรับการสื่อสารทางเสียง ตามรูปที่ 44



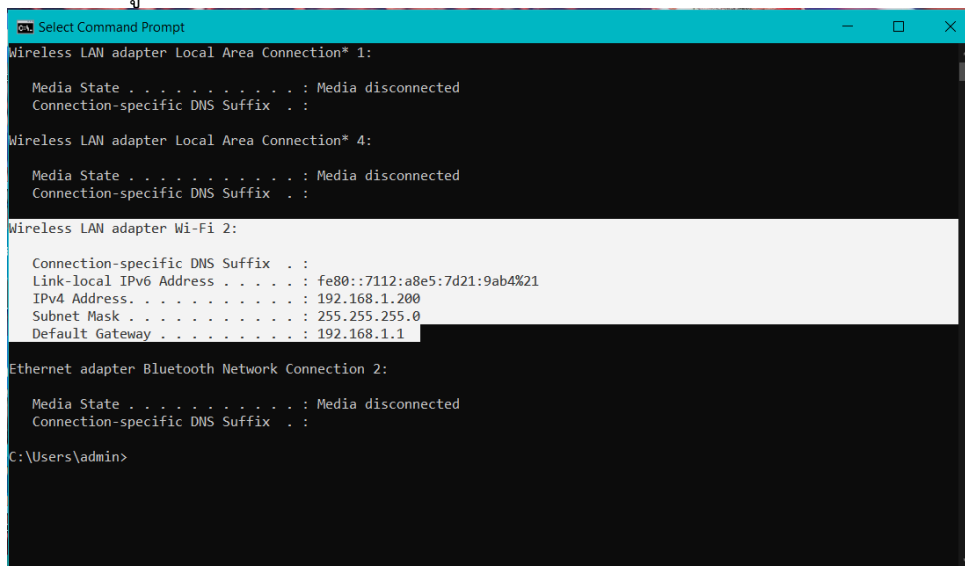
รูปที่ 44 เครือข่ายไร้สายชื่อ Cave_project-2.4

2. จากนั้นเลือกใช้โปรแกรม Command Prompt ตามรูปที่ 45



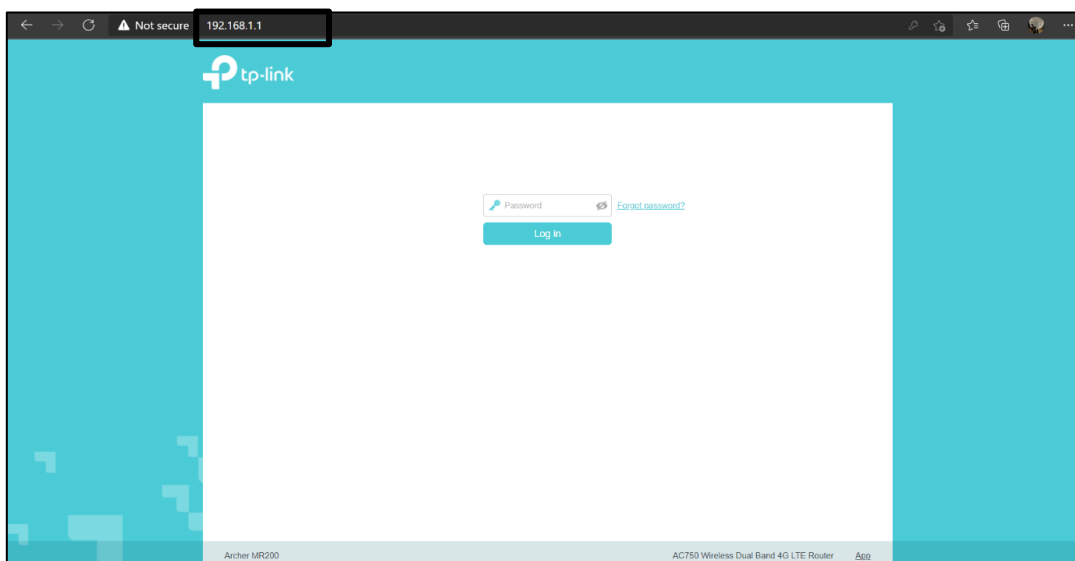
รูปที่ 45 โปรแกรม Command Prompt

3. เมื่อทำการพิมพ์คำสั่ง ipconfig เพื่อดูการตั้งค่า Default Gateway ของเครื่องคอมพิวเตอร์ และใช้ Default Gateway สำหรับการเข้าใช้งานหน้าเว็บในการควบคุมเราเตอร์หรือเพื่อการส่งเกตค่า IP address ของเครื่องแม่ข่ายตามรูปที่ 46



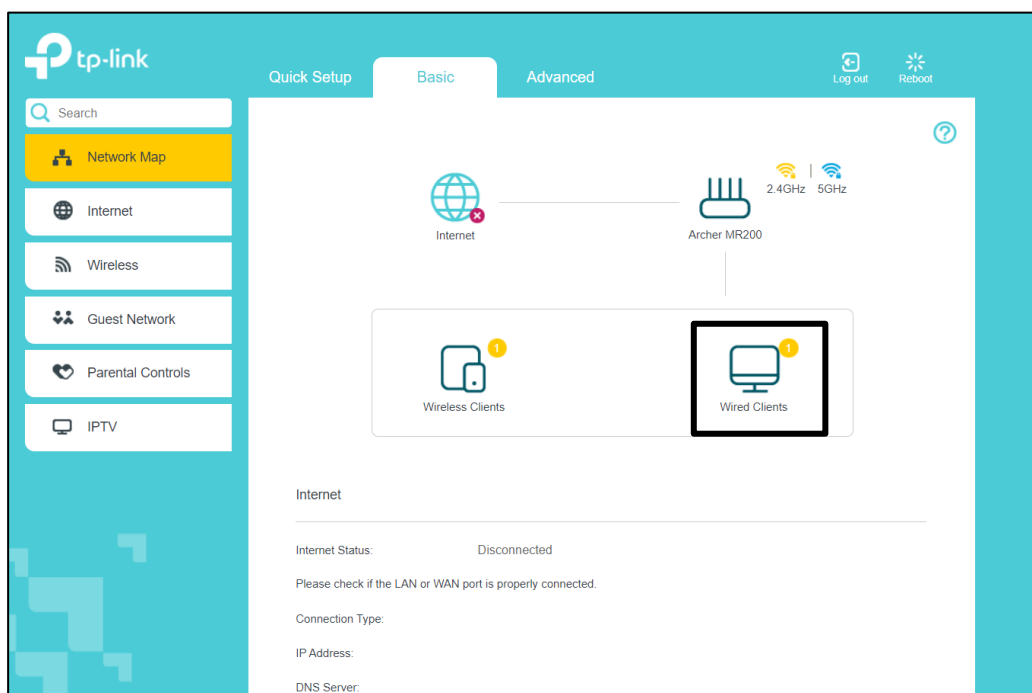
รูปที่ 46 IP Address ของ Host และ Default Gateway จากโปรแกรม Command Prompt

4. นำค่า Default Gateway ที่ได้จากโปรแกรม Command Prompt มาพิมพ์ลงตามกรอบสีแดง จากนั้นจะมีหน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสเพื่อเข้าใช้งานเราเตอร์ ให้ทำการกรอกรหัสผ่านเพื่อทำการล็อกอินเข้าระบบตามรูปที่ 47



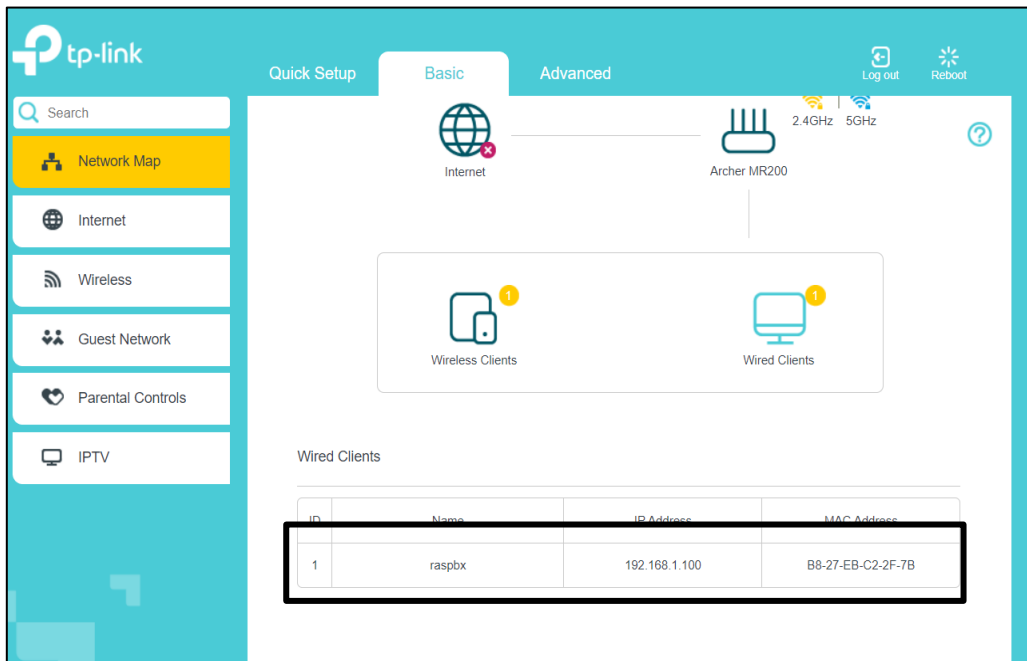
รูปที่ 47 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสหน้าเว็บเพื่อเข้าใช้งานเราเตอร์

5. เมื่อทำการลือคอนเรียวร้อยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 48 จากนั้นทำการคลิกที่กรอบสีดำ

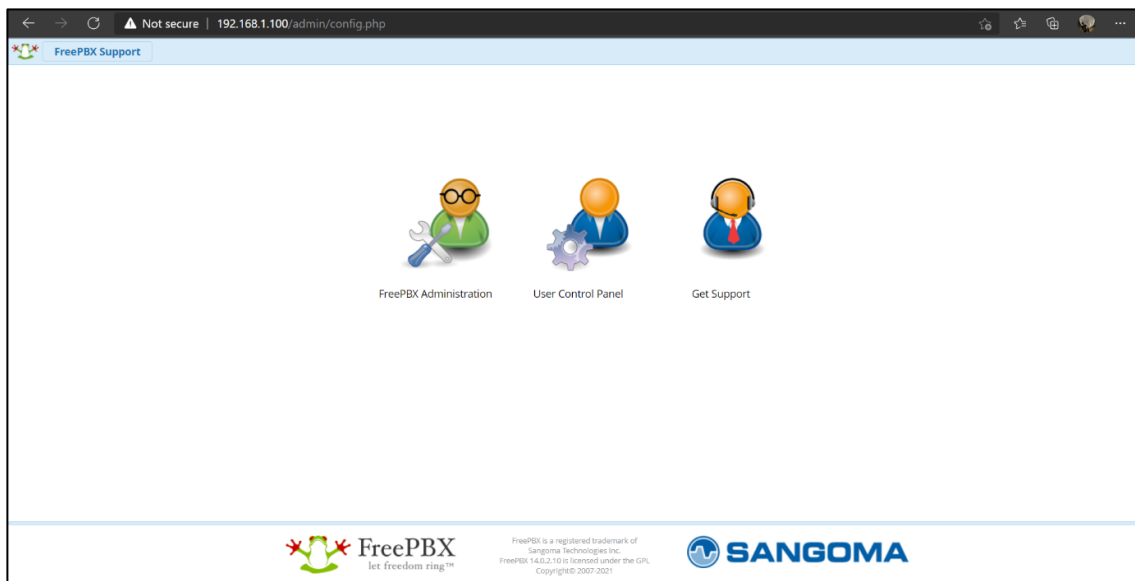


รูปที่ 48 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของเราเตอร์

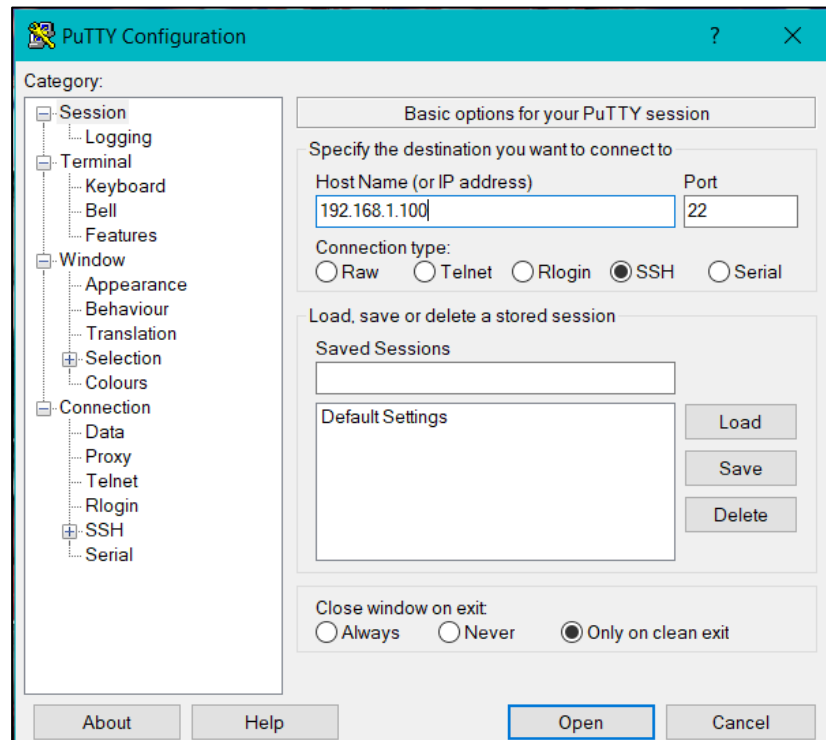
6. เมื่อทำตามรูปที่ 48 จะเห็นตามกรอบสีดำตามรูปที่ 49 ซึ่งจะแสดงเป็นหมายเลข IP Address ของ Raspberry Pi Model B หรือเรียกว่าเครื่องแม่ข่าย จากนั้นให้นำ IP Address เข้าไปใช้งานผ่านหน้าเว็บ ตามรูปที่ 50 และเข้าใช้งานผ่านโปรแกรม PuTTY ตามรูปที่ 51



รูปที่ 49 IP Address ของเครื่องแม่ข่าย

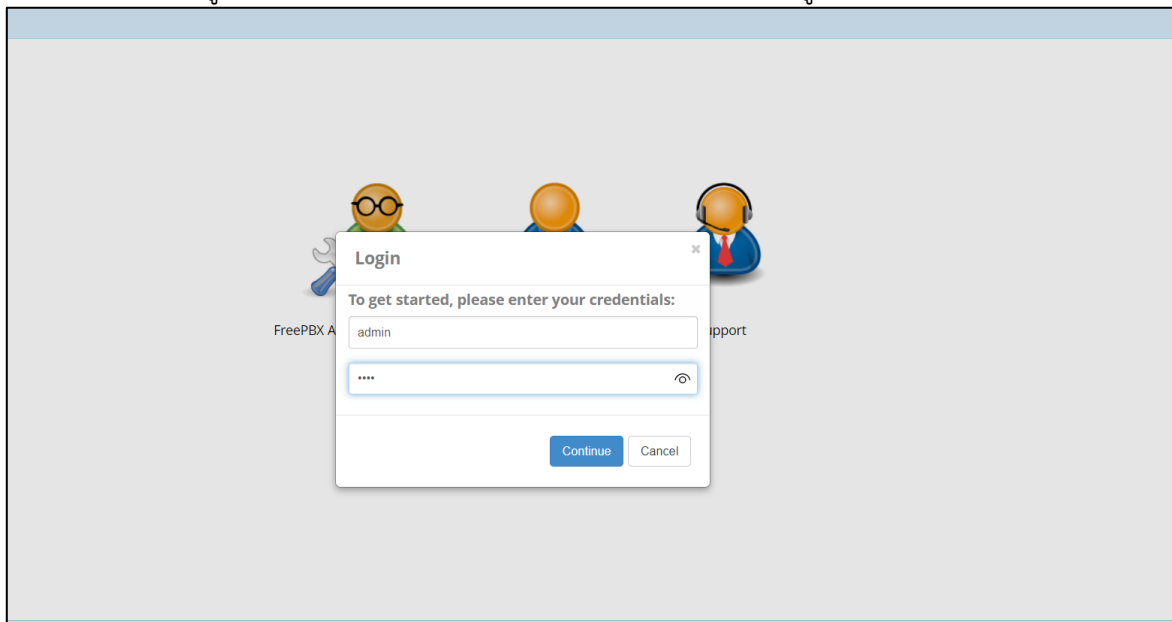


รูปที่ 50 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของเครื่องแม่ข่าย



รูปที่ 51 โปรแกรม PuTTY

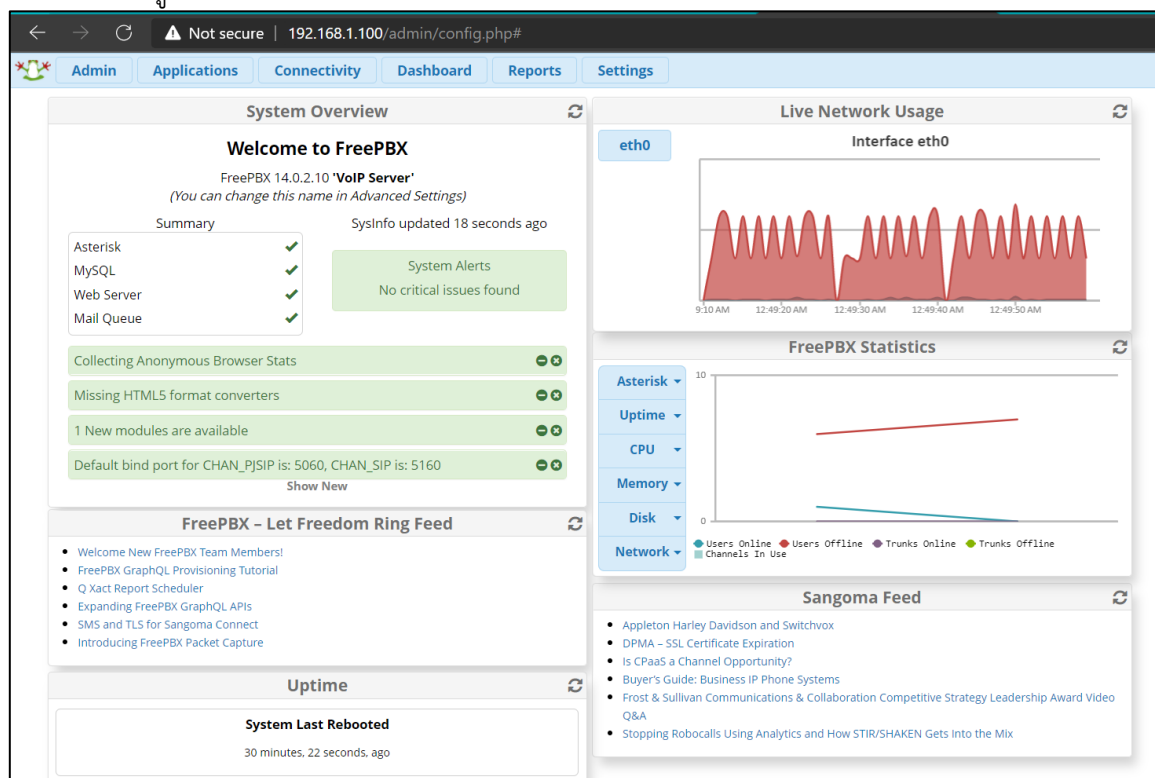
7. จากรูปที่ 50 ให้คลิกที่ FreePBX Administration จากนั้นทำการล็อกอินเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย โดยทำการกรอกชื่อผู้ใช้งาน (Username) และรหัสผ่าน (Password) ตามรูปที่ 52



รูปที่ 52 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสหน้าเว็บเพื่อเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย

2) การตั้งค่าโปรแกรม FreePBX ผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์

1. หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของเครื่องแม่ข่ายโดยโปรแกรม FreePBX ตามรูปที่ 53 โดยสามารถทำการตั้งค่าและควบคุมการทำงานของเครื่องแม่ข่ายผ่านหน้าเว็บได้ ซึ่งมีคุณสมบัติหลัก ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ ตามรูปที่ 53



รูปที่ 53 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของเครื่องแม่ข่ายโดยโปรแกรม FreePBX

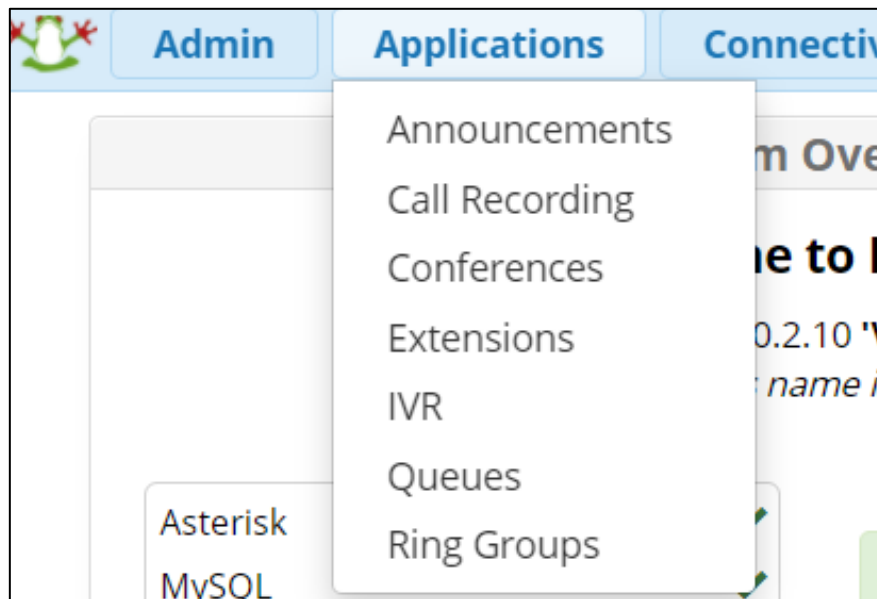
2. จากรูปที่ 54 เมื่อผู้ดูแลระบบทำการกดที่ Applications จะมีโหมดการตั้งค่าการสร้างหมายเลขการสื่อสาร ซึ่งมีโหมดที่สำคัญในการทำงานของระบบดังนี้

- Conferences เป็นโหมดการตั้งค่าการสร้างเลขสำหรับการสื่อสารแบบประชุมสาย ซึ่งการสื่อสารแบบประชุมสายทำหน้าที่ในการโทรแบบกลุ่ม โดยที่จะสร้างหมายเลขการสื่อสารขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้งานทุกคนสามารถเข้ามาที่หมายเลขนี้เพื่อสื่อสารร่วมกันได้ ซึ่งทำให้สามารถติดต่อสื่อสารทางเสียงกันแบบ Multipoint ได้

- Extensions เป็นโหมดการตั้งค่าการสร้างเลขหลักในการใช้งาน IP Softphone และการสื่อสารแบบ Point-2-Point

- Ring Groups เป็นโหมดการตั้งค่าการสร้างเลขสำหรับการสื่อสารแบบกลุ่มวงแหวน ชุมสาย การสื่อสารแบบประชุมสายซึ่งทำหน้าที่ในการโทรแบบกลุ่มเช่นเดียวกับกับแบบ Conferences แต่มีความแตกต่างกันที่การสร้างเส้นทางการเชื่อมต่อที่เมื่อมีผู้ใช้งานคนใดคนหนึ่งเริ่มต้นการสื่อสาร ก็จะมีการแจ้งเตือนไปหาทุกเครื่องผู้ใช้งานที่อยู่ในเครือข่ายว่ามีผู้ใช้งานอยู่ในเครือข่ายนั้น ๆ ต้องการสื่อสารทางเสียง และท้ายที่สุดทำให้สามารถติดต่อสื่อสารทางเสียงกันแบบ Multipoint ได้เช่นกัน

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ



รูปที่ 54 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของเครื่องแม่ข่ายโดยโปรแกรม FreePBX

3) วิธีการตั้งค่าหมายเลขเครื่องมือสื่อสาร (Extension)

1. จากรูปที่ 55 แสดงหน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของการสร้างหมายเลขหลักในการเข้าใช้งาน IP Softphone โดยที่ผู้วิจัยได้สร้างหมายเลข 7000 – 7007 ขึ้นมา และเลือกใช้โปรโตคอล PJSIP ในการสื่อสารหลักและถ้าหากต้องการสร้างเพิ่มสามารถกดปุ่ม Add Extension>Add New PJSIP Extension

	Extension	Name	CW	DND	FM/FM	CF	CFB	CFU	Type	Actions
<input type="checkbox"/>	7001	USA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7002	China	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7003	Thailand	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7004	Brazil	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7005	Russia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7006	France	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️
<input type="checkbox"/>	7007	Argentina	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	✎ 🗑️

รูปที่ 55 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของการสร้างหมายเลขหลักในการเข้าใช้งาน IP Softphone

2. จากรูปที่ 56 แสดงหน้าต่างในการตั้งค่าหมายเลขการสื่อสารหลัก (Extension) โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างหมายเลข 7008 ตั้งชื่อเป็น India และรหัสผ่าน 1234 จากนั้นทำการกดปุ่ม Submit เป็นอันเสร็จสิ้น

รูปที่ 56 หน้าต่างในการตั้งค่าหมายเลขการสื่อสารหลัก (Extension)

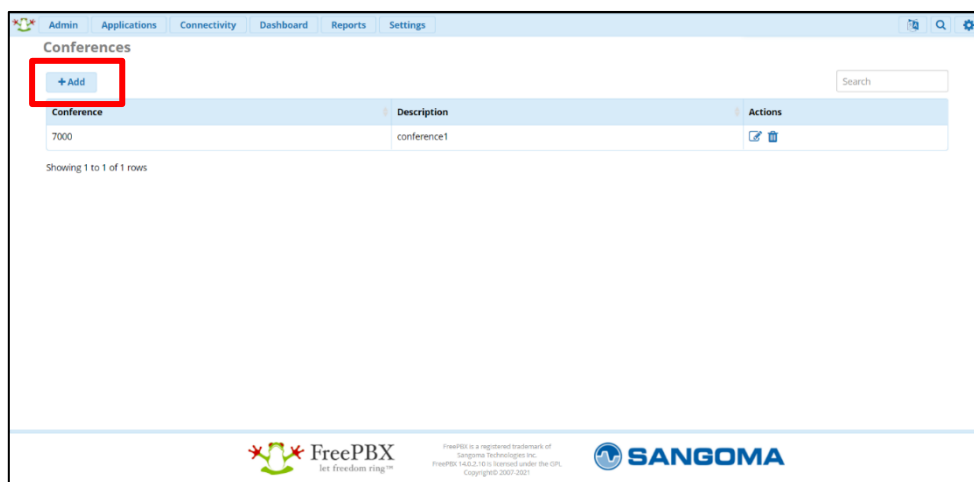
3. จากรูปที่ 57 แสดงหมายเลขการสื่อสาร 7008 เพิ่มเข้ามาในตาราง ส่วนปุ่มสีแดงตามกรอบสีแดงคือคำสั่ง Apply Config หมายถึงการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลง ถ้าหากไม่กดคลิกจะไม่มีการบันทึกการตั้งค่าหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำงานตามการตั้งค่าล่าสุดได้

	Extension	Name	CW	DND	FM/FM	CF	CFB	CFU	Type	Actions
<input type="checkbox"/>	7001	USA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7002	China	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7003	Thailand	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7004	Brazil	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7005	Russia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7006	France	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7007	Argentina	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	
<input type="checkbox"/>	7008	India	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	pjsip	

รูปที่ 57 หน้าต่างในการตั้งค่าหมายเลขการสื่อสารหลัก (Extension)

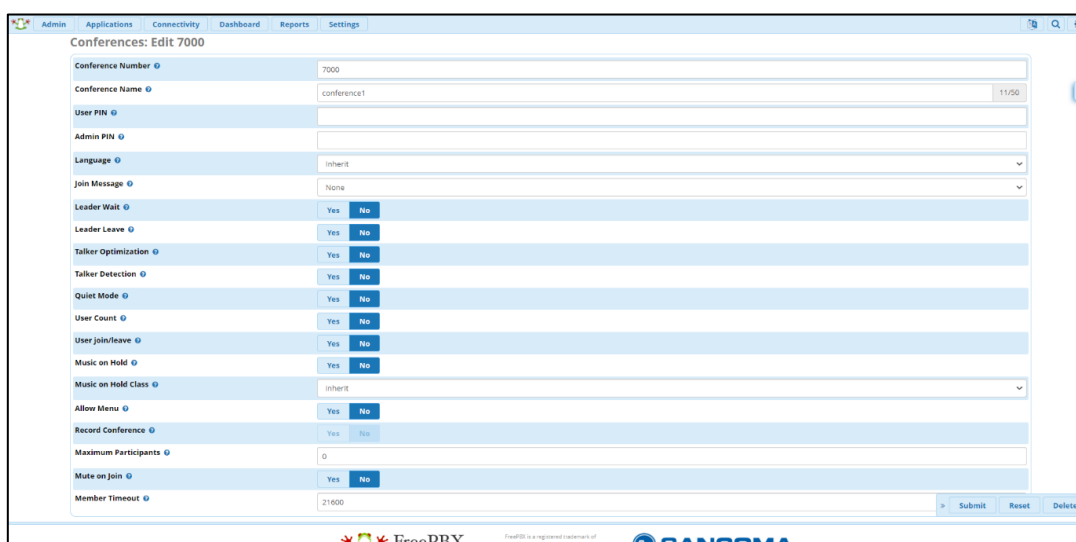
3) วิธีการตั้งค่าหมายเลขสำหรับการประชุมสาย (Conference)

1. จากรูปที่ 58 แสดงหน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของการสร้างหมายเลขแบบประชุมสาย (Conferences) โดยที่ผู้วิจัยได้สร้างหมายเลข 7000 ขึ้นมาพร้อมตั้งชื่อว่า Conferences 1 ถ้าหากจะสร้างหมายเลขเพิ่มสามารถกดได้ที่ปุ่ม +Add ตามกรอบสีแดง



รูปที่ 58 หน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟสของการสร้างหมายเลขแบบประชุมสาย (Conferences)

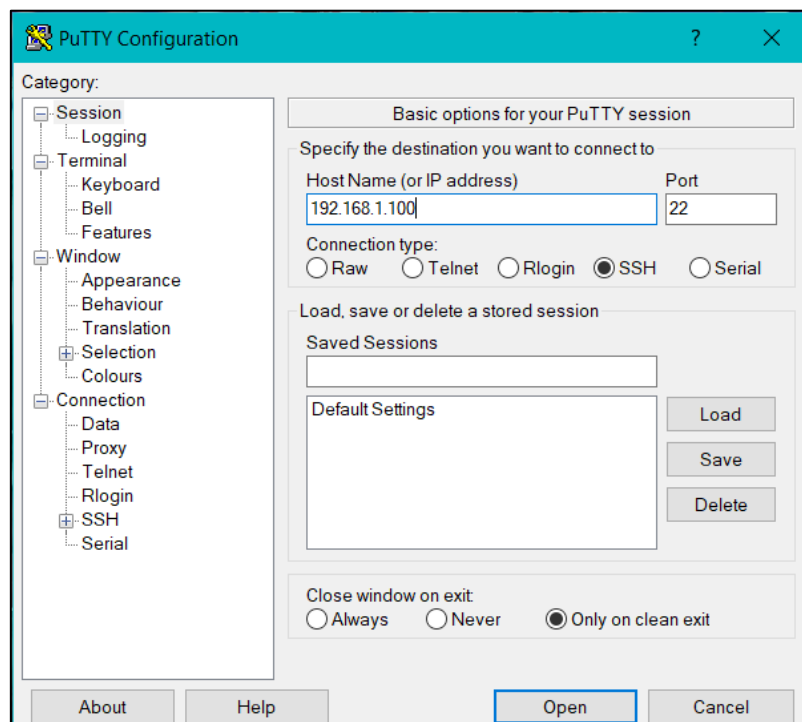
2. จากรูปที่ 59 แสดงหน้าต่างในการตั้งค่าหมายเลขการสื่อสารแบบประชุมสาย (Conferences) โดยเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างหมายเลข 7000 ตั้งชื่อเป็น Conferences จากนั้นทำการกดปุ่ม Submit เป็นอันเสร็จสิ้นการตั้งค่า



รูปที่ 59 หน้าต่างในการตั้งค่าหมายเลขการสื่อสารแบบประชุมสาย (Conferences)

4) การดูแลระบบการสื่อสารทางเสียงด้วยโปรแกรม PuTTY

1. จากรูปที่ 60 แสดงการเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่ายผ่านโปรแกรม PuTTY โดยทำการกรอกหมายเลข IP Address ตามที่ได้รับมา จากนั้นกดปุ่ม Open



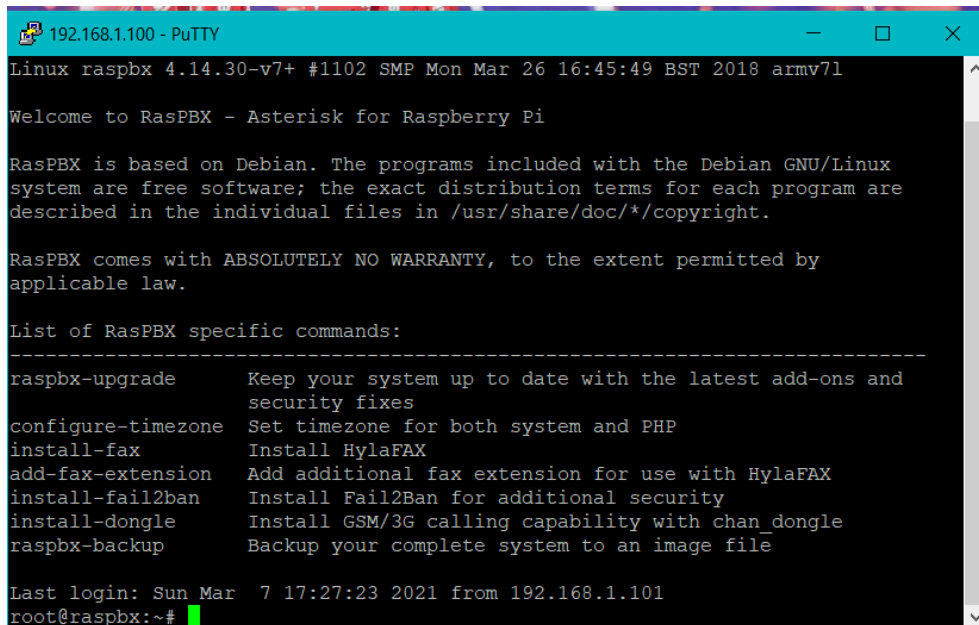
รูปที่ 60 การเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่ายผ่านโปรแกรม PuTTY

2. จากรูปที่ 61 แสดงหน้าต่างการล็อกอินเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย โดยมีการกรอก Username และ Password ก่อนเข้าใช้งาน



รูปที่ 61 หน้าต่างการล็อกอินเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่าย
โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

3. เมื่อทำการลือคอินเข้าระบบสำเร็จจะสามารถเข้าใช้งานเครื่องแม่ข่ายได้ สามารถมอนิเตอร์การใช้งานการสื่อสารทางเสียง ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งนอกจากการใช้งานผ่านหน้าเว็บ ตามรูปที่ 62



```

192.168.1.100 - PuTTY
Linux raspbx 4.14.30-v7+ #1102 SMP Mon Mar 26 16:45:49 BST 2018 armv7l
Welcome to RasPBX - Asterisk for Raspberry Pi

RasPBX is based on Debian. The programs included with the Debian GNU/Linux
system are free software; the exact distribution terms for each program are
described in the individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

RasPBX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent permitted by
applicable law.

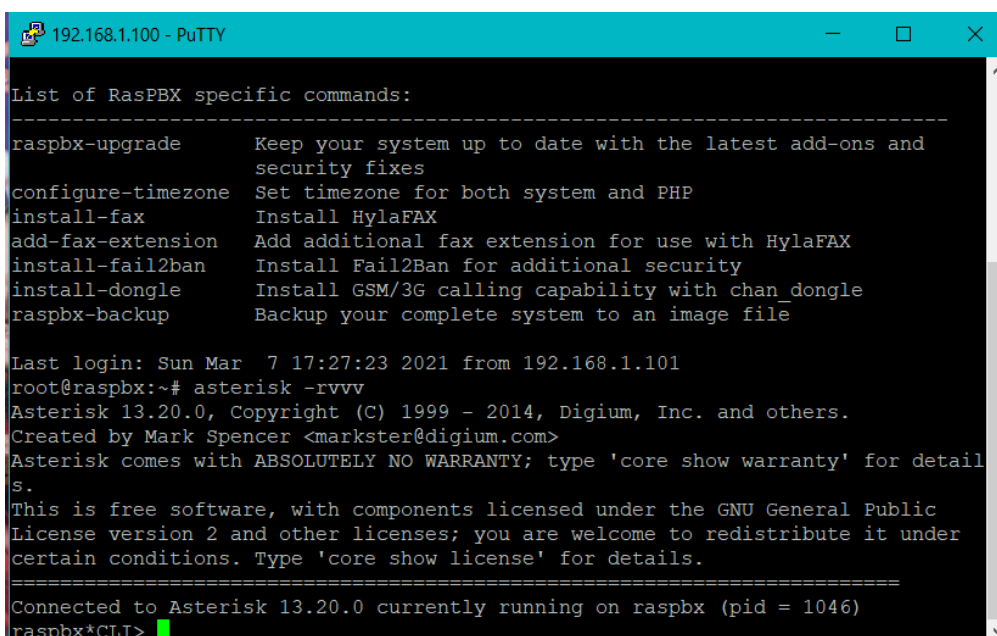
List of RasPBX specific commands:
-----
raspbx-upgrade      Keep your system up to date with the latest add-ons and
                    security fixes
configure-timezone  Set timezone for both system and PHP
install-fax         Install HylaFAX
add-fax-extension   Add additional fax extension for use with HylaFAX
install-fail2ban    Install Fail2Ban for additional security
install-dongle      Install GSM/3G calling capability with chan_dongle
raspbx-backup       Backup your complete system to an image file

Last login: Sun Mar  7 17:27:23 2021 from 192.168.1.101
root@raspbx:~#

```

รูปที่ 62 หน้าต่างมอนิเตอร์เครื่องแม่ข่าย

4. จากรูปที่ 63 เมื่อทำการพิมพ์คำสั่ง asterisk -rvvv จะมีการเปลี่ยนโหมดการทำงาน ซึ่งจะทำได้สามารถตั้งค่าหรือควบคุมการทำงานหรือการมอนิเตอร์ได้



```

192.168.1.100 - PuTTY

List of RasPBX specific commands:
-----
raspbx-upgrade      Keep your system up to date with the latest add-ons and
                    security fixes
configure-timezone  Set timezone for both system and PHP
install-fax         Install HylaFAX
add-fax-extension   Add additional fax extension for use with HylaFAX
install-fail2ban    Install Fail2Ban for additional security
install-dongle      Install GSM/3G calling capability with chan_dongle
raspbx-backup       Backup your complete system to an image file

Last login: Sun Mar  7 17:27:23 2021 from 192.168.1.101
root@raspbx:~# asterisk -rvvv
Asterisk 13.20.0, Copyright (C) 1999 - 2014, Digium, Inc. and others.
Created by Mark Spencer <markster@digium.com>
Asterisk comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY; type 'core show warranty' for details.
This is free software, with components licensed under the GNU General Public
License version 2 and other licenses; you are welcome to redistribute it under
certain conditions. Type 'core show license' for details.
=====
Connected to Asterisk 13.20.0 currently running on raspbx (pid = 1046)
raspbx*CLI>

```

รูปที่ 63 การเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเจ้าหน้าที่ดูแลระบบ (Administration)

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

5. เมื่อทำการพิมพ์คำสั่ง pjsip list endpoints จะแสดงหน้าต่างขึ้นมาตามรูปที่ 64 ซึ่งเป็นการแสดงถึงหมายเลขที่เข้าใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สาย ยกตัวอย่างเช่น แสดงหมายเลข 7001 และ 7007 เข้าใช้งานในระบบตามเส้นสีแดงที่แสดงไว้

```

192.168.1.100 - PuTTY
I/OAuth: <AuthId/UserName.....>
Aor: <Aor.....> <MaxContact>
Contact: <Aor/ContactUri.....> <Hash....> <Status> <RTT(ms)...>
Transport: <TransportId.....> <Type> <cos> <tos> <BindAddress.....>
Identify: <Identify/Endpoint.....>
Match: <criteria.....>
Channel: <ChannelId.....> <State.....> <Time.....>
Exten: <DialedExten.....> CLCID: <ConnectedLineCID.....>
=====
Endpoint: 7001/7001                               Not in use    0 of inf
InAuth: 7001-auth/7001
Aor: 7001
Contact: 7001/sip:7001@192.168.1.102:13621      b0b3dba4c6 Avail    10.971
Endpoint: 7002/7002                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7002-auth/7002
Aor: 7002
Endpoint: 7003/7003                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7003-auth/7003
Aor: 7003
Endpoint: 7004/7004                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7004-auth/7004
Aor: 7004
Endpoint: 7005/7005                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7005-auth/7005
Aor: 7005
Endpoint: 7006/7006                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7006-auth/7006
Aor: 7006
Endpoint: 7007/7007                               Not in use    0 of inf
InAuth: 7007-auth/7007
Aor: 7007
Contact: 7007/sip:7007@192.168.1.200:60229;rinstantc 9724ad3a7f Avail    15.712
Endpoint: 7008/7008                               Unavailable  0 of inf
InAuth: 7008-auth/7008
Aor: 7008
Endpoint: anonymous                               Unavailable  0 of inf

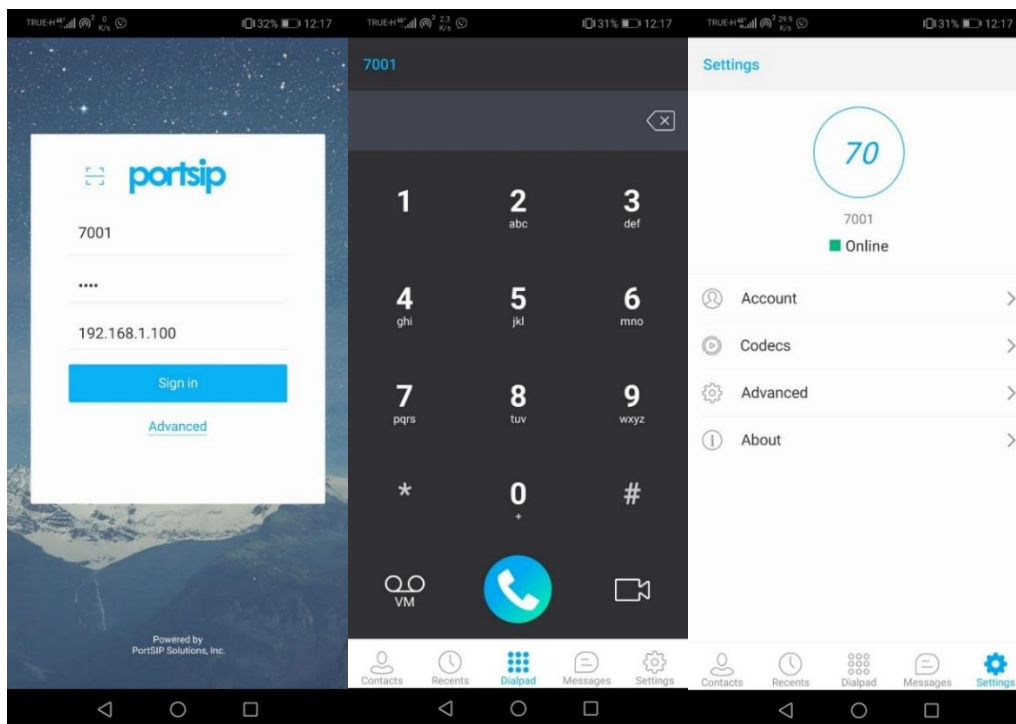
Objects found: 9
raspbx*CLI>

