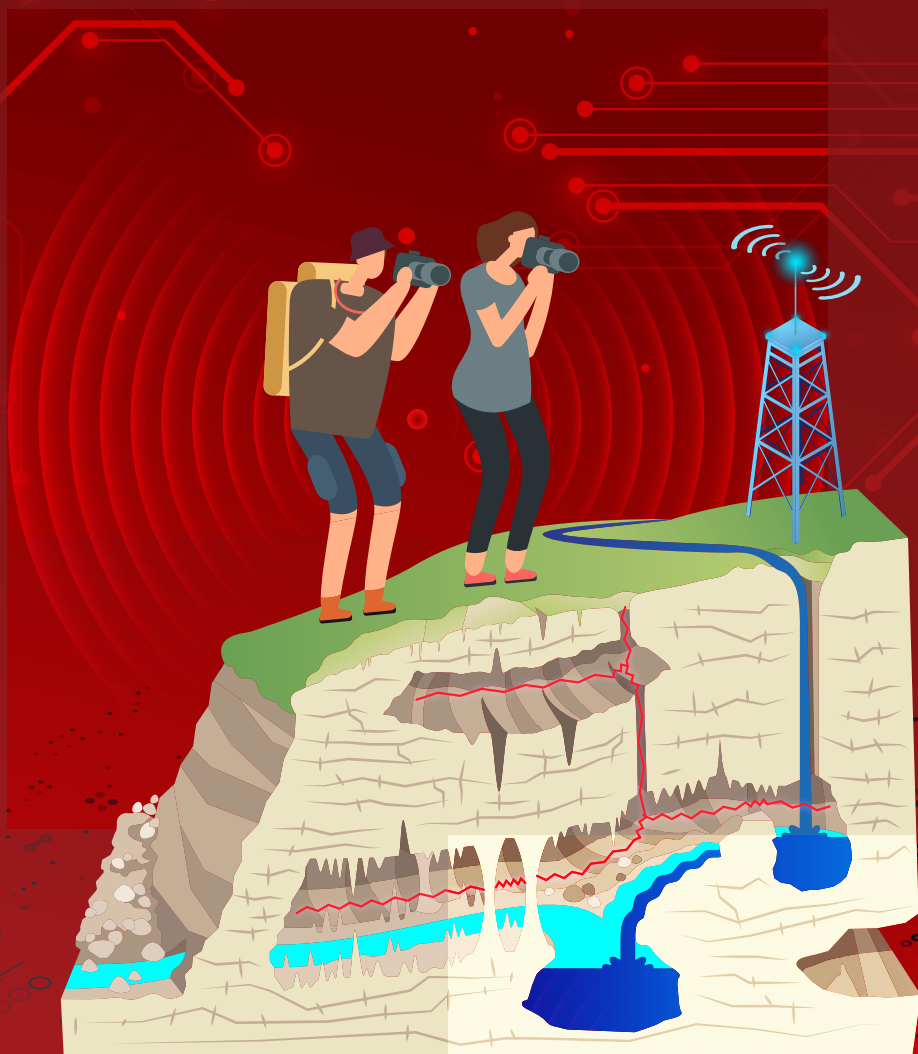




การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ ภายในถ้ำเชียงดาว

A STUDY ON RADIO WAVE PROPAGATION IN CHIANG DAO CAVE

รังสรรค์ วงศ์สรรค์¹

พีรสันต์ คำสาลี²

อัษฎพงศ์ วรรณโกมล³

ประโยชน์ คำสวัสดิ์⁴

อาทิตย์ ศรีแก้ว⁵

อรรถวิทย์ จันทอุปสี⁶

Rangsan Wongsan¹

Peerasan Khamsalee²

Akkhapun Wannakomol³

Prayoth Kumsawat⁴

Arthit Srikaew⁵

Atawit Jantaupalee⁶

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000^{1 ถึง 6}

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand^{1 to 6}

Corresponding E-mail: rangsan@sut.ac.th

Received Date January 26, 2022
Revised Date October 3, 2022
Accepted Date October 18, 2022

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์ภัยแล้งหลวงในปี พ.ศ. 2561 ได้พบปัญหาของระบบสื่อสารระหว่างการปฏิบัติการกู้ภัยไม่สามารถใช้งานภายในถ้ำได้ เนื่องจากคลื่นความถี่ที่ใช้มีการลดทอนสูงในขณะที่แพร่กระจายในโพรงถ้ำ จึงทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ตลอดแนวโพรงถ้ำ จากทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นพบว่า คลื่นความถี่ต่ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นพื้นผิวนั้นสามารถทะลุผ่านชั้นหินของภูเขาได้ ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าการสื่อสารด้วยคลื่นความถี่ต่ำ มีความเป็นไปได้ในการแพร่ภายในโพรงถ้ำได้ดีกว่าคลื่นความถี่ที่สูงกว่า ในบทความนี้จึงได้เสนอการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ เพื่อตรวจสอบปัญหาและความเป็นไปได้ในการใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ โดยทดสอบในถ้ำเชียงดาวซึ่งเป็นถ้ำหินปูนในจังหวัดเชียงใหม่ และเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ LF ถึง UHF โดยใช้ทั้งขนาด สภาพแวดล้อม และเส้นทางเดินของถ้ำที่ได้นำเสนอ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คลื่นความถี่ต่ำสามารถส่งผ่านตลอดเส้นทางเดินในโพรงถ้ำขนาดใหญ่และส่งผ่านชั้นหินได้ในขณะที่คลื่นความถี่สูงเกิดการลดทอนสูงเมื่อส่งคลื่นผ่านโพรงถ้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลองที่ได้นำเสนอนั้นให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดทดสอบด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาความถี่ต่ำที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาระบบสื่อสารภายในถ้ำในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบสื่อสารในถ้ำ การแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ

Abstract

During the Tham Luang Search and Rescue operation in 2018, a problem occurred from wireless communication system fail due to the fact that the frequencies used were highly attenuated while propagating in the cave. According to the radio wave propagation theory, low frequencies had surface-wave properties and could penetrate through rock layers of mountains. Therefore, the hypothesis was that radio communication with low frequencies could provide better propagation in the cave than higher frequencies. This paper presented a study on radio wave propagation in caves to verify the problem and the possibility of using different frequencies to communicate. The study was done in Chiang Dao cave, Chiang Mai. In addition, the study proposed a propagation model of the radio frequencies in the LF to UHF bands by using the cave's dimension, environment, and passages. The study result found that low-frequency band could transmit through large-sized cave passages or rock layers. In contrast, higher frequency band highly attenuated while propagating through the cave passage. Furthermore, it was found that the modeling result corresponded with the measurement result. Therefore, the study result could be beneficial for determining appropriate low frequency bands to develop effective cave communication systems in the future.

Keywords: In-cave communication system, Wave propagation in cave, Modeling of wave propagation in cave passages

**** กองบรรณาธิการวารสารวิชาการ กสทช. มีข้อสังเกตว่า** การศึกษานี้อาจมีข้อจำกัดบางประการ อาทิ ช่วงเวลาทำการทดลอง เช่น ฤดู ปริมาณน้ำ ความชื้น รวมทั้งแบบจำลองตามเอกสารอ้างอิงระบุอยู่ในย่านความถี่ UHF หรือ ย่านความถี่ 1MHz-1000MHz ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวส่งผลต่อความแม่นยำในช่วงย่านความถี่ต่ำ ประกอบกับเป็นการทดลองที่มีเพียง 1 ตัวอย่าง จึงอาจมีผลต่อความแม่นยำ

1. บทนำ

จากเหตุการณ์ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นกับนักกีฬาฟุตบอลทีมเยาวชนและโค้ช รวม 13 คนที่ติดอยู่ในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ณ อุทยานขุนน้ำนางนอน อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ในปี พ.ศ. 2561 ที่ผ่านมา ทำให้เกิดความตระหนักถึงความสำคัญในการช่วยเหลือ ภัย และป้องกันภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยส่วนสำคัญคือ การสนับสนุนระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ เพื่อให้ระบบการสื่อสารไม่เป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ ซึ่งกรณีเหตุเกิดภายในถ้ำจะพบข้อจำกัดด้านการสื่อสาร ด้วยลักษณะทางกายภาพ ประกอบกับธรรมชาติของคลื่นความถี่ที่ใช้เป็นคลื่นพาห์ (Carrier wave) ในระบบสื่อสารแต่ละย่านความถี่ที่มีคุณลักษณะเฉพาะและตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าจากเหตุการณ์ที่อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอนดังกล่าวทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสื่อสารไร้สาย บนคลื่นความถี่ช่วง VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) หรือวิทยุคมนาคมระบบอื่น ๆ ไม่สามารถใช้งานได้หรือไม่สามารถใช้งานได้

