

ระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย
ย่านความถี่ 2.4 GHz



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

IN-CAVE VOICE COMMUNICATION SYSTEM BASED ON 2.4 GHZ
WIRELESS COMMUNICATION NETWORK



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Telecommunication and Computer Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2022

ระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย
ย่านความถี่ 2.4 GHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. รุ่งสรรค์ วงศ์สรรค์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ร.อ. ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. นุชนาฏ สันทาลุนย์)

กรรมการ



(รศ. ดร. นิตราชัย โชติชูช่างูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัชนนท์ สุนาพรหม : ระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่าน
ความถี่ 2.4 GHz (IN-CAVE VOICE COMMUNICATION SYSTEM BASED ON 2.4 GHz
WIRELESS COMMUNICATION NETWORK) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือ
อากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์, 129 หน้า.

คำสำคัญ : การสื่อสารภายในถ้ำ/การสื่อสารด้วยเสียง/โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ปัจจุบันมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นในถ้ำอยู่บ่อยครั้ง เมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้นการสื่อสารเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่สำคัญต่อการช่วยเหลือผู้ประสบภัย แต่การสื่อสารในถ้ำนั้นมียุทธศาสตร์การสื่อสารไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการสื่อสารภายในถ้ำ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการสื่อสารโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz (2.4-2.45 GHz) มาใช้สำหรับการสื่อสารภายในถ้ำ เนื่องจากอุปกรณ์สื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz นั้นหาได้ง่ายและมีราคาถูก โดยมีอุปกรณ์เราเตอร์ (Router) เป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณหลัก มีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) สำหรับทวนสัญญาณจากอุปกรณ์เราเตอร์ และได้นำบอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องแม่ข่าย (Server) และเครื่องลูกข่าย (Client) แต่เนื่องจากสภาพแวดล้อมของถ้ำเป็นอุปสรรคอย่างมากสำหรับคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณให้สามารถกระจายสัญญาณภายในถ้ำได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับเฟิร์มแวร์เพื่อตรวจสอบดูแลอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ในการทดสอบวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบระบบสื่อสารภายในอาคารก่อน แล้วนำผลการทดสอบมาพัฒนาระบบสื่อสารก่อนที่จะนำไปทดสอบที่ถ้ำจริงสองแห่ง

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

RACHANON SUNAPROM : IN-CAVE VOICE COMMUNICATION SYSTEM BASED ON
2.4 GHZ WIRELESS COMMUNICATION NETWORK. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
FLT. LT. Dr. PRAYOTH KUMSAWAT, Ph.D., 129 PP.

Keyword : Communication In Cave/Voice Communication/ Wireless Sensor Network

Nowadays, there are frequent accidents in the cave. When such an accident occurs, communication is another important aspect to help the victims. Since there are not many means of communication in the cave, this thesis therefore proposes another option for communication within the cave. In this thesis, we use the principle of communication using a wireless communication network in the 2.4 GHz band (2.4-2.45 GHz) for communication inside the cave because communication devices in the 2.4 GHz frequency band are easy to find and inexpensive. We use a router device as the main broadcasting device and a repeater for repeating the signal from the router device. We also apply the Raspberry Pi embedded system board as a server and client. However, since the environment of the cave is a huge obstacle for communication using the 2.4 GHz band, this thesis has developed the antennas for signal repeaters to better propagate signals inside the cave. In addition, a Monitoring program has been developed and applied to monitor various devices within the wireless communication network. In order to obtain the result, the experiment of the communication system is first conducted inside the building. Then, we use this results to further develop our communication system and the final tests are performed at two real caves.

School of Telecommunication Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature *R. Sunaprom*
Advisor's Signature *P. Kumsawat*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากพระคุณของบิดาและมารดา คือ คุณพ่อณฤทธิ์ สุณาพรม และคุณแม่ ธิดารัตน์ สุณาพรม ผู้วิจัยขอบคุณพระคุณท่านทั้งสองที่มอบชีวิต ให้ความรักความห่วงใย และให้การเลี้ยงดูอย่างอบอุ่น ความสำเร็จนี้คือความภูมิใจของท่านทั้งสอง

ขอบคุณพระคุณในการช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคล อันได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้มอบวิชาความรู้ คอยให้ความช่วยเหลือทางด้านทุนทรัพย์ ค่าปรึกษาทางด้านงานวิจัย การใช้ชีวิต และเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา และคอยให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งคอยชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย และการใช้ชีวิตที่ถูกต้อง

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาในการเข้าศึกษา และขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายธนกร หอประเสริฐวงศ์ นายวงศธร ภาธรสุวรรณ นางสาวณิชาล สว่างสไสว นางสาวธนวรรณ กมลกลาง พี่ น้อง และเพื่อน รวมถึงมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา คอยให้กำลังใจและมิตรภาพที่ดีมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ(สำนักงาน กสทช.) ภายใต้ทุน B62-1-(2)-004 ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถผ่านอุปสรรคและผ่านความยากลำบากมาได้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ครูอาจารย์ รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รัก และเคารพทุกท่าน

รัชนนท์ สุณาพรม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 สรุป.....	3
2 ปรัชศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีความรู้พื้นฐาน.....	4
2.2.1 ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system).....	4
2.2.2 โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network).....	5
2.2.3 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC).....	6
2.2.4 ค่าความแรงสัญญาณภาครับ.....	6
2.2.5 การสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย.....	7
2.2.6 Orthogonal frequency division multiplexing.....	8
2.2.7 บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B.....	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.8	โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT 10
2.2.9	บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH..... 11
2.2.10	อุปกรณ์เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300..... 11
2.2.11	อุปกรณ์ TP-LINK's 2.4GHz 300Mbps 9dBi Outdoor CPE..... 12
2.3	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 13
2.4	สรุป 15
3	วิธีการดำเนินการวิจัย..... 16
3.1	บทนำ..... 16
3.2	การทดสอบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้โมดูล nRF21L01 16
3.2.1	วงจรส่งข้อมูลเสียง 17
3.2.2	ผลการทดสอบวงจรส่งข้อมูลเสียง 17
3.2.3	วงจรรับข้อมูลเสียง 19
3.2.4	ผลการทดสอบวงจรรับข้อมูลเสียง 19
3.2.5	การทดสอบการได้ยินเสียงของวงจรสื่อสารภายในอาคาร..... 21
3.2.6	ผลการทดสอบการได้ยินเสียงของวงจรสื่อสารภายในอาคาร 22
3.2.7	สรุปผลการทดสอบวงจรสื่อสาร 27
3.3	การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่าน ความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร..... 28
3.3.1	การออกแบบและการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้ โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร..... 29
3.3.2	การทดสอบวัดค่าความแรงของสัญญาณภาครับ 30
3.3.3	ผลการทดสอบวัดค่าความแรงของสัญญาณภาครับ 31
3.3.4	การทดสอบระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ภายในอาคาร..... 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในถ้ำจริง	38
3.4.1	การออกแบบและสร้างระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz	38
3.4.2	การวางแผนการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz	48
3.4.3	การทดสอบหลังการพัฒนาของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz	53
3.5	การออกแบบโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz	63
3.6	สรุป	65
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	66
4.1	บทนำ	66
4.2	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับที่รับได้สำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด	67
4.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด	72
4.4	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่รับได้สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด	78
4.4.1	ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก	78
4.4.2	ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง	81
4.5	ผลการทดสอบความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ผลการพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณ.....	86
4.6.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	87
4.6.2 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน.....	89
4.6.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความแรงสัญญาณสองโพลาริซ.....	90
4.6.4 ผลการทดสอบเพิ่มกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ.....	92
4.7 ผลการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้งานในถ้ำโดยใช้โครงข่าย สื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz.....	93
4.7.1 ผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับและผลเฉลี่ย โดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายใน โนดย่อย.....	94
4.7.2 ผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับและผลเฉลี่ย โดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่าง โนดย่อย.....	97
4.7.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในระยะห่าง 50 เมตรด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง สำหรับ อุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่ 2.4 GHz.....	101
4.8 ผลการพัฒนาโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียง สำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz.....	112
4.9 สรุป.....	114
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	116
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	118
รายการอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก ก บทควมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	120
ประวัติผู้เขียน.....	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกล่าวถึง..... 13
3.1	กำหนดระดับการได้ยินเสียง..... 22
3.2	ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 1 23
3.3	ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 2 24
3.4	ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 3 25
3.5	ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 4 26
3.6	ตารางเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณภาครับระหว่าง Internal Antenna กับ External Antenna สำหรับบอร์ด Raspberry Pi zero WH 32
3.7	ค่าความแรงของสัญญาณภาครับ ของบอร์ด Raspberry Pi Zero W เมื่อรับข้อมูลจากเราเตอร์..... 34
3.8	ผลการทดสอบวัดค่าสัญญาณปิงของอุปกรณ์สื่อสารในระยะทางต่างกัน 36
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำและค่าความแรงสัญญาณภาครับ 67
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms)..... 73
4.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย ค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก..... 78
4.4	การทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย ค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก 79
4.5	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก 81
4.6	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสารไร้สายด้วย ค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยที่หนึ่ง..... 82
4.7	ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย ค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง 83
4.8	ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ของสายอากาศทั้งโพลาริซ์แนวระนาบ (Horizontal) และโพลาริซ์แนวตั้ง (Vertical) ของขั้วด้านขวา..... 90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ของสายอากาศทั้งโพลาไรซ์แนวระนาบ (Horizontal) และ โพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical) ของขั้วด้านซ้าย 91
4.10	ผลการทดสอบเรเตอร์และอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์..... 92
4.11	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย ในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง 94
4.12	ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง..... 96
4.13	ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย โดยเปรียบเทียบในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง 98
4.14	ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อยโดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง 99
4.15	ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง..... 103
4.16	ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม 105
4.17	ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย..... 108
4.18	ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โหนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง..... 110

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ระบบสมองกลฝังตัวในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย.....	5
2.2	Opus encoding and decoding process	8
2.3	เปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ FDM และ OFDM.....	9
2.4	บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B.....	10
2.5	โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT	10
2.6	บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH	11
2.7	เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300	12
2.8	อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz	13
3.1	รูปจำลองวงจรส่งข้อมูลเสียง.....	17
3.2	รูปสัญญาณเสียงในขณะที่ยังไม่พูด.....	18
3.3	รูปสัญญาณขณะพูด.....	18
3.4	รูปจำลองวงจรรับข้อมูลเสียง	19
3.5	รูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียงในขณะที่ยังไม่พูด	20
3.6	รูปสัญญาณเสียงที่รับได้ขณะพูด	20
3.7	รูปการขยายขนาดรูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียง.....	21
3.8	รูปแผนผังภายใน F11 ชั้นที่ 3	21
3.9	รูปจากมุมมองด้านบนของอาคาร F11.....	22
3.10	วัดระยะทางเส้นทางที่ 1	23
3.11	วัดระยะทางเส้นทางที่ 2	24
3.12	วัดระยะทางเส้นทางที่ 3	25
3.13	วัดระยะทางเส้นทางที่ 4	26
3.14	ระดับการได้ยินเสียงในเส้นทางทั้งหมด	27
3.15	ระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร ...	29
3.16	เส้นทางทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ	30
3.17	โปรแกรม Wavemon	31
3.18	ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19	ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับจากเราเตอร์..... 35
3.20	แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย 39
3.21	เครื่องแม่ข่ายที่พร้อมใช้งาน 40
3.22	การตรวจสอบสถานการณ์เชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายด้วยซอฟต์แวร์บริหารจัดการโครงข่าย 41
3.23	เครื่องลูกข่าย 42
3.24	การสร้างไฟล์ (กรอบสีแดง) ในตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณไร้สายเข้ากับเราเตอร์..... 43
3.25	การตั้งค่าชื่อโครงข่าย (SSID) และรหัสผ่านโครงข่าย (PSK) ในการเชื่อมต่อกับเราเตอร์..... 44
3.26	ชุดคำสั่งเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย 44
3.27	ชุดคำสั่งเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย 45
3.28	ภาพด้านบนของเครื่องลูกข่าย..... 46
3.29	ไฟแสดงสถานะของเครื่องลูกข่าย..... 46
3.30	การตรวจสอบสถานการณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องลูกข่ายภายในโครงข่าย 47
3.31	แผนผังระบบเพื่อการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด 48
3.32	แบบร่างสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้าปฎิหารีย์..... 49
3.33	แบบร่างสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้าเชียงดาว 50
3.34	แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกค่าการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่หนึ่ง 51
3.35	แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกค่าการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่สอง..... 52
3.36	แผนวงจรบังคับทิศทางของสายอากาศ 54
3.37	แผนวงจรสายอากาศ 54
3.38	แผนวงจรประมวลผลสัญญาณของสายอากาศ 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.39	ชุดสายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้น 55
3.40	การเชื่อมต่อระหว่างชั้นกราวด์และชั้นสายอากาศ 56
3.41	แผนผังการทดสอบระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำป่าภูหินรีและถ้ำเชียงดาว 57
3.42	แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งในพื้นที่การใช้งานจริง 58
3.43	แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่สองในพื้นที่การใช้งานจริง 59
3.44	แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่สามในพื้นที่การใช้งานจริง 59
3.45	รูปแผนผังการทดสอบระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในพื้นที่การใช้งานจริง 60
3.46	แบบร่างสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้ำป่าภูหินรี 61
3.47	แบบร่างสถานที่การดำเนินการวิจัยภายในถ้ำเชียงดาว 62
3.48	แผนผังการทำงานของโปรแกรมเฝ้าระวัง 65
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) 68
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง 69
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง 70
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงของโนดย่อยที่สอง 71
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำและค่าเวลาแฝง (ms) 74
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำและค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง 75
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำและค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง 76
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำและค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดย่อยที่สอง 77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก	79
4.10 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ด้วยค่าเวลาแฝง (ms) สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก	80
4.11 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสาร ไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายใน โนดหลัก	82
4.12 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย ลำดับที่หนึ่ง	83
4.13 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย ด้วยค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง	85
4.14 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาแล้ว	87
4.15 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ	88
4.16 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่	88
4.17 แบบจำลองระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่	89
4.18 แบบจำลองระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่	90
4.19 ส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่	91
4.20 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ	93
4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสาร แบบหลายจุดภายในโนดย่อย โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง	95
4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ภายในโนดย่อย โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง	96
4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสาร แบบหลายจุดระหว่างโนดย่อยในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง	98
4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุด สู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	แผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง 101
4.26	แผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม 102
4.27	กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง 104
4.28	กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม 106
4.29	แผนภาพการทดสอบโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย 107
4.30	แผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง 107
4.31	กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย 109
4.32	กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่สอง 112
4.33	ผลการทดสอบโปรแกรมเฝ้าระวังสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้ โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz 113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารภายในอาคารได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก รวมถึงการศึกษาการสื่อสารภายในถ้ำ โดยที่ถ้ำเป็นโพรงที่ลึกเข้าไปในภูเขาหรือในพื้นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีขนาดโพรงที่ใหญ่พอที่มนุษย์สามารถเข้าไปได้ จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ด้านการท่องเที่ยว การศึกษาหินและแร่ การศึกษาเกี่ยวกับสัตว์ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีนักสำรวจและนักวิจัยเข้าไปสำรวจและทำวิจัยต่าง ๆ ซึ่งบ่อยครั้งที่อาจเกิดอุบัติเหตุขึ้นภายในถ้ำ ยกตัวอย่างเช่น ในปี 2561 กลุ่มนักฟุตบอลเยาวชน หมูป่าอคาเดมี่ ได้ไปติดในถ้ำหลวง วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย ซึ่งมีสาเหตุมาจากน้ำท่วมภายในถ้ำและไม่สามารถติดต่อสื่อสารเพื่อขอความช่วยเหลือได้อย่างทันที โดยที่การช่วยเหลือเป็นไปได้ว่ายากลำบาก ใช้เวลานานและมีการสูญเสียเกิดขึ้น โดยในการช่วยเหลือทีมหมูป่า นั้น ถ้ำมีลักษณะที่ลึกกลับและซับซ้อนเป็นอย่างมาก การสื่อสารด้วยโทรศัพท์มือถือเป็นไปได้เลยหรือแม้กระทั่งวิทยุสื่อสารทั่วไปยังยากที่จะใช้งาน อุปกรณ์สื่อสารภายในถ้ำที่สำคัญมีชื่อว่า วิทยุถ้ำ (Cave radio) ซึ่งนิยมใช้อยู่ 2 แบบคือ HeyPhone ออกแบบโดยนักผจญภัยชาวอังกฤษที่มีชื่อว่า John Hey (Bedford, 2002) และ Nicola System (Gibson, 2003) ซึ่งเป็นระบบสื่อสารของประเทศฝรั่งเศส อุปกรณ์สื่อสารทั้งสองแบบใช้งานในย่านความถี่ 87 KHz หน่วยงานอาสาสมัครที่มีชื่อว่า Derbyshire Cave Rescue Organisation (DCRO) (อาภาขจร, 2018) จากประเทศอังกฤษ ได้นำวิทยุถ้ำจำนวน 4 เครื่องมาช่วยเหลือทีมหมูป่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการสื่อสารภายในถ้ำเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะถ้ำการสื่อสารภายในถ้ำมีประสิทธิภาพที่ดี การทำการช่วยเหลือภายในถ้ำจะทำให้รวดเร็วมากขึ้นและยังลดโอกาสการเสียชีวิตของผู้ที่ประสบอุบัติเหตุภายในถ้ำได้ด้วย

การสื่อสารภายในถ้ำในปัจจุบัน อุปกรณ์มักจะมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สื่อสารในย่านความถี่ที่ต่ำมาก (Very Low Frequency, VLF) จึงอาจเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่จะพกพาไปได้อย่าง และมีจำนวนเครื่องที่น้อย ที่อาจจะทำให้เกิดความล่าช้าในการติดต่อสื่อสารหรือประสานงานต่าง ๆ ดังนั้นจึงเริ่มมีการสนใจที่จะนำอุปกรณ์สื่อสารและบอร์ดสมองกลฝังตัวที่สามารถสื่อสารในย่านความถี่สูงได้ เช่น ในย่านความถี่ 2.4 GHz หรือย่านความถี่ไวไฟ (Wi-Fi) มาใช้ในถ้ำ เนื่องจากมีขนาดของอุปกรณ์ที่เล็ก พกพาง่าย และมีราคาถูก เช่น Xbee, nRF24L01, ESP8266, ESP32, Raspberry Pi เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อันดับแรกนำเสนอระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับทดสอบภายในอาคาร เพื่อให้ได้ผลทดสอบในการพัฒนาระบบสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำจริง จากนั้นจะนำเสนอการออกแบบและสร้างระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz รวมถึงการพัฒนาสายอากาศและการสร้างโปรแกรมเฟิร์มแวร์สำหรับระบบสื่อสาร และในลำดับสุดท้ายจะนำเสนอผลการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในถ้ำจริงสองแห่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำ โดยใช้หลักการโครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำ โดยใช้หลักการโครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz

1.2.3 สามารถนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปใช้งานได้จริง และเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดให้มีมูลค่าและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ดำเนินการสร้างต้นแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.3.2 ทำการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเพิ่มความสามารถในการสื่อสารภายในถ้ำได้มากยิ่งขึ้น

1.4.2 เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.4.3 สามารถนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ไปใช้ได้จริง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูลรวมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.5.3 พัฒนาสายอากาศอุปกรณ์ทวนสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.5.4 พัฒนาโปรแกรมเผ้าระวังสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

1.5.5 ดำเนินการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในถ้ำจริง

1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

1.5.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 สรุป

ปัญหาและความเป็นมาของวิจัยนี้ เป็นการวิจัยที่เกี่ยวข้องโครงข่ายระบบสื่อสารด้วยเสียงในย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับใช้งานในถ้ำ เพื่อสนับสนุนการช่วยเหลือผู้ประสบภัยที่เกิดอุบัติเหตุขึ้นภายในถ้ำ สามารถช่วยเหลือผู้ประสบภัยได้อย่างทันเวลาที่

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

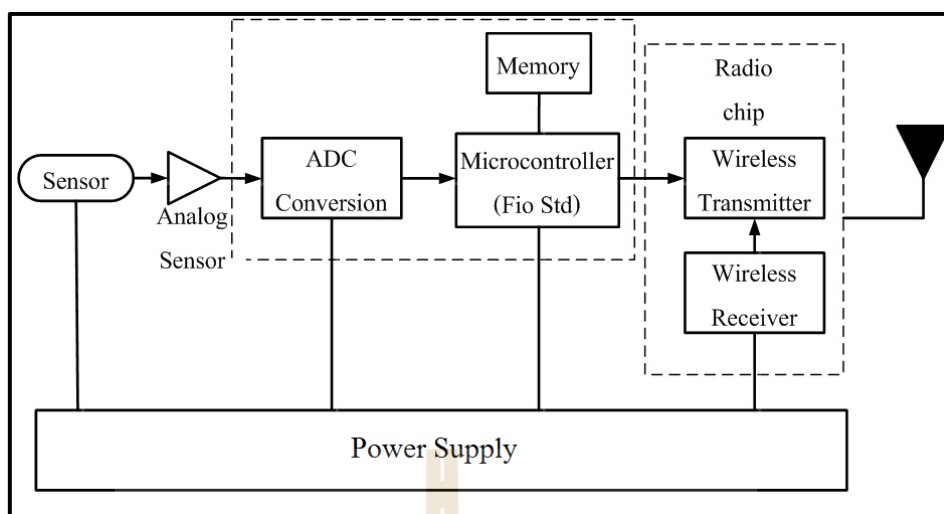
2.1 บทนำ

ในบทที่ 2 นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ โดย อันดับแรกจะอธิบายถึงทฤษฎีความรู้พื้นฐาน หลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ทฤษฎีค่าความแรงของสัญญาณภาครับ โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เทคโนโลยีที่ใช้ในการบีบอัดสัญญาณเสียงที่ใช้งานบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต ทฤษฎีระบบสมองกลฝังตัว อันดับที่สองจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ต้องใช้จะประกอบไปด้วย บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH บอร์ด ReSpeaker 2-Mics Pi HAT อุปกรณ์เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300 และอุปกรณ์ TP-LINK's 2.4 GHz 300Mbps 9dBi Outdoor CPE และกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นส่วนสุดท้ายของบทนี้

2.2 ทฤษฎีความรู้พื้นฐาน

2.2.1 ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system)

ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) เปรียบเสมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่มีแผงวงจรขนาดเล็กและมีความสามารถที่น้อยกว่าคอมพิวเตอร์ทั่วไป ระบบสมองกลฝังตัวได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมต่าง ๆ เนื่องจากมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพที่ดี งานวิจัยนี้จึงได้นำระบบสมองกลฝังตัวมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณเสียงในการติดต่อสื่อสารให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านการใช้ช่องสัญญาณ การจัดการพลังงาน และสามารถออกแบบซอฟต์แวร์บริหารจัดการได้ง่าย ระบบสมองกลฝังตัวในการประยุกต์ใช้ในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบสมองกลฝังตัวในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

(ที่มา:<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/>

123456789/5558/1/SUT7-709-56-12-59-Fulltext.pdf, 2566)

2.2.2 โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network)

โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายคือการรวมกันของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก ที่มีมากกว่าหนึ่งเซ็นเซอร์ การสื่อสารผ่านโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks, WSN) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นขึ้นสำหรับการสื่อสารที่ใช้อัตราการส่งข้อมูลต่ำแต่สามารถสร้างโครงข่ายสื่อสารได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นโครงข่ายส่วนบุคคลแบบไร้สาย (Wireless personal area network, WPAN) ในโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่ถูกติดตั้งนั้น ปกติแล้วจะมีองค์ประกอบอยู่ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1. เซ็นเซอร์โนด ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลจากตัวเซ็นเซอร์ 2. เราเตอร์โนด ทำหน้าที่ค้นหาเส้นทางเพื่อส่งผ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์โนดไปยังโคออดิเนเตอร์โนดภายในโครงข่าย และ 3. โคออดิเนเตอร์โนดหรือเกตเวย์โนด ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลจากเราเตอร์โนดไปยังเซ็นเซอร์โนดทั้งหมด

อุปกรณ์ที่มีความจำเป็นและสำคัญต่อการพัฒนาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ใน ถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ที่ใช้หลักการของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย Raspberry Pi 3 Model B ซึ่งมีหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวในการควบคุมการสื่อสารด้วยเสียงที่ทำงานเปรียบเสมือนแม่ข่าย Raspberry Pi zero WH มีหน้าที่ในการเป็นระบบสมองกลฝังตัวในการรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้และส่งออกข้อมูลเสียงให้กับผู้ใช้ ทำงานร่วมกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณเสียง ReSpeaker 2-Mics Pi HAT เป็นบอร์ดประมวลผลสัญญาณเสียงที่มีอุปกรณ์ Analog to Digital Converter (ADC) และ Digital to Analog Converter (DAC) พร้อมวงจรขยายสัญญาณเสียงสำหรับการใช้งานกับไมโครโฟน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้าง

โครงข่ายไร้สายประกอบด้วย อุปกรณ์โครงข่าย D-Link DWR-M920 ซึ่งเป็นอุปกรณ์เราเตอร์สำหรับใช้ในการสร้างโครงข่ายไร้สายในระบบ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังจะได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย Wireless-N USB Adapter หรือ Wi-Fi Receiver แบบ USB ที่มีสายอากาศขนาดเล็กสำหรับใช้กับ Raspberry Pi zero WH เพื่อช่วยในการเชื่อมต่อกับโครงข่ายไร้สายดังกล่าว

2.2.3 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC)

Analog to Digital Converter (ADC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อที่จะนำไปประมวลผล ซึ่งเป็นกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่สัญญาณแปรผันต่อเนื่อง ถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยที่ไม่มีการสูญเสียข้อมูล ลักษณะของข้อมูลแอนะล็อกกับข้อมูลดิจิทัลจะมีความแตกต่างกัน คือข้อมูลแอนะล็อกจะเป็นตัวเลขที่เป็นเลขยกกำลังของ 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 (2¹⁰) ระดับ Arduino Nano ใช้เทคนิคการแปลง ADC โดยใช้เทคนิคการชาร์จตัวเก็บประจุจากนั้นจับเวลาที่ตัวเก็บประจุคายประจุผ่านตัวต้านทาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบจำนวนของรอบนาฬิกาที่ตัวเก็บประจุคายประจุจนหมด จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจะถูกส่งกลับเมื่อ ADC เสร็จสมบูรณ์

Digital to Analog Converter (DAC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าที่ปกติมี 2 ระดับ (0,1) ให้เป็นสัญญาณที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่จำกัดสถานะหรือที่เรียกว่าสัญญาณแอนะล็อก Arduino Nano ใช้วิธีการแปลง DAC โดยใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะทำการปรับสถานะของพัลส์ (0,1) สลับกันไปมาด้วยคาบเวลาหนึ่ง ค่าแอนะล็อกที่ได้จะใช้ความกว้างของค่าสัญญาณพัลส์ในการบ่งบอกข้อมูลแอนะล็อก ซึ่งเรียกว่าความกว้างของสัญญาณ (Pulse width)

2.2.4 ค่าความแรงของสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength Indicator, RSSI)

ค่าความแรงของสัญญาณภาครับ เป็นดัชนีบ่งชี้ของความแรงของสัญญาณวิทยุที่ตัวรับสามารถรับได้ โดยความแรงของสัญญาณมีหน่วยเป็น Decibel-milliwatts (dBm) ซึ่งอ้างอิงที่ระดับ milliwatt เมื่อ 1 milliwatt จะมีค่าเท่ากับ 0 dBm สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$x = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{mW}} \quad (2.1)$$

$$P = 1 \text{ mW} * 10^{\frac{x}{10}} \quad (2.2)$$

โดย X คือ ระดับ RSSI มีหน่วยเป็น dBm

P คือกำลัง มีหน่วยเป็น Milliwatt

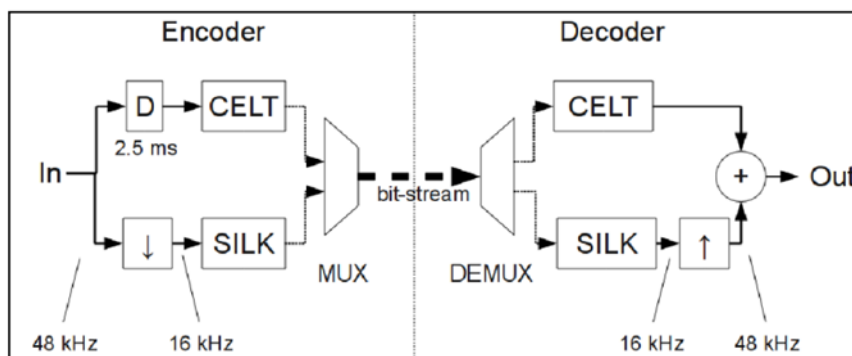
โดยส่วนใหญ่ระดับความแรงของสัญญาณวิทยุจะมีค่าต่ำกว่าศูนย์ซึ่งจะมีค่าเป็นลบ เช่น -20 dBm, -70 dBm เป็นต้น

2.2.5 การสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย

การสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายหรือโครงข่ายอื่น ๆ ในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีการบีบอัด สัญญาณเสียงที่ออกแบบเฉพาะการใช้งานบนโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่เรียกว่า วอยซ์โอเวอร์ไอพี (Voice over IP, VoIP) หรือ วีโอไอพี ซึ่งทำงานได้บนอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล โดยสัญญาณเสียงจะถูกตัดแบ่งเป็นแพ็คเกจ (Package) ของข้อมูลที่วิ่งผ่านไปบนโครงข่ายที่ใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลทั่วไปแทนการใช้วงจรเฉพาะ ตามวิธีการสื่อสารในระบบโทรศัพท์ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิมเปรียบได้กับการให้รถยนต์วิ่งแทรกกันได้ตามช่องว่างที่มีอยู่ ของถนนแทนการให้รถยนต์คันเดียวจองถนนวิ่งแบบผูกขาด ข้อดีของวอยซ์โอเวอร์ไอพีคือ สามารถใช้โครงข่าย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถให้บริการการสื่อสารด้วยเสียงได้ในอัตราค่าบริการที่ถูกลงมาก ตัวอย่าง ของอัลกอริทึมและวิธีการในการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและการถอดรหัสสัญญาณเสียง (Coder decoder) หรือ เรียกสั้นๆ ว่าโคเดก (Codec) เพื่อใช้กับการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย มีดังนี้

- Opus เป็นตัวแปลงสัญญาณหรือโคเดก (Codec) ที่ใช้สำหรับการพูดคุยด้วยเสียงและการส่ง เพลงผ่านอินเทอร์เน็ต สามารถให้คุณภาพเสียงที่ดีเมื่อมีอัตราความผิดพลาดบิตเรตที่ต่ำ และยังมีคความหน่วง เวลาที่ต่ำมาก ๆ โดยที่ Opus เป็นโคเดกที่มีการใช้ระหว่าง 2 โคเดก ได้แก่ CELT และ SILK องค์ประกอบของ Opus ดังแสดงในรูปที่ 2.2

- CELT (Constrained Energy Lapped Transform) คือ รูปแบบการบีบอัดเสียงแบบยอมให้มีการสูญเสียได้ (Lossy compression) ซึ่งมีความหน่วงเวลาในการสื่อสารที่ต่ำ CELT เป็นโคเดกออกแบบประสงค์แบบเต็มย่านความถี่ (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



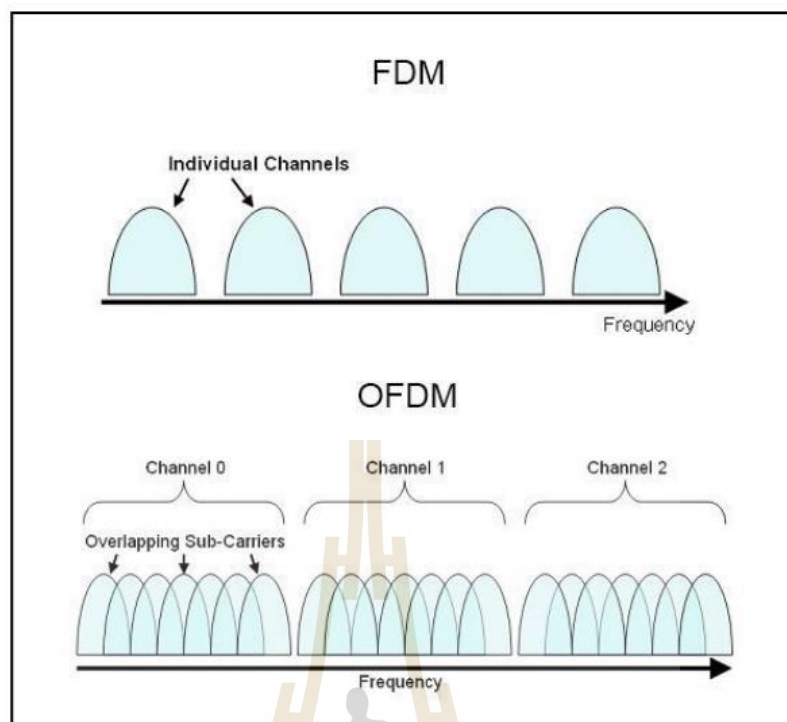
รูปที่ 2.2 Opus encoding and decoding process

(ที่มา: <https://www.slideshare.net/hanxue/opus-codec, 2566>)

- SILK คือ รูปแบบการบีบอัดเสียงที่พัฒนาโดย Skype Limited เพื่อใช้ในแอปพลิเคชัน Skype และถูกนำไปใช้ในมาตรฐานอินเทอร์เน็ต Opus โคเดก (Internet standard Opus codec) ซึ่ง SILK สามารถใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างที่อัตรา 8 12 16 และ 24 kHz และสามารถใช้บิตเรตได้ที่ความเร็ว 6 kbps ถึง 40 kbps

2.2.6 Orthogonal frequency division multiplexing

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ซึ่งในระบบการส่งสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห์แบบดิจิตอลและมีการเข้ารหัสแบบดิจิตอลในความถี่หลาย 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 2.3 เปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณในการมอดูเลตแบบ FDM และ OFDM
(ที่มา: <https://devopedia.org/orthogonal-frequency-division-multiplexing>, 2566)

2.2.7 บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B

บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B ผู้วิจัยขอเรียกว่าบอร์ด Raspberry Pi 3 Model B เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวที่ใช้ใน การควบคุมการสื่อสารด้วยเสียงเปรียบเสมือนแม่ข่าย ซึ่งการสื่อสารสามารถสื่อสารได้ทั้งแบบหนึ่งจุดสู่ หนึ่งจุด (Point-to-Point) และการเชื่อมต่อแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด (Point-to-Multipoint) ขึ้นอยู่กับ การใช้งาน 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 รวมไว้บนบอร์ดเดียวกัน บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B
(ที่มา: <http://store.dolphinlabs.in/index.php/product/raspberry-pi-3-model/>, 2566)

2.2.8 โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT

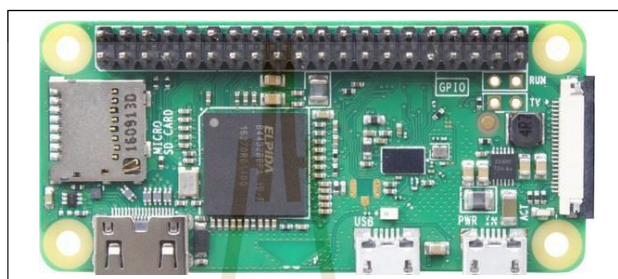
โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT เป็นบอร์ดขยายไมโครโฟนคู่ สำหรับ Raspberry pi ที่ออกแบบมาสำหรับแอปพลิเคชันด้านปัญญาประดิษฐ์และการเชื่อมต่อกับสัญญาณเสียง โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT ใช้ชิป WM8960 ทำหน้าที่เป็นโคเดกในการแปลงสัญญาณเสียงแบบสเตอริโอที่ใช้พลังงานต่ำ มีไมโครโฟนสองตัวทั้งสองด้านของบอร์ด และมีสวิตช์สำหรับใช้เป็นปุ่มกดจำนวน 1 ตำแหน่ง และยังมีเอาต์พุต สัญญาณเสียงแบบสเตอริโอขนาด 3.5 mm. หรือ JST 2.0 Speaker Out โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โมดูล ReSpeaker 2-Mics Pi HAT
(ที่มา: <https://www.reichelt.com/de/en/respeaker-2-mic-hat-for-raspberry-pi-rpi-resp-2mic-p248718.html>, 2566)

2.2.9 บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH

บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH ผู้วิจัยขอเรียกว่าบอร์ด Raspberry Pi zero WH เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวที่ใช้ในการสื่อสารหรือเครื่องลูกข่าย Raspberry Pi zero WH ใช้ชิปประมวลผล BCM2835 มีความเร็วในการประมวลผล 1 GHz มีหน่วยความจำ RAM 512 MB และมีการติดตั้งโมดูลสื่อสารไร้สาย Wi-Fi 802.11n ไว้บนบอร์ดด้วย บอร์ด Raspberry Pi zero WH แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH

(ที่มา: <https://www.conrad.com/p/raspberry-pi-zero-wh-raspberry-pi-zero-wh-512-mb-1-x-10-ghz-1667360,2566>)

2.2.10 อุปกรณ์เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300

เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300 ผู้วิจัยขอเรียกว่า D-LINK DWR-M920 ผู้วิจัยประยุกต์ใช้เราเตอร์ D-LINK DWR-M920 ยี่ห้อ D-Link เป็นเราเตอร์ในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ซึ่งรองรับซิมการ์ด 4G LTE และ 3G ความเร็วดาวน์โหลดสูงสุดที่ 150 Mbps (Megabit per second) และความเร็วอัปโหลดสูงสุด 50 Mbps ลูกข่ายสามารถส่งข้อมูลได้สูงสุด 300 Mbps มี 4 พอร์ตแลนสำหรับ 10/100 Ethernet รองรับมาตรฐาน Wireless 802.11 b/g/n, 802.3, 802.3u มีมาตรฐานความปลอดภัย WPA/WPA2 รองรับการเชื่อมต่อผ่าน Wi-Fi พร้อมกันสูงสุด 32 ผู้ใช้งาน อุปกรณ์เราเตอร์ D-LINK DWR-M920 แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เราเตอร์ 4G Router D-LINK (DWR-M920) Wireless N300

2.2.11 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 สามารถรับส่งได้ทั้งโพลาริซตามแนวแกนตั้งและโพลาริซตามแนวแกนอนสายอากาศดังกล่าวมีอัตราขยาย 9 dBi และมีกำลังส่งสูงสุดอยู่ที่ 27 dBm หรือ 500 mW ใช้เทคนิค Time division multiple access (TDMA) ในการจัดการข้อมูล รองรับการเชื่อมต่อโครงข่ายทั้งแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการเชื่อมต่อแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด มีระบบปฏิบัติการที่สามารถปรับตั้งค่าให้ทำงานเป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Access point (AP) หรืออุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบต่างๆ สามารถส่งข้อมูลได้ไกลถึง 5 km ในการใช้งานกลางแจ้ง อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สาย TP-LINK's 2.4 GHz
(ที่มา: <https://www.tp-link.com/th/business-networking/outdoor-radio/cpe210/>, 2566)

2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2010	Sukunya Sauram	Design of node locations for indoor wireless mesh networks	นำเสนอผลกระทบของสิ่งกีดขวางต่อสมรรถนะของโครงข่าย และออกแบบการติดตั้งโหนดที่เหมาะสม
2014	Alok Ranjan and H.B. Sahu	Advancements in communication and safety systems in underground mines: present status and future	นำเสนอคุณสมบัติต่างๆที่พบได้ทั่วไปในเหมืองถ่านหินและโลหะที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสาร
2018	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim and David Wee Gin Lim	Investigation of rough surfaces for propagation modeling in caves	นำเสนอพฤติกรรมของคลื่นวิทยุบนพื้นผิวขรุขระแบบสุ่มโดยใช้เทคนิคการติดตามรังสี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผิวขรุขระมีค่าน้อยกว่าพื้นเรียบอยู่ 6 dB