```

รูปที่ 64 หน้าต่างแสดงหมายเลขการเข้าใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สาย

5) เครื่องมือสื่อสารของผู้ใช้ที่มีโปรแกรม IP Softphone PortSIP UC

จากรูปที่ 65 แสดงหน้าต่างการเข้าใช้งานโปรแกรม IP Softphone PortSIP UC โดยมีการกรอกหมายเลขการสื่อสารที่ได้ทำการตั้งค่าไว้จากเครื่องแม่ข่ายผ่านหน้าเว็บ ยกตัวอย่างเช่น รหัสผ่าน และ IP Address ของเครื่องแม่ข่าย จากนั้นทำการกดปุ่ม Sign in เพื่อเข้าใช้งาน หลังจากนั้นจะแสดงหน้าต่างการใช้งานขึ้นมาสำหรับกรอกหมายเลขเพื่อทำการติดต่อสื่อสาร



รูปที่ 65 หน้าต่างการเข้าใช้งานโปรแกรม IP Softphone PortSIP UC

5.2.5 การทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดสอบการใช้งานระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย โดยประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Point-2-Point จำนวน 2 เครื่อง การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 3 เครื่อง การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 4 เครื่อง และการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint โดยนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Point-2-Point จำนวน 2 เครื่อง

ในส่วนของการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Point-2-Point จำนวน 2 เครื่อง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานทั้ง 2 เครื่องที่ระยะ 20 เมตร 40 เมตร และ 80 เมตร โดยสถานที่ที่ผู้วิจัยเลือกใช้การทำทดสอบการสื่อสารทางเสียงทั้งแบบ Point-2-Point คือ ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 66 ซึ่งในส่วนของการแสดงผลการทดสอบจะมีการแสดงถึงตำแหน่งที่เครื่องผู้ใช้งาน เราเตอร์ และอุปกรณ์ทวนสัญญาณ บนภาพแผนผังที่นำเสนอ ดังนี้

สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องที่ใช้แทนในแผนผังอาคาร ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ ศูนย์เครื่องมือ F11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ได้แก่

- เครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7001 โทรศัพท์มือถือ ที่มี IP Softphone คือ PortSIP UC App
- เครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7002 โทรศัพท์มือถือ ที่มี IP Softphone คือ PortSIP UC App
- เครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7003 โทรศัพท์มือถือ ที่มี IP Softphone คือ PortSIP UC App
- เครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7004 โทรศัพท์มือถือ ที่มี IP Softphone คือ PortSIP UC App
- ▲ เราเตอร์ (Router - TP-LINK (Archer MR200) Wireless AC750 Dual Band)
- อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater - 2.4 GHz 300 Mbps 9 dBi Outdoor CPE)

1. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 20 เมตร



รูปที่ 66 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 20 เมตร ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 20 เมตร

เครื่องหมายเลข	เครื่องหมายเลข 7002 โทรหาเครื่อง หมายเลข 7003		เครื่องหมายเลข 7003 โทรหาเครื่อง หมายเลข 7002	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7002	ดีมาก	-59	ดีมาก	-45
7003	ดีมาก	-55	ดีมาก	-57

จากตารางผลการทดลองที่ 7 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 2 เครื่องที่ระยะห่างจากเราเตอร์ 20 เมตร ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 2 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อเครื่องหมายเลข 7002 โทรหาเครื่องหมายเลข 7003 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าอยู่ที่ -59 dBm เครื่องหมายเลข 7003 มีค่าอยู่ที่ -55 dBm และเมื่อเครื่องหมายเลข 7003 โทรหาเครื่องหมายเลข 7002 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าอยู่ที่ -45 dBm เครื่องหมายเลข 7003 มีค่าอยู่ที่ -57 dBm

2. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 40 เมตร



รูปที่ 67 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องห่างกันเป็นระยะ 40 เมตร

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 40 เมตร

เครื่องหมายเลข	เครื่องหมายเลข 7002 โทรหาเครื่อง หมายเลข 7003		เครื่องหมายเลข 7003 โทรหาเครื่อง หมายเลข 7002	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7002	ดีมาก	-59	ดีมาก	-59
7003	ดีมาก	-62	ดีมาก	-53

จากตารางที่ 8 ผลการทดลองพบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 2 เครื่องที่ระยะห่างจากเราเตอร์ 40 เมตร ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 2 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อเครื่องหมายเลข 7002 โทรหาเครื่องหมายเลข 7003 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าอยู่ที่ -59 dBm เครื่องหมายเลข 7003 มีค่าอยู่ที่ -62 dBm และเมื่อเครื่องหมายเลข 7003 โทรหาเครื่องหมายเลข 7002 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าอยู่ที่ -59 dBm เครื่องหมายเลข 7003 มีค่าอยู่ที่ -53 dBm

3. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 80 เมตร



รูปที่ 68 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องห่างกันเป็นระยะ 80 เมตร ตารางที่ 9 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 2 เครื่องที่ระยะห่าง 80 เมตร

เครื่องมือหมายเลข	เครื่องมือหมายเลข 7002 โทรหาเครื่องมือหมายเลข 7003		เครื่องมือหมายเลข 7003 โทรหาเครื่องมือหมายเลข 7002	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7002	ดีมาก	-62	ดีมาก	-62
7003	ดีมาก	-62	ดีมาก	-62

จากผลการทดลองในตารางที่ 9 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 2 เครื่องที่ระยะห่างจากเราเตอร์ 80 เมตร ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 2 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก

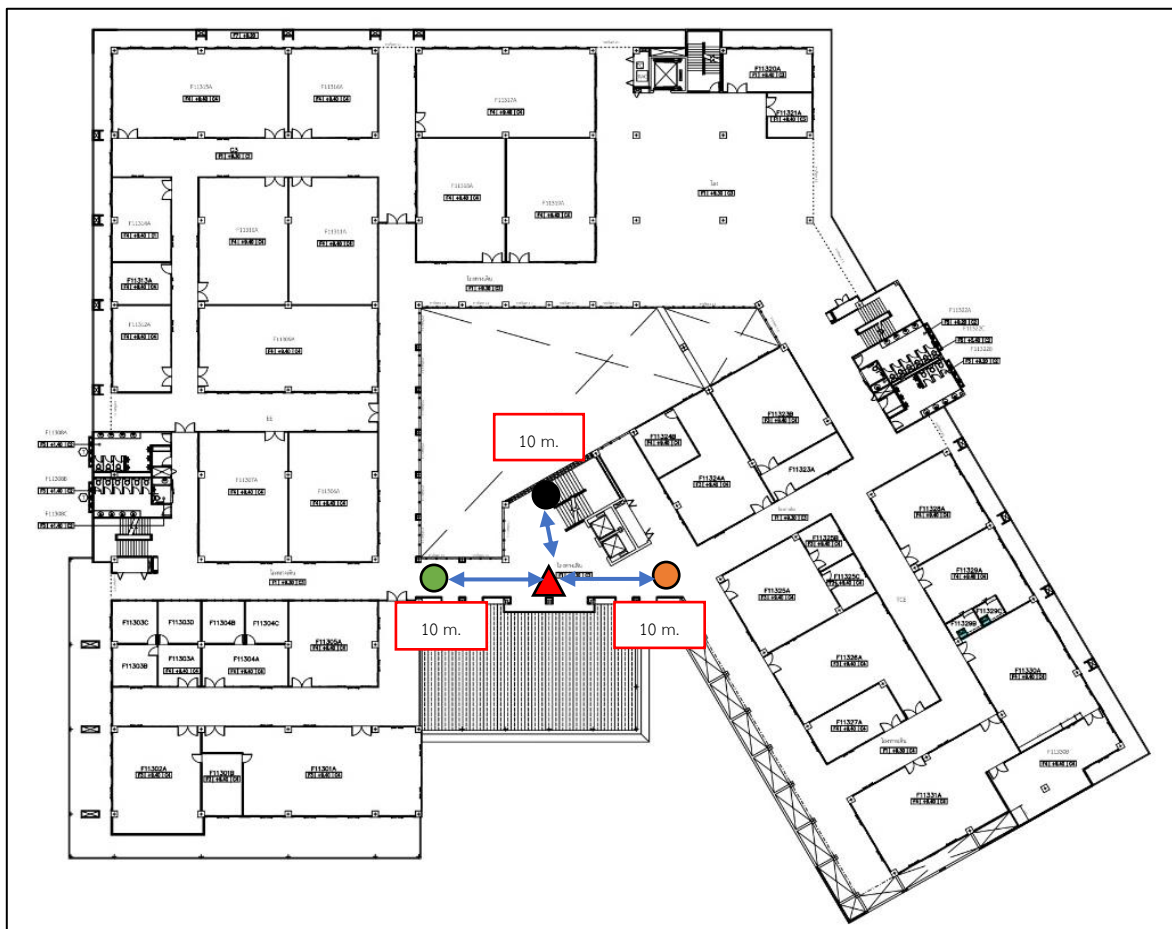
โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อเครื่องหมายเลข 7002 โทรหาเครื่องหมายเลข 7003 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าอยู่ที่ -62 dBm เท่ากับค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7003 และเมื่อเครื่องหมายเลข 7003 โทรหาเครื่องหมายเลข 7002 เครื่องหมายเลข 7002 มีค่าความแรงของสัญญาณเท่ากับเครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -62 dBm

2) การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 3 เครื่อง

ในส่วนของ การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint และใช้งานหมายเลขการสื่อสารทางเสียงแบบประชุมสายหมายเลข 7000 จำนวน 3 เครื่อง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะทาง ได้แก่ ระยะห่างจากเราเตอร์ระหว่างเครื่องผู้ใช้งาน 3 เครื่องในรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 69 ระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 3 เครื่องในรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 70 และระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 3 เครื่องในรูปแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 71 โดยสถานที่ที่ผู้วิจัยเลือกใช้การทำการทดสอบการสื่อสารทางเสียงทั้งแบบ Multipoint คือ ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ ศูนย์เครื่องมือ F11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 1



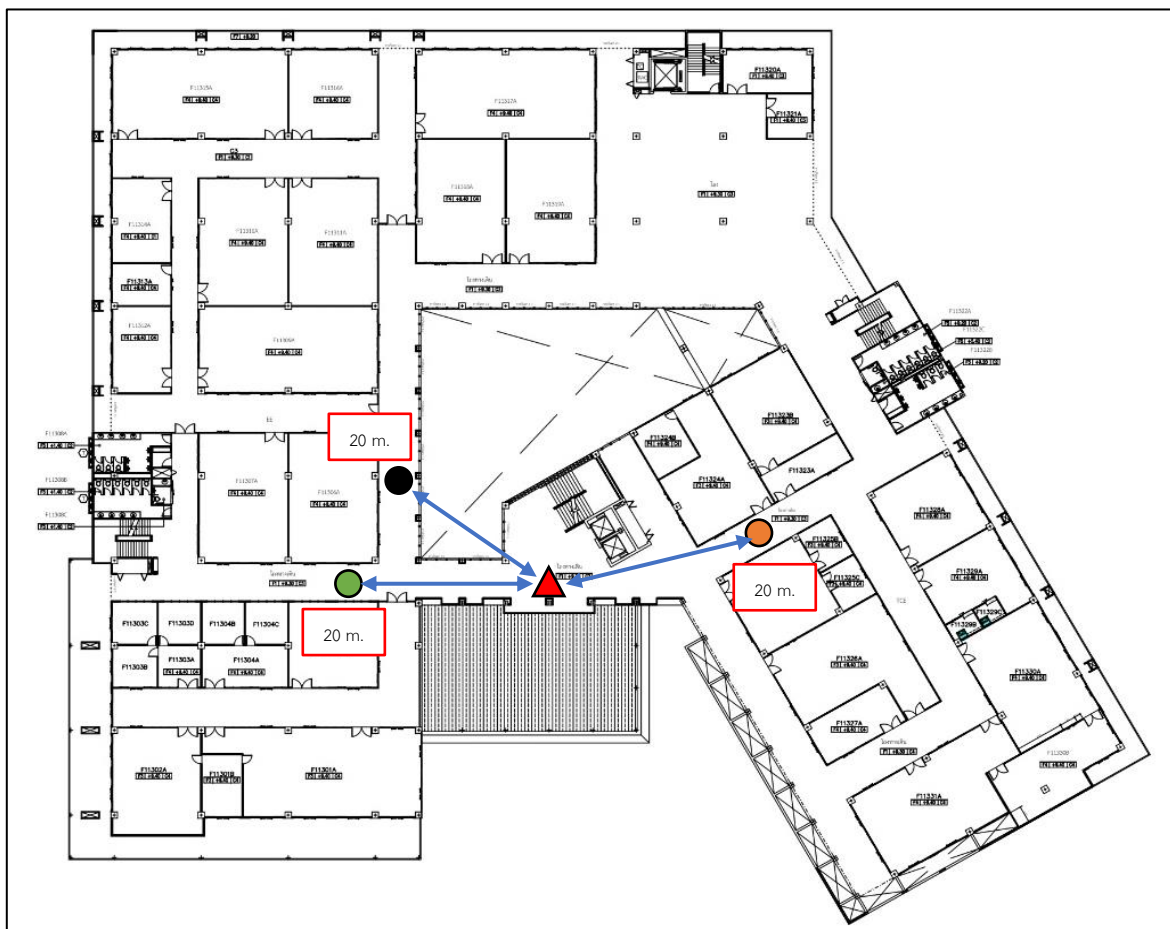
รูปที่ 69 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 1

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 1

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 3 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-48
7002	ดีมาก	-59
7003	ดีมาก	-59

จากผลการทดลองในตารางที่ 10 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 3 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 1 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 3 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณ เครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -48 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -59 dBm และเครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -59 dBm ซึ่งมีค่าความแรงของสัญญาณใกล้เคียงกัน

2. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 2



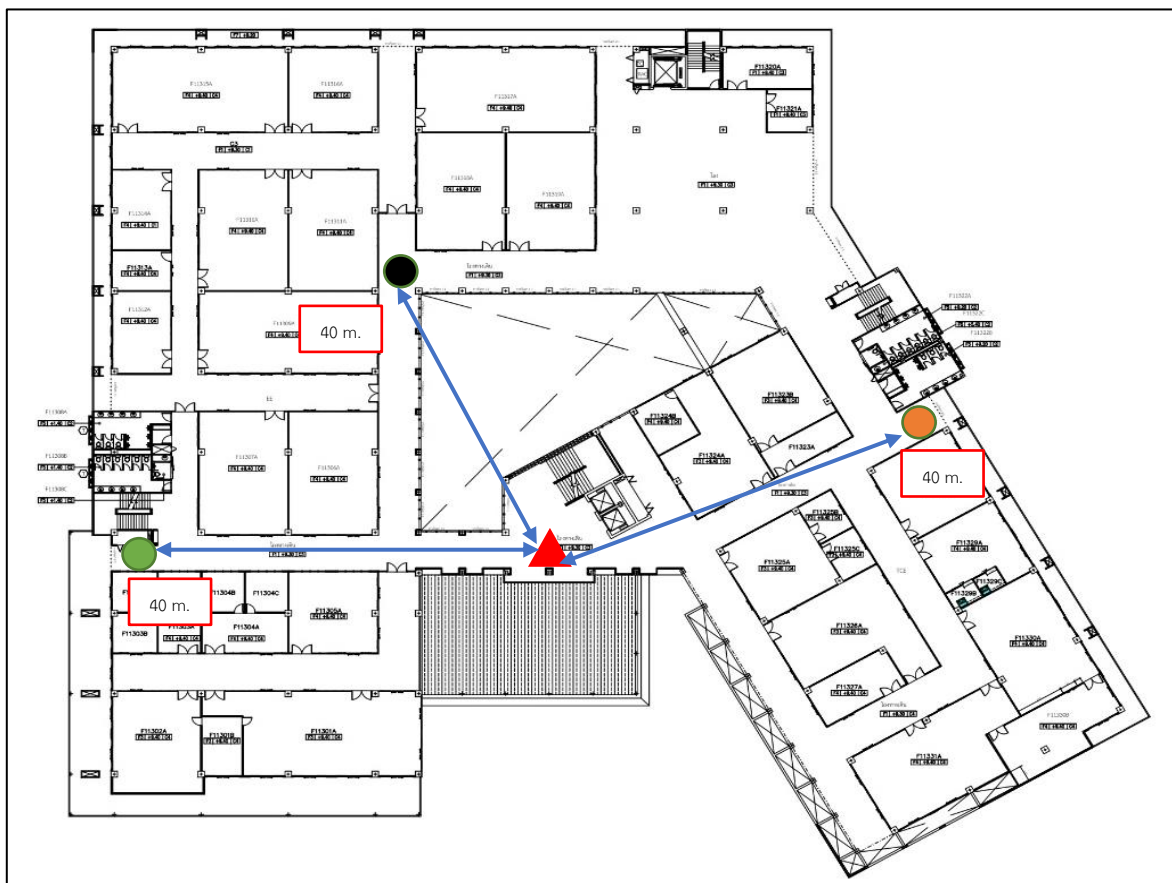
รูปที่ 70 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 2

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 2

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 3 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-62
7002	ดีมาก	-61
7003	ดีมาก	-61

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 3 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 2 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 3 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณ เครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -62 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -61 dBm และเครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -61 dBm ซึ่งมีค่าความแรงของสัญญาณใกล้เคียงกัน

3. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 3



รูปที่ 71 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 3

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง ในระยะทางตามรูปแบบที่ 3

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 3 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ไม่ชัดเจน	-63
7002	ดี	-80
7003	ดี	-81

จากผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 3 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 3 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 2 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดี แต่เครื่องหมายเลข 7001 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจากบริเวณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่นอกกลุ่มของสัญญาณ ทำให้สามารถรับสัญญาณจากเราเตอร์ได้น้อย โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 3 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -63 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -80 dBm และเครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -81 dBm ซึ่งเมื่อเครื่องหมายเลข 7001 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน ทำให้เครื่องหมายเลขอื่นได้ยินสัญญาณติดขัด

3) การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 4 เครื่อง

ในส่วนของ การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint และใช้งานหมายเลขการสื่อสารทางเสียงแบบประชุมสายหมายเลข 7000 จำนวน 4 เครื่อง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะทาง ได้แก่ ระยะห่างจากเราเตอร์ระหว่างเครื่องผู้ใช้งาน 4 เครื่องในรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 72 ระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 3 เครื่องในรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 73 และระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 4 เครื่องในรูปแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 74 โดยสถานที่ที่ผู้วิจัยเลือกใช้การทำทดสอบการสื่อสารทางเสียงทั้งแบบ Multipoint คือ ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 1

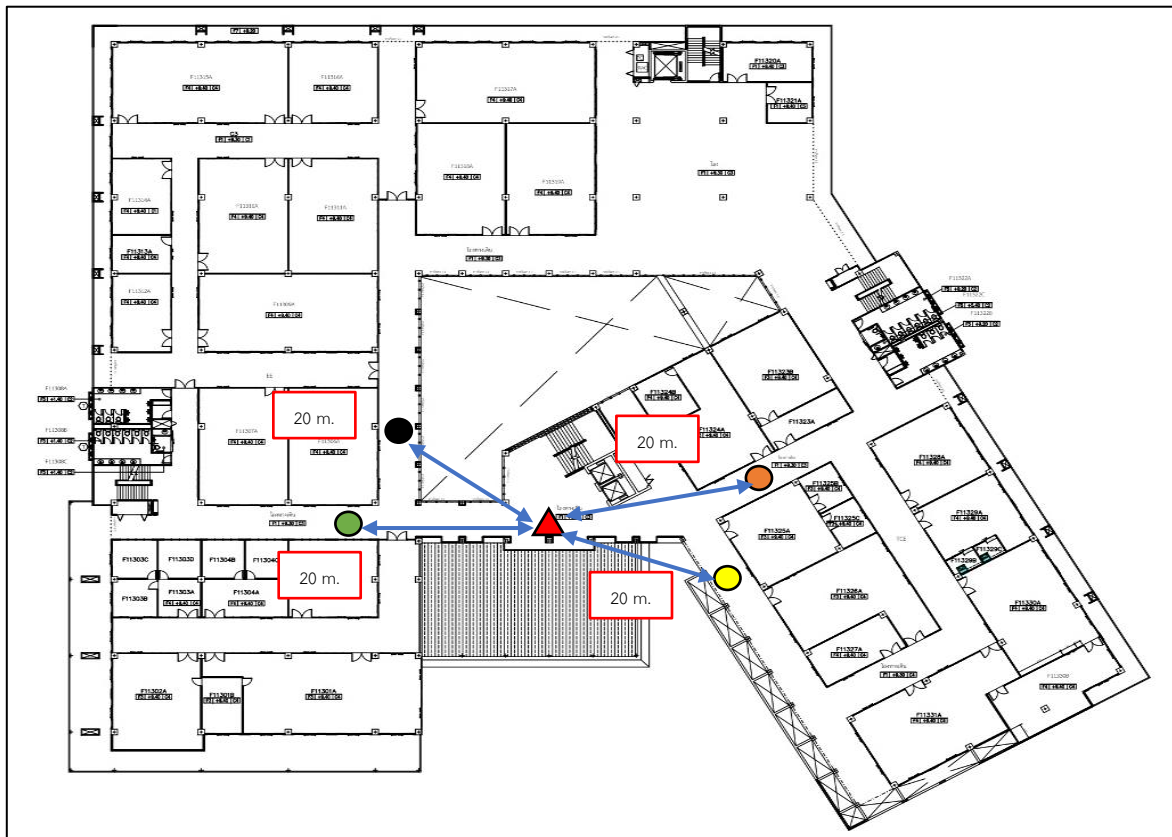


รูปที่ 72 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 1 ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 1

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-51
7002	ดีมาก	-55
7003	ดีมาก	-55
7004	ไม่ชัดเจน	-76

จากผลการทดลองในตารางที่ 13 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 4 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 1 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก แต่เครื่องหมายเลข 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากเครื่องหมายเลข 7004 อยู่หลังเราเตอร์ ซึ่งอยู่นอกขอบของสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณจากเราเตอร์ได้ดีเท่ากับด้านหน้าและด้านข้างเราเตอร์ โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -51 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -55 dBm เครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -55 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -76 dBm ซึ่งเมื่อเครื่องหมายเลข 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน จะทำให้เครื่องหมายเลขอื่นรับสัญญาณไม่ชัดเจนตามไปด้วยเพราะอยู่ในโครงข่ายเดียวกัน

2. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 2



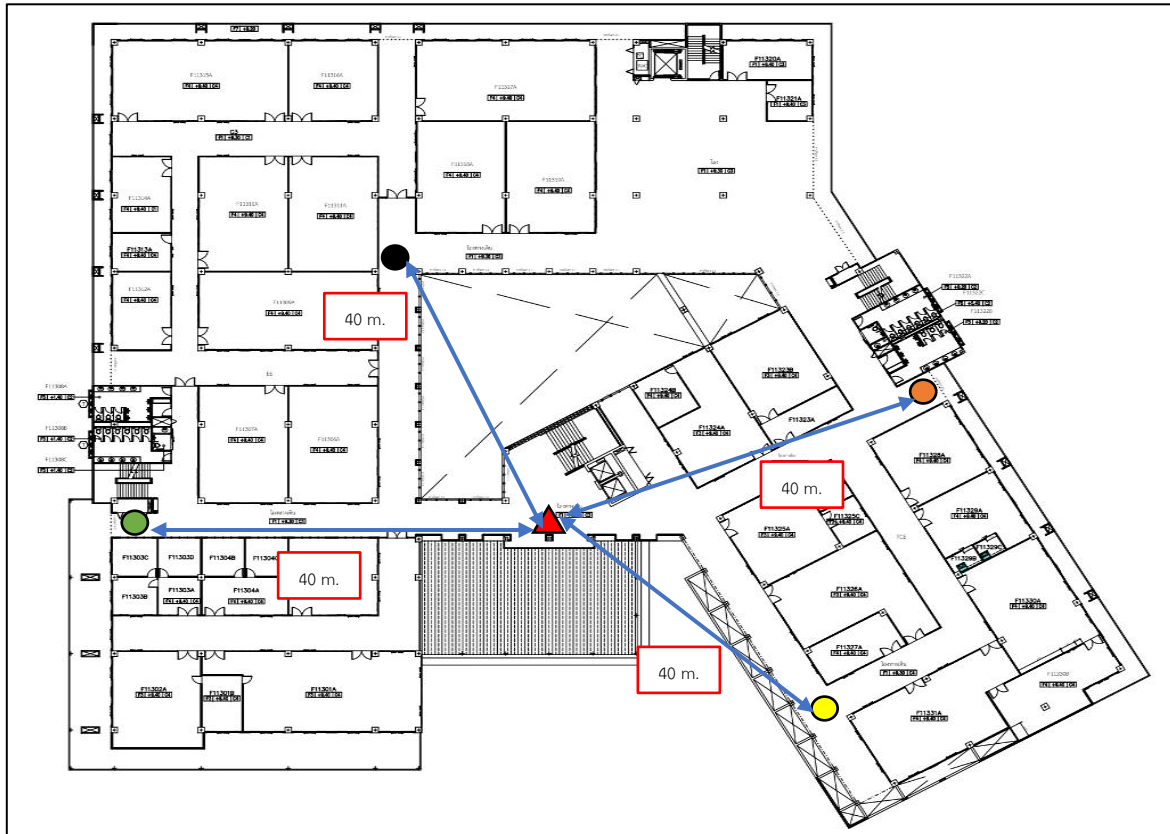
รูปที่ 73 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 2
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 2

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-57
7002	ดีมาก	-54
7003	ดีมาก	-54
7004	ไม่ชัดเจน	-76

จากผลการทดลองการทดลองในตารางที่ 14 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 4 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางรูปแบบที่ 2 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก แต่เครื่องหมายเลข 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากเครื่องหมายเลข 7004 อยู่หลังเราเตอร์ ซึ่งอยู่นอกกลุ่มของสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณจากเราเตอร์ได้ดีเท่ากับด้านหน้าและด้านข้างเราเตอร์ โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -57 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -54 dBm เครื่องหมายเลข 7003

อยู่ที่ -54 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -76 dBm ซึ่งเมื่อเครื่องหมายเลข 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจนและทำให้เครื่องหมายเลขอื่นได้ยินเสียงไม่ชัดเจนตามไปด้วย

3. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 3



รูปที่ 74 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 3

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง ในระยะทางรูปแบบที่ 3

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-73
7002	ดีมาก	-73
7003	ไม่ชัดเจน	-73
7004	ไม่ชัดเจน	-81

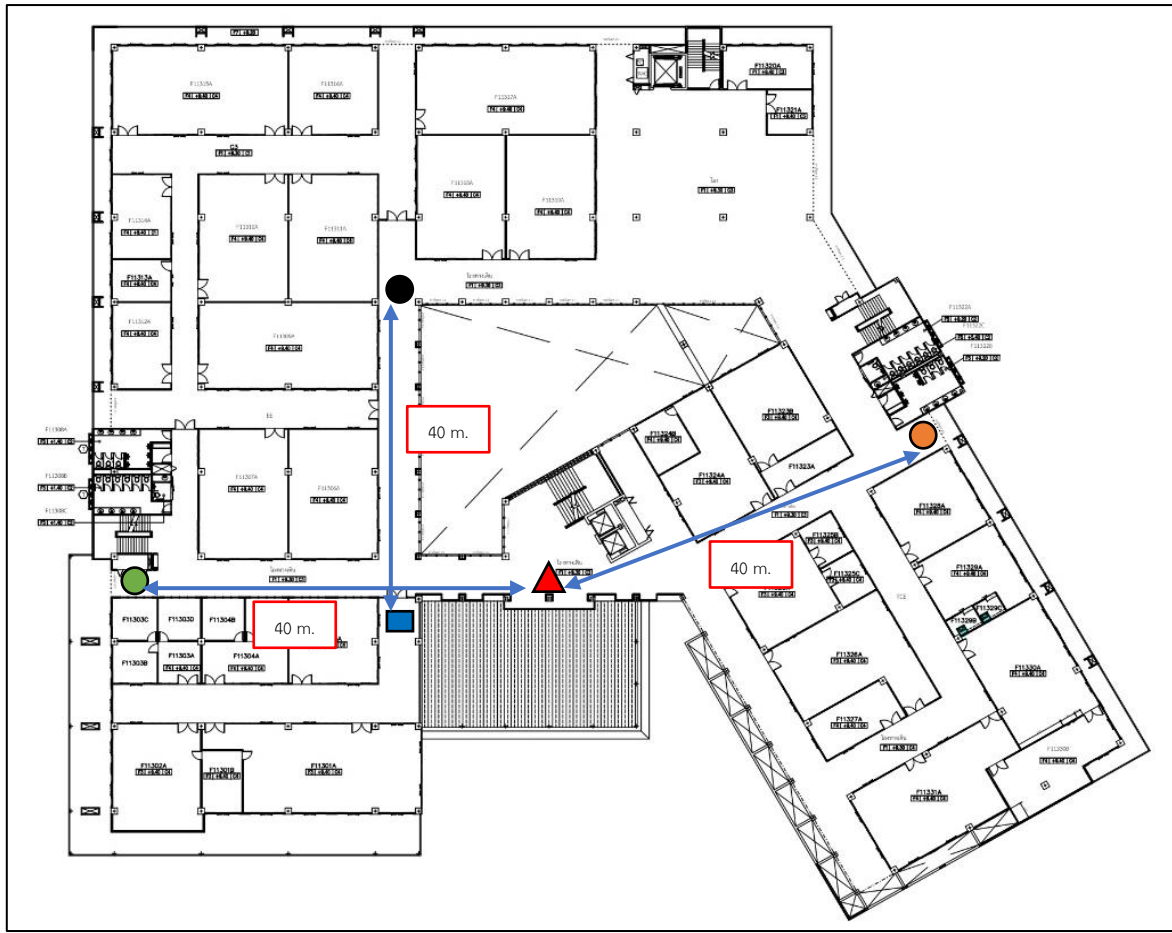
จากผลการทดลองในตารางที่ 15 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 4 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางรูปแบบที่ 3 ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 2 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก แต่เครื่องหมายเลข 7003 และเครื่องหมาย 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากเครื่องหมายเลข 7004 อยู่หลังเราเตอร์ ซึ่งอยู่นอกกลุ่มของสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณจากเราเตอร์ได้ดีเท่ากับด้านหน้าและด้านข้างเราเตอร์ เครื่องหมายเลข 7003 อาจอยู่นอกกลุ่มของสัญญาณ ทำให้สามารถรับสัญญาณได้น้อย โดยค่าความ

แรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -73 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -73 dBm เครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -73 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -81 dBm ซึ่งเมื่อเครื่องหมายเลข 7003 และเครื่องหมายเลข 7004 ได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจนและทำให้เครื่องหมายเลขอื่นได้ยินสัญญาณไม่ชัดเจนตามไปด้วย

4) การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint โดยมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์

ในส่วนของการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานโดยเป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint และใช้งานหมายเลขการสื่อสารทางเสียงแบบประชุมสายหมายเลข 7000 โดยมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 4 ระยะทาง ได้แก่ ระยะห่างจากเราเตอร์ระหว่างเครื่องผู้ใช้งาน 3 เครื่องโดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ในรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 75 ระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ในรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 76 ระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 4 เครื่องโดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ในรูปแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 77 และระยะห่างระหว่างเครื่องผู้ใช้งานเป็นระยะทาง 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ในรูปแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 78 โดยสถานที่ที่ผู้วิจัยเลือกใช้การทำทดสอบการสื่อสารทางเสียงทั้งแบบ Multipoint คือ ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ ศูนย์เครื่องมือ F11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 1



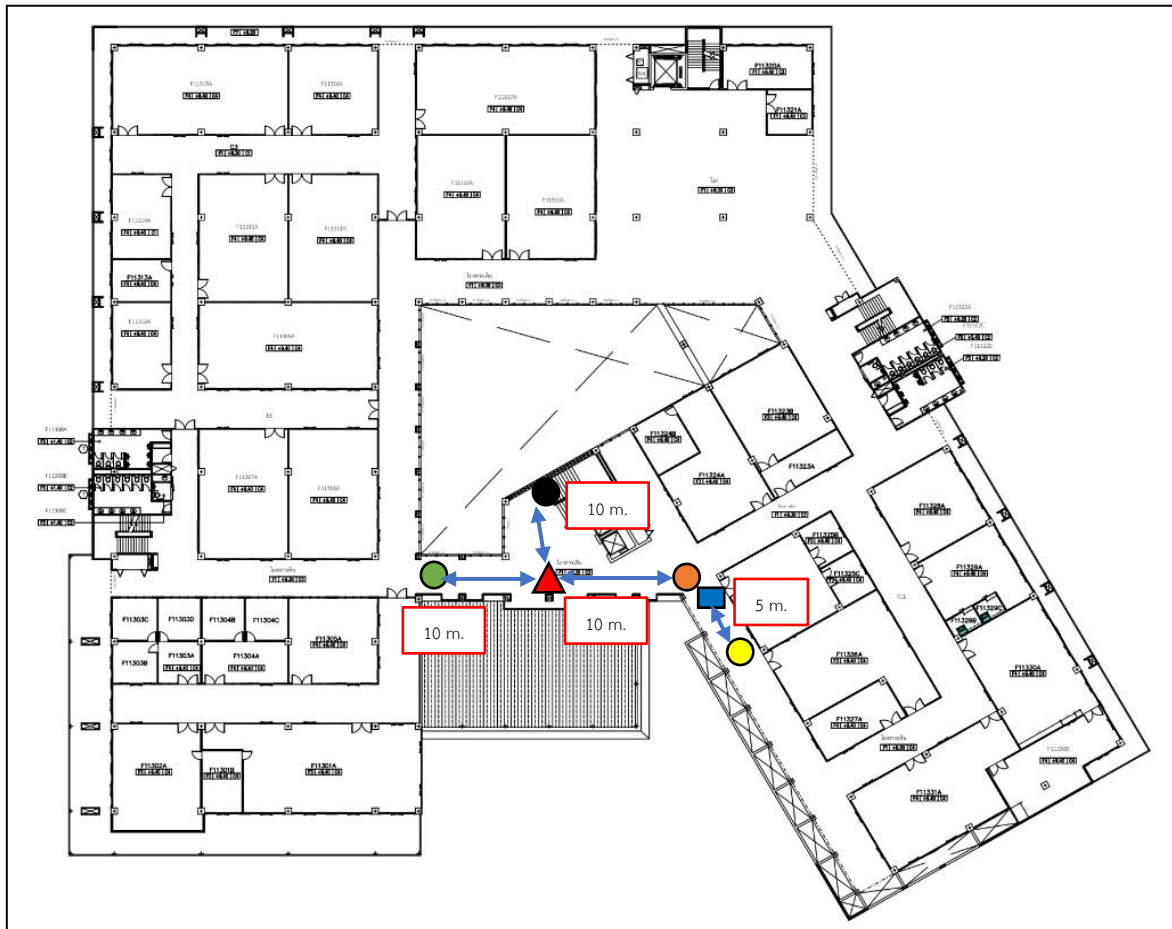
รูปที่ 75 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 1

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 3 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 1

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 3 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-54
7002	ดีมาก	-71
7003	ดีมาก	-73

ในตารางที่ 16 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 3 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 1 และติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่ม 1 ตัวบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7001 ทำให้ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 3 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -54 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -71 dBm และเครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -73 dBm

2. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 2



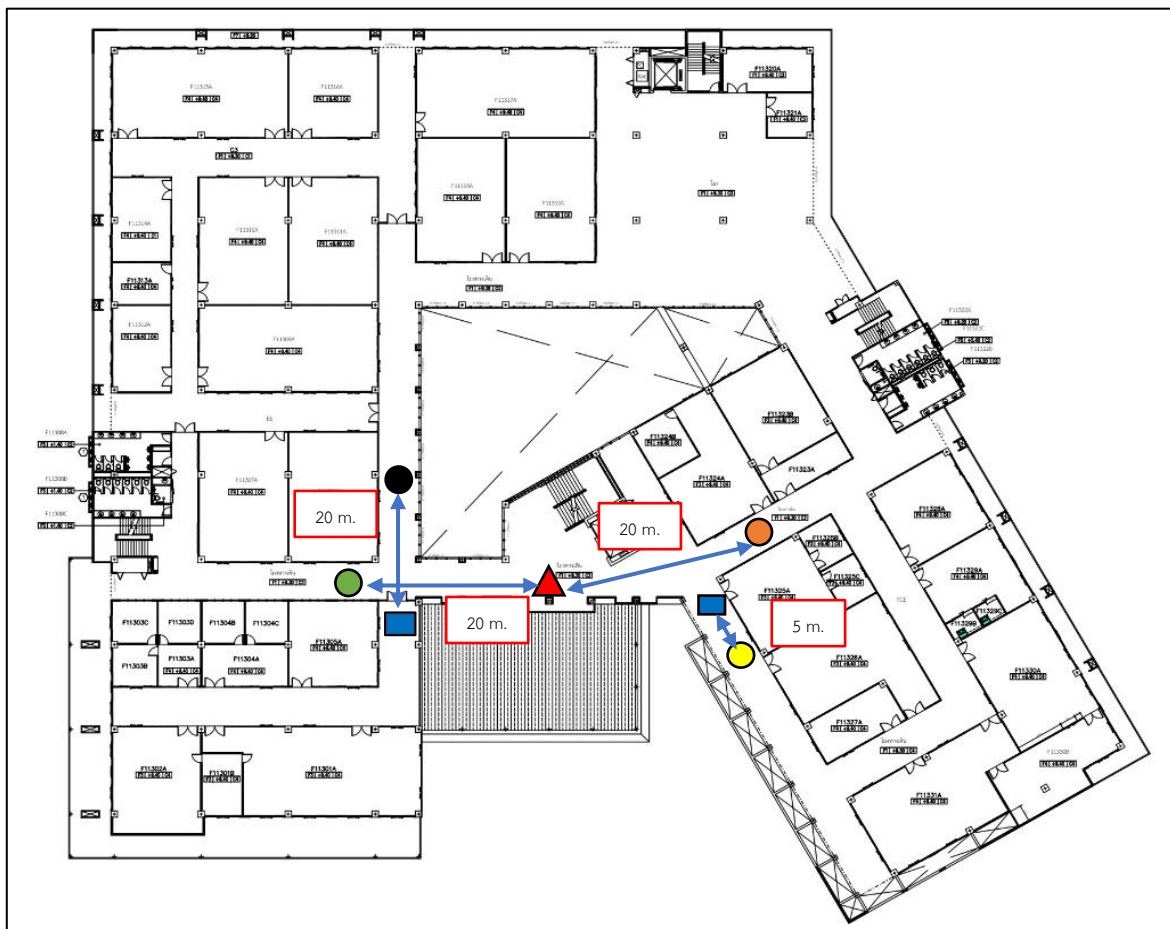
รูปที่ 76 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 2

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 2

เครื่องมือหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-48
7002	ดีมาก	-58
7003	ดีมาก	-58
7004	ดี	-50

จากผลการทดลองในตารางที่ 17 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 4 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 2 และติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่ม 1 ตัวบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7004 ทำให้ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 4 เครื่องได้ยินกันชัดเจนมากขึ้น โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -48 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -58 dBm เครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -58 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -50 dBm

3. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 3



รูปที่ 77 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 3

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 3

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-53
7002	ดีมาก	-59
7003	ดีมาก	-59
7004	ดี	-64

จากผลการทดลองในตารางที่ 18 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 4 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางแบบที่ 3 และติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่ม 2 ตัวบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7001 และบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7004 ทำให้ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 3 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีมาก โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -53 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -59 dBm เครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -59 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -64 dBm ตามลำดับ

4. การทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 4



รูปที่ 78 แผนผังแสดงตำแหน่งการติดตั้งเราเตอร์และเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 4

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสาร 4 เครื่อง โดยมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ในระยะทางรูปแบบที่ 4

เครื่องหมายเลข	การโทรแบบประชุมสาย 4 เครื่อง	
	การได้ยิน	RSSI (dBm)
7001	ดีมาก	-60
7002	ดีมาก	-64
7003	ดีมาก	-64
7004	ดี	-70