จากการวิจัยที่ผ่านมาของ Bedford and Kennedy (2014) Deryck (1978) Emslie et al. (1975) Rak and Pechac (2007) และ Soo et al. (2018) ได้ศึกษาแบบจำลองของถ้ำหรืออุโมงค์ที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation) พบว่า การสร้างแบบจำลองเหมาะสำหรับถ้ำและอุโมงค์ที่ใกล้เคียงหรือเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น โดยมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกันตลอดความยาวและมีขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของคลื่นความถี่นั้น ๆ ได้ ดังนั้นตามแนวทางการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นความถี่ โดยศึกษาคลื่นความถี่ตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ไปจนถึงคลื่นความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) ด้วยแนวทางเชิงประจักษ์จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของคลื่นความถี่แต่ละย่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการทดลองและแบบจำลองของถ้ำอีกด้วย

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 สภาพต้านทานทางไฟฟ้าและสภาพนำทางไฟฟ้า

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity) ไม่เท่ากัน จาก Glover (2015) พบว่า หนึ่งในคุณสมบัติที่มีผลกับค่าความนำไฟฟ้า คือ ค่าความพรุน (Porosity) ในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อความพรุนเพิ่มขึ้นและถูกแทนที่ด้วยแร่ต่าง ๆ จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) มีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความนำทางไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

ρ คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์มเมตร)

จากตัวอย่างหินในงานวิจัยของ Daniels (2004) พบว่า ตัวกลางที่เป็นหินปูนจะมีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ที่ 10^{-8} ถึง 10^{-6} ซีเมนส์ต่อเมตร อีกทั้งจากงานวิจัยของ Bedford (2001) และ Gibson (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบสื่อสารภายในถ้ำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำส่งผ่านชั้นหิน ซึ่งคลื่นความถี่ต่ำมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดิน (Ground wave) และคลื่นผิว (Surface wave) โดยคุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากค่าความลึกผิว (Skin depth) ที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านตัวกลางที่มีความเป็นตัวนำทางไฟฟ้า ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2 (Siwiak, 2007)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (2)$$

เมื่อ δ คือ ความลึกผิว (เมตร)

σ คือ ความนำทางไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (เฮนรีต่อเมตร)

2.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ

จากงานวิจัยของ Deryck (1978) และ Emslie et al. (1975) พบว่า โดยทั่วไปแล้ว การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในถ้ำหรืออุโมงค์ใต้ดิน ถ้าเป็นลักษณะของอุโมงค์ที่โพรงทางเดินมีรูปร่างที่สม่ำเสมอหรือตลอดระยะทางมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน จะพิจารณาแบบจำลองให้เสมือนกับท่อนำคลื่น ซึ่งโดยทั่วไปท่อนำคลื่นจะมีโครงสร้างกลวง มีผนังตัวนำรองรับไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric: TE) และแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น ซึ่งขนาดของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวกำหนดว่าคลื่นความถี่ใดบ้างที่สามารถส่งผ่านจากต้นทางไปสู่ปลายทางได้ โดยความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านเข้าไปได้โดยมีการสูญเสียน้อยที่สุด คือ ความถี่ตัด (Cut-off frequency) ซึ่งสามารถหาได้จากความยาวคลื่นตัด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับถ้ำตามธรรมชาติที่มีลักษณะคล้ายท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยแล้ว จะสามารถหาความยาวคลื่นตัดได้ตามสมการที่ 3

$$\lambda_{mn} = \frac{2\sqrt{ab}}{\sqrt{m^2 \frac{b}{a} + n^2 \frac{a}{b}}} \quad (3)$$

โดย a คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น (เมตร)

b คือ ความยาวของท่อนำคลื่น (เมตร)

m, n คือ โหมดของท่อนำคลื่น

อย่างไรก็ตาม อุโมงค์หรือโพรงถ้าไม่ว่าจะเป็นชนิดผนังห็นแบบใดก็ตาม จะไม่อยู่ในสภาพดังกล่าวโดยสิ้นเชิง เนื่องจากผนังภายในของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวนำที่ใกล้เคียงสมบูรณ์ที่สุด (Near-perfect conductors) แต่ผนังของถ้าจะทำหน้าที่เหมือนไดอิเล็กทริก (Dielectric) มากกว่าตัวนำสมบูรณ์ และจากงานวิจัยของ Bedford and Kennedy (2014) Emslie et al. (1975) และ Rak and Pechac (2007) ได้อธิบายถึงแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในอุโมงค์และถ้ำ ซึ่งพิจารณาเทียบกับลักษณะทางกายภาพของถ้ำ โดยจะเกิดการลดทอนจากทั้งโหมดของคลื่นในแนวตั้งและแนวนอน ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$\alpha_{mn}^{(v)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3} \frac{(m+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} + \frac{1}{b^3} \frac{\epsilon_r^{(v)}(n+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(v)} - 1}} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_{mn}^{(h)} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3} \frac{\epsilon_r^{(h)}(m+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} + \frac{1}{b^3} \frac{(n+1)^2}{\sqrt{\epsilon_r^{(h)} - 1}} \right) \quad (5)$$

โดย $\epsilon_r^{(v)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของขั้วคลื่นแนวตั้ง

$\epsilon_r^{(h)}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของขั้วคลื่นแนวนอน

การลดทอนจากความขรุขระของผิว (Roughness) ที่เกิดจากความขรุขระบนผิวของผนังถ้ำ ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร สามารถแสดงในสมการที่ 6

$$\alpha_{roughness} = 4.343\pi^2 \Delta h^2 \lambda \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \quad (6)$$

โดย Δh คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความสูงบนผิวขรุขระของผนัง (เมตร)

การลดทอนที่เกิดจากความเอียง (Tilt) ของผนังถ้ำในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ซึ่งแสดงในสมการที่ 7

$$\alpha_{tilt} = \frac{4.343\pi^2 \theta^2}{\lambda} \quad (7)$$

โดย θ คือ มุมเอียงของผนังถ้ำ (เรเดียน)

ซึ่งผลรวมของการลดทอนตามแบบจำลองการแพร่คลื่น จะสามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$\alpha = \alpha_{mn} + \alpha_{roughness} + \alpha_{tilt} \quad (8)$$

2.3 การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นตามคลื่นความถี่

การทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่ที่เกิดขึ้นภายในถ้ำหินปูน เพื่อนำมาศึกษาคลื่นความถี่ที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้ภายในถ้ำ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bedford and Kennedy (2014) Kjeldsen and Hopkins (2006) Rak and Pechac (2007) และ Soo et al. (2018) ได้มีการศึกษาคลื่นความถี่ในย่าน UHF และย่าน SHF (Super High Frequency) ซึ่งเป็นย่านความถี่สูง ในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มการศึกษาคลื่นความถี่ในย่าน LF จนถึง UHF โดยกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ย่านความถี่ต้น ย่านความถี่กลาง และย่านความถี่ปลาย ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้ได้งดการทดสอบย่านความถี่ LF ที่มีความถี่ต่ำกว่า 300 kHz (กิโลเฮิรตซ์: Kilohertz) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของค้างคาวที่อาศัยเป็นจำนวนมากในสองถ้ำที่ทำการทดสอบ โดยจากงานวิจัย Jones and Holderied (2007) และ Moss (2018) พบว่า ค้างคาวหลายพันธุ์ที่มีอยู่ทั่วโลกจะใช้สัญญาณคลื่นความถี่อัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) ในการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าเพื่อวัดระยะทาง (Bat echolocation) โดยมีความถี่ตั้งแต่ 20-200 kHz

ตารางที่ 1 ความถี่ที่กำหนดสำหรับใช้ทดสอบในแต่ละย่านความถี่

ย่านความถี่	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
LF	35 kHz	100 kHz	165 kHz	232.5 kHz	300 kHz
MF	350 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
HF	3.5 MHz	10 MHz	16.5 MHz	23.5 MHz	30 MHz
VHF	35 MHz	100 MHz	165 MHz	232.5 MHz	300 MHz
UHF	350 MHz	1000 MHz	1650 MHz	2325 MHz	3000 MHz

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

3.1 เพื่อศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารที่เหมาะสมกับการสื่อสารในถ้ำ

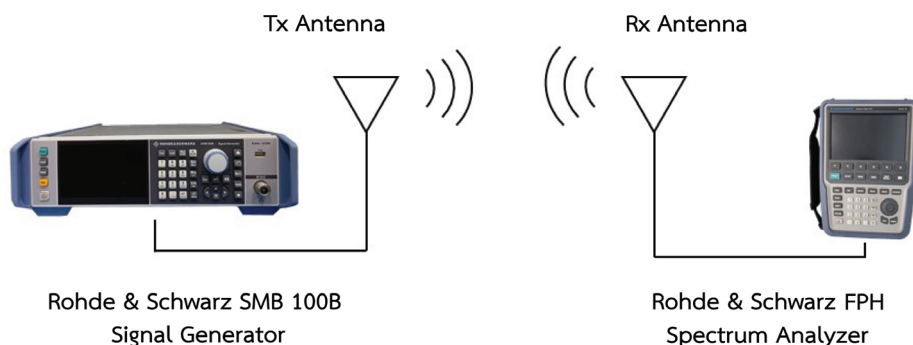
3.2 เพื่อเผยแพร่ผลการศึกษาให้หน่วยงานภาครัฐ ภาคประชาคม และประชาชน รับทราบ ผลการศึกษาด้านการเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ได้จากการวิจัย