ตารางที่ 2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อบทความ	รายละเอียดเบื้องต้น
2018	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, David Wee Gin Lim, Kian Meng Yap and Sian Lun Lau	Propagation Measurement of a Natural Cave-Turned-Wine-Cellar	นำเสนอผลการทดสอบสัญญาณของโครงข่ายไร้สายในถ้ำเก็บไวน์ชื่อ Jeff's cellar โดยใช้ 3 คลื่น 2.4 GHz, 5.8 GHz และ 900MHz ผลการทดสอบผู้เขียนแนะนำให้ใช้ความถี่ต่ำ ซึ่งสวนทางกับกระแสนิยมที่จะนำคลื่นมิลลิเมตรเวฟมาใช้
2019	Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, David Wee Gin Lim, Nurhidayah Rusli, Ka Heng Chong, Kian Meng Yap and Sian Lun Lau	Measurement of an Uneven Terrain Model for Potential Applications in Caves	นำเสนอผลการทดสอบสัญญาณความถี่ 2.4 GHz ในพื้นที่แบบจำลองถ้ำ ในเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวางหรือไม่ใช่เส้นแนวสายตา ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จะถูกลดทอน
2019	Tajudeen Olawale Olasupo	Wireless Communication Modeling for the Deployment of Tiny Iot Devices in Rocky and Mountainous Environments	นำเสนอผลการทดสอบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ต่างกัน 3 ชนิด ในสภาพแวดล้อมที่เป็นหินและภูเขา นำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์

จากปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ผู้วิจัยเข้าใจพฤติกรรมของคลื่นย่านความถี่ 2.4 GHz มากขึ้น ได้รู้ถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมของถ้ำที่อาจมีต่อคลื่นย่านความถี่ 2.4 GHz และได้เข้าใจข้อดีและข้อเสียของคลื่นย่านความถี่ 2.4 GHz ผู้วิจัยจะนำความรู้ที่ได้ไปปรับใช้กับงานวิจัยนี้ต่อไป

2.4 สรุป

ทฤษฎีความรู้พื้นฐาน หลักการที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้นำเสนอเนื้อหาในบทที่ 2 เป็นหลักการทฤษฎีความรู้พื้นฐานของอุปกรณ์ที่เรามาใช้ทำงานในระบบสื่อสารด้วยเสียงในถ้ำโดยใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ต่อมาได้นำเสนออุปกรณ์สำคัญที่เกี่ยวข้องและใช้ในระบบสื่อสารด้วยเสียงในถ้ำโดยใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz และท้ายที่สุดใบบทนี้ได้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจะนำความรู้ที่ได้ไปปรับใช้ในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

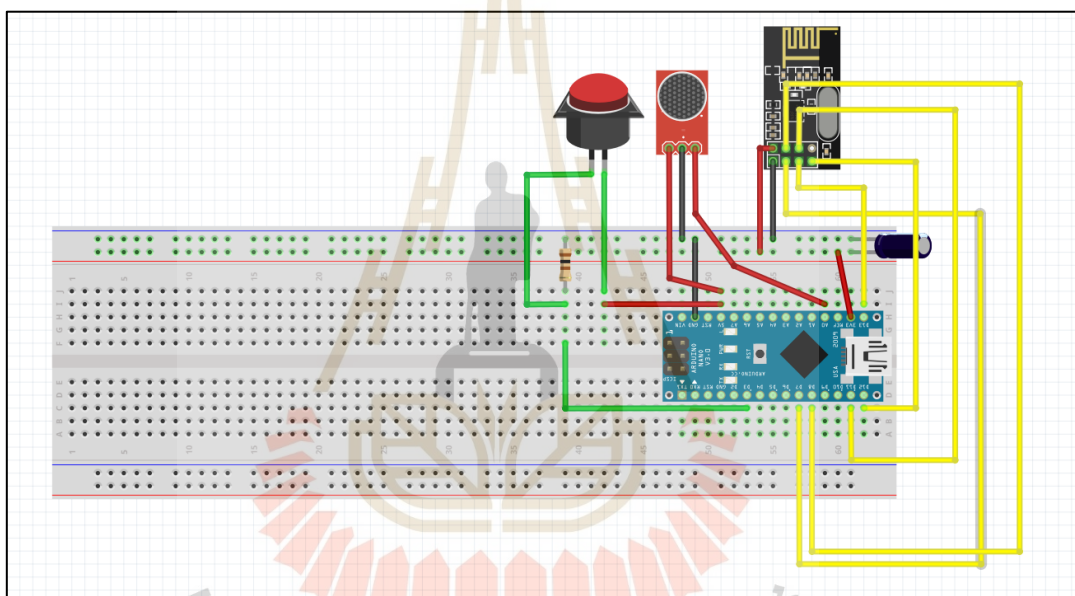
สำหรับการศึกษาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ในบทนี้จะมุ่งเน้นในการนำเสนอรายละเอียดการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มจากการทดสอบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นช่วงแรกของการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz การออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับใช้ในถ้ำ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย เช่น แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย การวางแผนการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับใช้ในถ้ำ วิธีดำเนินการทดสอบความแรงสัญญาณที่เครื่องลูกข่ายและเครื่องแม่ข่ายสามารถรับได้ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความแรงของสัญญาณที่รับได้ในเทอมของพลังงานมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล - มิลลิวัตต์ (Decibel-milliwatts, dBm) การพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณให้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในถ้ำ และในลำดับสุดท้ายเป็นการออกแบบโปรแกรมสำหรับเฝ้าระวัง (Monitoring) ในระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

3.2 การทดสอบอุปกรณ์สื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้โมดูล nRF21L01

ในช่วงแรกของการทดสอบระบบสื่อสารในย่านความถี่ 2.4 GHz ผู้วิจัยเลือกการใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ร่วมกับระบบสมองกลฝังตัว Arduino Nano แนวทางนี้ผู้วิจัยได้ใช้โมดูลสื่อสารสำเร็จรูป nRF24L01 โดยที่โมดูลสื่อสารดังกล่าวได้มาตรฐาน ZigBee/IEEE 802.15.4 ทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการจัดการทรัพยากรของระบบ ก่อนที่ผู้วิจัยจะเปลี่ยนไปใช้บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry pi ในภายหลัง โดยในการทดสอบนี้ เครื่องลูกข่ายในระบบจะต้องมีไมโครโฟนและหูฟัง รวมถึงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC) และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital to Analog Converter, DAC) สำหรับเปลี่ยนสัญญาณเสียงพูดให้สามารถสื่อสารผ่านโครงข่ายสื่อสารไร้สายและรับฟังเสียงสนทนาได้ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ วงจรส่งข้อมูลเสียง วงจรรับข้อมูลเสียง และการทดสอบภายในอาคาร ตามลำดับ

3.2.1 วงจรส่งข้อมูลเสียง

วงจรส่งข้อมูลเสียงประกอบด้วย Arduino nano โมดูลไมโครโฟน และ nRF24L01 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยวงจรนี้จะมีการใช้งานร่วมกับไมโครโฟนจากหูฟัง เพื่อใช้ในการรับสัญญาณเสียงจากผู้ทดสอบเสียง จึงต้องทำการทดสอบไมโครโฟนดังกล่าวก่อนใช้งาน ซึ่งจะนำไมโครโฟนมาเชื่อมต่อกับเครื่องออสซิลโลสโคป เพื่อดูรูปสัญญาณ ความถี่ของเสียงพูด และความถี่ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไมโครโฟนจากหูฟังมาต่อกับ jack breakout 3.5mm แล้วเชื่อมต่อสายนำสัญญาณและสายกราวด์กับโมดูลไมโครโฟน และทำการต่อวงจรส่งข้อมูลเสียงดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 รูปจำลองวงจรส่งข้อมูลเสียง

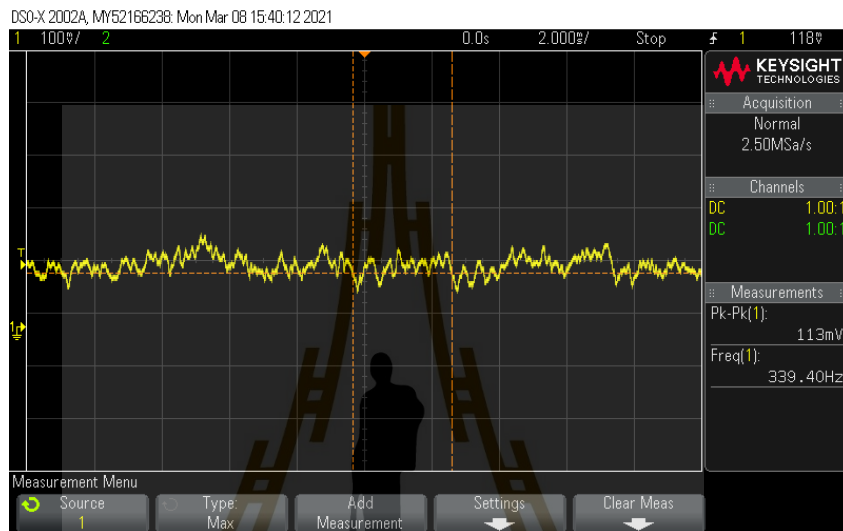
หลักการทำงาน เมื่อกดสวิตช์เพื่อเริ่มการทำงานของวงจรส่งข้อมูลเสียง ไมโครโฟนจากหูฟังจะรับสัญญาณเสียงจากผู้วิจัย จากนั้นโมดูลไมโครโฟนจะทำการปรับปรุงคุณภาพเสียงก่อนที่จะส่งสัญญาณเสียงไปยัง Arduino nano เพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ต่อมาจึงส่งสัญญาณไปที่ nRF24L01 เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สายไปยังวงจรรับข้อมูลเสียง

3.2.2 ผลการทดสอบวงจรส่งข้อมูลเสียง

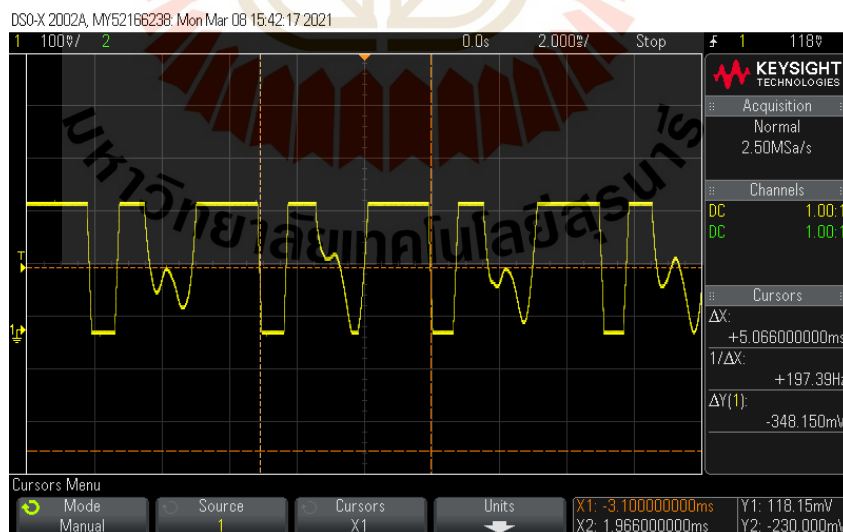
ในวงจรส่งข้อมูลเสียงผู้วิจัยได้นำเครื่องออสซิลโลสโคปมาเชื่อมต่อเข้ากับขาเอาต์พุตของไมโครโฟนเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงพูดต้นฉบับก่อนที่จะส่งสัญญาณข้อมูลเสียงไปยังวงจรรับข้อมูลเสียง ในขั้นตอนแรกผู้วิจัยทำการวัดสัญญาณเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงในขณะที่ยังไม่ได้พูด โดยจะเห็นได้

ว่าไมโครโฟนสามารถรับเสียงจากรอบข้างได้พอสมควร จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในขั้นตอนต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการพูดแล้วดูรูปสัญญาณจากเครื่องออสซิลโลสโคป จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณเสียงที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณต่อเนื่องและในหนึ่งลูกคลื่นมีความถี่ 197.39 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.3



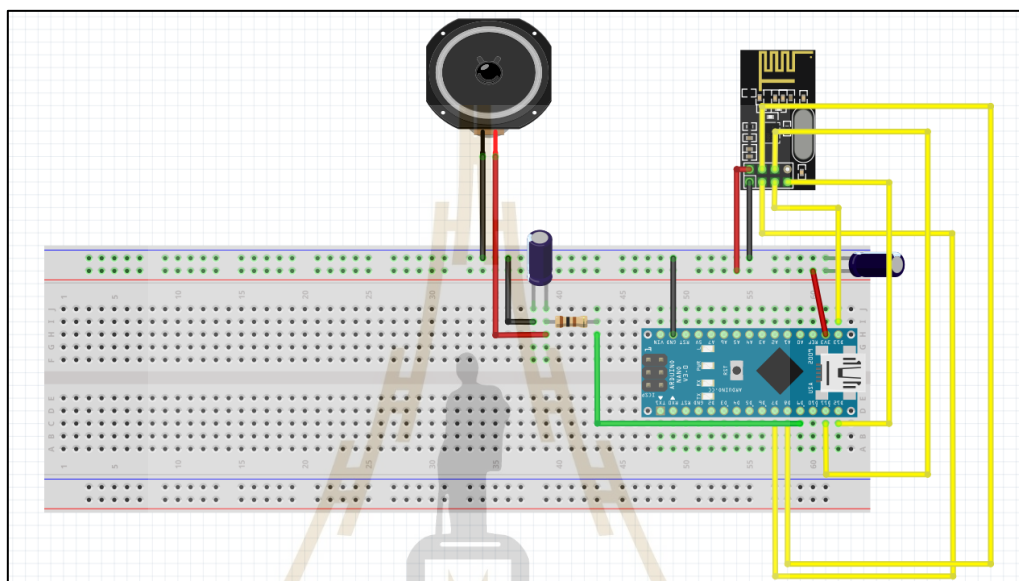
รูปที่ 3.2 รูปสัญญาณเสียงในขณะที่ยังไม่พูด



รูปที่ 3.3 รูปสัญญาณขณะพูด

3.2.3 วงจรรับข้อมูลเสียง

วงจรรับข้อมูลเสียงประกอบด้วย Arduino nano ลำโพง และ nRF24L01 ซึ่งผู้วิจัยได้ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) โดยใช้ตัวเก็บประจุ 0.1 μ F และตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ซึ่งจะกรองความถี่จาก Arduino nano ก่อนที่ข้อมูลจะส่งออกที่ลำโพงเพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยได้กำหนดความถี่ตัดผ่านไว้ที่ประมาณ 1500 Hz ซึ่งจะต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.4



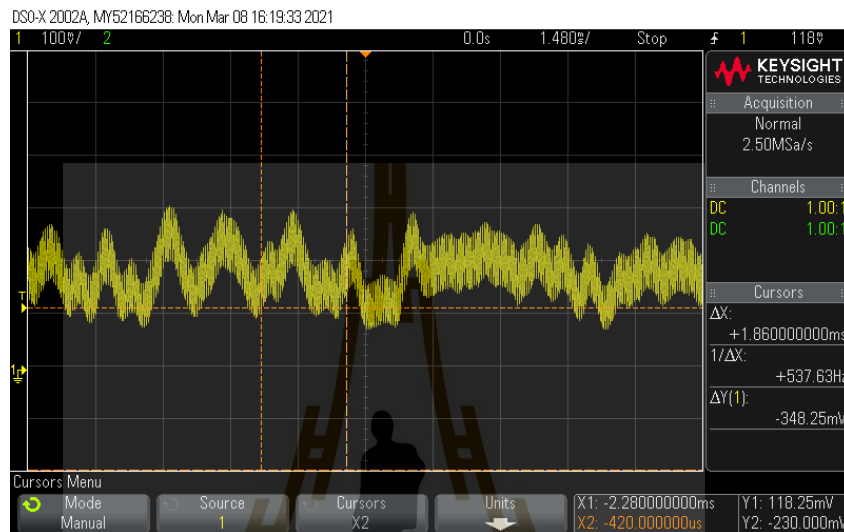
รูปที่ 3.4 รูปจำลองวงจรรับข้อมูลเสียง

หลักการทำงาน วงจรรับข้อมูลเสียงถูกเขียนโปรแกรมให้รอรับข้อมูลจากวงจรส่งข้อมูลเสียงตลอดเวลา เมื่อวงจรรับข้อมูลเสียงได้รับข้อมูลเสียงผ่านโมดูล nrf24l01 แล้ว Arduino nano จะทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกผ่านพอร์ต PWM (Pulse Width Modulation) สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จะถูกกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งออกที่ลำโพง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

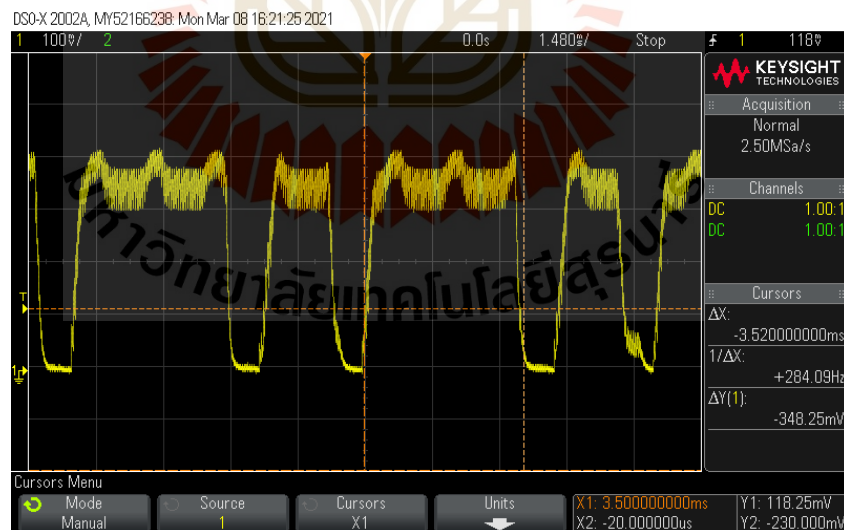
3.2.4 ผลการทดสอบวงจรรับข้อมูลเสียง

ในการรับข้อมูลเสียง ผู้วิจัยได้นำลำโพงออกวงจร จากนั้นนำเครื่องออสซิลโลสโคปไปเชื่อมต่อกับวงจรรับข้อมูลเสียงที่ตำแหน่งสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเพื่อทำการวัดค่าสัญญาณเสียงเอาต์พุตที่ได้รับมาจากวงจรส่งข้อมูลเสียง โดยจะเห็นได้ว่าลักษณะสัญญาณเสียงที่รับได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ แต่มีลักษณะของเส้นกราฟที่ใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของพอร์ต PWM ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการพูด

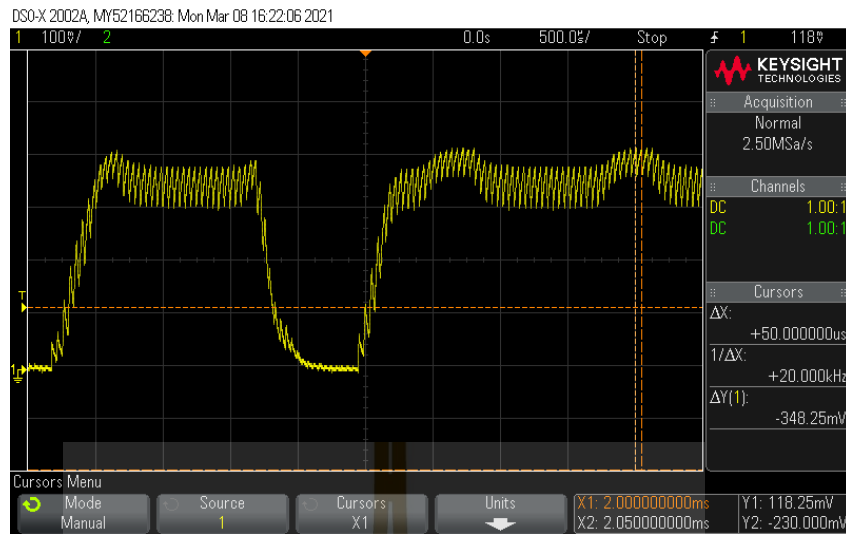
แล้วดูรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียงมีลักษณะแตกต่างจากรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นรูปสัญญาณต้นฉบับ แต่มีความถี่ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการขยายรูปสัญญาณ จะเห็นได้ว่ามีความถี่สูงอยู่บนสัญญาณเสียง ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากพอร์ต PWM ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 รูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียงในขณะที่ยังไม่พูด



รูปที่ 3.6 รูปสัญญาณเสียงที่รับได้ขณะพูด



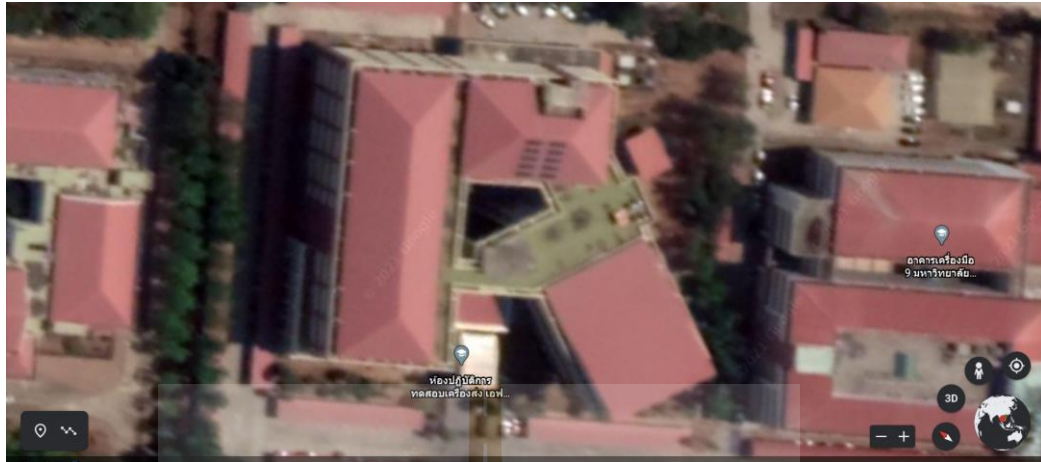
รูปที่ 3.7 รูปการขยายขนาดรูปสัญญาณเสียงที่รับได้จากวงจรส่งข้อมูลเสียง

3.2.5 การทดสอบการได้ยินเสียงของวงจรสื่อสารภายในอาคาร

ผู้วิจัยทำการวัดทดสอบข้อมูลเสียงภายในอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีแผนผังอาคารดังแสดงในรูปที่ 3.8 และด้านบนของอาคารดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยนำวงจรส่งข้อมูลเสียงไปวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นส่งสัญญาณเสียงผ่านไมโครโฟนของวงจรส่งข้อมูลเสียง แล้ววัดระดับเสียงที่สามารถได้ยินจากวงจรรับข้อมูลเสียง หลังจากนั้นบันทึกผลของระดับการได้ยินเสียง



รูปที่ 3.8 รูปแผนผังภายใน F11 ชั้นที่ 3



รูปที่ 3.9 รูปจากมุมมองด้านบนของอาคาร F11

3.2.6 ผลการทดสอบการได้ยินเสียงของวงจรสื่อสารภายในอาคาร

ในการทดสอบสัญญาณ ผู้วิจัยได้มีการกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) ไว้ที่ 2.4 kHz และกำหนดอัตราการส่งข้อมูล (Bit rate) ไว้ที่ 1 Mbps เพื่อคุณภาพของเสียงที่ดี รวมถึงการกำหนดระดับการได้ยินเสียงเป็นสีและตัวเลขดังตารางที่ 3.1 โดยในการวัดระดับการได้ยินเสียงภายในอาคาร ผู้วิจัยได้ทำการเดินวัดสัญญาณตามระยะทางของ 4 เส้นทาง โดยจะหยุดฟังเสียงทุก ๆ 5 เมตร ซึ่งมีระดับการได้ยินเสียงดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.5

ตารางที่ 3.1 กำหนดระดับการได้ยินเสียง

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

ตารางที่ 3.2 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 3.10 วัดระยะทางเส้นทางที่1

ตารางที่ 3.3 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 2

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



รูปที่ 3.11 วัดระยะทางเส้นทางที่ 2

ตารางที่ 3.4 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 3

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



รูปที่ 3.12 วัดระยะทางเส้นทางที่ 3

ตารางที่ 3.5 ระดับการได้ยินเสียงตามเส้นทางที่ 4

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



รูปที่ 3.13 วัดระยะทางเส้นทางที่ 4

เมื่อนำผลการทดสอบการวัดระดับการได้ยินเสียงทั้ง 4 เส้นทางมาประกอบกัน จะเห็นว่าเสียงจะเริ่มขาดหายเมื่อระยะทางประมาณ 40 เมตรในเส้นทางที่ตรงและยาวที่สุดคือเส้นทางที่ 1 แต่ก็ยังสามารถได้ยินอยู่บ้างที่ระยะทางประมาณ 80 เมตร และเสียงจะขาดหายเมื่อเดินไปที่มุมตึกที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่บังอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระดับการได้ยินเสียงในเส้นทางทั้งหมด

3.2.7 สรุปผลการทดสอบวงจรสื่อสาร

จากการสังเกตรูปสัญญาณเสียงของโมดูลไมโครโฟนที่ได้จากเครื่องมือนัด ออสซิลโลสโคป oscilloscope พบว่า รูปสัญญาณเสียงไม่มีสัญญาณรบกวนจากวงจรเลย แต่เมื่อโมดูลไมโครโฟนสามารถรับเสียงรอบข้างได้ดี จึงทำให้สัญญาณเสียงเหล่านั้นเป็นสัญญาณรบกวนได้ และเมื่อทำการส่งข้อมูลเสียงจากวงจรส่งข้อมูลเสียงไปยังวงจรรับข้อมูลเสียงจะพบว่า เส้นของสัญญาณมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการทำ PWM ของบอร์ด Arduino Nano สัญญาณเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นทำให้เสียงที่ได้ยินมีสัญญาณรบกวนตลอดเวลาแต่ยังสามารถได้ยินเสียงพูดได้อยู่ และเมื่อทำการวัดระดับการได้ยินตามเส้นทางต่าง ๆ พบว่าระยะทางที่ได้ยินเสียงพูดชัดเจนจะไม่เกิน 40 เมตร ส่วนระยะที่เกิน 40 เมตร ก็ยังสามารถได้ยินเสียงพูดได้ แต่เสียงพูดจะขาดเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ในทางที่เป็นเส้นตรงและไม่ใช่เส้นทางที่เป็นทางโค้งหรือมีวัตถุที่ขนาดใหญ่มาบังเส้นทางการสื่อสาร ถ้าเป็นเส้นทางที่เป็นทางโค้งหรือมีวัตถุขนาดใหญ่มาบังจะทำให้เสียงที่ได้ยินจากเครื่องรับข้อมูลเสียงมีลักษณะขาดหายเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ จนไม่สามารถได้ยินเสียงเลย นั้นแสดงว่าคลื่นความถี่ในย่านความถี่ 2.4 GHz

ไม่สามารถเลี้ยวเบนได้มากนัก เพราะเป็นความถี่ที่สูงและความยาวคลื่นเพียงแค่ 0.125 เมตร จึงทำให้คลื่นไปได้ไม่ไกลมาก

จากการทดสอบใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ร่วมกับระบบสมองกลฝังตัว Arduino Nano พบว่าการใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ดังกล่าว สามารถทำการสื่อสารระหว่าง โหนดหลักกับโหนดย่อยในโครงข่ายเช่นเซอร์ไร้สายที่เป็นแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ได้และมีคุณภาพของ สัญญาณเสียงที่ชัดเจนยอมรับได้ และในการวิจัยขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยพบว่า การใช้โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 ในแนวทางดังกล่าวยังไม่สามารถสร้างโครงข่ายไร้สายที่เป็นแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ได้ และไม่สามารถพัฒนาเป็นการสื่อสารเป็นกลุ่มย่อยได้ เนื่องจากมีปัญหาในด้านขนาดของช่องสัญญาณ และการเชื่อมโยงข้อมูลในโครงข่ายที่ไม่เสถียรที่เกิดจากโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของโมดูลสื่อสาร ดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้พัฒนาต่อในระบบเครื่องรับ-ส่งวิทยุย่านความถี่สูงระบบดิจิทัลให้มีความสามารถตรงตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ ผู้วิจัยจึงไม่ใช้แนวทางนี้ในการพัฒนาระบบต่อไป

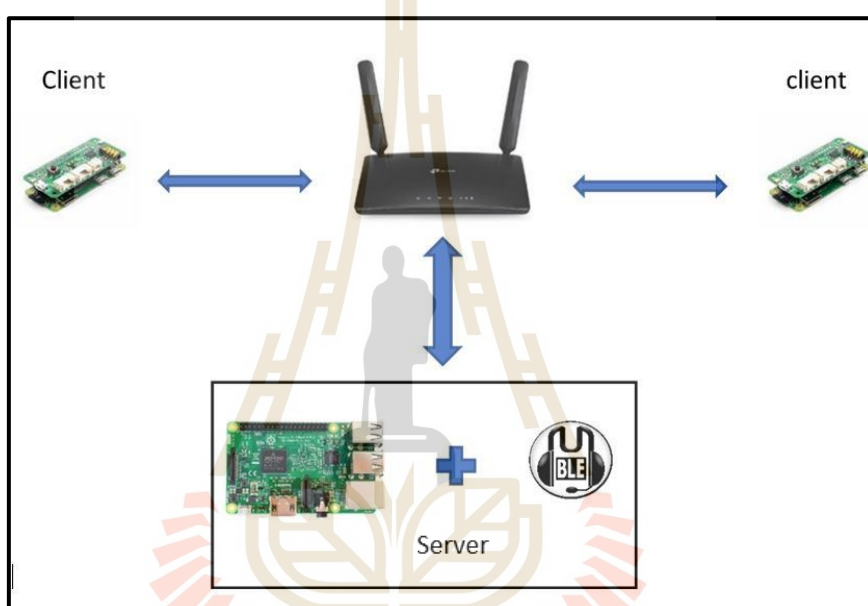
ในส่วนของการพัฒนาต่อไป ผู้วิจัยจะนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) มาใช้ ตามมาตรฐาน IEEE 802.11g, 802.11n, 802.11 ac โดยใช้อุปกรณ์โครงข่าย Wi-Fi ที่ได้มาตรฐาน ดังกล่าวในการสร้างโครงข่ายสื่อสารไร้สายดังกล่าว เครื่องลูกข่าย (Client) จะถูกทำการบริหารจัดการผ่านเครื่องแม่ข่าย (Server) สามารถเพิ่มจำนวนลูกข่ายสื่อสารด้วยเสียงได้สูงสุดถึง 100 ลูก ข่าย และสามารถบริหารจัดการระบบสื่อได้สะดวกและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

3.3 การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นการทดสอบภายในอาคาร โดยใช้บอร์ด Raspberry pi 3 model B เป็นอุปกรณ์สื่อสารหลัก ในการดำเนินการทดสอบนั้น อันดับแรกดำเนินการออกแบบและสร้างการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้บอร์ด Raspberry Pi 3 model B เป็นเซิร์ฟเวอร์ทำงานร่วมกับเราเตอร์ D-Link DWR-920 และใช้บอร์ด Raspberry Pi zero WH เป็นอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาจำนวน 2 เครื่อง จากนั้นทำการทดสอบวัดระยะทางสูงสุดที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ระหว่างบอร์ด Raspberry Pi zero WH โดยมีเราเตอร์เป็นอุปกรณ์กระจายสัญญาณ สุดท้ายทำการทดสอบระดับการได้ยินเสียงและวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ โดยการทดสอบทั้งหมดนั้นจะใช้สภาพแวดล้อมจำลองของการเป็นแนวสายตา (Line of sight, LOS) และไม่เป็นแนวสายตา (Non Line of Sight, NLOS) ซึ่งทดสอบภายในอาคารบริเวณ ชั้น 3 อาคารอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.1 การออกแบบและการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร

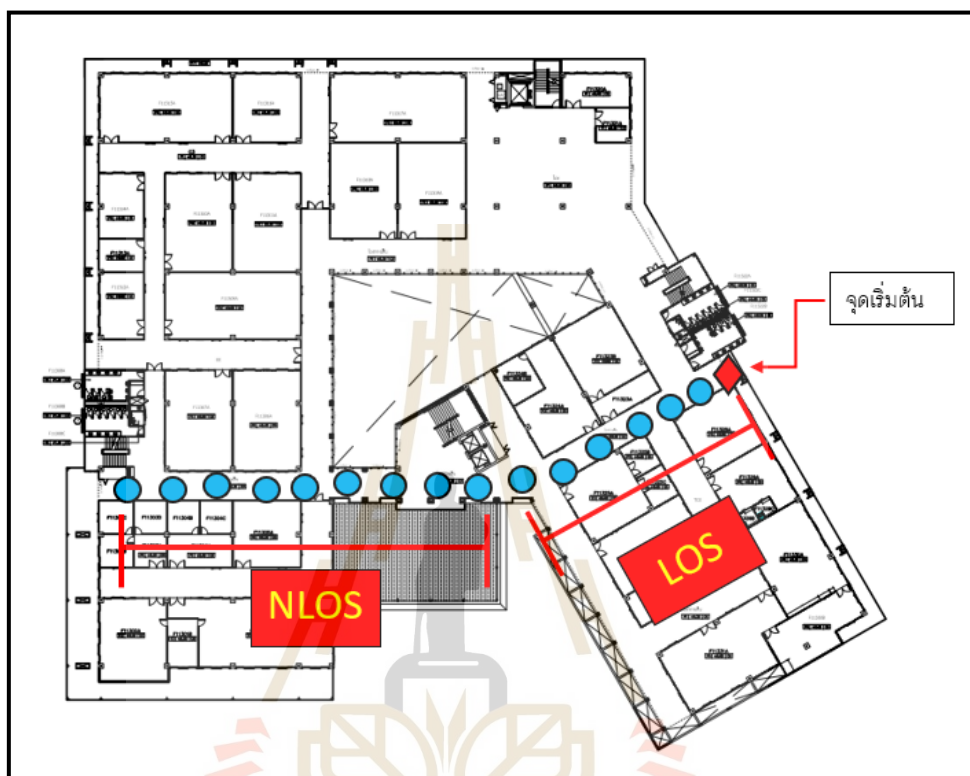
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบ การสร้างอุปกรณ์ การติดตั้งและการทดสอบอุปกรณ์และตามด้วยการออกแบบการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร ผู้วิจัยจะนำเสนอในส่วนของ การออกแบบ วิธีการสร้างการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร



รูปที่ 3.15 ระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร

จากรูปที่ 3.15 เป็นการแสดงแผนภาพและอุปกรณ์ของการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร โดยอุปกรณ์สื่อสารด้วยเสียงประกอบไปด้วย Raspberry Pi zero WH ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz และทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล ซึ่งจะรับข้อมูลเสียงและส่งข้อมูลเสียงจาก ReSpeaker 2-Mics Pi HAT ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูป มีไฟ LED ที่สามารถบอกสถานะได้ มี jack 3.5 mm เพื่อส่งข้อมูลเสียงออกลำโพง มีไมโครโฟนแบบ I2S ซึ่งเป็นไมโครโฟนแบบดิจิทัลอยู่ที่ 2 ฝั่งของบอร์ด โดยจะต่อเข้ากับ 40 pin GPIO header ของ Raspberry Pi zero WH เมื่อ Raspberry Pi zero WH รับข้อมูลเสียงจาก ReSpeaker 2-Mics Pi HAT จากนั้น Raspberry Pi zero WH จะประมวลผลข้อมูลเป็นสัญญาณเป็นดิจิทัลแล้วส่งข้อมูลไปยัง Raspberry Pi 3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์ โดยผ่านเราเตอร์ D-Link DWR-921 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารกลาง เมื่อ Raspberry Pi 3 model B รับข้อมูลมาแล้ว

จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลต่อไปยัง Raspberry Pi zero WH อีกตัว Raspberry Pi zero WH จะทำการประมวลผลสัญญาณ แล้วส่งข้อมูลเสียงออกที่พอร์ต jack 3.5mm ของ ReSpeaker 2-Mics Pi HAT



รูปที่ 3.16 เส้นทางทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ

3.3.2 การทดสอบวัดค่าความแรงของสัญญาณภาครับ

ในหัวข้อนี้นำเสนอการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ ของสายอากาศภายในและสายอากาศภายนอกของบอร์ด Raspberry Pi zero HW เพื่อหาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้ ในการทดสอบ เริ่มแรกผู้วิจัยจะทำการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณภาครับของสายอากาศภายในโดยนำบอร์ด Raspberry Pi zero WH จำนวน 1 เครื่องทำหน้าที่เป็นเราเตอร์ เพื่อกระจายสัญญาณในย่านความถี่ 2.4 GHz จากนั้นจะนำบอร์ด Raspberry Pi zero WH ที่ทำหน้าที่เป็นเราเตอร์ไปวางไว้ที่จุดเริ่มต้น (จุดสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และนำบอร์ด Raspberry Pi zero WH อีกเครื่องที่ทำการลงโปรแกรม Wavemon แล้ว ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์วัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ จากนั้นนำชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นแล้วหยุดวัดสัญญาณทุก ๆ 5 เมตร โดยใช้โปรแกรม Wavemon วัดความแรงของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณจนกว่าจะครบทุกเส้นทางหรือจนกว่าสัญญาณ

จะขาดการเชื่อมต่อ หลังจากทดสอบสายอากาศภายในเสร็จสิ้น ผู้วิจัยจะนำสายอากาศภายนอก (External Antenna) มาเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด Raspberry Pi zero WH ทั้ง 2 ตัว โดยที่สายอากาศภายนอกผู้วิจัยจะใช้ Wireless-N USB Adapter จากนั้นนำบอร์ด Raspberry Pi zero WH ที่มีโปรแกรม Wavemon ไปวางไว้ที่จุดสีแดงดั้งเดิม จากนั้นนำชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณเคลื่อนที่ออกห่างทำการหยุดวัดสัญญาณทุก ๆ 5 เมตร ทำการวัดสัญญาณจนกว่าจะครบทุกเส้นทางหรือจนกว่าสัญญาณจะขาดการเชื่อมต่อ โดยเส้นทางในการทดสอบจะตามจุดสีฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.16 สุดท้ายนำค่าความแรงของสัญญาณภาครับที่วัดได้ทั้ง 2 กรณีมาวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับงานวิจัยนี้

```

lqInterface
xwlan0 (IEEE 802.11), phy 0, reg: n/a, SSID: Rss
tqLevels
xlink quality: 100% (70/70)
x
x
x
xsignal level: -34 dBm (0.40 uW)
x
x
tqStatistics
xRX: 8,144 (752.14 KiB)
xTX: 176,065 (22.13 MiB), failed: 44
tqInfo
xmode: Managed, connected to: C2:37:2F:1A:23:1C, time: 17:16m, inactive: 0.0s
xfreq: 2412 MHz, channel: 1 (width: 20 MHz)
xrx rate: 1.0 Mbit/s, tx rate: 72.2 Mbit/s
xstation flags: WME, preamble: short, slot: short
xpower mgt: on, tx-power: 31 dBm (1258.93 mW)
xretry: short limit 7, rts/cts: off, frag: off
tqNetwork
xwlan0 (UP RUNNING BROADCAST MULTICAST)
xmac: B8:27:EB:EC:8B:8F, qlen: 1000
xip: 192.168.43.208/24
mq

```

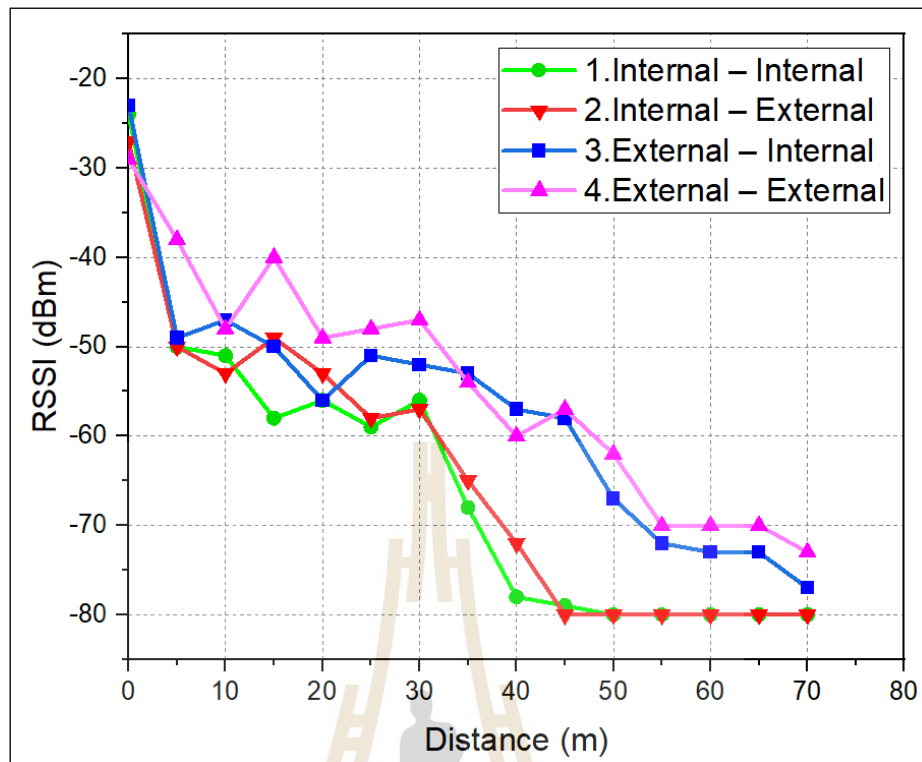
รูปที่ 3.17 โปรแกรม Wavemon

3.3.3 ผลการทดสอบวัดค่าความแรงของสัญญาณภาครับ

ในหัวข้อนี้แสดงผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ โดยใช้โปรแกรม Wavemon เป็นการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณภาครับเพื่อเลือกใช้สายอากาศ ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบวัดค่าความแรงของสัญญาณภาครับ ในการทดลองทั้ง 4 แบบคือ Internal – Internal, Internal – External, External – Internal และ External – External โดยผู้วิจัยเลือกสถานที่ทำการทดลองภายในอาคารบริเวณชั้น 3 อาคารอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมถ้าที่มีทั้งเส้นแนวสายตาและไม่เป็นเส้นแนวสายตา