จากผลการทดลองในตารางที่ 19 พบว่าเมื่อทดสอบการสื่อสารระหว่างเครื่องมือสื่อสารทั้ง 3 เครื่องที่ระยะห่างในระยะทางรูปแบบที่ 4 และติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่ม 2 ตัวบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7001 และบริเวณด้านหน้าเครื่องหมายเลข 7004 ทำให้ประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของทั้ง 4 เครื่องได้ยินกันชัดเจนดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยค่าความแรงของสัญญาณหรือ RSSI เมื่อทั้ง 4 เครื่องทำการโทรแบบประชุมสาย ค่าความแรงของสัญญาณเครื่องหมายเลข 7001 อยู่ที่ -60 dBm เครื่องหมายเลข 7002 อยู่ที่ -64 dBm เครื่องหมายเลข 7003 อยู่ที่ -64 dBm และเครื่องหมายเลข 7004 อยู่ที่ -70 dB ตามลำดับ

5.3 สรุปผลการทดสอบ

ในการทดสอบการใช้งานระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายบนคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งเป็นการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Point-2-Point จำนวน 2 เครื่อง การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 3 เครื่อง การทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 4 เครื่อง และการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint และมีการนำอุปกรณ์ทวนสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเราเตอร์ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ผลการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานที่เป็นการสื่อสารทางเสียงแบบ Point-2-Point จำนวน 2 เครื่อง สามารถติดต่อสื่อสารได้ในระดับที่ดีมากทั้งในระยะ 20 เมตร 40 เมตร และ 80 เมตร ในพื้นที่การทดสอบ ชั้น 3 อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ ศูนย์เครื่องมือ F11 ซึ่งมีลักษณะพื้นที่ที่เต็มไปด้วยกำแพงและวัตถุขนาดใหญ่ที่อาจจะมีผลต่อการแพร่กระจายสัญญาณ แต่ระบบสามารถทำการสื่อสารได้มาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการนำเสนอ

2. ผลการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 3 เครื่องสามารถติดต่อสื่อสารในระดับที่ดีมากทั้งในระยะการสื่อสารในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 แต่ในรูปแบบที่ 3 การติดต่อสื่อสารมีปัญหาสัญญาณขัดข้องอยู่บ้าง อาจจะเป็นเนื่องจากบริเวณตำแหน่งของเครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7001 มีวัตถุขนาดใหญ่บังสัญญาณหรือทำให้สัญญาณมีการเลี้ยวเบนมากเกินไป แต่ก็ยังสามารถทำการติดต่อสื่อสารกันได้ตามปกติ

3. ผลการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint จำนวน 4 เครื่องสามารถติดต่อสื่อสารในระดับที่ดีเยี่ยมทั้งในระยะการสื่อสารในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 แต่ในรูปแบบที่ 3 มีการติดต่อสื่อสารของสัญญาณเกิดขัดข้องอยู่บ้าง อาจจะเป็นเนื่องจากบริเวณตำแหน่งของเครื่องผู้ใช้งานหมายเลข 7003

และ 7004 มีวัตถุประสงค์ใหญ่บังสัญญาณหรือทำให้สัญญาณมีการเลี้ยวเบนมากเกินไป ทำให้การสื่อสารกันแบบ ประชุมสายมีสัญญาณที่ติดขัดไปด้วย จึงจำเป็นต้องมีการแก้ปัญหาโดยการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่มขึ้น

4. ผลการทดสอบเครื่องผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงแบบ Multipoint โดยมีการนำอุปกรณ์ทวน สัญญาณมาใช้งานร่วมกับเรเตอร์พบว่า สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ในระดับที่ดีเยี่ยมทั้งในระยะทางการ สื่อสารในรูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการแก้ปัญหาบริเวณที่ สัญญาณไม่ชัดเจนได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่มเติม

6. ระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุในรายงานความคืบหน้าครั้งที่ 1 โดยผู้วิจัยพบว่าที่ความถี่ 1,000 MHz, 2,325 MHz และ 3,000 MHz (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกหน่วยความถี่เป็น GHz) สามารถเดินทางไปในโพรงถ้ำในแนวระดับสายตา (Line of Sight; LOS) ได้ดีกว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า ในขณะที่ถูกนำไปใช้ภายนอกถ้ำซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นอากาศว่าง (Free Space) ความถี่สูงกลุ่มนี้จะมีค่าการสูญเสียในอากาศว่างสูงกว่าความถี่ที่ต่ำกว่า แต่ผลจากการวัดทดสอบที่ความถี่เดียวกันนี้ด้วยการส่งและรับคลื่นที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line of Sight; NLOS) กลับพบว่ามีค่าอัตราการสูญเสียจากการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรสูงกว่าความถี่ต่ำทั้งภายในถ้ำ หินปูนและหินทราย ส่งผลให้ค่ากำลังของคลื่นความถี่นี้มีค่าลดลงมากในบริเวณที่มีการส่งผ่านคลื่นแบบ NLOS และไม่สามารถเดินทางต่อไปได้ในบริเวณถัดไปที่เป็นแบบ LOS ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายวิทยุสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำในระบบดิจิทัลจึงเหมาะที่จะเลือกใช้ความถี่ในกลุ่มนี้ เนื่องจากสามารถติดตั้งโหนดหลักที่เป็นแม่ข่ายไว้ ณ ตำแหน่งที่เป็น NLOS หรือบริเวณที่เป็น L-bend ซึ่งคลื่นความถี่กลุ่มดังกล่าวมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านค่อนข้างสูงกว่าความถี่ต่ำได้ และที่สำคัญในปัจจุบันมีอุปกรณ์ที่เป็นโมดูลสื่อสารต่าง ๆ ที่ความถี่กลุ่มนี้ (โดยเฉพาะที่ความถี่ 2.4 GHz) มีการผลิตออกมาจำหน่ายเป็นจำนวนมาก และมีหลายระดับคุณภาพให้เลือกนำมาประยุกต์ใช้งานได้โดยง่าย ทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกที่จะออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องส่งวิทยุความถี่สูงระบบดิจิทัลที่ความถี่ 2.4 GHz ในขั้นต้นเพื่อนำไปทดสอบและรายงานผลการทดสอบต่อไป

6.1 ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

จากรายงานความคืบหน้างานวิจัยครั้งที่ 1 ผู้วิจัยได้นำเสนอการออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล โดยได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลไว้ 2 แนวทาง คือ

1) การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRf24L01

การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRf24L01 ร่วมกับระบบสมองกลฝังตัว Arduino Nano แนวทางนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โมดูลสื่อสารสำเร็จรูป nRf24L01 โดยที่โมดูลสื่อสารดังกล่าวได้มาตรฐาน ZigBee/IEEE 802.15.4 ทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการจัดการทรัพยากรของระบบ เครื่องลูกข่ายในระบบจะต้องมีไมโครโฟนและหูฟัง รวมถึงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter; ADC) และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital to analog converter; DAC) สำหรับเปลี่ยนสัญญาณเสียงพูดให้สามารถสื่อสารผ่านโครงข่ายสื่อสารไร้สายและรับฟังเสียงสนทนาได้

ที่ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยในแนวทางนี้ในความคืบหน้าครั้งที่ 1 พบว่าการใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRf24L01 ดังกล่าว สามารถทำการสื่อสารระหว่างโหนดหลักกับโหนดย่อยในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่เป็นแบบจุดสู่หนึ่งจุด (Point to Point; P2P) ได้และมีคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ชัดเจนยอมรับได้ และในการวิจัยขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยพบว่า การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRf24L01 ในแนวทางดังกล่าวยังไม่สามารถสร้างโครงข่ายไร้สายที่เป็นแบบจุดสู่หลายจุด (Point to Multipoint; PMP) ได้ และพัฒนาเป็นการสื่อสารเป็นกลุ่มย่อยได้ เนื่องจากมีปัญหาในด้านขนาดของช่องสัญญาณและการเชื่อมโยงข้อมูลในโครงข่ายที่ไม่เสถียรที่เกิดจากโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของโมดูลสื่อสารดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้พัฒนาต่อให้ระบบเครื่องรับ-

ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลมีความสามารถตรงตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ ผู้วิจัยจึงไม่ใช้แนวทางนี้ในการพัฒนาระบบในอนาคต

2) การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi)

การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11g, 802.11n, 802.11 ac โดยใช้อุปกรณ์โครงข่าย Wi-Fi ที่ได้มาตรฐานดังกล่าวในการสร้างโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เครื่องลูกข่าย (Client) จะถูกทำการบริหารจัดการผ่านเครื่องแม่ข่าย (Server) สามารถเพิ่มจำนวนลูกข่ายสื่อสารด้วยเสียงได้สูงสุดถึง 100 ลูกข่าย

ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยในแนวทางนี้ในรายงานความคืบหน้างานวิจัยครั้งที่ 1 พบว่าการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารอินเทอร์เน็ตไร้สายถูกใช้เป็นที่โครงข่ายหลักของการสื่อสารแบบไร้สาย สามารถทำการติดต่อสื่อสารด้วยการสนทนาได้ และมีคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ค่อนข้างชัดเจน ผู้วิจัยได้ทดลองใช้เครื่องลูกข่าย 2 แบบคือ ใช้เครื่องโทรศัพท์มือถือที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Android และเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi ผู้วิจัยได้ทำการจัดการอุปกรณ์เราเตอร์ (Router) ในชั้นโครงข่าย (Network Layer) ที่ทำหน้าที่แจกจ่ายไอพี (Internet Protocol) เนื่องจากระบบส่วนใหญ่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้งานภายในถ้าเป็นหลัก ดังนั้นอุปกรณ์เราเตอร์จึงไม่จำเป็นต้องใช้ซิมการ์ด (Sim Card) ของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G/4G เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet Gateway) แต่อย่างใด ซึ่งถือว่าเป็นจุดเด่นของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ยังสามารถสร้างโครงข่ายไร้สายที่เป็นแบบจุดสู่หลายจุดได้ และสามารถพัฒนาเป็นการสื่อสารด้วยเสียงเป็นกลุ่มย่อยได้ ทำให้สามารถนำแนวทางการวิจัยดังกล่าวนี้มาใช้พัฒนาต่อให้เป็นมีความสามารถตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ และผู้วิจัยจะให้ความสนใจกับการพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารด้วยเสียงโดยมีเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาที่ต่ำกว่าการใช้เครื่องโทรศัพท์มือถือ

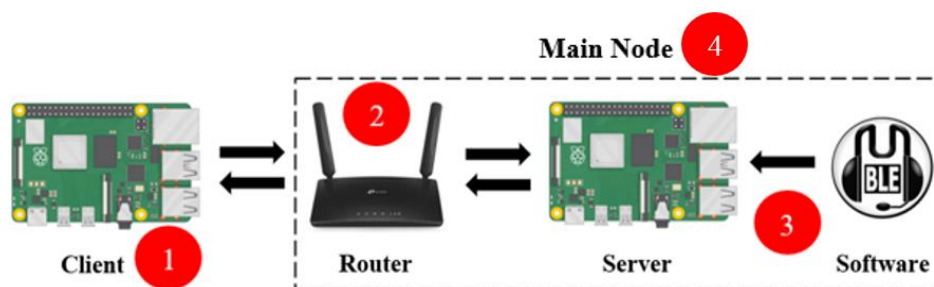
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ การออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลเพื่อการใช้งานจริงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ซึ่งเป็นการออกแบบระบบโครงข่ายสื่อสารดิจิทัลความถี่สูงกำลังส่งต่ำ (ไม่เกิน 1 วัตต์) ขนาดเล็กเหมาะสำหรับพกพาขณะปฏิบัติการในถ้า โดยใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่สูงที่เหมาะสม ที่สามารถติดต่อกันภายในถ้าโดยใช้หลักการคล้ายระบบโครงข่ายเซ็นเซอร์ (Sensors network) โดยออกแบบให้มีโหนดหลัก (Backbone nodes หรือ Main node) และโหนดผู้ใช้งาน (Mobile nodes หรือ Client) จำนวนหนึ่งที่สามารถติดต่อสื่อสารเชื่อมโยงถึงกันได้โดยใช้โทโปโลยีแบบตาข่าย (Mesh topology) โดยโหนดผู้ใช้งานสามารถติดต่อถึงโหนดอื่น ๆ ได้โดยผ่านโหนดหลักที่อยู่ใกล้กันมากที่สุด และสามารถติดต่อข้ามไปยังโหนดผู้ใช้งานอื่น ๆ ที่เป็นลูกข่ายของโหนดหลักอีกโครงข่ายหนึ่งได้โดยการเชื่อมโยงระหว่างโหนดหลักที่อยู่ใกล้กันแบบเป็นทอด ๆ กันไป ซึ่งในโครงข่ายดังกล่าวจะประกอบด้วยโหนดหลักอย่างน้อย 3 โหนดหลักต่อหนึ่งโครงข่าย และมีโหนดผู้ใช้งานจำนวน 5 ชุดต่อหนึ่งโหนดหลัก พร้อมทั้งนำเสนอผลการทดสอบระบบในพื้นที่ของถ้าเพื่อการใช้งานจริง

6.2 การดำเนินงานวิจัยการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอรายละเอียดของการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย เช่น แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย การวางแผนการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้ำ และวิธีการดำเนินการทดสอบความแรงสัญญาณที่ต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้ด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับในเทอมของพลังงานและมีหน่วยการวัดเป็น dBm

6.2.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบสื่อสารทางเสียงแบบไร้สาย

การออกแบบโครงสร้างของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ที่ผู้วิจัยนำเสนอ แสดงเป็นแผนภาพตามรูปที่ 79 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ในระบบ คือ ลูกข่าย (Client) เราเตอร์ (Router) และ แม่ข่าย (Server) แสดงด้วยหมายเลข 1 ถึง 3 ตามลำดับ ส่วนหมายเลข 4 เรียกว่า โหนดหลัก (Main node) ซึ่งจะใช้เรียกส่วนของระบบที่ประกอบด้วย เราเตอร์ และแม่ข่าย ที่มีโปรแกรม (Software) การเฝ้าระวังและการตรวจสอบการทำงานของระบบดังกล่าวทำงานอยู่ในส่วนนี้ รายละเอียดของอุปกรณ์ตามหมายเลข 1 ถึง 4 ในรูปที่ 79 มีดังนี้



รูปที่ 79 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย

หมายเลข (1) เครื่องลูกข่าย ผู้วิจัยใช้ฮาร์ดแวร์หลักของเครื่องลูกข่ายเป็นระบบสมรรถนะสูง Raspberry Pi 4 Model ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเสียงของผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงทั้งการส่งข้อมูลเสียงไปให้ผู้ใช้งานปลายทางและรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้งานปลายทาง โดยทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่หลักของโครงข่าย ในการพัฒนาโปรแกรมในเครื่องลูกข่ายนี้ จะพัฒนาเพื่อใช้งานในระบบปฏิบัติการราสเบียน (Raspbian) ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่ใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและทำงานร่วมกับไลบรารี TalkiePi ทำให้สามารถทำการกำหนดค่าโครงข่าย (configuration) เพื่อใช้วิธีการสื่อสารทางเสียงแบบวีโอไอพี (Voice Over IP; VoIP) ซึ่งระบบทั้งหมดนี้เมื่อทำงานร่วมกันจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานภายใน Raspberry Pi 4 Model เป็นตัวกลางในการสื่อสารโปรโตคอลต่าง ๆ บนระดับชั้น Open Systems Interconnection Model (OSI Model Layer) อาทิเช่น ระดับชั้นเคลื่อนย้ายข้อมูล (Transport Layer) ที่ทำการเคลื่อนย้ายข้อมูลประเภทเสียงผ่านโปรโตคอล TCP/UDP เป็นต้น หรือระดับชั้นโครงข่าย

(Network Layer) ที่ทำการสร้างการเชื่อมต่อและค้นหาเส้นทางเพื่อเคลื่อนย้ายข้อมูลไปที่โนดหลัก (Main Node) และเครื่องแม่ข่าย (Server) เป็นต้น

หมายเลข (2) เราเตอร์ (Router) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยประยุกต์ใช้เราเตอร์ 4G Router TP-LINK (Archer MR200) Wireless AC750 Dual Band ซึ่งอุปกรณ์เราเตอร์จัดว่ามีความสำคัญในระบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless Network) ที่ถูกออกแบบขึ้น โดยเราเตอร์จะดำเนินการในชั้นโครงข่าย (Network layer) ทำหน้าที่แจกจ่ายไอพี (Internet Protocol - IP) ให้แก่เครื่องลูกข่ายเพื่อเข้าใช้งานในโครงข่ายไร้สาย รวมถึงการสร้างเส้นทางขนส่งในระดับชั้นเคลื่อนย้ายข้อมูล เพื่อให้การสื่อสารทางเสียงสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ เราเตอร์ยังทำหน้าที่กระจายสัญญาณ Wi-Fi ในย่านความถี่ 2.4 GHz ให้เครื่องลูกข่ายและเครื่องแม่ข่ายสามารถสื่อสารกันได้ภายในระบบ ในงานวิจัยนี้ เราเตอร์ดังกล่าวจะไม่มีติดตั้ง Sim card 3G/4G ใด ๆ เพราะระบบที่ออกแบบขึ้นสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งความสามารถของอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Gateway) แต่อย่างใด ซึ่งทำให้ระบบที่ออกแบบขึ้นมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานภายในถ้ำ อย่างไรก็ตาม ในระบบโครงข่ายไร้สายที่มีเราเตอร์เปรียบเป็นสถานีฐาน (Base station) หรือจะเรียกรวมว่าเป็นโนดหลัก แต่ด้วยข้อจำกัดถึงระยะทาง รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการรบกวนและการลดทอนต่าง ๆ เมื่อนำไปใช้งานภายในถ้ำ ในการใช้งานจริงจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือทวนสัญญาณ (Repeater) เพื่อทำหน้าที่ในการทวนสัญญาณเนื่องจากระยะทางที่ไกลจากสถานีฐานรวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับ-ส่งสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น

หมายเลข (3) เครื่องแม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่การจัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบที่ทำการเชื่อมต่อภายในโครงข่าย ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องแม่ข่ายขึ้นโดยใช้อุปกรณ์หลักเครื่องแม่ข่ายเป็น Raspberry Pi 4 Model และมีการติดตั้งซอฟต์แวร์ (Software) หรือโปรแกรม (Program) บริหารจัดการโครงข่าย เพื่อใช้ในการเฝ้าระวังและการตรวจสอบการทำงานของระบบดังกล่าว และมีการทำงานร่วมกับระบบซอฟต์แวร์ Mumble Server เพื่อการใช้งานโปรโตคอลวีโอไอพี

หมายเลข (4) โหนดหลัก (Main node) เป็นการเรียกส่วนของระบบที่ประกอบด้วย เราเตอร์ และแม่ข่าย ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสะดวกในการอธิบายโครงสร้างของระบบ

ผู้วิจัยจะอธิบายเพิ่มเติมถึงรายละเอียดในส่วนต่าง ๆ ในแต่ละหมายเลขให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. เครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีโอไอพี

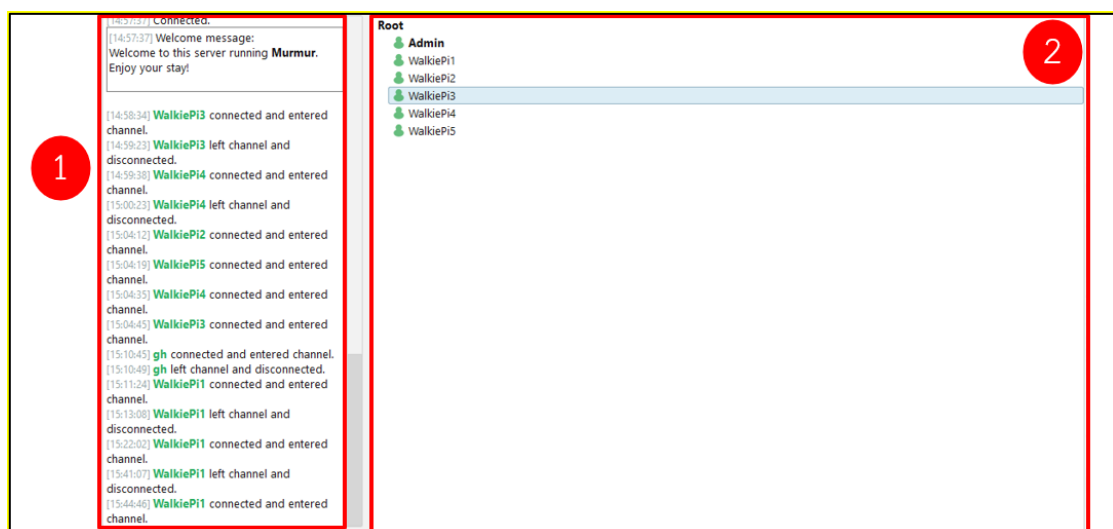
ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีโอไอพี โดยมีตัวอย่างอุปกรณ์เครื่องแม่ข่ายแสดงในรูปที่ 80 จากนั้นผู้วิจัยจะนำเสนอรายละเอียดการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายได้จากซอฟต์แวร์บริหารจัดการโครงข่ายวีโอไอพี ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถแสดงผลบนคอมพิวเตอร์แบบพกพา



รูปที่ 80 อุปกรณ์เครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีไอไอพี

เครื่องแม่ข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีไอไอพี ทำหน้าที่การจัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบที่ทำการเชื่อมต่อภายในโครงข่ายเดียวกัน ซึ่งเครื่องแม่ข่ายจะมีการทำงานร่วมกันทั้ง 2 ระบบ ได้แก่ ระบบฮาร์ดแวร์ที่ประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 4 Model B ที่ทำงานร่วมกับระบบซอฟต์แวร์คือ Mumble Server ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการราชเปียน (Raspbian) และมีโครงข่ายไร้สายแบบ Client/Server หรือ Infrastructure mode

ในส่วนของการจัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบ สามารถดำเนินการได้โดยเจ้าหน้าที่ดูแลระบบ (Administrator) ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมบริหารจัดการโครงข่าย ซึ่งได้แสดงผลการทำงานของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) ดังในรูปที่ 81



รูปที่ 81 การตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายด้วยซอฟต์แวร์บริหารจัดการโครงข่าย

จากรูปที่ 81 เป็นตัวอย่างการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายได้จากโปรแกรมบริหารจัดการโครงข่าย โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

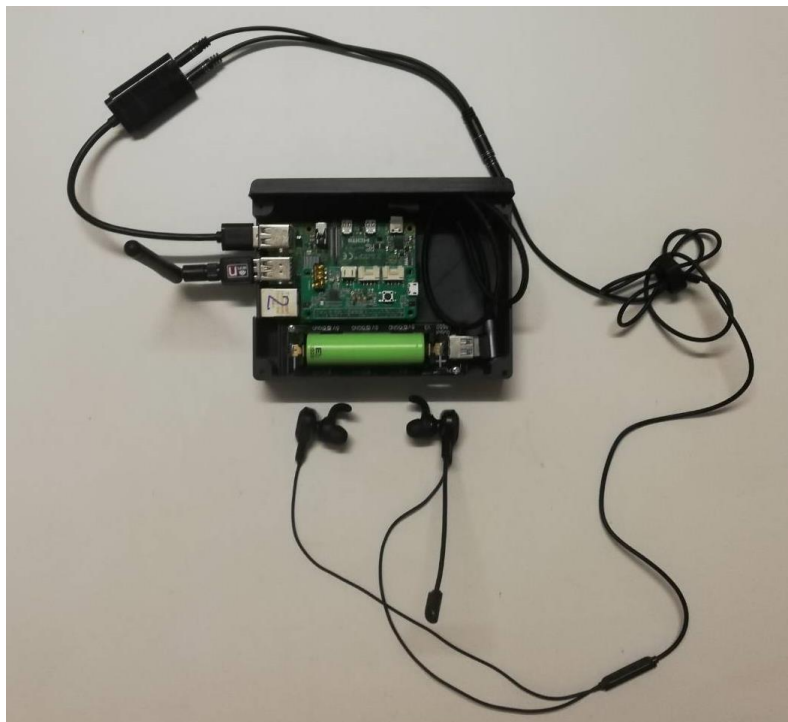
หมายเลข (1) เป็นการแสดงผลข้อความบอกสถานะการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องแม่ข่ายและเครื่องลูกข่ายในระบบ โดยมีข้อความบอกสถานะหลัก ๆ ทั้งหมด 2 สถานะ ยกตัวอย่างเช่น ‘WalkiePi3 connected and entered channel’ หมายถึง อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม (WalkiePi3) ทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายในระบบ และ ‘WalkiePi3 left channel and disconnected’ หมายถึง อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม (WalkiePi3) ทำการยกเลิกการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายในระบบ

หมายเลข (2) เป็นการแสดงผลเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบที่ทำการเชื่อมต่อเครื่องแม่ข่ายที่พร้อมสำหรับการสื่อสาร ซึ่งตัวอย่างที่แสดงผลมีการแสดงผลผู้ใช้งานที่แสดงสถานะพร้อมใช้งานทั้งหมด 6 ผู้ใช้งาน ประกอบไปด้วย 1. ผู้ดูแลระบบ (Administrator) 2. เครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง (WalkiePi1) 3. เครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง (WalkiePi2) 4. เครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม (WalkiePi3) 5. เครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ (WalkiePi4) และ 6. เครื่องลูกข่ายหมายเลขห้า (WalkiePi5)

นอกจากนี้ หากผู้ดูแลระบบพบปัญหาหรือต้องการเข้าไปตั้งค่าต่าง ๆ ในเครื่องแม่ข่ายสามารถเชื่อมต่อได้โดยผ่านคอมพิวเตอร์พกพาด้วยโปรแกรม Putty ตามหมายเลข IP ที่กำหนดให้แก่เครื่องแม่ข่ายในระบบ รวมถึงการใช้ซอฟต์แวร์บริหารจัดการโครงข่ายภายในหนึ่งโหนดหลักที่กำลังพัฒนาขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถใช้เทคโนโลยีการสื่อสารทางเสียงแบบวีโอไอพีได้มีประสิทธิภาพ

ข. เครื่องลูกข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีโอไอพี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การทำงานของเครื่องลูกข่ายซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์พกพาเพื่อใช้ในการสื่อสารด้วยเสียงแบบวีโอไอพี หน้าที่หลักของเครื่องลูกข่ายคือทำการประมวลผลข้อมูลเสียงของผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงทั้งการส่งข้อมูลเสียงไปที่ผู้ใช้งานปลายทางและรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้งานปลายทางตามโปรโตคอลที่กำหนดไว้ ในการส่งข้อมูลเสียงออกไปยังปลายทางนั้น ตัวประมวลซึ่งเป็นระบบสมองกลฝังตัวจะทำการเข้ารหัสสัญญาณเสียงตามอัลกอริทึมมาตรฐาน Constrained Energy Lapped Transform (CELT) ก่อนจะส่งข้อมูลเป็นแพคเกจ (Package) ออกไปยังผู้รับปลายทางตามโปรโตคอลของการสื่อสารที่ผู้ดูแลระบบกำหนดไว้ ส่วนในการรับสัญญาณเสียงก็จะประมวลผลที่ตรงกันข้ามกับขั้นตอนของการส่งข้อมูล คือทำการถอดรหัสสัญญาณเสียงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ในงานวิจัยนี้จะใช้การรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz รูปภาพเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 82



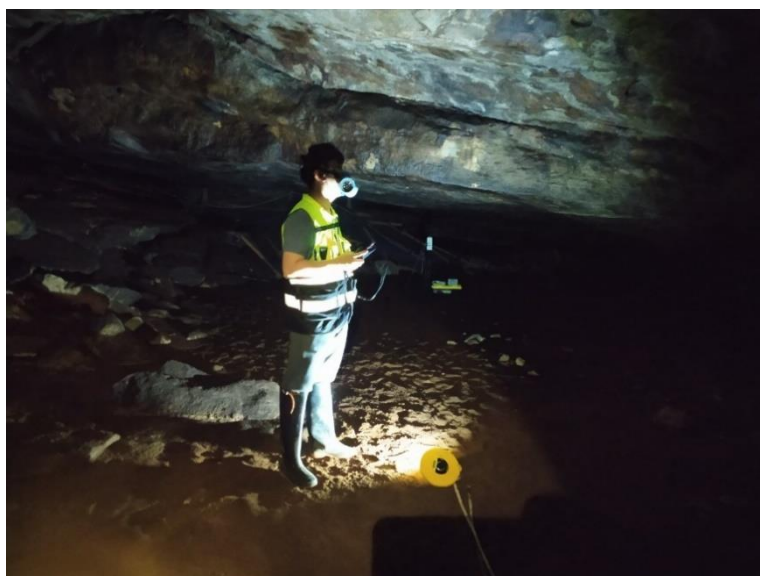
รูปที่ 82 เครื่องลูกข่ายพร้อมอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีไอไอพี

จากรูปที่ 82 แสดงภาพเครื่องลูกข่ายในระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีไอไอพีที่ผู้วิจัยออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย 1. Raspberry Pi 4 Model 2. ReSpeaker 2 - Mics Pi HAT และ 3. ชุดหูฟัง HP Gaming Headset H150 ระบบ

ตัวประมวลผลหลักในระบบเครื่องลูกข่าย ผู้วิจัยประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 4 Model 2 ซึ่งมีระบบปฏิบัติการราสเบียนที่ทำงานร่วมกับไลบรารี TalkiePi ทำให้สามารถสื่อสารทางเสียงแบบวีไอไอพี และประยุกต์ใช้บอร์ด ReSpeaker 2 - Mics Pi HAT ที่สามารถรับสัญญาณเสียงจากการนำชุดหูฟัง HP Gaming Headset H150 ซึ่งเป็นชุดสื่อสารทางเสียงที่มีครบทั้งหูฟังและไมโครโฟนจากการเชื่อมต่อผ่านสายนำสัญญาณและช่องเสียบหูฟังขนาด 3.5 mm. เข้ากับบอร์ดระบบสมองกลฝังตัว ผู้ใช้งานสามารถใช้สวิตช์ที่ติดตั้งอยู่บนบอร์ด ReSpeaker 2 - Mics Pi HAT เป็นปุ่มกดสำหรับการสื่อสารออกไปด้วยการกดเพื่อพูด (Push to Talk) แต่ถ้าผู้ใช้งานไม่ได้ทำการกดปุ่มนี้ก็จะเข้าสู่โหมดการรอรับฟังเสียงสนทนา ซึ่งทำให้สะดวกต่อการใช้งานและประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายภายในถ้ำ ตามรูปที่ 83 และรูปที่ 84



รูปที่ 83 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์เครื่องลูกข่าย 1



รูปที่ 84 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์เครื่องลูกข่าย 2

ในขั้นตอนการใช้งาน ผู้ดูแลระบบจะต้องทำการปรับตั้งอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายในระบบก่อนเสมอ โดยเริ่มจากการนำตัวประมวลผลหลักของเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 4 Model ไปทำการเชื่อมต่อสัญญาณโครงข่ายแบบไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีเราเตอร์ติดตั้งอยู่ในโครงข่ายที่สร้างไว้ และทำการปรับตั้งค่า (Configuration) เริ่มต้นต่าง ๆ ก่อนการใช้งานในไฟล์สำหรับใช้ในการปรับตั้งค่า (CONF file) ที่ผู้ดูแลระบบจะต้องทำการปรับตั้งให้ถูกต้องก่อนทำการรัน (Run) เพื่อเริ่มต้นการทำงานของเครื่องลูกข่าย รายละเอียดของไฟล์หลักและการเขียนไฟล์การปรับตั้งค่าโครงข่ายที่ใช้แสดงไว้ในรูปที่ 85 และรูปที่ 86 เมื่อทำการเชื่อมต่อกับเราเตอร์สำเร็จแล้ว ในขั้นตอนถัดไปผู้ดูแลระบบจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับ

เครื่องแม่ข่ายเพื่อการบริหารจัดการลูกข่ายต่าง ๆต่อไป ตัวอย่างของขั้นตอนในการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย แสดงในรูปที่ 87 และ รูปที่ 88 ตามลำดับ

Name	Date modified	Type	Size
bootcode.bin	5/1/2564 7:30	BIN File	52 KB
cmdline.txt		Text Document	1 KB
config.txt	31/1/2564 19:14	Text Document	2 KB
COPYING.linux	31/1/2564 18:56	LINUX File	19 KB
fixup.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	8 KB
fixup_cd.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	4 KB
fixup_db.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	11 KB
fixup_x.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	11 KB
fixup4.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	6 KB
fixup4cd.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	4 KB
fixup4db.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	9 KB
fixup4x.dat	8/1/2564 15:26	DAT File	9 KB
issue.txt	11/1/2564 13:08	Text Document	1 KB
kernel.img	31/1/2564 18:56	Disc Image File	5,188 KB
kernel7.img	31/1/2564 18:56	Disc Image File	5,534 KB
kernel7l.img	31/1/2564 18:56	Disc Image File	5,856 KB
kernel8.img	31/1/2564 18:56	Disc Image File	15,121 KB
LICENCE.broadcom	5/1/2564 7:30	BROADCOM File	2 KB
start.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	2,872 KB
start_cd.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	773 KB
start_db.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	4,677 KB
start_x.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	3,613 KB
start4.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	2,164 KB
start4cd.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	773 KB
start4db.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	3,630 KB
start4x.elf	8/1/2564 15:26	ELF File	2,006 KB
wpa_supplicant.conf	20/6/2564 13:44	CONF File	1 KB
ssh	1/8/2564 16:19	File	0 KB

รูปที่ 85 การสร้างไฟล์ (กรอบสีแดง) ในตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณไร้สายเข้ากับเราเตอร์

```
wpa_supplicant.conf - Notepad
File Edit Format View Help
country=IN
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
network={
    ssid="Cave_project-2.4"
    psk="28548782"
    key_mgmt=WPA-PSK
}
```

รูปที่ 86 การตั้งค่าชื่อโครงข่าย (SSID) และรหัสผ่านโครงข่าย (PSK) ในการเชื่อมต่อกับเราเตอร์

```

pi@TalkiePi: ~
login as: pi
pi@192.168.1.108's password:
Linux TalkiePi 5.4.51-v7l+ #1333 SMP Mon Aug 10 16:51:40 BST 2020 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Jun 17 14:42:16 2021 from 192.168.1.100

SSH is enabled and the default password for the 'pi' user has not been changed.
This is a security risk - please login as the 'pi' user and type 'passwd' to set
a new password.

pi@TalkiePi:~$ sudo nano /etc/systemd/system/mumble.service

```

รูปที่ 87 ชุดคำสั่งเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย

```

[Unit]
Description = Mumble Client
Requires = systemd-user-sessions.service network.target sound.target
After = multi-user.target

[Service]
User = pi
Group = pi
Type = simple
ExecStart = /home/pi/go/bin/talkiepi -server YOUR_SERVER:PORT -username YOUR_USERNAME -certificate /home/pi/mumble.pem -channel Root
Restart = always
RestartSec = 5

[Install]
WantedBy = multi-user.target

```

รูปที่ 88 ชุดคำสั่งเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย

จากตัวอย่างคำสั่งในรูปที่ 88 แสดงตัวอย่างของการตั้งค่าเครื่องลูกข่ายเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย โดยคำสั่งในการตั้งค่าตามที่ขีดเส้นใต้สีแดง มีรายละเอียดดังนี้

คำสั่ง `-server YOUR_SERVER:PORT` เป็นคำสั่งในการตั้งค่าระบุตำแหน่งไอพีหรือชื่อของเครื่องแม่ข่ายและตามด้วยพอร์ตในการสื่อสาร ยกตัวอย่างเช่น ตั้งค่าได้เป็น `-server 192.168.1.101:64738` เป็นต้น

คำสั่ง `-username YOUR_USERNAME` เป็นคำสั่งในการตั้งค่าชื่อระบุเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ทำการใช้งานอยู่ ยกตัวอย่างเช่น ตั้งค่าเป็น `-username WalkiePi2` เป็นต้น

คำสั่งการตั้งค่าที่อยู่ระหว่าง `-certificate` และ `-channel` โดยจะแทรกด้วยคำสั่ง `-password` โดยเป็นคำสั่งในการตั้งรหัสผ่านของเครื่องแม่ข่ายที่ต้องการเชื่อมต่อ ยกตัวอย่างเช่น ตั้งค่าเป็น `-password youngstar3` เป็นต้น

เมื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายเสร็จสิ้น ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะการใช้งานและการเชื่อมต่อได้จากอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายซึ่งจะมีดวงไฟแสดงสถานะเป็นหลอดไฟแอลอีดี (LED) แบบ RGB

(Red Green and Blue) เพื่อใช้แจ้งสถานะทั้งหมด 3 สถานะ แยกตามสีของแสงไฟแอลอีดี โดยมีรายละเอียดของการแจ้งสถานะดังนี้

สถานะ (1) แสงไฟแอลอีดีสีแดง หมายถึงอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายได้สำเร็จเรียบร้อยแล้วแสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 89

สถานะ (2) แสงไฟแอลอีดีสีเขียว หมายถึงอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายพร้อมใช้งานหรือในเครื่องแม่ข่าย มีอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ที่พร้อมใช้งานมากกว่า 1 อุปกรณ์แสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 90

สถานะ (3) แสงไฟแอลอีดีสีน้ำเงิน หมายถึงสถานะการกดเพื่อพูด (Push to Talk) เมื่อผู้ใช้กดปุ่มเพื่อพูดบนบอร์ดจะแจ้งสถานะเป็นแสงไฟแอลอีดีสีน้ำเงิน ตัวอย่างอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายในการตรวจสอบสถานะการใช้งานแสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 91



รูปที่ 89 แสงไฟแอลอีดีสีแดงแสดงสถานะการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายได้สำเร็จ



รูปที่ 90 แสงไฟแอลอีดีสีเขียวแสดงสถานะที่อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายพร้อมใช้งานหรือในเครื่องแม่ข่าย มีอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ที่พร้อมใช้งานมากกว่า 1 อุปกรณ์



รูปที่ 91 แสงไฟแอลอีดีสีน้ำเงินแสดงสถานะกดเพื่อพูด

ค. โครงข่ายไร้สายของระบบการสื่อสารทางเสียงสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงโครงข่ายไร้สายของระบบการสื่อสารทางเสียงสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ อุปกรณ์หลักที่มีความสำคัญในระบบโครงข่ายไร้สายนี้ประกอบไปด้วย เราเตอร์ ทำหน้าที่กระจายสัญญาณย่านความถี่ 2.4 GHz โดยมีโปรแกรมสำหรับใช้เฟิร์มแวร์และดูแลการทำงานภายในโครงข่าย โดยผู้วิจัยจะแสดงตัวอย่างการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อจากอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายภายในโครงข่ายด้วยที่อยู่ไอพี (IP Address) ดังในรูปที่ 92 และในโครงข่ายนี้ผู้วิจัยได้ใช้อุปกรณ์กระจายสัญญาณไร้สายที่มีการปรับแต่งการทำงานร่วมกับ Raspberry Pi เพื่อทำงานเป็นโหนดย่อยลำดับที่ 2 (Sub Node No.2) และโหนดย่อยลำดับที่ 3 (Sub Node No.3) ของโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ และทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณ ซึ่งมีหน้าที่ทวนสัญญาณจากอุปกรณ์เราเตอร์ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มระยะทางการกระจายสัญญาณทำให้สามารถทำการเชื่อมต่อหรือการส่งข้อมูลได้ไกลขึ้น รูปภาพเราเตอร์และอุปกรณ์โหนดย่อยลำดับที่ 2 แสดงในรูปที่ 93

Wireless Clients

ID	Name	IP Address	MAC Address
1	LAPTOP-3RH2K45P	192.168.1.100	A8-7E-EA-43-D4-56
2	TalkiePi	192.168.1.109	00-0F-00-79-A3-F8
3	TalkiePi	192.168.1.103	00-0F-00-5D-73-F2
4	Unknown	192.168.1.101	E4-5F-01-17-C1-DE

รูปที่ 92 การตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องลูกข่ายภายในโครงข่ายด้วยที่อยู่ไอพี



รูปที่ 93 เราเตอร์และอุปกรณ์ทวนสัญญาณจากเราเตอร์

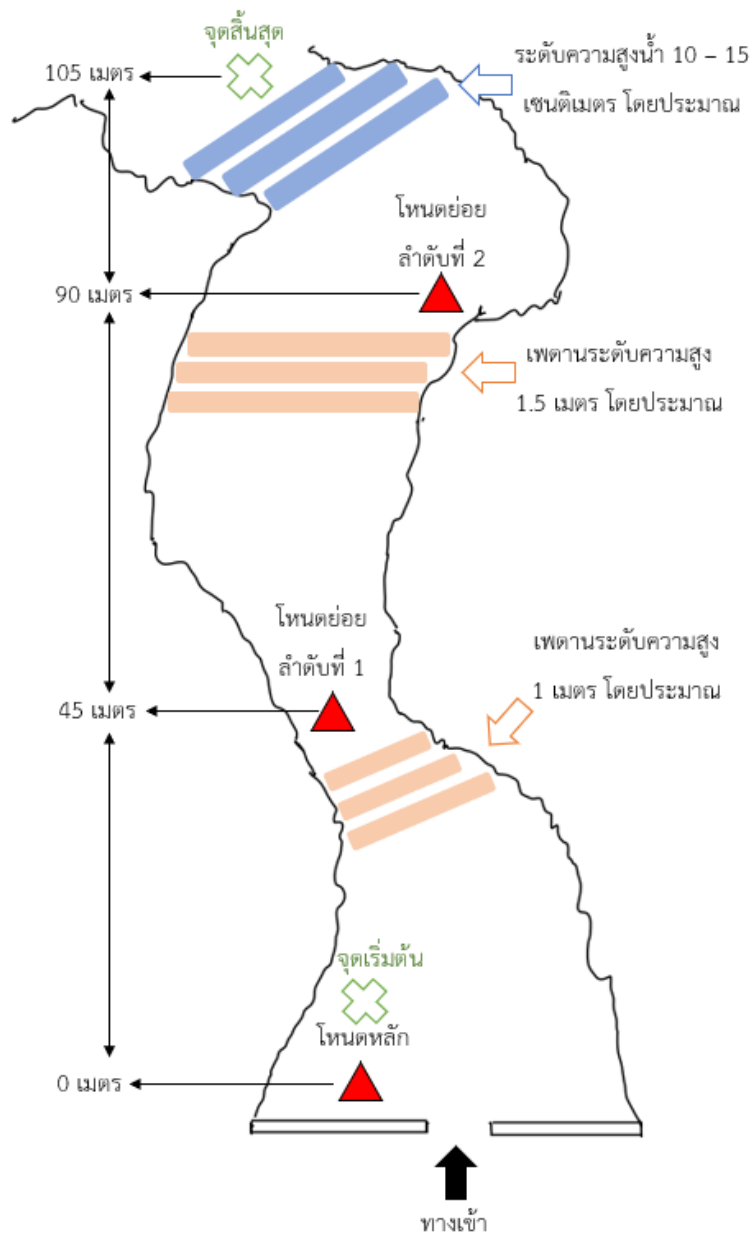
ในการสร้างโครงข่ายไร้สายสำหรับระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายแบบวีโอไอพี อุปกรณ์ในระบบดังกล่าวประกอบด้วย โหนดหลักและโหนดย่อย ซึ่งโหนดหลักมีอุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราเตอร์ TP-Link Archer MR200 ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก และ Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นแม่ข่าย (Server) โดยมีโปรแกรม Mumble เป็นโปรแกรมสำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี และมีเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาสำหรับดูแลระบบสื่อสารทั้งหมดโดยผู้ดูแลระบบ และในส่วนของโหนดย่อยนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 โหนด และแต่ละโหนดจะทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากอุปกรณ์จัดเส้นทาง อย่างไรก็ตาม การจัดวางตำแหน่งของโหนดย่อยแต่ละโหนดอาจจะวางห่างกันเป็นระยะทางประมาณ 30 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง และแต่ละโหนดย่อยจะมีลูกข่ายเข้าใช้งานได้จำนวน 5 เครื่อง