4. วิธีการวิจัย

4.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดทดสอบ

การวัดการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น (Propagation path loss) โดยใช้สายอากาศ (Antenna) แต่ละคลื่นความถี่ ประกอบด้วย ช่วงความถี่ 300-350 kHz ใช้สายอากาศรูป Passive shielded (20 Hz-1 MHz AH Systems SAS-565L) ช่วงความถี่ 1000-3000 kHz ใช้สายอากาศ Isotron 200B ช่วงความถี่ 3.5-30 MHz ใช้สายอากาศรูป Passive shielded (1 kHz-30 MHz AH Systems SAS-564) ช่วงความถี่ 35-232.5 MHz ใช้สายอากาศ Biconical (20 MHz-1 GHz Aaronia BicoLOG 20100) และ ในช่วงความถี่ 300 MHz-3 GHz ผู้วิจัยได้สร้างสายอากาศโมโนโพลความยาว 1/4 ของความยาวคลื่น (Omnidirectional quarter-wave monopole) สำหรับสายอากาศแต่ละความถี่ โดยหลังจากนั้นจะป้อน สัญญาณจากเครื่อง Rohde & Schwarz SMB100B signal generator ซึ่งใช้สัญญาณ Narrow-band Continuous Wave (CW) ไปยังสายอากาศผ่านสายนำสัญญาณแบบสูญเสียต่ำ (Low loss) 50 โอห์มเบอร์ LMR-240 ความยาว 2 เมตร และที่ภาครับจะรับด้วย Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer

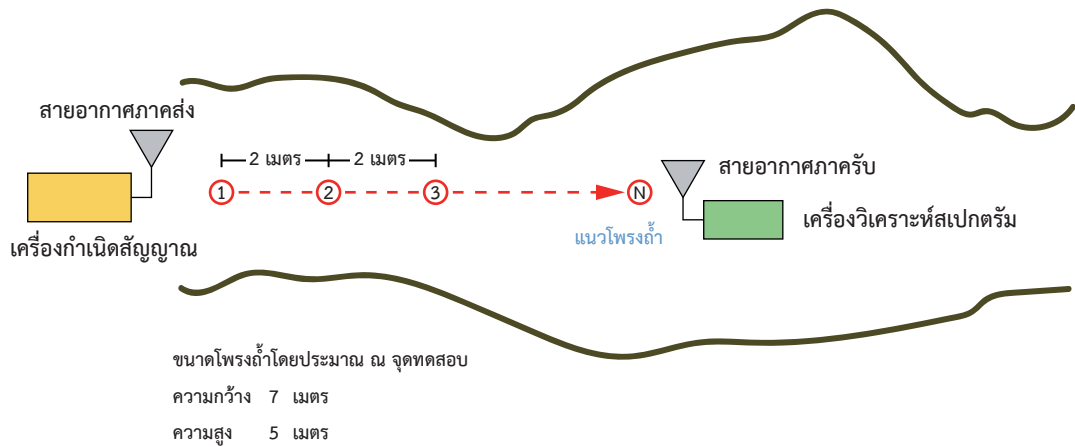
กับสายอากาศ Rohde & Schwarz HE400HF Antenna Module (8.3 kHz-30 MHz) ในย่านความถี่ 300 kHz-30 MHz สายอากาศ Rohde & Schwarz HE400UWB Antenna Module (30 MHz-6 GHz) ในย่านความถี่ 35-300 MHz และสายอากาศ Aeronia HyperLOG 3080 X Antenna (380 MHz-8 GHz) ในย่านความถี่ 350 MHz-3 GHz ดังแสดงในภาพที่ 1



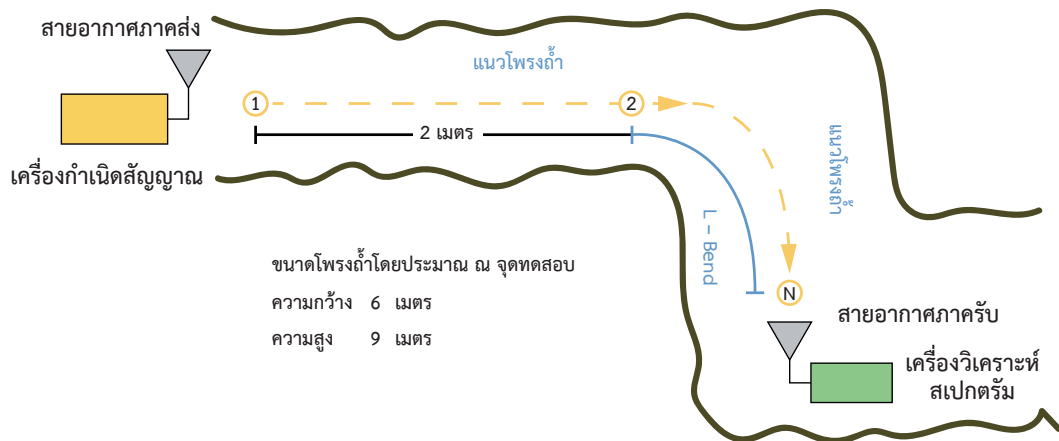
ภาพที่ 1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการออกแบบการวัดทดสอบที่ดีและเหมาะสมที่สุดก็คือการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่ทั้งในแนวระดับสายตา (Line of Sight: LOS) และแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line of Sight: NLOS) ทั้งเงื่อนไขข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (Vertical-Vertical linear polarization: V-V) และข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (Vertical-Horizontal linear polarization: V-H) โดยอ้างอิงวิธีการวัดทดสอบจาก Bedford and Kennedy (2014) Kjeldsen and Hopkins (2006) Lee and Bertoni (2003) และ Soo et al. (2018) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยพิจารณาที่ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น เพื่อนำมาค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในแต่ละคลื่นความถี่ที่ทำการวัดทดสอบดังตารางที่ 1 การวัดทดสอบทั้ง LOS และ NLOS จะมีการทดสอบแบบเดียวกันทุกประการ โดยจะแตกต่างกันเฉพาะสภาพภูมิประเทศภายในถ้าเท่านั้น ในส่วนของอุปกรณ์ภาคส่งทั้งหมดจะถูกนำไปติดตั้งบริเวณจุดเริ่มต้นของแนวผนังโครงถ้ำที่เป็นเป้าหมาย โดยสายอากาศภาคส่งจะถูกกำหนดให้มีข้อคลื่นเป็นแบบแนวตั้งเพียงอย่างเดียว ส่วนสายอากาศภาครับเป็นแบบแถบความถี่กว้างพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ (Spectrum analyzer) วัดค่าระดับของสัญญาณทั้งข้อคลื่นแบบแนวตั้งและแบบแนวนอน โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับที่ติดตั้งตามแนวโครงถ้ำให้มีระยะห่างออกมาจากสายอากาศภาคส่งครั้งละ 2 เมตร จนถึงระยะสุดท้ายที่ 20 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 การทดสอบแบบแนวระดับสายตา (LOS)



ภาพที่ 3 การทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวระดับสายตา (NLOS)

โดยค่าระดับความแรงของสัญญาณที่สายอากาศภาครับรับได้และส่งไปยังตัวป้อน (Input) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ไม่ใช่ค่าความแรงของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ณ ตำแหน่งนั้น เนื่องจากสายอากาศภาครับที่ใช้งานมีอัตราขยายค่าหนึ่งเฉพาะความถี่นั้น ๆ และยังมีการสูญเสียไม่เท่ากันในสายนำสัญญาณที่ถูกต่อจากสายอากาศภาครับไปยังตัวป้อนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่อีก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัตถุประสงค์คือการวัดค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าระดับความแรงของสัญญาณที่เริ่มแผ่ออกมาจากสายอากาศและแพร่กระจายไปตลอดแนวโพรงทุก ๆ ระยะ 2 เมตร ของการวัดทดสอบมาพิจารณาหาการสูญเสียจากการแพร่คลื่นได้โดยตรง ทำให้ค่าระดับกำลังที่วัดได้จากสายอากาศภาครับผ่านสายนำสัญญาณจนถึงตัวป้อนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่สามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นแต่ละความถี่ที่เดินทางในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติได้ โดยใช้ความลาดเอียงของเส้นตรง (Linear line) สำหรับพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในแต่ละความถี่ทั้งเงื่อนไขการวัดทดสอบแบบ V-V และ V-H หากความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันมากจะแสดงให้เห็นค่าการสูญเสียมีค่าสูง ในขณะที่ความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันน้อยกว่าจะแสดงให้เห็นว่าเกิดค่าการสูญเสียต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังที่รับได้ในสภาพแวดล้อมภายในโพรงถ้าแต่ละระยะทางนั้นอาจเกิดการแพร่หลายวิถี (Multipath fading) จากการสะท้อนของสิ่งกีดขวางภายในถ้ำจนทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างกันของคลื่นเกิดขึ้น