ตารางที่ 3.6 ตารางเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณภาครับระหว่าง Internal Antenna
กับ External Antenna สำหรับบอร์ด Raspberry Pi zero WH

ระยะทาง (เมตร)	Internal – Internal (dBm)	Internal – External (dBm)	External – Internal (dBm)	External – External (dBm)
0	-24	-27	-23	-29
5	-50	-50	-49	-38
10	-51	-53	-47	-48
15	-58	-49	-50	-40
20	-56	-53	-56	-49
25	-59	-58	-51	-48
30	-56	-57	-52	-47
35	-68	-65	-53	-54
40	-78	-72	-57	-60
45	-79	-80	-58	-57
50	-80	-80	-67	-62
55	-80	-80	-72	-70
60	-80	-80	-73	-70
65	-80	-80	-73	-70
70	-80	-80	-77	-73



รูปที่ 3.18 ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ

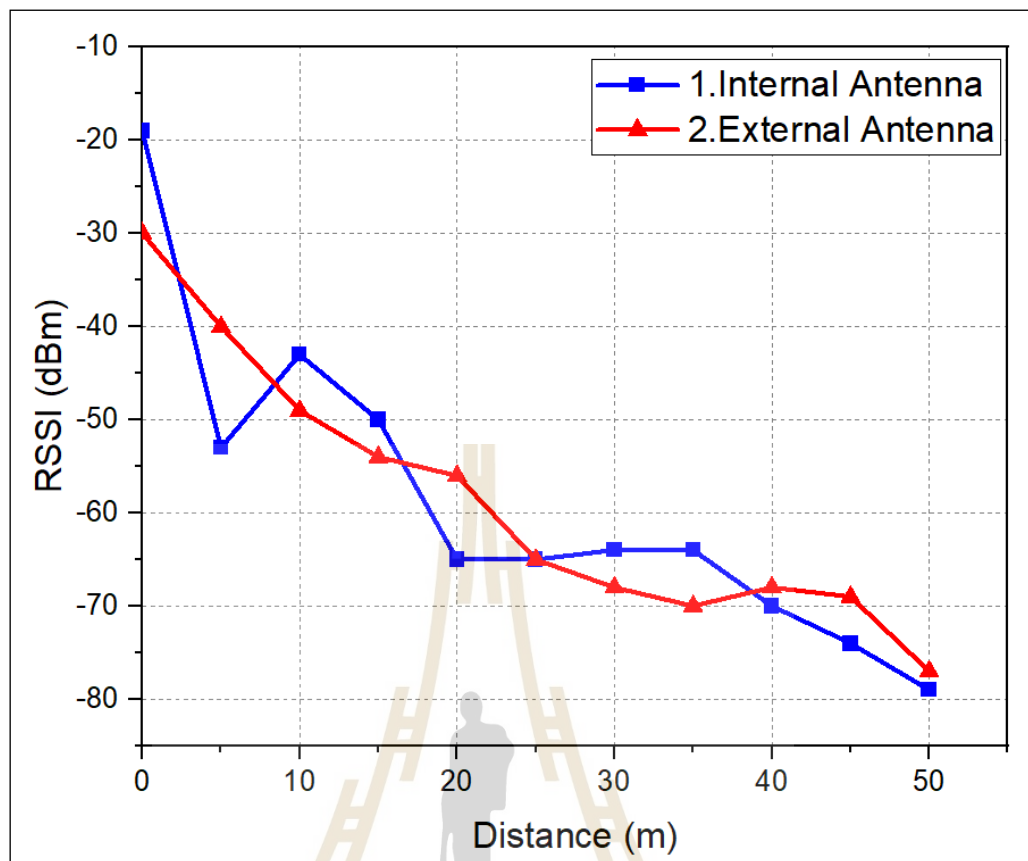
ผลการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และตารางที่ 3.6 พบว่าสายอากาศภายนอกสามารถรับและส่งสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศภายในของบอร์ด Raspberry Pi zero HW ในช่วงที่เป็นเส้นแนวสายตาหรือระยะทางประมาณ 30 เมตรจากเราเตอร์ จะเห็นได้ว่าการทดลองทั้ง 4 แบบมีความแตกต่างกันไม่มาก แต่จะเห็นได้ว่าการทดลองแบบ External - External จะมีค่าความแรงของสัญญาณภาครับมากกว่าทั้ง 3 การทดลอง และเมื่อพิจารณาเส้นทางที่ไม่เป็นเส้นแนวสายตา หรือช่วงระยะทางมากกว่า 30 เมตรจะพบว่า การส่งที่ใช้สายอากาศภายในจะเริ่มมีการขาดการเชื่อมต่อหรือมีค่าความแรงของสัญญาณภาครับน้อยกว่า -70 dBm ในขณะที่อุปกรณ์ที่ส่งด้วยสายอากาศภายนอกมีค่าความแรงของสัญญาณภาครับมากกว่า -70 dBm การส่งด้วยสายอากาศภายนอกในระยะทาง 45 เมตร ดีกว่าสายอากาศภายใน 22 dBm หรือคิดเป็น 27.8 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับสายอากาศภายใน สายอากาศภายนอกยังสามารถส่งได้ไกลกว่าสายอากาศภายในประมาณ 25 เมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สายอากาศภายนอกในการทดลองต่อไป

ผลการทดสอบค่าความแรงของสัญญาณภาครับของสายอากาศภาครับโดยใช้สายอากาศภายในและสายอากาศภายนอกจะแสดงในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.19 โดยมีเราเตอร์เป็นตัวกระจายสัญญาณ พบว่าค่าความแรงของสัญญาณภาครับของสายอากาศทั้งสองมีค่าที่ไม่ต่างกัน

มาก ไม่ว่าจะเป็นที่ทางที่เป็นเส้นแนวสายตาและไม่เป็นเส้นแนวสายตา เพราะค่าความแรงของสัญญาณภาครับที่รับได้จากเราเตอร์ สายอากาศภาครับจึงไม่ค่อยมีผลกับระยะทางในการสื่อสาร แต่ระยะทางในการสื่อสารจะขึ้นกับสายอากาศภาคส่งมากกว่าสายอากาศภาครับ

ตารางที่ 3.7 ค่าความแรงของสัญญาณภาครับ ของบอร์ด Raspberry Pi Zero W เมื่อรับข้อมูลจากเราเตอร์

ระยะทาง (เมตร)	Internal Antenna (dBm)	External Antenna (dBm)
0	-19	-30
5	-53	-40
10	-43	-49
15	-50	-54
20	-65	-56
25	-65	-65
30	-64	-68
35	-64	-70
40	-70	-68
45	-74	-69
50	-79	-77



รูปที่ 3.19 ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับจากเราเตอร์

3.3.4 การทดสอบระยะทางที่ไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ภายในอาคาร

ในหัวข้อนี้นำเสนอการทดสอบวัดระยะที่ไกลที่สุดที่ยังสามารถติดต่อสื่อสารได้ภายในอาคาร โดยผู้วิจัยจะนำอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาจำนวน 2 เครื่อง ไปทดสอบโดยมีเราเตอร์ D-Link DWR-920 เป็นตัวกระจายสัญญาณ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบด้วยการเช็คสัญญาณ ping (Ping) โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบคือ การทดสอบระยะไกลสุดที่จะส่งข้อมูลได้ และการทดสอบระยะไกลสุดที่จะสามารถรับข้อมูลได้

การทดสอบระยะไกลสุดที่จะสามารถส่งข้อมูลได้

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยจะนำเราเตอร์ D-Link DWR-920 และอุปกรณ์สื่อสารที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่งไว้ด้วยกัน โดยวางไว้ที่จุดเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 3.16 จากนั้นนำอุปกรณ์สื่อสารอีกเครื่องทำหน้าที่เป็นภาครับข้อมูลไว้กับผู้วิจัย แล้วเดินออกห่างเราเตอร์ โดยทำการเช็คสัญญาณ ping ทุก ๆ 5 เมตร

การทดสอบระยะไกลสุดที่จะสามารถรับข้อมูลได้

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยจะนำเราเตอร์ D-Link DWR-920 และอุปกรณ์สื่อสารที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่งไว้ด้วยกัน โดยวางไว้ที่จุดเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 3.16 จากนั้นนำอุปกรณ์สื่อสารอีกเครื่องทำหน้าที่เป็นภาครับไว้กับผู้วิจัย แล้วเดินออกห่างเราเตอร์ โดยทำการเช็คสัญญาณ ping ทุก ๆ 5 เมตร

การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงในถ้ำโดยใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz เป็นการทดสอบโดยใช้สิ่ง ping ในการตรวจสอบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์สื่อสาร การใช้คำสั่ง ping เป็นการทดสอบค่าเวลาแฝง (Latency) เป็นค่าเวลาในการตอบกลับจากเครื่องต้นทางไปยังเครื่องปลายทาง มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที (Millisecond, ms) ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบค่าเวลาแฝงของอุปกรณ์สื่อสารภาคส่ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.8

จากผลการทดสอบพบว่าอุปกรณ์สื่อสารภาคส่งสามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ภาครับโดยผ่านเราเตอร์ D-Link DWR-920 ได้ระยะทางถึง 80 เมตร และมีค่าเวลาแฝงที่น้อย ตลอดระยะทางมีค่าเวลาแฝงที่ไม่เกิน 1000 ms

ต่อมาทำการทดสอบค่าสัญญาณ ping ของอุปกรณ์ภาครับโดยอุปกรณ์ภาคส่งอยู่ที่เราเตอร์ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าในระยะทางที่ 75 เมตร มีค่าสัญญาณ ping 1498 ms ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แต่ที่ระยะทาง 80 เมตร มีค่าสัญญาณ ping เพียงแค่ 5.67 ms จากการทดสอบค่าสัญญาณ ping ทั้งสองกรณีอุปกรณ์สื่อสารภาคส่งมีแนวโน้มระยะทางการสื่อสารได้ไกลกว่าอุปกรณ์สื่อสารภาครับที่รับข้อมูลจากเราเตอร์ D-Link DWR-920

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบวัดค่าสัญญาณ ping ของอุปกรณ์สื่อสารในระยะทางต่างกัน

ระยะทาง (เมตร)	ภาครับ (ms)	ภาคส่ง (ms)
0	4.70	3.51
5	13.30	2.93
10	4.65	3.33
15	3.43	3.21
20	10.60	2.10
25	2.25	3.48
30	4.28	3.17
35	4.27	5.78
40	3.11	2.14
45	2.55	2.89

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบวัดค่าสัญญาณปิงของอุปกรณ์สื่อสารในระยะทางต่างกัน (ต่อ)

ระยะทาง (เมตร)	ภาครับ (ms)	ภาคส่ง (ms)
50	3.51	4.84
55	9.07	14.80
60	768.00	4.06
65	6.02	2.86
70	10.62	4.81
75	1498.00	10.80
80	5.67	6.53

จากผลการออกแบบและการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ ของบอร์ด Raspberry Pi zero WH ในการทดสอบจะเป็นการวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ ของสายอากาศภายในและสายอากาศภายนอกเพื่อที่จะเลือกใช้สายอากาศที่ดีที่สุด สายอากาศภายนอกผู้วิจัยเลือกใช้ Wireless-N USB Adapter โดยทำการทดสอบที่ละสายอากาศ โดยเริ่มทดสอบกับสายอากาศภายในเป็นอันดับแรก และตามด้วยการทดสอบสายอากาศภายนอก ซึ่งทำการทดลองที่บริเวณชั้น 3 อาคาร อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ F11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในผลการทดสอบนั้นสายอากาศภายนอกสามารถให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับ ที่มากกว่าสายอากาศภายในในระยะทางที่เท่ากัน และยังมี ความสามารถเลี้ยวเบนได้มากกว่าสายอากาศภายใน ที่ระยะ 60 เมตร และ 75 เมตร จะสังเกตได้ว่า ค่าสัญญาณปิงของสายอากาศภายในมีค่าที่สูงกว่าปกติ เพราะว่าสายอากาศภายในมีความสามารถรับสัญญาณได้น้อยเมื่อมีระยะทางที่มากกว่า 50 เมตร ทำให้ความสามารถในการรับข้อมูลมีความไม่คงที่ได้ ถ้าคิดแค่เส้นทางที่มีความตรงมากที่สุดและมีความยาวมากที่สุด สายอากาศภายนอกสามารถทำได้ดีกว่าสายอากาศภายในอยู่ 27.8 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยจึงควรเลือกที่จะนำสายอากาศภายนอก Wireless-N USB Adapter มาใช้ในงานวิจัยนี้ แต่เนื่องจากการนำไปใช้งานในถ้าจริง การใช้งานสายอากาศภายนอก Wireless-N USB Adapter มักพบปัญหาบ่อย เช่น บอร์ดประมวลผลของสายอากาศภายนอกไม่ทำงาน หรือบอร์ดประมวลผลของสายอากาศภายนอกทำงานช้าจนทำให้อุปกรณ์ที่ใช้งานสายอากาศภายนอกทำงานช้าไปด้วย เป็นต้น ผู้วิจัยจึงตัดสินใจใช้สายอากาศภายในของบอร์ด Raspberry Pi zero WH ต่อไปสำหรับการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ในหัวข้อต่อจากนี้ไป

ผลการทดสอบระยะทาง ในการทดลองจะแบ่งการทดลองเป็นสองกรณีคือ 1.การทดสอบวัดค่าสัญญาณปิง เมื่อภาคส่งออกห่างจากเราเตอร์และ 2.การทดสอบวัดค่าสัญญาณปิง เมื่อ

ภาครับออกห่างจากเราเตอร์ โดยทดสอบที่บริเวณชั้น 3 อาคารอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ F11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมของถ้ำที่ไม่เป็นเส้นแนวสายตาและมีความซับซ้อนของเส้นทาง จากการทดสอบวัดค่าสัญญาณ ping เมื่อภาคส่งออกจากเราเตอร์พบว่า สามารถส่งข้อมูลได้ถึงระยะ 80 เมตร จากนั้นทำการทดสอบวัดค่าสัญญาณ ping เมื่อภาครับออกห่างจากเราเตอร์พบว่าสามารถรับข้อมูลวัดค่าสัญญาณ ping ได้ถึง 80 เมตร เมื่อรับข้อมูลวัดค่าสัญญาณ ping จากอุปกรณ์สื่อสารภาคส่งโดยผ่านเราเตอร์ D-Link DWR-920

3.4 การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในถ้ำจริง

โดยในการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz จะเป็นการทดสอบภายในถ้ำจริงสองแห่ง ได้แก่ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และ ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

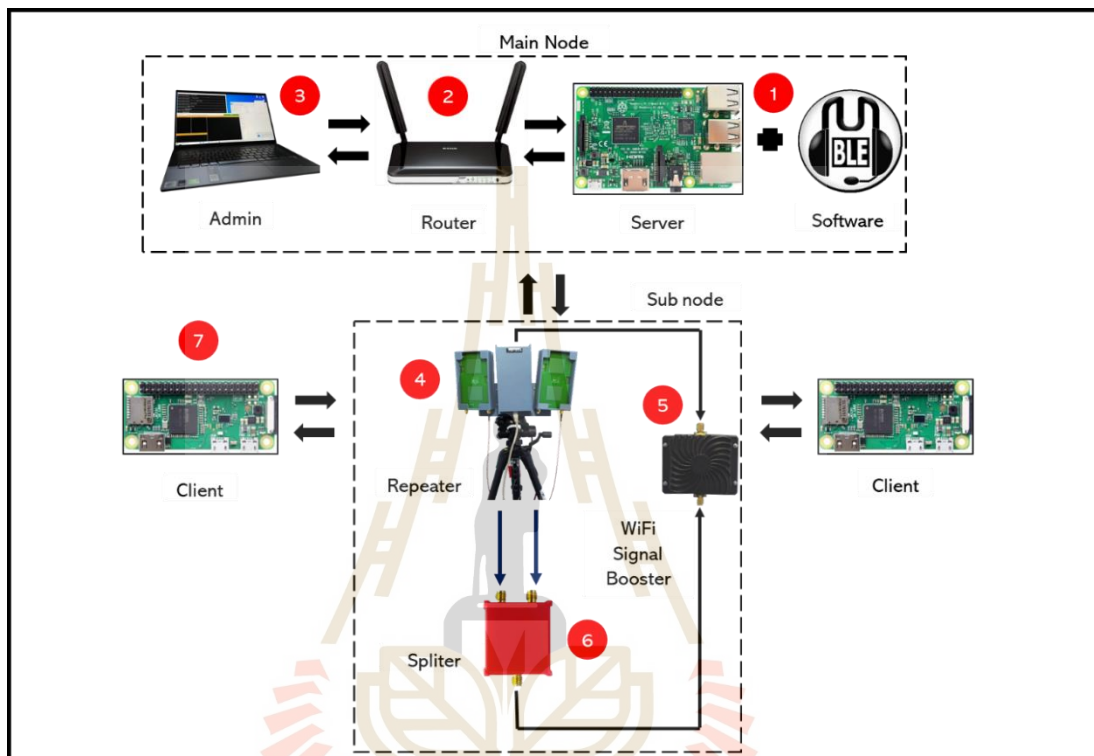
3.4.1 การออกแบบและสร้างระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz

ในหัวข้อนี้ นำเสนอการออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 3.20 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ โหนดหลัก (Main node) โหนดย่อย (Sub node) และลูกข่าย โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz มีดังนี้

หมายเลข (1) เครื่องแม่ข่าย ทำหน้าที่จากการและดูแลควบคุมลูกข่ายทั้งหมดที่ทำการเชื่อมกับเครื่องแม่ข่าย โดยเครื่องแม่ข่ายที่ผู้วิจัยนำมาพัฒนาคือ Raspberry Pi 3 Model B ได้ทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ (Software) หรือ โปรแกรม (Program) สำหรับการสื่อสารด้วยเสียง นั่นคือ โปรแกรม Mumble Server

หมายเลข (2) เราเตอร์ (Router) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เราเตอร์ D-Link DWR-921 4G LTE Router ซึ่งอุปกรณ์เราเตอร์มีความสำคัญในระบบโครงข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยเราเตอร์จะดำเนินงานในชั้นโครงข่าย (Network layer) ทำหน้าที่จ่ายหมายเลขไอพี (IP – Internet Protocol) ให้แก่เครื่องลูกข่ายเพื่อที่จะสามารถเข้าใช้งานในระบบโครงข่ายไร้สายได้ รวมถึงการสร้างเส้นทางในการส่งข้อมูลในระบบ นอกจากนี้เราเตอร์ยังทำหน้าที่กระจายสัญญาณ Wi-Fi ในย่านความถี่ 2.4 GHz ให้อุปกรณ์ทั้งหมดในระบบโครงข่ายไร้สายสามารถสื่อสารกันได้ ในงานวิจัยนี้ เราเตอร์จะไม่มีการใช้งาน Sim card 3G/4G เพื่อใช้งานอินเทอร์เน็ตเกตเวย์ (Gateway) แต่อย่างไรก็ตาม ระบบโครงข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ที่ออกแบบขึ้นจะสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้

อินเทอร์เน็ต แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของเราเตอร์ในเรื่องของระยะทาง รวมถึงปัญหาที่เกิดจากการลดทอนต่าง ๆ ภายในถ้า ในการใช้งานจริงจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือรีพีตเตอร์ (Repeater) เพื่อทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากเราเตอร์ให้ได้ระยะทางในการสื่อสารที่ไกลขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.20 แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สาย

หมายเลข (3) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Computer Notebook) ในงานวิจัยนี้จะมีคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กจำนวน 1 เครื่อง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมสำหรับการเฝ้าระวังในระบบโครงข่ายไร้สายไว้ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

หมายเลข (4) อุปกรณ์ทวนสัญญาณ สำหรับการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เนื่องจากข้อจำกัดต่าง ๆ ของเราเตอร์ที่ไม่สามารถกระจายสัญญาณภายในถ้าทั้งหมดได้ การใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณสามารถเพิ่มระยะทางในการติดต่อสื่อสารได้และยังเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลให้ดียิ่งขึ้นเมื่อนำไปใช้ภายในถ้า

หมายเลข (5) อุปกรณ์เพิ่มกำลังส่งของสายอากาศ (Wi-Fi Booster) เป็นอุปกรณ์เพิ่มกำลังส่งที่ถูกติดตั้งไว้กับอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือรีพีตเตอร์ เพื่อเพิ่มระยะทางการติดต่อสื่อสารของอุปกรณ์ให้ได้ระยะทางที่ไกลยิ่งขึ้น

หมายเลข (6) วงจรแยกสัญญาณ (Spilter) เป็นวงจรที่จะทำหน้าที่แยกสัญญาณ ก่อนที่สัญญาณจะเข้าสู่สายอากาศและทำหน้าที่รวมสัญญาณจากสายอากาศก่อนที่จะส่งกลับเข้าสู่บอร์ดประมวลผลของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

หมายเลข (7) เครื่องลูกข่าย ผู้วิจัยใช้บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเสียงของผู้ใช้งานในการสื่อสารทั้งการส่งข้อมูลเสียงไปที่ผู้ใช้งานปลายทางและรับข้อมูลเสียงจากผู้ใช้งานปลายทาง โดยทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz เครื่องลูกข่าย จะทำการสื่อสารแบบวีโอไอพี (Voice Over IP, VoIP) โดยใช้ไลบรารี TalkiePi สามารถควบคุมและ กำหนดการตั้งค่าของเครื่องลูกข่ายด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนต่าง ๆ ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. เครื่องแม่ข่ายสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบวีโอไอพี

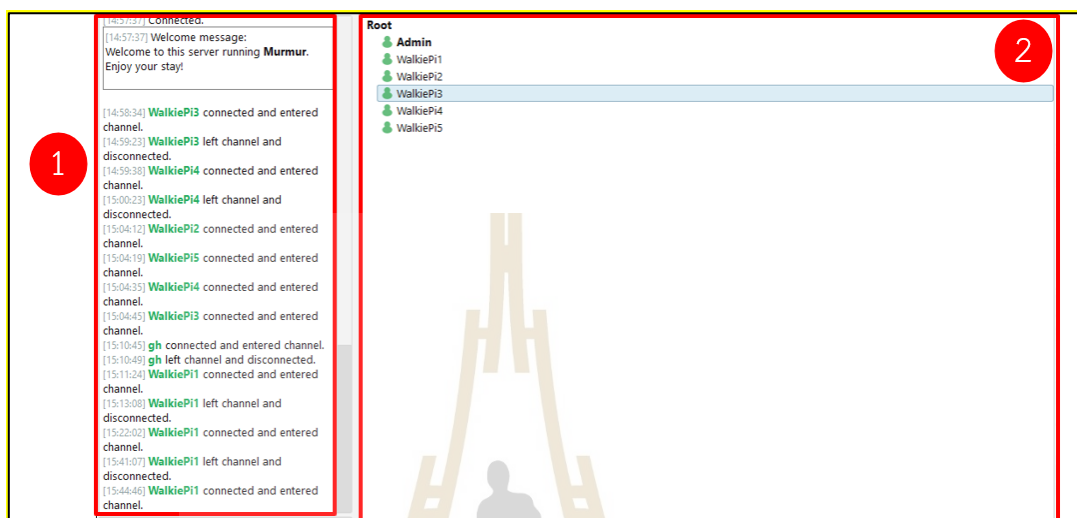
ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการทำงานของเครื่องแม่ข่ายสำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี รูปตัวอย่างอุปกรณ์แม่ข่ายแสดงในรูปที่ 3.21 และจะนำเสนอซอฟต์แวร์สำหรับตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ที่ทำการสื่อสารแบบวีโอไอพีภายในโครงข่าย

เครื่องแม่ข่ายสำหรับการสื่อสารไร้สายแบบวีโอไอพี จะทำหน้าที่ดูแล ควบคุม และเป็นอุปกรณ์สื่อสารกลางของเครื่องลูกข่ายทั้งหมดในระบบโครงข่ายเดียวกัน โดยเครื่องแม่ข่ายได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากบอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 Model B ที่ทำงานร่วมกับระบบซอฟต์แวร์ Mumble Server



รูปที่ 3.21 เครื่องแม่ข่ายที่พร้อมใช้งาน

ในส่วนของการจัดการดูแลและควบคุมเครื่องลูกข่ายในระบบทั้งหมด สามารถดูแลระบบด้วยการใช้โปรแกรม Mumble ซึ่งได้แสดงผลการทำงานของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ดังในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การตรวจสอบสถานะการณ้เชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายด้วยซอฟต์แวร์บริหารจัดการโครงข่าย

จากรูปที่ 3.22 เป็นตัวอย่างการตรวจสอบสถานะเครื่องลูกข่ายที่เชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายด้วยโปรแกรมบริหารจัดการ Mumble โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

หมายเลข (1) เป็นการแสดงข้อความบอกสถานะการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องแม่ข่ายและเครื่องลูกข่ายในระบบ โดยมีข้อความบอกสถานะหลัก ๆ ทั้งหมด 2 สถานะได้แก่ ‘connected and entered channel’ หมายถึง เครื่องลูกข่ายได้ทำตามทำการเชื่อมต่อและเข้าในระบบแล้ว และ ‘left channel and disconnected’ หมายถึง เครื่องลูกข่ายได้ยกเลิกและออกจากระบบแล้ว

หมายเลข (2) เป็นการแสดงผลเครื่องลูกข่ายที่ทำการเชื่อมต่อและเข้าในระบบของเครื่องแม่ข่ายนอกจากนี้ หากพบปัญหาหรือต้องการเข้าไปตั้งค่าต่าง ๆ ในเครื่องแม่ข่ายหรือเครื่องลูกข่าย สามารถเข้าถึงอุปกรณ์เหล่านี้ได้ผ่านคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โดยผ่านโปรแกรม Command Prompt (cmd) ด้วยคำสั่ง ‘ssh pi@’ ตามด้วยหมายเลข IP ของอุปกรณ์ที่ต้องการเข้าถึง ตัวอย่างเช่น ‘ssh pi@192.168.1.101’ เป็นต้น

ข. เครื่องลูกข่ายในระบบการสื่อสารแบบวีโอไอพี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานของเครื่องลูกข่ายซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบพกพา เครื่องลูกข่ายมีหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเสียงของผู้ใช้เพื่อส่งข้อมูลเสียงไปยังปลายทาง

และรับข้อมูลเสียงจากปลายทาง ในการส่งข้อมูลเสียงไปยังปลายทางนั้น ตัวประมวลผลซึ่งเป็นระบบสมองกลฝังตัวจะทำการเข้ารหัสเสียงตามอัลกอริทึมมาตรฐาน Constrained Energy Lapped Transform (CELT) ก่อนจะส่งข้อมูลเป็นแพคเกจ (Packet) ออกไปยังผู้รับปลายทาง ในส่วนของการรับข้อมูลเสียงจากปลายทางระบบสมองกลฝังตัวจะประมวลผลที่ตรงข้ามกับขั้นตอนการส่งข้อมูล คือการถอดรหัสสัญญาณเสียงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ในงานวิจัยนี้การรับส่งข้อมูลจะเป็นแบบไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz รูปภาพเครื่องลูกข่ายที่ผู้วิจัยออกแบบจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องลูกข่าย

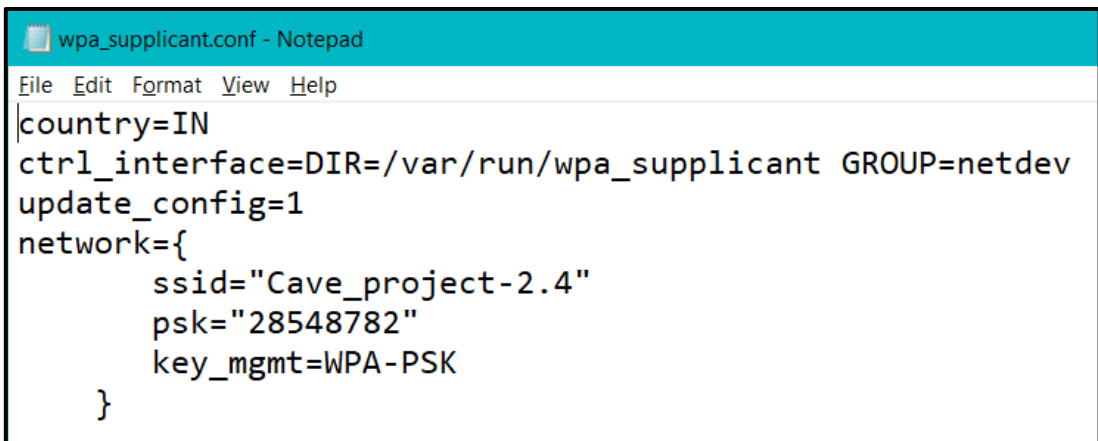
จากรูปที่ 3.23 แสดงภาพเครื่องลูกข่ายในระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยประกอบไปด้วย Raspberry Pi zero WH, ReSpeaker 2 – Mics Pi HAT และ ชุดหูฟัง HP Gaming Headset H150

ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งไลบรารี TalkiePi ไว้ที่บอร์ด Raspberry Pi zero WH เพื่อให้สามารถสื่อสารแบบวีโอไอพีได้ ซึ่งบอร์ด Raspberry Pi zero WH ยังทำงานร่วมกับบอร์ด ReSpeaker 2 – Mics Pi HAT ที่ทำหน้าที่รับและส่งเสียงจากชุดหูฟัง HP Gaming Headset H150 นอกจากนี้บอร์ด ReSpeaker 2 – Mics Pi HAT ยังมีปุ่มกดสำหรับการกดพูดแบบ Push to Talk และยังมีหลอดไฟ LED สามดวง ที่สามารถนำมาแสดงสถานะของเครื่องลูกข่ายได้

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	2,906 KB
wpa_supplicant.conf	20/6/2564 13:44	CONF File	1 KB
ssh	1/8/2564 16:19	File	0 KB

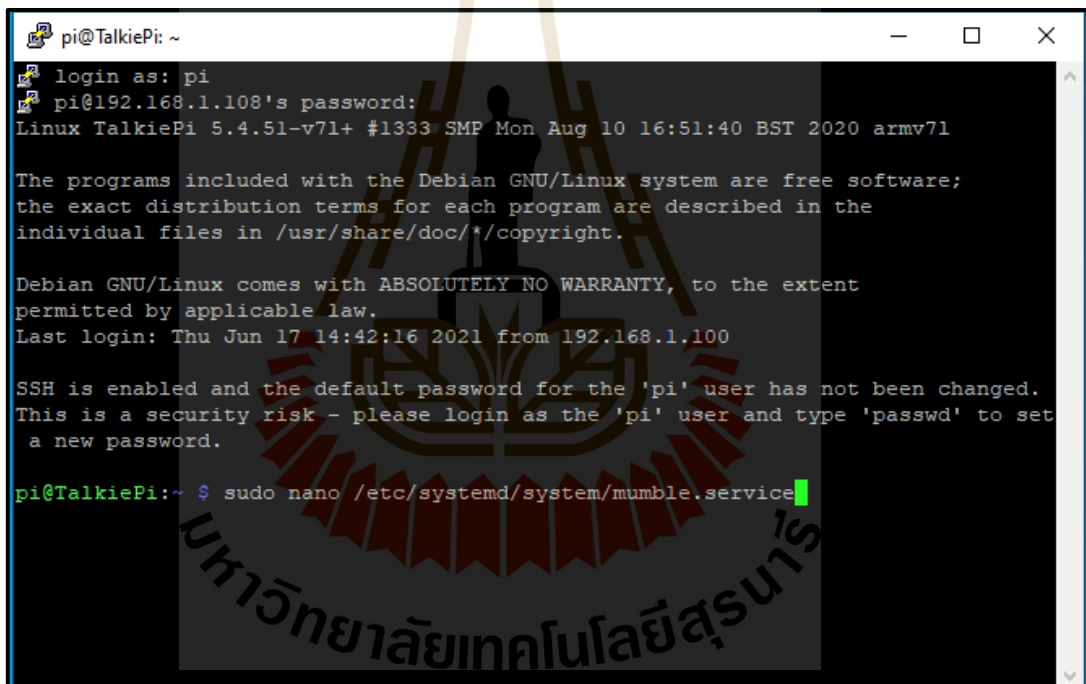
รูปที่ 3.24 การสร้างไฟล์ (กรอบสีแดง) ในตั้งค่าการเชื่อมต่อสัญญาณไร้สายเข้ากับเราเตอร์