6.2.2 แผนการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย

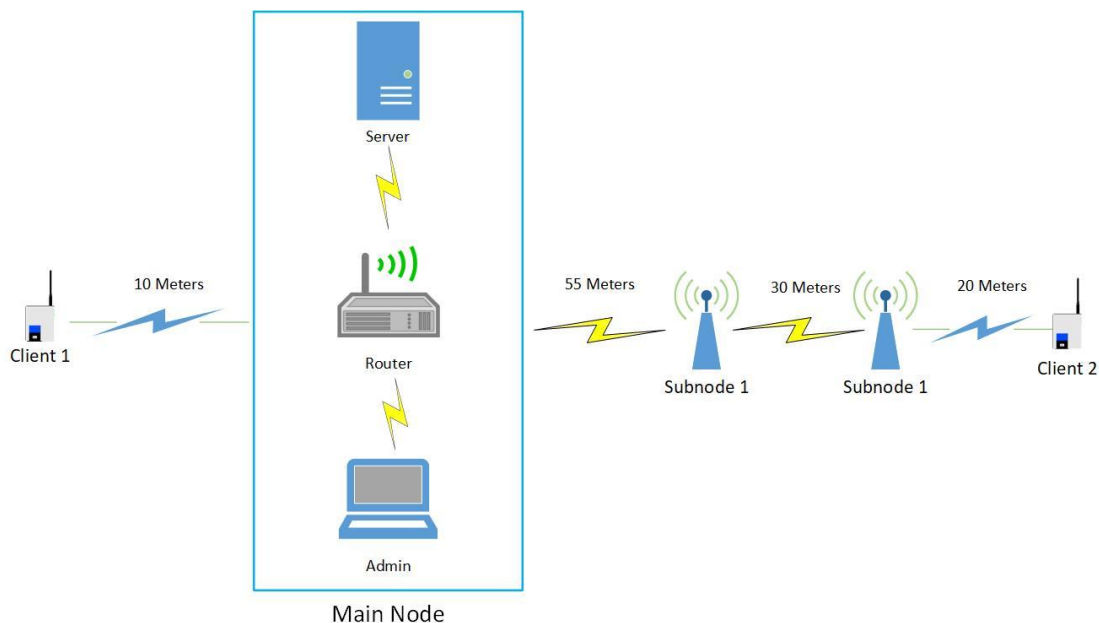
ในการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในพื้นที่ของถ้ำจำนวน 2 แห่ง เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในการใช้งานจริง ประกอบด้วย การวัดทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator และการวัดทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการทำงานของลูกข่ายในระบบในสองรูปแบบคือ การสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด (Point to Point) และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด (Point to Multipoint) และในที่สุดท้าย เป็นการทดสอบความแรงสัญญาณที่ต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโหนดหลักสามารถรับได้ด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator แผนการทดสอบดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แผนการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี เป็นสถานที่ในการดำเนินงานในการสื่อสารรูปแบบนี้ โดยผู้วิจัยนำเสนอแผนภาพตัวอย่างสถานที่การดำเนินงานภายในถ้ำดังกล่าวตามรูปที่ 94 และได้นำเสนอแผนภาพระบบดังกล่าวเพื่อใช้ในการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ตามรูปที่ 95

ข. แผนการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ วัดถ้ำเชียงดาว อ. เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เป็นสถานที่การดำเนินงานในการสื่อสารรูปแบบนี้ โดยผู้วิจัยจะนำเสนอแผนภาพตัวอย่าง สถานที่การดำเนินงานภายในถ้ำดังกล่าวตามรูปที่ 96 และได้นำเสนอแผนภาพพระบดดังกล่าวเพื่อใช้บันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ตามรูปที่ 97 และรูปที่ 98



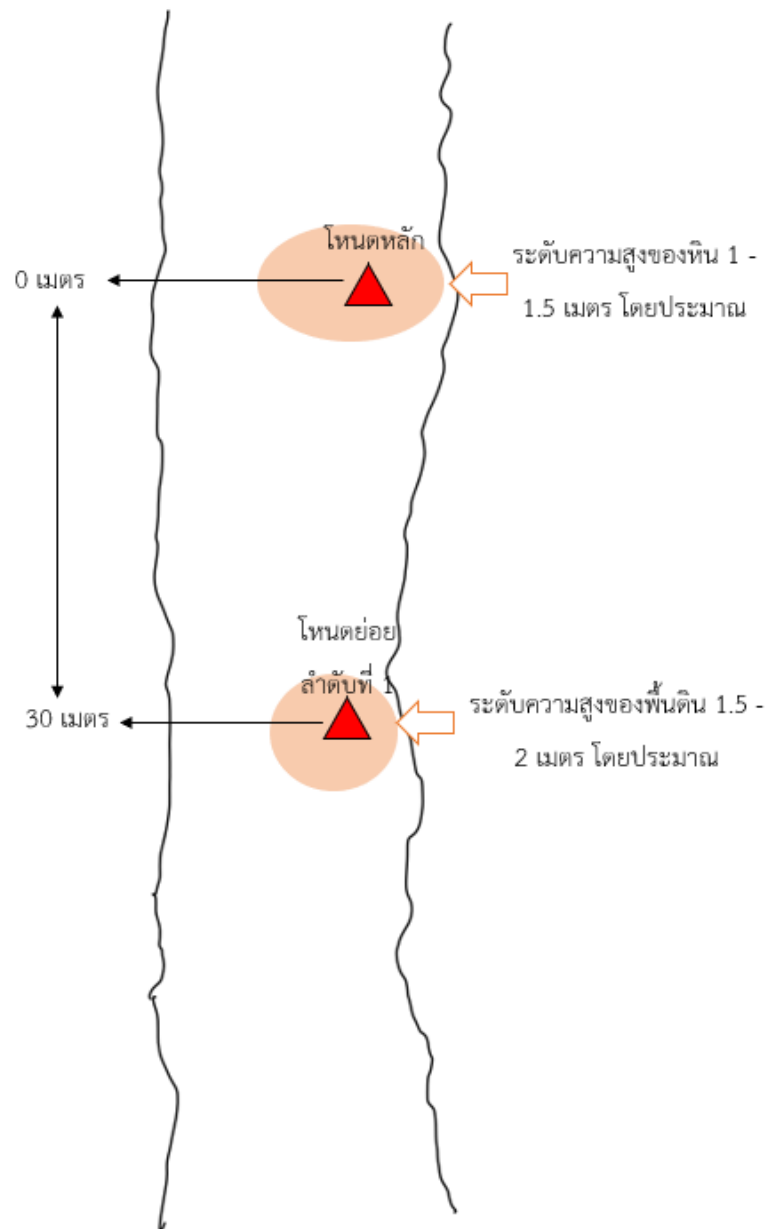
รูปที่ 94 แผนภาพสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้ำป่าภูหารีย์



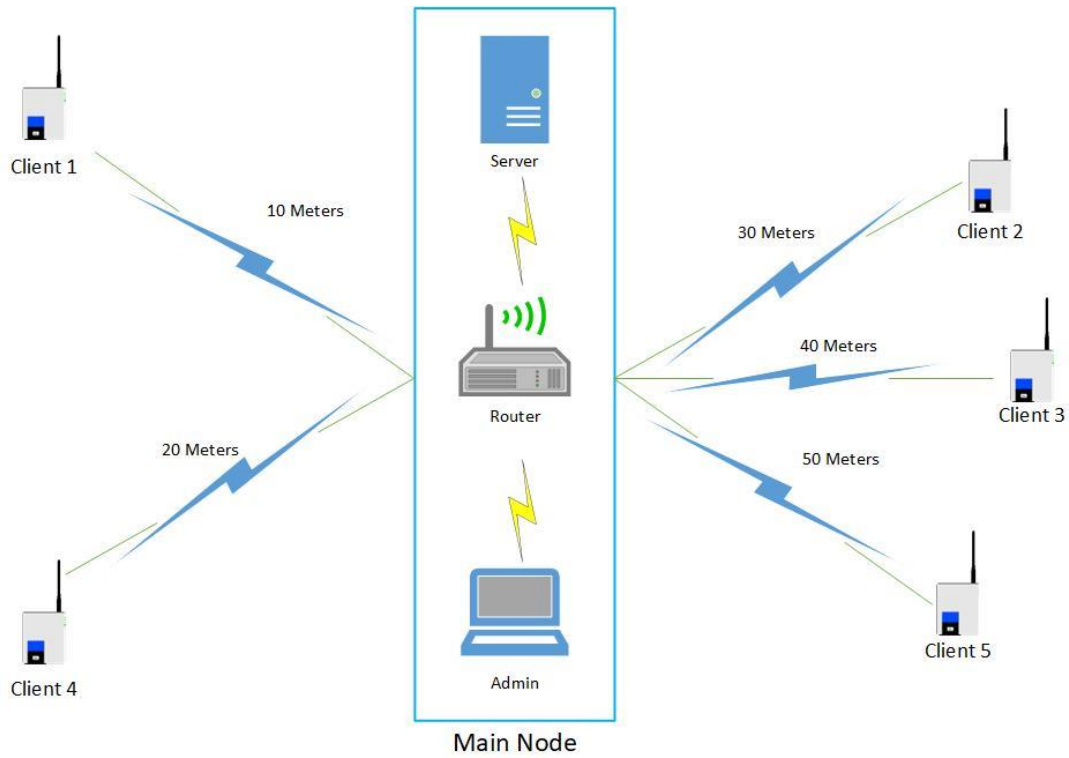
รูปที่ 95 แผนผังระบบเพื่อการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหนึ่งจุด

ค. แผนการทดสอบการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง

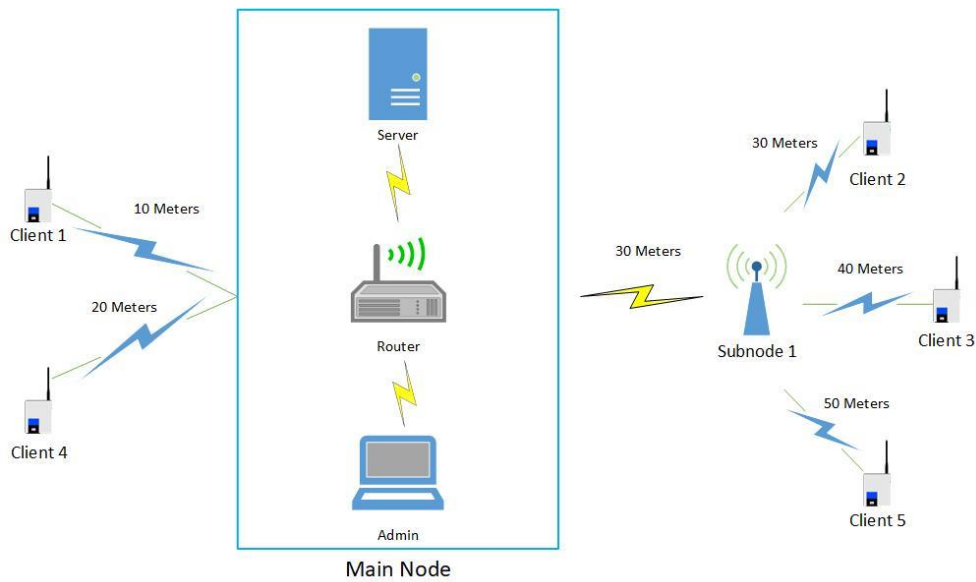
จากรูปที่ 95 แสดงแผนผังการออกแบบระบบเพื่อทำการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหนึ่งจุด ในโนดหลักจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์จัดเส้นทาง รุ่น TP-Link Archer MR200 ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นแม่ข่าย โดยมีโปรแกรม Mumble เป็นโปรแกรมสำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี และมีเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับดูแลระบบสื่อสารทั้งหมด ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแบบหนึ่งจุดสู่อีกหนึ่งจุดโดยใช้ลูกข่าย 2 เครื่อง กล่าวคือลูกข่ายเครื่องที่ 1 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์จัดเส้นทางโดยตรงและวางห่างจากอุปกรณ์จัดเส้นทางในระยะ 10 เมตร และลูกข่ายเครื่องที่ 2 เชื่อมต่อกับโนดย่อย ซึ่งในการทดสอบนี้มีโนดย่อยจำนวน 2 โนด โดยโนดย่อยที่ 1 จะวางห่างจากอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นระยะ 55 เมตร และโนดย่อยที่ 2 วางห่างจากโนดย่อยที่ 1 เป็นระยะ 30 เมตร เนื่องจากสภาพแวดล้อมในถ้ำที่มีพื้นที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถวางโนดย่อยที่ 2 ห่างจากโนดย่อยที่ 1 ได้ไกลกว่านี้ โดยลูกข่ายเครื่องที่ 2 จะวางห่างจากโนดย่อยที่ 2 เป็นระยะ 20 เมตร ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3 ต่อไป



รูปที่ 96 แผนภาพสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว



รูปที่ 97 แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่หนึ่ง



รูปที่ 98 แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่สอง

จากรูปที่ 97 และรูปที่ 98 แสดงแผนภาพการออกแบบระบบเพื่อบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยการใช้ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ในการวางโครงข่ายในรูปแบบที่หนึ่งและรูปแบบที่สอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การวางโครงข่ายในรูปแบบที่หนึ่งในรูปที่ 97 เป็นการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก โดยโนดหลักประกอบไปด้วยอุปกรณ์จัดเส้นทาง รุ่น TP-Link Archer MR200 ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก โดยใช้ Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นเครื่องแม่ข่าย ซึ่งมีโปรแกรม Mumble เป็นโปรแกรมสำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี และมีเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับดูแลระบบสื่อสารในโครงข่ายทั้งหมดซึ่งมีลูกข่ายจำนวน 5 เครื่อง ในขั้นตอนของการทดสอบ เริ่มจากการวางโนดหลักไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางโครงข่าย จากนั้นนำลูกข่ายเครื่องที่ 1 และลูกข่ายเครื่องที่ 4 วางไว้ห่างจากโนดหลักไปทางซ้ายในระยะทาง 10 เมตรและ 20 เมตรตามลำดับ ในขั้นตอนต่อมา ผู้วิจัยได้ทำการวางลูกข่ายเครื่องที่ 2 ลูกข่ายเครื่องที่ 3 และลูกข่ายเครื่องที่ 5 ห่างจากโนดหลักไปทางขวาในระยะทาง 30 เมตร 40 เมตร และ 50 เมตรตามลำดับ

การวางโครงข่ายในรูปแบบที่สองในรูปที่ 98 ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มโนดย่อยในการทวนสัญญาณจากอุปกรณ์จัดเส้นทางจำนวนหนึ่งโนดทางด้านขวาของโนดหลัก จากนั้นทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ 2 ลูกข่ายเครื่องที่ 3 และลูกข่ายเครื่องที่ 5 วางห่างออกไปจากโนดย่อยด้านขวาเป็นระยะทาง 30 เมตร 40 เมตร และ 50 เมตรตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.3

6.3 ผลการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดลองระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ โดยแบ่งผลการทดสอบระบบออกเป็น 3 หัวข้อย่อย ดังนี้

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด
2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด
3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดค่าได้นั้น ผู้วิจัยได้ทำการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในโครงข่าย โดยในตำแหน่งแรกคือ ที่โนดลำดับที่หนึ่งหรือโนดหลัก ซึ่งมีอุปกรณ์เราเตอร์ทำหน้าที่กระจายสัญญาณย่านความถี่ 2.4 GHz และในตำแหน่งที่สองคือ ที่โนดลำดับที่สองหรือโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) จากโนดหลัก และในตำแหน่งที่สามคือ ที่โนดลำดับที่สามหรือโนดย่อยลำดับที่สอง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

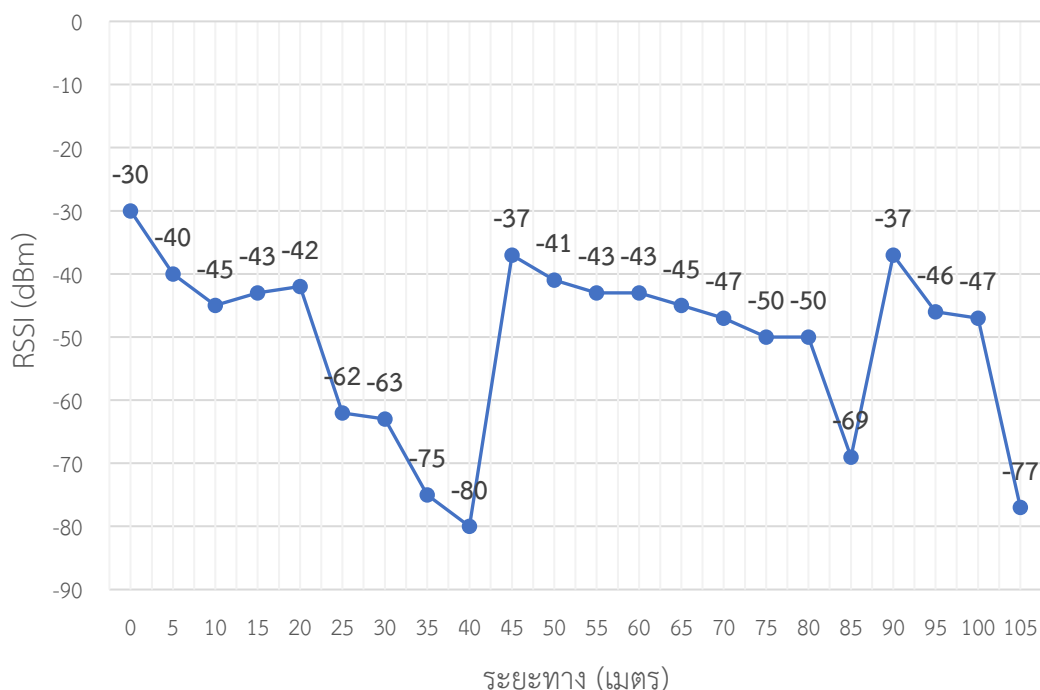
6.3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด

การทดสอบประสิทธิภาพในส่วนนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้โปรแกรม Wavemon ที่เป็นเครื่องมือสำหรับระบบปฏิบัติการราสเบียน ที่ทำงานบนระบบฮาร์ดแวร์ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi

ในขั้นตอนของการทดสอบ ผู้วิจัยได้กำหนดให้เครื่องลูกข่ายที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่ง (Transmitter) สัญญาณเสียงประจำอยู่ที่โนดหลัก และเครื่องลูกข่ายที่ทำหน้าที่เป็นภาครับ (Receiver) สัญญาณเสียงอยู่ที่ตำแหน่งของเครื่องแม่ข่าย โดยจะกำหนดให้ตำแหน่งของเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้นในการวัดระยะทางในการทดลองทั้งหมด จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายที่ทำหน้าที่เป็นภาครับให้ห่างออกไปเป็นระยะทางครึ่งละ 5 เมตร ทั้งนี้เพื่อหาระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถรับสัญญาณเสียงได้ โดยดูจากการวัดค่า Receive Signal Strength Indicator ซึ่งผลการทดลองได้นำเสนอไว้ในตามตารางที่ 20 และรูปที่ 99

ตารางที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่า Receive Signal Strength Indicator

ลำดับที่โหนด	ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)
โหนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	0	-30
	5	-40
	10	-45
	15	-43
	20	-42
	25	-62
	30	-63
	35	-75
	40	-80
โหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	45	-37
	50	-41
	55	-43
	60	-43
	65	-45
	70	-47
	75	-50
	80	-50
	85	-69
โหนดย่อยลำดับที่สอง (ทวนสัญญาณ)	90	-37
	95	-46
	100	-47
	105	-77



รูปที่ 99 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm)

จากกราฟในรูปที่ 99 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (เมตร) ซึ่งแสดงค่าอยู่บนแกน x และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) แสดงค่าอยู่บนแกน y โดยจะสังเกตเห็นระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถรับสัญญาณเสียงได้ด้วยการประเมินสีทึบภาพด้วยค่า RSSI เป็นระยะทางทั้งหมด 105 เมตร และมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

จากการสังเกตที่เส้นกราฟในช่วงแรกระยะ 0 เมตรถึง 40 เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโนดหลัก (Main_Node1) สามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายภาคส่งและภาครับให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ในระยะทาง 40 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -80 dBm ซึ่งเป็นระดับสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถรับสัญญาณในบริเวณโครงข่ายของโนดหลักและถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดหลัก

ในลำดับถัดมาให้สังเกตเส้นกราฟในช่วงระยะ 40 เมตรถึง 85 เมตร เป็นกราฟของค่าผลการวัดที่ผู้วิจัยทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายภาครับเข้าสู่บริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ที่ทำการกระจายสัญญาณพร้อมกับการทวนสัญญาณจากโนดหลัก ดังนั้นระยะทางเริ่มต้นของโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่ระยะทาง 45 เมตร (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้นในการทดสอบนี้) ซึ่งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งสามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายภาคส่งและภาครับให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เพิ่มขึ้นเป็นระยะทาง 85 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -69 dBm ซึ่งเป็นระดับสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถรับสัญญาณในบริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

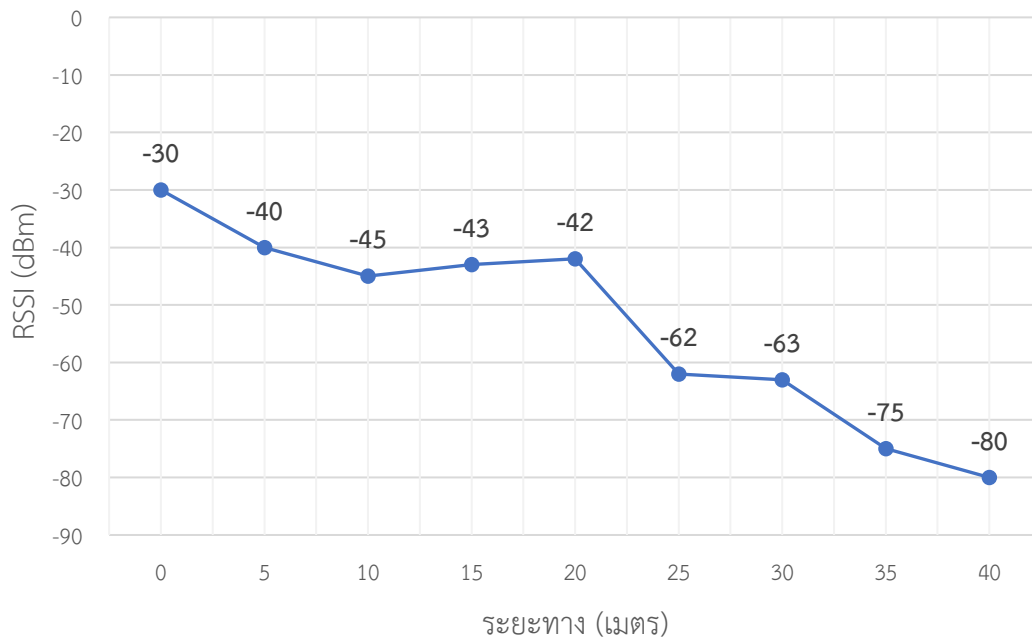
และในลำดับสุดท้ายให้สังเกตเส้นกราฟในช่วงระยะ 85 เมตรถึง 105 เมตร เป็นกราฟของผลการวัดที่ผู้วิจัยทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายภาครับเข้าสู่บริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองที่ทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ดังนั้นระยะทางเริ่มต้นของโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สอง ที่ระยะทาง 90

เมตร (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้น) ซึ่งโนดย่อยลำดับที่สองสามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายภาคส่งและภาครับสามารถติดต่อสื่อสารกันได้เพิ่มขึ้นเป็นระยะทาง 105 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -77 dBm ซึ่งเป็นระดับสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถรับสัญญาณในบริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองและถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สอง

ในลำดับถัดไป ผู้วิจัยจะทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่า Receive Signal Strength Indicator โดยจะให้ข้อมูลของสภาพแวดล้อมการทดสอบภายในถ้ำซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละระยะทางของการทดสอบเพื่อให้การนำผลการทดสอบดังกล่าวมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่า Receive Signal Strength Indicator ของโนดหลัก โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง และโนดย่อยลำดับที่สอง จะนำเสนอในตารางที่ 21, 22 และ 23 และรูปที่ 100, 101 และ 102 ตามลำดับ

ตารางที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโนดลำดับที่หนึ่งหรือโนดหลัก

โนด	ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	0	-30
	5	-40
	10	-45
	15	-43
	20	-42
	25	-62
	30	-63
	35	-75
	40	-80



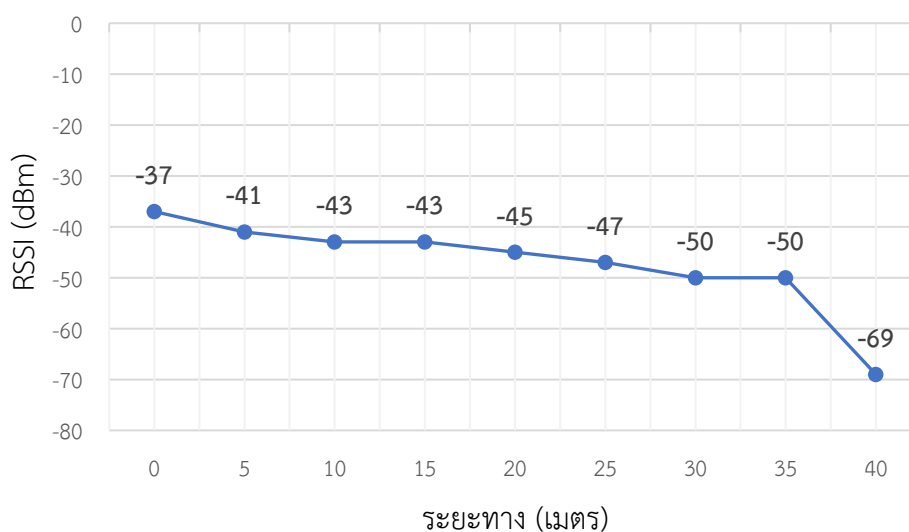
รูปที่ 100 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (เมตร) และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) สำหรับโหนดลำดับที่หนึ่งหรือโหนดหลัก

จากกราฟในรูปที่ 100 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (เมตร) ซึ่งแสดงค่าอยู่บนแกน x และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโหนดลำดับที่หนึ่ง (Main_Node1) หรือโหนดหลัก การวัดที่ตำแหน่งเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้น) หรือที่ระยะทาง 0 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -30 dBm และที่จุดสิ้นสุด คือ ระยะทาง 40 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -80 dBm ซึ่งแสดงว่าระยะทางการสื่อสารภายในโครงข่ายของโหนดหลัก มีระยะทางในการกระจายสัญญาณทั้งหมดคือ 40 เมตร เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือ ที่ระยะทาง ตั้งแต่ 0 เมตร ถึง 20 เมตร พบว่ามีผลต่อค่า RSSI น้อยมากทำให้กราฟมีความชันน้อย เนื่องจากในช่วงนี้โหนดหลักมีกำลังส่งเพื่อทำการกระจายสัญญาณได้ดี ผู้วิจัยยังได้ทำการสังเกตพื้นที่โดยรอบภายในถ้ำพบว่า ในช่วงระยะทางนี้พื้นที่ภายในถ้ำมีลักษณะโถงกว้างและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่สามารถเดินได้อย่างสะดวก ส่งผลทำให้ค่า RSSI ลดลงเล็กน้อย และที่ระยะทางบนกราฟตั้งแต่ 20 เมตรถึง 40 เมตร จะมีผลต่อค่า RSSI ค่อนข้างมาก ทำให้กราฟมีความชันมาก เนื่องจากในช่วงนี้โหนดหลักเริ่มมีกำลังส่งในการกระจายสัญญาณลดลง นอกจากนี้ลักษณะภายในถ้ำช่วงระยะทางนี้มีลักษณะโถงแคบและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่ต่ำเป็นสาเหตุของการเลี้ยวเบนของสัญญาณ (Diffraction) ส่งผลทำให้ค่า RSSI ลดลงอย่างมาก

จากการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่า RSSI จะมีค่าลดลง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง และค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโหนดลำดับที่หนึ่งหรือโหนดหลัก มีค่า RSSI แปรผกผันกับค่าระยะทาง

ตารางที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโหนดลำดับที่สองหรือโหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

โหนด	ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)
โหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	0	-37
	5	-41
	10	-43
	15	-43
	20	-45
	25	-47
	30	-50
	35	-50
	40	-69



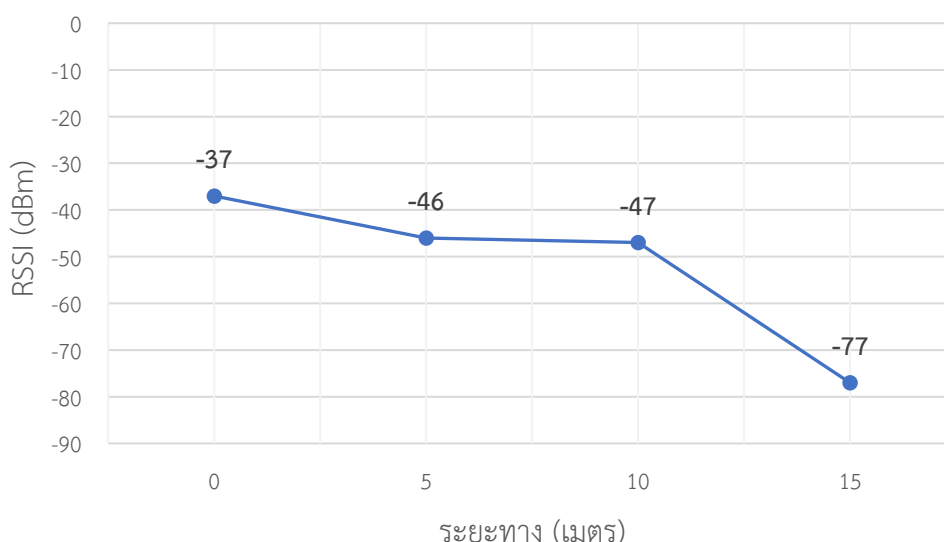
รูปที่ 101 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (เมตร) และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) สำหรับโหนดลำดับที่สองหรือโหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

จากกราฟในรูปที่ 101 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (เมตร) ซึ่งแสดงค่าอยู่บนแกน x และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโหนดลำดับที่สอง (Sub_Node2) หรือโหนดย่อยอันดับที่หนึ่ง (Repeater) โดยการตรวจวัดที่จุดเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งโหนดย่อยลำดับที่หนึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองนี้) คือที่ระยะทาง 0 เมตร พบว่ามีค่า RSSI ที่ระดับ -37 dBm และจุดสิ้นสุดที่ระยะทาง 40 เมตรพบว่ามีค่า RSSI ที่ระดับ -69 dBm ซึ่งแสดงว่าระยะทางภายในโครงข่ายของโหนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีระยะทางในการกระจายสัญญาณทั้งหมดคือ 40 เมตร

เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือ ที่ระยะทางตั้งแต่ 0 เมตรถึง 35 เมตร พบว่ามีผลต่อค่า RSSI น้อยมาก ทำให้กราฟมีความชันน้อยเนื่องจากในช่วงนี้ โนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดหลักได้ดี ผู้วิจัยยังได้ทำการสังเกตพื้นที่โดยรอบภายในถ้ำพบว่า ในช่วงระยะทางนี้พื้นที่ภายในถ้ำมีลักษณะโถงกว้างและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่สามารถเดินได้อย่างสะดวก ส่งผลทำให้ค่า RSSI ลดลงเล็กน้อย และที่ระยะทางตั้งแต่ 35 เมตรถึง 40 เมตร จะพบว่าระยะทางที่มากขึ้นนี้มีผลต่อค่า RSSI ค่อนข้างมากทำให้กราฟมีความชันมากขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้โนดย่อยลำดับที่หนึ่งเริ่มมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดหลักลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อสังเกตสภาพแวดล้อมของการทดสอบพบว่า ลักษณะพื้นที่ของถ้ำในระยะทางช่วงนี้มีลักษณะโถงแคบและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่ต่ำเป็นสาเหตุของการเลี้ยวเบนของสัญญาณ (Diffraction) ซึ่งจะส่งผลให้ค่า RSSI ลดลงอย่างมาก จากกราฟดังกล่าวทำให้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่า RSSI จะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโนดลำดับที่สองหรือโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง มีค่า RSSI แปรผกผันกับค่าระยะทาง

ตารางที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (Distance) และค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโนดลำดับที่สามหรือโนดย่อยลำดับที่สอง

โนด	ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)
โนดย่อยลำดับที่สอง (ทวนสัญญาณ)	0	-37
	5	-46
	10	-47
	15	-77



รูปที่ 102 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (เมตร) และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) สำหรับโนดลำดับที่สามหรือโนดย่อยลำดับที่สอง

จากกราฟในรูปที่ 102 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (เมตร) ซึ่งแสดงค่าอยู่บนแกน x และค่า Receive Signal Strength Indicator (dBm) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโนดลำดับที่สาม หรือโนดย่อยลำดับที่สอง

โดยการตรวจวัดที่จุดเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งโนดย่อยลำดับที่สองเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบนี้) คือที่ระยะทาง 0 เมตร มีค่า RSSI ที่ระดับ -37 dBm และพบว่ามีจุดสิ้นสุดที่ระยะทาง 15 เมตร พบว่ามีค่า RSSI ที่ระดับ -77 dBm ซึ่งแสดงว่าระยะทางภายในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองมีระยะทางในการกระจายสัญญาณทั้งหมดคือ 15 เมตร

เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือที่ระยะทางตั้งแต่ 0 เมตรถึง 10 เมตร พบว่ามีผลต่อค่า RSSI น้อยมาก ทำให้กราฟมีความชันน้อยเนื่องจากในช่วงนี้โนดย่อยลำดับที่สองมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งได้ดี

ผู้วิจัยยังได้ทำการสังเกตพื้นที่โดยรอบภายในถ้ำพบว่า ช่วงระยะทางนี้เป็นลักษณะโถงกว้างและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่สามารถเดินได้อย่างสะดวก ส่งผลทำให้ค่า RSSI ลดลงเล็กน้อย แต่ระยะทางตั้งแต่ 10 เมตรถึงระยะทาง 15 เมตรจะมีผลต่อค่า RSSI ที่ค่อนข้างมาก ทำให้กราฟมีความชันมาก เนื่องจากในช่วงนี้โนดย่อยลำดับที่สองเริ่มมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งลดลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าในพื้นที่ของการทดสอบในบริเวณนี้จะมีลักษณะเป็นโถงกว้างและเพดานของถ้ำมีระดับความสูงที่สามารถเดินได้อย่างสะดวก แต่ในบริเวณนี้มีพื้นที่ของถ้ำบางส่วนมีลักษณะเป็นน้ำขัง ซึ่งน้ำมีผลโดยตรงต่อสัญญาณในการดูดซับคลื่น (Absorption) ส่งผลทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Attenuation) ทำให้ค่า RSSI ลดลงเป็นอย่างมาก

จากกราฟดังกล่าวทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่า RSSI จะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับโนดลำดับที่สาม หรือโนดย่อยลำดับที่สองมีค่า RSSI แปรผกผันกับค่าระยะทาง

6.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย

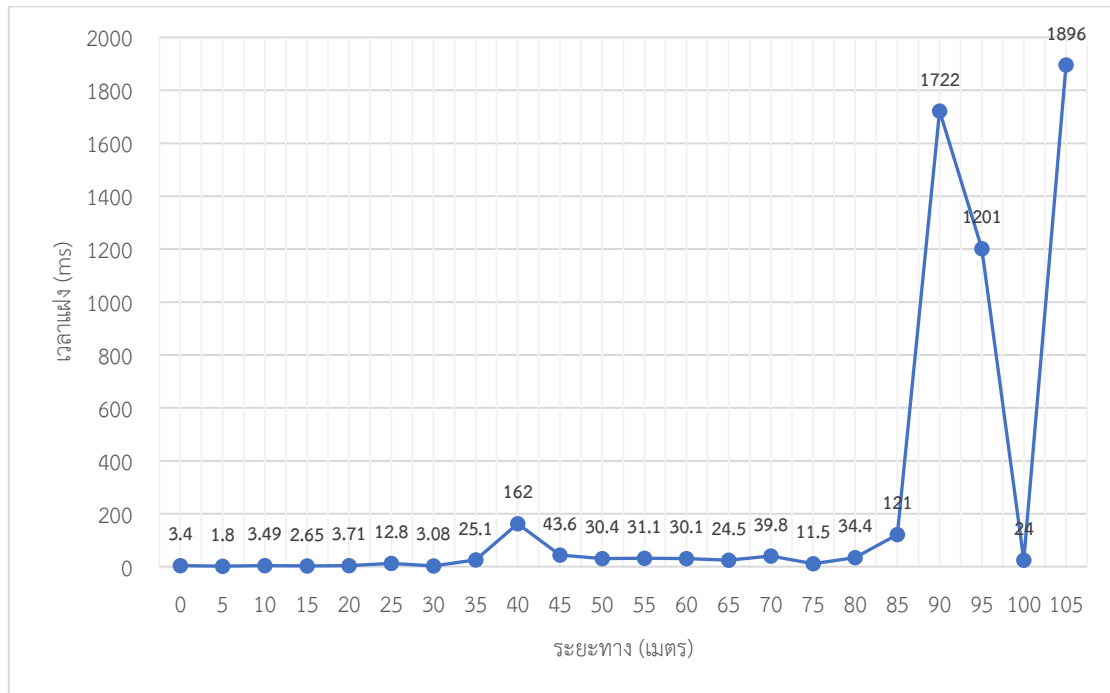
ค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด

ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย โดยทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝง ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้คำสั่ง Ping ในโครงข่ายดังกล่าว ซึ่งการ Ping เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการทดสอบการเชื่อมต่อระบบในโครงข่าย โดยการส่งสัญญาณการเชื่อมต่อในโครงข่ายออกไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น ๆ ซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ปลายทางหรือเครื่องลูกข่ายจะส่งสัญญาณตอบกลับมาอีกทีหนึ่ง ซึ่งการ Ping แต่ละครั้งจะให้คำตอบเป็นเวลาออกมาในหน่วยของมิลลิวินาที (milli second, ms) ทำให้ทราบว่าข้อมูลชุดหนึ่งใช้เวลาเท่าไรในการเดินทางไป-กลับระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายกับเครื่องแม่ข่าย

ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้เครื่องลูกข่ายภาคส่ง (transmitter) สัญญาณเสียงประจำอยู่ที่โนดหลัก และเครื่องลูกข่ายภาครับ (receiver) สัญญาณเสียงอยู่ที่ตำแหน่งของเครื่องแม่ข่าย เป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบ จากนั้นทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายภาครับออกไปเป็นระยะทางครั้งละ 5 เมตร เพื่อหาระยะทางโดยรวมและระยะเวลาตอบรับเครื่องลูกข่ายภาครับเป็นค่าเวลาแฝง ซึ่งผลการทดสอบได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 24 และรูปที่ 103

ตารางที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms)

โนด	ระยะทาง (เมตร)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	0	3.40
	5	1.80
	10	3.49
	15	2.65
	20	3.71
	25	12.80
	30	3.08
	35	25.10
	40	162.00
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	45	43.60
	50	30.40
	55	31.10
	60	30.10
	65	24.50
	70	39.80
	75	8.50
	80	34.40
	85	121.00
โนดย่อยลำดับที่สอง (ทวนสัญญาณ)	90	1722.00
	95	1201.00
	100	24.00
	105	1896.00



รูปที่ 103 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms)

จากกราฟในรูปที่ 103 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง จะเห็นว่าระยะทางโดยรวมและระยะเวลาตอบรับเครื่องลูกข่ายภาครับเป็นระยะเวลาแฝงเป็นระยะทาง 105 เมตร และมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

เริ่มจากการสังเกตกราฟในช่วงแรกที่ระยะ 0 เมตรถึง 40 เมตร ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าโนดหลักสามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายทั้งภาคส่งและภาครับสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในระยะทาง 40 เมตร โดยมีค่า Latency ที่ 162 ms ซึ่งเป็นระยะเวลาตอบรับที่หน่วงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถตอบกลับเครื่องลูกข่ายภาคส่งในบริเวณโครงข่ายของโนดหลัก และถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดหลักที่ระยะทางดังกล่าว

ในลำดับถัดมาสังเกตเส้นกราฟที่ระยะ 40 เมตรถึง 85 เมตร เป็นกราฟจากการที่ผู้วิจัยได้ทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายภาครับเข้าสู่บริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งซึ่งทำการทวนสัญญาณจากโนดหลัก ดังนั้นระยะทางเริ่มต้นของโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่ระยะทาง 45 เมตร (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองนี้) ซึ่งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งสามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายทั้งภาคส่งและภาครับสามารถทำการติดต่อสื่อสารกันได้เพิ่มขึ้นเป็นระยะทาง 85 เมตร มีค่าเวลาแฝงที่ 121 ms ซึ่งเป็นระยะเวลาตอบรับที่หน่วงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถตอบกลับเครื่องลูกข่ายภาคส่งในบริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