ทั้งนี้ การทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่แบบ LOS ได้กำหนดโพรงถ้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงแนวเส้นตรงมากที่สุด เพื่อพิจารณาเฉพาะการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่โดยโพรงถ้ำใกล้เคียงแนวเส้นตรงที่ผู้วิจัยเลือกเป็นสถานที่ทำการทดสอบอยู่ในเส้นทางเดินไปสู่ถ้ำน้ำ ซึ่งมีระยะทางหลายช่วงอยู่ที่ประมาณ 30-50 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) ส่วนการวัดทดสอบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ NLOS ผู้วิจัยต้องการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นที่อาจเกิดการสะท้อน (Reflection) หรือเลี้ยวเบน (Diffraction) จึงได้กำหนดให้เลือกใช้บางตำแหน่งของโพรงถ้ำที่ผนังมีลักษณะเป็นแนวโค้งสามารถบดบังสัญญาณแนว LOS ได้ (Collin, 1985) เพื่อนำมาตั้งสมมติฐานว่าคลื่นความถี่คลื่นใดสามารถเลี้ยวเบนหรือสะท้อนบนผนังถ้ำที่มีความคดเคี้ยวได้มากน้อยอย่างไร จะสามารถสรุปได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่บอกกว่าคลื่นความถี่นั้นสามารถใช้งานได้ดีที่สุดในถ้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติได้ บริเวณที่ส่วนโค้งของผนังถ้ำเกิดการบดบังคลื่นความถี่อย่างชัดเจนและมีระยะทางตามแนวโค้งของผนังถ้ำอย่างน้อย 20 เมตร ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4 (ข)



ก) LOS



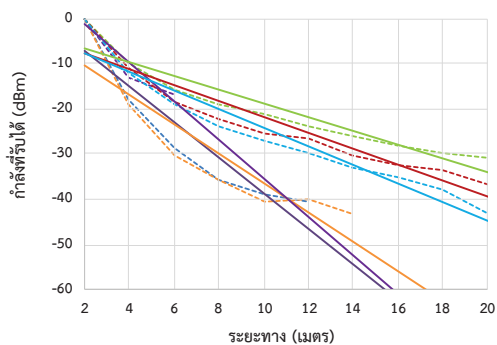
ข) NLOS

ภาพที่ 4 ตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่ ณ ถ้ำเชียงดาว

5. ผลการวิจัย

5.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)

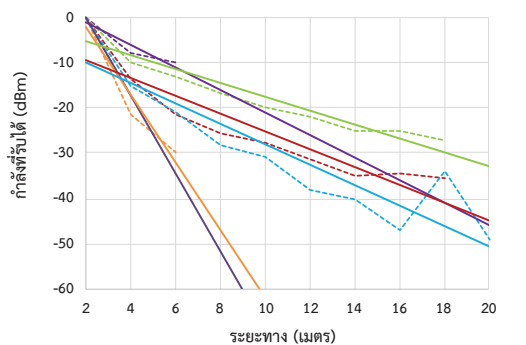
ในหัวข้อนี้จะแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร ซึ่งเป็นการพิจารณาเฉพาะการวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ที่มีข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (V-V) ซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบวิทยุสื่อสารโทรคมนาคมทั่วไป และข้อคลื่นเชิงเส้นแบบแนวตั้งที่ภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (V-H) เพื่อพิจารณาว่าแต่ละคลื่นความถี่มีการเปลี่ยนข้อคลื่นในขณะที่แพร่หรือไม่ แสดงผลดังกราฟในภาพที่ 5-9



ระยะทาง (เมตร)

--- 300 kHz --- 350 kHz --- 1000 kHz
 --- 1650 kHz --- 2325 kHz --- 3000 kHz
 --- Linear (300 kHz) --- Linear (350 kHz) --- Linear (1000 kHz)
 --- Linear (1650 kHz) --- Linear (2325 kHz) --- Linear (3000 kHz)

ก) V-V Polarization

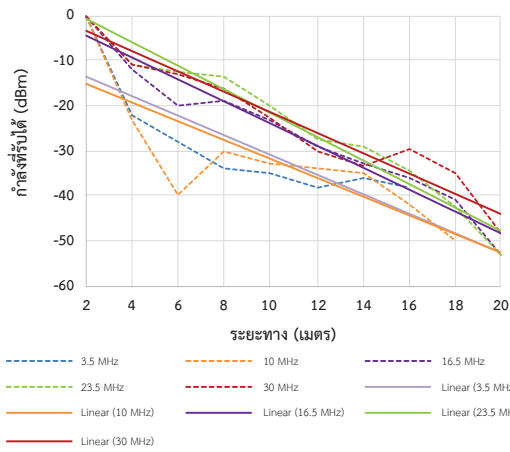


ระยะทาง (เมตร)

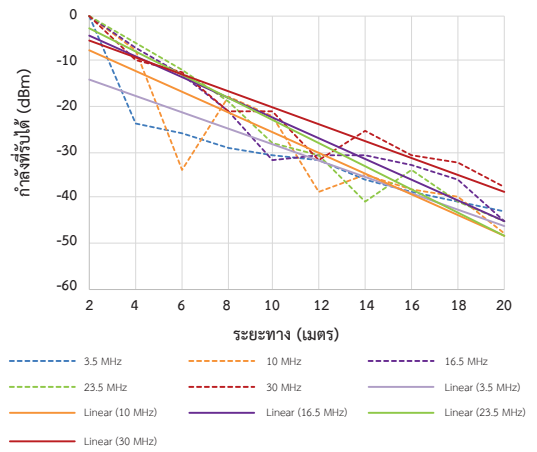
--- 300 kHz --- 350 kHz --- 1000 kHz
 --- 1650 kHz --- 2325 kHz --- 3000 kHz
 --- Linear (300 kHz) --- Linear (350 kHz) --- Linear (1000 kHz)
 --- Linear (1650 kHz) --- Linear (2325 kHz) --- Linear (3000 kHz)

ข) V-H Polarization

ภาพที่ 5 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ LF (Low Frequency) และ MF (Medium Frequency)

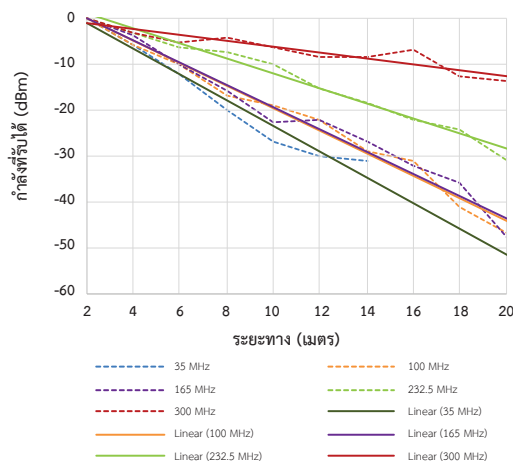


ก) V-V Polarization

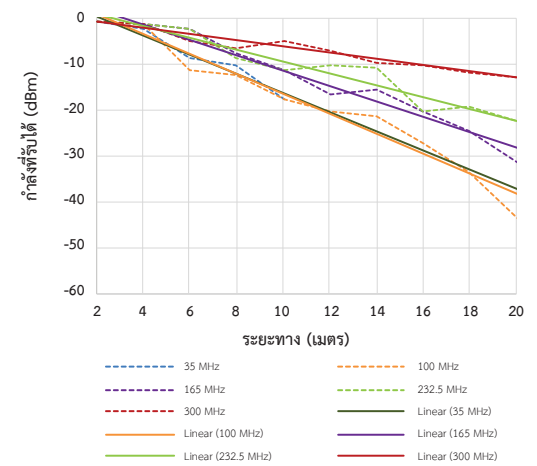


ข) V-H Polarization

ภาพที่ 6 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ HF (High Frequency)

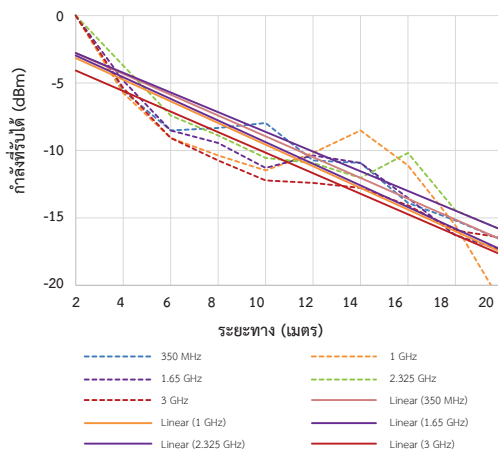


ก) V-V Polarization

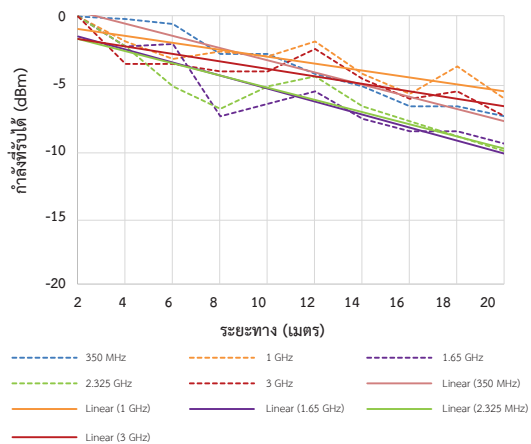


ข) V-H Polarization

ภาพที่ 7 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)