ในขั้นตอนการใช้งานนั้น จำเป็นต้องกำหนดค่าให้เครื่องลูกข่ายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ไฟล์ที่จำเป็นในการกำหนดค่าแสดงไว้ในรูปที่ 3.24 ในไฟล์กำหนดค่าไฟล์แรก “wpa_supplicant.conf” มีรายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 3.25 เป็นการกำหนดค่าการเชื่อมต่อเข้าสู่เครื่องเราเตอร์ที่เป็นเครื่องกระจายสัญญาณหลักของโครงข่ายสื่อสาร และในไฟล์ที่สอง “ssh” เป็นไฟล์เปล่า สร้างขึ้นมาเพื่อเปิดใช้งานฟังก์ชัน Secure Shell เป็นฟังก์ชันที่มีไว้เพื่อที่สามารถเข้าถึงอุปกรณ์นั้น ๆ ภายในโครงข่ายได้ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าให้เครื่องลูกข่ายตามรูปที่ 3.26 และ 3.27 ซึ่งเป็นคำสั่งสำหรับเครื่องลูกข่ายเข้าถึงเครื่องมาข่าย เพื่อใช้งานการสื่อสารแบบวีไอไอพี



```
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 3.25 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 3.26 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 3.27 ชุดคำสั่งเพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย

จากรูปที่ 3.27 เป็นการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้เครื่องลูกข่ายสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายได้ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

-server เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยเป็นการกำหนดชื่อเซิร์ฟเวอร์และหมายเลขพอร์ตของเซิร์ฟเวอร์ที่เราต้องการที่จะเชื่อมต่อ จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์แทนที่ YOUR_SERVER:PORT เช่น 192.168.1.101:64738

-username เป็นค่าพารามิเตอร์ในการตั้งชื่อในการเริ่มใช้งานของเครื่องลูกข่าย จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์แทนที่ YOUR_USERNAME เช่น WalkiePi2

-password เป็นค่าพารามิเตอร์ในการกำหนดรหัสผ่านสำหรับการเข้าถึงเครื่องแม่ข่าย โดยจะเพิ่มพารามิเตอร์ -password เข้าไปที่หลังพารามิเตอร์ -certificate เช่น -password admin123 เป็นต้น

เมื่อเครื่องลูกข่ายสามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องแม่ข่ายได้สำเร็จ จะมีไฟแสดงสถานะแสดงขึ้นที่เครื่องลูกข่ายดังแสดงในรูปที่ 3.28 และ 3.29 โดยไฟแสดงสถานะมีทั้งหมด 3 สี แต่ละสีจะบอกสถานะที่แตกต่างกันดังนี้

สถานะ (1) แสงไฟแอลอีดีสีแดง หมายถึงอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายทำการเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่าย ได้สำเร็จเรียบร้อยแล้ว

สถานะ (2) แสงไฟแอลอีดีสีเขียว หมายถึงอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายพร้อมใช้งานหรือในเครื่องแม่ข่าย มีอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายอื่น ๆ ที่พร้อมใช้งานมากกว่า 1 อุปกรณ์

สถานะ (3) แสงไฟแอลอีดีสีน้ำเงิน หมายถึงสถานะการกดเพื่อพูด (Push to Talk) เมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มเพื่อพูดบนบอร์ดจะแจ้งสถานะเป็นแสงไฟแอลอีดีสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.28 ภาพด้านบนของเครื่องลูกข่าย

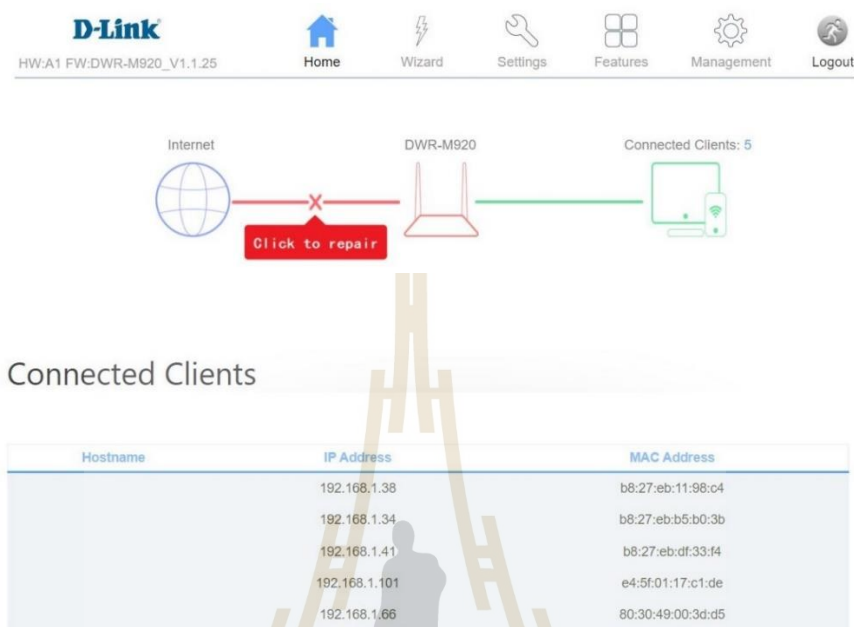


รูปที่ 3.29 ไฟแสดงสถานะของเครื่องลูกข่าย

ค. โครงข่ายไร้สายของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะอธิบายถึงโครงข่ายสื่อสารไร้สายของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำ ในโครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz มีอุปกรณ์ที่สำคัญคือ เราเตอร์ โดยเครื่องเราเตอร์จะทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลักภายในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย และยังทำหน้าที่ในการแจกจ่ายหมายเลขไอพีให้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ทำการเชื่อมต่อมาในโครงข่ายสื่อสาร และเราเตอร์ยังเป็นอุปกรณ์กำหนดเส้นทางการไหลของข้อมูลในโครงข่ายด้วย แต่ในการสื่อสารภายในถ้ำนั้น เครื่องเราเตอร์เพียงเครื่องเดียวไม่สามารถกระจายสัญญาณภายในถ้ำได้ทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เครื่องทวนสัญญาณ มาช่วยขยายสัญญาณจากเครื่องเราเตอร์ เพื่อให้สามารถสื่อสารภายในถ้ำได้ไกลยิ่งขึ้น ซึ่งต่อไปผู้วิจัยจะเรียกเครื่องทวนสัญญาณว่า โนดย่อย ผู้วิจัยได้แสดงตัวอย่างการตรวจสอบสถานะของ

อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโครงข่ายสื่อสาร โดยใช้โปรแกรมบริหารโครงข่ายสำหรับเครื่องเราเตอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การตรวจสอบสถานการณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องลูกข่ายภายในโครงข่าย

ภายในโครงสร้างของโครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- 1) โหนดหลัก โหนดหลักจะประกอบไปด้วย เราเตอร์ D-link DWR-M210 มี Raspberry Pi 3 model B ทำหน้าที่เป็นแม่ข่าย และมีเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 1 เครื่อง สำหรับการบริหารและเฝ้าระวังภายในโครงข่าย
- 2) โหนดย่อย โหนดย่อยคือชื่อเรียกของเครื่องทวนสัญญาณ ผู้วิจัยเลือกใช้ TP-LINK's 2.4GHz 300Mbps 9 dBi Outdoor CPE เป็นเครื่องทวนสัญญาณภายในโครงข่าย ในงานวิจัยที่มีโหนดย่อยทั้งหมด 3 โหนด โดยแต่ละโหนดย่อยจะวางห่างกันเป็นระยะทางประมาณ 50 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายในถ้ำ
- 3) เครื่องลูกข่าย เครื่องลูกข่ายถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi zero WH ในงานวิจัยนี้มีเครื่องลูกข่ายทั้งหมด 15 เครื่อง โดยจะมีเครื่องลูกข่ายประจำอยู่ที่โหนดย่อย โหนดย่อยละ 5 เครื่อง

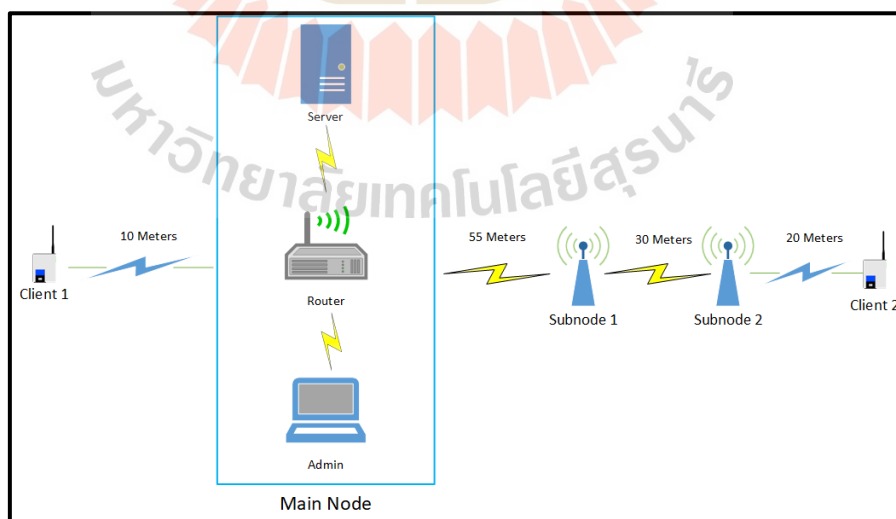
3.4.2 การวางแผนการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในย่าน

ความถี่ 2.4 GHz

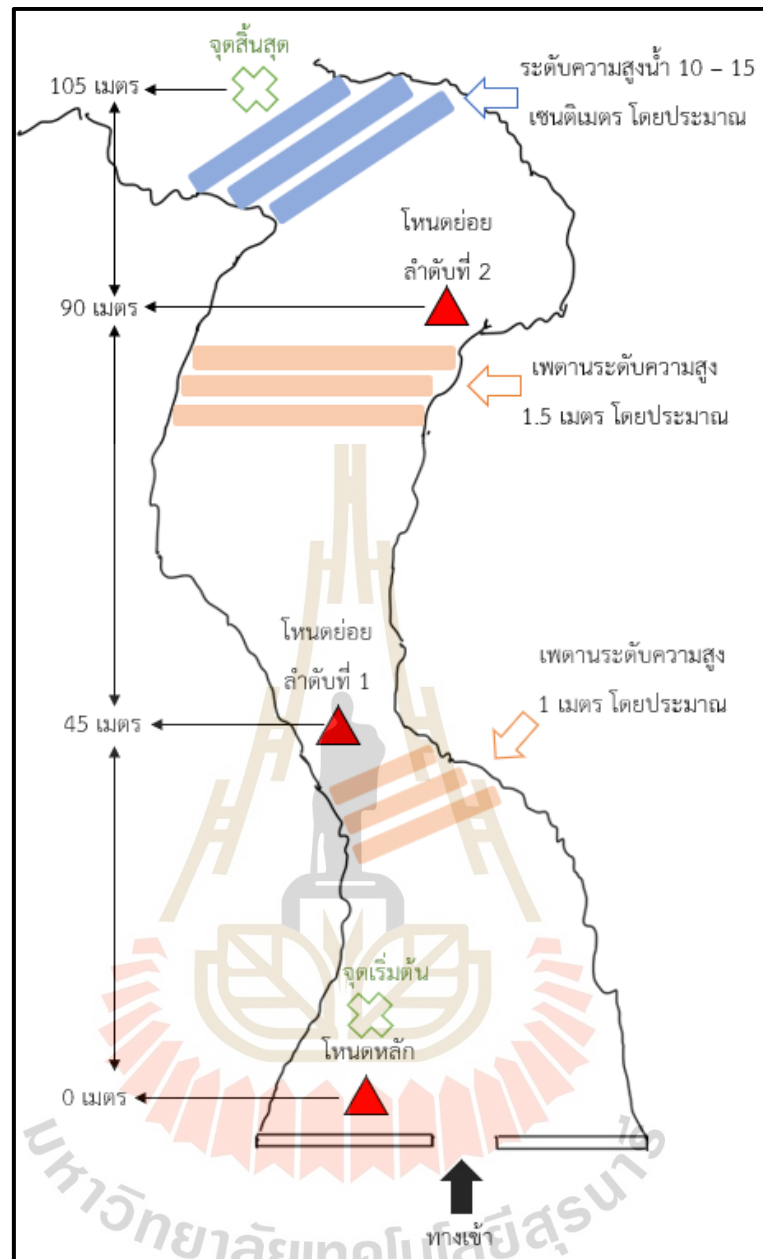
ผู้วิจัยทำการวางแผนในการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยจะทำการทดสอบรูปแบบการสื่อสารสองรูปแบบ คือ 1.การทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และ 2.การทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด การทดสอบความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้ การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้งานในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยการทดสอบทั้งหมดจะทำการทดสอบที่ ถ้ำป่าภูหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และ ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดแต่ละการทดสอบดังต่อไปนี้

ก. การทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด

ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ และการทดสอบประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝง ผู้วิจัยจะทำการทดสอบที่ถ้ำป่าภูหารีย์ แผนภาพแบบร่างของถ้ำป่าภูหารีย์ แสดงในรูปที่ 3.32 และแผนภาพโครงข่ายการสื่อสารสำหรับทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.31



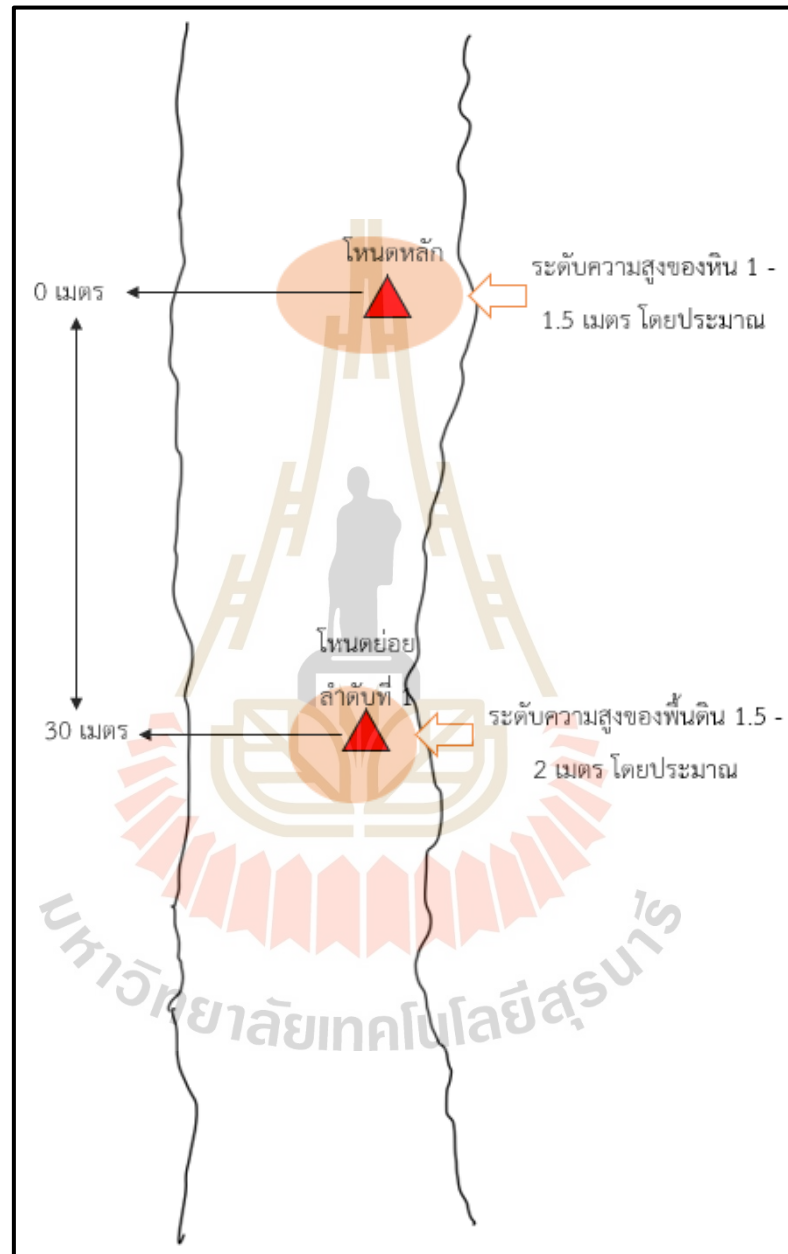
รูปที่ 3.31 แผนผังระบบเพื่อการบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด



รูปที่ 3.32 แบบร่างสถานที่การดำเนินงานวิจัยภายในถ้าป่าภูหารีย์

จากรูปที่ 3.31 เป็นแผนผังแสดงการออกแบบโครงข่ายสื่อสารในการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด ในโครงข่ายการสื่อสารนี้ ในส่วนของโนดหลักจะประกอบไปด้วย เครื่องเราเตอร์ เครื่องแม่ข่าย และเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก นอกจากโนดหลักแล้ว ยังมีโนดย่อยอีก 2 โนด ในการทดสอบนี้เป็นทดสอบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องลูกข่าย 2 เครื่องในการทดสอบ โดยเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ 1 วางไว้ที่บริเวณโนดหลัก

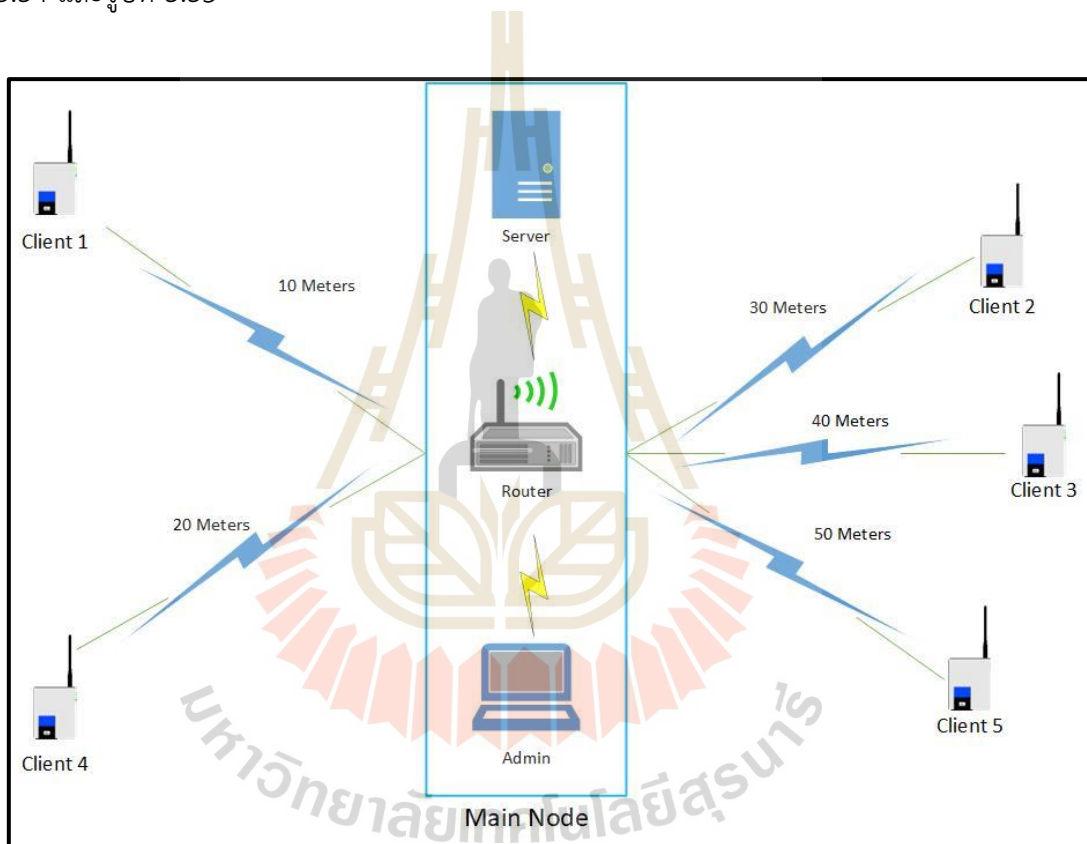
โดยวางห่างจากเครื่องเรเตอร์เป็นระยะทาง 10 เมตร และเครื่องลูกข่ายเครื่องที่ 2 วางไว้ที่บริเวณ โนดย่อยที่ 2 โดยห่างจากโนดย่อยที่ 2 เป็นระยะทาง 20 เมตร โดยที่โนดย่อยที่ 1 และโนดย่อยที่ 2 วางห่างกันเป็นระยะทาง 30 เมตร



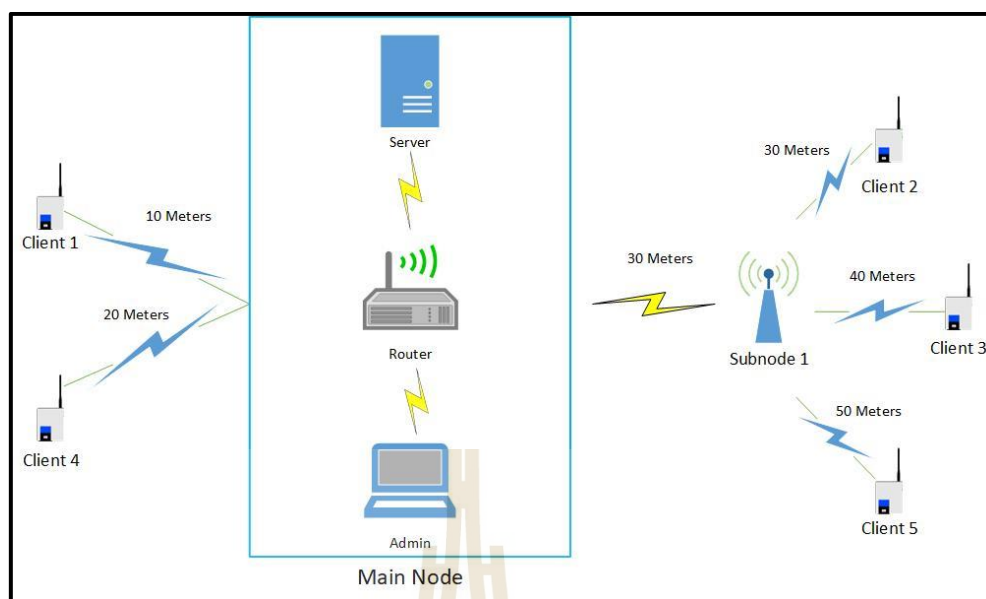
รูปที่ 3.33 แบบร่างสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว

ข. การทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด

ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ และการทดสอบประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝง ผู้วิจัยจะทำการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว แผนภาพแบบร่างของถ้ำเชียงดาว แสดงในรูปที่ 3.33 และแผนภาพโครงข่ายการสื่อสารสำหรับทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.34 และรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.34 แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกค่าการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่หนึ่ง



รูปที่ 3.35 แผนผังการออกแบบระบบเพื่อการบันทึกค่าการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสาร ด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุดในรูปแบบที่สอง

จากรูปที่ 3.34 และ 3.35 เป็นแผนผังแสดงการออกแบบโครงข่ายสื่อสารในการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ในรูปที่ 3.34 เป็นแผนผังการทดสอบระบบสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก การทดสอบนี้มีเครื่องลูกข่าย 5 เครื่อง โดยที่เครื่องลูกข่ายที่ 1 วางห่างจากโนดหลัก 10 เมตรทางซ้ายมือ เครื่องลูกข่ายที่ 4 วางห่างจากโนดหลัก 20 เมตรทางซ้ายมือ เครื่องลูกข่ายที่ 2 วางห่างจากโนดหลัก 30 เมตรทางขวามือ เครื่องลูกข่ายที่ 3 วางห่างจากโนดหลัก 40 เมตรทางขวามือ และเครื่องลูกข่ายที่ 5 วางห่างจากโนดหลัก 50 เมตรทางซ้ายมือ ในส่วนของรูปที่ 3.35 เป็นแผนผังการทดสอบระบบสื่อสารแบบหลายจุดโดยมีโนดย่อยหนึ่งโนด การทดสอบนี้มีเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่อง และมีลักษณะการวางตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายคล้ายกับการทดสอบภายในโนดหลัก แต่มีโนดย่อยเพิ่มเข้าทางขวามือของโนดหลัก เครื่องลูกข่ายที่ 2, 4 และ 5 จะวางห่างจากโนดย่อยไปทางขวามือ เป็นระยะทาง 30, 40 และ 50 เมตรตามลำดับ

ในการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการทดสอบก่อนที่จะมีพัฒนาระบบสื่อสาร เป็นการทดสอบเพื่อดูประสิทธิภาพการสื่อสารของอุปกรณ์สื่อสารทั้งหมด และเพื่อเข้าใจการสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยโครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อการพัฒนาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยโครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โดย

ผู้วิจัยจะนำเสนอการพัฒนากระบวนสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยโครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ในหัวข้อต่อไป

3.4.3 การทดสอบหลังการพัฒนาของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

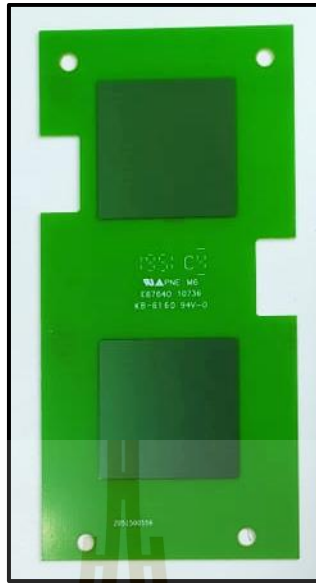
ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอการทดสอบหลังการพัฒนาของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยได้มีการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณหรือโนดย่อย การออกแบบรูปแบบการทดสอบใหม่โดยเพิ่มจำนวนเครื่องลูกข่าย เพิ่มจำนวนโนดย่อย และเพิ่มระยะทางระหว่างโนด อันดับแรกผู้วิจัยจะนำเสนอการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณ การออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz และการทดสอบโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ตามลำดับ

ก. การพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอวิธีการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณ เมื่อผู้วิจัยนำเครื่องทวนสัญญาณไปใช้จริงในถ้ำพบว่า เครื่องทวนสัญญาณกระจายสัญญาณได้ไม่ไกลเท่าที่ควร เนื่องจากเครื่องทวนสัญญาณมีสายอากาศเดิมเป็นสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง ไม่สามารถปรับทิศทางของสายอากาศได้ ทำให้การกระจายสัญญาณทางด้านหลังของเครื่องทวนสัญญาณมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาสายอากาศเป็นสายอากาศแบบคู่ (Dual-Antenna) ที่สามารถปรับทิศทางในแนวระนาบได้ เพื่อให้สามารถกระจายสัญญาณไปตามแนวโพรงถ้ำได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเพิ่มกำลังส่งของสายอากาศสำหรับเครื่องทวนสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์ Wi-Fi Signal booster ขนาด 8 วัตต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องทวนสัญญาณ

เดิมทีเครื่องทวนสัญญาณมีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่สามส่วน คือ 1.ชั้นบนสุด เป็นชั้นวงจรบังคับทิศทางของสายอากาศ แสดงไว้ตามรูปที่ 3.36 2.ชั้นกลาง เป็นชั้นวงจรสายอากาศ แสดงไว้ตามรูปที่ 3.37 และ 3.ชั้นล่างสุด เป็นวงจรสำหรับประมวลผลข้อมูลของสายอากาศ แสดงไว้ตามรูปที่ 3.38

ผู้วิจัยได้ทำสร้างชุดสายอากาศขึ้นมาใหม่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.39 โดยในแต่ละชุดของสายอากาศจะประกอบไปด้วย 1.ชั้นบนสุด เป็นชั้นวงจรบังคับทิศทางของสายอากาศ 2.ชั้นกลาง เป็นชั้นของสายอากาศย่านความถี่ 2.4 GHz และ 3.ชั้นล่างสุด เป็นแผ่นป้องกันการกระจายสัญญาณไปทางด้านหลังของสายอากาศ และยังเป็นกราวด์ให้กับสายอากาศ ในเครื่องทวนสัญญาณแบบใหม่จะต้องมีชุดสายอากาศจำนวน 2 ชุดเสมอ



รูปที่ 3.36 แผ่นวงจรบังคับทิศทางของสายอากาศ



รูปที่ 3.37 แผ่นวงจรสายอากาศ

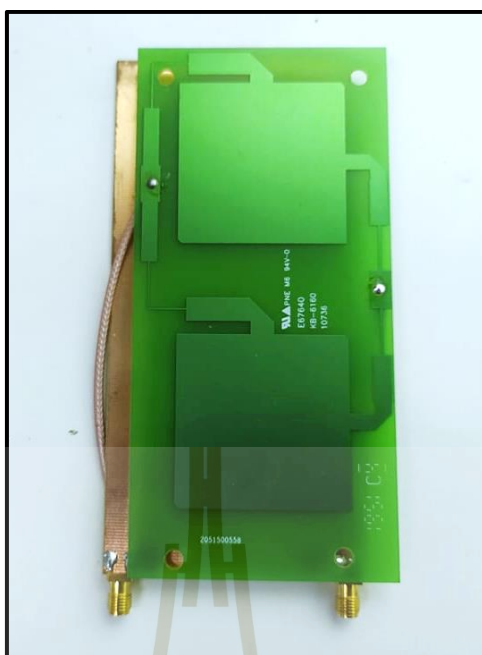


รูปที่ 3.38 แผงวงจรประมวลผลสัญญาณของสายอากาศ



รูปที่ 3.39 ชุดสายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 3.39 เป็นชุดสายอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นสายอากาศแบบคู่ (Dual-Antenna) โดยฉั้่นกลางและชั้นล่างสุดของชุดสายอากาศจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยใช้สายนำสัญญาณสองเส้น และชั้นล่างสุดจะทำการติดตั้งตัวเชื่อมต่อ SMA (Subminiature version A) ดังแสดงในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การเชื่อมต่อระหว่างชั้นกราวด์และชั้นสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบสองโพลาริซ์ คือ โพลาริซ์ (Horizontal) และโพลาริซ์แนวตั้ง (Vertical) ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าความแรงสัญญาณที่ส่งออกได้ทั้งสองโพลาริซ์ของสายอากาศโดยใช้เครื่องทวนสัญญาณจำนวนสองชุดในการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ที่ระยะทาง 3 เมตร พบว่า ขั้วที่อยู่ด้านขวาเป็นขั้วของโพลาริซ์แนวระนาบ และขั้วที่อยู่ฝั่งซ้ายเป็นโพลาริซ์แนวตั้ง ผู้วิจัยจะนำเสนอผลทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับส่งได้ทั้งสองโพลาริซ์ ผลการทดสอบเรเตอร์และอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ในบทถัดไป

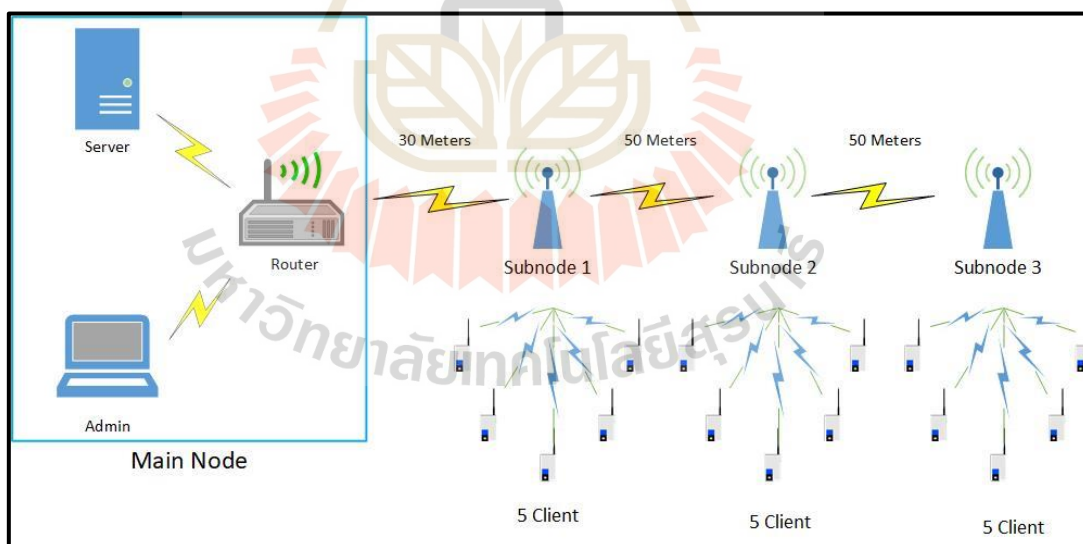
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของสายอากาศดั้งเดิมและสายอากาศที่พัฒนาขึ้น ด้วยเครื่อง Keysight FieldFox N9912A ทำการทดสอบที่ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารสิรินธรวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นการทดสอบสายอากาศในช่วงความถี่ 2.4 – 2.5 GHz ห้องที่ทำการทดสอบเป็นห้องที่ประกอบด้วยวัสดุที่ช่วยปิดกั้นสัญญาณรบกวนจากภายนอก เรียกว่า ห้องไร้เสียงสะท้อน (Anechoic Chamber) และผู้วิจัยยังได้ทำการทดสอบวัดผลทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศที่พัฒนาขึ้น ซึ่งผู้วิจัยทำการทดสอบสายอากาศทั้งแนวตั้ง (Vertical) และแนวระนาบ (Horizontal) เพื่อศึกษา รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ เพื่อประโยชน์ในการปรับใช้ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม

ของถ้า ผู้วิจัยจะนำเสนอรายละเอียดผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับและการวัดผลทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน ในบทถัดไป

ข. การออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการออกแบบวิธีการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ในถ้าจริงสองแห่งคือถ้าปาฎิหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และ ถ้าเชียงดาว อ.เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ ผู้วิจัยทำการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง โดยจะแบ่งรูปแบบการทดสอบออกเป็นสองรูปแบบ ได้แก่ 1.การทดสอบรูปแบบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และ 2.การทดสอบรูปแบบการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด

ในการทดสอบรูปแบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด จะเป็นการทดสอบจุดต่อจุดภายในโนดและจุดต่อจุดระหว่างโนด โดยการทดสอบรูปแบบการสื่อสารนี้ผู้วิจัยจะทำการทดสอบที่ถ้าปาฎิหารีย์ และในการทดสอบรูปแบบการสื่อสารแบบหลายจุด จะเป็นการทดสอบแบบหลายจุดภายในโนดและแบบหลายจุดระหว่างโนด โดยการทดสอบรูปแบบการสื่อสารนี้ผู้วิจัยจะทำการทดสอบที่ถ้าเชียงดาว รูปแบบโครงข่ายสื่อสารในหัวข้อนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 แผนผังการทดสอบระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้าปาฎิหารีย์และถ้าเชียงดาว

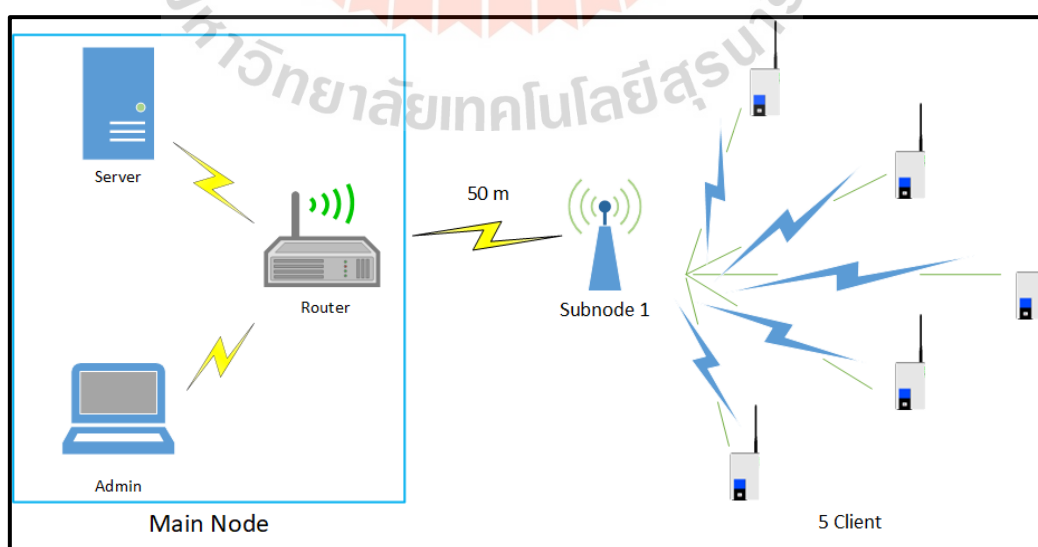
จากรูปที่ 3.41 เป็นแผนผังโครงข่ายสื่อสารสำหรับใช้ในการทดสอบที่ถ้าทั้งสองแห่ง รูปแบบโครงข่ายจะมีลักษณะที่คล้ายกับการทดสอบก่อนหน้า แต่ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวน

เครื่องลูกข่าย โดยมีเครื่องลูกข่ายทั้งหมด 15 เครื่อง โดยจะแบ่งเครื่องลูกข่ายไว้ที่โนดย่อย โนดละ 5 เครื่อง ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยใช้โนดย่อยทั้งหมด 3 โนด เพื่อให้การสื่อสารโดยรวมทั้งหมดในโครงข่ายสื่อสารสามารถสื่อสารได้ไกลยิ่งขึ้น ในโนดหลักจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์เราเตอร์ D-Link DWR-921 4G LTE Router ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก จ่ายหมายเลขไอพีให้อุปกรณ์ในโครงข่ายทั้งหมด และทำหน้าที่ในการจัดการเส้นทางสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ มีเครื่องแม่ข่ายที่พัฒนาจากระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi 3 model B มีโปรแกรม Mumble สำหรับการสื่อสารแบบวีโอไอพี

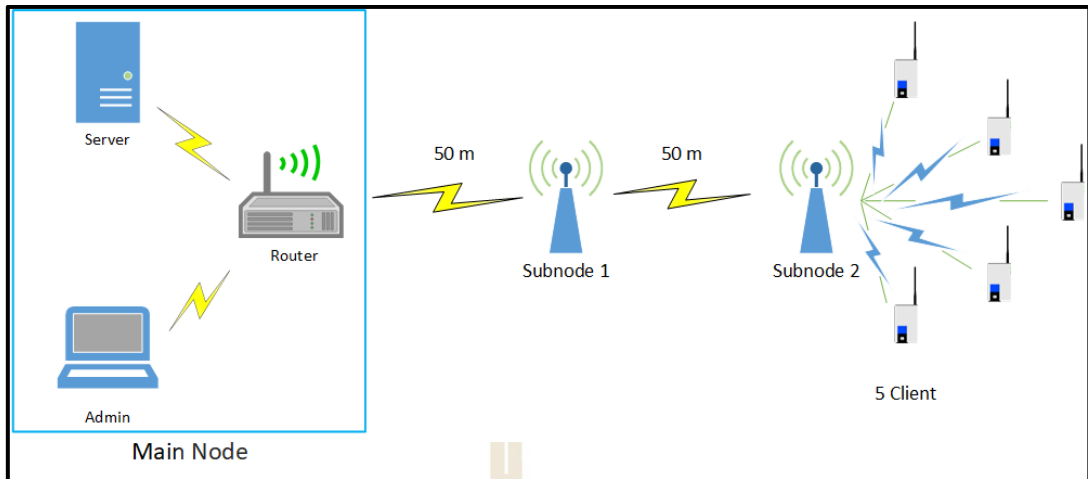
ในส่วนของเครื่องลูกข่ายทั้ง 15 เครื่อง ผู้วิจัยจะกำหนดชื่อเรียกของเครื่องลูกข่าย โดยขึ้นต้นด้วย “WalkePi” แล้วตามด้วยหมายเลขของเครื่องลูกข่าย เช่น เครื่องลูกข่ายหมายเลข 2 ผู้วิจัยจะกำหนดชื่อว่า “WalkePi2” เป็นต้น ผู้วิจัยจะนำเครื่องลูกข่ายหมายเลขที่ 1 ถึงหมายเลขที่ 5 ไว้ที่โนดย่อยที่ 1 เครื่องลูกข่ายหมายเลขที่ 6 ถึงหมายเลขที่ 10 ไว้ที่โนดย่อยที่ 2 เครื่องลูกข่ายหมายเลขที่ 11 ถึงหมายเลขที่ 15 ไว้ที่โนดย่อยที่ 3 ผู้วิจัยจะนำเสนอวิธีการทดสอบและผลการทดสอบในบทถัดไป

ค. แผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

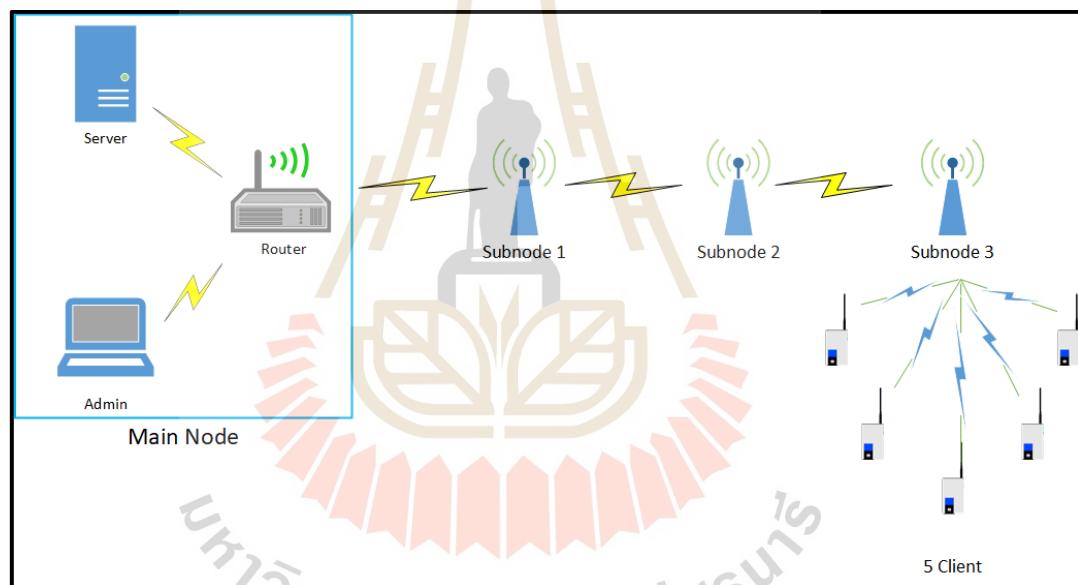
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแผนภาพการทำงานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับการทดสอบภายในถ้าทั้ง 2 แห่ง รูปแบบการสื่อสารในการทดสอบจะเน้นไปที่การทดสอบรูปแบบการสื่อสารแบบหลายจุด โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ รูปแบบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.42, 3.43 และ 3.44 ตามลำดับ และรูปแบบการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อยต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.45



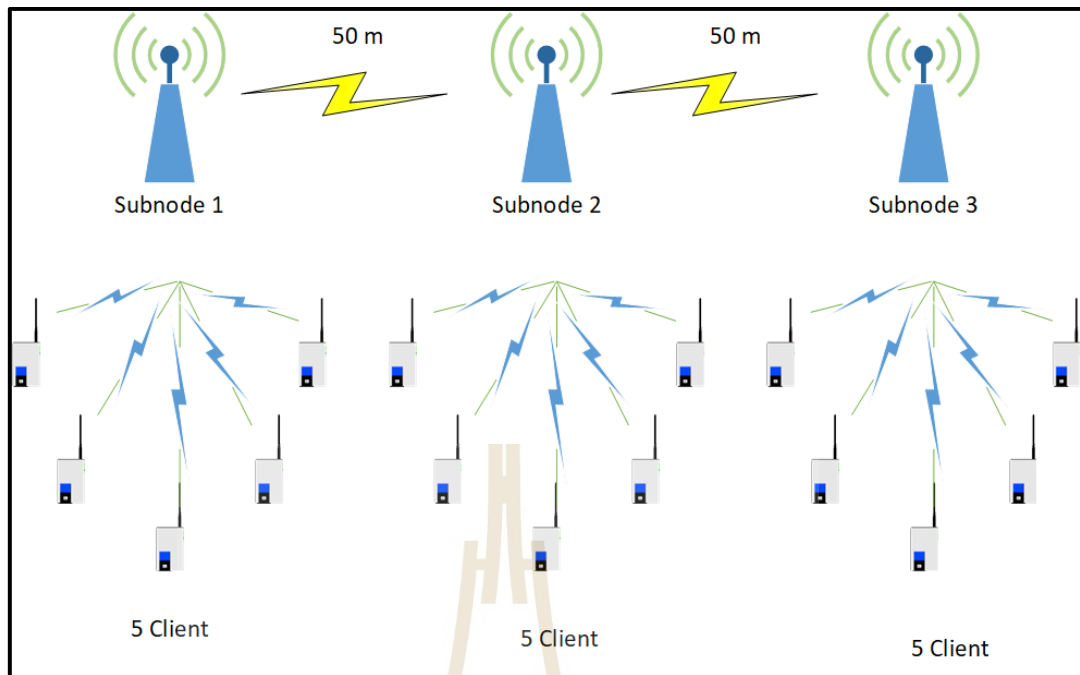
รูปที่ 3.42 แผนผังการทดสอบภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่งในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 3.43 แผนผังการทดสอบภายในโน้ตย่อลำดับที่สองในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 3.44 แผนผังการทดสอบภายในโน้ตย่อลำดับที่สามในพื้นที่การใช้งานจริง



รูปที่ 3.45 รูปแผนผังการทดสอบระหว่างโนดย่อยลำดับต่าง ๆ ในพื้นที่การใช้งานจริง

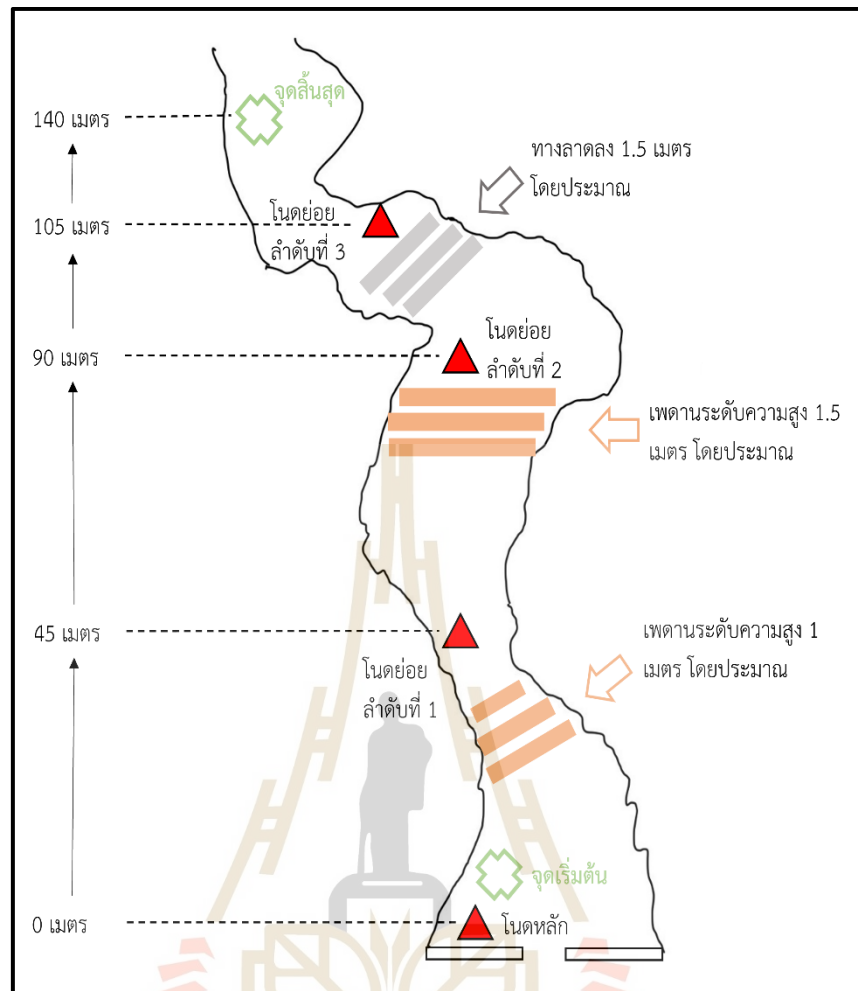
ง. วิธีการดำเนินการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการดำเนินการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของอุปกรณ์ในด้านประสิทธิภาพการสื่อสาร โดยผู้วิจัยมีแผนการทดสอบดังต่อไปนี้

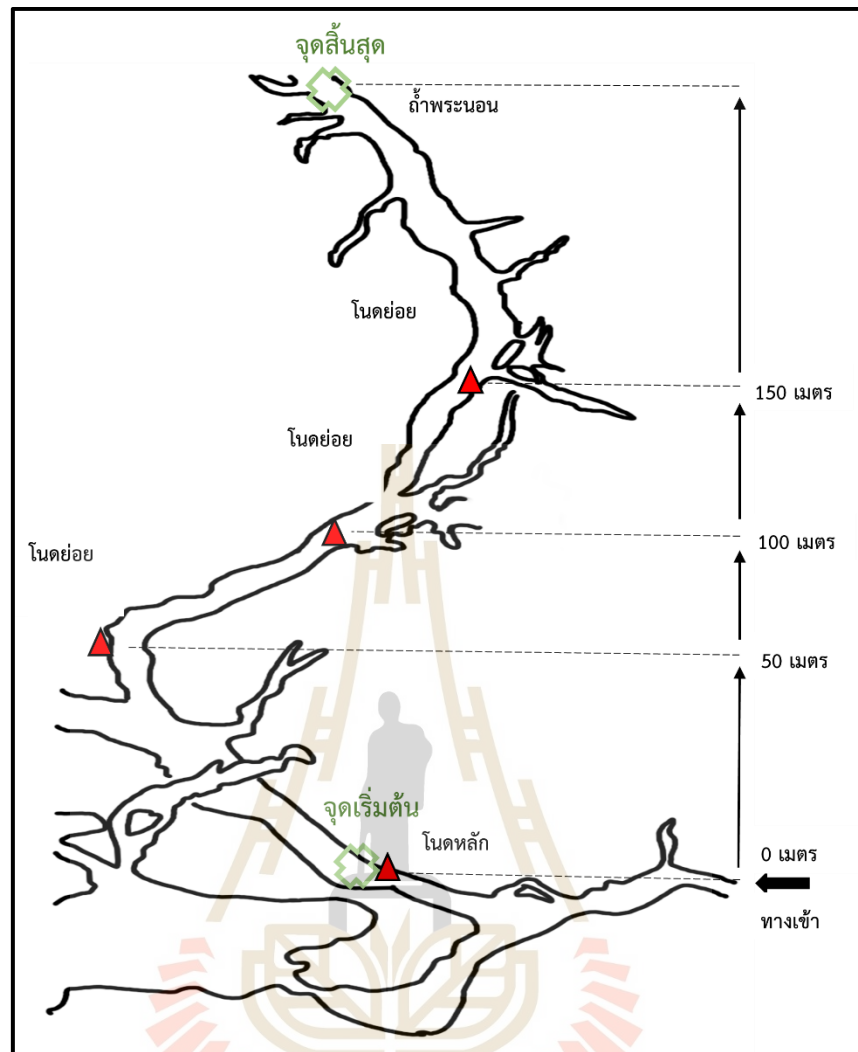
1) แผนการทดสอบการสื่อสารแบบโดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบดั้งเดิม ผู้วิจัยเลือกถ้ำปาฎิหาริย์เป็นสถานที่ทดสอบการสื่อสารแบบอุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบสายอากาศเจาะจงทิศทาง ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ยังไม่ได้พัฒนา แผนภาพการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.38

2) แผนการทดสอบการสื่อสารแบบโดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาแล้ว

ผู้วิจัยเลือกถ้ำเชียงดาวเป็นสถานที่ทดสอบการสื่อสาร โดยมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาแล้ว ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาสายอากาศเป็นสายอากาศคู่ (Dual antennas) เป็นสายอากาศคู่ที่สามารถปรับทิศทางได้ตามสภาพโพรงถ้ำ ซึ่งจะสามารถกระจายสัญญาณไปตามแนวของโพรงถ้ำได้ไกลและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มกำลังส่งและเพิ่มความสามารถในการรับสัญญาณของสายอากาศด้วยอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ Wi-Fi signal booster แผนภาพการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.46 แบบร่างสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้าปภาภิหารีย์



รูปที่ 3.47 แบบร่างสถานที่การดำเนินการทดสอบภายในถ้ำเชียงดาว

รูปแบบการทดสอบของถ้ำทั้งสองแห่งจะมีรูปแบบการทดสอบที่เหมือนกัน โดยจะมี โหนดหลักที่ประกอบไปด้วย อุปกรณ์เราเตอร์ เครื่องแม่ข่าย และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก มีโหนดย่อย 3 โหนด และเครื่องลูกข่าย 15 เครื่อง ซึ่งจะทำให้การทดสอบรูปแบบการสื่อสาร 2 แบบคือ การสื่อสารภายใน โหนดย่อย และการสื่อสารระหว่างโหนดย่อย โดยจะเป็นการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับ และการทดสอบค่าเวลาแฝง

1) การทดสอบการสื่อสารภายในโหนด ผู้วิจัยจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 โหนดย่อย ในแต่ละโหนดย่อยจะมีเครื่องลูกข่าย 5 เครื่อง ในขั้นตอนการทดสอบนั้น เครื่องลูกข่ายหนึ่งเครื่อง จะต้องทำการ ping ไปยังเครื่องลูกข่ายอีก 4 เครื่องภายในโหนดย่อยเดียวกัน เพื่อเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงในการสื่อสารภายในโหนดย่อยของแต่ละโหนด ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝง 20 ข้อมูลต่อการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่าย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อผู้วิจัยจะทำการทดสอบเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงของ

เครื่องลูกข่ายที่ 1 (WalkiePi1) ผู้วิจัยจะต้องทำการปิงไปยังเครื่องลูกข่ายที่ 2 (WalkiePi2) จำนวน 20 ครั้ง เมื่อครบแล้ว ผู้วิจัยจะต้องทำการปิงจากเครื่องลูกข่ายที่ 1 ไปยังเครื่องลูกข่ายที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ เป็นต้น ดังนั้นในการทดสอบในแต่ละโนดย่อยผู้วิจัยจะต้องเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงทั้งหมด 400 ข้อมูล แต่เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจะทำการหาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงในแต่ละโนด ในขณะที่ทำการเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝง ผู้วิจัยได้ทำการส่งข้อมูลเสียงไปด้วย และเมื่อเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงจนครบแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องได้รับจากโนดย่อยด้วย และทำการหาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับในแต่ละโนดย่อย

2) การทดสอบการสื่อสารระหว่างโนดย่อย ผู้วิจัยจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 โนดย่อย ในแต่ละโนดย่อยจะมีเครื่องลูกข่าย 5 เครื่อง ในขั้นตอนการทดสอบนั้น ผู้วิจัยจะทำการสุ่มเครื่องลูกข่ายหนึ่งเครื่องภายในโนดย่อยหนึ่งโนด จากนั้นผู้วิจัยจะทำการปิงจากเครื่องลูกข่ายเครื่องนั้นไปยังเครื่องลูกข่ายที่อยู่ภายในโนดย่อยอื่น ๆ เพียงโนดละหนึ่งเครื่องเท่านั้น ในการเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงระหว่างเครื่องลูกข่าย ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูล 20 ข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น ในโนดย่อยที่หนึ่ง ผู้วิจัยเลือกเครื่องลูกข่ายที่ 3 (WalkiePi3) เป็นเครื่องทดสอบ ในโนดย่อยที่สองผู้วิจัยเลือกเครื่องลูกข่ายที่ 7 (WalkiePi7) เป็นเครื่องทดสอบ ในโนดย่อยที่สามผู้วิจัยเลือกเครื่องลูกข่ายที่ 14 (WalkiePi14) เป็นเครื่องทดสอบ ผู้วิจัยจะต้องปิงจากเครื่องลูกข่ายที่ 3 ไปยังเครื่องลูกข่ายที่ 7 ทั้งหมด 20 ครั้ง และทำการปิงไปยังเครื่องลูกข่ายที่ 14 อีก 20 ครั้ง เป็นต้น ดังนั้นในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจะต้องเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงทั้งหมด 120 ข้อมูล แต่เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจะทำการหาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงในแต่ละโนด ในขณะที่ทำการเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝง ผู้วิจัยได้ทำการส่งข้อมูลเสียงไปด้วย และเมื่อเก็บข้อมูลค่าเวลาแฝงจนครบแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องได้รับจากโนดย่อยด้วย และทำการหาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับในแต่ละโนดย่อย