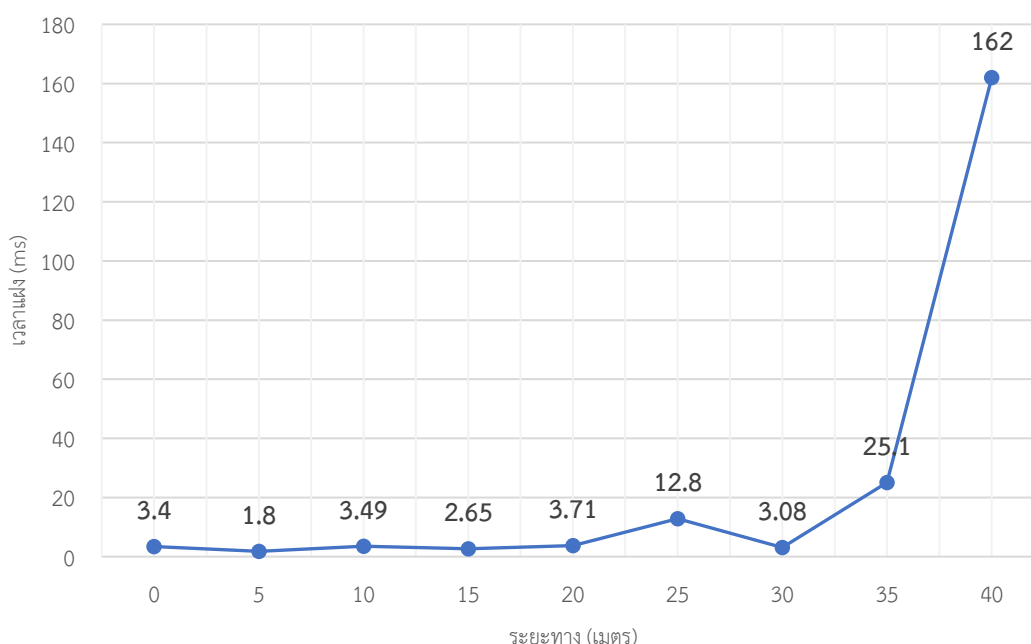
สำหรับในลำดับสุดท้ายให้สังเกตเส้นกราฟที่ระยะ 85 เมตรถึง 105 เมตร ซึ่งเป็นกราฟการทดสอบค่าเวลาแฝงเมื่อผู้วิจัยได้ทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายภาครับเข้าสู่บริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองซึ่งทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ดังนั้นระยะทางเริ่มต้นของโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองที่ระยะทาง 90 เมตร (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้น) ซึ่งโนดย่อยลำดับที่สองสามารถกระจายสัญญาณให้แก่เครื่องลูกข่ายทั้งภาคส่งและภาครับให้สามารถทำการติดต่อสื่อสารกันได้เพิ่มขึ้น

เป็นระยะทาง 105 เมตร มีค่าเวลาแฝงที่ 1,896 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาตอบรับที่หน่วงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายภาครับสามารถตอบกลับเครื่องลูกข่ายภาคส่งในบริเวณโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สองและถือว่าสิ้นสุดการกระจายสัญญาณในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่สอง

ผู้วิจัยจะนำเสนอข้อมูลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝงในแต่ละโนด โดยจะให้ข้อมูลของสภาพแวดล้อมการทดสอบภายในถ้ำซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละระยะทางของการทดสอบเพื่อให้ผลการทดสอบดังกล่าวมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝงของโนดหลัก โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง และโนดย่อยลำดับที่สอง จะนำเสนอตามตารางที่ 25 26 และ 27 และรูปที่ 104, 105, และ 106 ตามลำดับ

ตารางที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับโนดลำดับที่หนึ่งหรือโนดหลัก

โนด	ระยะทาง (เมตร)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	0	3.40
	5	1.80
	10	3.49
	15	2.65
	20	3.71
	25	12.80
	30	3.08
	35	25.10
	40	162.00



รูปที่ 104 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับ โหนดลำดับที่หนึ่งหรือโนดหลัก

จากกราฟในรูปที่ 104 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำซึ่งแสดงค่าอยู่บนแกน x และค่าเวลาแฝง (ms) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโหนดลำดับที่หนึ่ง (Main_Node1) หรือโนดหลัก การวัดที่ตำแหน่งเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งเครื่องแม่ข่ายเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองนี้) หรือที่ระยะทาง 0 เมตร พบว่ามีค่า Latency ที่ 3.4 ms และจุดสิ้นสุดที่ระยะทาง 40 เมตร พบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ 162 ms ซึ่งแสดงว่าระยะทางภายในโครงข่ายของโนดหลักมีระยะทางทั้งหมดคือ 40 เมตร

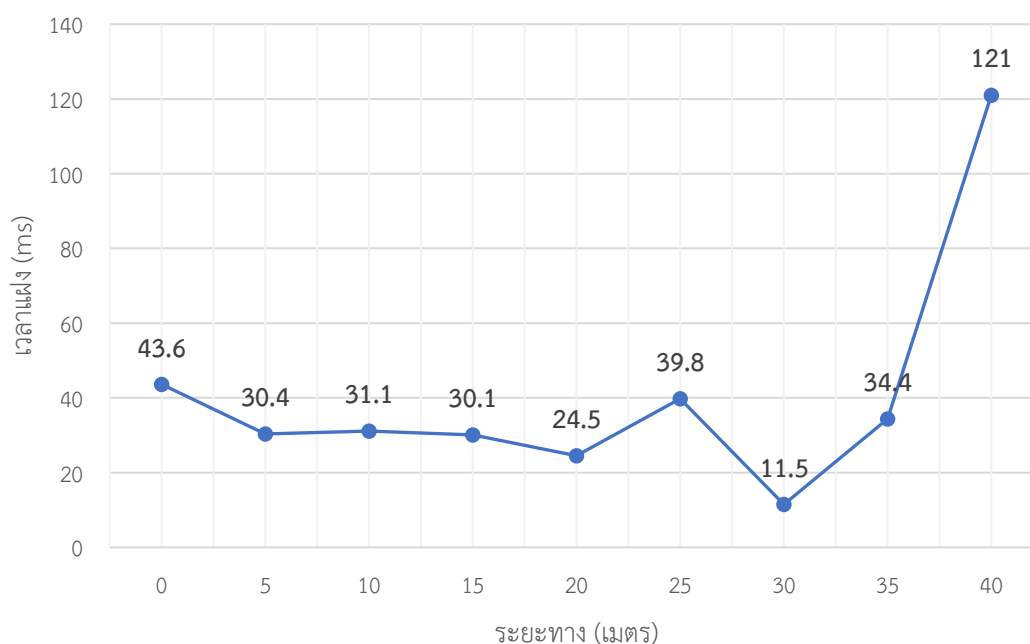
เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือ ที่ระยะทางตั้งแต่ 0 เมตรถึง 35 เมตร พบว่ามีผลต่อค่า Latency น้อยมาก ทำให้กราฟมีความชันน้อยเนื่องจากในช่วงนี้ โหนดหลักมีกำลังส่งในการกระจายสัญญาณได้ดี ส่งผลทำให้ค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีการตอบสนองระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับอย่างรวดเร็วตามเวลาจริง

เมื่อเคลื่อนห่างออกไปที่ระยะทางตั้งแต่ 35 เมตรถึง 40 เมตรจะเริ่มมีผลต่อค่าเวลาแฝงค่อนข้างมากทำให้กราฟมีความชันมากขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้โนดหลักเริ่มมีกำลังส่งในการกระจายสัญญาณลดลง ส่งผลทำให้ค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีการตอบสนองระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับที่ช้าลงอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าเวลาแฝงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝงสำหรับโหนดลำดับที่หนึ่งหรือโนดหลักจะมีค่าเวลาแฝงที่แปรผันตรงกับค่าระยะทาง

ตารางที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับโนดลำดับที่สองหรือโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

โนด	ระยะทาง (เมตร)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	0	43.60
	5	30.40
	10	31.10
	15	30.10
	20	24.50
	25	39.80
	30	8.50
	35	34.40
	40	121.00



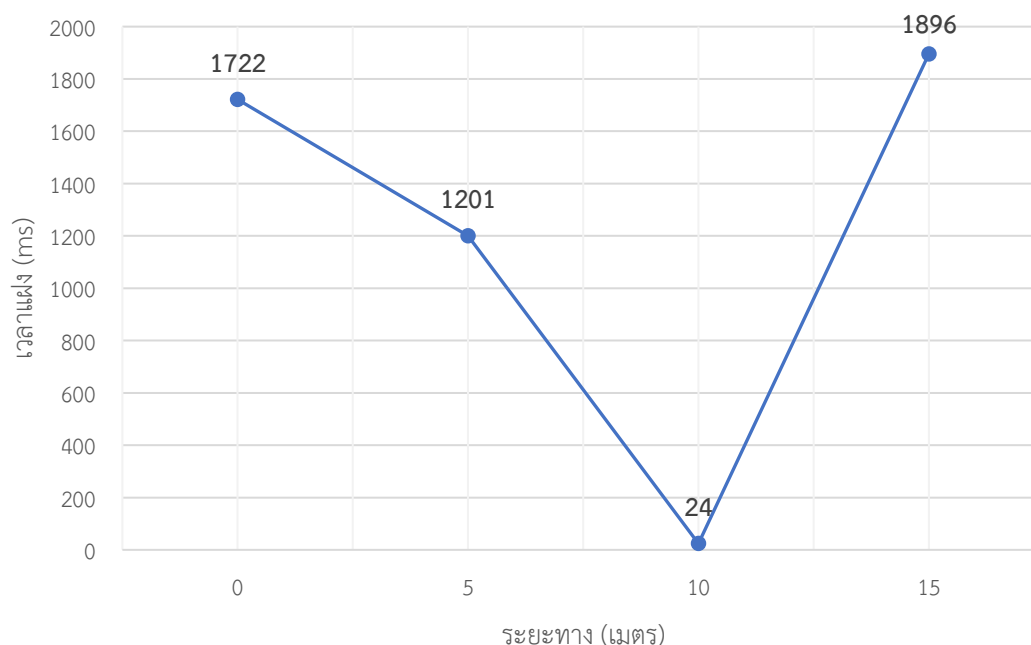
รูปที่ 105 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับโนด

จากกราฟในรูปที่ 105 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (Distance) แสดงค่าอยู่บนแกน x และค่าเวลาแฝง Ping (ms) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโนดลำดับที่สอง (Main_Node2) หรือโนดย่อยอันดับที่หนึ่ง การวัดที่ตำแหน่งเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองนี้) หรือที่ระยะทาง 0 เมตร พบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ 43.6 ms และที่จุดสิ้นสุดที่ระยะทาง 40 เมตรพบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ 121 ms ซึ่งแสดงว่าระยะทางภายในโครงข่ายของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีระยะทางทั้งหมดคือ 40 เมตร เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือ ที่ระยะทางตั้งแต่ 0 เมตรถึง 35

เมตร พบว่ามีผลต่อค่า เวลาแฝงน้อยมาก ทำให้กราฟมีความชันน้อยเนื่องจากในช่วงนี้โนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดหลักได้ดี ส่งผลทำให้ค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีการตอบสนองระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับอย่างรวดเร็วตามเวลาจริง และเมื่อเคลื่อนห่างออกไปที่ระยะทางตั้งแต่ระยะทาง 35 เมตรถึง 40 เมตร จะมีผลต่อค่าเวลาแฝงค่อนข้างมาก ทำให้กราฟมีความชันมากเนื่องจากในช่วงนี้โนดย่อยลำดับที่หนึ่งเริ่มมีกำลังส่งในการทวนสัญญาณจากโนดหลักลดลง ส่งผลทำให้ค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมากและมีการตอบสนองระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับที่ช้าลงอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่าเวลาแฝงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝงสำหรับโนดลำดับที่สองหรือโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง มีค่าเวลาแฝงที่แปรผันตรงกับค่าระยะทาง

ตารางที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับโนดลำดับที่สามหรือโนดย่อยลำดับที่สอง

โนด	ระยะทาง (เมตร)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดย่อยลำดับที่สอง (ทวนสัญญาณ)	0	1722.00
	5	1201.00
	10	24.00
	15	1896.00



รูปที่ 106 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับโนดลำดับที่สามหรือโนดย่อยลำดับที่สอง

จากรูปที่ 106 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการทดสอบภายในถ้ำ (Distance) แสดงค่าอยู่บนแกน x และค่าเวลาแฝง Ping (ms) แสดงค่าอยู่บนแกน y ในการทดสอบโนดลำดับที่สาม หรือโนดย่อยอันดับที่สอง การวัดที่ตำแหน่งเริ่มต้น (กำหนดให้ตำแหน่งโนดย่อยลำดับที่สองเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองนี้) หรือที่ระยะทาง 0 เมตร พบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ 1,722 ms และที่จุดสิ้นสุดที่ระยะทาง 15 เมตร พบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ 1,896 ms

เมื่อทำการสังเกตกราฟในช่วงแรกคือ ที่ระยะทางตั้งแต่ 0 เมตรถึง 10 เมตรพบว่ามีค่าเวลาแฝงที่ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ระยะทาง 10 เมตรถึง 15 เมตร พบว่ามีค่าเวลาแฝงที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าเริ่มมีความผันผวนอย่างมากสำหรับโนดย่อยลำดับที่สอง และค่าเวลาแฝงในช่วงระยะทางนี้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบค่าเวลาแฝงจากโนดต่าง ๆ ตามกราฟตามที่ได้นำเสนอไปแล้วในรูปที่ 104 และรูปที่ 105 ผู้วิจัยยังได้ทำการสังเกตพื้นที่โดยรอบภายในถ้ำพบว่า ในบริเวณนี้มีพื้นที่ของถ้ำ บางส่วนมีลักษณะเป็นน้ำขัง โดยน้ำมีผลโดยตรงต่อสัญญาณในการดูดซับคลื่น ซึ่งมีผลทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ และทำให้ระยะเวลาในการตอบกลับของเครื่องลูกข่ายภาครับไปยังเครื่องลูกข่ายภาคส่งเกิดการหน่วงของเวลาที่มากตามไปด้วย

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าเวลาแฝงสำหรับโนดลำดับที่สาม หรือโนดย่อยลำดับที่สอง โดยจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงระยะทาง 0 เมตรถึง 10 เมตรจะมีการแปรผกผันกับค่าเวลาแฝง และในช่วงระยะทางตั้งแต่ 10 เมตรถึง 15 เมตรจะมีการแปรผันตรงกับค่าเวลาแฝง

6.3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ด้วยค่าReceive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด

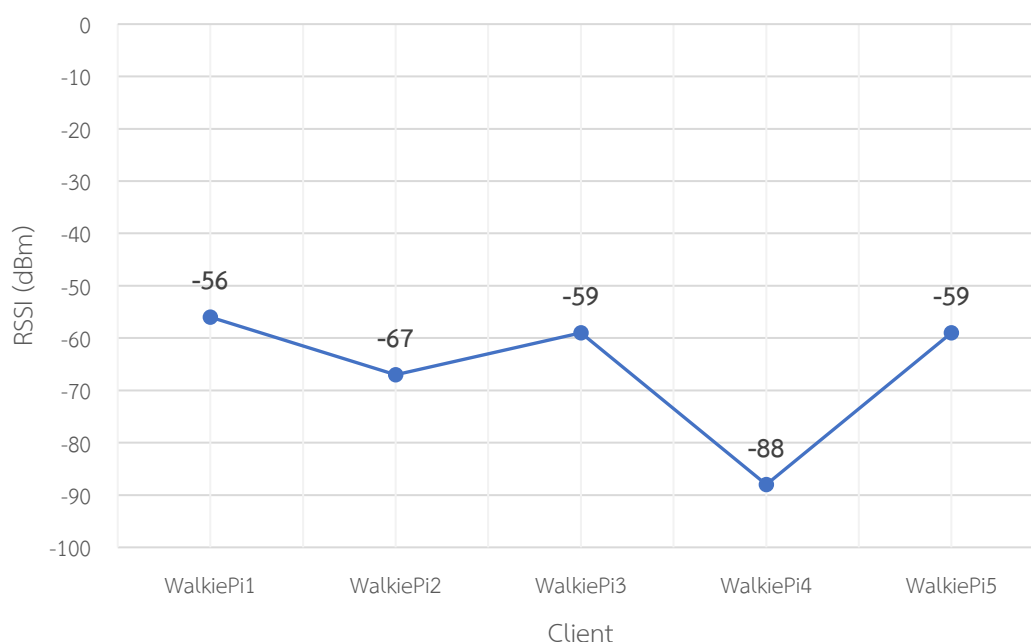
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบด้วยการวัดค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด โดยผลการทดสอบดังกล่าวจะนำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อย่อยดังนี้คือ ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดหลัก (Main Node) และผลการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลัก และโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (Sub Node No.1)

ก. ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

ในขั้นตอนของการทดสอบ ผู้วิจัยจะนำเครื่องลูกข่ายจำนวนเครื่อง 5 เครื่อง โดยกำหนดนามเรียกขาน 'WalkiePi1' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง 'WalkiePi2' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง 'WalkiePi3' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม 'WalkiePi4' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ และกำหนดให้ 'WalkiePi5' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขห้า เครื่องลูกข่ายทั้ง 5 เครื่องจะประจำอยู่ภายในโนดหลักเพื่อทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดเดียวกัน หรือทดสอบว่าในโครงข่ายเดียวกันสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดหลัก แสดงไว้ในตารางที่ 28 และรูปที่ 107 และผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดหลัก แสดงไว้ในตารางที่ 29 และ 108

ตารางที่ 28 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

โนด	เครื่องลูกข่ายภายในโนด	RSSI (dBm)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	WalkiePi1	-56
	WalkiePi2	-67
	WalkiePi3	-59
	WalkiePi4	-88
	WalkiePi5	-59

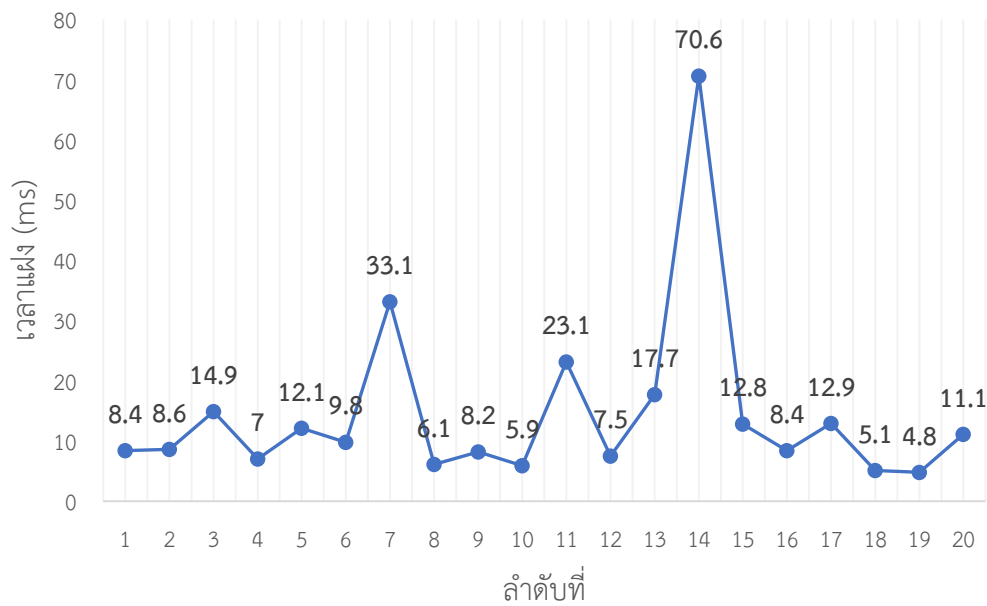


รูปที่ 107 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

จากรูปที่ 107 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก พบว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ (WalkiePi4) มีค่า Receive Signal Strength Indicator ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ภายในโนดหลักหรือในโครงข่ายเดียวกัน แต่เมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบเครื่องลูกข่ายดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการสื่อสารทางเสียงทั้งการทำงานเป็นภาครับ (Receiver; Rx) และการทำงานเป็นภาคส่ง (Transmitter; Tx) เสียงการสนทนา ผู้วิจัยยังไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงที่ขัดข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่มีค่า Receive Signal Strength Indicator ที่น้อยที่สุด แต่ยังคงเป็นค่าที่ยอมรับได้และเพียงพอที่จะสามารถติดต่อสื่อสารกันภายในโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 29 การทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

โนด	ลำดับที่	เครื่องลูกข่าย ภาคส่ง (Tx)	เครื่องลูกข่าย ภาครับ (Rx)	ค่าเวลา แฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	1	WalkiePi1	WalkiePi2	8.402
	2		WalkiePi3	8.634
	3		WalkiePi4	14.947
	4		WalkiePi5	7.078
	5	WalkiePi2	WalkiePi1	12.148
	6		WalkiePi3	9.843
	7		WalkiePi4	33.121
	8		WalkiePi5	6.092
	9	WalkiePi3	WalkiePi1	8.246
	10		WalkiePi2	5.866
	11		WalkiePi4	23.095
	12		WalkiePi5	7.499
	13	WalkiePi4	WalkiePi1	17.755
	14		WalkiePi2	70.572
	15		WalkiePi3	12.776
	16		WalkiePi5	8.452
	17	WalkiePi5	WalkiePi1	12.942
	18		WalkiePi2	5.103
	19		WalkiePi3	4.811
	20		WalkiePi4	8.078



รูปที่ 108 กราฟการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

จากรูปที่ 108 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดหลัก พบว่าค่าเวลาแฝงมีค่ามากที่สุดที่ลำดับที่ 14 คือเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่เป็นภาคส่งสัญญาณเสียงไปที่เครื่องหมายเลขสองเป็นภาครับ โดยมีค่าเวลาตอบสนอง 70 ms แต่เมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบเครื่องลูกข่ายดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการสื่อสารทางเสียงทั้งการทำงานเป็นภาครับและการทำงานเป็นภาคส่ง เสียงการสนทนา ผู้วิจัยยังไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงที่ขัดข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาแฝง ที่มากที่สุดที่เครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่เป็นภาคส่งสัญญาณเสียงไปที่เครื่องหมายเลขสองเป็นภาครับ ยังคงมีระยะเวลาตอบสนองในการสื่อสารที่ยังคงมีประสิทธิภาพ

ข. ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

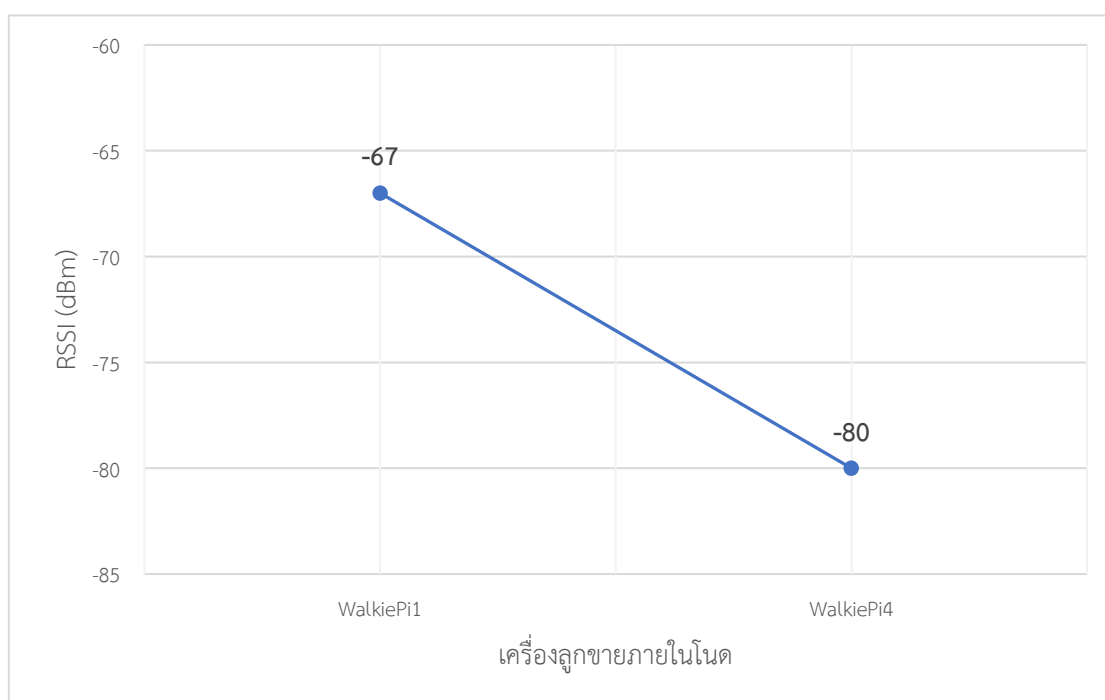
ในขั้นตอนของการทดสอบการสื่อสารระหว่างโนดหลัก และโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ผู้วิจัยจะทำการกระจายเครื่องลูกข่ายออกไป โดยเครื่องลูกข่ายจะถูกแบ่งให้ประจำภายในโนดหรือโครงข่าย โดยการใช้นามเรียกขาน 'WalkiePi1' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง และ 'WalkiePi4' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ ซึ่งจะประจำอยู่ในโนดหลัก และใช้นามเรียกขาน 'WalkiePi2' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง 'WalkiePi3' คือเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง และ 'WalkiePi5' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง จะประจำอยู่ในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

สำหรับการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดนั้น เป็นการทดสอบเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกันได้สำเร็จ ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดหลัก ในตารางที่ 30 และกราฟในรูปที่ 109 และนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength

Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ในตารางที่ 31 และในกราฟรูปที่ 110 และได้นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลัก และโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ในตารางที่ 32 และกราฟในรูปที่ 111 เป็นส่วนสุดท้าย

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

โนด	เครื่องลูกข่ายภายในโนด	RSSI (dBm)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	WalkiePi1	-67
	WalkiePi4	-80

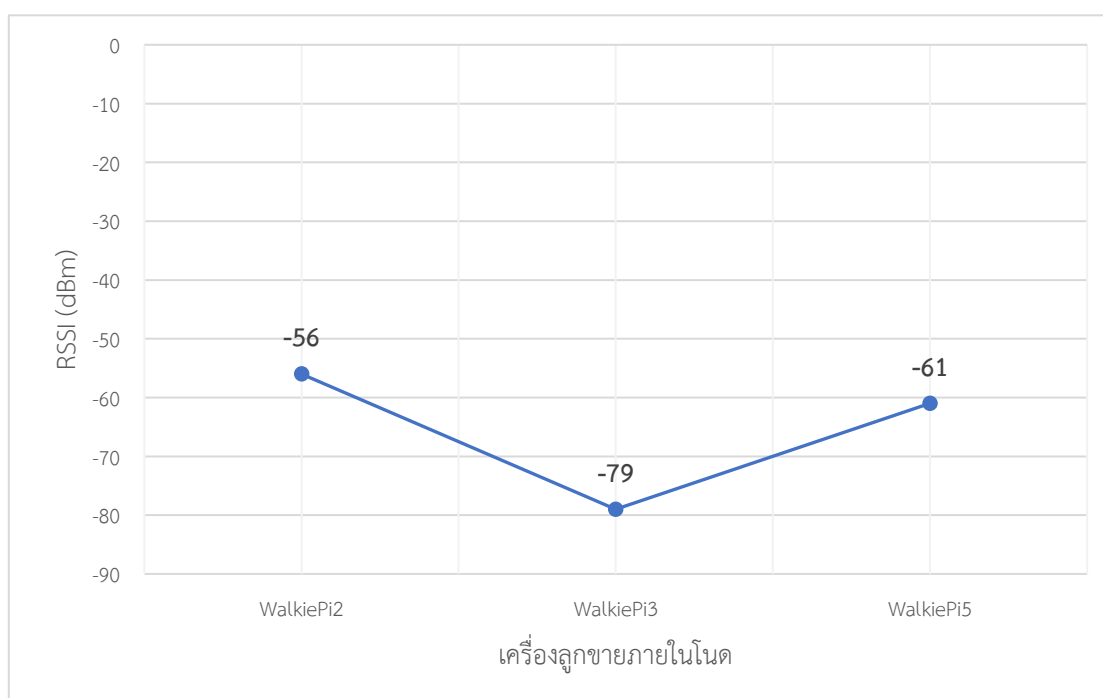


รูปที่ 109 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก

จากรูปที่ 109 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดหลัก พบว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ (WalkiePi4) มีค่า Receive Signal Strength Indicator น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ภายในโนดหลักหรือโครงข่ายเดียวกัน แต่เมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบเครื่องลูกข่ายดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการสื่อสารทางเสียงทั้งการทำงานเป็นภาครับ และการทำงานเป็นภาคส่งเสียงการสนทนา ผู้วิจัยยังไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงที่ขัดข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่มีค่า Receive Signal Strength Indicator ที่น้อยที่สุด แต่ยังคงเป็นค่าที่ยอมรับได้ และเพียงพอที่จะสามารถติดต่อสื่อสารกันภายในโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 31 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

โนด	เครื่องลูกข่ายภายในโนด	RSSI (dBm)
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	WalkiePi2	-56
	WalkiePi3	-79
	WalkiePi5	-61

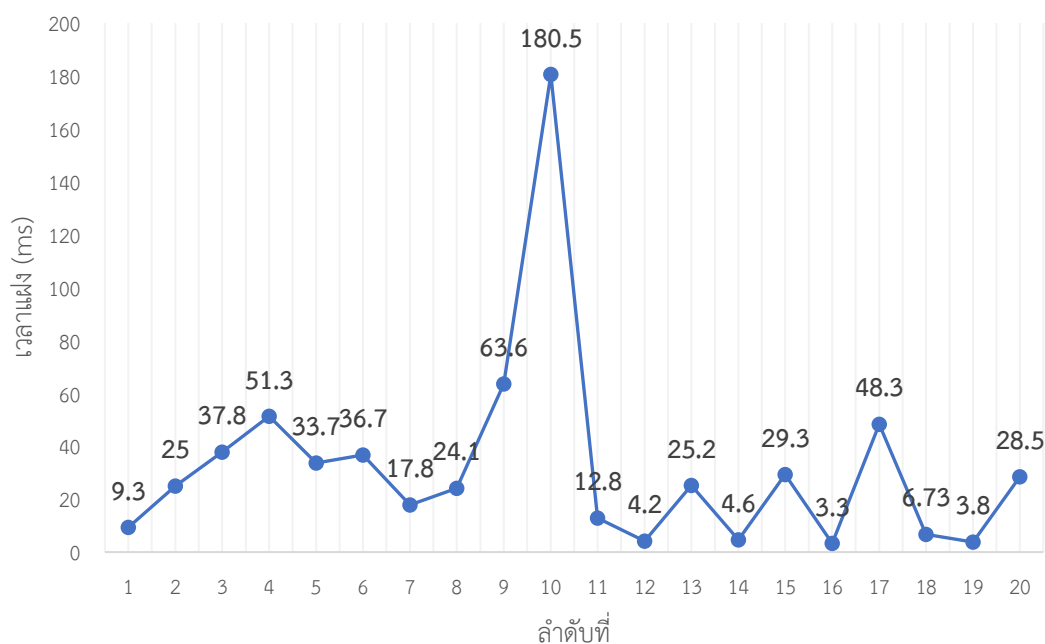


รูปที่ 110 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

จากรูปที่ 110 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง พบว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม (WalkiePi3) มีค่า Receive Signal Strength Indicator น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ภายในโนดหลักหรือโครงข่ายเดียวกัน แต่เมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบเครื่องลูกข่ายดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการสื่อสารทางเสียงทั้งการทำงานเป็นภาครับและการทำงานเป็นภาคส่งเสียงการสนทนา ผู้วิจัยยังไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงที่ขัดข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่มี ค่า Receive Signal Strength Indicator ที่น้อยที่สุด แต่ยังคงเป็นค่าที่ยอมรับได้และเพียงพอที่จะสามารถติดต่อสื่อสารกันภายในโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 32 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

โนด	ลำดับที่	เครื่องลูกข่าย ภาคส่ง (Tx)	เครื่องลูกข่าย ภาครับ (Rx)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์ และเครื่องแม่ข่าย)	1	WalkiePi1	WalkiePi2	9.271
	2		WalkiePi3	24.961
	3		WalkiePi4	37.775
	4		WalkiePi5	51.35
	5	WalkiePi4	WalkiePi1	33.696
	6		WalkiePi2	36.736
	7		WalkiePi3	17.841
	8		WalkiePi5	24.128
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	9	WalkiePi2	WalkiePi1	63.602
	10		WalkiePi3	180.472
	11		WalkiePi4	12.843
	12		WalkiePi5	4.227
	13	WalkiePi3	WalkiePi1	25.248
	14		WalkiePi2	4.64
	15		WalkiePi4	29.34
	16		WalkiePi5	3.346
	17	WalkiePi5	WalkiePi1	48.28
	18		WalkiePi2	6.727
	19		WalkiePi3	3.79
	20		WalkiePi4	28.536



รูปที่ 111 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

จากรูปที่ 111 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ระหว่างโนดหลัก และโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง พบว่าค่าเวลาแฝง มีค่ามากที่สุดที่ลำดับที่ 10 คือเครื่องลูกข่ายหมายเลขสองเป็นภาคส่ง สัญญาณเสียงไปที่เครื่องหมายเลขสามเป็นภาครับ โดยมีค่าเวลาตอบสนอง 180.5 ms แต่เมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบเครื่องลูกข่ายดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการสื่อสารทางเสียงทั้งการทำงานเป็นภาครับและการทำงานเป็นภาคส่งเสียงการสนทนา ผู้วิจัยยังไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงที่ขัดข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาแฝงที่มากที่สุดที่เครื่องลูกข่ายหมายเลขสองเป็นภาคส่งสัญญาณเสียงไปที่เครื่องหมายเลขสามเป็นภาครับ ยังคงมีระยะเวลาตอบสนองในการสื่อสารที่ยังคงมีประสิทธิภาพ

6.4 สรุปผลการทดสอบ

ผู้วิจัยได้นำเสนอ การออกแบบโครงข่ายระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล โดยโครงสร้างของระบบสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้าที่ผู้วิจัยนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกเป็นเครื่องแม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่จัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบที่ทำการเชื่อมต่อภายในโครงข่าย โดยอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นเครื่องแม่ข่ายคือ Raspberry Pi 4 Model โดยทำงานร่วมกับระบบซอฟต์แวร์คือ Mumble Server ในส่วนที่สองคือเครื่องลูกข่าย (Client) ทำหน้าที่ในการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้งานในการสื่อสารทางเสียงทั้งส่งข้อมูลเสียงไปที่ผู้ใช้งานปลายทางและรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้งานปลายทาง และใช้ย่านความถี่ 2.4 GHz ในการสื่อสารภายในโครงข่าย โดยอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นเครื่องลูกข่ายคือ Raspberry Pi 4 Model และในส่วนที่สุดท้ายเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi Access Point) หน้าที่กระจายสัญญาณย่านความถี่ 2.4 GHz ให้เครื่องลูกข่ายและเครื่องแม่ข่ายสามารถสื่อสารกันได้

ในภายในระบบ โดยอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณคือเราเตอร์ (Router) และทวนสัญญาณ (Repeater)

ผู้วิจัยยังได้นำเสนอ รายละเอียดของการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย สำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย การวางแผน การทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้ำ และวิธีการดำเนินการ ทดสอบประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบ ดิจิทัลเพื่อการใช้งานจริงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในพื้นที่การใช้งานจริง 2 แห่งคือ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และที่วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานระบบ เช่น การวัดทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator และการวัดทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการทำงานของเครื่องลูกข่ายในระบบทั้งสองรูปแบบคือ การสื่อสารแบบ หนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด และในที่สุดท้าย เป็นการทดสอบความแรงสัญญาณ ที่ต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโหนดหลักสามารถรับได้ด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้โปรแกรม Wavemon พบว่ามีค่าดังกล่าว แปรผกผันกับค่าระยะทางภายในโครงข่ายทุก ๆ โหนด และปัจจัยที่มีผลต่อค่า Receive Signal Strength Indicator คือการดูดซับสัญญาณ (Absorption) ที่เกิดจากพื้นที่ภายในถ้ำที่มีน้ำขังบางส่วนและการเลี้ยวเบนของสัญญาณ (Diffraction) ที่เกิดจากในลักษณะภายในถ้ำที่มีวัตถุวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

2) ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้คำสั่ง Ping ซึ่งเป็นเครื่องมือเกี่ยวกับการทดสอบการเชื่อมต่อระบบในโครงข่ายพบว่า มีค่าเวลาแฝงแปรผันตรงกับค่าระยะทางภายในโครงข่ายทุก ๆ โหนด และปัจจัยที่มีผลต่อค่าเวลาแฝงคือ การเคลื่อนที่ของสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกัน (Multipath) เนื่องจากปัญหาของการ เลี้ยวเบนของสัญญาณ และปัญหาของการดูดซับคลื่นจากน้ำ

3) ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด พบว่าสามารถทำการ สื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งภายในโหนดเดียวกันหรือระหว่างโหนด

จากผลการทดสอบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูง ระบบดิจิทัลเพื่อการใช้งานจริงสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยในพื้นที่การใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจะต้องทำการพัฒนาระบบการเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้มีระยะทางที่ไกลมากขึ้น รวมทั้งมี ประสิทธิภาพในการสื่อสารภายในโหนดและระหว่างโหนดให้มากขึ้น

7. การพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในการดำเนินงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลเพื่อการใช้งานจริงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย จากนั้นได้ดำเนินการทดสอบในพื้นที่การใช้งานจริง 2 แห่งคือ ถ้าป่าภูทิว อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และที่วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในการใช้งานจริง เช่น การวัดทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator การวัดทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการทำงานของเครื่องลูกข่ายในระบบ ซึ่งการดำเนินการวิจัยในขั้นตอนถัดมา ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงระบบดังกล่าวเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยได้เรียนรู้จากผลการทดสอบการใช้งานจริงดังกล่าวข้างต้น จากนั้นผู้วิจัยได้นำระบบที่ผ่านการพัฒนาปรับปรุงเรียบร้อยแล้วทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ไปทำการทดสอบการใช้งานจริงอีกครั้งที่ วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ และนำผลการทดสอบที่ได้ไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบระบบก่อนการพัฒนาปรับปรุงต่อไป

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะเริ่มจากการนำเสนอการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ จากนั้นจะกล่าวถึงการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล และกล่าวถึงสรุปผลการทดสอบเป็นส่วนสุดท้าย

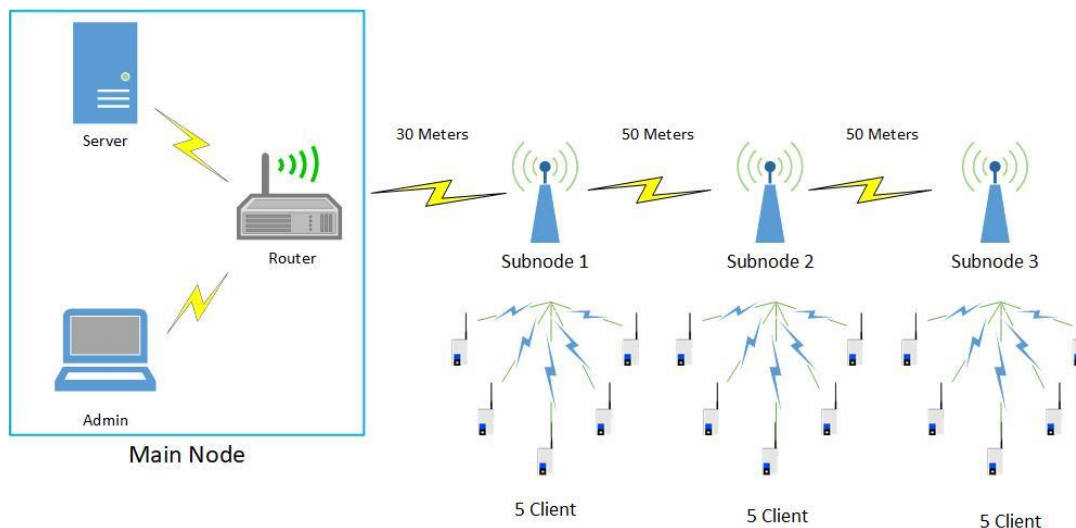
7.1 แนวทางในการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ผู้วิจัยจะนำเสนอ การพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ โดยระบบที่ออกแบบขึ้นประกอบด้วยเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลต้นแบบจำนวน 1 โหนดหลัก (Main node) 3 โหนดย่อย (Sub node) และ 15 โหนดผู้ใช้งาน (Client) พร้อมกับการนำเสนอผลการทดสอบการใช้งานจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจากพื้นที่ทั้งสองแห่ง ผลการดำเนินการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าวจะเริ่มให้รายละเอียดจาก การนำเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ และวิธีการดำเนินการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้ำ ตามลำดับ

7.1.1 การออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ การออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำจำนวนสองแห่ง เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในการใช้งานจริงประกอบด้วยการวัดทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator การวัดทดสอบค่าและค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการทำงานของลูกข่ายในระบบในสองรูปแบบจากสถานที่ที่แตกต่างกันทั้งสองแห่งคือ การสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโหนดและระหว่างโหนดในพื้นที่ของถ้ำป่าภูทิว และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโหนดภายในโหนดและระหว่างโหนดในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว ซึ่งแผนผังการออกแบบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำทั้งสองแห่งจะมีรูปแบบเหมือนกัน เพื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ได้แก่ ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง (Latency) มาทำการเปรียบเทียบเพื่อประเมินประสิทธิภาพว่าการพัฒนาระบบ

สายอากาศและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำจะมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งกว่าระบบรูปแบบเดิมหรือไม่ ซึ่งจะแสดงรูปแบบแผนผังการทำงานทั้งหมดตามรูปที่ 112