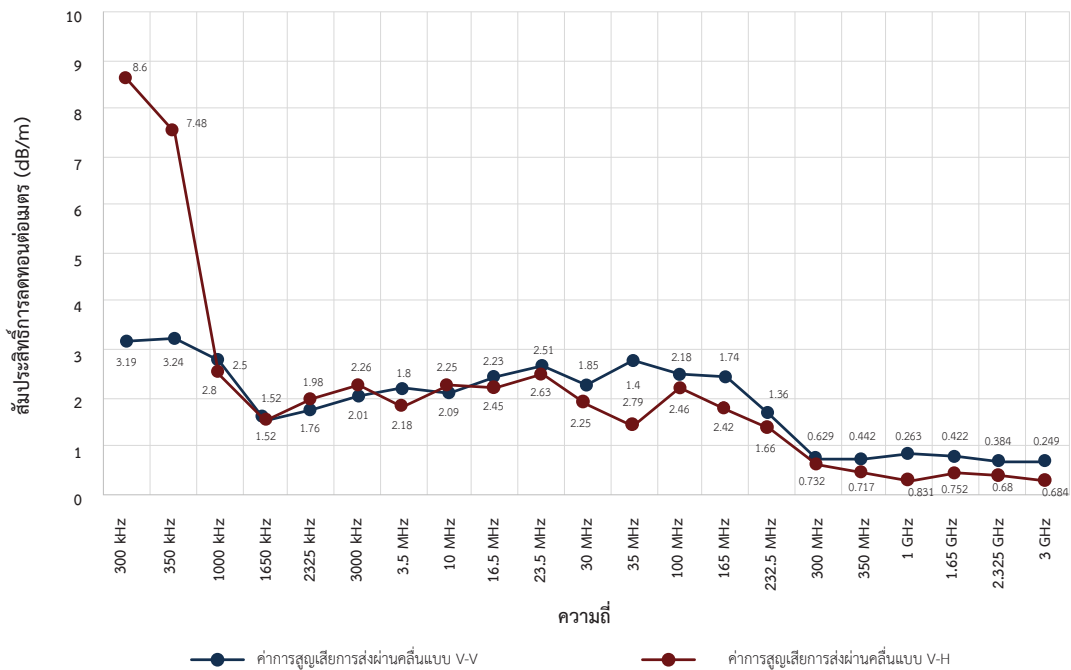


ก) V-V Polarization



ข) V-H Polarization

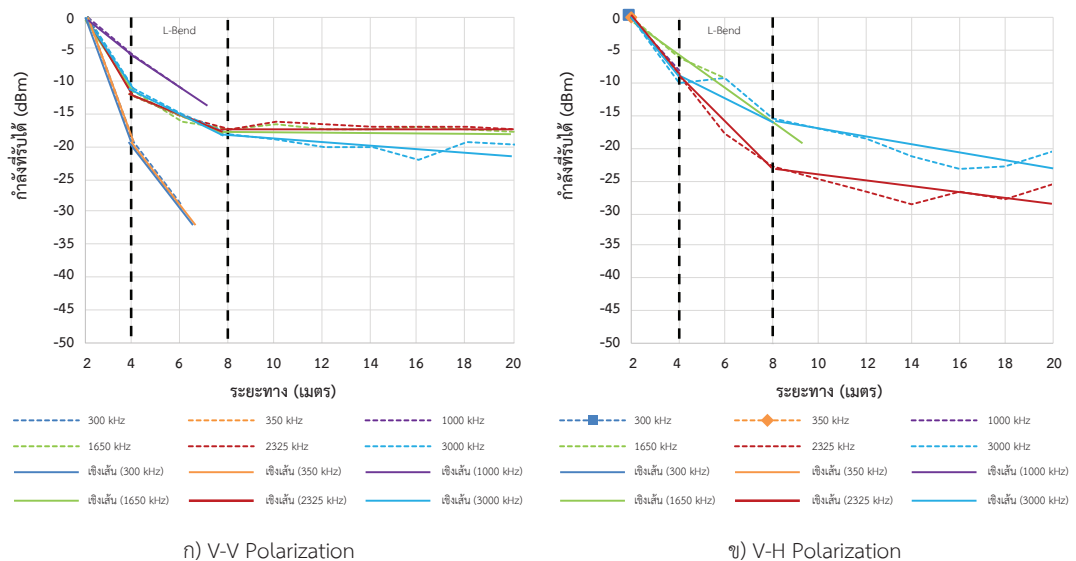
ภาพที่ 8 ผลการทดสอบแบบแนวสายตา (LOS) ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)



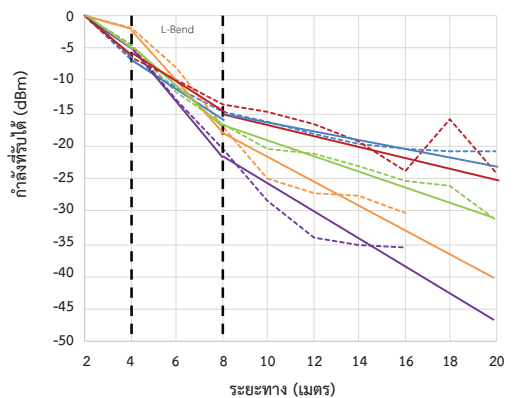
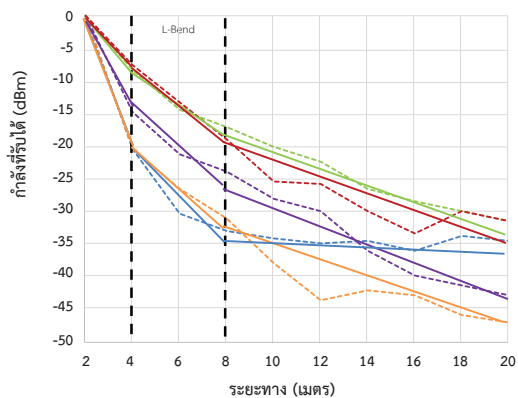
ภาพที่ 9 สัมประสิทธิ์การลดทอนจากการทดสอบในแนวสายตาทุกย่านความถี่

5.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)

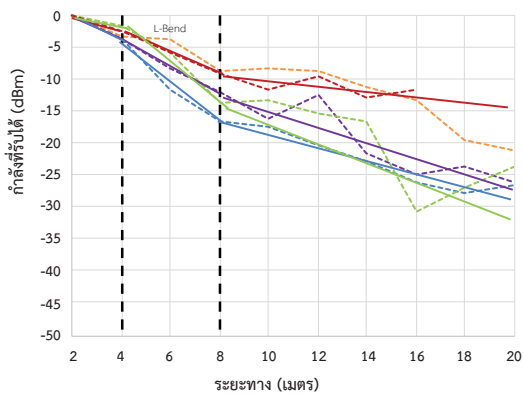
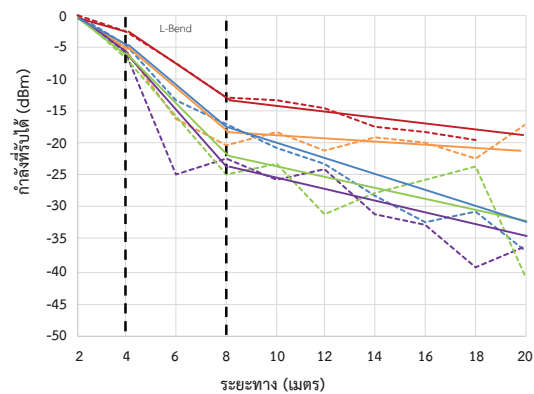
ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่แพร่ในโพรงถ้ำนั้น จะต้องพิจารณาจากผลการแพร่ของคลื่นที่มีสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติภายในโพรงถ้ำเป็นอุปสรรคขวางเส้นทางการแพร่คลื่นอยู่ด้วย ดังนั้นจึงได้พิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรที่ระยะจากจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งไปตามส่วนโค้งของผนังถ้ำที่เป็นสิ่งกีดขวางจนถึงระยะที่เป็นทางตรง โดยเรียกระยะนี้ว่า L-Bend ในการทดสอบได้กระทำทั้งแบบชั่วคราวเชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาคส่งและภาครับ (V-V) และชั่วคราวเชิงเส้นแบบแนวตั้งที่ภาคส่งและแนวนอนที่ภาครับ (V-H) ซึ่งสามารถแสดงโดยกราฟในภาพที่ 10-14