3.5 การออกแบบโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียง สำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

โปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) จะทำหน้าที่ค้นหาหมายเลขไอพีทั้งหมดภายในโครงข่ายสามารถระบุได้ว่าแต่ละหมายเลขไอพีเป็นอุปกรณ์อะไรที่อยู่ภายในโครงข่ายตามที่ระบุไว้ ถ้าหมายเลขไอพีใดไม่ใช่อุปกรณ์ภายในโครงข่ายตามที่ระบุไว้ ให้โปรแกรมระบุหมายเลขไอพีนั้นให้เป็น “null” สามารถระบุได้ว่ามีอุปกรณ์ตามที่ระบุไว้ทั้งหมดกี่เครื่อง มีเครื่องแม่ข่าย เครื่องลูกข่าย อุปกรณ์เราเตอร์ อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่อยู่ภายในโครงข่ายกี่เครื่อง และนอกจากนี้ ยังสามารถติดตามหมายเลขไอพีทั้งหมดที่ค้นหาได้ว่ายังอยู่ภายในโครงข่ายหรือไม่

ในการออกโปรแกรมสำหรับเฟิร์มแวร์นั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบแผนผังการทำงานของโปรแกรมตามผังงาน (Flowchart) ที่แสดงในรูปที่ 3.48 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) โปรแกรมจะรอรับค่าหมายเลขไอพีจากผู้ใช้ สามารถระบุเป็นช่วงซับเน็ตมาร์ค (Subnet mask) ของหมายเลขไอพี เช่น 192.168.1.1/24 เป็นต้น และสามารถระบุเพียงหนึ่งหมายเลขไอพี เช่น 192.168.1.1

2) หลังจากระบุหมายเลขไอพีแล้ว ให้ทำการกดปุ่ม “Scan_IP” โปรแกรมจะทำการค้นหาหมายเลขไอพีตามที่ได้ระบุไว้ เมื่อโปรแกรมค้นหาหมายเลขไอพีเสร็จแล้ว โปรแกรมจะแสดงหมายเลขไอพีทั้งหมดรวมถึงหมายเลขประจำตัวอุปกรณ์ (MAC Address)

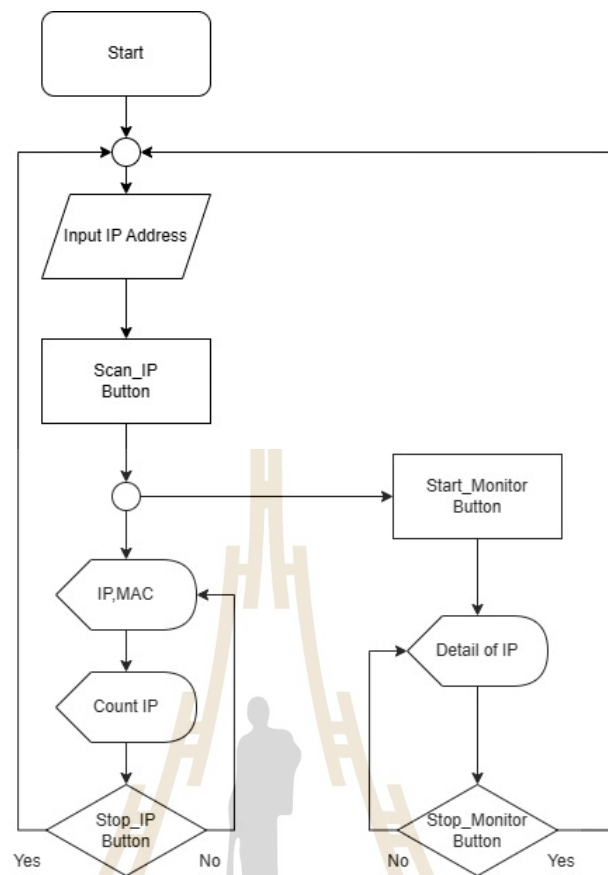
3) เมื่อโปรแกรมแสดงรายละเอียดหมายเลขไอพีที่ค้นหาได้เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะระบุจำนวนหมายเลขไอพี จำนวนอุปกรณ์เราเตอร์ จำนวนอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และจำนวนเครื่องลูกข่ายทั้งหมด

4) เมื่อต้องการหยุดค้นหาหมายเลขไอพี ให้กดปุ่ม “Stop_IP”

5) เมื่อต้องการติดตามหมายเลขไอพี ให้กดปุ่ม “Start_Monitor” โปรแกรมจะทำการตรวจสอบแต่ละหมายเลขไอพีที่ค้นหาได้

6) ในการติดตามหมายเลขไอพีนั้น โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่า แต่ละหมายเลขไอพียังอยู่ภายในโครงข่ายหรือไม่ ถ้ายังอยู่ในโครงข่าย โปรแกรมจะแสดงข้อความว่า “is available” หรือถ้าไม่ได้อยู่ในโครงข่ายแล้ว โปรแกรมจะแสดงข้อความว่า “is not available” และโปรแกรมจะระบุว่าแต่ละหมายเลขไอพีคืออุปกรณ์อะไร เช่น หมายเลขไอพี 192.168.1.32 คือหมายเลขไอพีของเครื่องลูกข่ายหมายเลข 2 โปรแกรมจะแสดงข้อความต่อท้ายหมายเลขไอพีนี้ว่า “WalkiePi 2” เป็นต้น

7) เมื่อต้องการหยุดการติดตามหมายเลขไอพี ให้กดปุ่ม “Stop_Monitor”



รูปที่ 3.48 แผนผังการทำงานของโปรแกรมเฝ้าระวัง

3.6 สรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในอาคาร เมื่อทำการทดสอบแล้วพบว่าระบบสื่อสารสามารถสื่อสารได้ดีในอาคาร และสายอากาศภายนอก (External Antenna) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสายอากาศภายใน (Internal Antenna) แต่การนำไปใช้งานจริงพบว่า สายอากาศภายนอกมีปัญหาในการใช้งาน ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สายอากาศภายในสำหรับการทดสอบ ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารภายในถ้ำจริง ผู้วิจัยจะนำเสนอในบทถัดไป นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับเฝ้าระวังภายในโครงข่าย เพื่อการตรวจสอบ เฝ้าระวัง และดูแลระบบให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 บทนำ

ในบทนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำ โดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ ที่รับได้สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด นำเสนอผลการทดสอบความแรงสัญญาณภาครับที่ต่ำสุดและสูงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้ นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz นำเสนอผลการพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และในลำดับสุดท้ายจะนำเสนอผลการทดสอบการพัฒนาระบบเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับใช้งานในระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ค่าความแรงสัญญาณภาครับสามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของความแรงสัญญาณของเครื่องส่ง ที่เครื่องปลายทางสามารถรับได้ ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะมีค่าติดลบเสมอ ยิ่งค่าความแรงสัญญาณมีค่าใกล้ศูนย์มากเท่าไร ประสิทธิภาพการสื่อสารจะยิ่งดีขึ้นมากเท่านั้น และในส่วนของค่าเวลาแฝงนั้น สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพในด้านความเร็วของการสื่อสาร ค่าเวลาแฝงจะเริ่มนับตั้งแต่ทำการส่งค่าปิงออกจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับที่อยู่ปลายทาง เมื่อเครื่องปลายทางรับค่าปิงแล้ว เครื่องปลายทางจะส่งค่าปิงกลับมายังเครื่องต้นทาง เครื่องต้นทางจะรู้ได้ทันทีว่าระยะเวลาในการส่งข้อมูลไปและกลับมีค่าเป็นเท่าไร ค่าเวลาแฝงจะมีค่าเป็นบวกเสมอ ยิ่งค่าเวลาแฝงมีค่าน้อยหรือใกล้ศูนย์มากเท่าไร ประสิทธิภาพความเร็วในการติดต่อสื่อสารก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงจะต้องมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ถ้าค่าความแรงสัญญาณภาครับมีค่ามาก ค่าเวลาแฝงต้องมีค่าน้อยตามลงไปด้วย

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้ โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ ที่รับได้สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในโครงข่ายทั้งหมด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Wavemon ในการตรวจวัดค่าสัญญาณ ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงข่ายในการทดสอบดังนี้ โดยเริ่มจากเราเตอร์ที่ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก (โนดหลัก) ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งแรกของโครงข่าย ต่อมาเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (โนดย่อย) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยใช้โนดย่อยจำนวน 2 โนด ได้แก่ โนดย่อยที่หนึ่งวางที่ตำแหน่งที่สองทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากเราเตอร์ และโนดย่อยที่สองวางที่ตำแหน่งที่สามทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง

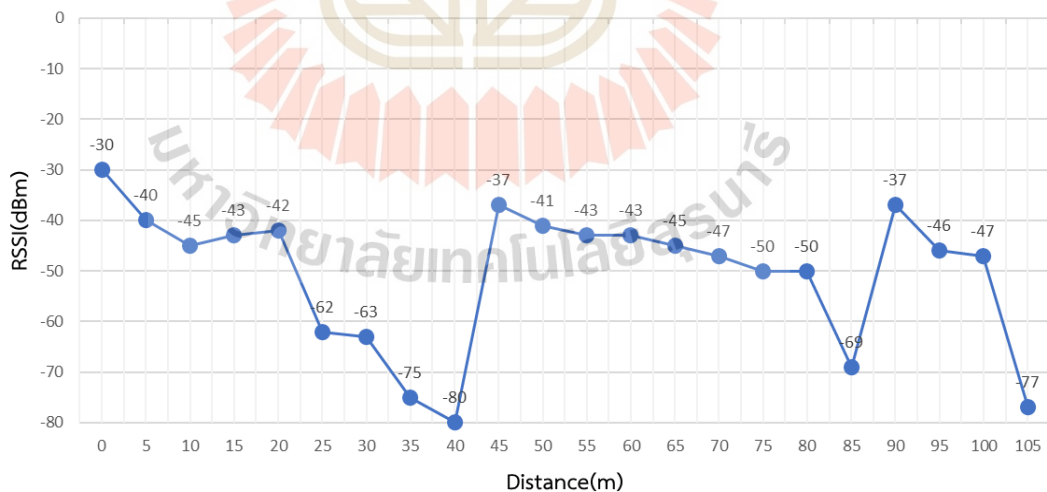
ขั้นตอนของการทดสอบ ผู้วิจัยให้เครื่องลูกข่ายภาคส่งอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับโนดหลัก จากนั้นผู้วิจัยจะนำเครื่องลูกข่ายภาครับที่ทำการลงซอฟต์แวร์ Wavemon ไว้สำหรับการตรวจวัดสัญญาณเคลื่อนที่ออกจากเครื่องลูกข่ายภาคส่งครั้งละ 5 เมตร จนกว่าเครื่องลูกข่ายทั้งสองจะไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ภายในโครงข่าย โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบภายในถ้ำป่าภูหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ผลการทดสอบได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำและค่าความแรงสัญญาณภาครับ

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

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในถ้ำและค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ต่อ)

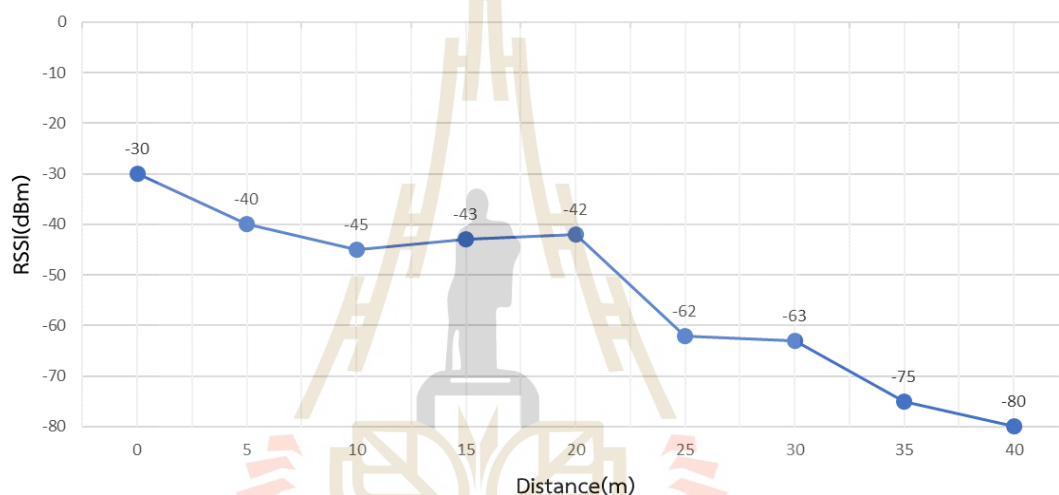
ลำดับโหนด	ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)
โหนดย่อยลำดับที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	45	-37
	50	-41
	55	-43
	60	-43
	65	-45
	70	-47
	75	-50
	80	-50
	85	-69
โหนดย่อยลำดับที่สอง (ทวนสัญญาณ)	90	-37
	95	-46
	100	-47
	105	-77



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm)

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 พบว่าระยะทางที่เครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่งสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ไกลที่สุด 105 เมตร ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

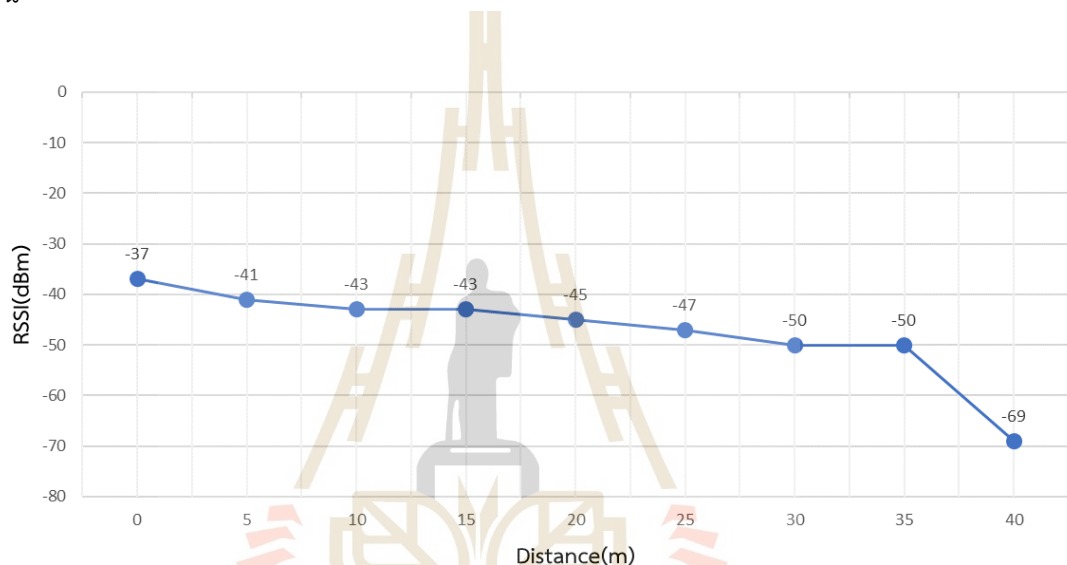
ช่วงที่หนึ่ง คือช่วงระยะทางที่ 0 เมตรถึงระยะทางที่ 40 เมตร เป็นช่วงระยะทางระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง เมื่อเครื่องลูกข่ายภาครับออกห่างจากเครื่องลูกข่ายภาคส่ง ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะมีคาลดลง โดยมีค่าต่ำสุดที่ระยะทางที่ 40 เมตร มีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ -80 dBm ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่ทำให้สิ้นสุดการสื่อสารของเครื่องลูกข่ายทั้งสองในช่วงระยะห่างระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 0 เมตรถึงระยะทางที่ 40 เมตร แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าความแรงสัญญาณภาครับในช่วงระยะทางการทดสอบระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่ง โดยที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองจะทำการรับส่งข้อมูลผ่านเครื่องเราเตอร์ โดยเริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองอยู่ที่เครื่องเราเตอร์ ทำให้มีค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดในช่วงการทดสอบนี้ที่ -30 dBm ต่อมาที่ระยะทางที่ 0 เมตร ถึง 20 เมตร เป็นช่วงที่เป็นแนวสายตาดังทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงค่อนข้างน้อยจากช่วงก่อนหน้า ต่อมาที่ระยะทาง 20 เมตร ถึง 40 เมตร เป็นช่วงระยะทางที่ถ้ามีลักษณะเพดานที่ต่ำและช่องทางเดินที่แคบ ทำให้ระยะทางในช่วงนี้มีผลต่อค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงจากช่วงก่อนหน้าอย่างมาก สามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้

ช่วงที่สอง คือช่วงระยะทางที่ 45 เมตรถึง 85 เมตร เป็นช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่หนึ่ง และโนดย่อยที่สอง เครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง จึงทำให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงการทดสอบนี้ เมื่อเครื่องลูกข่ายภาครับออกห่างจากโนดย่อยที่หนึ่ง ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะเริ่มลดลงอีกครั้ง โดยมีค่าต่ำสุดที่ระยะทางที่ 85 เมตรจากโนดหลัก มีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ -69 dBm ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดทำให้สิ้นสุดการสื่อสารของเครื่องลูกข่ายทั้งสองในช่วงระยะห่างระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 45 เมตรถึงระยะทางที่ 85 เมตร แสดงในรูปที่ 4.3 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

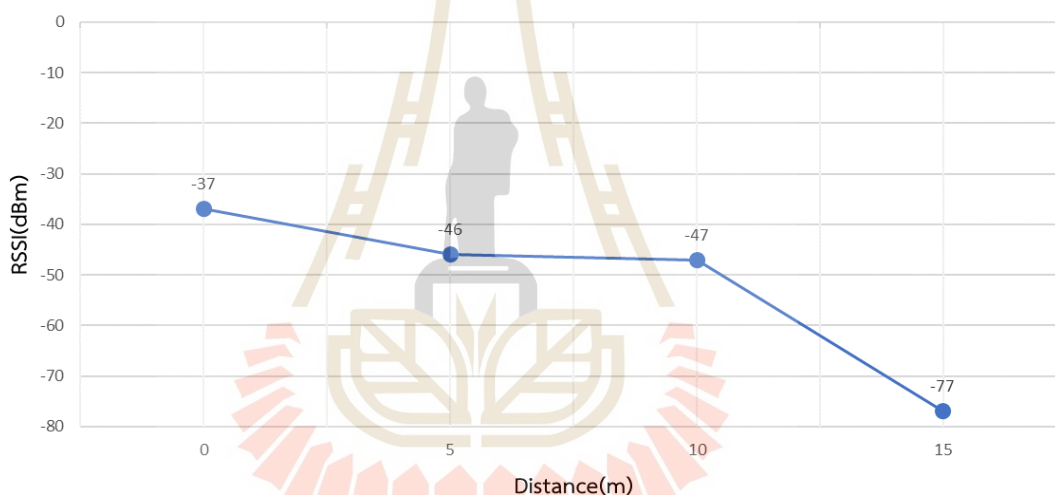


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าความแรงสัญญาณภาครับในช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่งผ่านโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง โดยที่เครื่องลูกข่ายภาคส่งอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับเราเตอร์ และเครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง โดยเริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร (ระยะทางที่ 45 เมตร จากจุดเริ่มต้น) เป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายภาครับอยู่ที่โนดย่อยที่หนึ่ง ทำให้มีค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงที่สุดในช่วงการทดสอบนี้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -37 dBm ต่อมาที่ระยะทางที่ 0 เมตร ถึง 35 เมตร เป็นช่วงที่เป็นแนวสายตาพื้นที่ถ้ำมีลักษณะเป็นโถงกว้างเพดานสูงจึงทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงจากช่วงก่อนหน้าค่อนข้างน้อย ต่อมาที่ระยะทาง 35 เมตร ถึง 40 เมตร เป็นช่วงที่ถ้ำมีลักษณะเพดาน

ที่ต่ำและช่องทางเดินที่แคบ ทำให้ระยะทางในช่วงนี้มีผลต่อค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงอย่างมากจากช่วงก่อนหน้า สามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้

และช่วงสุดท้ายที่ระยะทาง 90 เมตรถึง 105 เมตร เป็นช่วงระยะทางการสื่อสารระหว่างโนดย่อยที่สองและเครื่องลูกข่ายภาครับโดยตรง เครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่สอง จึงทำให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงการทดสอบนี้ เมื่อเครื่องลูกข่ายภาครับออกห่างจากโนดย่อยลำดับที่สอง ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะลดลง โดยมีค่าต่ำสุดที่ระยะทางที่ 105 เมตรจากโนดหลัก มีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ -77 dBm ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดทำให้สิ้นสุดการสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับ โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 90 เมตรถึงระยะทางที่ 105 เมตร แสดงในรูปที่ 4.4 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าความแรงสัญญาณภาครับ (dBm) ในช่วงของโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าความแรงสัญญาณภาครับในบริเวณพื้นที่กระจายสัญญาณของโนดย่อยที่สอง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่งผ่านโนดหลัก โนดย่อยที่หนึ่ง และโนดย่อยที่สอง ตามลำดับ โดยที่เครื่องลูกข่ายภาคส่งอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับเราเตอร์ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น และเครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่สอง โดยเริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร (ระยะทางที่ 90 เมตร จากจุดเริ่มต้น) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายภาครับอยู่ที่โนดย่อยที่สอง ทำให้มีค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดในช่วงการทดลองนี้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -37 dBm ต่อมาที่ระยะทางที่

0 เมตร ถึง 10 เมตร เป็นช่วงที่เป็นแนวสายตา พื้นที่ถ้ามีลักษณะเป็นโถงกว้างเพดานสูงเล็กน้อยจึงทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงจากช่วงก่อนหน้าค่อนข้างน้อย ต่อมาที่ระยะทาง 10 เมตร ถึง 15 เมตร ลักษณะของถ้ำในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นแนวสายตามีเพดานที่ไม่สูงมากนัก และมีน้ำขังเนื่องจากน้ำฝนไหลมาตามรอยแยกของหิน ทำให้พื้นที่ถ้ำในช่วงนี้รวมถึงเพดานถ้ำมีลักษณะที่ชื้น น้ำที่ขังอยู่ในบริเวณพื้นถ้ำและตามผนังถ้ำในช่วงนี้ส่งผลต่อการดูดซับคลื่น (Absorption) และส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Attenuation) ช่วงระยะทางในการทดสอบนี้จึงส่งผลให้ค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงอย่างมาก สามารถสังเกตได้จากความชื้นของกราฟในช่วงนี้

เนื่องจากระยะทางที่มากกว่า 15 เมตร (ระยะทาง 105 เมตร จากจุดเริ่มต้น) พื้นที่ของถ้ำจะเป็นลักษณะเลี้ยวโค้ง ทำให้เครื่องลูกข่ายภาครับไม่สามารถรับสัญญาณจากโนดย่อยที่สองได้ ผู้วิจัยจึงหยุดการทดสอบ โดยมีระยะทางจากจุดเริ่มต้นรวมเป็นระยะทาง 105 เมตร จากการทดสอบที่ผ่านมาเป็นระยะทางทั้งหมด 105 เมตร จะเห็นได้ว่า เมื่อมีระยะทางมากขึ้นจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณไม่ว่าจะเป็นโนดหลักหรือโนดย่อย ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงสรุปได้ว่า ค่าความแรงสัญญาณภาครับแปรผกผันกับระยะทาง

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หนึ่งจุด

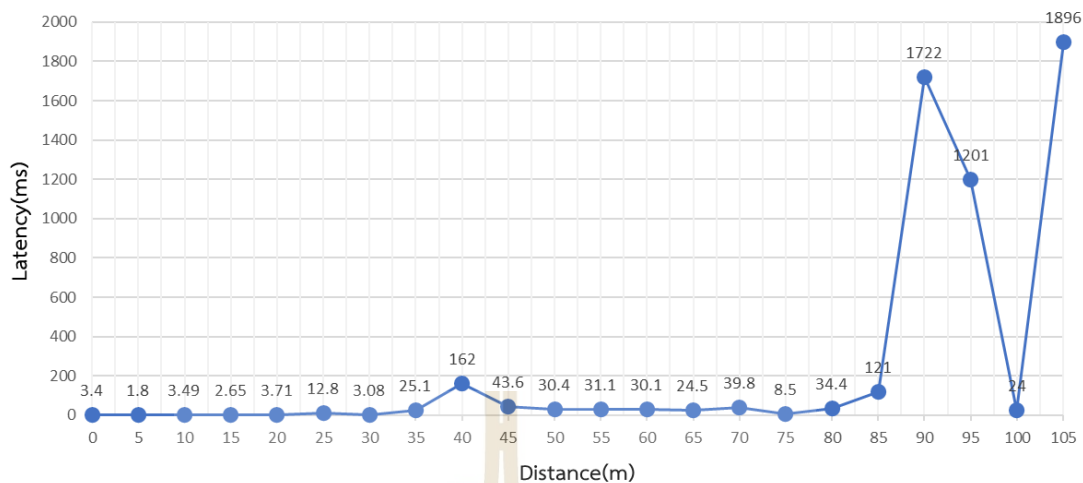
ในการทดสอบผู้วิจัยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในโครงข่ายทั้งหมด ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงข่ายการทดสอบนี้ โดยเริ่มจากเราเตอร์ที่ทำหน้าที่กระจายสัญญาณหลัก (โนดหลัก) ซึ่งเป็นตำแหน่งแรกของโครงข่าย ต่อมาเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (โนดย่อย) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยใช้โนดย่อยจำนวน 2 โนด ได้แก่ โนดย่อยที่หนึ่งวางที่ตำแหน่งที่สองทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากเราเตอร์ และโนดย่อยที่สองวางที่ตำแหน่งที่สามทำหน้าที่ทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.31

ขั้นตอนของการทดสอบ ผู้วิจัยให้เครื่องลูกข่ายภาคส่งอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับโนดหลักซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบ จากนั้นผู้วิจัยจะนำเครื่องลูกข่ายภาครับเคลื่อนที่ออกจากเครื่องลูกข่ายภาคส่งครั้งละ 5 เมตร เพื่อหาเวลาแฝงที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ภายในโครงข่ายทั้งหมด โดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝง ผู้วิจัยจะใช้คำสั่ง ping ในการทดสอบ คำสั่ง ping เป็นการส่งข้อมูลขนาดเล็กไปยังเครื่องปลายทาง จากนั้นเครื่องปลายทางจะส่งข้อมูลนั้นกลับมา มีหน่วยเป็น

มิลลิวินาที (millisecond, ms) ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบภายในลำปาฏิหาริย์ อ.โงงเจียม จ.อุบลราชธานี ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางโดยรวมภายในลำ (เมตร) และค่าเวลาแฝง (ms)

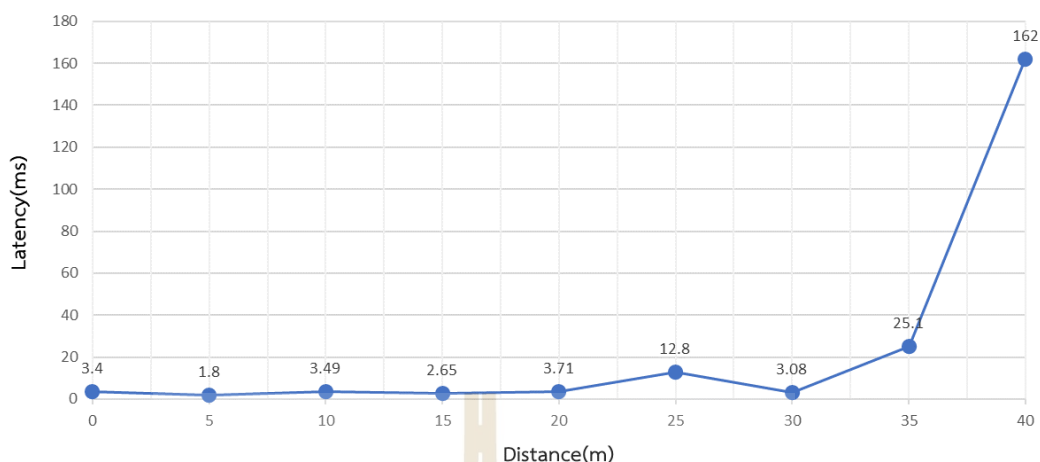
โนด	ระยะทาง (เมตร)	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	0	3.40
	5	1.80
	10	3.49
	15	2.65
	20	3.71
	25	12.80
	30	3.08
	35	25.10
	40	162.00
โนดย่อยที่หนึ่ง (ทวนสัญญาณ)	45	43.60
	50	30.40
	55	31.10
	60	30.10
	65	24.50
	70	39.80
	75	8.50
	80	34.40
	85	121.00
โนดย่อยที่สอง (ทวนสัญญาณ)	90	1722.00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



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าเวลาแฝง (ms)

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 เป็นผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลาแฝง มีระยะการทดสอบรวมทั้งหมด 105 เมตร จากจุดเริ่มต้น ผู้วิจัยจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

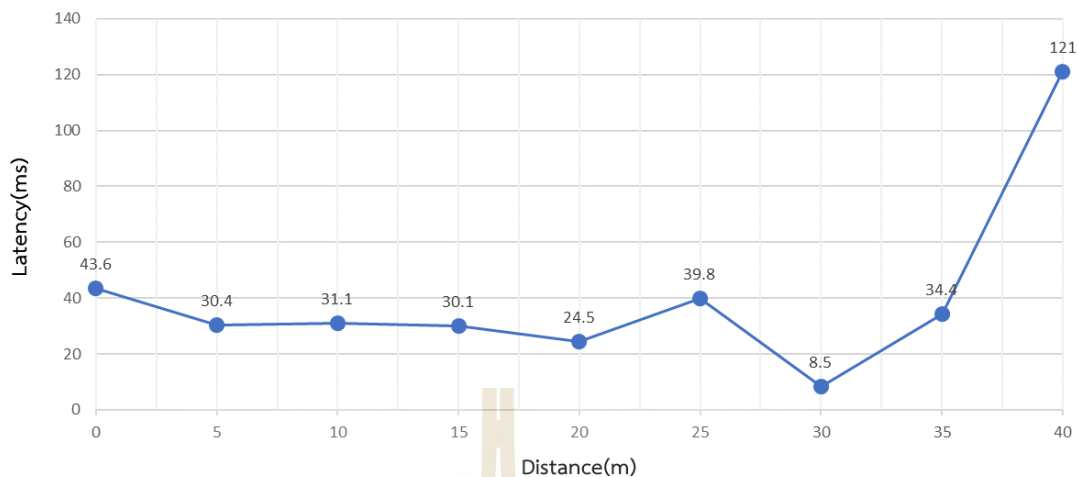
ช่วงที่หนึ่ง คือช่วงระยะทางที่ 0 เมตรถึงระยะทางที่ 40 เมตร เป็นช่วงระยะทางระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง มีค่าเวลาแฝงมากที่สุด 162 ms ที่ระยะทาง 40 เมตร ซึ่งเป็นค่าเวลาที่หน่วงมากที่สุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จึงสิ้นสุดการสื่อสารของเครื่องลูกข่ายทั้งสอง ในช่วงระยะทางระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 0 เมตรถึงระยะทางที่ 40 เมตร แสดงในรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าเวลาแฝงในช่วงระยะทางระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่ง โดยที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองจะทำการรับส่งข้อมูลจากเครื่องเราเตอร์ โดยเริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร เป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายทั้งสองอยู่ที่เครื่องเราเตอร์ ทำให้มีค่าเวลาแฝงที่ 3.4 ms ต่อมาที่ระยะทางที่ 0 เมตร ถึง 35 เมตร เป็นช่วงที่ถ้ำมีลักษณะเป็นแนวสายตาจึงทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าเวลาแฝงมีค่าขึ้นลงเล็กน้อย ระยะทางในช่วงนี้สามารถติดต่อสื่อสารได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง ต่อมาที่ระยะทาง 35 เมตร ถึง 40 เมตร เป็นช่วงที่ถ้ำมีลักษณะเพดานที่ต่ำและช่องทางเดินที่แคบ ทำให้ระยะทางในช่วงนี้มีผลต่อค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมาก สามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้

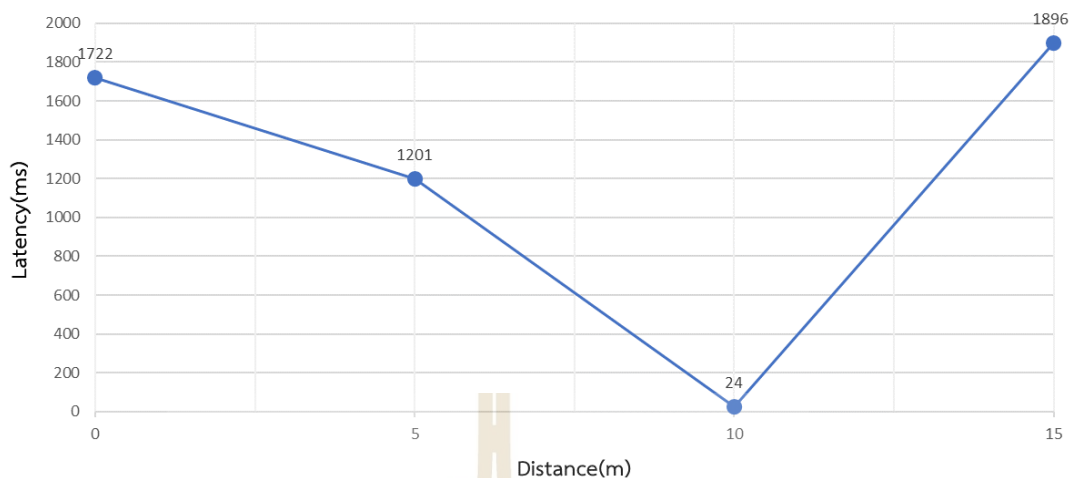
ช่วงที่สอง คือช่วงระยะทางที่ 45 เมตรถึง 85 เมตร เป็นช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง เครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง ซึ่งมีค่าเวลาแฝงมากที่สุด 121 ms ที่ระยะทาง 85 เมตร ซึ่งเป็นค่าเวลาที่หน่วงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จึงสิ้นสุดการสื่อสารของเครื่องลูกข่ายทั้งสองในช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 45 เมตรถึงระยะทางที่ 85 เมตร แสดงในรูปที่ 4.7 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าเวลาแฝงในช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่ง โดยที่เครื่องลูกข่ายภาครับจะรับสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง เริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร (ระยะทางที่ 45 เมตร จากจุดเริ่มต้น) เป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายภาครับอยู่ที่เดียวกับโนดย่อยที่หนึ่ง ทำให้มีค่าเวลาแฝงที่ 43.6 ms ต่อมาที่ระยะทางที่ 0 เมตร ถึง 35 เมตร เป็นช่วงที่ถ้ำเป็นลักษณะแนวสายตาจึงทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าเวลาแฝงมีค่าขึ้นลงเล็กน้อย แต่เนื่องจากระยะทางรวมจากเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับมีค่ามากกว่าก่อนหน้า จึงทำให้มีค่าเวลาแฝงสูงกว่าช่วงก่อนหน้า ต่อมาที่ระยะทาง 35 เมตร ถึง 40 เมตร เป็นช่วงที่ถ้ำมีลักษณะเป็นเพดานต่ำ ทำให้ระยะทางในช่วงนี้มีผลต่อค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมาก สามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้

และช่วงสุดท้ายที่ระยะทาง 85 เมตรถึง 105 เมตร เป็นช่วงระยะทางระหว่างโนดย่อยที่สองและเครื่องลูกข่ายภาครับ เครื่องลูกข่ายภาครับจะเปลี่ยนมารับสัญญาณจากโนดย่อยที่สอง ซึ่งจะมีค่าเวลาแฝงมากที่สุด 1,896 ms ที่ระยะทาง 105 เมตร ซึ่งเป็นค่าเวลาที่หน่วงที่สุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จึงสิ้นสุดการสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับ โดยเมื่อพิจารณากราฟในช่วงระยะทางที่ 85 เมตรถึงระยะทางที่ 105 เมตร แสดงในรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (m) โดยรวมภายในถ้ำ และค่าเวลาแฝง (ms) ในช่วงของโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางที่มีผลต่อค่าเวลาแฝงในช่วงระยะทางของโนดย่อยที่สอง เป็นการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายภาครับและเครื่องลูกข่ายภาคส่ง โดยที่เครื่องลูกข่ายภาครับจะรับสัญญาณจากโนดย่อยที่สอง โดยเริ่มจากระยะทางที่ 0 เมตร (ระยะทางที่ 90 เมตร จากจุดเริ่มต้น) เป็นตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายภาครับอยู่ที่เดียวกับโนดย่อยที่สอง ทำให้มีค่าเวลาแฝงที่ 1,722 ms ต่อมาที่ระยะทางที่ 0 เมตร ถึง 10 เมตร เป็นช่วงที่เป็นแนวสายตาดิ่งทำให้ระยะทางมีผลให้ค่าเวลาแฝงมีค่าลดลงอย่างมาก ต่อมาที่ระยะทาง 10 เมตร ถึง 15 เมตร ถึงแม้ลักษณะของถ้ำในช่วงนี้จะเส้นแนวสายตาแต่มีเพดานที่ไม่สูงมากนัก และมีน้ำขังเนื่องจากน้ำฝนไหลมาตามรอยแยกของหิน ทำให้พื้นที่ถ้ำในช่วงนี้รวมถึงเพดานถ้ำมีลักษณะที่ขรุขระ น้ำที่ขังอยู่ในบริเวณพื้นถ้ำและตามผนังถ้ำในช่วงนี้ส่งผลต่อการดูดซับคลื่น (Absorption) และส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Attenuation) ทำให้ระยะทางในช่วงนี้ส่งผลให้ค่าเวลาแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมาก สามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้ และเนื่องจากระยะทางรวมจากเครื่องลูกข่ายภาคส่งและเครื่องลูกข่ายภาครับมีค่ามากกว่าสองช่วงการทดสอบก่อนหน้านี้ก่อนหน้านี้ ทำให้ค่าเวลาแฝงสูงกว่าสองช่วงก่อนหน้านี้ด้วย

เนื่องจากระยะทางที่มากกว่า 15 เมตร (ระยะทาง 105 เมตร จากจุดเริ่มต้น) ทางเดินภายในถ้ำมีลักษณะเป็นทางโค้งไปตามผนังถ้ำ ทำให้เครื่องลูกข่ายภาครับไม่สามารถรับสัญญาณจากโนดย่อยที่สองได้ ผู้วิจัยจึงหยุดการทดสอบ โดยมีระยะทางจากจุดเริ่มต้นรวมเป็นระยะทาง 105 เมตร

จากการทดสอบที่ผ่านมาเป็นระยะทางทั้งหมด 105 เมตร จะเห็นได้ว่า เมื่อมีระยะทางมากขึ้นจากอุปกรณ์กระจายสัญญาณไม่ว่าจะเป็นโนดหลักหรือโนดย่อย ค่าเวลาแฝงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงสรุปได้ว่า ค่าเวลาแฝงแปรผันตรงกับระยะทาง

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่รับได้สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด

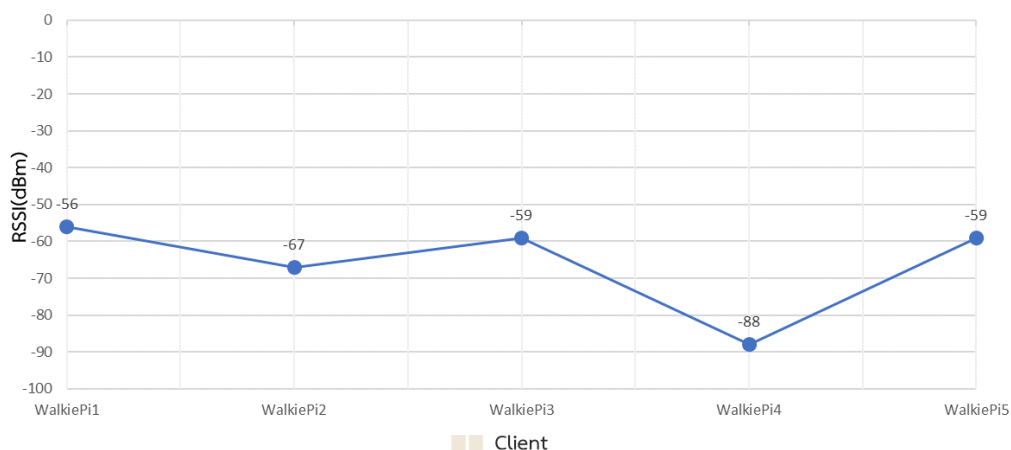
ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่หลายจุด ผู้วิจัยจะแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก และผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

4.4.1 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

ในขั้นตอนของการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจะนำเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่อง โดยกำหนดชื่อเรียกของเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องว่า “WalkiePi” แล้วตามด้วยหมายเลขของเครื่อง เช่น เครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่ง จะมีชื่อเรียกว่า “WalkiePi1” เป็นต้น โดยเครื่องลูกข่ายทั้ง 5 เครื่อง จะวางอยู่บริเวณโนดหลัก ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 และผลการทดสอบค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

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



รูปที่ 4.9 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

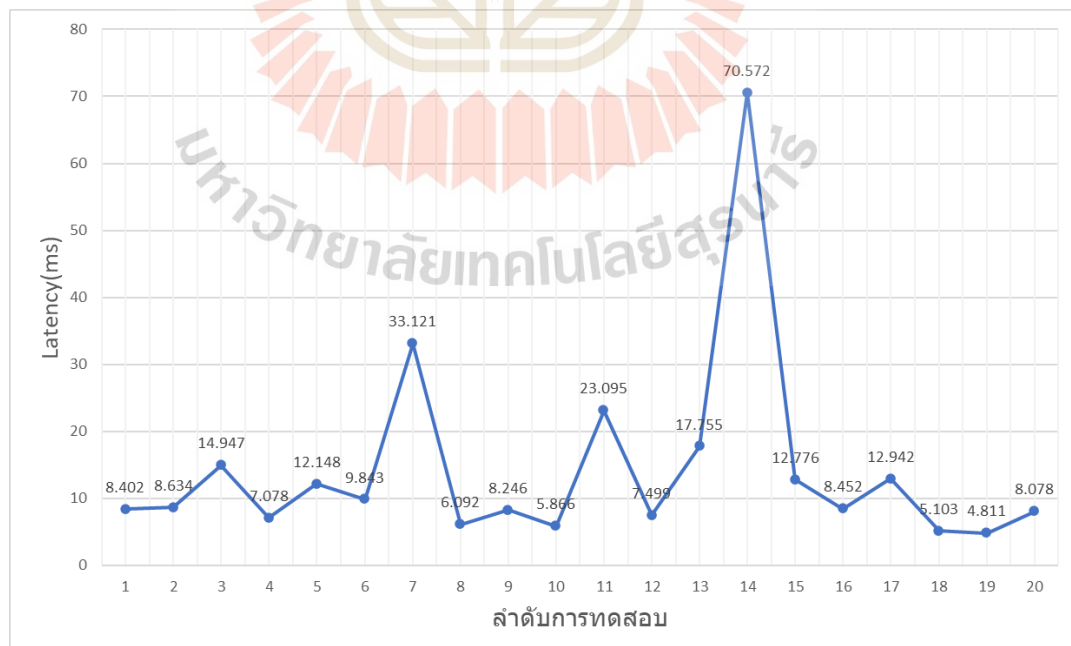
จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก พบว่า ลูกข่ายหมายเลขสี่ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงของเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ พบว่าสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายเครื่องอื่นได้ปกติ ซึ่งแสดงว่าถึงมีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ต่ำ แต่ยังสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงกับเครื่องลูกข่ายเครื่องอื่นได้

ตารางที่ 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