รูปที่ 112 แผนผังการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำปาฏิหาริย์และถ้ำเชียงดาว

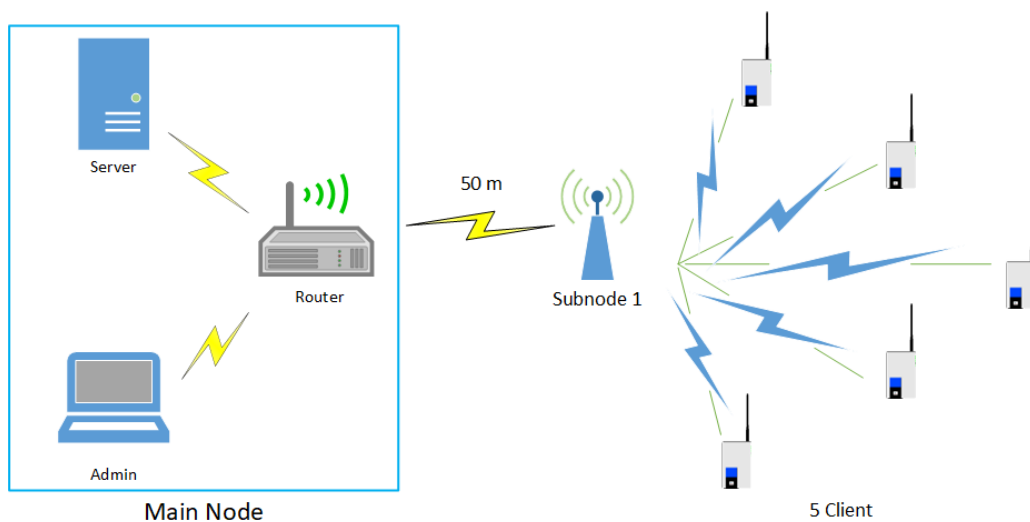
จากรูปที่ 112 เป็นแผนผังการวางโครงข่ายระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำจำนวน 2 แห่ง โดยผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และวัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เป็นสถานที่การดำเนินงานทดสอบในการสื่อสารรูปแบบนี้ และการออกแบบระบบเพื่อทำการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง ซึ่งในระบบประกอบด้วยเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลต้นแบบจำนวน 1 โหนดหลัก (Main node) 3 โหนดย่อย (Sub node) และ 15 โหนดผู้ใช้งาน (Client) ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โดยอันดับแรกในโหนดหลักจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์จัดเส้นทาง รุ่น TP-Link Archer MR200 ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลักโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นเครื่องแม่ข่าย และมีโปรแกรม Mumble เป็นโปรแกรมสำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี และประยุกต์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งโปรแกรมที่ทีมวิจัยพัฒนาขึ้นสำหรับการเฝ้าระวังและดูแลระบบสื่อสารดังกล่าว จากนั้นภายในโหนดย่อยลำดับต่าง ๆ (Node internal) โดยเริ่มต้นจากโหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง มีเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่องซึ่งมีการกำหนดนามเรียกขาน 'WalkiePi1' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง 'WalkiePi2' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง 'WalkiePi3' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม 'WalkiePi4' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ และกำหนดให้ 'WalkiePi5' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขห้า ต่อมาคือโหนดย่อยลำดับที่สอง มีเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่องซึ่งมีการกำหนดนามเรียกขาน 'WalkiePi6' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขหก 'WalkiePi7' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขเจ็ด 'WalkiePi8' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขแปด 'WalkiePi9' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขเก้า และกำหนดให้ 'WalkiePi10' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบ และสุดท้ายคือโหนดย่อยลำดับที่สาม มีเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่องซึ่งมีการกำหนดนามเรียกขาน 'WalkiePi11' เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบเอ็ด

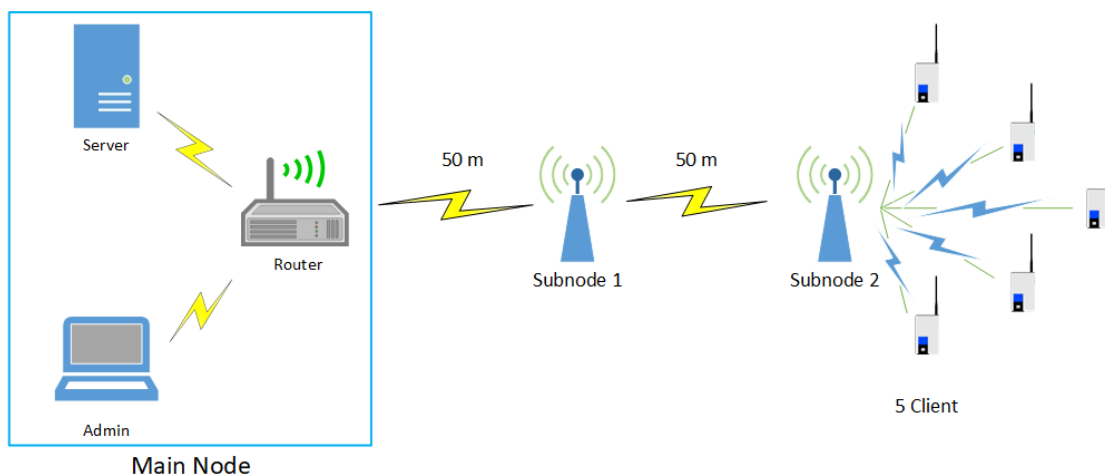
‘WalkiePi12’ เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสอง ‘WalkiePi13’ เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสาม ‘WalkiePi14’ เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสี่ และกำหนดให้ ‘WalkiePi15’ เป็นเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบห้าตามลำดับ

7.1.2 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานภายในถ้ำ

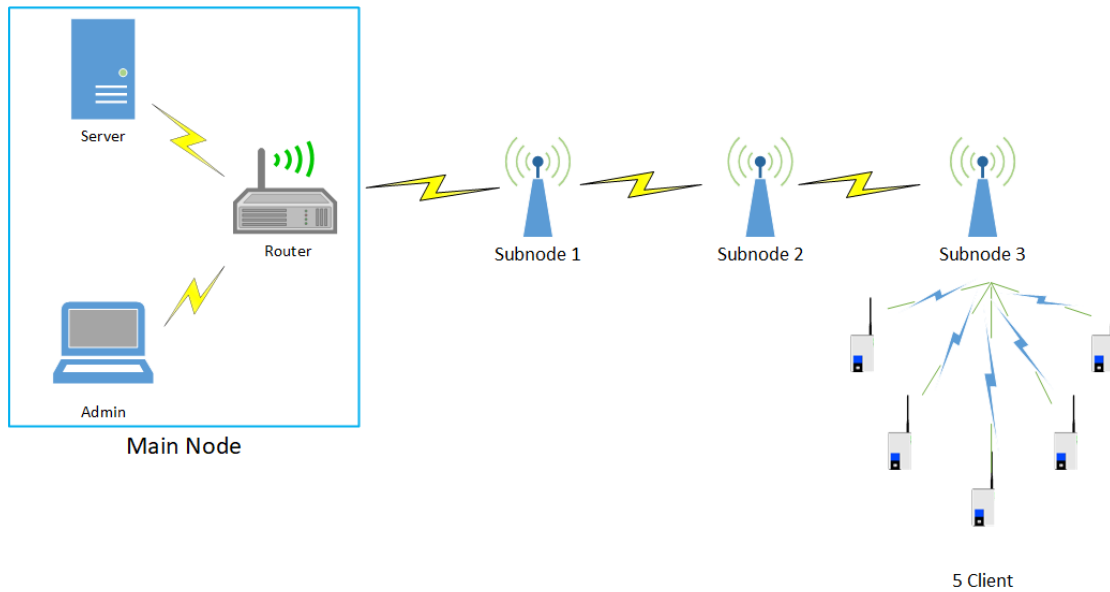
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในพื้นที่การใช้งานจริงจำนวนสองแห่งดังกล่าวไว้ข้างต้น โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่างๆ (Node internal) ตามรูปที่ 113, 114 และ 115 และส่วนที่สองคือการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ (Node External) ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 116



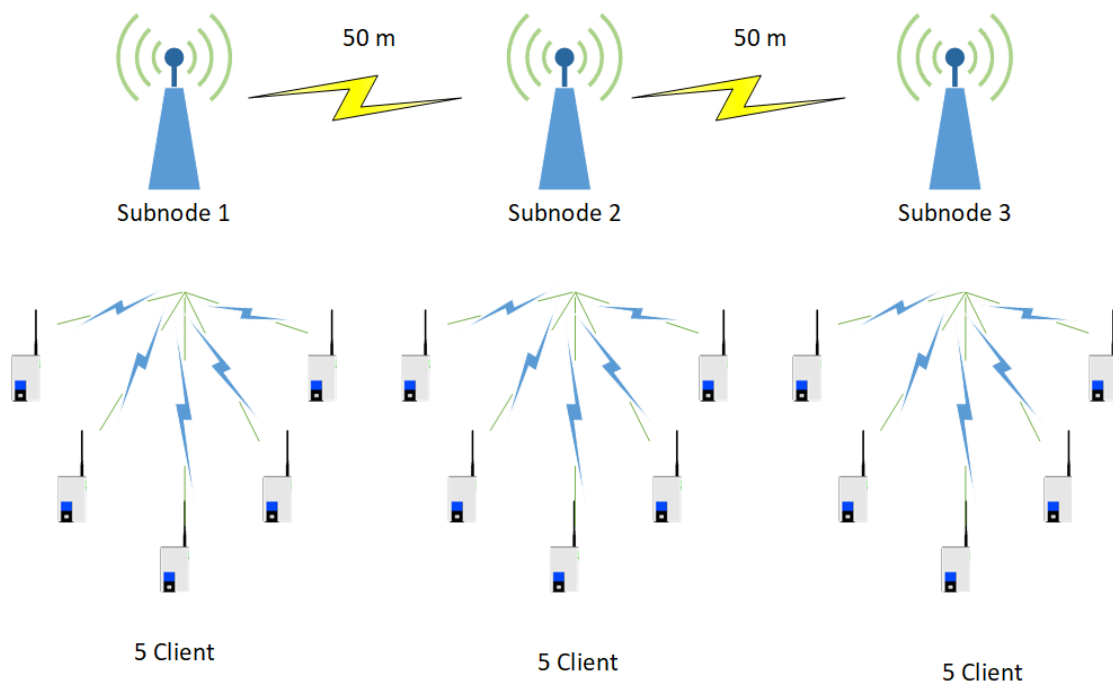
รูปที่ 113 แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 114 แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่สองในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 115 แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่สามในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 116 รูปแผนผังการทดสอบระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในพื้นที่การใช้งานจริง

7.1.3 วิธีการดำเนินการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้ำ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการดำเนินการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้ำ โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบในระหว่างสถานที่การใช้งานจริงสองแห่ง และได้ทำ

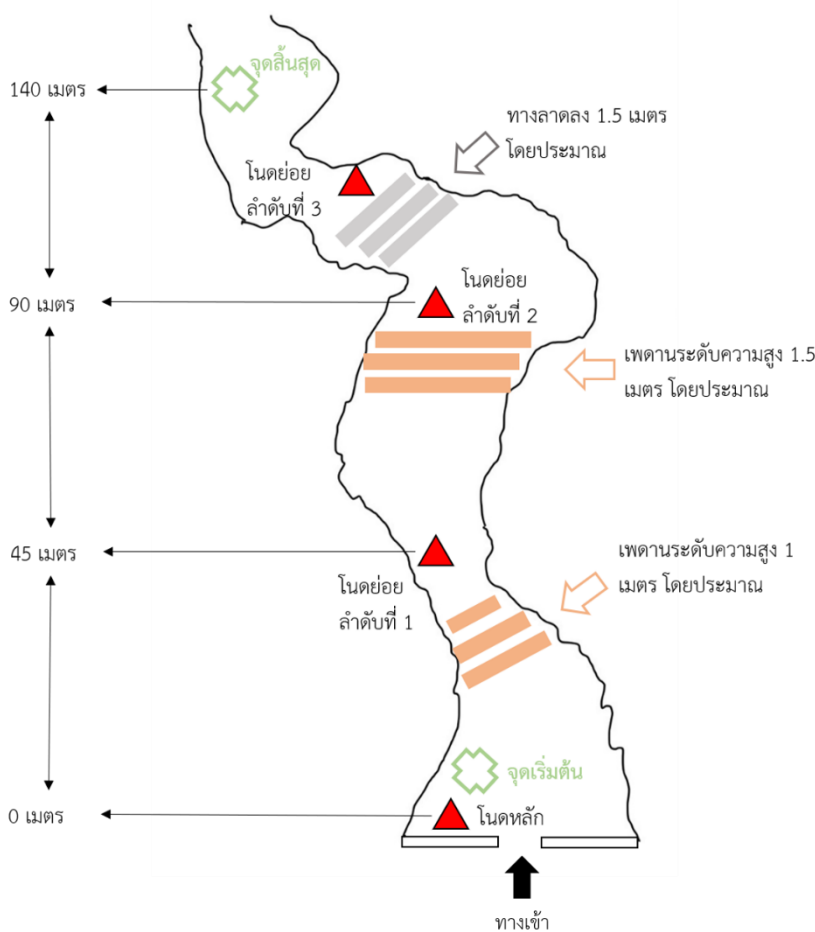
การเปรียบเทียบในแง่ของการพัฒนาประสิทธิภาพของสายอากาศและโปรแกรมดูและระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยทีมวิจัย จึงมีแผนการทดสอบดังนี้

ก. แผนการทดสอบการสื่อสารแบบอุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบสายอากาศเจาะจงทิศทาง

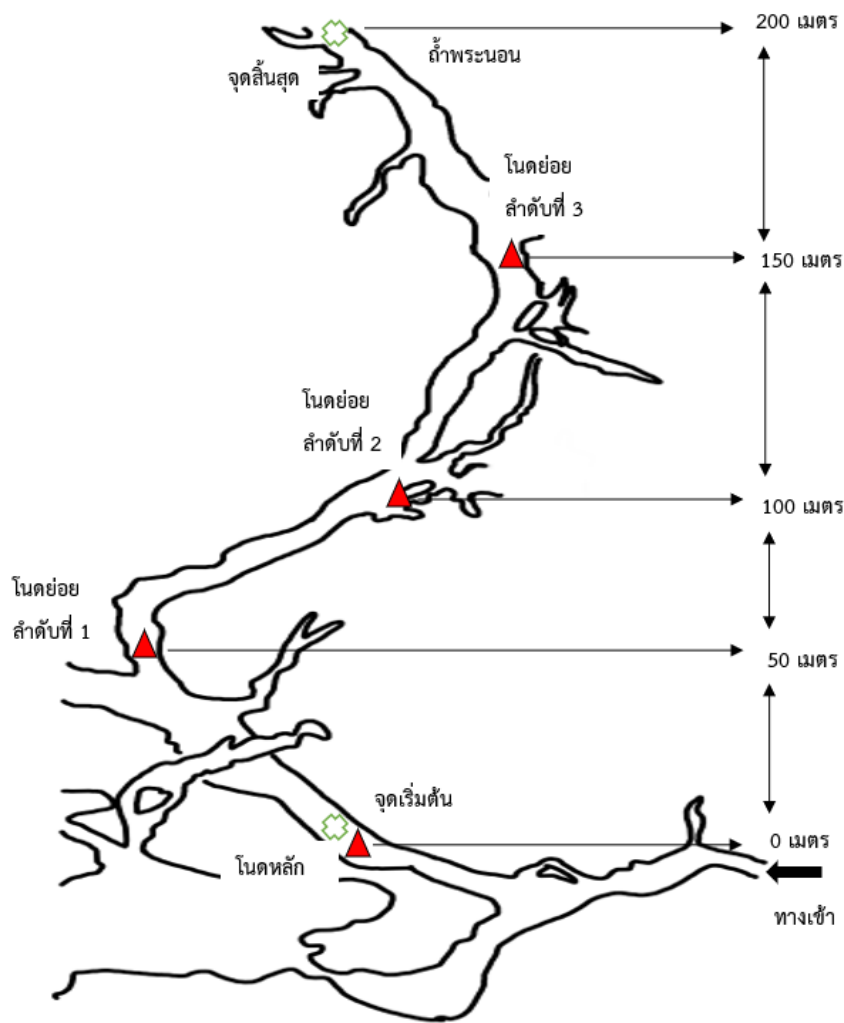
ผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ ถ้ำป่าภูหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี เป็นสถานที่ในการดำเนินงานในการสื่อสารรูปแบบนี้ ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นระบบที่ยังไม่ได้ทำการพัฒนาระบบสายอากาศ แผนภาพสถานที่การดำเนินงานภายในถ้ำดังกล่าวนำเสนอตามรูปที่ 117

ข. แผนการทดสอบการสื่อสารแบบอุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนทิศทางพร้อมด้วยอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ

ผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เป็นสถานที่การดำเนินงานในการสื่อสารรูปแบบนี้ ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบสายอากาศให้เป็นสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) เพื่อให้สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำรวมทั้งเพิ่มความไวการรับสัญญาณ (Sensitivity) และเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณนี้โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) แผนภาพสถานที่การดำเนินงานภายในถ้ำดังกล่าวนำเสนอตามรูปที่ 118



รูปที่ 117 แผนภาพสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้ำป่าภูหารีย์



รูปที่ 118 แผนภาพสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว

จากรูปที่ 117 และ 118 เป็นแผนภาพสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้ำปาฏิหาริย์และถ้ำเชียงดาว โดยหลักการทดสอบของทั้งสองแห่งจะมีรูปแบบเหมือนกัน ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ การทดสอบการสื่อสารภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ และการทดสอบการสื่อสารระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยการทดสอบจะทำการเก็บค่า Receive Signal Strength Indicator และการวัดทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency)

1) การทดสอบการสื่อสารภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ลำดับแรกเป็นการทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้โปรแกรม Wavemon ที่เป็นเครื่องมือสำหรับระบบปฏิบัติการราสเบอรี่ ที่ทำงานบนระบบฮาร์ดแวร์ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi โดยลักษณะของการทดสอบจะทำการสื่อสารภายในโนดเดียวกัน ซึ่งในขั้นตอนการสื่อสารจะทำการพูดเพื่อส่งสัญญาณเสียงจากต้นทางไปที่ปลายทาง ยกตัวอย่างเช่น ต้นทางคือเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งส่งสัญญาณเสียงไปที่ปลายทางคือเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง โดยในระหว่างที่ทำการส่งสัญญาณเสียงจะทำการเก็บข้อมูลค่า Receive Signal Strength Indicator ไปพร้อมๆ กัน

เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จสิ้น ผู้วิจัยจะทำการทดสอบเพื่อบันทึกค่าเวลาแฝงภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยการนำเครื่องลูกข่ายหมายเลขใด ๆ ก็ตามภายในโนด กำหนดเป็นเครื่องลูกข่ายภาคส่ง (Tx) จากนั้น

ทำการส่งสัญญาณแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ซึ่งในที่นี้แทนเป็นภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยเครื่องลูกข่ายหมายเลขต่าง ๆ ที่เหลือจะถูกกำหนดเป็นเครื่องลูกข่ายภาครับ (Rx) ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้เครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง (WalkiePi1) เป็นเครื่องลูกข่ายภาคส่ง (Tx) จากนั้นทำการส่งสัญญาณแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง โดยเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่เหลืออยู่จะประกอบไปด้วยเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง (WalkiePi2) เครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม (WalkiePi3) เครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ (WalkiePi4) และเครื่องลูกข่ายหมายเลขห้า (WalkiePi5) กำหนดเป็นเครื่องลูกข่ายภาครับ (Rx) และทำการเก็บบันทึกค่าเวลาแฝงจากการปิง (Ping) จำนวน 20 ข้อมูล และในขณะเดียวกัน ผู้วิจัยได้ทำการพูดติดต่อสื่อสารเพื่อที่สังเกตการตอบสนองของค่าเวลาแฝงตามเวลาจริง โดยอันดับแรกจะทำการปิงจากเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายหมายเลขสองจำนวน 20 ข้อมูล จากนั้นทำการพิจารณาข้อมูลทั้งหมดโดยพิจารณาถึงข้อมูลที่มีค่าเวลาแฝงต่ำสุด (Lowest Latency) และค่าเวลาแฝงมากที่สุด (Highest Latency) เมื่อพิจารณาข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมดซึ่งจะทำให้ได้ค่าเวลาแฝงเฉลี่ย (Average Latency) ซึ่งถือว่าการเก็บข้อมูลเฉพาะการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายเลขสองได้สำเร็จเรียบร้อย จากนั้นจึงจะทำการเก็บข้อมูลจากการปิงจากเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายเลขอื่น ๆ ภายในโนดจนครบทั้งหมดจึงจะสลับไปยังเครื่องลูกข่ายอื่นๆ ตามลำดับ

2) การทดสอบการสื่อสารระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ ลำดับแรกเป็นการทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้โปรแกรม Wavemon ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับระบบปฏิบัติการราสเปียน ที่ทำงานบนระบบฮาร์ดแวร์ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi โดยลักษณะของการทดสอบจะทำการสื่อสารระหว่างโนดย่อย โดยทำการสื่อสารด้วยการพูดส่งสัญญาณเสียงจากต้นทางไปที่ปลายทาง ยกตัวอย่างเช่น ต้นทางคือเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งที่อยู่ภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งทำการพูดเพื่อส่งสัญญาณเสียงไปที่ปลายทางคือเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบห้าที่อยู่ภายในโนดย่อยลำดับที่สาม ในระหว่างที่ทำการส่งสัญญาณเสียงผู้วิจัยก็จะทำการเก็บข้อมูลค่า Receive Signal Strength Indicator ไปพร้อมๆ กัน

เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบค่าเวลาแฝงระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ โดยการนำเครื่องลูกข่ายหมายเลขต่าง ๆ ภายในโนดย่อยลำดับใด ๆ ก็ตาม โดยกำหนดให้เป็นเครื่องลูกข่ายภาคส่ง (Tx) จากนั้นทำการส่งสัญญาณแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดไปยังโนดย่อยลำดับที่ที่อยู่ปลายทางโดยกำหนดให้เป็นเครื่องลูกข่ายภาครับ (Rx) ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้เครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง (WalkiePi1) ภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งเป็นเครื่องลูกข่ายภาคส่ง จากนั้นทำการส่งสัญญาณแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดไปยังโนดย่อยลำดับที่สามเป็นเครื่องลูกข่ายภาครับ โดยเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่สามจะประกอบไปด้วยเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบเอ็ด (WalkiePi11) เครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสอง (WalkiePi12) เครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสาม (WalkiePi13) เครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบสี่ (WalkiePi14) และเครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบห้า (WalkiePi15) และทำการเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงจากการปิง (Ping) จำนวน 20 ข้อมูล และในขณะเดียวกัน ผู้วิจัยได้ทำการติดต่อสื่อสารทางเสียง เพื่อที่จะสามารถสังเกตการตอบสนองของค่าเวลาแฝงตามเวลาจริงได้ โดยลำดับแรกจะทำการปิงจากเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายหมายเลขสิบเอ็ดจำนวน 20 ข้อมูล จากนั้นทำการพิจารณาข้อมูลทั้งหมด โดยพิจารณาถึงข้อมูลที่มีค่าเวลาแฝงต่ำสุด (Lowest Latency) และค่าเวลาแฝงมากที่สุด (Highest Latency) เมื่อพิจารณาข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมดซึ่งจะทำให้ได้ค่าเวลาแฝงเฉลี่ย (Average Latency) ซึ่งถือว่าการเก็บข้อมูลเฉพาะการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายเลขสิบเอ็ดได้สำเร็จเรียบร้อย จากนั้นจึงจะทำการเก็บข้อมูลจากการปิงจากเครื่องลูก

ข่ายหมายเลขหนึ่งไปที่เครื่องลูกข่ายเลขอื่นๆ ภายในโนดย่อยลำดับที่สามจนครบ แล้วค่อยทำการสลับเครื่องลูกข่ายอื่นๆ ตามลำดับ

7.2 การพัฒนาสายอากาศสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ผู้วิจัยจะนำเสนอ การพัฒนาสายอากาศของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) ซึ่งสายอากาศเดิมของอุปกรณ์ทวนสัญญาณดังกล่าวเป็นสายอากาศประเภทเจาะจงทิศทาง แต่เมื่อผู้วิจัยนำไปใช้งานจริงภายในถ้าพบว่า สายอากาศดังกล่าวยังไม่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่ำเกินไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาสายอากาศขึ้นมาใหม่เป็นสายอากาศคู่ (Dual antennas) เพื่อให้สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำรวมทั้งเพิ่มความไวการรับ (Sensitivity) และเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณนี้โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) สำเร็จรูปที่มีจำหน่ายทั่วไป ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างโนดหลักที่อยู่ถัดไปสามารถเพิ่มระยะทางได้ประมาณ 70 – 80 เมตร

ในการพัฒนาระบบสายอากาศที่อยู่ภายในอุปกรณ์ทวนสัญญาณของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขสองส่วนหลักของโครงสร้าง โดยส่วนที่หนึ่งคือการปรับเปลี่ยนทิศทางของสายอากาศ ส่วนที่สองคือการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณให้แก่อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เพื่อให้ได้อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่มีสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง

โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณประกอบไปด้วย 3 ลำดับ ได้แก่ ลำดับที่หนึ่งเป็นชั้นบนสุดที่อยู่ในภายในของอุปกรณ์ทวนสัญญาณซึ่งคือแผ่นวงจรพิมพ์บังคับทิศทางของสายอากาศ ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 119 ลำดับที่สองเป็นชั้นกลางที่อยู่ในภายในของอุปกรณ์ทวนสัญญาณคือแผ่นวงจรพิมพ์สายอากาศ ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 120 และลำดับที่สามเป็นชั้นล่างสุดที่อยู่ในภายในของอุปกรณ์ทวนสัญญาณคือแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นส่วนประมวลผลสัญญาณของสายอากาศ ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 121 ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาสายอากาศให้เป็นสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 122



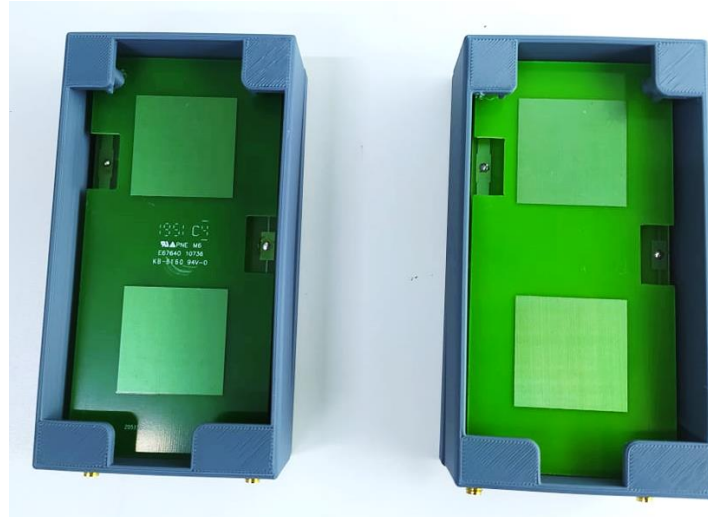
รูปที่ 119 แผ่นวงจรพิมพ์บังคับทิศทางของสายอากาศ



รูปที่ 120 แผ่วงจรพิมพ์สายอากาศ

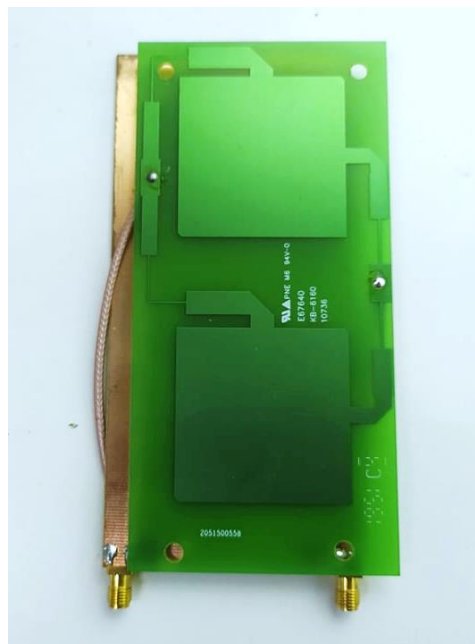


รูปที่ 121 แผ่วงจรพิมพ์การประมวลผลสัญญาณของสายอากาศ



รูปที่ 122 สายอากาศแบบสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas)

จากรูปที่ 122 เป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ดังนั้นภายในที่ทำการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงขึ้นมาคือ รูปผังขวาที่ทำการพัฒนาแผ่นวงจรพิมพ์ขึ้นมาใหม่ และทำการเชื่อมประสาน (Solder) ตัวเชื่อมต่อ SMA (Subminiature version A) ที่ชั้นล่างสุดบริเวณกราวด์ (Ground) เชื่อมต่อกับแผ่นวงจรพิมพ์ประมวลผลสัญญาณ และเชื่อมสายนำสัญญาณสองเส้นเข้ากันตามรูปที่ 123



รูปที่ 123 การเชื่อมต่อระหว่างกราวด์ แผ่นวงจรพิมพ์และสายนำสัญญาณ

เนื่องจากสายอากาศเป็นแบบสองโพลาไรซ์ คือ โพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal) และโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical) ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าความแรงสัญญาณที่ส่งออกได้ทั้งสองโพลาไรซ์ของสายอากาศโดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณจำนวนสองชุดในการทดสอบวัดค่ากำลังที่รับได้และค่า

กำลังที่ส่งได้ที่ระยะทาง 3 เมตร พบว่าขั้วที่อยู่ด้านขวาเป็นขั้วของโพลาริซ์แนวนอน และขั้วที่อยู่ฝั่งซ้ายเป็นโพลาริซ์แนวตั้ง ซึ่งผลทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับส่งได้ทั้งสองโพลาริซ์ ซึ่งแสดงไว้ตามตารางที่ 33 และตารางที่ 34

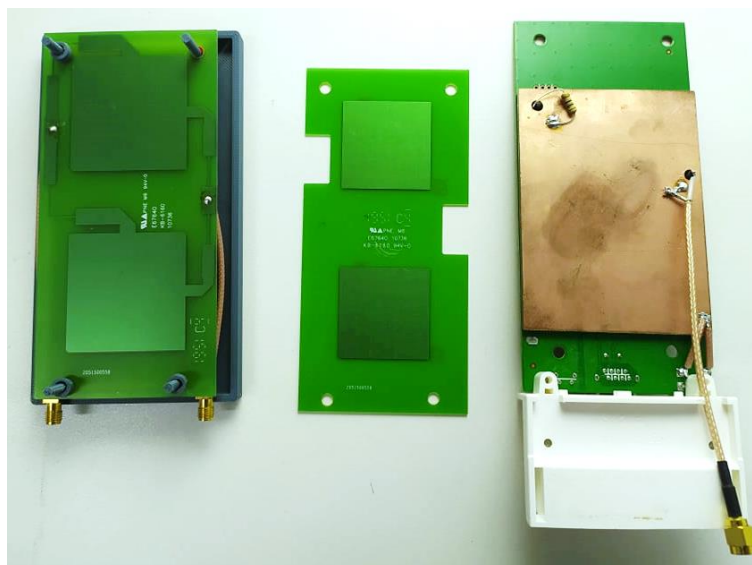
ตารางที่ 33 ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ของสายอากาศทั้งโพลาริซ์แนวนอน (Horizontal) และโพลาริซ์แนวตั้ง (Vertical)

Polarization	ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ แบบไม่เพิ่มกำลัง (dBm)	ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ แบบเพิ่มกำลัง (dBm)
Horizontal	-50	-21
Vertical	-68	-25

ตารางที่ 34 ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ของสายอากาศทั้งโพลาริซ์แนวนอน (Horizontal) และโพลาริซ์แนวตั้ง (Vertical)

Polarization	ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ (dBm)	ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ แบบเพิ่มกำลัง (dBm)
Horizontal	-62	-31
Vertical	-54	-35

จากการทดสอบตามตารางที่ 33 และตารางที่ 34 ผู้วิจัยจึงใช้ขั้วด้านขวาซึ่งเป็นขั้วของโพลาริซ์แนวนอน เพียงขั้วเดียวเนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังให้กับสายอากาศแล้ว สามารถเพิ่มความสามารถในการรับส่งสัญญาณได้มากกว่าขั้วด้านซ้ายที่เป็นโพลาริซ์แนวตั้ง ในส่วนต่อมาเป็นส่วนของบอร์ดประมวลผลของสายอากาศ เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการใช้เพียงแค่ขั้วด้านขวา ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ Impedance ของสายอากาศพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 12-18 โอห์ม ผู้วิจัยจึงนำตัวต้านทางขนาด 15 โอห์มมาบัดกรีเข้ากับขั้วด้านซ้ายเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณ และเนื่องจากผ่านบอร์ดประมวลผลของสายอากาศมีกราวด์อยู่ภายในบอร์ด ผู้วิจัยจึงนำแผ่นทองแดงมาติดที่บอร์ดเพื่อสร้างกราวด์ไว้สำหรับบัดกรีโดยแผ่นทองแดงจะถูกบัดกรีเข้ากับขั้วกราวด์ที่ด้านล่างของบอร์ดประมวลผลของสายอากาศเพื่อลดการสูญเสียภายในสายดังแสดงในรูปที่ 124



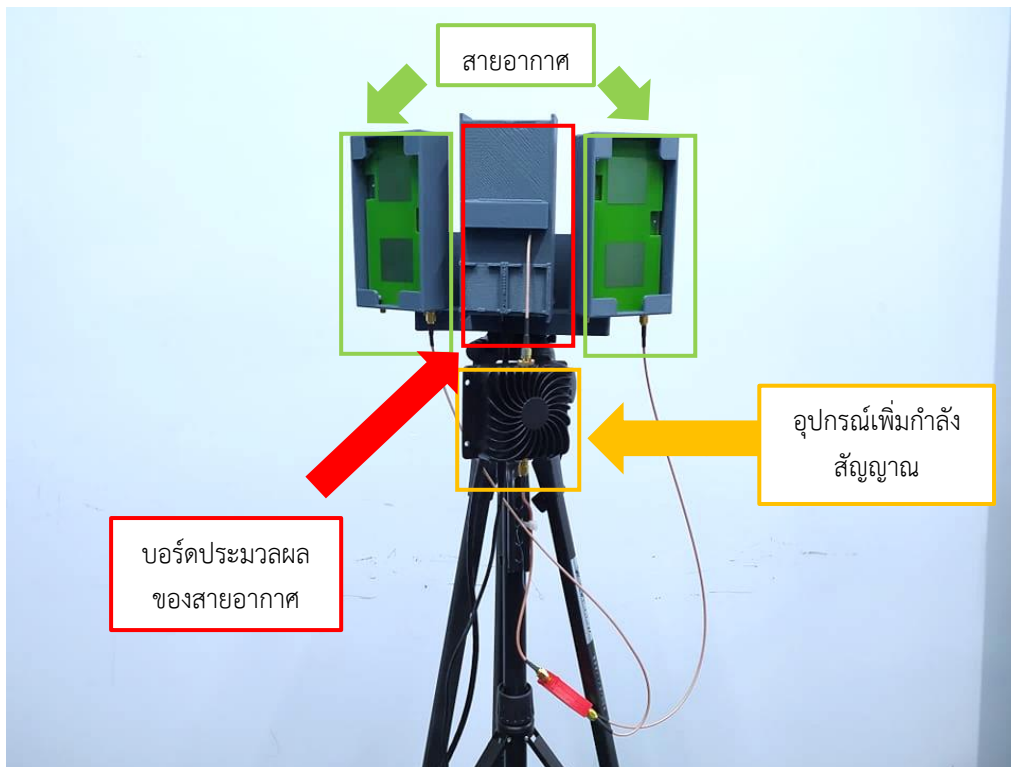
รูปที่ 124 ส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความแรงสัญญาณที่รับได้ของสายอากาศในทีโล่งแจ้งที่เส้นทางเป็นเส้นแนวสายตา (Line of sight) เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณได้อย่างเหมาะสมและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้จริง ซึ่งการทดสอบจะทำการทดสอบระหว่างเราเตอร์กับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และอุปกรณ์ทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยแบ่งออกทั้งตอนที่ไม่มีและมีอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกแสดงในตารางที่ 35 และตัวอย่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ ซึ่งเป็นไปรูปที่ 125

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบเราเตอร์และอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์	ระยะทาง (m)	ค่า RSSI (dBm)
Router กับ Repeater (ไม่ใช่ Wi-Fi booster)	270	-97
Router กับ Repeater (ใช้ Wi-Fi booster)	270	-63
Repeater (ไม่ใช่ Wi-Fi booster) กับ Repeater (ไม่ใช่ Wi-Fi booster)	125	-92
Repeater (ใช้ Wi-Fi booster) กับ Repeater (ใช้ Wi-Fi booster)	380	-67
Repeater (ใช้ Wi-Fi booster) กับ Repeater (ไม่ใช่ Wi-Fi booster)	380	-97

จากตารางผลการทดสอบตามตารางที่ 35 พบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ สามารถเพิ่มความสามารถในการรับส่งของสายอากาศได้ประมาณ 30 dBm และยังสามารถเพิ่มระยะทางในการรับส่งได้มากกว่า 300 เมตร



รูปที่ 125 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการปรับปรุงวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณให้สามารถปรับทิศทางของสายอากาศได้ตามสภาพโพรงถ้ำ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลในการนำไปใช้งานภายในถ้ำ โดยอุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบดั้งเดิมแสดงไว้ตามรูปที่ 126 และอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่พัฒนาโดยทีมวิจัยแสดงไว้ตามรูปที่ 127



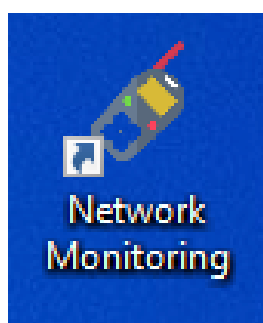
รูปที่ 126 อุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบดั้งเดิม



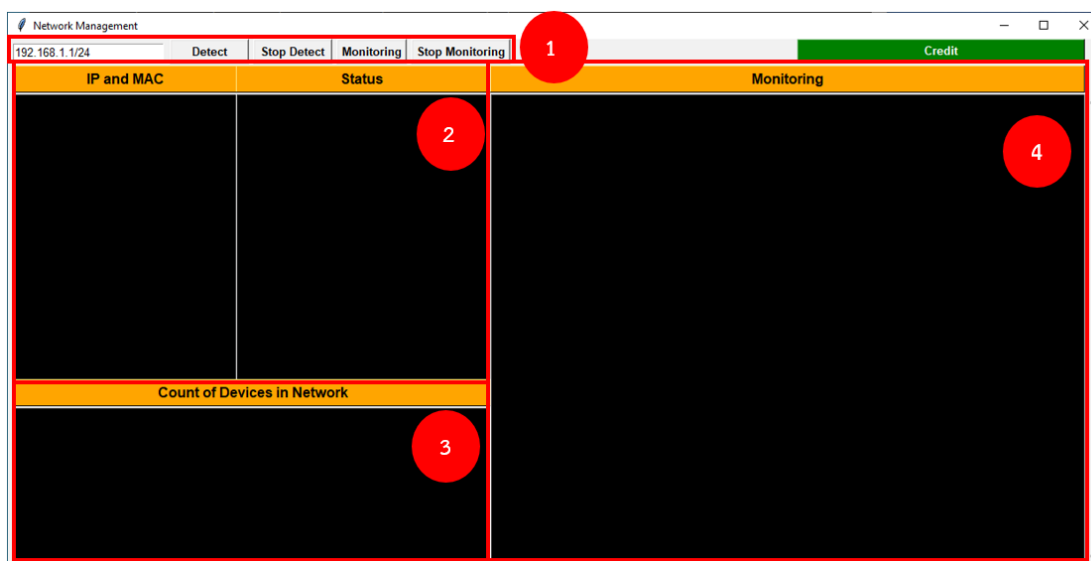
รูปที่ 127 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่พัฒนาโดยทีมวิจัย

7.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ โปรแกรมสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการแผ่กระจาย การบริหารจัดการและการควบคุมระบบทั้งหมด เช่น โหนดหลัก (ประกอบด้วยอุปกรณ์เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย) โหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง โหนดย่อย (อุปกรณ์ทวนสัญญาณ) ลำดับที่สอง โหนดย่อยลำดับที่สาม และเครื่องลูกข่าย (Client) ทั้งหมดในระบบ ซึ่งการดำเนิน การบริหารจัดการระบบทั้งหมดเหล่านี้สามารถกระทำได้โดยเจ้าหน้าที่ดูแลระบบ (Administrator) ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมบริหารจัดการโครงข่าย ที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยการโปรแกรมด้วยภาษาไพทอน (Python) โดยแสดงไอคอนของโปรแกรมเพื่อเข้าใช้งานและตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) ดังในรูปที่ 128 และ 129 ตามลำดับ



รูปที่ 128 ไอคอนการเข้าใช้งานโปรแกรม



รูปที่ 129 ตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์พกพา

จากรูปที่ 129 เป็นตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์พกพา เป็นหน้าต่างแสดงผลการบริหารจัดการระบบทั้งหมด โดยมีโดยโปรแกรมมีฟังก์ชันการทำงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่

หมายเลข (1) เป็นการฟังก์ชันการทำงานโดยมีการระบุไอพีแอดเดรส (IP Address) ของตำแหน่งอุปกรณ์เราเตอร์เพื่อเป็นการระบุตัวตนของการเจ้าหน้าที่ในการเข้าใช้งานโปรแกรม ดังนั้นจึงเป็นการป้องกันการแทรกแซงผู้ใช้งานผู้อื่นที่ไม่ได้อยู่ในระบบ รวมถึงแสดงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน จากนั้นจะมีปุ่มเพื่อสั่งการทำงานทั้งหมด 4 ปุ่มได้แก่ ปุ่มที่หนึ่งคือ ปุ่ม “Detect” เป็นปุ่มเพื่อออกคำสั่งสำหรับตรวจจับไอพีแอดเดรสภายในระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นภายในโนดหรือระหว่างโนด และเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบสามารถตรวจจับได้หมด ดังนั้นการแสดงผลการตรวจจับจะแสดงผลออกผ่านหมายเลข (2) และหมายเลข (3) ต่อมาปุ่มที่สองคือ ปุ่ม “Stop Detect” เป็นปุ่มเพื่อออกคำสั่งสำหรับหยุดการตรวจจับไอพีแอดเดรสภายในระบบทั้งหมด ปุ่มที่สามคือ ปุ่ม “Monitoring” เป็นปุ่มเพื่อออกคำสั่งสำหรับบริหารจัดการหรือดูแลระบบ ซึ่งจะแสดงผลผ่านหมายเลข (4) และสุดท้ายคือปุ่มที่สี่ คือ ปุ่ม “Stop Monitoring” เป็นปุ่มเพื่อออกคำสั่งสำหรับหยุดบริหารจัดการหรือดูแลระบบ