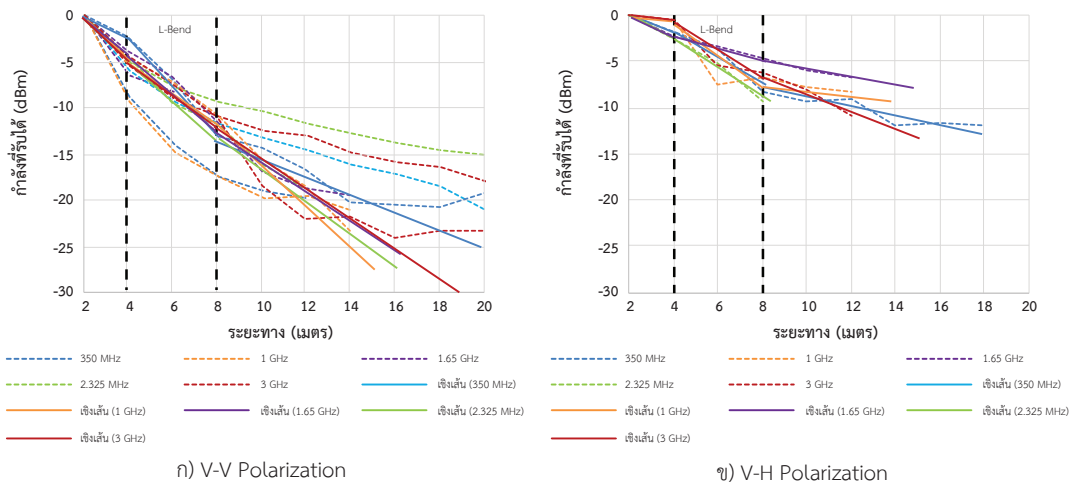
ภาพที่ 10 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ LF (Low Frequency) และ MF (Medium Frequency)



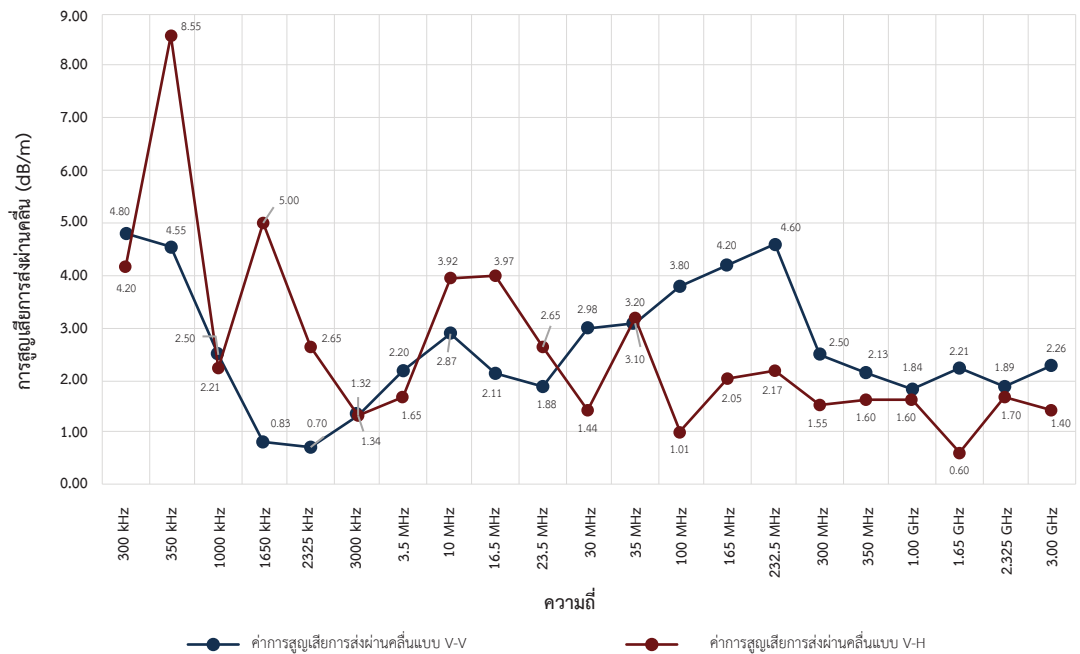
ภาพที่ 11 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ HF (High Frequency)



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ VHF (Very High Frequency)



ภาพที่ 13 ผลการทดสอบแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS) ย่านความถี่ UHF (Ultra High Frequency)



ภาพที่ 14 การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นจากการทดสอบที่ไม่อยู่ในแนวสายตาทุกย่านความถี่

6. การอภิปรายผล

6.1 การวัดทดสอบแบบแนวสายตา (LOS)

จากผลการทดสอบซึ่งได้ทำการปรับช่วงเพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล หรือ นอร์มัลไลซ์ (Normalized) ค่ากำลังที่รับได้ในทุกย่านความถี่ เพื่อให้สังเกตได้ถึงค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร ได้อย่างชัดเจน โดยย่านความถี่ LF (300 kHz) และย่าน MF ตันแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) ที่ทำการทดสอบ ทั้งชั่วคราวแบบ V-V และ V-H จะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรค่อนข้างสูง เนื่องจากสมมติฐาน ตามทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นทั่วไประบุว่าคลื่นความถี่ย่านนี้นั้นมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นดินหรือ คลื่นผิวที่สามารถแพร่ลงไปในผิวดินได้ดี (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) หากส่งผ่านตัวกลางที่เป็นดินหรือหินที่มี ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กสอดคล้องกับความถี่และความยาวคลื่น จะเกิดการเหนี่ยวนำหรือซึมซาบ เข้าไปในเนื้อตัวกลางมากกว่าที่จะแพร่คลื่นออกไปในแนวระดับสายตา จึงทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูง ส่วนที่ย่านความถี่ MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดิน แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผืนและพื้นถ้ำมากกว่า ที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เป็นหินปูน ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับ ผืนและพื้นถ้ำได้ดี แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ตันแถบ ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิว โดยกรณีที่มีชั่วคราวแบบ V-H เมื่อมีการแพร่ในโพรงถ้ำหินปูนจะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรสูงกว่าค่าที่ได้การวัดทดสอบแบบ V-V มาก โดยเฉพาะที่ความถี่ 1000 kHz, 1650 MHz และ 2325 kHz พบว่ามีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลง แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวเกิดขึ้นด้วย ทำให้สายอากาศภาครับในแนวนอนสามารถรับค่ากำลังของคลื่น ได้มากกว่า

ย่านความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) ตามทฤษฎี การแพร่กระจายคลื่นพบว่า ในย่านความถี่นี้มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบน ในชั้นบรรยากาศหรือส่วนโค้งของโลกได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำที่มีขนาดเล็กกว่า ความยาวคลื่นที่เหมาะสมตามทฤษฎีของท่อนำคลื่นหรือมีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัด รวมทั้งมีสภาพแวดล้อม แตกต่างจากธรรมชาติที่ควรเป็นของคลื่นความถี่นี้ ทำให้เกิดการลดทอนค่อนข้างสูง แม้ว่าเกิดการสูญเสีย การส่งผ่านไม่สูงเท่ากับย่านความถี่ LF ปลายแถบหรือ MF ตันแถบ เช่นเดียวกันทั้งชั่วคราวแบบ V-H และ แบบ V-V ก็ตาม

ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) มีคุณสมบัติ การแพร่คลื่นแบบคลื่นตรง (Direct wave) หรือคลื่นในอากาศว่างโดยคลื่นต้องอยู่ในแนวระดับสายตา แต่เมื่อนำมา วัดทดสอบในโพรงถ้ำแบบ NLOS พบว่าการทดสอบชั่วคราวแบบ V-V ที่ความถี่ 300 MHz มีค่าการสูญเสีย การส่งผ่านต่ำสุด แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนก็คือ ยิ่งความถี่ในย่าน VHF นี้มีค่าสูงขึ้นกลับมีค่าการสูญเสีย

การส่งผ่านที่ระยะทางเท่ากันลดลง เนื่องจากความยาวของคลื่นมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างกว่าได้ดีขึ้น เมื่อเปลี่ยนขั้วคลื่นของสายอากาศภาครับให้อยู่ในแนวนอนเพื่อรับคลื่น จะมีแนวโน้มของการสูญเสียการส่งผ่านเหมือนกับกรณีที่สายอากาศภาครับกับภาคส่งให้มีขั้วคลื่นแนวตั้งเหมือนกัน เพียงแต่มีค่าต่ำกว่าซึ่งไม่ได้หมายความว่าสามารถส่งและรับสัญญาณได้ไกลกว่าแบบ V-V

ในย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF สำหรับความถี่ในย่าน UHF เมื่อทำการทดสอบขั้วคลื่นทั้งแบบ V-V และแบบ V-H พบว่า การสูญเสียการส่งผ่านมีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่ำกว่าย่านความถี่ VHF ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีการสูญเสียในที่ว่าง (Free-space loss) โดยมีสาเหตุมาจากคลื่นที่เดินในโพรงถ้ำที่ผนังมีค่าความนำไฟฟ้าและมีค่าความลึกผิวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่ VHF และความถี่อื่นที่ต่ำกว่าซึ่งทำให้เปรียบเสมือนคลื่นที่แพร่ในท่อนำคลื่น อีกทั้งขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่ในย่าน UHF นี้ได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงบ้าง เนื่องจากเมื่อคลื่นดังกล่าวแพร่ไปกระทบกับสิ่งกีดขวางในถ้ำซึ่งมีความเป็นตัวนำทางไฟฟ้า จึงเกิดการสะท้อนไปยังจุดที่ติดตั้งสายอากาศภาครับและทำให้เกิดการเสริมหรือหักล้างเฟสของคลื่น (Phase angle) ได้