โนด	ลำดับที่การทดสอบ	เครื่องลูกข่ายภาคส่ง	เครื่องลูกข่ายภาครับ	ค่าเวลาแฝง (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

ตารางที่ 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก (ต่อ)

โนด	ลำดับที่การทดสอบ	เครื่องลูกข่ายภาคส่ง	เครื่องลูกข่ายภาครับ	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	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 4.10 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝง สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก พบว่าลำดับการทดสอบที่ 14 มีค่าเวลาแฝงสูงที่สุดอยู่ที่ 70.572 ms ซึ่งเป็นการส่งค่าปิงระหว่างเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ไปยังเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงระหว่างเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่และเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง พบว่าเครื่องลูกข่ายทั้งสองยังสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงได้

4.4.2 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

ในการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง ผู้วิจัยได้นำเครื่องลูกข่ายจำนวน 5 เครื่อง ไปวางไว้ประจำจุด 2 จุด โดยจุดแรกคือตำแหน่งของโนดหลัก มีเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งและเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ประจำที่จุดนี้ และจุดที่สองคือตำแหน่งของโนดย่อยที่หนึ่ง มีเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง เครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม และเครื่องลูกข่ายหมายเลขห้า ประจำที่จุดนี้

ผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก ผู้วิจัยได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4.5 และกราฟในรูปที่ 4.11 นำเสนอผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยที่หนึ่งในตารางที่ 4.6 และในกราฟรูปที่ 4.12 และได้นำเสนอผลการทดสอบการสื่อสารแบบหลายจุดด้วยค่าเวลาแฝง ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง ในตารางที่ 4.7 และกราฟในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสารไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

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

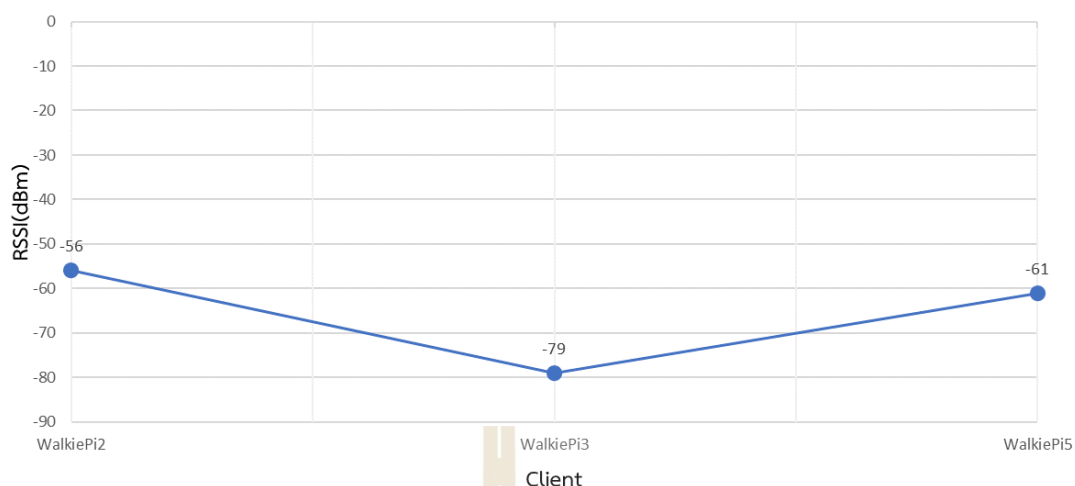


รูปที่ 4.11 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดหลัก โดยลูกข่ายทั้งสองจะวางห่างจากโนดหลักเป็นระยะทาง 10 เมตร และ 20 เมตร ตามลำดับ พบว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงของเครื่องลูกข่ายหมายเลขสี่ พบว่าสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายหมายเลขหนึ่งได้ ซึ่งแสดงว่าถึงมีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ต่ำ แต่ยังสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงได้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงด้วยโครงข่ายสื่อสารไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยที่หนึ่ง

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



รูปที่ 4.12 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยลำดับที่หนึ่ง

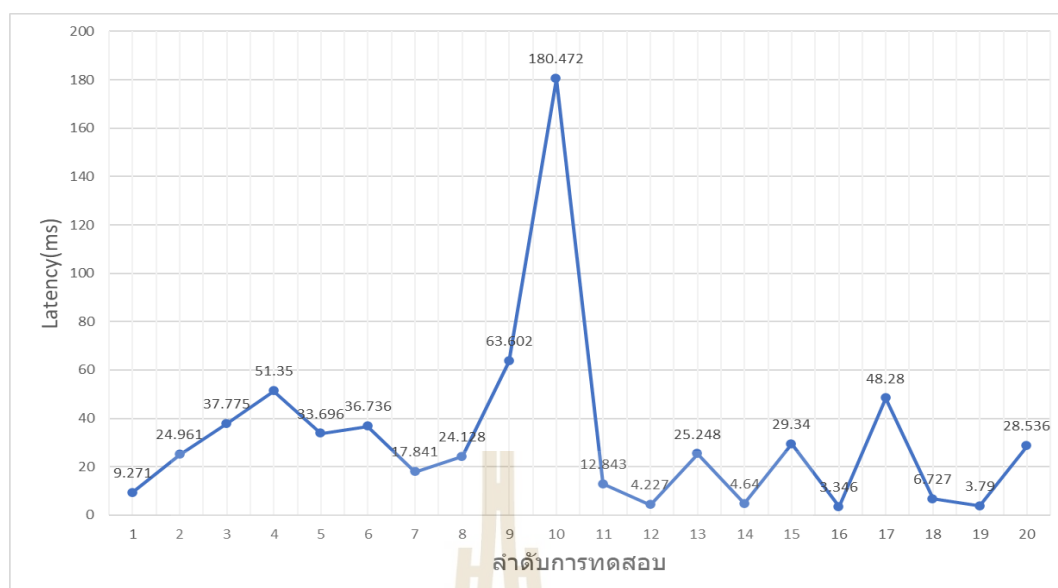
จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในย่อยลำดับที่หนึ่ง โดยเครื่องลูกข่ายทั้งสามเครื่องจะวางห่างจากโนดย่อยเป็นระยะทาง 30 เมตร 40 เมตร และ 50 เมตร ตามลำดับ พบว่าเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม มีค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงของเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม พบว่าสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายหมายเลขสองและเครื่องลูกข่ายหมายเลขห้าได้ ซึ่งแสดงว่าถึงมีค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ต่ำ แต่ยังสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงได้ปกติ กล่าวคือ ถึงแม้ว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับจะใกล้เคียง -80 dBm แต่เครื่องลูกข่ายยังสามารถพูดและฟังเสียงสนทนาระหว่างลูกข่ายได้ค่อนข้างชัดเจนและใกล้เคียงกับเวลาจริงในการสนทนา

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วยค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

โนด	ลำดับที่การทดสอบ	เครื่องลูกข่าย	เครื่องลูกข่าย	ค่าเวลาแฝง (ms)
โนดหลัก (เราเตอร์และเครื่องแม่ข่าย)	1	WalkiePi1	WalkiePi2	9.271
	2		WalkiePi3	24.961
	3		WalkiePi4	37.775
	4		WalkiePi5	51.350

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย
 ค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง (ต่อ)

โนด	ลำดับที่การทดสอบ	เครื่องลูกข่าย	เครื่องลูกข่าย	ค่าเวลาแฝง (ms)
	5	WalkiePi4	WalkiePi1	33.696
	6		WalkiePi2	36.736
	7		WalkiePi3	17.841
	8		WalkiePi5	24.128
โนดย่อยที่หนึ่ง (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 4.13 กราฟผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารด้วยเสียงผ่านโครงข่ายไร้สายด้วย
ค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย โดยพิจารณาจากค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดหลักและโนดย่อยที่หนึ่ง พบว่าลำดับการทดสอบที่ 10 มีค่าเวลาแฝงมากที่สุด ซึ่งเป็นการส่งค่า ping จากเครื่องลูกข่ายหมายเลขสองไปยังเครื่องลูกข่ายหมายเลขสาม ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงของเครื่องลูกข่ายหมายเลขสอง พบว่าสามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายเครื่องอื่นได้ ซึ่งแสดงว่าถึงมีค่าเวลาแฝงหรือเวลาหน่วงที่ค่อนข้างสูง แต่ยังสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงได้ กล่าวคือ ถึงแม้ว่าค่าเวลาแฝงจะมีค่าที่สูงกว่า 100 ms แต่เป็นค่าที่สูงเพียงค่าเดียว ดังนั้นเครื่องลูกข่ายยังสามารถพูดและฟังเสียงสนทนาระหว่างลูกข่ายได้ค่อนข้างชัดเจนและใกล้เคียงกับเวลาจริงในการสนทนา

4.5 ผลการทดสอบความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้

ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โดยใช้พิจารณาด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้

ขั้นตอนการทดสอบ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบในพื้นที่ถ้าป่าภูหริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี โดยเริ่มแรกผู้วิจัยจะนำโนดหลักและเครื่องลูกข่ายจำนวนหนึ่งเครื่องไว้ที่ตำแหน่งเดียวกัน ภายในถ้า

บริเวณทำที่เป็นโง้งโล่ง จากนั้นทำการวัดทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้จากโนดหลัก และค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดที่โนดหลักสามารถรับได้จากเครื่องลูกข่าย ต่อมาผู้วิจัยจะทำการเคลื่อนย้ายเครื่องลูกข่ายให้ออกห่างจากโนดหลัก เพื่อหาตำแหน่งก่อนที่เครื่องลูกข่ายจะไม่สามารถรับสัญญาณจากโนดหลักได้ เมื่อได้ตำแหน่งแล้วผู้วิจัยจะทำการวัดทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับของโนดหลักที่ตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม จากนั้นผู้วิจัยทำการย้ายเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปที่ตำแหน่งของโนดหลักเพื่อวัดทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่าย

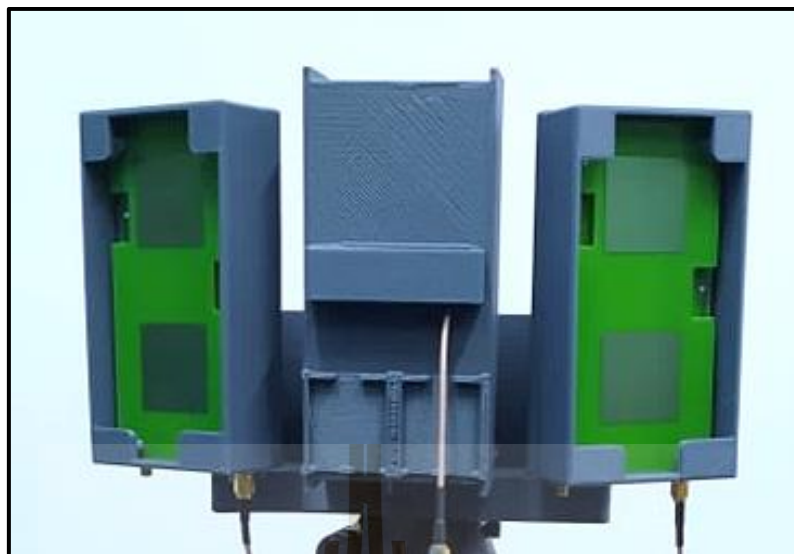
ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดของโนดหลักที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -32.9 dBm ที่ความถี่ 2.499 GHz และผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดของโนดหลักที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -21.8 dBm ที่ความถี่ 2.499 GHz

ผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดของเครื่องลูกข่ายที่โนดหลักสามารถรับได้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -21.1 dBm ที่ความถี่ 2.409 GHz และผลการทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดของเครื่องลูกข่ายที่โนดหลักสามารถรับได้ มีค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -23.4 dBm ที่ความถี่ 2.409 GHz

จากผลการทดสอบความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายและโนดหลักสามารถรับได้ พบว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับมีค่าลดลงตามระยะทางที่มากขึ้น สังเกตได้จากค่าความแรงสัญญาณภาครับสูงสุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับจากโนดหลักได้อยู่ที่ -21.8 dBm เมื่อเครื่องลูกข่ายออกห่างจากโนดหลัก ค่าความแรงสัญญาณภาครับต่ำสุดที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้จากโนดหลักจะอยู่ที่ -32.9 dBm ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับแปรผกผันกับระยะทาง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบก่อนหน้านี้เป็นการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับด้วยซอฟต์แวร์ Wavemon

4.6 ผลการพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

ในการพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือโนดย่อย ผู้วิจัยได้พัฒนาสายอากาศของอุปกรณ์ทวนสัญญาณให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในถ้ำ เดิมทีแล้วอุปกรณ์ทวนสัญญาณมีสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง ไม่สามารถปรับทิศทางได้ ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาสายอากาศของอุปกรณ์ทวนสัญญาณให้สามารถปรับทิศทางได้ในระนาบแนวระนาบ เพื่อให้สามารถกระจายสัญญาณไปในโพรงถ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14

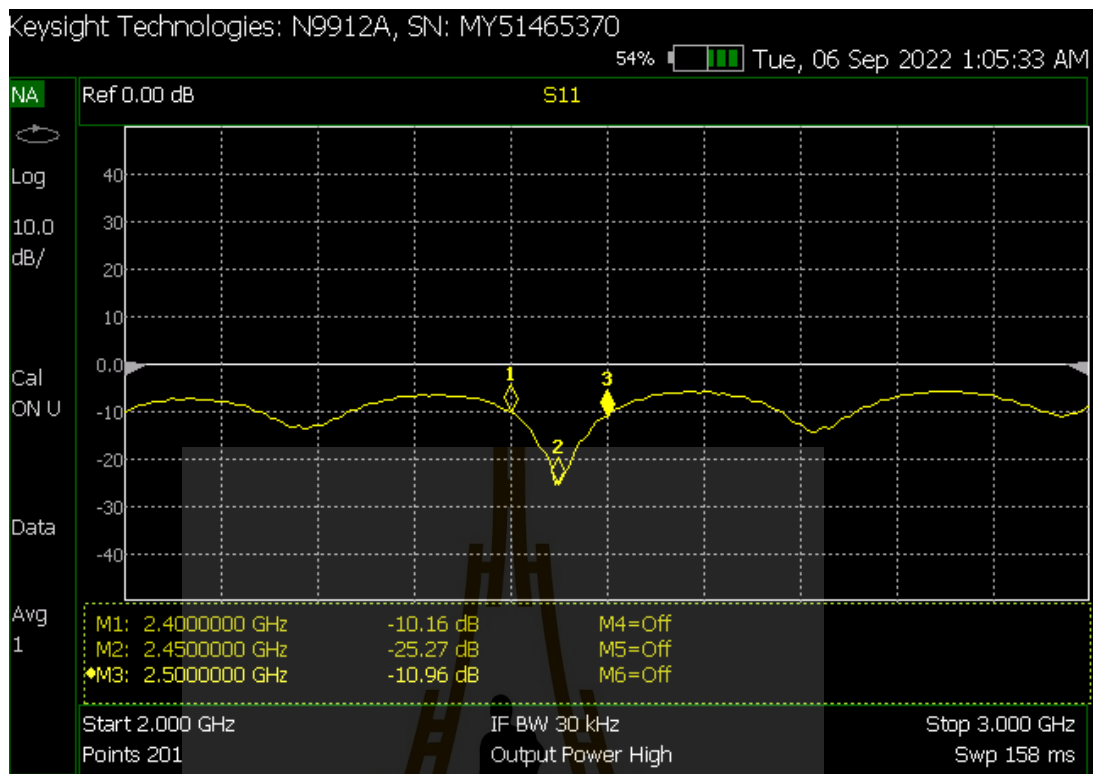


รูปที่ 4.14 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาแล้ว

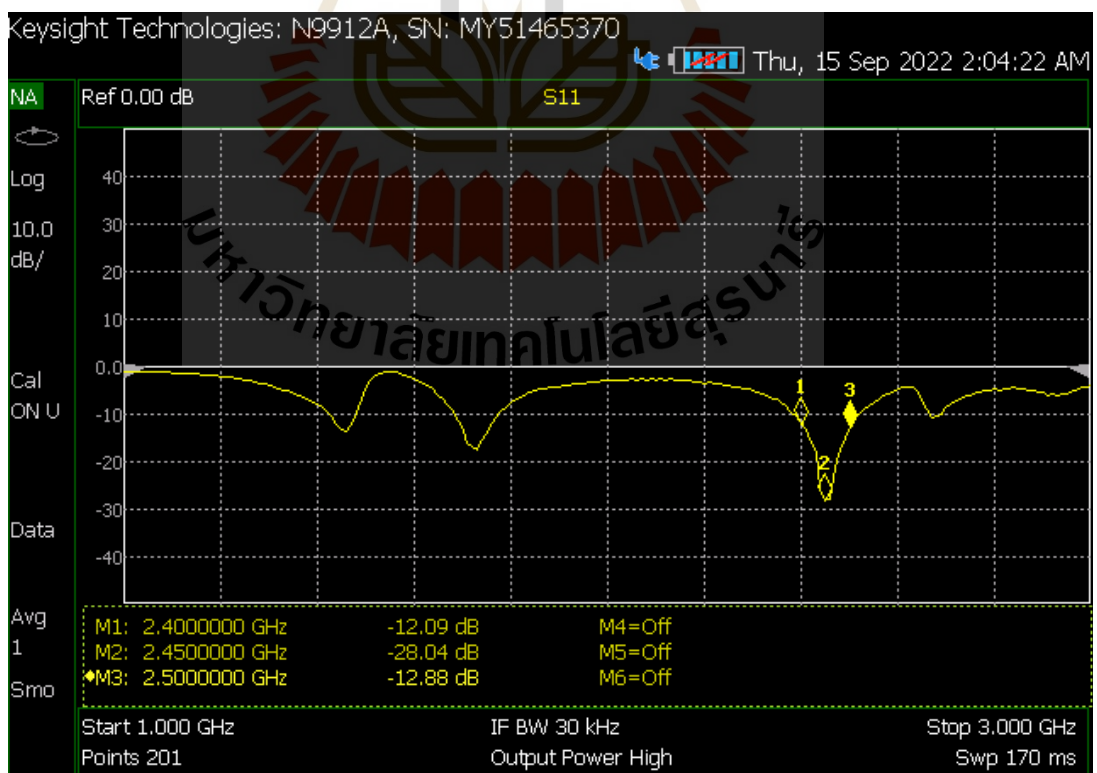
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ ผลการเปรียบเทียบค่าความแรงสัญญาณสองโพลาริซ และผลการทดสอบเพิ่มกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ ในการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับและการวัดผลทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน ผู้วิจัยใช้เครื่อง Keysight FieldFox N9912A ทำการทดสอบที่ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.6.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -25.27 dB แสดงในรูปที่ 4.15 และผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศใหม่ มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ -28.04 dB แสดงในรูปที่ 4.16 จะสังเกตได้ว่าสายอากาศต้นแบบและสายอากาศใหม่ มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ 2.45 GHz หรือช่องความถี่ที่ 9 ของความถี่ Wi-Fi



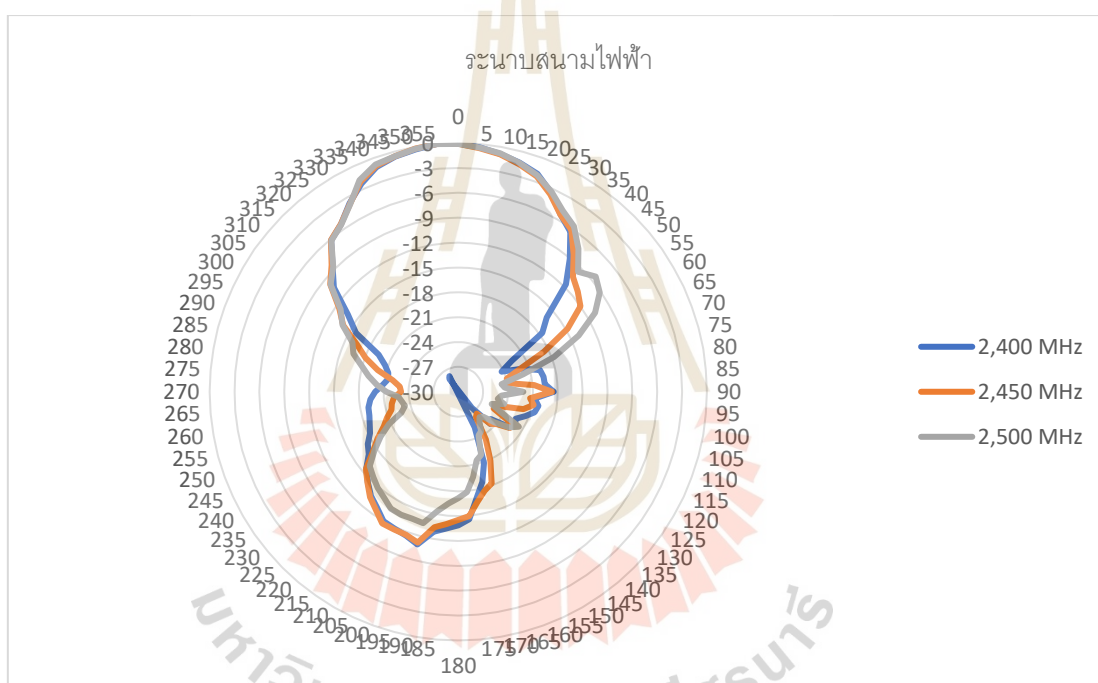
รูปที่ 4.15 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบ



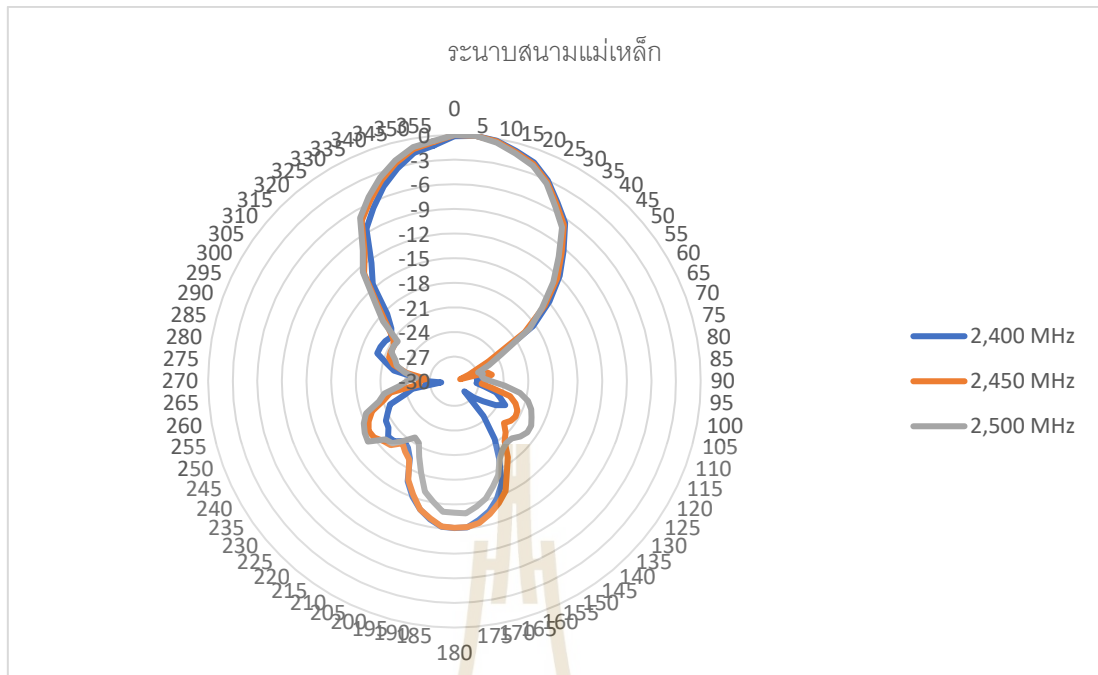
รูปที่ 4.16 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่

4.6.2 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน

ผลการทดสอบการแผ่ของคลื่น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานในสองระนาบได้แก่ ระนาบสนามไฟฟ้า (Electric Field) และระนาบสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งผลการทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ประมาณ 45 องศา เมื่อพิจารณาจากลำคลื่นหลักที่ตำแหน่ง 0 องศา โดยใช้จุดที่กำลังงานลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half-power Beamwidth) เป็นจุดพิจารณาความกว้างลำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และในระนาบสนามแม่เหล็กใช้หลักพิจารณาเดียวกันกับระนาบสนามไฟฟ้า ดังนั้นระนาบสนามแม่เหล็กจึงมีความกว้างลำคลื่นประมาณ 40 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel



รูปที่ 4.17 แบบจำลองระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่



รูปที่ 4.18 แบบจำลองระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่สร้างขึ้นใหม่

4.6.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความแรงสัญญาณสองโพลาไรซ์

เนื่องจากสายอากาศเป็นแบบสองโพลาไรซ์ คือ โพลาไรซ์แนวระนาบ (Horizontal polarization) และโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical polarization) ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบค่าความแรงสัญญาณที่รับได้และค่าความแรงสัญญาณที่ส่งออกได้ทั้งสองโพลาไรซ์ของสายอากาศโดยใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณจำนวนสองชุดในการทดสอบวัดค่ากำลังที่รับได้และค่ากำลังที่ส่งได้ที่ระยะทาง 3 เมตร พบว่าขั้วที่อยู่ด้านขวาเป็นขั้วของโพลาไรซ์แนวระนาบ และขั้วที่อยู่ฝั่งซ้ายเป็นโพลาไรซ์แนวตั้ง ซึ่งผลทดสอบวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับส่งได้ทั้งสองโพลาไรซ์ ซึ่งแสดงไว้ตามตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ของสายอากาศทั้งโพลาไรซ์แนวระนาบ (Horizontal) และโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical) ของขั้วด้านขวา

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

ตารางที่ 4.9 ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ของสายอากาศทั้งโพลาริซแนวระนาบ (Horizontal) และ โพลาริซแนวดิ่ง (Vertical) ของขั้วด้านซ้าย

โพลาริเซชัน	ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้ (dBm)	ค่าความแรงสัญญาณที่ส่งได้แบบเพิ่มกำลัง (dBm)
Horizontal	-62	-31
Vertical	-54	-35

จากการทดสอบตามตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 ผู้วิจัยจึงใช้ขั้วด้านขวาซึ่งเป็น ขั้วของโพลาริซแนวระนาบเพียงขั้วเดียว เนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังให้กับสายอากาศแล้ว สามารถเพิ่ม ความสามารถในการรับส่งสัญญาณได้มากกว่าขั้วด้านซ้ายที่เป็นโพลาริซแนวดิ่ง ในส่วนต่อมาเป็นส่วน ของบอร์ดประมวลผลของสายอากาศ เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการใช้เพียงแค่ขั้วด้านขวา ผู้วิจัยได้ทำการ ทดสอบค่าความต้านทาน (Impedance) ของสายอากาศพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 12-18 โอห์ม ผู้วิจัยจึง นำตัวต้านทางขนาด 15 โอห์มมาบัดกรีเข้ากับขั้วด้านซ้ายเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณ และเนื่องจากบอร์ดประมวลผลของสายอากาศมีกราวด์อยู่ภายในบอร์ด ผู้วิจัยจึงนำแผ่นทองแดงมา ติดที่บอร์ดเพื่อสร้างกราวด์ไว้สำหรับบัดกรีโดยแผ่นทองแดงจะถูกบัดกรีเข้ากับขั้วกราวด์ที่ด้านล่าง ของบอร์ดประมวลผลของสายอากาศเพื่อลดการสูญเสียภายในสายดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่

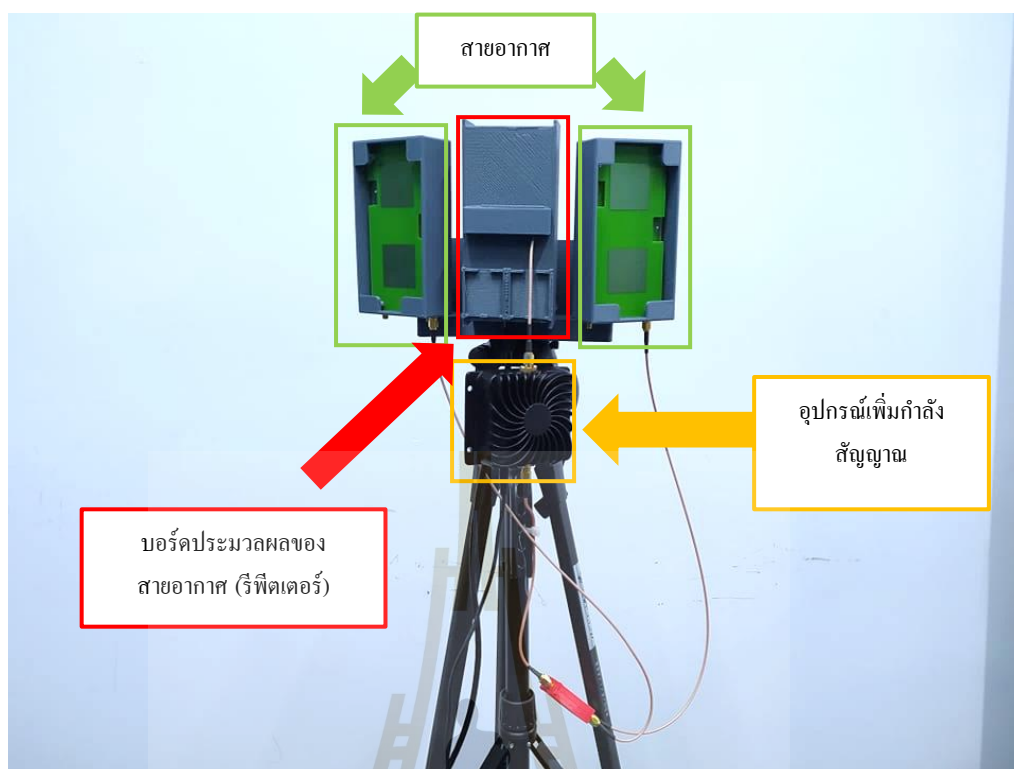
4.6.4 ผลการทดสอบเพิ่มกำลังสัญญาณของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความแรงสัญญาณที่รับได้ของสายอากาศในที่โล่งแจ้งที่เส้นทางเป็นเส้นแนวสายตา (Line of sight) เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณได้อย่างเหมาะสมและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้จริง ซึ่งการทดสอบจะทำการทดสอบระหว่างเราเตอร์กับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และอุปกรณ์ทวนสัญญาณกับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นเมื่อไม่มีและมีอุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกแสดงในตารางที่ 4.10 และตัวอย่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ แสดงในรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบเราเตอร์และอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่มีการใช้และไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

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

จากตารางผลการทดสอบตามตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณสามารถเพิ่มความสามารถในการรับส่งของสายอากาศได้ประมาณ 30 dBm และยังสามารถเพิ่มระยะทางในการรับส่งได้มากกว่า 300 เมตร



รูปที่ 4.20 อุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานจริงภายในถ้ำ

4.7 ผลการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้งานในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ การเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้งานในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สำหรับถ้ำป่าภูทิวและถ้ำเชียงดาว ผู้วิจัยแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับ และผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย และผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับและผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบโดยใช้รูปแบบการทดสอบเดียวกันสำหรับถ้ำทั้งสองแห่ง โดยกำหนดให้ตำแหน่งแรกหรือจุดเริ่มต้นเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่หนึ่ง (โนดย่อยที่หนึ่ง) ซึ่งทำการทวนสัญญาณจากโนดหลัก ตำแหน่งที่สองเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่สอง (โนดย่อยที่สอง) ทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง และตำแหน่งที่สามเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่สาม (โนดย่อยที่สาม) ทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่สอง

ในลำดับการทดสอบ การทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือโนดย่อย หลังจากที่ได้ทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำป่าภูหารีย์เสร็จสิ้นแล้ว โดยผู้วิจัยได้พัฒนาสายอากาศให้เป็นสายอากาศคู่ (Dual Antenna) สามารถปรับทิศทางในแนวระนาบได้ จากเดิมที่เป็นสายอากาศเดี่ยวแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ขนาด 8 วัตต์ เพื่อให้อุปกรณ์ทวนสัญญาณทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

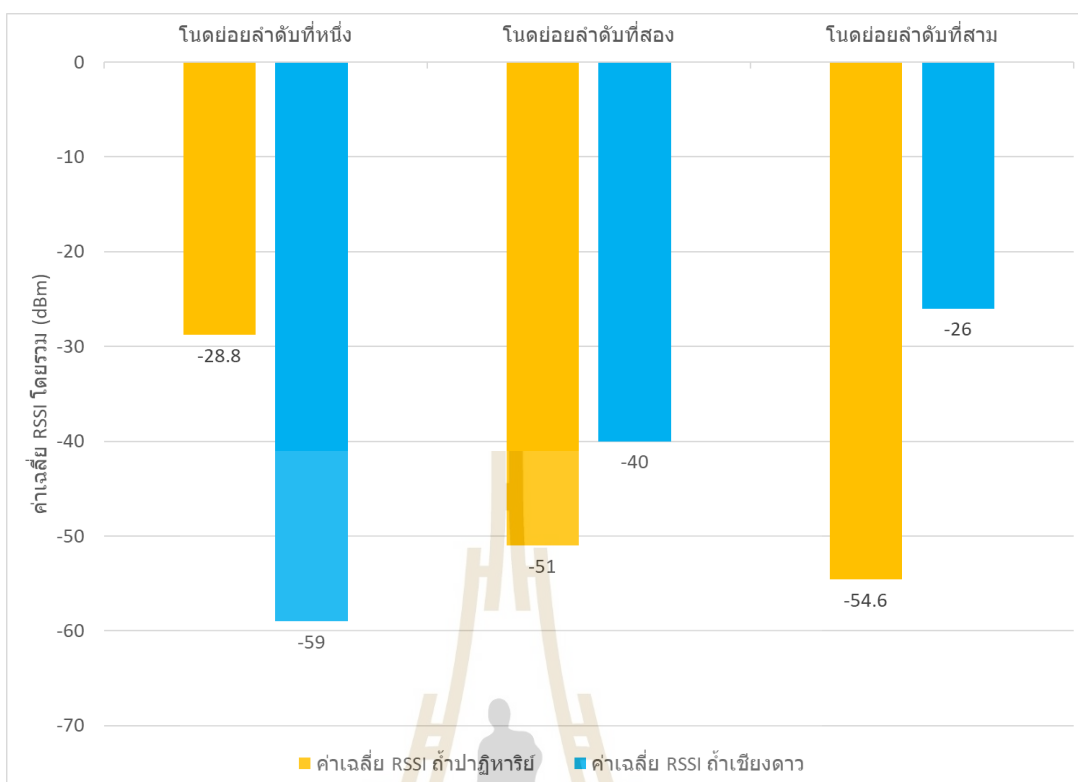
4.7.1 ผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับและผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย

ผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ของแต่ละข้อมูลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยโดยใช้ค่าความแรงสัญญาณภาครับ เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่าย ระหว่างถ้ำป่าภูหารีย์และถ้ำเชียงดาว แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.19 และการนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อยโดยใช้ค่าเวลาแฝง เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ระหว่างถ้ำป่าภูหารีย์และถ้ำเชียงดาว แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย ในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำป่าภูหารีย์	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำเชียงดาว
โนดย่อยที่หนึ่ง	-28.8	-59
โนดย่อยที่สอง	-51	-40
โนดย่อยที่สาม	-54.6	-26



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับ สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

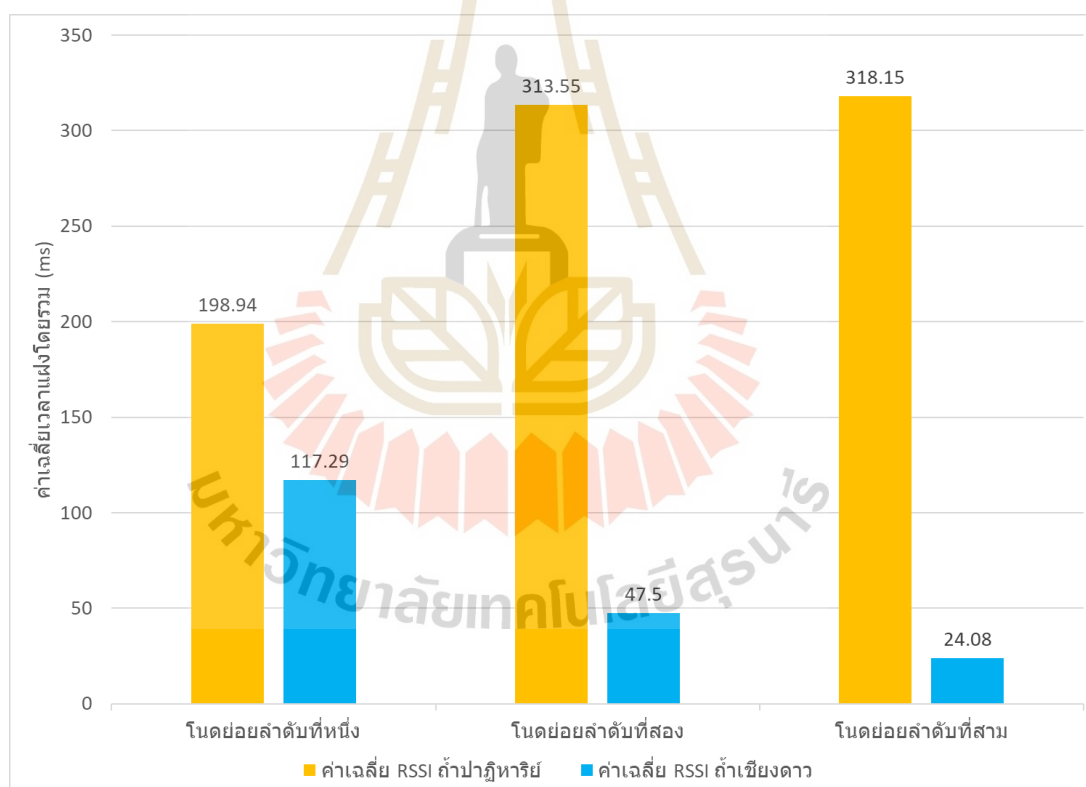
จากรูปที่ 4.21 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับ สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย ระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง พบว่าที่พื้นที่ถ้ำปาฎิหาริย์มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเครื่องลูกข่ายดีที่สุดที่โนดย่อยที่หนึ่ง -28.8 dBm และในพื้นที่ถ้ำเชียงดางมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเครื่องลูกข่ายที่ดีที่สุดที่โนดย่อยที่สาม -26 dBm

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับโดยรวมของแต่ละโนดย่อย ภายในพื้นที่ถ้ำทั้งสองแห่ง พบว่าในพื้นที่ถ้ำปาฎิหาริย์มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของแต่ละโนดย่อยอยู่ที่ -28.8 dBm -51 dBm และ -54.6 dBm ตามลำดับ แต่ในส่วนในพื้นที่ถ้ำเชียงดางมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับเพิ่มขึ้นเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของแต่ละโนดย่อยอยู่ที่ -59 dBm -40 dBm และ -26 dBm ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อย ในพื้นที่ถ้ำทั้งสองแห่งแปรผกผันกัน เพราะสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่ถ้ำแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันอย่างมาก ทำให้ความสามารถในการติดต่อสื่อสารแตกต่างกัน อีกปัจจัยหนึ่งน่าจะมีผลมาจากโครงสร้างของถ้ำทั้งสองแห่งที่มีโครงสร้างของวัสดุหินที่

แตกต่างกัน และมีโงงทางเดินภายในถ้ำที่แตกต่างกัน จึงทำให้ผลการทดสอบ ต่าง ๆ ของทั้งสองถ้ำมีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.12 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุด ภายในโนดย่อยในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ยเวลาแฝงโดยรวม (ms)	
	ค่าเฉลี่ยภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำปาฏิหาริย์	ค่าเฉลี่ยภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำเชียงดาว
โนดย่อยที่หนึ่ง	198.94	117.29
โนดย่อยที่สอง	313.55	47.50
โนดย่อยที่สาม	318.15	24.08



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดภายในโนดย่อย โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

จากกราฟผลการทดสอบ ในรูปที่ 4.22 พบว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ภายในถ้ำทั้งสองแห่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน พื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ย

โดยรวมของเวลาแฝงที่เพิ่มเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงของแต่ละโนดย่อยอยู่ที่ 198.94 ms 313.55 ms และ 318.15 ms ตามลำดับ ค่าเวลาแฝงที่เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงความหน่วงในการสื่อสารที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ในพื้นที่ถ้าเชียงดาว ลดลงเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงของแต่ละโนดย่อยอยู่ที่ 117.29 ms 47.5 ms และ 24.08 ms ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงสูงสุดเพียง 117.29 ms ที่ตำแหน่งโนดย่อยที่หนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์ มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงสูงสุดถึง 318.15 ms ที่ตำแหน่งของโนดย่อยที่สาม เนื่องจากผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือโนดย่อย ก่อนที่จะไปทำการทดสอบในพื้นที่ถ้าเชียงดาว ค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ภายในพื้นที่ถ้าเชียงดาวมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงน้อยกว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงภายในพื้นที่ถ้าปาฏิหาริย์ ซึ่งค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงที่ลดลง จะส่งผลให้ความหน่วงในการส่งข้อมูลเสียงและรับข้อมูลเสียงลดลง หรือจะกล่าวได้ว่า ความเร็วในการติดต่อสื่อสารจะเพิ่มขึ้นถ้ามีค่าเวลาแฝงลดน้อยลง

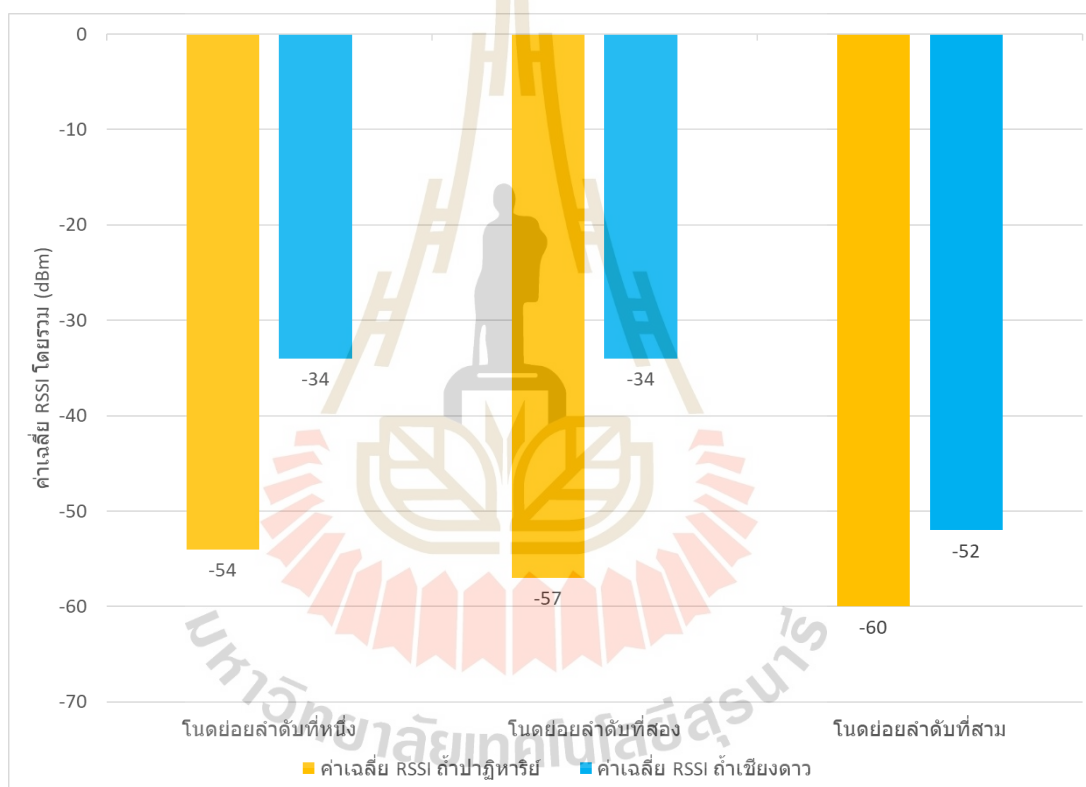
4.7.2 ผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับและผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย

ผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝงมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) ของแต่ละข้อมูลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย โดยพิจารณาด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่าย ระหว่างถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเชียงดาว ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.23 และนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องลูกข่ายในการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย โดยพิจารณาด้วยค่าเวลาแฝง เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ระหว่างถ้าปาฏิหาริย์และถ้าเชียงดาว ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.13 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย โดยเปรียบเทียบในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

เครื่องลูกข่ายภายในโนด	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำปาฏิหาริย์	ค่าเฉลี่ย RSSI ภายในโนดต่าง ๆ ที่ถ้ำเชียงดาว
โนดย่อยที่หนึ่ง	-54	-34
โนดย่อยที่สอง	-57	-34
โนดย่อยที่สาม	-60	-52



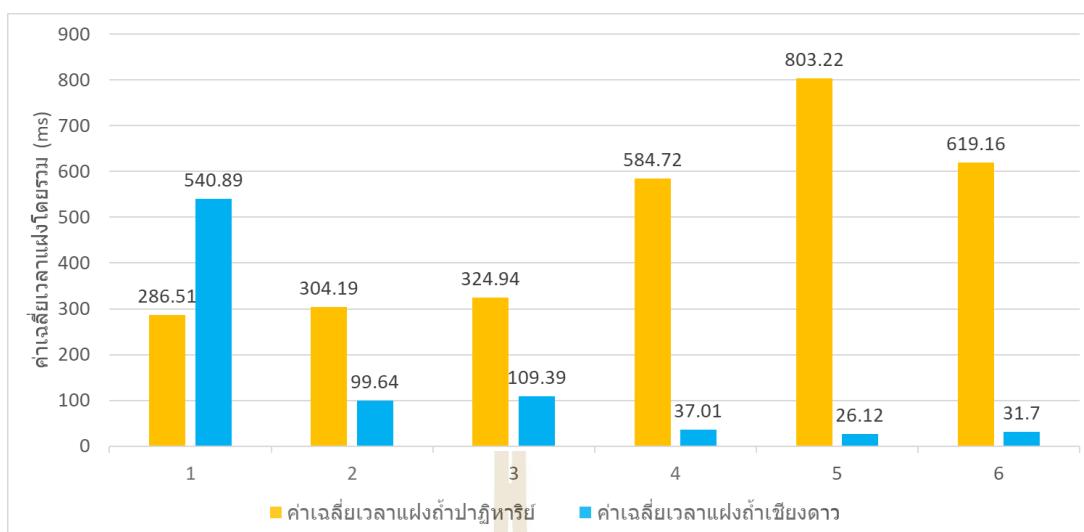
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่า ความแรงสัญญาณภาครับ สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย ในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

จากรูปที่ 4.23 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับ สำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย ในพื้นที่ถ้ำสองแห่ง พบว่าในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่ายดีที่สุดที่โนดย่อยที่หนึ่ง -54 dBm และในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเครื่องลูกข่ายดีที่สุดที่โนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สองเท่ากันที่ -34 dBm

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของแต่ละโนดย่อย ภายในพื้นที่ถ้ำทั้งสองแห่ง พบว่าในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลงเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -54 dBm -57 dBm และ -60 dBm ตามลำดับ แต่ในส่วนของพื้นที่ถ้ำเชียงดาว มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับเพิ่มขึ้นเป็นลำดับจากโนดย่อยที่หนึ่งถึงโนดย่อยที่สาม มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับอยู่ที่ -34 dBm -34 dBm และ -52 dBm ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่ายภายในโนดย่อยในพื้นที่ถ้ำทั้งสองแห่ง แปรผกผันกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่ถ้ำแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันอย่างมาก ทำให้ความสามารถในการติดต่อสื่อสารแตกต่างกัน แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือโนดย่อยก่อนที่จะทำการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว จึงทำให้ค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่ายภายในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าที่สูงกว่าในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์