หมายเลข (2) เป็นฟังก์ชันการแสดงผลการระบุไอพีแอดเดรสและแมคแอดเดรส (MAC Address) และแสดงผลสถานะ (Status) ของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ ของอุปกรณ์เราเตอร์ เครื่องแม่ข่าย อุปกรณ์ทวนสัญญาณ รวมทั้งเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบ ซึ่งคอลัมน์ “IP and MAC” จะทำหน้าที่แสดงไอพีแอดเดรสและแมคแอดเดรสอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ และคอลัมน์ “Status” จะทำหน้าที่แสดงสถานะว่าเป็นอุปกรณ์ชนิดอะไร รวมทั้งแสดงสถานะการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เราเตอร์หรืออุปกรณ์ทวนสัญญาณ

หมายเลข (3) เป็นฟังก์ชันการแสดงผลการเข้าใช้งานทั้งหมดในระบบ โดยจะมีการระบุเป็นตัวเลขที่เข้าใช้งานในระบบ โดยเป็นการเช็คสถานะว่าอุปกรณ์ใดสามารถใช้งานได้ในระบบ

หมายเลข (4) เป็นฟังก์ชันการแสดงผลอุปกรณ์ทั้งหมดทั้งหมดในระบบที่ทำการเชื่อมต่อเครื่องแม่ข่ายที่พร้อมสำหรับการสื่อสาร ซึ่งจะเป็นการดูแลระบบโดยการเช็คสถานะอีกครั้งจากการตรวจจับข้อมูลว่าอุปกรณ์ทั้งหมดยังคงอยู่ในระบบหรือไม่ เพื่อแสดงความแม่นยำของระบบว่ามีการตรวจจับถูกต้องหรือไม่

รวมทั้งเป็นการป้องกันการไม่ให้ข้อมูลในการบริหารจัดการและดูแลมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในส่วนนี้จะมีการแสดงถึงอุปกรณ์ในระบบมีเชื่อมการเชื่อมต่อ (Connected) หรือไม่เชื่อมต่อ (Disconnected) ต่อมาจะแสดงผลถึงอุปกรณ์ในระบบทั้งหมดว่าเป็นอุปกรณ์ชนิดอะไร และสุดท้ายจะแสดงค่าเวลาแฝง (Latency) ทั้งแสดงค่าสูงสุด (Maximum) ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าเฉลี่ย (Average) เพื่อที่จะทำให้เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบทำการบริหารจัดการเครือข่ายสามารถวิเคราะห์ว่าอุปกรณ์ในเครือข่ายมีปัญหาขัดข้องหรือไม่ ซึ่งผลของการแสดงการใช้งานโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้งานจริงภายในถ้า จะแสดงไว้ตามรูปที่ 130

IP and MAC	Status	Monitoring
(1) IP: 192.168.1.1 MAC: f0:b4:d2:5d:cb:6b	(1) Router (192.168.1.1)	DATEIME = 04/02/2022, 13:51:35 (1) This 192.168.1.1 is connected Device Name: TP-LINK Archer MR200 Latency: Minimum = 4ms, Maximum = 10ms, Average = 6ms
(2) IP: 192.168.1.3 MAC: a8:7e:ea:43:d4:56	(2) Client No. NaN (192.168.1.3) Connecting with Main Node	(2) This 192.168.1.3 is connected Latency: Minimum = 0ms, Maximum = 0ms, Average = 0ms
(3) IP: 192.168.1.31 MAC: 1a:3b:f3:73:31:60	(3) Client No. 1 (192.168.1.31) Connecting with Sub Node	(3) This 192.168.1.31 is connected Device Name: walkiepi1 Latency: Minimum = 14ms, Maximum = 27ms, Average = 19ms
(4) IP: 192.168.1.33 MAC: 1a:3b:f3:73:31:60	(4) Client No. 3 (192.168.1.33) Connecting with Sub Node	(4) This 192.168.1.33 is connected Device Name: walkiepi3 Latency: Minimum = 7ms, Maximum = 29ms, Average = 17ms
(5) IP: 192.168.1.34 MAC: 1a:3b:f3:73:31:60	(5) Client No. 4 (192.168.1.34) Connecting with Sub Node	(5) This 192.168.1.34 is connected Device Name: walkiepi4 Latency: Minimum = 8ms, Maximum = 15ms, Average = 12ms
(6) IP: 192.168.1.32	(6) Client No. 2 (192.168.1.32)	(6) This 192.168.1.32 is connected Device Name: walkiepi2 Latency: Minimum = 8ms, Maximum = 24ms, Average = 17ms
Count of Devices in Network		
Router: 1 Device Server: 1 Device Clients: 16 Device Repeater: 3 Device		
		(7) This 192.168.1.101 is connected Device Name: Raspberry Pi 3 Server Latency: Minimum = 9ms, Maximum = 154ms, Average = 46ms (8) This 192.168.1.2 is disconnected Latency: Received = 3, Lost = 1 (25% loss) (9) This 192.168.1.38 is connected Device Name: walkiepi8 Latency: Minimum = 15ms, Maximum = 157ms, Average = 51ms (10) This 192.168.1.40 is connected

รูปที่ 130 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานจริง

7.4 ผลการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลสำหรับการใช้งานภายในถ้า

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลสำหรับการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย โดยจะเปรียบเทียบผลการทดสอบในพื้นที่ถ้าป่าภูทิวและพื้นที่ถ้าเชียงดาว ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอแผนการทดสอบระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงภายในถ้าไว้ในหัวข้อที่ 7.1 ดังกล่าวข้างต้น และแบ่งการนำเสนอผลการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อย่อย ดังนี้

- 1) ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ
- 2) ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

ในการทดสอบครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งภายในโครงข่ายและภายนอกโครงข่าย โดยรูปแบบโครงข่ายการติดตั้งโครงข่ายทั้งที่ถ้าป่าภูทิวและถ้าเชียงดาวนั้นมีรูปแบบโครงข่ายพื้นฐานเดียวกัน ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะประกอบไปด้วย ตำแหน่งแรกคือโนดย่อยลำดับที่หนึ่งเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณจากโนดหลัก ตำแหน่งที่สอง

คือโนดย่อยลำดับที่สองเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง และตำแหน่งที่สามคือ โนดย่อยลำดับที่สามเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณจากโนดย่อยลำดับที่สอง

7.4.1 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator

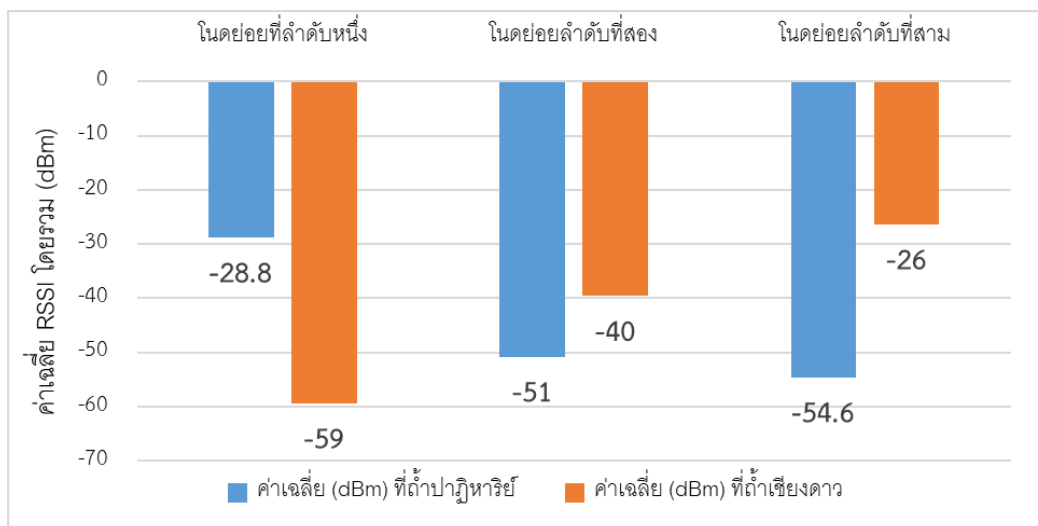
และค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

ผลการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลสำหรับการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ (Node internal) และทำการนำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในแต่ละโนดภายในและการสรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างผลการทดสอบที่ถ้ำปาฎิหาริย์และผลการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว และนำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยโดยรวมของ Receive Signal Strength Indicator ของการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่ถ้ำปาฎิหาริย์และผลการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว ดังแสดงไว้ในตารางที่ 36 และรูปที่ 131 และในส่วนของการคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง (Latency) ในการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบที่ถ้ำปาฎิหาริย์และที่ถ้ำเชียงดาว ดังแสดงไว้ในตารางที่ 37 และรูปที่ 132

ตารางที่ 36 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของ Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในพื้นที่การทดสอบสองแห่ง

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำปาฎิหาริย์	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำเชียงดาว
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง	-28.8	-59
โนดย่อยลำดับที่สอง	-51	-40
โนดย่อยลำดับที่สาม	-54.6	-26



รูปที่ 131 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของ Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในพื้นที่การทดสอบสองแห่ง

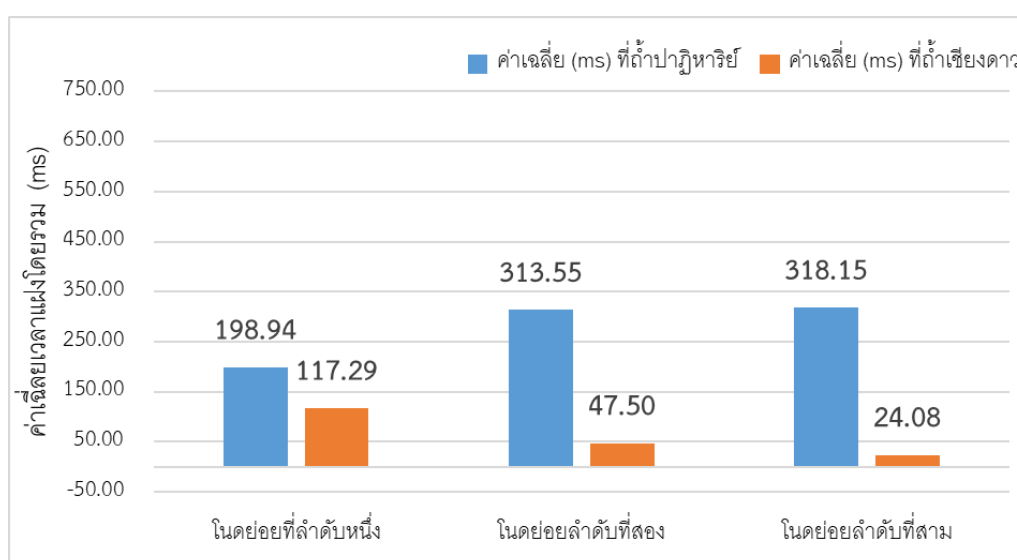
จากรูปที่ 131 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของ Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดสอบที่ถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเชิงดาวซึ่งพบว่า ผลการทดสอบที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ย Receive Signal Strength Indicator ของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่ -28.8 dBm เป็นค่าที่มากที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด ในขณะที่ผลการทดสอบที่ถ้าเชิงดาวมีค่าเฉลี่ย Receive Signal Strength Indicator ของโนดย่อยลำดับที่สามที่ -26 dBm เป็นค่าที่มากที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละโนดย่อยลำดับต่าง ๆ พบว่า โนดย่อยลำดับที่หนึ่งในพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ย RSSI ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับที่ถ้าเชิงดาว แต่โนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามในพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ย RSSI ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ถ้าเชิงดาว ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้งสองพื้นที่มีความแตกต่างกันเป็นค่าความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน พิจารณาจากที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ย RSSI ลดลง โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ -28.8 dBm โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ -51 dBm และโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ -54.6 dBm แตกต่างกับที่ถ้าเชิงดาวมีค่าเฉลี่ย RSSI เพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ -59 dBm โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ -40 dBm และโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ -26 dBm

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ทำการทดสอบที่ถ้าเชิงดาว เป็นระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาทั้งในส่วนของระบบสายอากาศที่เป็นแบบสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) ที่สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำรวมทั้งเพิ่มความไวการรับสัญญาณ (Sensitivity) และมีการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) จึงทำให้ผลการวัดค่า RSSI มีประสิทธิภาพดีและแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของโนดย่อยลำดับที่สามที่มีระยะห่างมากที่สุดแต่ยังคงมีคุณภาพสูงทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลัก และในการทดสอบยังพบว่าสามารถเพิ่มคุณภาพเสียงให้มีความชัดเจนมากขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 37 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง (Latency) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่างๆ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างที่ถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเชียงดาว

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ยโดยรวม (ms)	
	ค่าเฉลี่ยภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้าปาฏิหาริย์	ค่าเฉลี่ยภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้าเชียงดาว
โนดย่อยที่ลำดับหนึ่ง	198.94	117.29
โนดย่อยลำดับที่สอง	313.55	47.50
โนดย่อยลำดับที่สาม	318.15	24.08



รูปที่ 132 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง (Latency) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่างๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบกันในพื้นที่การทดสอบสองแห่ง

จากรูปที่ 132 เป็นกราฟการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่างๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างที่ถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเชียงดาว พบว่าที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่ 198.94 ms เป็นค่าที่น้อยที่สุดและมีคุณภาพสูงสุดในขณะที่ถ้าเชียงดาวมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงของโนดย่อยลำดับที่สามที่ 24.08 ms เป็นค่าที่น้อยที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละโนดย่อยลำดับต่างๆ พบว่า โหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง โหนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามของที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ถ้าเชียงดาว ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้งสองพื้นที่มีความแตกต่างกันเป็นค่าความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน โดยพิจารณาจากที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงเพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

มีค่าเท่ากับ 198.94 ms โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ 313.55 ms และโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ 318.15 ms แตกต่างกับที่ถ้าเชียงดาวซึ่งมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงลดลง โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 117.29 ms ลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ 47.50 ms และลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ 24.08 ms

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ทำการทดสอบที่ถ้าเชียงดาว เป็นระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาทั้งในส่วนของระบบสายอากาศที่เป็นแบบสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) ที่สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโครงข่ายรวมทั้งเพิ่มความไวการรับสัญญาณ (Sensitivity) และมีการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) จึงส่งผลให้การทดสอบค่าเฉลี่ยเวลาแฝงมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นและที่สำคัญยังแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของโนดย่อยลำดับที่สามที่มีระยะห่างมากที่สุดแต่ยังคงมีคุณภาพสูงทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลัก รวมทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยการพูดโต้ตอบหรือการรับส่งสัญญาณได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง

7.4.2 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ (Node External)

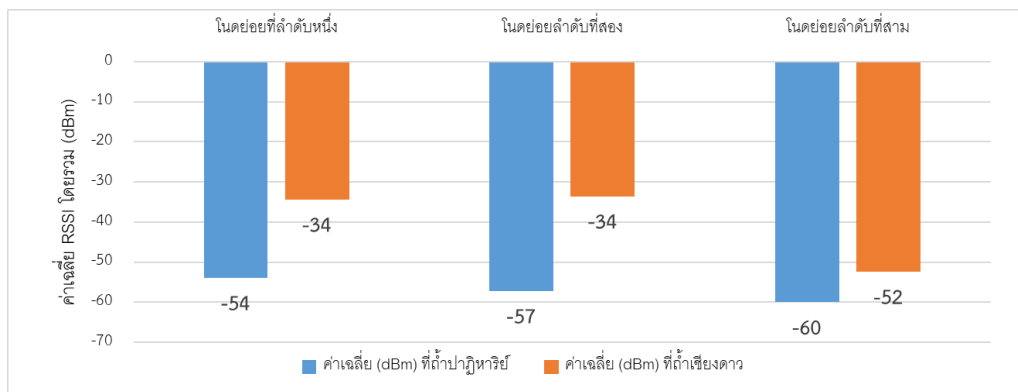
หัวข้อนี้จะนำเสนอ ผลการทดสอบวัดค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง ในการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ (Node External) การนำเสนอข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในแต่ละโนดภายในและการสรุปผลการทดสอบ ประสิทธิภาพการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างผลการทดสอบที่ถ้าป่าภูหารีย์และผลการทดสอบที่ถ้าเชียงดาว และนำเสนอเป็นผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 38 และรูปที่ 133

ส่วนผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง (Latency) ในการทดสอบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดภายในโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่ถ้าป่าภูหารีย์และผลการทดสอบที่ถ้าเชียงดาว ดังแสดงไว้ในตารางที่ 39 และ 134

ตารางที่ 38 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบในพื้นที่การทดสอบสองแห่ง

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้าป่าภูหารีย์	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้าเชียงดาว
โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง	-54	-34
โนดย่อยลำดับที่สอง	-57	-34
โนดย่อยลำดับที่สาม	-60	-52



รูปที่ 133 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของ Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

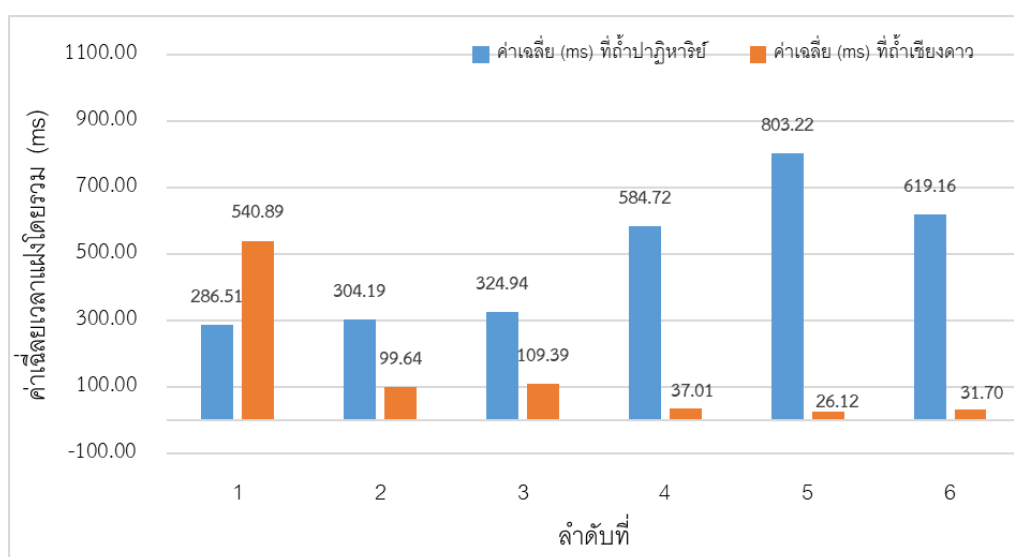
จากรูปที่ 133 เป็นกราฟการเฉลี่ยโดยรวมของค่า Receive Signal Strength Indicator สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในพื้นที่ถ้ำปาฎิหาริย์และถ้ำเชียงดาวซึ่งพบว่า ผลการทดสอบที่ถ้ำปาฎิหาริย์มีค่าเฉลี่ย Receive Signal Strength Indicator ของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งที่ -54 dBm เป็นค่าที่มากที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด ในขณะที่ผลการทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าเฉลี่ย Receive Signal Strength Indicator ของโนดย่อยลำดับที่สามที่ -34 dBm เป็นค่าที่มากที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละโนดย่อยลำดับต่าง ๆ พบว่า โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง โนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามของการทดสอบที่ถ้ำปาฎิหาริย์มีค่าเฉลี่ย RSSI ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้งสองพื้นที่มีความเหมือนกันหรือเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง โดยพิจารณาจากที่ถ้ำปาฎิหาริย์มีค่าเฉลี่ย RSSI ลดลง โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ -54 dBm โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ -57 dBm และโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ -60 dBm เช่นเดียวกันกับที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าเฉลี่ย RSSI ลดลง โดยเรียงลำดับจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ -34 dBm โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเท่ากับ -34 dBm และโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเท่ากับ -52 dBm

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ทำการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว ซึ่งเป็นระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาทั้งในส่วนของระบบสายอากาศที่เป็นแบบสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) ที่สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโครงข่ายรวมทั้งเพิ่มความไวการรับสัญญาณ (Sensitivity) และมีการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) จึงส่งผลให้การทดสอบดังกล่าวมีค่า RSSI ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและที่สำคัญยังเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของโนดย่อยลำดับที่สามซึ่งมีระยะห่างมากที่สุดแต่ยังคงมีคุณภาพสูงทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลัก และในการทดสอบยังพบว่าสามารถเพิ่มคุณภาพเสียงให้มีความชัดเจนมากขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 39 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบในพื้นที่การทดสอบสองแห่ง

ลำดับที่	การสื่อสารจากโนดเริ่มต้นไปที่โนดปลายทาง	ค่าเฉลี่ยค่าเวลาแฝง (ms) ในพื้นที่การทดสอบ	
		ถ้าปาฏิหาริย์	ถ้าเซียงดาว
1	โนดย่อยลำดับที่หนึ่งไปที่โนดย่อยลำดับที่สอง	286.51	540.89
2	โนดย่อยลำดับที่หนึ่งไปที่โนดย่อยลำดับที่สาม	304.19	99.64
3	โนดย่อยลำดับที่สองไปที่โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง	324.94	109.39
4	โนดย่อยลำดับที่สองไปที่โนดย่อยลำดับที่สาม	584.72	37.01
5	โนดย่อยลำดับที่สามไปที่โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง	803.22	26.12
6	โนดย่อยลำดับที่สามไปที่โนดย่อยลำดับที่สอง	619.16	31.70



รูปที่ 134 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง (Latency) สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ

จากรูปที่ 134 เป็นกราฟการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเซียงดาวซึ่งพบว่าผลการทดสอบในพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงของการสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งไปที่โนดย่อยลำดับที่สองที่ 286.51 ms เป็นค่าที่น้อยที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด ในขณะที่ถ้าเซียงดาวมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงของการสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่สามไปโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง 26.12 ms เป็นค่าที่น้อยที่สุดและมีคุณภาพสูงสุด

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละการสื่อสารจากโนดเริ่มต้นไปที่โนดปลายทางพบว่า การสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งไปที่โนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงดีกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบที่ถ้าเซียงดาว แต่การสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่หนึ่งไปที่โนดย่อยลำดับที่สาม การสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่สองไปที่โนดย่อยลำดับที่หนึ่ง การสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่สองไปโนดย่อยลำดับที่สาม การสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่สามไปโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและการสื่อสารจากโนดย่อยลำดับที่สามไปโนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ถ้าเซียงดาว ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากทั้งสองพื้นที่มีความแตกต่างกันเป็นค่าความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน โดยพิจารณาได้จากการที่ถ้าปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงเพิ่มขึ้น แตกต่างกับที่ถ้าเซียงดาวซึ่งมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงลดลงและมีแนวโน้มที่ดีกว่า

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายที่ใช้ทำการทดสอบที่ถ้าเซียงดาว ซึ่งเป็นระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาทั้งในส่วนของระบบสายอากาศที่เป็นแบบสองทิศทางหรือสายอากาศคู่ (Dual antennas) ที่สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโครงข่ายรวมทั้งเพิ่มความไวการรับสัญญาณ (Sensitivity) และมีการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) จึงส่งผลให้การทดสอบดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยเวลาแฝงที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และที่สำคัญยังเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของโนดย่อยลำดับที่สามซึ่งมีระยะห่างมากที่สุดแต่ยังคงมีคุณภาพสูงทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลัก รวมทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยการพูดโต้ตอบหรือการรับส่งสัญญาณได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง

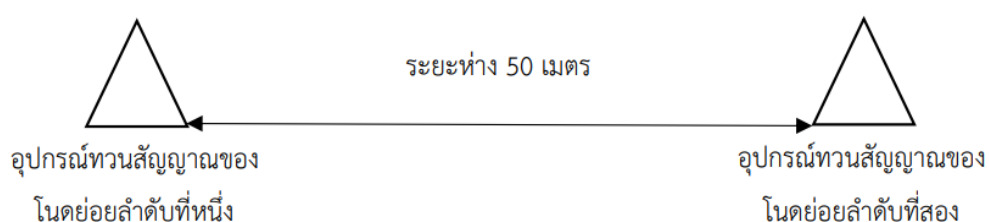
7.5 ผลการทดสอบเชิงคุณภาพในระยะทาง 50 เมตร ระหว่างค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดสอบเชิงคุณภาพในระยะทาง 50 เมตร ระหว่างค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง (Latency) สำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล โดยทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบ ณ ระยะทางที่ 50 เมตรของแต่ละอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการทดสอบของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย โดยแบ่งการนำเสนอผลการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อย่อย ดังนี้

- 1) ผลการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงที่ระยะทางที่ 50 เมตร ระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ
- 2) ผลการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงที่ระยะทางที่ 50 เมตร ระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

7.5.1 ผลการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงที่ระยะทางที่ 50 เมตร ระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

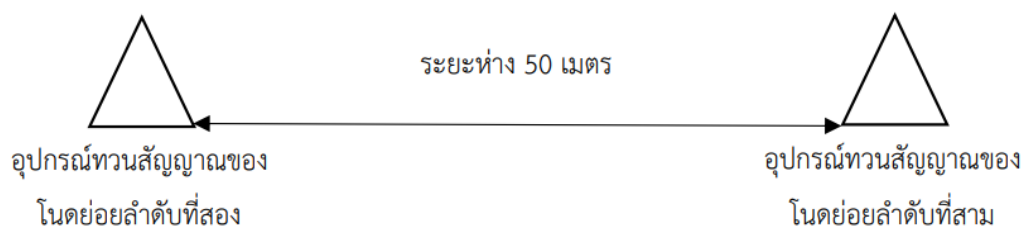
ในการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในระยะทาง 50 เมตร ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นได้นำข้อมูลมาทำการคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินประสิทธิภาพในการรับกำลังของสัญญาณ รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพการส่งสัญญาณเสียงให้มีความล่าช้า น้อยที่สุดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของแต่ละโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในระยะห่าง 50 เมตร ดังนั้นวิธีดำเนินการทดสอบตามตัวอย่างแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง และแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 135 และรูปที่ 136



รูปที่ 135 แผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง

จากรูปที่ 135 เป็นแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง อันดับแรกจะเริ่มต้นจากการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการสลับตำแหน่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณระหว่างโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง เพื่อทดสอบความสามารถในการรับกำลังสัญญาณระหว่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator ของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง จะต้องเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทวน

สัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง มาที่ตำแหน่งการทวนสัญญาณจากเราเตอร์หรือโนดหลักแทน เพื่อให้อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งรับกำลังสัญญาณจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง เป็นต้น ต่อมาการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์พกพาในการปิง (Ping) ไปยังอุปกรณ์ปลายทางแทน เนื่องจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณไม่สามารถสร้างชุดข้อมูลสำหรับการปิงได้ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง จะใช้อุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์พกพาของเจ้าหน้าที่ซึ่งประจำการอยู่ ณ บริเวณที่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง จากนั้นทำการปิงไปยังอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง เป็นต้น



รูปที่ 136 แผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม

จากรูปที่ 136 เป็นแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม อันดับแรกจะเริ่มต้นจากการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการสลับตำแหน่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณระหว่างโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม เพื่อทดสอบความสามารถในการรับกำลังสัญญาณระหว่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator ของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง จะต้องเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม มาที่ตำแหน่งการทวนสัญญาณจากเราเตอร์หรือโนดหลักแทน เพื่อให้อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สามรับกำลังสัญญาณจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง เป็นต้น และในการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาของเจ้าหน้าที่ในการปิงไปยังอุปกรณ์ปลายทางแทน เนื่องจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณไม่สามารถสร้างชุดข้อมูลสำหรับการปิงได้ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง จะใช้อุปกรณ์ของเจ้าหน้าที่ประจำการอยู่ ณ บริเวณที่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง จากนั้นทำการปิงไปยังอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม เป็นต้น

ในการนำเสนอประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทวนสัญญาณในแต่ละโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างค่าการทดสอบที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 40 และรูปที่ 137 และเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างค่าการทดสอบที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator (หน่วย dBm) และค่าเวลาแฝง (หน่วยมิลลิวินาที หรือ ms) สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 41 และรูปที่

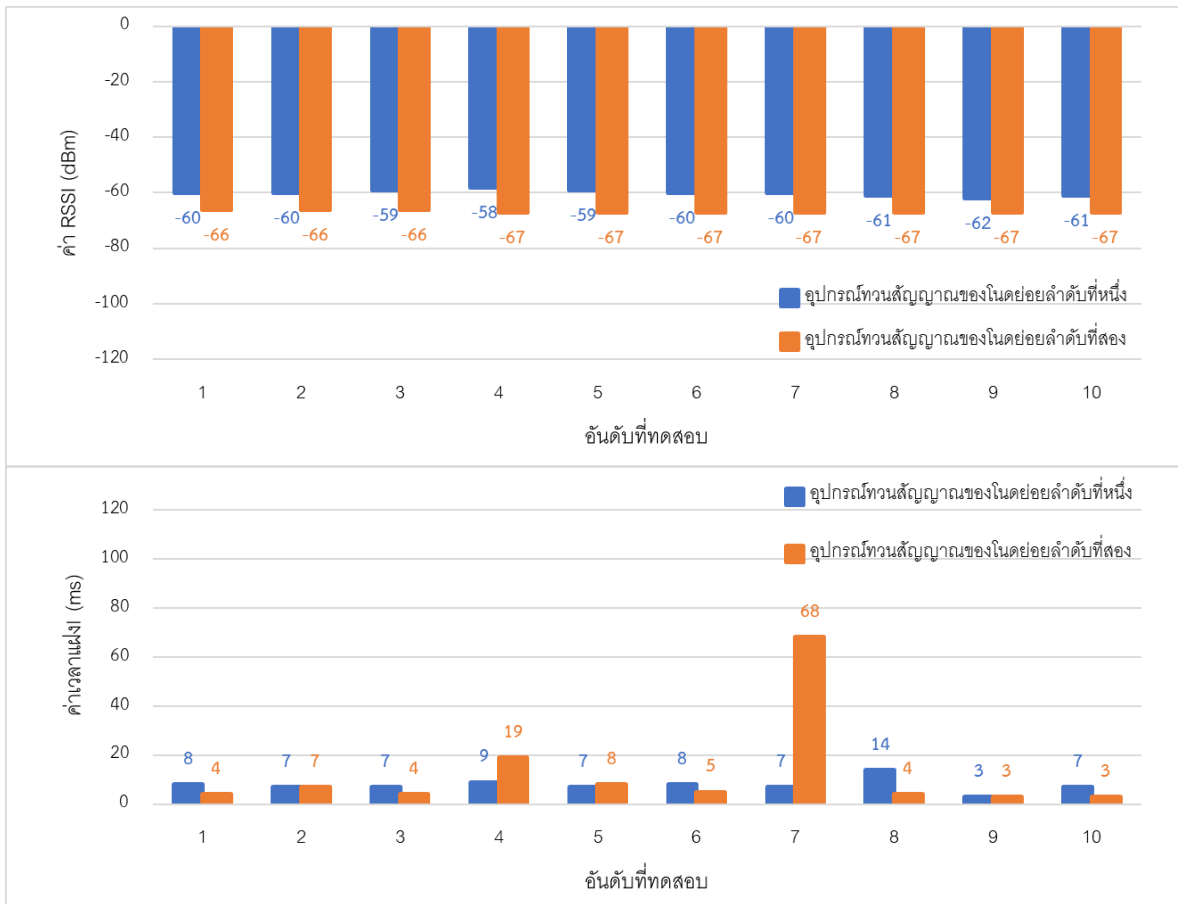
138

ตารางที่ 40 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง

ลำดับที่ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)	
	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (*1)	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง (*2)
1	-60	-66	8	4
2	-60	-66	7	7
3	-59	-66	7	4
4	-58	-67	9	19
5	-59	-67	7	8
6	-60	-67	8	5
7	-60	-67	7	68
8	-61	-67	14	4
9	-62	-67	3	3
10	-61	-67	7	3
ค่าเฉลี่ย	-60	-67	8	13

หมายเหตุท้ายตารางที่ 40

- *1 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง
- *2 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง



รูปที่ 137 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อย ลำดับที่สอง

จากรูปที่ 137 เป็นกราฟผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง เริ่มต้นจากค่า Receive Signal Strength Indicator จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองมีค่าที่ดีที่สุดที่ -58 dBm และ -66 dBm และมีค่าเฉลี่ยที่ -60 และ -67 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการรับกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณอยู่ในระดับดีมาก และค่าที่บันทึกได้จำนวน 10 ครั้ง มีค่าการกระจายของข้อมูลผลการทดสอบของอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งสองน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการรับกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณมีความเสถียรภาพ และค่าเวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้ง จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองมีค่าเฉลี่ยที่ 8 ms และ 13 ms พบว่ามีค่าน้อยมากและมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งยังคงอยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานจริง เมื่อเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและสอง มีการสื่อสารผ่านเสียงด้วยความหน่วงตามเวลาจริงน้อยมากและมีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน

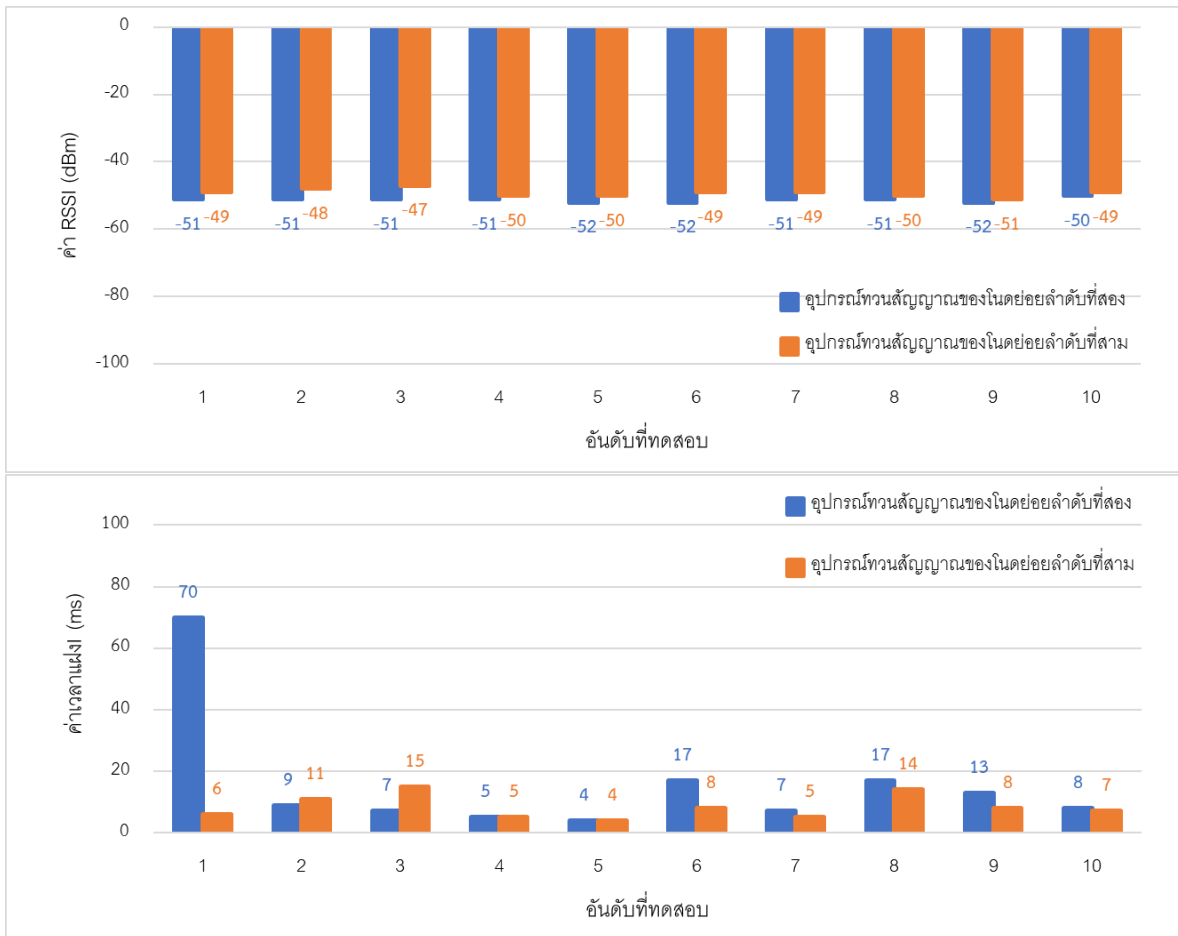
ตารางที่ 41 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม

ลำดับที่ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)	
	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง (*3)	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม (*4)
1	-51	-49	70	6
2	-51	-48	9	11
3	-51	-47	7	15
4	-51	-50	5	5
5	-52	-50	4	4
6	-52	-49	17	8
7	-51	-49	7	5
8	-51	-50	17	14
9	-52	-51	13	8
10	-50	-49	8	7
ค่าเฉลี่ย	-51	-49	16	8

หมายเหตุท้ายตารางที่ 41

-*3 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม

-*4 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง

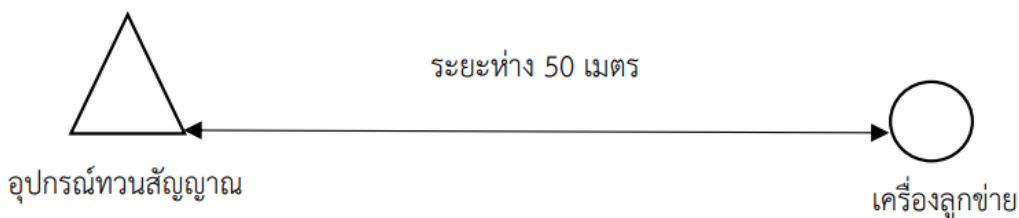


รูปที่ 138 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม

จากรูปที่ 138 เป็นกราฟผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สาม เริ่มต้นจากค่า Receive Signal Strength Indicator จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าที่ดีที่สุดที่ -50 dBm และ -47 dBm และมีค่าเฉลี่ยที่ -51 และ -49 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการรับกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณอยู่ในระดับดีมากและค่าที่บันทึกได้จำนวน 10 ครั้ง มีค่าการกระจายของข้อมูลผลการทดสอบของอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งสองน้อยมาก ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นความสามารถในการรับกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณมีความเสถียรภาพ และค่าเวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้ง จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามมีค่าเฉลี่ยที่ 16 ms และ 8 ms พบว่ามีค่าน้อยมากและมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งยังคงอยู่ในระดับเดียวกันและสอดคล้องกับการใช้งานจริง เมื่อเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่สองและสาม มีการสื่อสารผ่านเสียงด้วยความหน่วงตามเวลาจริงน้อยมากและมีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน

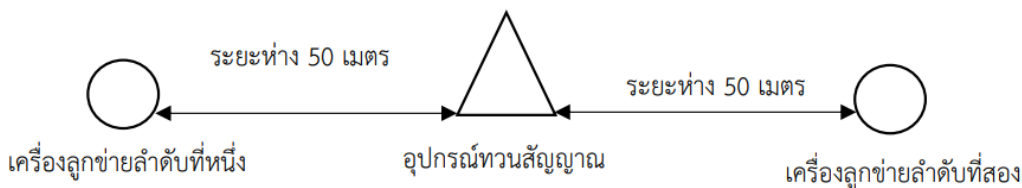
7.5.2 ผลการวัดค่าระยะทางระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ

ในการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในระยะทาง 50 เมตร ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 15 ครั้ง จากนั้นได้นำข้อมูลมาทำการคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินประสิทธิภาพในการรับกำลังของสัญญาณ รวมทั้งการใช้เวลาการส่งสัญญาณเสียงให้มีความล่าช้า น้อยที่สุดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายของโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในระยะห่าง 50 เมตร ดังนั้นวิธีดำเนินการทดสอบตามตัวอย่างแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย และแผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 139 และ รูปที่ 140



รูปที่ 139 แผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย

จากรูปที่ 139 เป็นแผนภาพการทดสอบอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย โดยการทดสอบจะใช้การทดสอบระยะที่ห่างจากเราเตอร์หรือโนดหลักให้มากที่สุด ดังนั้นจึงใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สามและเครื่องลูกข่ายหมายเลขสองเป็นตัวอย่างในการทดสอบครั้งนี้ อันดับแรกจะเริ่มต้นจากการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator จะทำการบันทึกค่าเฉพาะของเครื่องลูกข่ายเท่านั้น เนื่องจากเครื่องลูกข่ายไม่สามารถที่ส่งกำลังสัญญาณในรูปแบบของอุปกรณ์ทวนสัญญาณได้ ต่อมาการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) ในกรณีของอุปกรณ์ทวนสัญญาณจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ในการปิงไปยังอุปกรณ์ปลายทาง เนื่องจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณไม่สามารถสร้างชุดข้อมูลสำหรับการปิงได้ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ จะใช้อุปกรณ์ของเครื่องเจ้าหน้าที่ประจำการอยู่ ณ บริเวณที่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ จากนั้นทำการปิงไปยังเครื่องลูกข่าย เป็นต้น



รูปที่ 140 แผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง

จากรูปที่ 140 เป็นแผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง โดยการทดสอบจะใช้การทดสอบระยะที่ห่างจากรีเซเตอร์หรือโนดหลักให้มากที่สุด ดังนั้นจึงใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สามและเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งแทนลำดับที่หนึ่งและหมายเลขสองแทนลำดับที่สองเป็นตัวช่วยในการทดสอบครั้งนี้ อันดับแรกเริ่มจากการบันทึกค่า Receive Signal Strength Indicator และจะทำการบันทึกค่าเฉพาะของเครื่องลูกข่ายเท่านั้น เนื่องจากเครื่องลูกข่ายไม่สามารถที่ส่งกำลังสัญญาณในรูปแบบของอุปกรณ์ทวนสัญญาณได้ ต่อมาทำการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) ในกรณีของอุปกรณ์ทวนสัญญาณจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ในการปิงไปยังอุปกรณ์ปลายทาง เนื่องจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณไม่สามารถสร้างชุดข้อมูลสำหรับการปิงได้ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาซึ่งเป็นอุปกรณ์ของเจ้าหน้าที่ที่ประจำการอยู่ ณ บริเวณที่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ จากนั้นทำการปิงไปยังเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง เป็นต้น

ในการนำเสนอประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายในแต่ละโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างค่าระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายดังแสดงไว้ในตารางที่ 42 และรูปที่ 141 และเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างค่าการทดสอบที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับ เครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สองตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 43 และรูปที่ 142

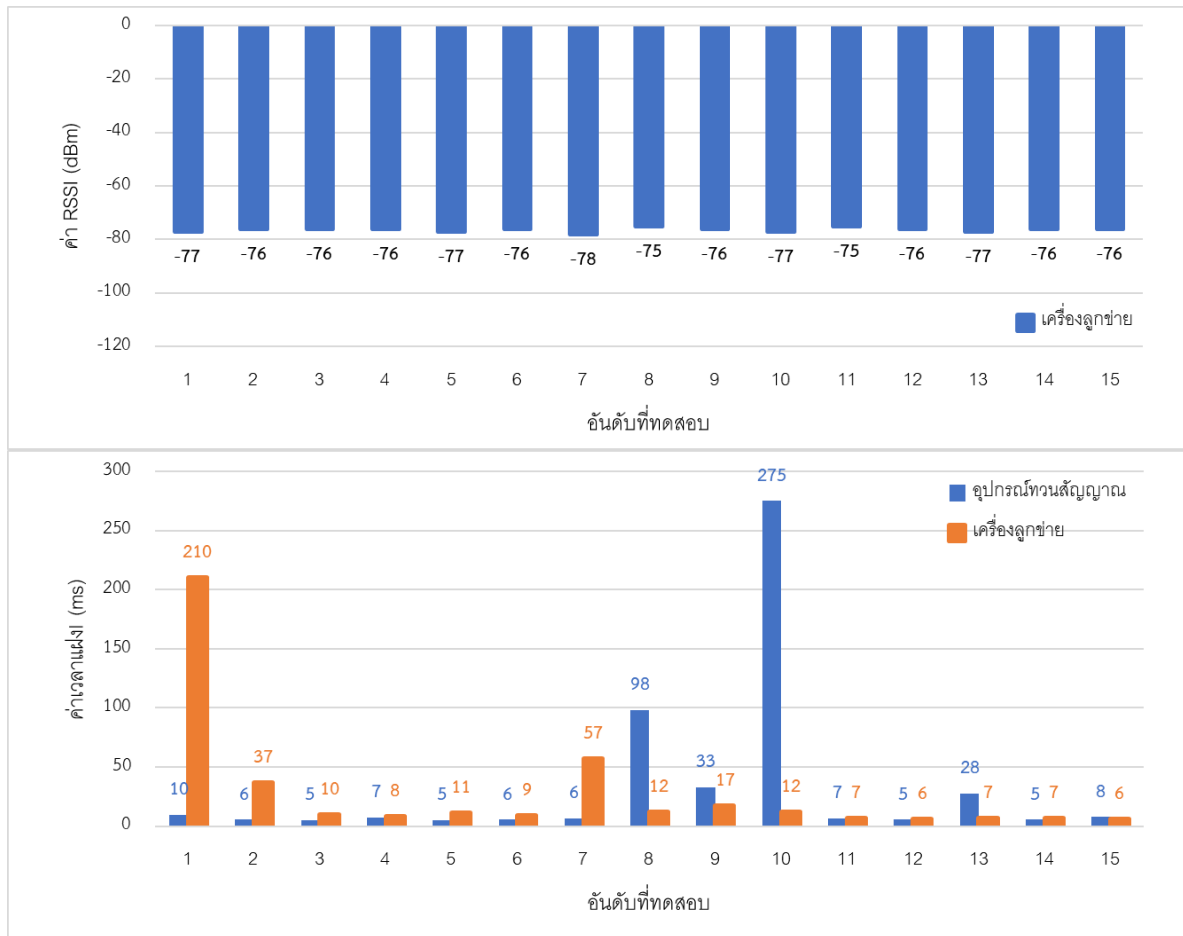
ตารางที่ 42 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย

ลำดับที่ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)	ค่าเวลาแฝง (ms)	
	เครื่องลูกข่าย	อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (*5)	เครื่องลูกข่าย (*6)
1	-77	10	210
2	-76	6	37
3	-76	5	10
4	-76	7	8
5	-77	5	11
6	-76	6	9
7	-78	6	57
8	-75	98	12
9	-76	33	17
10	-77	275	12
11	-75	7	7
12	-76	5	6
13	-77	28	7
14	-76	5	7
15	-76	8	6
ค่าเฉลี่ย	-76	34	28

หมายเหตุท้ายตารางที่ 42

-*5 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ) ไปที่เครื่องลูกข่าย

-*6 เป็นการ Ping จาก เครื่องลูกข่ายไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณ



รูปที่ 141 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย

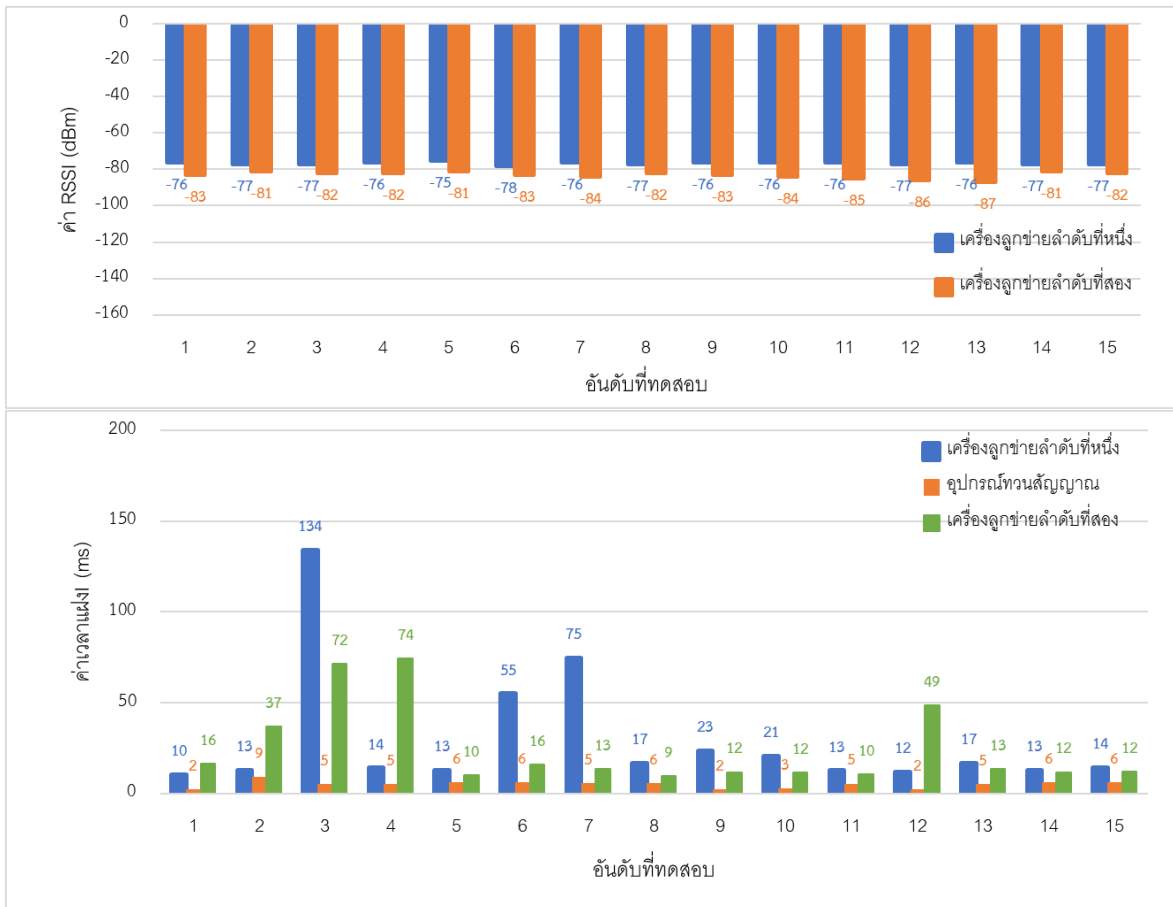
จากรูปที่ 141 เป็นกราฟผลการบันทึกค่าการทดสอบที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย เริ่มต้นจากค่า Receive Signal Strength Indicator จากเครื่องลูกข่ายมีค่าที่ดีที่สุดที่ -75 dBm และมีค่าเฉลี่ยที่ -76 dBm ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการรับกำลังสัญญาณของเครื่องลูกข่ายอยู่ในระดับดี ค่าที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับไม่ห่างกันมากและค่าที่บันทึกได้จำนวน 10 ครั้ง มีค่าการกระจายของข้อมูลผลการทดสอบของเครื่องลูกข่ายน้อยมากถึงแม้ว่าจะมีระยะห่างจากเราเตอร์หรือโนดหลักก็ตาม ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นความสามารถในการรับกำลังสัญญาณจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณของเครื่องลูกข่ายที่มีเสถียรภาพ และค่าเวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้ง จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่ายมีค่าเฉลี่ยที่ 34 ms และ 28 ms ตามลำดับ โดยพบว่ามีค่าน้อยมากและมีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าอุปกรณ์มีรูปแบบการทำงานที่ต่างกัน แต่เป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ดีที่สุดที่ทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ และสอดคล้องกับการใช้งานจริง ซึ่งพบว่าเมื่อเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่สาม จะมีการสื่อสารผ่านเสียงด้วยความหน่วงตามเวลาจริงที่น้อยมากและมีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน

ตารางที่ 43 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝงสำหรับเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง ตามลำดับ

ลำดับที่ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)		
	เครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง	เครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง	เครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง (*7)	อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (*8)	เครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง (*9)
1	-76	-83	10	2	16
2	-77	-81	13	9	37
3	-77	-82	134	5	72
4	-76	-82	14	5	74
5	-75	-81	13	6	10
6	-78	-83	55	6	16
7	-76	-84	75	5	13
8	-77	-82	17	6	9
9	-76	-83	23	2	12
10	-76	-84	21	3	12
11	-76	-85	13	5	10
12	-77	-86	12	2	49
13	-76	-87	17	5	13
14	-77	-81	13	6	12
15	-77	-82	14	6	12
ค่าเฉลี่ย	-76	-83	30	5	24

หมายเหตุท้ายตารางที่ 43

- *7 เป็นการ Ping จากเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่งที่เครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง
- *8 เป็นการ Ping จากเครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ) ไปที่เครื่องลูกข่าย (ลำดับที่หนึ่งหรือลำดับที่สองก็ได้)
- *9 เป็นการ Ping จากเครื่องลูกข่ายลำดับที่สองไปที่เครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง



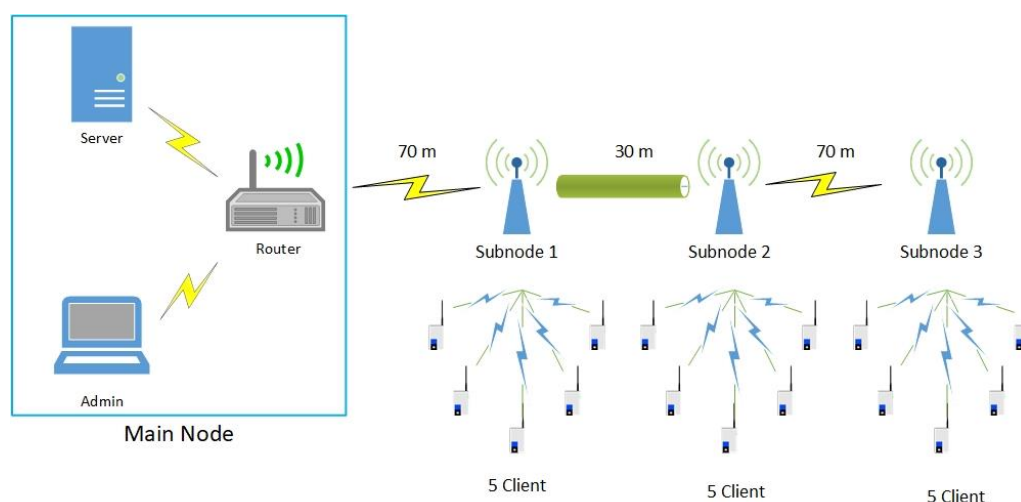
รูปที่ 142 ผลการบันทึกค่าที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สอง ตามลำดับ

จากรูปที่ 142 เป็นกราฟผลการบันทึกค่าการทดสอบที่ระยะทาง 50 เมตร ค่า Receive Signal Strength Indicator และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณและเครื่องลูกข่าย โดยจะพบว่าค่า Receive Signal Strength Indicator จากเครื่องลูกข่ายมีค่าที่ดีที่สุดที่ -76 dBm และมีค่าเฉลี่ยที่ -83 dBm ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการรับกำลังสัญญาณของเครื่องลูกข่ายอยู่ในระดับดีจนถึงระดับปานกลาง โดยค่าที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับที่ไม่ห่างกันมาก และค่าที่บันทึกไว้จำนวน 10 ครั้งนั้นพบว่า มีค่าการกระจายข้อมูลของเครื่องลูกข่ายน้อยมาก ถึงแม้ว่าจะมีระยะห่างจากเราเตอร์หรือโนดหลักก็ตาม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับกำลังสัญญาณจากอุปกรณ์ทวนสัญญาณของเครื่องลูกข่ายที่มีเสถียรภาพ และค่าเวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้งจากเครื่องลูกข่ายลำดับที่หนึ่ง อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่ายลำดับที่สองมีค่าเฉลี่ยที่ 30 ms 5 ms และ 24 ms ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าเวลาแฝงมีค่าน้อยมากและมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นการเป็นอุปกรณ์ที่มีรูปแบบของการทำงานที่ต่างกันก็ตาม จึงเป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ดีทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ และสอดคล้องกับการใช้งานจริง ซึ่งในการทดสอบพบว่าเมื่อเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่สาม จะมีการสื่อสารผ่านเสียงด้วยความหวังตามเวลาจริงน้อยมากและมีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน

7.6 ผลการทดสอบการใช้สายนำสัญญาณมาประยุกต์ใช้ร่วมงานกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดสอบในการใช้สายนำสัญญาณมาประยุกต์ใช้งานร่วมงานกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล โดยทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ. เชียงใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการเชื่อมต่อโดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเครือข่ายสายนำสัญญาณ (Wired Network) แบบ UTP CAT6 และเครือข่ายไร้สาย (Wireless Network) โดยการทำงานของระบบจะถูกออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน ดังแสดงไว้ตามรูปที่ 143

การทดสอบในหัวข้อนี้ ถือเป็น การทดสอบเพิ่มเติมโดยเป็นการจำลองเหตุการณ์ที่จำเป็นจะต้องทำการลากสายนำสัญญาณผ่านโพรงถ้ำด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถทำการกระจายสัญญาณแบบไร้สายแบบปกติได้



รูปที่ 143 แผนผังการออกแบบโดยการทำงานร่วมกันระหว่างเครือข่ายสายนำสัญญาณ (Wired Network) และเครือข่ายไร้สาย (Wireless Network) ของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

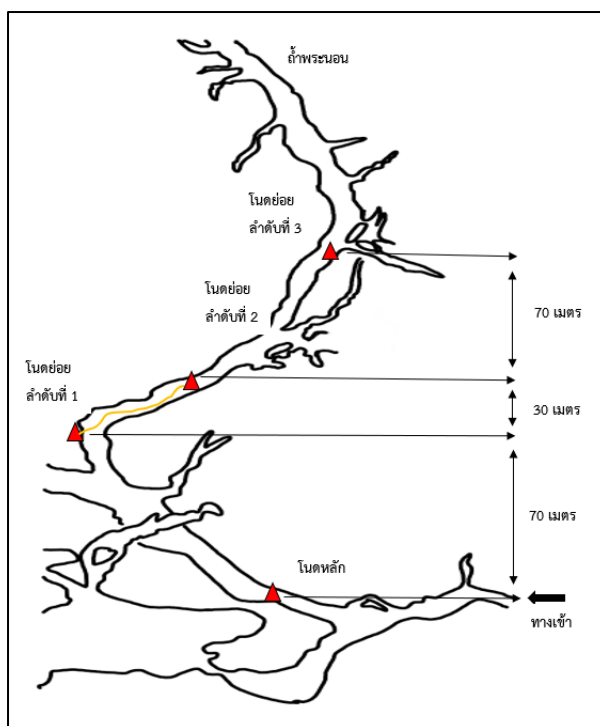
จากรูปที่ 143 เป็นแผนผังการออกแบบโดยการทำงานร่วมกันระหว่างเครือข่ายสายนำสัญญาณและเครือข่ายไร้สายของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล ผู้วิจัยได้นำสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองเป็นระยะทาง 30 เมตร และใช้การเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและโนดย่อยลำดับที่สามเป็นระยะทาง 70 เมตร ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) เพื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง รวมถึงการนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับระบบดั้งเดิมที่เป็นแบบเครือข่ายไร้สายเต็มรูปแบบ (Fully-Wireless Network) ผลการทดสอบโดยการใช้สายนำสัญญาณมาประยุกต์ใช้ร่วมงานกับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลจะแบ่งการนำเสนอผลการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อย่อยดังนี้

1) ผลการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) ของเครือข่ายแบบสายนำสัญญาณ (Wired Network) ระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง

2) ผลการเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network)

7.6.1 ผลการบันทึกค่าเวลาแฝง (Latency) ของเครือข่ายแบบสายนำสัญญาณ (Wired Network) ระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สอง

ในการบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองโดยเชื่อมต่อแบบสายนำสัญญาณในระยะทาง 30 เมตร ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง โดยมีแผนภาพการดำเนินการทดสอบดังแสดงไว้ตามรูปที่ 144 และทำการนำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 44 และรูปที่ 145



รูปที่ 144 แผนภาพการดำเนินการทดสอบบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองโดยเชื่อมต่อแบบสายนำสัญญาณในระยะทาง 30 เมตร

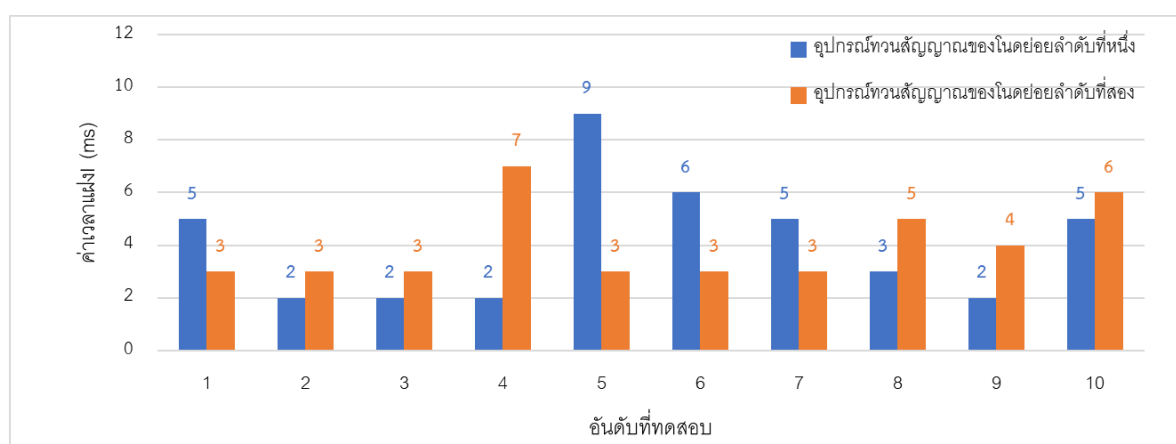
ตารางที่ 44 ผลการบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองโดยเชื่อมต่อแบบสายนำสัญญาณในระยะทาง 30 เมตร

อันดับที่ทดสอบ	ค่าเวลาแฝง (ms)	
	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (*10)	อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง (*11)
1	5	3
2	2	3
3	2	3
4	2	7
5	9	3
6	6	3
7	5	3
8	3	5
9	2	4
10	5	6
ค่าเฉลี่ย	4.1	4

หมายเหตุท้ายตารางที่ 44

-*10 เป็นการ Ping จาก เครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง

-*11 เป็นการ Ping จาก เครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณโนดย่อยลำดับที่สอง) ไปที่อุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

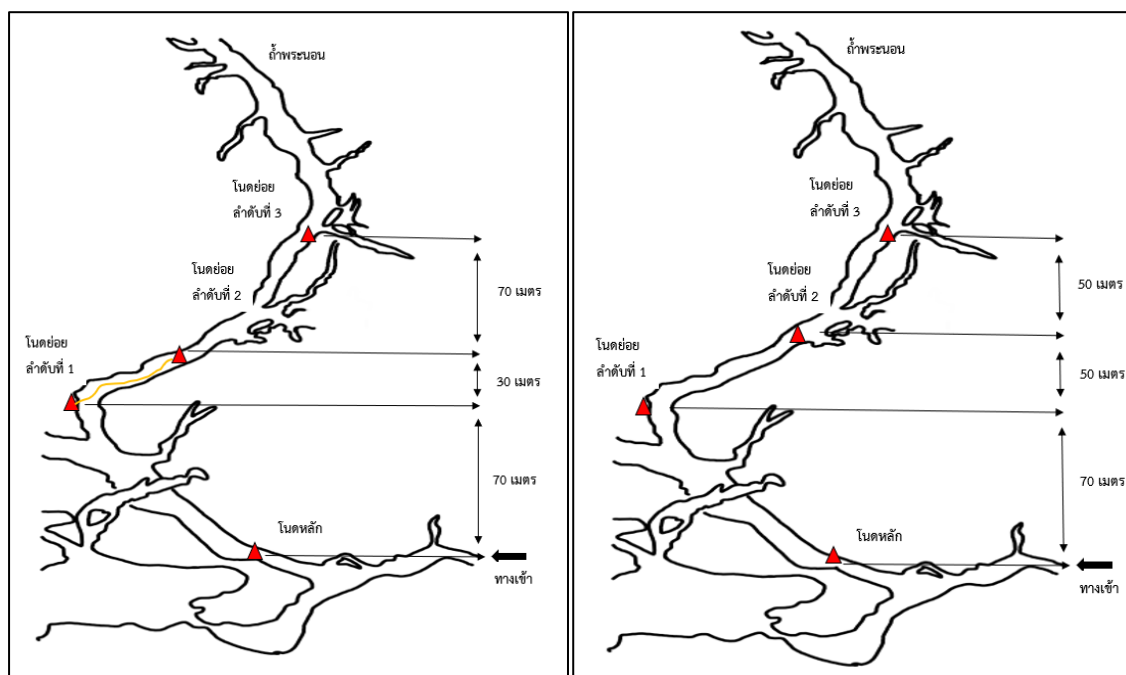


รูปที่ 145 ผลการบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองโดยเชื่อมต่อแบบสายนำสัญญาณในระยะทาง 30 เมตร

จากรูปที่ 145 เป็นกราฟผลการทดสอบในการบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของ โนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อยลำดับที่สองโดยมีการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณในระยะทาง 30 เมตร โดยค่า เวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้ง จากอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและโนดย่อย ลำดับที่สองมีค่าเฉลี่ยที่ 4.1 ms และ 4 ms ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าเวลาแฝงมีค่าน้อยมากและมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งยังคงอยู่ในระดับเดียวกันของเครือข่ายแบบสายนำ สัญญาณ (Wired Network) ที่ส่งผลทำให้เครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและสอง มีการสื่อสารผ่าน เสียงด้วยความหน่วงตามเวลาจริงน้อยมากและมีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน ซึ่งเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพ ของการนำสายนำสัญญาณมาใช้งานร่วมกับเครือข่ายไร้สาย ทำให้มั่นใจได้ว่าเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงตามตัวอย่างในการทดสอบครั้งนี้

7.6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และ เครือข่ายแบบดั้งเดิม (Wireless Network)

ในการเปรียบเทียบค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network) ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง โดยมีแผนภาพ การดำเนินการทดสอบดังแสดงไว้ตามรูปที่ 146



รูปที่ 146 แผนภาพการดำเนินการทดสอบบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสมและเครือข่ายแบบดั้งเดิม

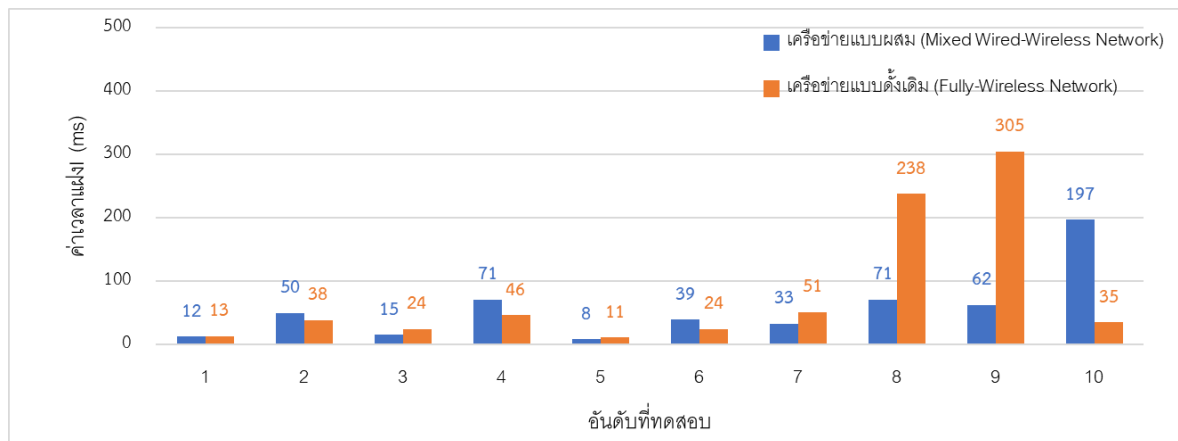
จากรูปที่ 146 เป็นแผนภาพการดำเนินการทดสอบบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสม (แผนภาพด้านซ้าย) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (แผนภาพด้านขวา) โดยระยะทางของการทดสอบของทั้งสองเครือข่ายจะมีระยะห่างเท่ากันที่ 170 เมตร โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของเครื่องแม่ข่าย (Server) ที่ประจำอยู่ในโนดหลัก จนถึงอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม ทั้งนี้การทดสอบเพื่อบันทึกค่าเวลาแฝงจะเป็นการ ping จากต้นทางคืออุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สาม (เครื่องเจ้าหน้าที่ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์แบบพกพา ณ บริเวณโนดย่อยลำดับที่สาม) ไปที่ปลายทางคือเครื่องแม่ข่าย แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองเครือข่ายจะมีความแตกต่างกันที่ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่หนึ่งและอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สอง โดยเครือข่ายแบบผสม (แผนภาพด้านซ้าย) มีระยะห่าง 30 เมตร ในขณะที่เครือข่ายแบบดั้งเดิม (แผนภาพด้านขวา) มีระยะห่าง 50 เมตร ซึ่งส่งผลทำให้เครือข่ายแบบผสมมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สองและอุปกรณ์ทวนสัญญาณของโนดย่อยลำดับที่สามมากกว่าเครือข่ายแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสมและเครือข่ายแบบดั้งเดิม ดังแสดงไว้ตามตารางที่ 45 และรูปที่ 147

ตารางที่ 45 ผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network)

ลำดับที่ทดสอบ	ค่าเวลาแฝง (ms)	
	เครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) (*12)	เครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network) (*13)
1	12	13
2	50	38
3	15	24
4	71	46
5	8	11
6	39	24
7	33	51
8	71	238
9	62	305
10	197	35
ค่าเฉลี่ย	55.8	78.5

หมายเหตุท้ายตารางที่ 45

- *12 เป็นการ Ping จาก เครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณโนดย่อยลำดับที่สาม) ไปที่เครื่องแม่ข่าย (Server)
- *13 เป็นการ Ping จาก เครื่องเจ้าหน้าที่ (ณ บริเวณโนดย่อยลำดับที่สาม) ไปที่เครื่องแม่ข่าย (Server)



รูปที่ 147 ผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network)

จากรูปที่ 147 เป็นกราฟผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแฝงระหว่างแบบเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) และเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network) โดยค่าเวลาแฝงจากการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ครั้ง จากเครือข่ายแบบผสมและเครือข่ายแบบดั้งเดิม มีค่าเฉลี่ยที่ 55.8 ms และ 78.5 ms พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเครือข่ายแบบดั้งเดิมมีค่าเฉลี่ยมากกว่า สามารถพิจารณาได้จากค่าสูงที่สุดที่ 238 ms และ 305 ms โดยมีลักษณะการกระจายจากกลุ่มข้อมูลในแต่ละครั้งของการทดสอบมากที่สุด ในขณะที่เครือข่ายแบบผสมมีค่าสูงที่สุดที่ 197 ms ยังคงอยู่ในแนวโน้มในลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลเครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) ดีกว่าเครือข่ายแบบดั้งเดิม (Fully-Wireless Network) ตามระยะทางทั้งหมด 170 เมตร

7.7 สรุปผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอ การพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนาไว้ 2 ด้านคือ การพัฒนาในด้านฮาร์ดแวร์ของระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลและการพัฒนาในด้านซอฟต์แวร์หรือการพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในการพัฒนาในด้านฮาร์ดแวร์ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi ในการสร้างเครื่องแม่ข่ายและลูกข่าย และใช้โครงข่ายการสื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz ใช้การสื่อสารทางเสียงด้วยโปรโตคอลเสียง VoIP (Voice over Internet protocol) โดยที่ไม่ได้ใช้การเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) แต่อย่างใดซึ่งถือว่าเป็นจุดเด่นของระบบนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาสายอากาศสำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) หรือโหนดย่อย (Sub node) ในระบบ โดยสายอากาศเดิมของอุปกรณ์ทวนสัญญาณนั้นเป็นสายอากาศประเภทเจาะจงทิศทาง เมื่อผู้วิจัยนำไปใช้งานจริงพบว่า สายอากาศดังกล่าวยังไม่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่ำเกินไปที่จะนำไปใช้งานจริงภายในถ้ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาระบบสายอากาศขึ้นมาใหม่เป็นสายอากาศคู่ (Dual antennas) เพื่อให้สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำ

รวมทั้งเพิ่มความไวการรับ (Sensitivity) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อระหว่างโนดหลักและโนดย่อยต่าง ๆ ที่อยู่ถัดไปสามารถเพิ่มระยะทางได้ประมาณ 80 – 90 เมตร

ในการพัฒนาด้านซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเฝ้าระวังการทำงาน (Monitoring) ระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล ซึ่งทำให้เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบสามารถบริหารจัดการระบบทั้งหมดได้ง่ายยิ่งขึ้น ทั้งในการตรวจสอบสถานะเครื่องลูกข่ายที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ ข้อมูลในระบบสามารถระบุชื่อผู้ใช้งาน เวลาในการเข้าใช้งานระบบ รวมทั้งทราบชนิดของอุปกรณ์ที่เข้าใช้งานในระบบ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ปัญหาของการใช้งาน และสุดท้ายมีการแสดงค่าเวลาแฝงเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์สัญญาณของแต่ละอุปกรณ์ในเครือข่ายง่ายที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่ถ้ำป่าภูหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ซึ่งเป็นผลการทดสอบของระบบเดิมก่อนทำการพัฒนา และที่วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ซึ่งเป็นผลการทดสอบระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว สังเกตได้จากกราฟที่โนดย่อยลำดับที่สามที่มีระยะห่างจากโนดหลักมากที่สุดแต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการติดต่อสื่อสาร โดยพบว่ามีค่า Receive Signal Strength Indicator ที่ดีและมีค่าเวลาแฝงที่ต่ำ ดังนั้นการพัฒนาระบบสายอากาศและการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณสามารถลดปัญหาในด้านระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลัก ทำให้การสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายสื่อสารไร้สายได้สำเร็จ มีความชัดเจนของเสียงพูดมากยิ่งขึ้นและสามารถทำการพูดโต้ตอบได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง ผลการทดสอบที่ได้นำเสนอในหัวข้อนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การพัฒนาทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และด้านซอฟต์แวร์ระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

8. สรุปผลการวิจัยโครงข่ายระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอ สรุปผลการศึกษาวิจัยตามโครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ ในส่วนของการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล จากนั้นจะกล่าวถึงปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานวิจัย และกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคตเป็นส่วนสุดท้าย

การศึกษาวิจัยตามโครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ ในส่วนของการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1) ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สายเป็นหลัก มีการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi สำหรับการสร้างเครื่องแม่ข่ายและเครื่องลูกข่าย และใช้โครงข่ายสื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารทางเสียงด้วยโพรโตคอลเสียง VoIP (Voice over Internet protocol) โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Internet gateway) แต่อย่างใด ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงภายในถ้ำและถือว่าเป็นจุดเด่นของระบบนี้

2) โครงสร้างของระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำที่ผู้วิจัยนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นเครื่องแม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่จัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายทั้งหมด โดยอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นเครื่องแม่ข่ายคือ Raspberry Pi 4 Model โดยทำงานร่วมกับระบบซอฟต์แวร์คือ Mumble server ส่วนที่สองคือเครื่องลูกข่าย (Client) ทำหน้าที่ในการติดต่อโดยตรงกับผู้ใช้ในการสื่อสารทางเสียงทั้งการส่งข้อมูลเสียงไปยังผู้ใช้งานปลายทางและรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้งานปลายทาง อุปกรณ์ที่ทำงานเป็นเครื่องลูกข่ายคือ Raspberry Pi 4 Model และในส่วนที่สุดท้ายเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi Access Point) หน้าที่กระจายสัญญาณย่านความถี่ 2.4 GHz ให้เครื่องลูกข่ายและเครื่องแม่ข่ายสามารถสื่อสารกันได้ภายในระบบ โดยอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันในการกระจายสัญญาณคืออุปกรณ์เราเตอร์ (Router) และอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater)

3) ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลเพื่อการใช้งานจริงในพื้นที่การใช้งาน 2 แห่งคือ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และที่วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เช่น การวัดทดสอบค่า Receive Signal Strength Indicator (RSSI) และการวัดทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการทำงานของเครื่องลูกข่ายในระบบทั้งสองรูปแบบคือ การสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหนึ่งจุด และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหลายจุด และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบความแรงสัญญาณที่ต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้ด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator

4) ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่า Receive Signal Strength Indicator ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้โปรแกรม Wavemon พบว่ามีค่าดังกล่าว แปรผกผันกับค่าระยะทางภายในโครงข่ายทุก ๆ โนด และปัจจัยที่มีผลต่อค่า Receive Signal Strength Indicator คือ การดูดซับสัญญาณ (Absorption) ที่เกิดจากพื้นที่ภายในถ้ำที่มีน้ำขังบางส่วนและการเลี้ยวเบนของสัญญาณ (Diffraction) ที่เกิดจากในลักษณะภายในถ้ำที่มีวัตถุขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

5) ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง ที่สามารถประเมินค่าได้ผ่านการใช้คำสั่ง ping (Ping) ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบการเชื่อมต่อระบบในโครงข่ายพบว่ามีค่าเวลาแฝงแปรผันตรงกับค่าระยะทางภายในโครงข่ายทุก ๆ โนด และปัจจัยที่มีผลต่อค่าเวลาแฝงคือ การเคลื่อนที่ของสัญญาณที่มาจากเส้นทางที่แตกต่างกัน (Multipath) เนื่องจากปัญหาของการเลี้ยวเบนของสัญญาณตามโพรงถ้ำและปัญหาของการดูดซับคลื่นจากน้ำ

6) ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายเพื่อการใช้งานจริงในพื้นที่การใช้งาน 2 แห่งดังกล่าวข้างต้นพบว่า ระบบที่นำเสนอสามารถทำการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งภายในโนดเดียวกันหรือระหว่างโนด อย่างไรก็ตามตามคณะผู้วิจัยยังต้องทำการพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างโนดที่มีระยะทางไกลมากขึ้น รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการสื่อสารภายในโนดและระหว่างโนดที่ดีขึ้น

7) ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาสายอากาศสำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) หรือโนดย่อย (Sub node) ในระบบ ซึ่งสายอากาศเดิมของอุปกรณ์ทวนสัญญาณดังกล่าวเป็นสายอากาศชนิดเจาะจงทิศทาง เมื่อผู้วิจัยนำไปใช้งานจริงพบว่า สายอากาศดังกล่าวยังไม่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่ำเกินไปที่จะนำไปใช้งานจริงภายในถ้ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาระบบสายอากาศขึ้นมาใหม่เป็นสายอากาศคู่ (Dual antennas) เพื่อให้สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำรวมทั้งเพิ่มความไวการรับ

(Sensitivity) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อระหว่างโนดหลักและโนดย่อยต่าง ๆ ที่อยู่ถัดไปสามารถเพิ่มระยะทางได้ประมาณ 80 – 90 เมตร

8) ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเฝ้าระวังการทำงาน (Monitoring) ของระบบดังกล่าว ทำให้เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบสามารถบริหารจัดการได้ง่ายยิ่งขึ้น ทั้งในด้านของการตรวจสอบสถานะเครื่องลูกข่ายที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ ข้อมูลในระบบสามารถระบุชื่อผู้ใช้งาน เวลาในการเข้าใช้งานระบบ รวมทั้งทราบชนิดของอุปกรณ์ที่เข้าใช้งานในระบบ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ และสุดท้ายมีการแสดงค่าเวลาแฝงเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์สัญญาณของแต่ละอุปกรณ์ในเครือข่ายง่ายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

9) ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่ถ้าป่าภูทิว อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ซึ่งเป็นผลการทดสอบของระบบเดิมก่อนทำการพัฒนา และที่วัดถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ซึ่งเป็นผลการทดสอบระบบที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาปรับปรุงเรียบร้อยแล้ว สังเกตได้จากการที่โนดย่อยลำดับที่สามที่มีระยะห่างจากโนดหลักมากที่สุดแต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการติดต่อสื่อสาร โดยพบว่าค่า Receive Signal Strength Indicator ที่ดีและมีค่าเวลาแฝงที่ต่ำ แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาระบบสายอากาศและการเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณสามารถลดปัญหาในด้านระยะทางในการติดต่อเครื่องลูกข่ายในสถานการณ์ที่อยู่ห่างไกลจากโนดหลักได้ ทำให้การสื่อสารทางเสียงผ่านโครงข่ายสื่อสารไร้สายได้สำเร็จ มีความชัดเจนของเสียงพูดมากยิ่งขึ้นและสามารถทำการพูดโต้ตอบได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง ทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ผู้วิจัยยังได้ทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยได้ทำการจำลองเหตุการณ์ที่จำเป็นจะต้องทำการลากสายนำสัญญาณผ่านโพรงถ้ำด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถทำการกระจายสัญญาณไร้สายแบบปกติได้ ทำให้มีการประยุกต์ใช้เครือข่ายแบบผสม (Mixed Wired-Wireless Network) ซึ่งพบว่าสามารถทำงานร่วมกันได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยตามโครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ ในส่วนของการพัฒนาระบบเครื่องรับส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัล มีแนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคตคือ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวิทยุที่กำหนดโดยซอฟต์แวร์ (Software define radio, SDR) ซึ่งอาจจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับเปลี่ยนความถี่การใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็วให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทางกายภาพภายในถ้ำที่จะทำให้มีระยะทางในการสื่อสารที่ไกลและครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

9. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

- [1] A. G. Yavus, Z. C. Taysi, and E. Celik, "In-Cave Wireless Communication System," In Proc. 2009 Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, Vol. 1, pp. 161-164, 2009.
- [2] Mangharam, R., Rowe, A., Rajkumar, R., Suzuki, R., "Voice over Sensor Networks", Real-Time Systems Symposium, 2006. (RTSS '06), IEEE Press, Dec. 2006, pp. 291 - 302,
- [3] Wang C., Sohraby K., Jana R., Ji L., Daneshmand M., "Voice Communications Over Zigbee Networks" Communications Magazine, IEEE, vol. 46(1), Jan. 2008, pp. 121- 127.
- [4] H. Saha, S. Mandal, S. Mitra, S. Banerjee, and U. Saha., "Comparative Performance Analysis between nRF24L01+ and XBEE ZB Module Based Wireless Ad-hoc Networks," International Journal of Computer Network and Information Security, Vol. 7, pp. 36-44, 2017.
- [5] Laura Garcia, Jose M. Jimenez, Miran Taha, Jaime Lloret, "Wireless Technologies for IoT in Smart Cities," Journal of Network Protocols and Algorithms, Vol. 1, No. 1, April 2018.
- [6] Audio codec. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Audio_codec
- [7] Paramvir B and Padmanabhan V. "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", 2000.
- [8] Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing
- [9] Coleri S, Ergen M, Puri A and Bahai A, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48 (3), pp. 223 – 229, 2002.
- [10] Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/>
- [11] AC750 Wireless Dual Band 4G LTE Router. [Online]. Available: <https://www.tp-link.com/th/home-networking/3g-4g-router/archer-mr200/>
- [12] USB WiFi 802.11n Wireless Adapter. [Online]. Available: <https://www.trangnetwork.com/136-wireless-usb-adapter/492-usb-wifi-802-11n-wireless-adapter-driver-download.html>
- [13] 2.4 GHz 300Mbps 9 dBi Outdoor CPE. [Online]. Available: <https://www.tp-link.com/th/business-networking/outdoor-radio/cpe210/>