6.2 การวัดทดสอบแบบที่ไม่อยู่ในแนวสายตา (NLOS)

การทดสอบแบบ NLOS จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น LOS และส่วนที่เป็น NLOS (L-Bend) ซึ่งเป็นทางโค้งคล้ายรูปตัวแอล (L) ที่จะบดบังคลื่นในแนวระดับสายตา จากบริเวณที่ทดสอบจะมีระยะ L-Bend ตั้งแต่ 4 เมตร ถึง 8 เมตร ซึ่งในระยะนี้จะสามารถสังเกตถึงความสามารถในการสะท้อนหรือเลี้ยวเบนของคลื่นในแต่ละความถี่ได้ โดยย่านความถี่ LF (300 kHz) และย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) ในการทดสอบขั้วคลื่นแบบ V-V เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรสูง โดยเฉพาะที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่สูงขึ้นถึง 1000 kHz ค่าการสูญเสียการส่งผ่านในระยะ L-Bend จะมีค่าลดลงทั้งนี้มีปัจจัยจากที่ความถี่ 1000 MHz การแพร่คลื่นจะเริ่มเปลี่ยนจากการซึมซาบลงเนื้อหินของผนังถ้ำเป็นการแพร่คลื่นบนพื้นผิวผนังถ้ำมากกว่า ทำให้สายอากาศภาครับซึ่งวางขนานและใกล้กับแนวผนังถ้ำสามารถรับค่ากำลังที่แพร่ออกมาจากพื้นผิวของผนังถ้ำได้ดียิ่งขึ้น ส่วนของการทดสอบขั้วคลื่นแบบ V-H ที่ย่านความถี่ LF (300 kHz) พบว่า ค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีค่าแตกต่างจากกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V เพียงเล็กน้อย แต่ค่าการลดทอนตลอดระยะของ L-Bend มีค่าสูงกว่าแบบ V-V ถึง 49.4 dB (เดซิเบล: Decibel) ซึ่งแสดงว่าคลื่นความถี่ 300 kHz เมื่อเหนี่ยวนำเข้าไปในเนื้อหินปูนจะไม่มีการเปลี่ยนขั้วคลื่น ขณะที่ย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงที่สุดและสูงกว่าการวัดทดสอบแบบ V-V ประมาณ 4 dB แสดงว่านอกจากมีการแพร่บนผิวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงขั้วคลื่นตามรูปร่างของผนังถ้ำด้วย ที่ย่านความถี่ MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ทั้งการทดสอบขั้วคลื่นแบบ V-V และแบบ V-H ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดิน และเช่นเดียวกันเมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิว

ของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เกิดขวาง ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดีขึ้น แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ต้นแถบ คุณสมบัติการแพร่คลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นแบบคลื่นฟ้ามามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเริ่มยกระดับขึ้น

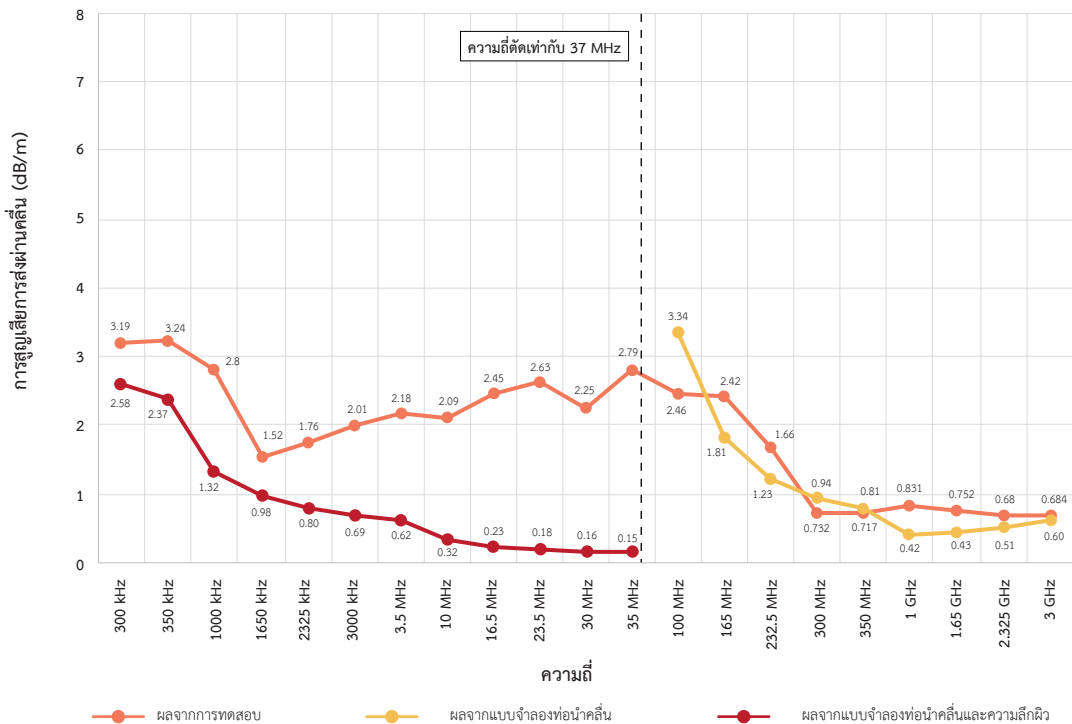
ย่านความถี่ HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) แม้จะมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้า แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมเป็นแบบ NLOS ทั้งการทดสอบชั่วคราวแบบ V-V และแบบ V-H จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอในลักษณะของการกระเจิง (Scattering) แบบไร้ทิศทางมากกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภายในโพรงถ้ำมีสภาพแวดล้อมของสิ่งกีดขวางที่แตกต่างกันตลอดความยาวของโพรงถ้ำ การพิจารณาบริเวณ L-Bend ตำแหน่งเดียวอาจจะใช้ไม่ได้กับบริเวณอื่น ๆ จึงเป็นเรื่องยากที่จะใช้การส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำอย่างหวังผล

ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง เมื่อนำมาวัดทดสอบแบบ NLOS ซึ่งมีสิ่งกีดขวางเป็นผนังถ้ำและก้อนหินขนาดใหญ่ จากการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H จะต่ำกว่ากรณีวัดทดสอบแบบ V-V เกือบทุกความถี่ แต่ยกเว้นที่ความถี่ 165 MHz จะมีค่าสูญเสียสูงกว่าแบบ V-V ประมาณ 0.24 dB (ถือว่าใกล้เคียง) แสดงให้เห็นว่า ผนังของถ้ำหินปูนอาจจะสามารถเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของคลื่นย่านความถี่ VHF ได้ง่าย ทำให้สายอากาศภาครับค่ากำลังของคลื่นที่มีชั่วคราวบนผนังถ้ำได้สูงกว่าในแนวตั้ง

ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่างเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นแบบ LOS ได้ดีกว่าแบบ NLOS เมื่อทำการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านในระยะของ L-Bend สูงกว่ากรณีของ LOS โดยมีค่าใกล้เคียงทุกความถี่ เนื่องจากความถี่ทั้งในย่าน VHF และย่าน UHF ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความถี่อื่น เมื่อทำการทดสอบในแบบ NLOS จึงเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านช่วง L-bend ได้น้อย ส่งผลให้เกิดการลดทอนสูงซึ่งถือเป็นหนึ่งในข้อจำกัดของช่วงความถี่สูงเมื่อคลื่นเดินทางผ่านเส้นทางคดเคี้ยวภายในถ้ำ ดังนั้น หากต้องการรับส่งคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นทันที ทำให้ค่าระดับกำลังที่รับได้โดยสายอากาศภาครับที่จุดสุดท้ายของ L-Bend มีค่าต่ำเกินไป จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในระบบสื่อสารระยะไกลภายในโพรงถ้ำ