ตารางที่ 4.14 ผลการเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ถ้ำสองแห่ง

ลำดับที่การทดสอบ	การสื่อสารจากโนดเริ่มต้นไปที่โนดปลายทาง	ค่าเฉลี่ยค่าเวลาแฝง (ms) ในพื้นที่การทดสอบ	
		ถ้ำปาฏิหาริย์	ถ้ำเชียงดาว
1	โนดย่อยที่หนึ่งไปที่โนดย่อยที่สอง	286.51	540.89
2	โนดย่อยที่หนึ่งไปโนดย่อยที่สาม	304.19	99.64
3	โนดย่อยที่สองไปที่โนดย่อยที่หนึ่ง	324.94	109.39
4	โนดย่อยที่สองไปโนดย่อยที่สาม	584.72	37.01
5	โนดย่อยที่สามไปโนดย่อยที่หนึ่ง	803.22	26.12
6	โนดย่อยที่สามไปโนดย่อยที่สอง	619.16	31.70



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหนึ่งจุด
สู่หลายจุดระหว่างโนดย่อยลำดับต่างๆ

จากกราฟผลการทดสอบ ในรูปที่ 4.24 พบว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ภายในถ้ำทั้งสองแห่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงที่เพิ่มเป็นลำดับจากลำดับการทดสอบที่ 1 ถึงลำดับการทดสอบที่ 6 และมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงที่น้อยที่สุดและมากที่สุดเท่ากับ 286.51 ms และ 809.22 ms ตามลำดับ ค่าเวลาแฝงที่เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงความหน่วงในการสื่อสารที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงของเครื่องลูกข่ายในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว ลดลงเป็นลำดับจากลำดับการทดสอบที่ 1 ถึงลำดับการทดสอบที่ 6 มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของเวลาแฝงที่น้อยที่สุดและมากที่สุดเท่ากับ 26.12 ms และ 540.81 ms ตามลำดับ

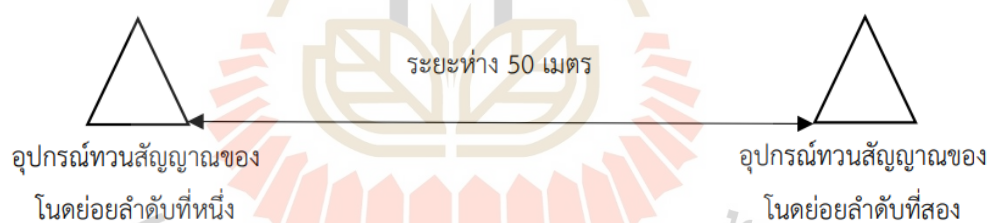
ค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงสำหรับการสื่อสารแบบหลายจุดระหว่างโนดย่อย ภายในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าเฉลี่ยโดยรวมที่น้อยกว่าภายในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์อย่างมาก เนื่องจากผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ทวนสัญญาณหรือโนดย่อย ก่อนที่จะไปทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว ค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงของเครื่องลูกข่าย ภายในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงน้อยกว่าค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงภายในพื้นที่ถ้ำปาฏิหาริย์ ซึ่งค่าเฉลี่ยโดยรวมของค่าเวลาแฝงที่ลดลง จะส่งผลให้ความหน่วงในการส่งข้อมูลเสียงและรับข้อมูลเสียงลดลง หรือจะกล่าวได้ว่า ความเร็วในการติดต่อสื่อสารจะเพิ่มขึ้นถ้ามีค่าเวลาแฝงลดน้อยลง

4.7.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในระยะห่าง 50 เมตร ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่ 2.4 GHz

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในระยะห่าง 50 เมตร ด้วยค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง สำหรับอุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่ 2.4 GHz โดยทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำเชียงดาว ผู้วิจัยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

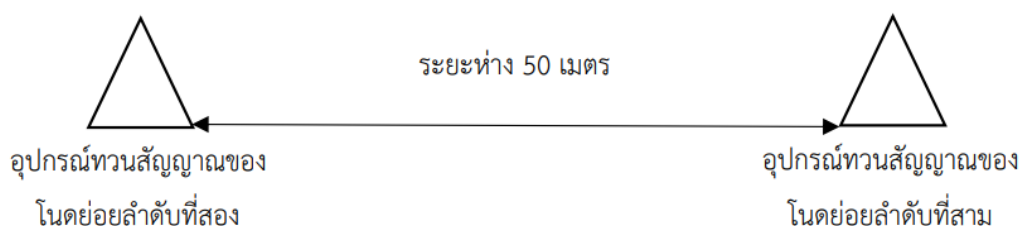
1) ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะทาง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อย

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งโดยบันทึกค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง ระหว่างโนดย่อย โดยเป็นการทดสอบระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง และการทดสอบระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม โดยที่โนดย่อยแต่ละโนดจะอยู่ห่างกัน 50 เมตร และทำการนำข้อมูลทั้งหมด 10 ค่าของแต่ละการทดสอบมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างโนดย่อย ที่ระยะทาง 50 เมตร มีวิธีดำเนินการทดสอบตามตัวอย่างแผนภาพการทดสอบโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง และแผนภาพการทดสอบโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สามตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 แผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.25 เป็นแผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง ในการทดสอบแรกเป็นการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ ซึ่งการทดสอบนี้จำเป็นต้องสลับตำแหน่งของโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง เนื่องจากโนดย่อยที่หนึ่งทำการทวนสัญญาณจากโนดหลัก จึงไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่สองได้ แต่โนดย่อยที่สองทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่งอยู่แล้ว จึงสามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่หนึ่งได้ ในการทดสอบที่สองเป็นการทดสอบค่าเวลาแฝง แต่เนื่องจากโนดย่อยไม่สามารถส่งค่าปิงได้ ผู้วิจัยจึงใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เน็ตบุ๊กในการส่งค่าปิง เพื่อทดสอบค่าเวลาแฝงของโนดย่อย โดยผู้วิจัยจึงทำการปิง ที่บริเวณใกล้กับโนดย่อยที่หนึ่ง ปิงไปยังโนดย่อยที่สอง เพื่อบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง



รูปที่ 4.26 แผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม

จากรูปที่ 4.26 เป็นแผนภาพการทดสอบของโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม ในการทดสอบแรกเป็นการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ ซึ่งการทดสอบนี้จำเป็นต้องสลับตำแหน่งของโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม เนื่องจากโนดย่อยที่สองทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่หนึ่ง จึงไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่สามได้ แต่โนดย่อยที่สามทำการทวนสัญญาณจากโนดย่อยที่สองอยู่แล้ว จึงสามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่สองได้

การทดสอบค่าเวลาแฝง เนื่องจากโนดย่อยไม่สามารถส่งค่าปิงได้ ผู้วิจัยจึงใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เน็ตบุ๊กในการส่งค่าปิง เพื่อทดสอบค่าเวลาแฝงของโนดย่อย โดยผู้วิจัยจะทำการปิง ที่บริเวณใกล้กับโนดย่อยที่สอง ปิงไปยังโนดย่อยที่สาม เพื่อบันทึกค่าเวลาแฝงระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม

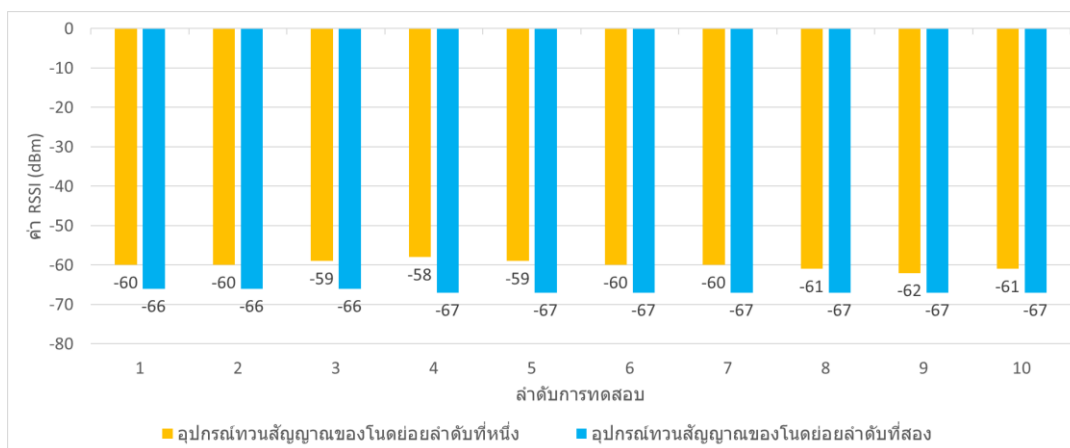
ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง ไว้ในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.27 และนำเสนอผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม ไว้ในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร
ระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง

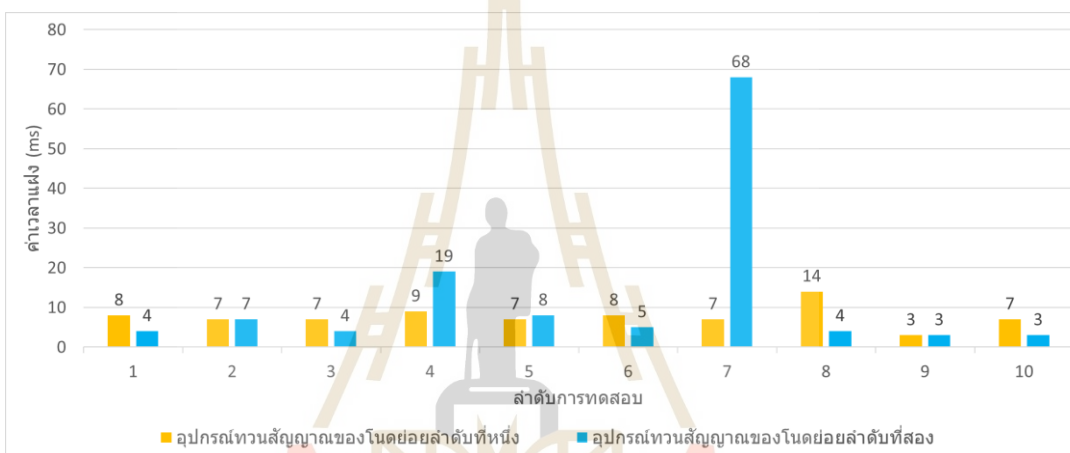
อันดับการทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)	
	โนดย่อยที่ หนึ่ง	โนดลำดับที่ สอง	โนดย่อยที่ หนึ่ง (*1)	โนดย่อยที่ สอง (*2)
1	-60	-66	8	4
2	-60	-66	7	7
3	-59	-66	7	4
4	-58	-67	9	19
5	-59	-67	7	8
6	-60	-67	8	5
7	-60	-67	7	68
8	-61	-67	14	4
9	-62	-67	3	3
10	-61	-67	7	3
ค่าเฉลี่ย	-60	-67	8	13

*1 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อยที่หนึ่ง) ไปที่ โนดย่อยที่สอง

*2 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อยที่สอง) ไปที่ โนดย่อยที่หนึ่ง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.27 กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง

จากรูปที่ 4.27 เป็นกราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตรระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง จากผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สองมีค่าสูงสุดที่ -58 dBm และ -66 dBm ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยที่ -60 และ -67 ตามลำดับ จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง จะพบว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับของโนดย่อยที่หนึ่งดีกว่าโนดย่อยที่สองเพียงเล็กน้อย บ่งบอกถึงระบบสื่อสารมีประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารที่ระยะห่าง 50 เมตร

และผลการทดสอบค่าเวลาแฝงจากโนดย่อยที่หนึ่งและโนดย่อยที่สอง ที่ระยะห่าง 50 เมตร มีค่าต่ำสุดที่ 3 ms และ 3 ms ตามลำดับ โนดย่อยทั้งสองมีค่าเวลาแฝงต่ำที่สุดเท่ากันที่ 3 ms และมีค่าเฉลี่ยที่ 8 ms และ 13 ms ตามลำดับ จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง จะพบว่าค่าเวลาแฝงของโนดย่อยที่หนึ่งค่อนข้างคงที่ แต่ค่าเวลาแฝงของโนดย่อยที่สองมีค่าเวลาแฝงที่สูงถึง 68 ms

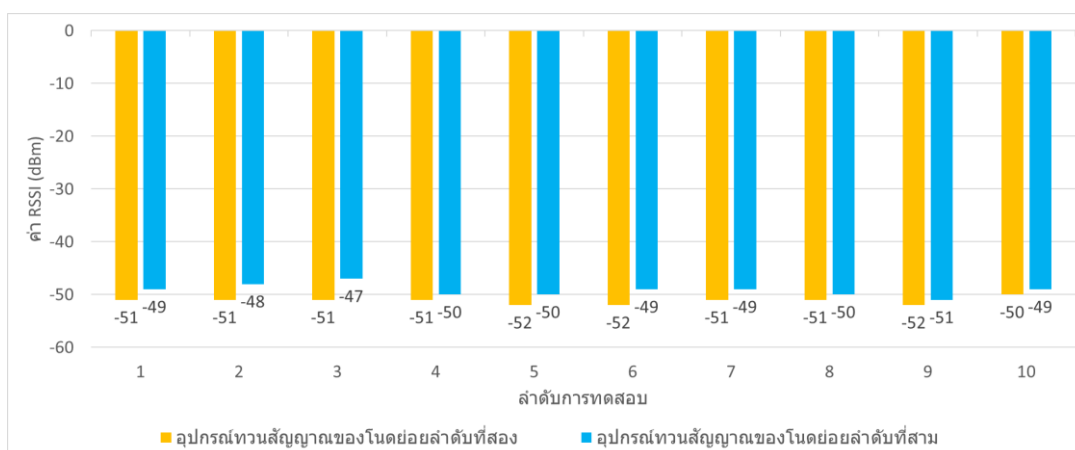
แต่มีค่าเวลาแฝงที่สูงเพียงครั้งเดียว บ่งบอกถึงระบบสื่อสารยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารที่ระยะห่าง 50 เมตร

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม

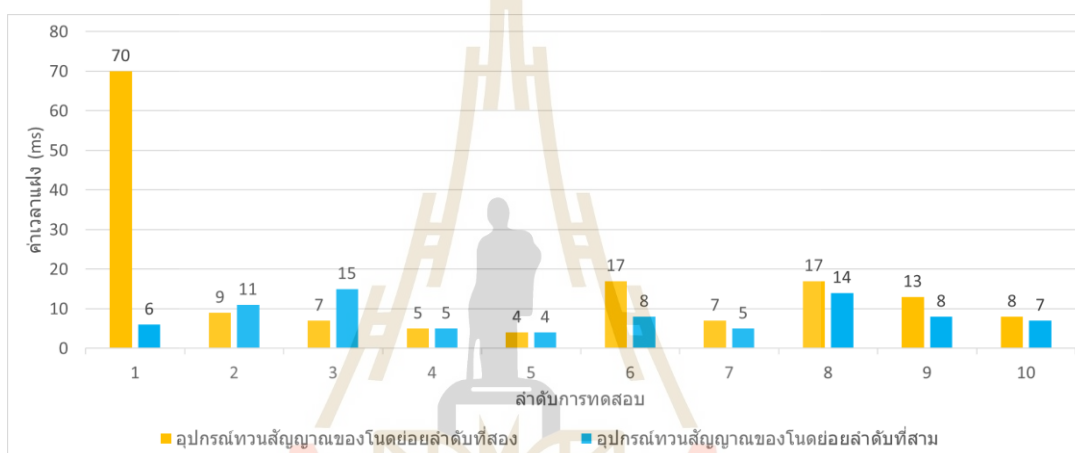
อันดับการทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)	
	โนดย่อยที่สอง	โนดย่อยที่สาม	โนดย่อยที่สอง (*3)	โนดย่อยที่สาม (*4)
1	-51	-49	70	6
2	-51	-48	9	11
3	-51	-47	7	15
4	-51	-50	5	5
5	-52	-50	4	4
6	-52	-49	17	8
7	-51	-49	7	5
8	-51	-50	17	14
9	-52	-51	13	8
10	-50	-49	8	7
ค่าเฉลี่ย	-51	-49	16	8

*3 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อยที่สอง) ไปที่ โนดย่อยที่สาม

*4 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อยที่สาม) ไปที่ โนดย่อยที่สอง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.28 กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม

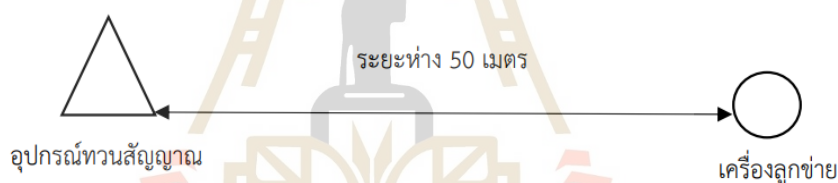
จากรูปที่ 4.28 เป็นกราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตรระหว่างโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สาม ค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สามมีค่าสูงสุดที่ -50 dBm และ -47 dBm ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยที่ -51 และ -49 ตามลำดับ จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง จะพบว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับของโนดย่อยที่สามดีกว่าโนดย่อยที่สองเพียงเล็กน้อย บ่งบอกถึงระบบสื่อสารมีประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารที่ระยะห่าง 50 เมตร

และค่าเวลาแฝงจากโนดย่อยที่สองและโนดย่อยที่สามมีค่าต่ำสุดที่ 4 ms และ 4 ms ตามลำดับ โนดย่อยทั้งสองมีค่าเวลาแฝงต่ำที่สุดเท่ากันที่ 4 ms และมีค่าเฉลี่ยที่ 16 ms และ 8 ms ตามลำดับ จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง พบว่าค่าเวลาแฝงของโนดย่อยที่สามค่อนข้างคงที่ แต่ค่าเวลาแฝงของโนดย่อยที่สองมีค่าเวลาแฝงที่สูงถึง 70 ms ซึ่งมีค่าเวลาแฝงที่สูงเพียงครั้งเดียวบ่งบอกถึงระบบสื่อสารยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารที่ระยะห่าง 50 เมตร

ในลำดับสุดท้าย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้เครื่องลูกข่าย ทำการทดสอบระหว่างโนดย่อยที่หนึ่งกับโนดย่อยที่สอง และระหว่างโนดย่อยที่สองกับโนดย่อยที่สาม พบว่าสามารถติดต่อสื่อสารด้วยเสียงได้ดี มีคุณภาพของเสียงที่ชัดเจน มีความหน่วงเวลาในการสื่อสารเล็กน้อย แต่สามารถติดต่อสื่อสารได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง

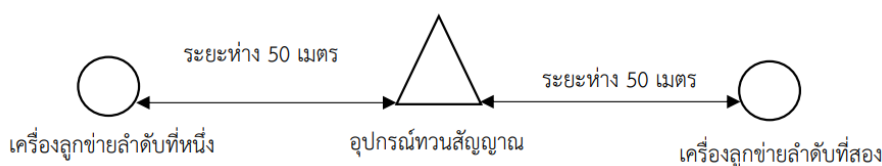
2) ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ทั้งหมดจำนวน 15 ครั้ง โดยบันทึกค่าความแรงสัญญาณภาครับ และค่าเวลาแฝง ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ที่ระยะห่าง 50 เมตร และทำการนำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยรวม (Total Average) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ที่ระยะห่าง 50 เมตร มีวิธีดำเนินการทดสอบตามตัวอย่างแผนภาพการทดสอบระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง และการทดสอบระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 แผนภาพการทดสอบโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย

จากรูปที่ 4.29 เป็นแผนภาพการทดสอบโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ที่ระยะห่าง 50 เมตร เป็นการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ในการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ โนดย่อยไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากเครื่องลูกข่ายได้ ผู้วิจัยจึงบันทึกผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับแค่ที่เครื่องลูกข่าย และในการทดสอบค่าเวลาแฝงระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย โนดย่อยไม่สามารถส่งค่าไปหาเครื่องลูกข่ายเพื่อหาค่าเวลาแฝงได้ ผู้วิจัยจึงทำการส่งค่าปings ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่ตำแหน่งเดียวกับโนดย่อยไปหาเครื่องลูกข่าย



รูปที่ 4.30 แผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่สอง

จากรูปที่ 4.30 เป็นแผนภาพการทดสอบเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง โดยแต่ละอุปกรณ์จะมีระยะห่างกันที่ 50 เมตร เป็นการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่สอง เนื่องจากการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ โนดย่อยไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับของเครื่องลูกข่ายได้ ผู้วิจัยจึงบันทึกผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับแค่ที่เครื่องลูกข่าย

และในส่วนของการทดสอบค่าเวลาแฝงระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่สอง โนดย่อยไม่สามารถส่งค่า ping ไปหาเครื่องลูกข่ายเพื่อหาค่าเวลาแฝงได้ ผู้วิจัยจึงทำการส่งค่า ping ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่ตำแหน่งเดียวกับโนดย่อยไปหาเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง และเครื่องลูกข่ายที่สอง

ผู้วิจัยนำเสนอผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย ไว้ในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.31 และนำเสนอผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง ไว้ในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.32

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย

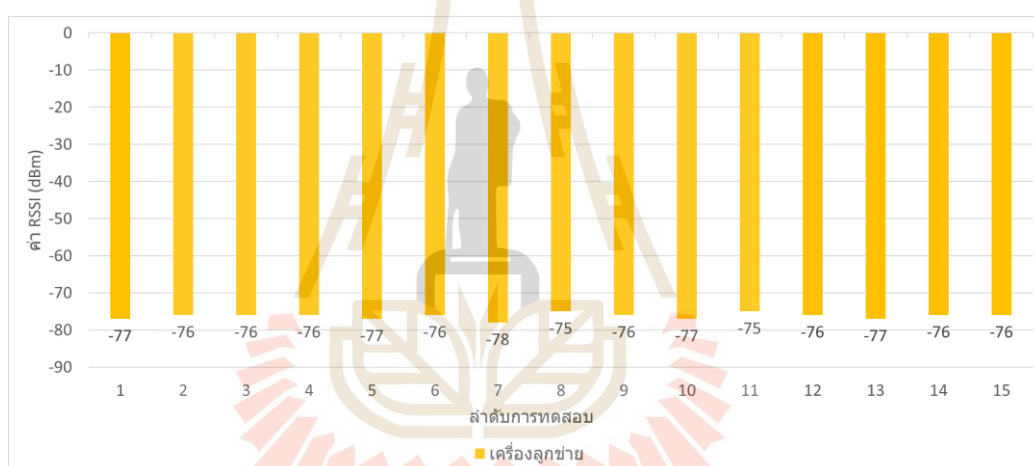
อันดับการทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)	ค่าเวลาแฝง (ms)	
	เครื่องลูกข่าย	โนดย่อย (*5)	เครื่องลูกข่าย (*6)
1	-77	10	210
2	-76	6	37
3	-76	5	10
4	-76	7	8
5	-77	5	11
6	-76	6	9
7	-78	6	57
8	-75	98	12
9	-76	33	17
10	-77	275	12
11	-75	7	7
12	-76	5	6
13	-77	28	7

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร
ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย (ต่อ)

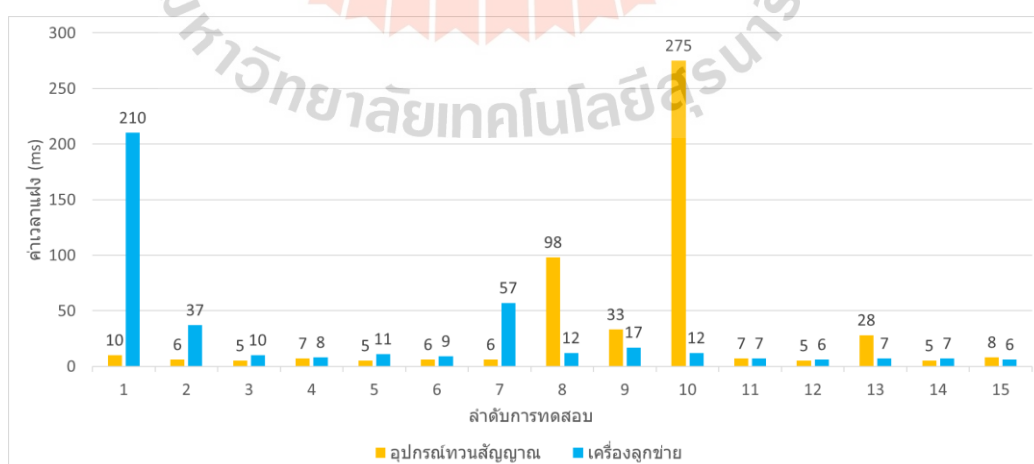
อันดับการทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)	ค่าเวลาแฝง (ms)	
	เครื่องลูกข่าย	โนดย่อย (*5)	เครื่องลูกข่าย (*6)
14	-76	5	7
15	-76	8	6
ค่าเฉลี่ย	-76	34	28

*5 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อย) ไปที่เครื่องลูกข่าย

*6 เป็นการ ping จากเครื่องลูกข่ายไปที่โนดย่อย



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.31 กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่
ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย

จากรูปที่ 4.31 เป็นกราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้จากโนดหลัก มีค่าสูงสุดที่ -76 dBm และมีค่าเฉลี่ยที่ -76 ซึ่งจากการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง จะพบว่าเครื่องลูกข่ายสามารถรับค่าความแรงสัญญาณภาครับจากโนดย่อยได้ดี แม้เครื่องลูกข่ายจะอยู่ห่างจากโนดย่อย บ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารของโนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่ระยะห่าง 50 เมตร

และจากผลการทดสอบค่าเวลาแฝงพบว่า ค่าเวลาแฝงของโนดย่อยและเครื่องลูกข่าย มีค่าต่ำสุดที่ 5 ms และ 6 ms ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยที่ 34 ms และ 28 ms ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง จะพบว่าอุปกรณ์ทั้งสองมีค่าเวลาแฝงที่สูงบางเวลา ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงระหว่างเครื่องลูกข่ายที่อยู่ห่างจากโนดย่อย 50 เมตร และเครื่องลูกข่ายที่อยู่ตำแหน่งเดียวกันกับโนดย่อย เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยเสียง พบว่าการสื่อสารด้วยเสียงนั้นสามารถสื่อสารได้ดี มีคุณภาพเสียงที่ดี และสามารถสื่อสารได้ใกล้เคียงกับเวลาจริง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การสื่อสารระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่ายมีประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารที่ระยะห่าง 50 เมตร

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง

อันดับที่ ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)		
	เครื่องลูกข่าย ที่หนึ่ง	เครื่องลูกข่าย ที่สอง	เครื่องลูกข่าย ที่หนึ่ง (*7)	โนดย่อย (*8)	เครื่องลูกข่าย ที่สอง (*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

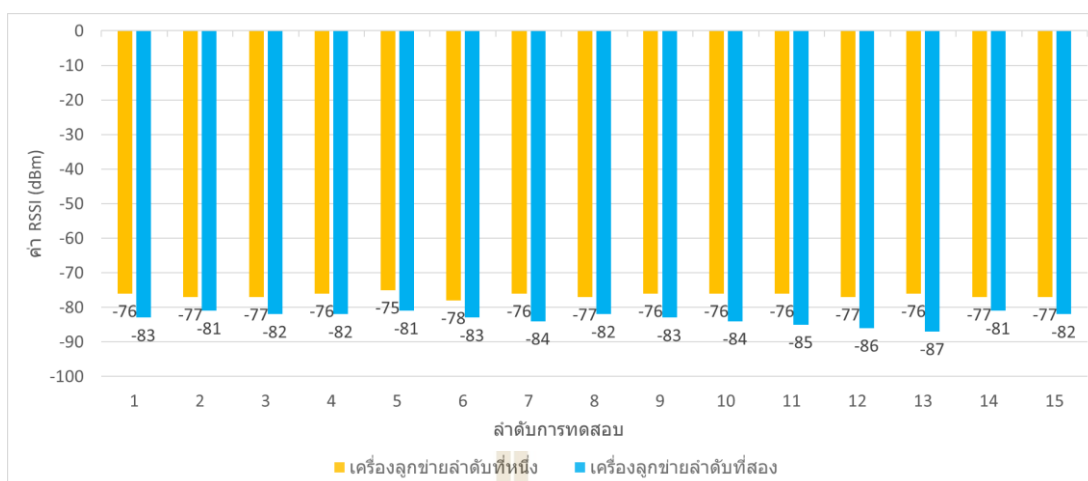
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ที่ระยะห่าง 50 เมตร
ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อยและเครื่องลูกข่ายที่สอง (ต่อ)

อันดับที่ ทดสอบ	ค่า RSSI (dBm)		ค่าเวลาแฝง (ms)		
	เครื่องลูกข่าย ที่หนึ่ง	เครื่องลูกข่าย ที่สอง	เครื่องลูกข่าย ที่หนึ่ง (*7)	โนดย่อย (*8)	เครื่องลูกข่าย ที่สอง (*9)
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

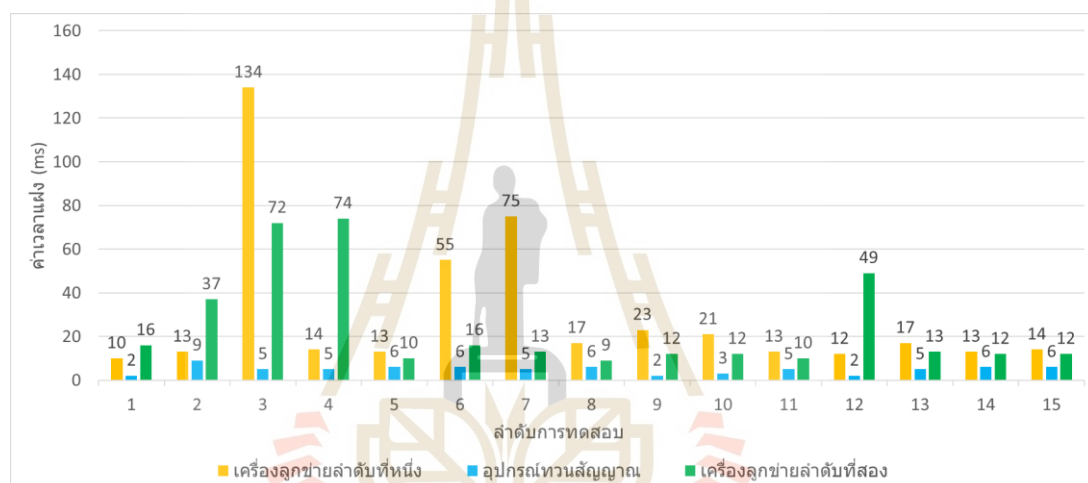
*7 เป็นการ ping จากเครื่องลูกข่ายที่หนึ่งไปยังเครื่องลูกข่ายที่สอง

*8 เป็นการ ping จากเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (ที่บริเวณโนดย่อย) ไปที่เครื่องลูกข่าย (เครื่องลูกข่าย เครื่องใดก็ได้)

*9 เป็นการ ping จากเครื่องลูกข่ายที่สองไปที่เครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.32 กราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.)

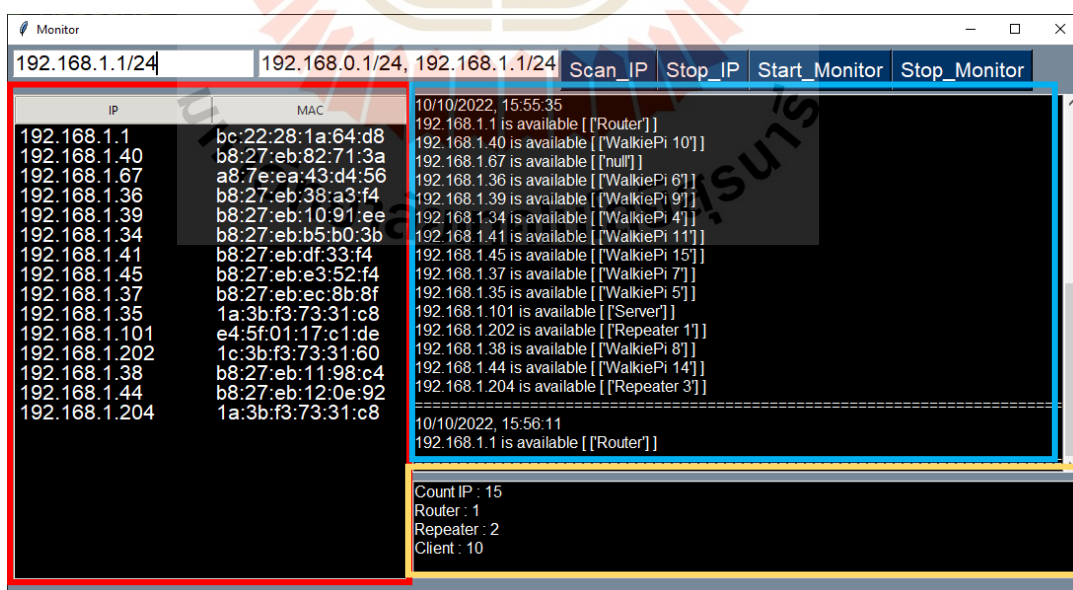
ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง

จากรูปที่ 4.32 เป็นกราฟผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ (ก.) และค่าเวลาแฝง (ข.) ที่ระยะห่าง 50 เมตร ระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายที่หนึ่งสามารถรับได้จากโนดย่อยดีกว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เครื่องลูกข่ายที่สองสามารถรับได้จากโนดย่อยเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ -76 dBm และ -82 dBm ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยที่ -76 และ -83 ตามลำดับ จากการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง จะพบว่าเครื่องลูกข่ายทั้งสอง มีความสามารถในการรับค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ใกล้เคียงกัน หรืออีกนัยหนึ่ง โนดย่อยสามารถส่งสัญญาณไปยังเครื่องลูกข่ายทั้งสองได้อย่างมีประสิทธิภาพ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีในการสื่อสารของโนดย่อยและเครื่องลูกข่ายทั้งสองที่ระยะห่าง 50 เมตร

และผลการทดสอบค่าเวลาแฝงระหว่างเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง โนดย่อย และเครื่องลูกข่ายที่สอง มีค่าต่ำสุดที่ 10 ms 2 ms และ 9 ms ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยที่ 30 ms 5 ms และ 24 ms ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบทั้งหมด 15 ครั้ง จะพบว่าอุปกรณ์ทั้งสามมีค่าเวลาแฝงที่สูงอยู่บางเวลา ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงระหว่างเครื่องลูกข่ายทั้งสองที่อยู่ห่างจากโนดย่อย 50 เมตร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารด้วยเสียง พบว่าการสื่อสารด้วยเสียงนั้นสามารถสื่อสารได้ดี มีคุณภาพเสียงที่ดี แต่มีการหน่วงเวลาในการสื่อสารอยู่เล็กน้อย เพราะว่าเครื่องลูกข่ายที่สองอยู่ห่างจากเครื่องแม่ข่ายมากกว่าเครื่องลูกข่ายที่หนึ่ง จึงต้องใช้เวลาในการส่งข้อมูลที่มากกว่า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การสื่อสารระหว่างโนดย่อยและเครื่องลูกข่ายทั้งสองมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างดีในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ทั้งสาม ที่ระยะห่าง 50 เมตร

4.8 ผลการพัฒนาโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียง สำหรับใช้ในถ้าโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz

ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการพัฒนาโปรแกรมเฝ้าระวังไว้ในรูปที่ 4.32 ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษาไพทอน (Python) โดยในการออกแบบโปรแกรมนั้น ผู้วิจัยออกแบบให้โปรแกรมสามารถค้นหาหมายเลขไอพีภายในโครงข่ายทั้งหมด จำแนกเครื่องเราเตอร์ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ และเครื่องลูกข่าย จากหมายเลขไอพีที่ค้นหาได้ และยังสามารถติดตามหมายเลขไอพีทั้งหมดในโครงข่ายได้ ในส่วนของวิธีการติดตามหมายเลขไอพีผู้วิจัยเลือกใช้คำสั่ง ping ซึ่งเป็นคำสั่งในการติดตามสถานะของแต่ละไอพี



รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบโปรแกรมเฝ้าระวังสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz

จากผลการทดสอบโปรแกรมเฝ้าระวังสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ในรูปที่ 4.33 พบว่าโปรแกรมเฝ้าระวังสามารถค้นหาหมายเลขไอพีของอุปกรณ์ภายในโครงข่ายทั้งหมดได้ ซึ่งแสดงในกรอบสีแดง สามารถระบุจำนวนหมายเลขไอพี จำนวนเราเตอร์ (โนดหลัก) จำนวนอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (โนดย่อย) และจำนวนเครื่องลูกข่ายได้ ซึ่งแสดงในกรอบสีเหลือง สามารถติดตามสถานะของแต่ละหมายเลขไอพีได้ โดยถ้าหมายเลขไอพีที่ยังอยู่ภายในโครงข่ายจะแสดงข้อความว่า “is available” แต่ถ้าหมายเลขไอพีใดก็ตามที่ไม่อยู่ในโครงข่ายแล้วจะแสดงข้อความว่า “is not available” นอกจากนี้โปรแกรมเฝ้าระวังยังสามารถระบุได้ว่าหมายเลขไอพีใดเป็นเครื่องเราเตอร์ (Router) สามารถระบุได้ว่าหมายเลขไอพีใดเป็นเครื่องแม่ข่าย สามารถระบุได้ว่าหมายเลขไอพีใดเป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ สามารถระบุได้ว่าหมายเลขไอพีใดเป็นเครื่องลูกข่าย (WalkiePi) และถ้าโปรแกรมไม่สามารถระบุประเภทของหมายเลขไอพีได้ โปรแกรมจะแสดงข้อความว่า “null” ซึ่งแสดงในกรอบสีฟ้า

4.9 สรุป

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการพัฒนาในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz

ในการพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนารายอากาศสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ผู้วิจัยได้พัฒนารายอากาศให้เป็นสายอากาศคู่ (Dual Antenna) สามารถปรับทิศทางในแนวระนาบได้ จากเดิมที่เป็นสายอากาศเดี่ยวแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์เพิ่มกำลังสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ขนาด 8 วัตต์ เพื่อให้อุปกรณ์ทวนสัญญาณทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สามารถเพิ่มระยะทางโดยรวมในการสื่อสารภายในแนวสายตาได้มากกว่า 300 เมตร และภายในถ้ำสามารถเพิ่มระยะทางได้ประมาณ 80-90 เมตร แต่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพของถ้ำด้วย

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่ถ้ำป่าภูหารีย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ซึ่งเป็นผลการทดสอบของระบบเดิมก่อนทำการพัฒนา และที่ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ซึ่งเป็นผลการทดสอบระบบที่ถูกพัฒนาเรียบร้อยแล้ว ผลการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาวจะมีแนวโน้มที่ดีกว่าผลการทดสอบที่ถ้ำป่าภูหารีย์ ทั้งในด้านของผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับ และในด้านผลการทดสอบค่าเวลาแฝง นอกจากนี้ผลการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงภายในพื้นที่ถ้ำเชียงดาวยังมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงในพื้นที่ถ้ำป่าภูหารีย์อีกด้วย ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยการพัฒนารายอากาศสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ สามารถเพิ่มระยะทางในการสื่อสาร

สามารถลดค่าเวลาแฝง และสามารถเพิ่มคุณภาพของเสียงให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นด้วย สามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เพิ่มขึ้นและผลการทดสอบค่าเวลาแฝงที่ลดลงจากการที่ทำการทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่เพิ่มขึ้นและผลการทดสอบค่าเวลาแฝงที่ถ้ำป่าภูหารีย์