6.3 การศึกษาแบบจำลองภายในถ้ำ

จากการศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำ ถัดมาจึงได้ทำการศึกษาถึงแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำที่มีทั้งลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น ขนาด รูปร่าง และเส้นทางที่แตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งรวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของถ้ำ เช่น ค่าความนำทางไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของถ้ำหิน เพื่อพิจารณาถึงแบบจำลองของการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นในขณะที่คลื่นแต่ละความถี่เดินทางผ่านโพรงถ้ำที่มีคุณสมบัติคล้ายท่อนำคลื่น ตามที่ในงานวิจัยของ Bedford and Kennedy (2014) Deryck (1978) Emslie et al. (1975) และ Rak and Pechac (2007) ได้นำเสนอแบบจำลองของการลดทอนในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดภายในโพรงถ้ำที่ได้กล่าวไปข้างต้น แต่การใช้แบบจำลองที่กล่าวมานั้นมีข้อจำกัดในส่วนของคุณสมบัติที่เดินทางในโพรงถ้ำ ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาความถี่ที่มีความยาวคลื่นรองรับขนาดของโพรงถ้ำ โดยในโพรงถ้ำที่ทดสอบนั้นมีขนาดความกว้างเท่ากับ 7 เมตร และความสูงเท่ากับ 5 เมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับแบบจำลองของท่อนำคลื่นตามสมการที่ 3 จะสามารถคำนวณค่าความถี่ตัดได้เท่ากับ 37 MHz อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด สามารถแพร่เข้าไปในโพรงถ้ำที่ผนังถ้ำมีความนำทางไฟฟ้าได้ โดยผนังของโพรงถ้ำจะแสดงคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกมากขึ้น ทำให้คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด สามารถเดินทางผ่านเข้าไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงแบบจำลองการแพร่คลื่นตามข้อมูลลักษณะของโพรงถ้ำเชียงดาว โดยเฉพาะแบบจำลองการแพร่คลื่นความถี่ต่ำที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดินหรือคลื่นผิว โดยนำค่าความลึกผิวที่ทำให้คลื่นความถี่สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อของผนังถ้ำมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งส่งผลให้เสมือนว่าโพรงถ้ำนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 15 การสูญเสียการส่งผ่านจากแบบจำลองและจากการทดสอบในแนวสายตาทุกย่านความถี่

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่าคลื่นความถี่สูงกว่าความถี่ตัดที่ 37 MHz นั้นสามารถใช้แบบจำลองการลดทอน ดังในสมการที่ 4 ถึงสมการที่ 8 ได้โดยผลที่ได้จากแบบจำลองท่อนำคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ตัด ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่หากใช้แบบจำลองเดียวกันนี้กับความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัด ผลที่ได้จะยังมีค่าเข้าใกล้กัน ซึ่งตรงข้ามกับผลที่ได้จากการทดสอบที่สามารถรับส่งคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัดได้ ดังนั้น จึงได้เสนอแนวคิดถึงการนำค่าความถี่ในแต่ละความถี่มาร่วมพิจารณาในส่วนของขนาดความกว้างและความสูงของโครงข่ายด้วย โดยคลื่นที่แพร่ซึบลงไปในผนังถ้าจะเปรียบเสมือนโครงข่ายนั้นมีขนาดกว้างขึ้นจนสามารถรองรับคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ตัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นผลลัพธ์ของแบบจำลองท่อนำคลื่นที่มีการนำค่าความถี่มาพิจารณาจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ในส่วนของแบบจำลองที่ความถี่สูงพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการลดทอนมาจากสิ่งกีดขวางภายในถ้ำ ความลาดเอียงและความขรุขระของผนังถ้ำ มากกว่าการลดทอนที่เกิดจากขนาดโครงข่าย หากนำความถี่มาพิจารณาในกรณีความถี่สูงจะทำให้การลดทอนที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงมาก

7. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในถ้ำที่ทดสอบ ณ ถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ โดยเป็นถ้ำหินปูน ซึ่งสามารถพบได้มากที่สุดในประเทศไทยและเป็นถ้ำชนิดเดียวกันกับอุทยานแห่งชาติ ถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ที่เกิดเหตุการณ์ปฏิบัติการค้นหาและกู้ภัยถ้ำหลวงในปี พ.ศ. 2561 โดยได้ทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่ที่ครอบคลุมตั้งแต่ย่านความถี่ตั้งแต่ LF ไปจนถึงย่านความถี่ UHF ทั้งในแนวระดับสายตา เพื่อเน้นศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่แพร่ภายในโพรงถ้ำที่เป็นผนังกึ่งตัวนำไฟฟ้าและการทดสอบแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตาเพื่อศึกษาถึงการสะท้อน เลี้ยวเบน และความสามารถในการเดินทางผ่านเส้นทางคดเคี้ยวของคลื่น โดยเน้นการพิจารณาค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของคลื่นที่เดินทางภายในถ้ำตามธรรมชาติ จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในแต่ละย่านนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน รวมถึงความเหมาะสมต่อการใช้งานด้วยลักษณะที่ต่างกัน โดยย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ย่าน MF ลงไป ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นดินและคลื่นผิว จะเหมาะสำหรับการสื่อสารด้วยระบบสื่อสารลงดิน (Through-the-earth communication) มากกว่าการแพร่คลื่นความถี่ต่ำผ่านโพรงอากาศของถ้ำที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นโดยตรง เนื่องจากทำให้เกิดการลดทอนสูง อีกทั้งโครงสร้างของสายอากาศย่านความถี่ต่ำที่มีขนาดใหญ่จะเป็นปัญหาด้านการใช้งาน จึงไม่เหมาะสำหรับการแพร่คลื่นผ่านอากาศว่างภายในโพรงถ้ำ ในขณะที่ย่านความถี่สูงตั้งแต่ย่านความถี่ HF ขึ้นไป ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นตรงอาจเหมาะสำหรับการแพร่ผ่านอากาศภายในโพรงถ้ำมากกว่าย่านความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน MF อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของย่านความถี่สูงที่มีการลดทอนภายในอากาศว่างที่สูงขึ้นตามความถี่ และเมื่อแพร่คลื่นไปในโพรงถ้ำที่มีเส้นทางคดเคี้ยวจะทำให้คลื่นในย่านความถี่สูงเกิดการลดทอนมากขึ้น ดังนั้น ระบบสื่อสารจึงอาศัยตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ระหว่างเส้นทางคดเคี้ยวเพื่อช่วยทวนสัญญาณคลื่นความถี่สูงที่สูญเสียระหว่างเส้นทางโค้งหรือสิ่งกีดขวางภายในถ้ำซึ่งเหมาะสำหรับย่านความถี่สูงโดยเฉพาะย่าน UHF โดยจากผลการศึกษาและการทดสอบที่ได้นำเสนอจะเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาเลือกใช้ความถี่ให้เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นในโพรงถ้ำทั้งในแนวระดับสายตาและในแนวที่ไม่อยู่ในระดับสายตา อีกทั้งจากการศึกษาธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำที่ผ่านมามะเห็นถึงธรรมชาติของคลื่นในแต่ละย่านความถี่ที่มีกลไกการแพร่กระจายคลื่นตอบสนองต่อขนาดของโพรงถ้ำแตกต่างกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำ ทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ที่จะนำไปวิเคราะห์ถึงการแพร่กระจายคลื่นของโพรงถ้ำที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันในแต่ละช่วงและรวมไปถึงถ้ำหรืออุโมงค์ชนิดอื่น ๆ ที่ผนังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยจะเป็นการลดเวลาในการทดสอบสำหรับถ้ำหรืออุโมงค์แห่งอื่น ๆ และยังสามารถนำองค์ความรู้เรื่องธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่นภายในถ้ำไปใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารได้อีกด้วย

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่เดินทางภายในโพรงถ้ำชนิดถ้ำหินปูน ซึ่งมีจำนวนมากที่สุดในประเทศไทย แต่ถ้ำหินปูนเป็นเพียงตัวอย่างถ้ำชนิดหนึ่งเท่านั้น ในอนาคตหากศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นที่เดินทางภายในโพรงถ้ำชนิดอื่น ๆ ด้วยแล้ว จะสามารถนำองค์ความรู้นี้ไปคิดค้น ต่อยอด และพัฒนาระบบสื่อสารที่ใช้งานภายในถ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากการได้รับทุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ในโครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ รหัสโครงการวิจัย BT62-1-(2)/004

รายการเอกสารอ้างอิง

- Bedford, M. (2001). *Introducing the Heyphone*. Caves & Caving 91, pp. 15-17.
- Bedford, M. D., & Kennedy, G. A. (2014). Modeling microwave propagation in natural caves passages. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 62(12), 6463-6471.
- Collin, R. E. (1985). *Antennas and radiowave propagation*. McGraw-Hill College.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. 2nd Edition, IEE Radar, Sonar and Navigation Series 15 (Ed.). The Institution of Electrical Engineers.
- Deryck, L. (1978). Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 27(3), 145-150.
- Emslie, A., Lagace, R., & Strong, P. (1975). Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 23(2), 192-205.
- Gibson, A. D. W. (2014). *How Earth-Current Antennas Really Work*. (n.p.).
- Glover, P. (2015). Geophysical properties of the near surface Earth: Electrical properties. *Treatise on Geophysics*, 11, 89-137.
- Jones, G., & Holderied, M. W. (2007). Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1612), 905-912.
- Kjeldsen, E., & Hopkins, M. (2006, October). An experimental look at RF propagation in narrow tunnels. *In MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference* (pp. 1-7). IEEE.
- Lee, J., & Bertoni, H. L. (2003). Coupling at cross, T, and L junctions in tunnels and urban street canyons. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 51(5), 926-935.
- Moss, C. F. (2018). *Auditory mechanisms of echolocation in bats*. Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience.
- Rak, M., & Pechac, P. (2007). UHF propagation in caves and subterranean galleries. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 55(4), 1134-1138.
- Siwiak, K. (2007). *Radiowave propagation and antennas for personal communications*. Artech House.
- 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.