ในด้านซอฟต์แวร์การพัฒนาโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียง สำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถช่วยให้การบริหารอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในปี 2561 ที่ผ่านมา มีคนที่เข้าไปติดภายในถ้ำจำนวน 13 คน เป็นเวลานานหลายวัน หนึ่งในอุปสรรคสำคัญในการทำการช่วยเหลือผู้ที่ติดอยู่ภายในถ้ำคือ การติดต่อสื่อสาร ปัจจุบันยังมีวิธีการสื่อสารภายในถ้ำไม่มากนัก วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้เสนออีกหนึ่งทางเลือกในการสื่อสารด้วยเสียงภายในถ้ำ โดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ระบบสามารถติดต่อสื่อสารหรือสนทนาด้วยเสียงภายในถ้ำได้เป็นอย่างดี โดยมีอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาหรือเครื่องลูกข่ายทั้งหมด 15 เครื่อง มีอุปกรณ์ทวนสัญญาณทั้งหมด 3 เครื่อง มีเครื่องแม่ข่ายและเครื่องเราเตอร์อย่างละ 1 เครื่อง โดยอุปกรณ์สื่อสารทุกเครื่องสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ มีโปรแกรมสำหรับเฝ้าระวังที่สามารถติดตามดูแลอุปกรณ์สื่อสารทั้งหมดภายในโครงข่ายได้ เมื่ออุปกรณ์สื่อสารทำงานผิดพลาดหรือขาดการเชื่อมต่อจากโครงข่าย จะสามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างทัน่วงที่ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การออกแบบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz มีประยุกต์ใช้บอร์ดระบบสมองกลฝังตัว Raspberry Pi สำหรับใช้เป็นเครื่องแม่ข่าย (Server) และเครื่องลูกข่าย (Client) มีอุปกรณ์สำหรับกระจายสัญญาณหลักคือเราเตอร์ (Router) มีอุปกรณ์สำหรับทวนสัญญาณ (Repeater) และมีโปรแกรมสำหรับการเฝ้าระวังในโครงข่าย (Monitoring) ในการสื่อสารนั้นได้เลือกใช้เทคนิคการสื่อสารแบบ VOIP (Voice over Internet Protocol) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Mumble ซึ่งไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตภายนอก มีความเหมาะสมในการใช้งานในถ้ำ

2) การทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ทำการทดสอบในพื้นที่ถ้ำจริง 2 แห่งคือ ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และที่ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสาร โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ (Receive Signal Strength Indicator, RSSI) และค่าเวลาแฝง (Latency) รวมถึงการทดสอบการสื่อสารด้วยเสียงภายในถ้ำด้วย รูปแบบการทดสอบมีสองรูปแบบหลัก คือ การสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหนึ่งจุด และการสื่อสารแบบหนึ่งจุดสู่อีกหลายจุด

3) ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz พิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับ ด้วยโปรแกรม Wavemon พบว่าค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ทดสอบได้จากถ้ำทั้งสองแห่ง มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน คือ ค่าความแรงสัญญาณภาครับแปรผกผันกับระยะทาง กล่าวคือ ค่าความแรงสัญญาณภาครับจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะทางที่เพิ่ม เมื่อค่าความแรงสัญญาณภาครับลดลง ประสิทธิภาพของการสื่อสารก็จะลดลงด้วย

4) ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz พิจารณาจากค่าเวลาแฝง ด้วยคำสั่ง ping (Ping) พบว่าเวลาแฝงที่ทดสอบได้จากถ้ำทั้งสองแห่ง มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน คือ ค่าเวลาแฝงแปรผันตรงกับระยะทาง กล่าวคือ ค่าเวลาแฝงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะทางที่มากขึ้น เมื่อค่าเวลาแฝงมีค่ามากขึ้น ความหน่วงเวลาในการสื่อสารก็จะมากขึ้นด้วย

5) การทดสอบค่าความแรงสัญญาณภาครับที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดของเครื่องลูกข่ายและโน้ตบุ๊กที่สามารถรับได้ เพื่อหาตำแหน่งการวางอุปกรณ์และระยะห่างของอุปกรณ์ที่เหมาะสมและยังคงประสิทธิภาพที่ดีในการติดต่อสื่อสาร

6) การพัฒนาสายอากาศอุปกรณ์ทวนสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ได้ปรับปรุงและพัฒนาสายอากาศอุปกรณ์ทวนสัญญาณ จากเดิมที่เป็นสายอากาศเดี่ยวแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna) ให้กลายเป็นสายอากาศคู่ (Dual Antenna) ที่สามารถปรับทิศทางสายอากาศในแนวระนาบได้ เพื่อให้อุปกรณ์ทวนสัญญาณสามารถกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่ภายในถ้ำได้มากยิ่งขึ้น แก้ปัญหาการติดต่อสื่อสารที่ต้องผ่านทางโค้งทางเลี้ยวให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มกำลังส่งของอุปกรณ์ทวนสัญญาณด้วยอุปกรณ์เพิ่มกำลังส่งสัญญาณ (Wi-Fi signal booster) ขนาด 8 วัตต์ สามารถเพิ่มระยะทางในการสื่อสารโดยรวมได้ประมาณ 80 - 90 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายในถ้ำด้วย ในการพัฒนาสายอากาศสำหรับอุปกรณ์ทวนสัญญาณ ได้ทำการทดสอบวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ และรูปแบบการแผ่พลังงาน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดี

7) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ภายในถ้ำจริง 2 แห่งได้แก่ 1.ถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี และ 2.ถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง ในขั้นตอนการทดสอบนั้น ได้ทำการทดสอบที่ถ้ำปาฏิหาริย์ก่อนเป็นอันดับแรก เพื่อศึกษารูปแบบการสื่อสารภายในถ้ำและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นย่านความถี่ 2.4 GHz จากนั้นได้นำข้อมูลที่ทดสอบได้ภายในถ้ำปาฏิหาริย์ รวมถึงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบ มาพัฒนาและปรับปรุงระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ก่อนที่จะนำไปทดสอบที่ถ้ำเชียงดาว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการสื่อสารในถ้ำ

เชิงควมมีแนวโน้มที่ดีกว่า โดยพิจารณาจากค่าความแรงสัญญาณภาครับและค่าเวลาแฝง และเมื่อได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยเสียง ผลการทดสอบภายในถ้ำเชียงดาวให้คุณภาพเสียงสนทนาที่ชัดเจนกว่า และมีระยะเวลาในการโต้ตอบสื่อสารใกล้เคียงกับเวลาจริงมากกว่าผลการทดสอบที่ถ้ำป่าภูหารีย์ สามารถสังเกตได้จากค่าเวลาแฝงที่น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ การพัฒนาและปรับปรุงระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารได้ ทั้งในเรื่องคุณภาพของเสียงสนทนา ความหน่วงเวลาในการสื่อสาร และระยะทางโดยรวมในการสื่อสาร

8) การพัฒนาโปรแกรมเฝ้าระวัง (Monitoring) สำหรับระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz โปรแกรมเฝ้าระวังสามารถค้นหาหมายเลขไอพี (IP Address) ทั้งหมดภายในโครงข่ายได้ สามารถระบุประเภทของอุปกรณ์ของแต่ละหมายเลขไอพีได้ และสามารถเฝ้าระวังติดตามหมายเลขไอพีทั้งหมดได้ว่า แต่ละหมายเลขไอพียังเชื่อมต่อภายในโครงข่ายอยู่หรือไม่ โปรแกรมเฝ้าระวังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ได้เป็นอย่างดี และยังทำให้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในโครงข่ายได้อย่างทันท่วงที

9) จากการทำวิจัยภายในถ้ำจริงสองแห่ง ทำให้เข้าใจถึงอุปสรรคในการติดต่อสื่อสารซึ่งเกิดจากสภาพแวดล้อมภายในถ้ำ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะเส้นทางเดิน รูปแบบของโพรงถ้ำ น้ำที่อยู่ภายในถ้ำไม่ว่าจะเป็นที่พื้นถ้ำหรือน้ำที่อยู่ในผนังถ้ำ และชนิดของหินภายในถ้ำ อุปสรรคเหล่านี้ล้วนทำให้ผลการทดสอบระบบสื่อสารด้วยเสียงโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz ของถ้ำทั้งสองแห่งมีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

แนวทางการพัฒนาระบบสื่อสารด้วยเสียงสำหรับใช้ในถ้ำโดยใช้โครงข่ายสื่อสารไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz มีแนวทางในการพัฒนาคือ

- 1) ปรับปรุงรุ่นของระบบปฏิบัติการสำหรับบอร์ด Raspberry Pi ให้เป็นรุ่นปัจจุบัน เพื่อให้ระบบปฏิบัติการมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น
- 2) พัฒนาสายอากาศของ Raspberry Pi zero WH ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยอาจจะใช้สายอากาศภายนอก (External Antenna)
- 3) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มจำนวนลูกข่ายหรือเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ภายในโครงข่าย จำเป็นจะต้องใช้เราเตอร์ (Router) ที่สามารถรองรับจำนวนอุปกรณ์ภายในโครงข่ายตามที่ต้องการได้
- 4) พัฒนาสายอากาศสำหรับทุกอุปกรณ์สื่อสาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารภายในถ้ำให้ดียิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- ประโยชน์ คำสวัสดิ์. (2558). รายงานการวิจัยการพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์สำหรับระบบ
ชลประทานอัตโนมัติ. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พันธ์ศักดิ์ อากาศจร. (2561). รู้จัก “วิทยุถ้ำ” : เครื่องมือกู้ชีพของนักผจญถ้ำ. สำนักข่าวอิศรา.
- Bedford, M. (2002). "The 'HeyPhone' to the Rescue" 2002 RedCom. pp. 16-18.
- Gibson, A. (2003). "Channel characterisation and system design for sub surface communications." 2003 PhD thesis, University of Leeds.
- Olasupo, T. O. (2019). Wireless communication modeling for the deployment of tiny IoT devices in rocky and mountainous environments. IEEE Sensors Letters, 3(7), 1-4.
- Ranjan, A., & Sahu, H. B. (2014). Advancements in communication and safety systems in underground mines: present status and future prospects.
- Sauram, S., Uthansakul, P., & Uthansakul, M. (2010). DESIGN OF NODE LOCATIONS FOR INDOOR WIRELESS MESH NETWORKS. SURANAREE JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 17(3), 211-223.
- Soo, Q. P., Lim, S. Y., & Lim, D. W. G. (2018, July). Investigation of rough surfaces for propagation modelling in caves. In 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (pp. 555-556). IEEE.
- Soo, Q. P., Lim, S. Y., Lim, D. W. G., Rusti, N., Chong, K. H., Yap, K. M., & Lau, S. L. (2019, November). Measurement of an Uneven Terrain Model for Potential Applications in Caves. In 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE) (pp. 1-3). IEEE.
- Soo, Q. P., Lim, S. Y., Lim, D. W. G., Yap, K. M., & Lau, S. L. (2018). Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17(5), 743-746.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

P. Kumsawat, R. Sunaprom, T. Hoprasertwong, W. Pathonsuwan, N. Sawangsawai, R. Wongsan, K. Attakitmongcol, and A. Srikaew. “**Wireless Communication System for Voice Data Transmission Using nRF24L01 Module**”, Proc. Of The SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2021), pp. 198-204., August 6, 2021, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



EAT0037

Wireless Communication System for Voice Data Transmission Using nRF24L01 Module

P. Kumsawat¹*, R. Sunaprom¹, T. Hoprasertwong¹, W. Pathonsuwan¹,
N. Sawangawai¹, R. Wongsan¹, K. Attakitmongcol² and A. Srikaew²

¹School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

* Corresponding Author: prayoth@sut.ac.th

Abstract. Nowadays, there are frequent accidents in the cave. When the incidents occurred, it is impossible to communicate for assistance. This research is interested in testing voice data transmission within the cave, which measures the received signal strength and hearing ability using nRF24L01 wireless communication module at frequency of 2.4 GHz. The experiment measures voice communication in two locations which are indoor scenario and inside the cave. As the result, the nRF24L01 module is able to communicate effectively in LOS (Line of Sight) paths and low diffract actions.

Keywords: Wireless communication, nRF24L01 module, cave, indoor coverage, Signal strength.

1. Introduction

Nowadays, the cave has several advantages of travelling, relaxing, exploring mineral, researching about everything that can occur inside the cave. So, many people enter the cave to do activities. One of the biggest accidents happening inside the cave is when twelve boys and their football coach had been trapped in the cave during the flood for nine days and had been found by two British divers on a ledge in a cavern after a long search operation in the Tham Luang caves in Chiang Rai. The challenge is to extract them safely. In this situation, if there is more effective communication, the rescue operations are able to access immediately.

Therefore, many previous researches about communication in the cave environment are interested; [1]-[4] are some example of them. In [1], this paper studied behavior of radio signal propagation of rough surface by modeling the cave using ray tracing technique. As a result, the rough surface causes the lower signal strength. As the real scenario in [2], besides the rough surface, NLOS path of signal causes lower signal strength. Moreover, an antenna is one of factor using on wireless communication. In the cave where its surface is smoother than others, the conventional antenna should be used since the signal can propagate further and more efficient [3]. Furthermore, for underground mine where metal

and coal components are interested, although wired system is more effective, detecting the trapper miners' position which can support the rescue operation requires the wireless communication in case of accident in [4]. In addition, the obstructions that decrease signal strength in indoor scenarios are considered for planning the node that increases data transmission success [5]. In addition, characteristic of material of surface causing the signal loss is important factor to study and consider in the future works [6].

In this paper, the voice communication in indoor scenario and in the cave is measured using nRF24L01 module for both transmitting and receiving data. The measurement is taken at 2.4 GHz that employs wireless local area network.

2. System Architecture

Wireless communication system consists of transmitter, receiver, and data. Therefore, the operation of the voice communication system is divided into 2 parts: the voice transmitter and receiver circuits. This section presents the experiment of circuit testing to study and improve the voice signal before transmitting.

2.1. Voice transmitter circuit

This circuit consists of an Arduino nano, a microphone module, a headset with microphone, and an nRF24L01. Before using the microphone that receives the signal from speaker, it is tested by oscilloscope to measure signal frequency, and noise.

From the principle of the voice transmission, the microphone of headset receives the voice signal. Then, the microphone module improves the signal quality before sending it to the Arduino nano for converting the analog signal to digital signal. Subsequently, the signal is sent to the nRF24L01 to transmit the wireless data signal to the voice receiver circuit.

Firstly, we measure voice signal while no one speaks. The signal indicates that the microphone is able to receive other sounds from surrounding that are considered to be interferences as shown in Figure 1 (a). Next, when the speaker says the word 'hello', the received signal is a continuous signal with frequency of 197.39 Hz as shown in Figure 1 (b). After testing the microphone, it is connected to the circuit as shown in Figure 2.



Figure 1. (a) Transmitted Voice signal with interferences when no one speaks.
(b) Transmitted Voice signal when someone speaks.

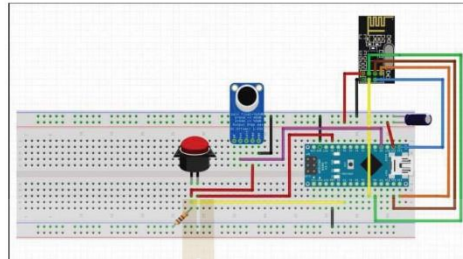


Figure 2. Voice Transmitter Circuit.

2.2. Voice receiver circuit

This circuit as shown in Figure 3 consists of an Arduino nano, a speaker, and an nRF24L01. Moreover, the circuit has connected a low pass filter circuit using a 0.1 μ F capacitor and a variable resistor for filtering the cut-off frequency at approximately 1500 Hz from the Arduino nano to reduce interference before sending data to the speaker.

From the principle of voice receiver, the circuit has waited to receive data from the transmitter all the time. When the circuit receives voice data signal through the nRF24L01 module, the Arduino nano converts the digital signal to analog signal through the PWM (Pulse Width Modulation) port. In addition, the analog signal is filtered by low pass filter before the signal is transmitted to the speaker.

In experiment of testing voice receiver circuit, the speaker is replaced by the oscilloscope to notice the characteristic of received voice signal. It is similar to the original signal while no one speaks. However, there is a large signal as shown in Figure 4 (a), which is caused by converting the analog to digital signal of the PWM port. Next, when the word 'Hello' has been said, the signal is different from the original signal although it has a similar frequency. When the signal is amplified, there is a high frequency on the voice signal which is noise signal generated by the PWM port as shown in Figure 4 (b). This figure also shows the frequency modulation of various voice signals about 100 to 1000 Hz with 50% duty cycle.

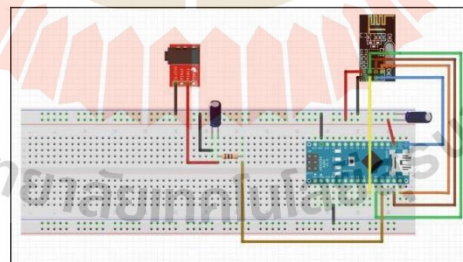


Figure 3. Voice Receiver Circuit.

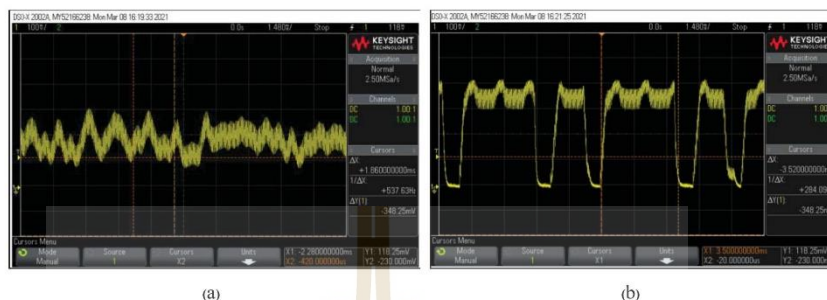


Figure 4. (a) Received Voice signal when no one speaks.
(b) Received Voice signal when someone speaks.

3. Indoor Experiment Setup

The aim of this paper is to measure received signal strength and hearing ability of receiver in various positions on the 3rd floor of the Sirindhorn Wisawatpat Building (F11), Suranaree University of Technology. The top of building plan is shown in Figure 5. In signal testing, the sampling rate was set at 2.4 kHz and the transmission rate (Bit rate) was set at 1 Mbps for good audio quality. There are 4 different routes and recording is made every 5 meters. The voice transmitter circuit is at starting position. Then, the voice signal is transmitted through the microphone to measure the hearing ability that can be heard from the voice receiver circuit. Therefore, the result of received signal strength is recorded from Spike Spectrum Analyzer and the hearing ability from the speaker. Moreover, the number of device connections on one network is measured. There are 5 input circuits to connect to 1 voice transmitter circuit for testing the sound. Then, we add each the voice receiver circuit and do this for 5 circuits. In real cave environment, the experiment is performed at Wat Tham Pathiharn Na Pho Klang, Amphoe Khong Chiam, Ubon Ratchathani.

4. Result and Discussion

This section presents the result of received signal strength and hearing ability analysis. The measurement evaluates the received signal strength while receiver moves far from the transmitter and recording is made every 5 meters. In addition, the aim of experiment is to see the effect of distance including LOS and NLOS path of signal for planning the repeating signal node.

Figure 5 presents the received signal strength measured at different distance. Firstly, the references of received signal strength in Figure 5 are based on the Wi-fi 2.4 GHz received signal strength indicator (RSSI) as shown in Table 1. The indicator consists of 4 levels: excellent, good, fair, and weak signal strength, which are green, blue, yellow, and red, respectively. As a result, the LOS RSSI values are good and excellent when the transmitter is about 30 meters far. However, when the receiver is turning at the corner, the NLOS RSSI values is continuously decreased. These results are consistent with the ones in [2] and [3] which are measured at frequency of 2.4 GHz. When the receiver moves far

from the transmitter, the received power continuously decreases and the signal strength of NLOS path extremely drops.

Figure 6 presents the result of the hearing voice levels which divide into 4 levels: normal hearing loss, moderate hearing loss, severe hearing loss, and profound hearing loss. In term of LOS path, the RSSI is excellent, and the hearing ability is normal. On the other hand, the RSSI decrease, and the hearing ability becomes moderate hearing loss continuously when the receiver starts to turn at the corner. As expected, the further the receiver moves from the transmitter and the more obstruction, the more loss in hearing abilities. In addition, we test the number of connections of voice communication devices in one network. When testing the connection of the transmission device, we find that one transmission circuit can transmit voice data to all 5 receiver circuits, but the noise level of hearing is lower when we compare to 1 to 1 transmission or 1 transmission circuit with the data receiver. Consequently, when the received signal strength is compared with the level of hearing voice, although the RSSI is fair, the hearing ability is still clear and we can communicate accurately at the beginning corner. The receiver is able to receive signal about 80 meters far from transmitter. Furthermore, when the measurement in cave is considered, the longest distance for hearing effectively normal voice is about 47.22 meters in LOS path as shown in Figure 7 while NLOS is normal hearing at distance less than 2 meters in turning corner.



Figure 5. Received Signal Strength measured at different distance.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Figure 6. The hearing ability measured at different distance.

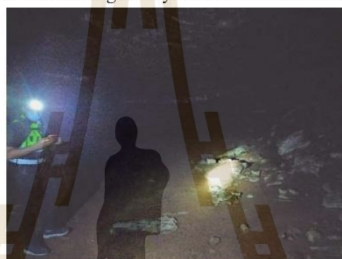


Figure 7. The measurement of voice signal in cave.

Table 1. The reference of Wi-Fi received signal strength indicator.

Wi-Fi 2.4 GHz Signal Strength	level	Colour
> -50 dBm	Excellent	Green
-50 to -60 dBm	Good	Blue
-60 to -70 dBm	Fair	Yellow
< -70 dBm	Weak	Red

5. Conclusions

In this paper, we have designed the wireless communication in cave at 2.4 GHz using nRF24L01 module. For the measurement in indoor scenario, LOS is able to communicate clearly and accurately. For the measurement in cave, the communication is still clear but nRF24L01 module is suitable to be a gateway to expand and enhance the connection between transmitters and receivers.

Acknowledgments

This work was supported by a grant from Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission under Grant B62-1-(2)-004. The authors also would like to thank Suranaree University of Technology for all great supports.

References

- [1] Soo Q. P, Lim, S. Y. and Lim D. W. G. 2018 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (pp. 555-556) IEEE.
- [2] Soo Q P, Lim S Y, Lim D W G, Rusli N, Chong K H, Yap K M, and Lau S L 2019 *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)* (pp. 1-3) IEEE.
- [3] Soo Q P, Lim S Y, Lim D W G, Yap K M, and Lau S L 2018 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **17**(5) 743-746
- [4] Ranjan A, and Sahu H B 2014 Advancements in communication and safety systems in underground mines: present status and future prospects
- [5] Sauram S, Uthansakul P, and Uthansakul M 2010 *Suranaree Journal of Science and Technology* **17**(3) 211-223
- [6] Olasupo T O 2019 *IEEE Sensors Letters* **3**(7) 1-4



ประวัติผู้เขียน

นายรัชนนท์ สุณาพรม เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พุทธศักราช 2541 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์พิทักษ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนอุดรพิชัยรักษ์พิทยา อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอุดรพัฒนการ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี และสำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรม โทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา

ระหว่างศึกษาได้นำเสนอบทความและเข้าร่วมประชุมในงานประชุมนานาชาติ The SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2021) ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2564



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี