

Part II

การศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำ

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. รั้งสรรค์ วงศ์สรรค์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ Part II

เนื้อหา	หน้า
1. บทนำ.....	3
2. กรอบความคิดในการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำ.....	6
3. เครื่องมือสำหรับการดำเนินการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำ.....	9
4. แนวทางการทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นภายในถ้ำ.....	12
5. วิธีการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำ.....	13
6. ผลการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำ.....	18
6.1 การวัดทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในถ้ำเชียงดาว.....	19
6.2 การวัดทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในถ้ำปาฏิหาริย์.....	89
7. สรุปผลการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำทั้งสองแห่งและ ทุกย่านความถี่.....	158
8. การวัดทดสอบเพิ่มเติมเพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ของการแพร่คลื่นระยะไกลในโพรงถ้ำ.....	174
8.1 การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นผิว.....	174
8.2 การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นดิน.....	186
9. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม.....	194

การศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำ

1. บทนำ

การสร้างระบบสื่อสารไร้สายสำหรับใช้งานในถ้ำเป็นเรื่องสำคัญมาก เนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ให้กับกิจกรรมอีกหลายอย่างที่เกี่ยวข้อกับถ้ำ เช่น ภูเขาไฟ (Volcanology) การศึกษาระบบชีววิทยาในถ้ำ (Speleo-biology) อุทกวิทยา (Hydrology) การสำรวจทางทหาร การสำรวจถ้ำ การเพิ่มความปลอดภัยในการเที่ยวชมถ้ำของนักท่องเที่ยว และที่สำคัญคือการใช้ช่วยในการดำเนินการค้นหาและช่วยเหลือสิ่งมีชีวิตในถ้ำ ที่ผ่านมามีคนได้มีคณะวิจัยจำนวนไม่มากนักได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นวิทยุที่เดินทางบนพื้นผิวที่ขรุขระทั้งบนพื้นทางเดินและบนผนังของถ้ำ ซึ่งผลลัพธ์ของการวิจัยที่สำคัญและน่าจะเป็นประโยชน์และเป็นชุดความรู้ นำทางสำหรับการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำของโครงการวิจัยนี้ได้และสามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1991 Larry G. Stolarczyk [1] ได้นำเสนองานวิจัยและได้อธิบายประวัติการพัฒนาเพื่อใช้งานความถี่ย่าน MF และเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นเมื่อห้าทศวรรษที่ผ่านมา ซึ่งมีการใช้งานในเหมืองถ่านหินและเหมืองโลหะในแอฟริกาใต้ ยุโรป และสหรัฐอเมริกา โดยอธิบายทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM) ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อสัญญาณวิทยุและการส่งสัญญาณไปตามตัวนำในสถานที่ที่กำหนดไว้แล้ว เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและการพัฒนาของเครือข่ายทวนสัญญาณ (Repeater network) โดยใช้สายส่งตัวนำร่วมกับอุปกรณ์วิทยุสื่อสารเคลื่อนที่สำหรับใช้งานในสภาวะฉุกเฉินเพื่อการติดต่อสื่อสารระหว่างบุคลากรที่อยู่บนพื้นผิว พื้นที่ปฏิบัติงาน หรือพื้นที่เส้นทางหนีภัย (Escapeways) ที่กำหนด คณะผู้วิจัยพบว่าพฤติกรรมของการแพร่คลื่นที่ออกมาจากระบบสื่อสารที่ใช้งานอยู่ในเหมืองใต้ดินสามารถกระทำได้ 2 โหมด ได้แก่ โหมดการส่งสัญญาณตามแนวตะเข็บ (Seam transmission mode) จะปรากฏขึ้นเมื่อเจอชั้นของถ่านหิน (Coal), แร่เกลือ (Trona), โพแทช (Potash), หินควอตซ์ (Quartzite) หรือ แอสฟัลต์ธรรมชาติ (Gilsonite) ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยชั้นตะกอนจำนวนมากที่มีค่าความนำไฟฟ้าภายในตัวมัน โดยชั้นของตะกอนเหล่านี้จะเป็นตัวสร้างท่อนำคลื่นโดยธรรมชาติที่สามารถส่งสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่กลาง (MF: Medium Frequency) ตั้งแต่ 300 ถึง 23000 kHz ผ่านเข้าไปได้ ส่วนการแพร่คลื่นอีกโหมดหนึ่งก็คือ โหมดสายส่งตัวนำ (Conductor transmission line mode) ซึ่งสามารถเกิดสถานะเสมือนท่อนำคลื่นได้เมื่อมีวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่ภายในเหมืองนั้นๆ เช่น สายเคเบิลสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้า โครงสร้างสายพานลำเลียง ท่อเหล็ก และรางสำหรับรถขนส่ง ที่ถูกวางอยู่ในเส้นทางเดิน โดยอัตราการลดทอนของท่อนำคลื่นโหมดสายส่งสัญญาณตัวนำจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อถูกนำไปใช้งานกับคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 30 ถึง 300 kHz อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบสื่อสารภายในเหมืองต่างๆ ควรใช้โหมดการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากหากเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น หินถล่ม ไฟไหม้ หรือเกิดการระเบิดภายในเหมือง การสื่อสารด้วยโหมดสายส่งตัวนำจะไม่สามารถใช้งานได้ และหากมีการขยายหรือพัฒนาพื้นที่ทำเหมืองเพิ่มขึ้น สายส่งเหล่านั้นก็จำเป็นต้องมีการขยายออกไปอีก

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Hsueh-Yuan Pao [2] ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาช่องความถี่วิทยุ (Radio channel) สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายในอุโมงค์และถ้ำซึ่งมีเส้นทางรับส่งสัญญาณ

ระหว่างเครื่องส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณอาจแตกต่างกันไปจากแนวสายตาและอาจผ่านเข้าไปในแนวที่ถูกกีดขวางอย่างรุนแรงจากผนังและมุมที่ขรุขระ ซึ่งช่องความถี่วิทยุจะแตกต่างจากที่เคยใช้ส่งผ่านสายส่งที่ติดตั้งอยู่กับที่และสามารถคาดการณ์ได้ ส่วนช่องความถี่วิทยุที่ใช้งานภายในถ้ำนั้นการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบกับสภาพแวดล้อมที่หลากหลายซึ่งส่งผลกระทบต่อระดับของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปยังเครื่องรับ เช่น การสะท้อน การเลี้ยวเบน และการกระเจิงของคลื่น เนื่องจากเกิดการสะท้อนหลายครั้งบนผนังที่ขรุขระจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางด้วยความยาวที่ต่างกัน ปฏิกริยาระหว่างคลื่นเหล่านี้ทำให้เกิดหลายเส้นทางที่จะจางหายไป ณ ที่ตำแหน่งใดๆ ได้ และความแรงของคลื่นจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีสุ่มและวิธีการทางสถิติรวมถึงกลไกทางธรรมชาติของการแพร่กระจายของคลื่นมาร่วมในการคำนวณ วิธีที่ทาง H. Y. Pao นำมาใช้ในการคำนวณแบบประมาณการโดยใช้หลักการของทฤษฎี Central limit โดยสร้างกระบวนการสุ่มแบบเกาส์ปริมาณเชิงซ้อน (Complex-valued Gaussian random) สำหรับสนามที่แพร่กระจายในถ้ำหรืออุโมงค์ที่อยู่ในแนวเส้นตรงและมีผนังที่ขรุขระโดยทั่วไป

ในปี ค.ศ. 2005 J. Pinget, R. Rieben และ D. White [3] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณการแพร่กระจายสัญญาณและการลดทอนของคลื่นความถี่ 200 MHz ที่แผ่ออกจากสายอากาศไดโพลโดยใช้แบบจำลองเป็นอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ความยาวอุโมงค์แนวเส้นตรง 75 เมตร มีผนังถ้ำหยาบขรุขระและมีการสูญเสียเกิดขึ้นบนผนังด้วย ทำการจำลองโดยใช้สมการคลื่น Maxwell แบบเต็ม (Full-wave analysis) ให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปของความหนาแน่นสเปกตรัมพลังงาน (Power spectral density) และเฟสขององค์ประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้า จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลลักษณะเดียวกันที่ได้จากแหล่งที่พื้นผิวมีความราบเรียบ แต่ก็ยังไม่ได้ทำการวิจัยในกรณีที่เป็นแบบจำลองของโครงสร้างถ้ำที่มีทางเดินเป็นแนวเส้นโค้งและเป็นทางแยกที่ซับซ้อน

การศึกษาเชิงทดลองที่น่าสนใจได้ถูกเผยแพร่อีกครั้งหนึ่งโดย M. Rak และ P. Pechac [4] ในปี ค.ศ. 2007 ทั้งสองท่านได้ทำการทดลองการแพร่กระจายตามธรรมชาติของคลื่นวิทยุย่านความถี่ UHF (446 MHz และ 860 MHz) ด้วยกำลังส่ง 0.5 วัตต์ และ 1 วัตต์ ทดลองรับส่งด้วยสายอากาศไดโพลและโมโนโพลทั้งโพลาริซแบบแนวนอนและแนวตั้งในระดับความสูง 1.2 เมตร ภายในถ้ำใต้ดินจำนวน 5 แห่งที่มีแนวเป็นเส้นตรงระยะทางไม่เกิน 300 เมตร พร้อมทดลองสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์ของการส่งคลื่นวิทยุขนานกันไป ด้วย โดยแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกปรับเทียบให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการวัดทดสอบและเปรียบเทียบกับวิธีทำนายคลื่นเชิงทฤษฎีเพื่อทำนายพฤติกรรมของคลื่นในการแพร่กระจายออกมาด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยครั้งนั้นส่วนหนึ่งสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการปฏิบัติงานระบบสื่อสารไร้สายในการประยุกต์ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และเป็นพื้นฐานการทดลองสำหรับงานทางทฤษฎีต่อไปได้ในอีกระดับหนึ่ง

ต่อมา Tomas Laborra และทีมวิจัย [5] ได้นำเสนอรายงานเรื่องการประเมินพื้นที่ครอบคลุมของระบบการสื่อสารไร้สายภายในสภาพแวดล้อมในถ้ำเพื่อการประยุกต์ใช้กับงานด้านถ้ำวิทยาในปี ค.ศ. 2014 โดยนำเสนอความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายภายในถ้ำโดยใช้หลักการของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network: WSN) ที่ความถี่ 868 MHz, 2.4 GHz และ 5 GHz เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก ราคาถูก และอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น สามารถนำชุด WSN ไปเชื่อมโยงเป็นโหนดเข้ากับระบบสื่อสารในถ้ำของเดิมซึ่งเป็นระบบเชื่อมโยงผ่านสายเคเบิลเพื่อให้ระบบสื่อสารในถ้ำศักยภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ในรายงานนี้ยังทำการวิเคราะห์การแพร่คลื่นวิทยุในถ้ำนี้โดยการใช้อัลกอริทึม

(Simulation code) และวิธีการส่งเส้นรังสีสามมิติ (3-D Ray launching) ภายในแบบจำลองถ้ำ ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันได้ว่าการใช้ประโยชน์จากประสิทธิภาพของเครือข่าย WSN สามารถขยายศักยภาพของระบบสื่อสารภายในถ้ำแบบเดิมที่ใช้สายเคเบิลได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้วิธีการจำลองการแพร่คลื่นที่นำเสนอในรายงานวิจัยดังกล่าวนี้มาช่วยได้

ปี ค.ศ. 2014 ได้มีการนำเสนอรายงานวิจัยเรื่อง การสร้างแบบจำลองการแพร่คลื่นไมโครเวฟบริเวณเส้นทางเดินภายในถ้ำธรรมชาติ โดย Michael D. Bedford and Gareth A. Kennedy [6] โดยเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลการลดทอนสัญญาณวิทยุที่ความถี่ไมโครเวฟ 1.3 GHz ให้ใกล้เคียงสภาพแวดล้อมในเส้นทางเดินถ้ำตามธรรมชาติมากขึ้นด้วยการวัดเชิงทดลองในหลายกรณีอย่างมีเหตุผล แม้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของความแม่นยำของข้อมูลการสำรวจซึ่งไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ แต่ก็ทำการประเมินคุณลักษณะของเส้นทางเดินในถ้ำและแยกแยะออกมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงส่วนที่มีความแตกต่างกัน ดังนี้ 1) ขนาดและรูปร่างของภาคตัดขวางตลอดเส้นทางตรงทุกๆ ส่วน 2) เส้นทางที่ประกอบด้วยส่วนที่ตรงสองส่วนและมีความโค้งปานกลางหนึ่งส่วน 3) เส้นทางที่ค้อมๆ มีความโค้ง และ 4) สองในสามของความถี่ที่ส่งไปตามทางเดินที่เป็นเส้นตรงและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในมิติภาคตัดขวาง อย่างไรก็ตามอาจจะมีความถี่ที่เพียงเล็กน้อยที่มีความแตกต่างบางประการเกิดขึ้นจากทั้งสี่ข้อนี้ จากรายงานวิจัยพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีความถูกต้องที่ยอมรับได้ในกรณีทางเดินในถ้ำที่มีความโค้งมากๆ และภาคตัดขวางบริเวณนั้นยังมีขนาดที่คงที่อยู่นั่น ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เกิดค่าเบี่ยงเบนจากความเป็นจริงในกรณีที่ขนาดภาคตัดขวางมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้แบบจำลองก็ไม่ได้แสดงถึงผลกระทบของแนวโค้งถ้ำที่แม่นยำภายในระยะทางสั้นๆ จากแนวโค้งก่อนหน้านี้ การลดทอนที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณ (Over-estimation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ที่สูงขึ้น ในขณะที่การลดทอนในส่วนของทางเดินแนวเส้นตรงซึ่งอยู่หลังจากแนวโค้งของถ้ำจะมีค่าต่ำกว่าที่ประมาณ (Under-estimation) ไว้ ผลกระทบทั้งสองเหตุการณ์นี้จะนำไปสู่การหักล้างซึ่งกันและกันจากการใช้แบบจำลองลำแสง (Ray optic model) ตามแนวโค้งของถ้ำ โดยการสมมติให้เสมือนเส้นรังสีที่พุ่งขนานกันออกไปและพุ่งกระทบเข้ากับแนวโค้ง ซึ่งจะส่งผลทำให้ไม่เกิดความแม่นยำอีกต่อไปถ้านำแนวโค้งนี้มาติดกับแนวโค้งที่อยู่ก่อนหน้านี้ ทำให้การลดทอนจากแนวโค้งที่สองมีค่ามากกว่าที่ประมาณการไว้ในกรณีที่เครื่องรับสัญญาณอยู่ในเขตของการแพร่กระจายในพื้นที่ว่าง (Free-space) เช่น เครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับเครื่องส่งสัญญาณ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าหากต้องการความแม่นยำที่สูงกว่าการใช้รังสีแบบขนาน ควรเลือกใช้วิธีติดตามรังสี (Ray tracing) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าแต่สิ่งที่ตามมาคือ จะมีความยากในการดำเนินการมากขึ้น

ในเดือนมีนาคม ค.ศ. 2018 ได้มีรายงานวิจัยของ William Walsh และ Jay Gao [7] เป็นการสำรวจโดยการยิงแสงและการสะท้อนของแสง (Shooting and Bouncing Rays: SBR) เพื่อสร้างแบบจำลองโดยประมาณของสภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าในทอလာวาทินบะซอลต์ที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น ภายในโพรงถ้ำที่มีผนังเรียบและมีขนาดกว้างขึ้นจนปรากฏสิ่งกีดขวางจากนั้นมีขนาดแคบลง ซึ่งไม่มีเส้นทางการสื่อสารในระดับสายตา (line-of-sight communications) ตลอดความยาวของโพรงถ้ำ 100 เมตร แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้ความรู้ของการสื่อสารในโอมิกส์ที่มีการศึกษามาแล้วร่วมกับเครื่องมือ ANSYS Savant เพื่อยกระดับของผลเฉลยที่ได้ในกรณีของรูปทรงภายในถ้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง ข้อมูลที่ได้รับจากรายงานนี้มีข้อสังเกตจำนวนหนึ่งจากพื้นฐานที่ได้จากแบบจำลองทอလာวา ดังพื้นที่ต่อไปนี้:

(1) มีการสังเกตพบว่าระดับของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ผนังถ้าสามารถสร้างพฤติกรรมการขยายสัญญาณที่ได้รับและสามารถช่วยให้การสื่อสารสามารถเกิดขึ้นได้ โดยใช้วิธีการส่งคลื่นพุ่งชนผนังและเกิดการสะท้อนกลับออกมาของสัญญาณ ดังนั้นการสื่อสารที่อยู่เบื้องหลังสิ่งกีดขวางจึงสามารถเป็นไปได้

(2) สามารถสังเกตได้ถึงการจางหายของสัญญาณในแต่ละตำแหน่งเชิงพื้นที่ ซึ่งเกิดจากผลกระทบทางเรขาคณิตที่เกิดจากสภาพภูมิศาสตร์ของผนังถ้าและก่อให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณที่สะท้อนกลับป้อนมาภายในพื้นที่นั้นจนเกิดการจางหายของสัญญาณอย่างมาก แต่ก็ดูเหมือนว่าจะไม่สามารถหาข้อสรุปถึงตำแหน่งที่แน่นอนที่เกิดการจางหายของสัญญาณมากหรือน้อยได้เนื่องจากสภาพของโพรงถ้ามีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform)

(3) จากการสังเกตพบว่าความแรงของสัญญาณที่ลดลงอย่างมากนั้นจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของผนังถ้าที่ล้อมรอบบริเวณนั้นๆ ในทุกมิติ ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทางกลอื่นๆ เข้าทำการสำรวจเข้าไปใกล้กับพื้นผนังถ้า และเพดานถ้าให้ครบทุกมิติ เพื่อให้ได้ค่าสำหรับชี้วัดระดับความแรงของสัญญาณที่อยู่ใกล้กับบริเวณดังกล่าวให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

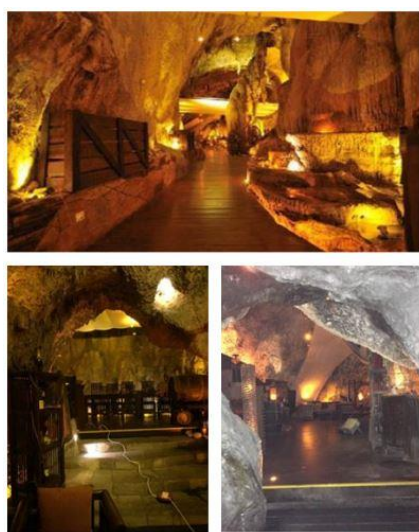
(4) มีการสังเกตพบว่าการจางหายของข้อมูลที่เลือกใช้อาจอาจเกิดขึ้นได้ด้วย เนื่องจากการแพร่กระจายของสัญญาณจะเกิดความล่าช้าเชิงเวลา (Time-delay spread) ผลการจำลองรวมถึงการประเมินโดยใช้สัญญาณ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และใช้สายอากาศไดโพลไซวี่ (Cross dipole) เพื่อไม่ต้องสนใจในเรื่องของการโพลาไรซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า โดยใช้กำลังส่งสัญญาณตั้งแต่ 10 mW ถึง 100 mW จากนั้นทำการวัดอัตราข้อมูล (Data rate) ที่ได้รับจากตำแหน่งต่างๆ ทัวทั้งถ้าจะถูกนำมาคำนวณและถูกจัดระดับตามกระบวนการวิจัย

รายงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นวิทยุในถ้าล่าสุดได้ถูกรายงานเมื่อเดือนกรกฎาคม ค.ศ. 2018 โดย Qi Ping Soo, Soo Yong Lim และ David Wee Gin Lim [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นวิทยุที่เดินทางบนพื้นผิวขรุขระแบบสุ่ม โดยใช้เทคนิคการติดตามรังสี (Ray tracing technique) ซึ่งรวมถึงพฤติกรรมการบิด (twist) ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฟรสเนล (Fresnel reflection coefficient) ด้วย เพื่อใช้อธิบายผลกระทบจากการกระเจิงของคลื่นที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ขรุขระของผนังถ้ำนั้นๆ ซึ่งผลการวิจัยนี้ถือว่าเป็นการวางรากฐานสำหรับการตรวจสอบเพิ่มเติมในสภาพแวดล้อมของถ้ำจริงเนื่องจากพื้นผิวด้านในถ้ำไม่เรียบแต่มีความหยาบหรือขรุขระมาก เมื่อค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับได้ถูกนำไปใช้บนพื้นผิวที่ขรุขระแบบสุ่ม พบว่าจะทำให้ระดับของสัญญาณ (Signal strength) ในเส้นทางนั้นๆ ลดลงประมาณ 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับระดับของสัญญาณที่เดินทางบนพื้นผิวดินที่ราบเรียบในระยะเวลาที่เท่ากัน

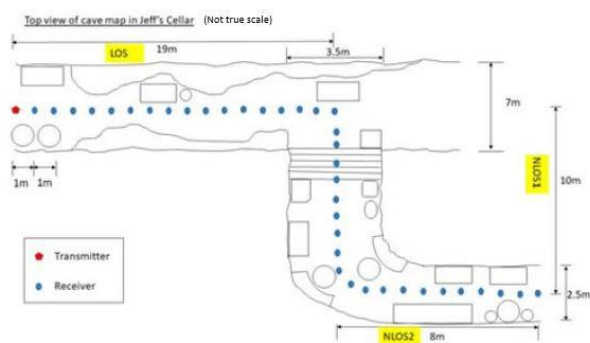
2. กรอบความคิดในการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำ

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านจะเห็นว่าผู้วิจัยเกือบจะทั้งหมดได้ดำเนินการวิจัยโดยใช้วิธีการที่พัฒนากันต่อๆ มาทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งมีการพิจารณาเลือกใช้คลื่นความถี่วิทยุที่แตกต่างกันไป ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ส่วนหนึ่งที่นักวิจัยในยุคหลังสามารถที่จะนำข้อดีและข้อเสียมาพัฒนากระบวนการวิจัยให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของตนเองได้ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตทั้งหมดจะพบว่ายังไม่มีผู้วิจัยคนใดเลยที่สามารถจะระบุได้ว่าย่านความถี่ไหนมีการแพร่คลื่นภายในโพรงถ้ำได้

ดีที่สุดและมีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการสื่อสารภายในโพรงถ้ำที่มีระยะทางไกลมากได้โดยปราศจากการใช้ระบบสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) ติดตั้งไว้เป็นช่วงๆ ระหว่างระยะทางเดินภายในโพรงถ้ำ นอกจากนี้ก็คงจะมีเพียงทฤษฎีพื้นฐานของการแพร่คลื่นวิทยุ (Radio wave propagation) ในย่านความถี่ต่างๆ ที่เน้นการแพร่ในบริเวณที่เป็นอากาศว่างและระบุว่าเป็นคลื่นดิน (Ground wave) คลื่นพื้นผิว (Surface wave) คลื่นฟ้า (Sky wave) และคลื่นในอากาศว่าง (Space wave) หรือที่เรียกว่าคลื่นตรง (Direct wave) เท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบโจทย์ของโครงการวิจัยฯ ในระยะเวลาที่จำกัดครั้งนี้ โดยมีเป้าหมายในการออกแบบและพัฒนาเครื่องรับส่งวิทยุทั้งแบบแอนะล็อกและแบบดิจิทัล จึงจำเป็นต้องทราบข้อเท็จจริงในข้อมูลผลการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำให้ได้ก่อนว่าคลื่นวิทยุความถี่ใดบ้างที่เหมาะสมกับเครื่องรับส่งวิทยุต้นแบบสำหรับระบบสื่อสารทั้งสองแบบนี้ โดยศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุด้วยวิธีวัดทดสอบภายในโพรงถ้ำจริงในประเทศไทยที่มีชนิดของผนังถ้ำแตกต่างกัน (ถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย) จำนวนสองแห่งตามที่กำหนด ทดแทนการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีแบบสุ่มตามที่เคยมีผู้รายงานไว้ในงานวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้ว อย่างไรก็ตามในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้แนวทางของ Soo Yong Lim และคณะ [9] เป็นกรอบแนวคิด เนื่องจากการวัดทดสอบค่าระดับความแรงของสัญญาณความถี่วิทยุทั้งแบบระดับสายตา (LOS: Line-of-Sight) และแบบไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS: Non-Line-of-Sight) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในเส้นทาง (Transmission path loss) ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 แม้ว่า จะทำการศึกษาเพียงสามความถี่ (900 MHz, 2.4 GHz และ 5.8 MHz) ก็ตาม แต่ผลเฉลยจากการวัดทดสอบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและการนำไปใช้ในทางปฏิบัติกับระบบสื่อสารไร้สายในโพรงถ้ำตามธรรมชาติในรูปแบบอื่นๆ ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ภาพแสดงภายในโพรงถ้ำ Jeff ที่มีเส้นทางเดินภายในทั้งแบบ LOS และ NLOS และ
(ข) ร่างภาพด้านบน (To view) ของโพรงถ้ำที่ใช้ในการวัดทดสอบพฤติกรรมคลื่นโดย S. Y. Lim และคณะวิจัย [9]

จากแนวทางของ S. Y. Lim และคณะ ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ โดยเพิ่มการวัดทดสอบคลื่นความถี่แต่ละช่วงที่อยู่ในย่าน LF, MF, HF, VHF และ UHF โดยใช้อุปกรณ์/เครื่องมือวัดที่มีมาตรฐาน มีความแม่นยำเชื่อถือได้ และทนทานในขณะใช้งานแบบต่อเนื่องภายในถ้ำ เนื่องจากต้องใช้ผลการวัดทดสอบไปทำการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการเลือกใช้คลื่นความถี่วิทยุไปออกแบบและสร้างเครื่องรับส่งวิทยุต้นแบบ

อย่างไรก็ตามทางคณะผู้วิจัยได้เริ่มต้นทำการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุย่านกลาง (MF: Medium Frequency) ก่อนที่โครงการวิจัยนี้จะเริ่มต้นภายใน “ถ้ำทรายทอง” ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุทยานแห่งชาติขุนน้ำนางนอนและอยู่ติดกันกับถ้ำขุนน้ำนางนอนที่เกิดเหตุการณ์หุบป่า 13 ชีวิต โดยร่วมกับเจ้าหน้าที่ของสำนักงาน กสทช. ส่วนกลางและเขต 34 จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2562 มาครั้งหนึ่งแล้ว เพื่อสร้างประสบการณ์และเตรียมความพร้อมของทีมวิจัยให้สามารถปฏิบัติงานจริงในภาคสนามได้อย่างราบรื่น ในครั้งนั้นได้ใช้เพียงเครื่องมือวัดทดสอบคลื่นวิทยุ (Radio test) และสายอากาศแถบกว้าง (Broadband antenna) เข้าไปวัดทดสอบสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุย่านกลาง (805 kHz, 1260 kHz และ 1394 MHz) ซึ่งถูกส่งมาจากสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ AM ที่อยู่ในจังหวัดเชียงราย ดังแสดงในรูปที่ 2 ในครั้งนั้นได้ใช้ค่าระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้บริเวณใกล้สระน้ำด้านหน้าปากโพรงถ้ำทรายทองซึ่งมีค่า 52 dB μ V, 53 dB μ V และ 59 dB μ V ตามลำดับ เป็นค่าอ้างอิงกับค่าที่วัดทดสอบได้ภายในโพรงถ้ำ



รูปที่ 2 ทีมงานวิจัยเคยทำการสำรวจพฤติกรรมการเดินทางของคลื่นความถี่วิทยุย่านกลางที่ถ้ำทรายทอง อุทยานแห่งชาติขุนน้ำนางนอน อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2562

การทดสอบเพื่อวัดระดับของสัญญาณที่รับได้ตำแหน่งแรกอยู่ใกล้บริเวณสระน้ำที่ด้านหน้าของปากถ้ำทรายทองได้ถูกใช้เป็นตำแหน่งและระดับของสัญญาณอ้างอิงอยู่ที่ 53 dB μ V, 51 dB μ V และ 58 dB μ V ที่ความถี่ 805 kHz, 1260 kHz และ 1394 kHz ตามลำดับ จากนั้นคณะสำรวจได้เริ่มทำการวัดระดับของสัญญาณจากปากโพรงถ้ำลงไปตามเส้นทางเดินเข้าไปภายในถ้ำที่ระยะทางต่างๆ (บนพื้นทางเดินที่มีความสะดวกในการวัดสัญญาณ) โดยไม่ได้กำหนดระยะทางตายตัวที่จะทำการวัดสัญญาณในแต่ละครั้ง เนื่องจากในครั้งนั้นทางทีมผู้สำรวจมีจุดมุ่งหมายเพียงเพื่อพิสูจน์อย่างคร่าวๆ ว่าคลื่นความถี่วิทยุย่านกลางที่มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นทั้งแบบคลื่นดินและคลื่นพื้นผิว จะสามารถเลี้ยวเบนไปตามผนังหรือขอบรูปทรง (Envelope) ของสิ่ง

กีดขวาง เช่น หินงอกหินย้อยที่มีอยู่ในถ้ำได้หรือไม่ และยังสามารถพิจารณาโพลาไรซ์ของคลื่นที่รับได้ จากผลการวัดทดสอบแบบคร่าวๆ ในขั้นต้นพบว่าคลื่นความถี่ย่านกลางดังกล่าวสามารถแพร่คลื่นเข้าไปตามแนวเส้นทางเดินของถ้ำได้ในระยะทางประมาณ 140 เมตร โดยที่ระดับความแรงของสัญญาณยังสูงพอและสามารถรับฟังเสียงที่ส่งมาจากสถานีวิทยุทั้งสามแห่งได้ แต่อัตราการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากความถี่ 805 kHz, 1260 kHz และ 1394 kHz ตลอดระยะทาง 140 เมตรภายในถ้ำจะมีค่าประมาณ 10 dB μ V, 11 dB μ V และ 18 dB μ V ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าความถี่สูงชันยังมีอัตราการลดทอนหรือการสูญเสียในอากาศสูงมากขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1 และจากประสบการณ์การวัดระดับความแรงของสัญญาณภายในถ้ำทรายทองในครั้งนั้น ได้ถูกนำมาเป็นส่วนช่วยในการกำหนดแนวทางเริ่มต้นเพื่อดำเนินการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารภายในถ้ำ ซึ่งได้ถูกนำเสนอในรายงานวิจัยฉบับนี้อย่างละเอียดต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลระดับความแรงของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุย่านกลางที่แพร่กระจายภายในถ้ำทรายทอง

ตำแหน่ง*	ระดับสัญญาณ (dB μ V)			สภาพถ้ำ
	f1 = 805 kHz	f2 =1260 kHz	f3 =1394 kHz	
0	53	51	58	สระน้ำหน้าถ้ำ
2	51	50	51	ปากปล่องถ้ำ
6	50	47	51	ทางเดินในถ้ำ
16	48	47	48	ทางเดินในถ้ำ
22	48	49	59	โถงเล็ก
30	45	45	46	โถงกว้าง
40	45	43	46	โถงใหญ่
60	44	41	45	ทางเดินในถ้ำ
75	44	41	44	ผ่านช่องหิน/ไม่มี Audio
90	45	44	46	โถงเล็ก/มี Audio
105	46	42	43	มี Noise 80%
120	44	40	45	โถงสูง/Noise > 80%
135	42	38	40	โถงสูง/Audio < 50%
140	43	40	40	ซอกหิน/Audio < 20%

3. เครื่องมือสำหรับการดำเนินการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำ

รายการเครื่องมือวัดทดสอบหลักที่จำเป็นต้องใช้ในการดำเนินการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำสำหรับโครงการวิจัยฯ นี้มีรายการดังต่อไปนี้

- 1) สายอากาศแถบกว้างสำหรับส่ง-รับสัญญาณเพื่อการศึกษาทดลอง ประกอบด้วย
 - สายอากาศแอกทิฟภาครับ ช่วงความถี่ 8.3 kHz – 6 GHz พร้อมอุปกรณ์ประกอบ
 - สายอากาศภาคส่ง ช่วงความถี่ 30 kHz – 300 kHz, 500 kHz - 649 kHz, 1600 kHz - 1799 kHz, 1.6 kHz - 30 MHz, 75 MHz - 3 GHz
- 2) เครื่องมือ RF Signal Generator 8 kHz-3 GHz พร้อม Option ที่กำหนด 1 ชุด
- 3) เครื่องมือ Handheld Spectrum Analyzer 5kHz–4 GHz พร้อม Option จำนวน 1 ชุด

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

อย่างไรก็ตามในการดำเนินการจัดซื้อและการส่งมอบครุภัณฑ์ทั้งสามรายการดังกล่าว ทางบริษัทตัวแทนจำหน่ายไม่สามารถดำเนินการได้ตามกำหนดเวลา เนื่องจากเกิดความล่าช้าในกระบวนการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศบางรายการจำเป็นต้องได้รับใบอนุญาตจากสำนักงาน กสทช. โดยทางบริษัทผู้แทนจำหน่ายได้จัดส่งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดให้กับทางมหาวิทยาลัยฯ ภายในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งเลยกำหนดเวลาในการส่งรายงานความก้าวหน้างวดที่ 2 ไปแล้ว ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยในช่วงแรกจึงจำเป็นต้องใช้เฉพาะเครื่องมือผลิตคลื่นความถี่วิทยุ (RF signal generator) 8 kHz-3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และสายอากาศภาคครีบบั๊ก Aaronia ซึ่งทำงานได้เฉพาะย่านความถี่ 380 MHz – 8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) ของหน่วยงานอื่นมาใช้งานก่อน



รูปที่ 3 ก) RF signal generator 8 kHz - 3 GHz และ Spectrum analyzer 5 kHz – 4 GHz
ข) Aaronia active antenna 380 MHz – 8 GHz



รูปที่ 4 สายอากาศควอเตอร์เวฟโมโนโพลกราวด์เพลน จำนวน 6 ชุดความถี่

ในส่วนของสายอากาศภาคครีบบั๊กก็เช่นเดียวกัน คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องออกแบบและสร้างสายอากาศควอเตอร์เวฟโมโนโพลกราวด์เพลน (Quarter-wavelength monopole with ground plane) - ขึ้นมาใช้ในการดำเนินการวิจัยล่วงหน้าไปก่อน จำนวน 6 ชุดความถี่ ได้แก่ที่ความถี่ 300 MHz, 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2, 325 MHz และ 3000 MHz เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศ

Aaronia ที่มีอยู่ เพื่อใช้ทดสอบเพื่อและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุในกรณีต่างๆ ในกรณีของถ้ำประเภทหินปูน (Limestone) และหินทราย (Sandstone) ดังแสดงในรูปที่ 4

หลังจากได้รับมอบรายการครุภัณฑ์หลักจากผู้แทนจำหน่ายในประเทศไทยครบทุกรายการที่จำเป็นต้องใช้ในการดำเนินการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำทุกย่านความถี่ โดยเฉพาะสายอากาศภาคส่งในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 35 MHz ได้แก่ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF ดังแสดงในรูปที่ 4 และสายอากาศเอกทีฟภาครับย่านความถี่ 8.3 kHz – 6 GHz พร้อมเครื่องผลิตความถี่วิทยุ ย่านความถี่ 8 kHz – 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 5 จึงได้นำมาใช้ดำเนินการวิจัยในความถี่ที่เหลือทั้งหมด ซึ่งจะได้อธิบายตามลำดับต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

- รูปที่ 4** ก) Passive Shielded Loop Antenna ยี่ห้อ AH Systems รุ่น SAS-565L (20 Hz – 1 MHz)
 ข) Passive Loop Antenna ยี่ห้อ AH Systems รุ่น SAS-564 (1 kHz - 30 MHz)
 ค) Biconical Antenna ยี่ห้อ Aaronia รุ่น BicoLOG20100 (20 MHz – 1000 MHz)
 ง) MF Broadcast Antenna ยี่ห้อ Isotron รุ่น 200B (1000 kHz – 2,500 kHz)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ก) RF Signal Generator ยี่ห้อ R&S รุ่น SMB100A (8 kHz - 3 GHz)

ข) Spectrum Analyzer ยี่ห้อ R&S รุ่น Rider HPF (5 kHz - 4 GHz) และ

Active Antennas ยี่ห้อ R&S รุ่น HE400 และ HE400UWB (8.3 kHz – 8 GHz)

4. แนวทางการทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นภายในถ้ำ

คลื่นความถี่ที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้ภายในถ้ำนั้น ได้อ้างอิงวิธีการวัดทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่ในระดับสายตา (LOS: Line-of-Sight RF transmission) ภายในโพรงถ้ำแนวตรง และการส่งผ่านของคลื่นความถี่ที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS: Non-Line-of-Sight RF transmission) ภายในโพรงถ้ำแนวโค้งจากผลงานวิจัยของ Soo Yong Lim และคณะ [9] มาพัฒนาใช้ในการวัดทดสอบในโครงการวิจัยนี้ด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปวิธีการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำโดยแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่

- 1) การส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS) ภายในโพรงถ้ำแนวตรง
- 2) การส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS) ภายในโพรงถ้ำแนวโค้ง

ตารางที่ 2 ย่านความถี่วิทยุที่ใช้ในการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในโครงการ

RF Band	Frequency	Freq#1	Freq#2	Freq#3	Freq#4	Freq#5
LF	30 - 300 kHz	30 kHz	97.5 kHz	165 kHz	232.5 kHz	300 kHz
MF	300 - 3000 kHz	350 kHz	1000 kHz	1650 kHz	2325 kHz	3000 kHz
HF	3 - 30 MHz	3.5 MHz	10 MHz	16.5 MHz	23.5 MHz	30 MHz
VHF	30 - 300 MHz	35 MHz	100 MHz	165 MHz	232.5 MHz	300 MHz
UHF	300 - 3000 MHz	350 MHz	1000 MHz	1650 MHz	2325 MHz	3000 MHz

จากตารางที่ 2 เป็นย่านความถี่วิทยุทั้งหมดที่ได้กำหนดไว้ในเอกสารโครงการวิจัยที่ได้นำเสนอต่อกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ได้แก่ ย่านความถี่ LF, MF, HF, VHF และ UHF อย่างไรก็ตามการแบ่งลำดับชั้นความถี่ (Frequency step) เพื่อการวัดทดสอบนั้น ได้แบ่งความถี่ในแต่ละย่านออกเป็น 5 ลำดับชั้น โดยกำหนดจากความถี่ต่ำสุด (Freq#1:

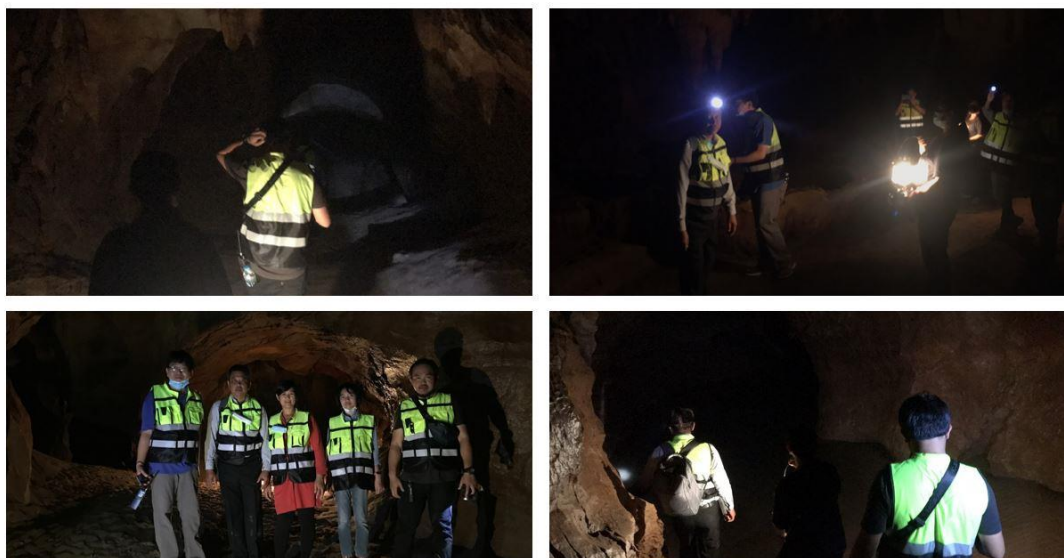
Lower frequency) และความถี่สูงสุด (Freq#5: Upper frequency) เพื่อคำนวณหาความถี่กลาง (Freq#3: Intermediate frequency) จากนั้นคำนวณหาค่าความถี่กลาง (Freq#2) ระหว่าง Freq#1 กับ Freq#3 และหาค่าความถี่กลาง (Freq#4) ระหว่าง Freq#3 กับ Freq#5 ตัวอย่างเช่น ที่ย่านความถี่ LF จะได้ Freq#1 = 30 kHz, Freq#2 = 97.5 kHz, Freq#3 = 165 kHz, Freq#4 = 232.5 kHz และ Freq#5 = 300 kHz จากนั้นเมื่อเปลี่ยนย่านความถี่ให้มีลำดับที่สูงขึ้นถัดไป จะมีการขยับขึ้นของความถี่ต่ำสุดในแต่ละย่านความถี่ให้อยู่ที่ 350 kHz, 3.5 MHz, 35 MHz และ 350 MHz สำหรับความถี่ย่าน MF, HF, VHF และ UHF ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อนกันระหว่างความถี่สูงสุดในย่านที่อยู่ต่ำกว่ากับความถี่ต่ำสุดของย่านที่อยู่ลำดับสูงถัดไป จึงกำหนดให้ทำการทดสอบความถี่วิทยุในแต่ละย่านจำนวน 5 ความถี่ (รวมทั้งหมด 25 ความถี่) และแต่ละความถี่จะแยกการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในโพรงถ้ำเป็นแบบ LOS และ NLOS ภายในระยะทาง 20 เมตร ที่ตำแหน่งเดียวกันของแต่ละถ้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดสอบที่มีการกำหนดกรอบของปัจจัยสภาพแวดล้อมที่คงที่โดยมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงคือ คลื่นวิทยุในแต่ละย่านความถี่และชนิดของสายอากาศภาคส่งเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลต่อความมั่นใจได้ว่าข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากวิธีการวัดทดสอบดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ให้เห็นพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุตามที่กำหนดได้ชัดเจนมากขึ้น

อย่างไรก็ตามทางคณะผู้วิจัยได้หลีกเลี่ยงในการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่มีย่านความถี่ต่ำกว่า 300 kHz หรือในย่านความถี่ VLF เนื่องจากได้มีข้อตกลงกับทางกรมอุทยาน สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในการอนุญาตให้เข้าทำการวิจัยในพื้นที่ถ้ำหลวงเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ และถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ที่กำหนดไว้ว่าคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้งานจะต้องไม่รบกวนการดำรงชีวิตอยู่ของฝูงค้างคาวที่อาศัยอยู่ในถ้ำทั้งสองแห่ง ซึ่งจากการสืบค้นจาก <https://www.scientificamerican.com/article/how-do-bats-echolocate-an/> พบว่าค้างคาวหลายพันธุ์ที่มีอยู่ทั่วโลกจะใช้สัญญาณคลื่นความถี่อัลตราโซนิกในการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าเพื่อวัดระยะทาง (Ultrasonic--ranging) ที่ความถี่ตั้งแต่ 20 kHz – 200 kHz ในขณะที่การได้ยินของมนุษย์โดยปกติจะมีความถี่สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 20 kHz

5. วิธีการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำ

5.1 การทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS)

การวัดทดสอบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS) ตามความถี่ที่กำหนดในตารางที่ 2 คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้ใช้โพรงถ้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงแนวเส้นตรงให้มากที่สุด โดยผลจากการสำรวจถ้ำทั้งสองแห่งพบว่าบริเวณของโพรงถ้ำหลวงเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงมากที่สุดจะอยู่ที่บริเวณโถงพระนอนไปตามเส้นทางก่อนที่จะเข้าสู่ปากทางเข้าถ้ำที่ชื่อว่า “ถ้ำน้ำ” ซึ่งมีระยะทางมากกว่า 20 เมตร แต่มีขนาดความกว้างของโพรงถ้ำไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6 ในขณะที่บริเวณของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ที่มีลักษณะทางเดินในถ้ำเป็นแนวเส้นตรงจะมีอยู่หลายช่วง และแต่ละช่วงจะมีระยะทางประมาณ 30-50 เมตร ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้เลือกบริเวณหลังโถงพระประธานที่มีเส้นทางเข้าสู่ปลายทางของโพรงถ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 บริเวณภายในโพรงถ้ำใกล้เคียงแนวเส้นตรงมากที่สุดของถ้ำหลวงเชียงดาว อ.เชียงดาว จ. เชียงใหม่

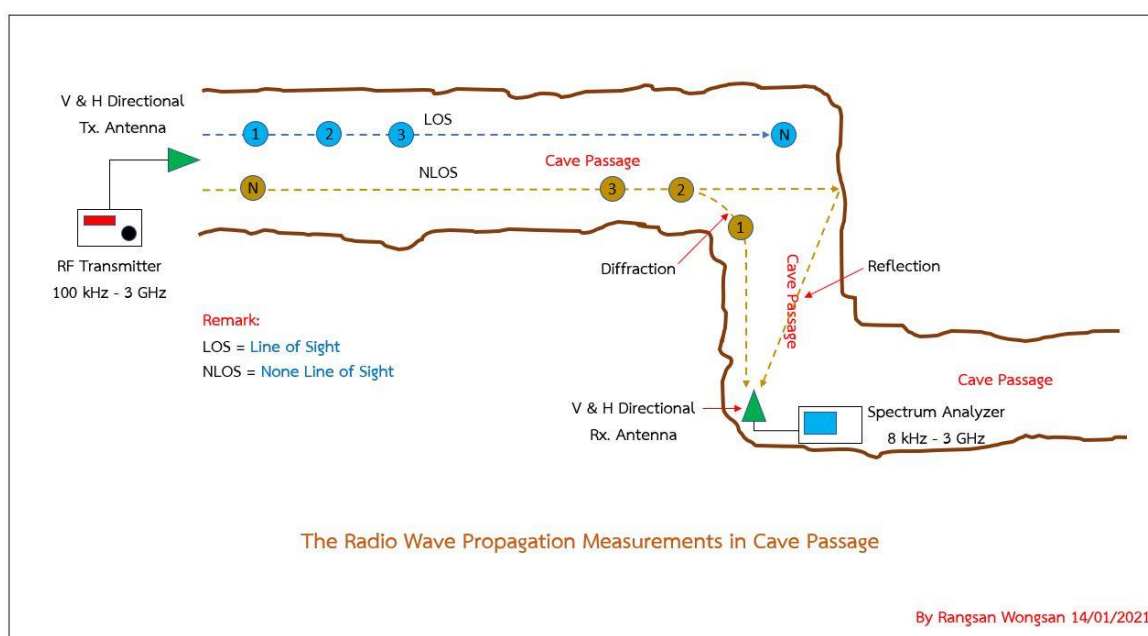


รูปที่ 7 บริเวณภายในโพรงถ้ำใกล้เคียงแนวเส้นตรงมากที่สุดของถ้ำปาฏิหาริย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี

สำหรับขั้นตอนการทดสอบการวัดทดสอบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS) ทางผู้วิจัยได้เน้นที่การวัดทดสอบการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่น (Propagation path loss) ซึ่งในสภาพแวดล้อมตลอดแนวของโพรงถ้ำที่จะใช้เป็นพื้นที่ทำการวัดทดสอบซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันจึงไม่จำเป็นต้องออกแบบระยะทางการวัดทดสอบให้ไกลมากจนเกินไป เนื่องจากเกิดการสูญเสียการส่งผ่านฯ ค่อนข้างสูง ดังนั้นในกรณีของโพรงถ้ำหลวงเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์จึงใช้ระยะทางการวัดทดสอบให้อยู่ภายในระยะ 20 เมตรก็เพียงพอ เนื่องจากอัตราการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่นที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ระยะ 2 เมตรจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการวัดทดสอบทุกย่านความถี่ได้ใช้สัญญาณคลื่นแบบต่อเนื่องที่มีแถบความถี่แคบ (Narrow-band Continuous Wave: CW) เพื่อเน้นเฉพาะการวัดระดับกำลังของสัญญาณ ณ ที่ตำแหน่งที่กำหนดเท่านั้น จากนั้นเมื่อได้รับผลการวัดทดสอบออกมาครบถ้วนทุกย่านความถี่ที่กำหนดตามแผนปฏิบัติงาน

โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารรวมทั้งการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

ทั้งหมดแล้ว จะถูกนำมาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ว่าการส่งและรับสัญญาณคลื่นวิทยุภายในโพรงถ้ำนั้น เหมาะสมที่จะใช้วิธีการแพร่คลื่นแบบใดไม่ว่าจะเป็นแบบคลื่นดิน คลื่นพื้นผิว คลื่นฟ้า หรือคลื่นในอากาศว่าง ซึ่งสามารถหาค่าตอบได้จากค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในแต่ละย่านความถี่ของคลื่นวิทยุที่ได้จาก กระบวนการวัดทดสอบดังกล่าว และหากมีความจำเป็นต้องส่งคลื่นวิทยุในรูปแบบของ LOS ปกติที่ใช้งานกัน ทั่วไปภายนอกถ้ำ จะสามารถนำผลการวัดทดสอบดังกล่าวมาคำนวณหาค่ากำลังประสิทธิผล (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) ของคลื่นความถี่วิทยุที่เราต้องการใช้งานมาออกแบบกำลังส่ง (Output power) ของเครื่องส่งวิทยุ อัตราขยายของสายอากาศส่ง-รับ (Transmitting and receiving antennas) และ ความไวสัญญาณ (Signal sensitivity) ของเครื่องรับวิทยุที่จะต้องถูกออกแบบและสร้างเป็นเครื่องวิทยุสื่อสาร ต้นแบบซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้ โดยรูปแบบที่ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการวัดทดสอบทั้งแบบ LOS และ NLOS ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ได้แสดงเป็นภาพจำลองไว้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงวิธีการวัดค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่นแบบ LOS และ NLOS

ขั้นตอนวิธีการวัดทดสอบแบบ LOS จะเริ่มต้นจากการใช้สายอากาศภาคส่งที่ถูกออกแบบให้มีความถี่ใช้งานอยู่ในย่านความถี่ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 จากนั้นทำการประมาณค่ากำลังส่งของคลื่นวิทยุ (RF output power) ที่ส่งออกจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ โดยเริ่มประมาณการด้วยระยะไกลสุดที่ 20 เมตรก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุไม่สามารถจ่ายกำลังส่งให้มีค่าเท่ากันในทุกคลื่นความถี่ที่กำหนดได้ (เป็นไปตามข้อกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องฯ) นอกจากนี้สายอากาศภาคส่งที่นำมาใช้งานแต่ละความถี่บางชนิดเป็นแบบแถบกว้าง (Broadband antenna) และแบบแถบแคบ (Narrow-band antenna) ซึ่งยอมให้อัตราขยายไม่เท่ากันตลอดแถบความถี่ใช้งานของสายอากาศชนิดนั้นๆ ได้ รวมทั้งสายอากาศเอกทิงภาครับยี่ห้อ R&S รุ่น HE400 และ HE400UWB (8.3 kHz - 8 GHz) ที่ถูกต่อกับเครื่องวิเคราะห์แถบสเปคตรัมทั้งย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงที่แยกกันคนละตัวก็มีอัตราขยายไม่เท่ากันตลอดแถบความถี่ของสายอากาศทั้งสองรุ่นนี้ด้วย จากการทดสอบที่ทุกๆ ความถี่พบว่ากำลังส่งที่เหมาะสมของเครื่อง

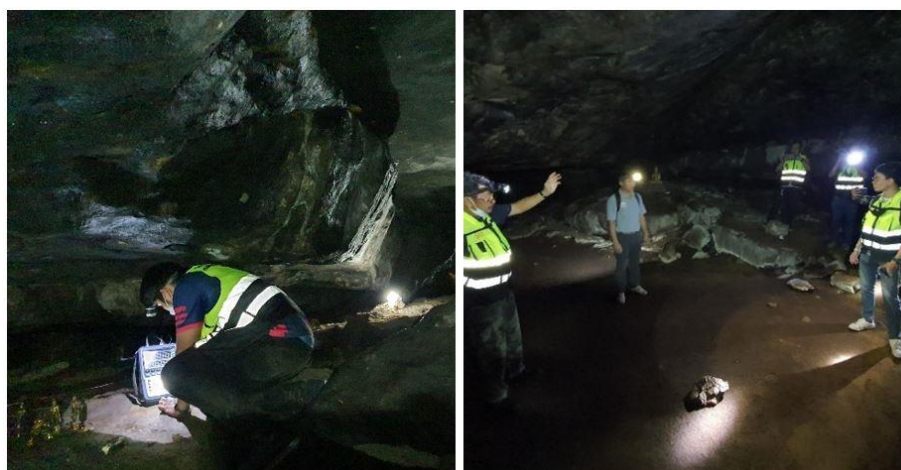
กำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุที่ใช้สำหรับการวัดค่าระดับของสัญญาณที่ระยะ 20 เมตร จะอยู่ที่ +20 dBm หรือประมาณ 100 มิลลิวัตต์ แม้ว่าในบางกรณีที่สายอากาศแถบกว้างถูกนำมาใช้งานในความถี่ที่สายอากาศต้นนั้น มีประสิทธิภาพต่ำสุด ก็อาจทำให้ระยะทางในการวัดค่าระดับของสัญญาณดังกล่าวน้อยกว่า 20 เมตรได้ แต่ถึงกระนั้นก็ตามค่ากำลังที่วัดได้ยังคงสามารถหาคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นต่อระยะหนึ่งเมตรได้ เช่นเดียวกัน จากนั้นจึงนำสายอากาศภาครับและเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัมเริ่มต้นวัดที่ระยะ 2 เมตรแรก จนถึงระยะสุดท้ายภายใน 20 เมตรที่กำหนด ในส่วนของสายอากาศภาคส่งจะถูกติดตั้ง ณ จุดเริ่มต้นของโพรงถ้ำที่เป็นเป้าหมาย โดยกำหนดการโพลาริซชันของสายอากาศเป็นแบบแนวตั้งเพียงอย่างเดียวเนื่องจากหากติดตั้งในแนวนอนจะทำให้เกิดแนวของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าส่วนหนึ่งที่แผ่ออกจากสายอากาศภาคส่งจะขนานกับพื้นถ้ำและถูกลัดวงจร (Shorted circuit) ลงสู่พื้นถ้ำ ส่งผลให้ค่ากำลังที่ส่งออกจากสายอากาศภาคส่งไปในทิศทางที่ทำการวัดทดสอบมีค่าต่ำกว่าการใช้การโพลาริซชันแบบแนวตั้งมากกว่าสองเท่า จากนั้นใช้สายอากาศภาครับแบบแถบความถี่กว้างพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์แถบสเปกตรัมความถี่วัดค่าระดับของสัญญาณทั้งการโพลาริซชันแบบแนวตั้งและแบบแนวนอนเพื่อคู่อธิพลของผนังถ้ำว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการโพลาริซชันของคลื่นหรือไม่อย่างไร โดยปรับเปลี่ยนระยะระหว่างสายอากาศภาครับห่างออกมาจากสายอากาศภาคส่งครึ่งละ 2 เมตร (จุดวงกลมเล็กสีฟ้า) แล้วบันทึกผลลงตารางที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงสรุปในรูปของกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดทดสอบแบบ LOS ในแต่ละย่านความถี่ต่อไป

5.2 การทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS)

การวัดทดสอบพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (NLOS) ตามความถี่ที่กำหนดในตารางที่ 2 เช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ LOS ผู้วิจัยได้กำหนดให้เลือกใช้บางตำแหน่งของโพรงถ้ำที่ผนังมีลักษณะเป็นแนวโค้งสามารถบดบังสัญญาณแนว LOS ได้อย่างมีนัยสำคัญ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเลี้ยวเบนและการสะท้อนของคลื่นความถี่วิทยุในทุกย่านความถี่ที่กำหนดจากสายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับ ซึ่งได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าหากคลื่นความถี่วิทยุคลื่นใดสามารถเลี้ยวเบนหรือสะท้อนบนผนังถ้ำที่มีความโค้งหรือคดเคี้ยวได้ดี โดยการสังเกตค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นสองบริเวณ ได้แก่ บริเวณแรกก่อนจะถึงส่วนโค้งที่เป็นสิ่งกีดขวาง (LOS) และบริเวณที่สองที่นับจากส่วนโค้งออกไป (NLOS) จนถึงระยะสุดท้ายที่ทำการวัดทดสอบ ซึ่งผลการวัดทดสอบที่ได้ในแต่ละความถี่จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่บอกว่าคุณสมบัตินั้นสามารถใช้งานได้ดีที่สุดในถ้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติได้หรือไม่ จากการสำรวจพบว่าทั้งสองถ้ำมีส่วนที่เป็นโพรงถ้ำตามที่ต้องการวัดทดสอบแบบ NLOS อยู่หลายตำแหน่ง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พื้นที่การวัดทดสอบ ณ บริเวณที่มีส่วนโค้งของผนังถ้ำเกิดการบดบังคลื่นความถี่วิทยุอย่างชัดเจนและมีระยะทางรวมจากจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งไปตามแนวโค้งของผนังถ้ำอย่างน้อย 20 เมตร เพื่อทำการวัดทดสอบการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่นเช่นเดียวกับการวัดทดสอบแบบ LOS ที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยโพรงถ้ำที่มีลักษณะโค้งเพื่อทำการวัดทดสอบแบบ NLOS ของถ้ำหลวงเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 บริเวณผนังถ้ำแนวโค้งที่ใช้ในการวัดทดสอบแบบ NLOS ภายในถ้ำหลวงเชียงดาว



รูปที่ 10 บริเวณผนังถ้ำแนวโค้งที่ใช้ในการวัดทดสอบแบบ LNOS ภายในถ้ำปาฏิหาริย์

ขั้นตอนวิธีการวัดทดสอบแบบ NLOS จะมีขั้นตอนเช่นเดียวกับวิธีการวัดทดสอบแบบ LOS ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 8 จะแตกต่างเฉพาะสภาพภูมิประเทศภายในถ้ำที่ได้กล่าวไปแล้วเท่านั้น ในส่วนของการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ อุปกรณ์ภาคส่งทั้งหมดจะถูกนำไปติดตั้งบริเวณจุดเริ่มต้นของแนวโค้งของผนังถ้ำที่เป็นเป้าหมาย โดยติดตั้งสายอากาศภาคส่งให้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบแนวตั้งเพียงอย่างเดียวด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ NLOS ส่วนสายอากาศภาครับที่ใช้งานยังคงเป็นทั้งแบบแถบกว้างและแบบแถบแคบชุดเดิมพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์แถบสเปกตรัมเพื่อวัดค่าระดับของสัญญาณทั้งการโพลาไรซ์แบบแนวตั้งและแบบแนวนอนเช่นเดิม โดยมีเป้าหมายเพื่อดูอิทธิพลของผนังถ้ำที่มีความโค้งบดบังการส่งคลื่นแบบ LOS ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นและสามารถเกิดการเลี้ยวเบนหรือเกิดการสะท้อนของคลื่นหรือไม่อย่างไร และยังคงปรับระยะระหว่างสายอากาศภาครับที่ติดตั้งตามแนวโค้งของโพรงถ้ำดังกล่าวให้มีระยะห่างออกมาจากสายอากาศภาคส่งครึ่งละ 2 เมตร (จุดวงกลมเล็กสีเหลือง) พร้อมบันทึกผลลงตารางที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงสรุปในรูปของกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดทดสอบแบบ NLOS ในแต่ละย่านความถี่ต่อไป

6. ผลการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุภายในถ้ำ

โดยทั่วไปแล้วการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในถ้ำหรืออุโมงค์ใต้ดิน ถ้าเป็นลักษณะของอุโมงค์ที่มีรูปร่างของโพรงทางเดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอหรือตลอดระยะทางมีลักษณะของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันมักจะมีการพิจารณาจำลองให้เหมือนกับท่อนำคลื่นทรงกลมขนาดใหญ่ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปท่อนำคลื่นจะมีโครงสร้างกลางที่มีผนังตัวนำรองรับไฟฟ้าตามขวาง (TE: Transverse Electric) และแม่เหล็กตามขวาง (TM: Transverse Magnetic) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางของคลื่น ซึ่งขนาดของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวกำหนดว่าคลื่นความถี่วิทยุใดบ้างที่สามารถส่งผ่านจากต้นทางไปสู่ปลายทางได้ โดยความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านเข้าไปได้โดยมีการสูญเสียที่น้อยที่สุด (มักเรียกว่าความถี่โดมิแนนท์ หรือ Dominant frequency) จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) จากขนาดของท่อนำคลื่นนั้นๆ อย่างไรก็ตามอุโมงค์หรือโพรงถ้ำไม่ว่าจะเป็นชนิดผนังทึบแบบใดก็ตามจะไม่อยู่ในสภาพดังกล่าวโดยสิ้นเชิง เนื่องจากผนังภายในของท่อนำคลื่นจะเป็นตัวนำที่ใกล้สมบูรณ์ที่สุด (Near-perfect conductors) แต่ผนังของถ้ำจะทำหน้าที่เหมือนฉนวน (Insulator) มากกว่าตัวนำ ด้วยเหตุที่เงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีเกิดขึ้นอยู่ภายในโพรงถ้ำ ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ที่พลังงานของคลื่นจะมีทั้งส่วนที่สะท้อนกลับเข้ามาภายในโพรงถ้ำและส่วนที่สูญเสียเข้าไปในชั้นหินของผนังถ้ำที่มีอยู่โดยรอบซึ่งถูกควบคุมด้วยค่าดัชนีการหักเห (Refraction index) ระหว่างตัวกลางที่เป็นอากาศและตัวกลางที่เป็นผนังถ้ำซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กแตกต่างกัน โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นความถี่ต่ำนั้น ค่าความลึกผิว (Skin depth) ของคลื่นที่เดินทางแทรกเข้าไปในพื้นผิวผนังถ้ำที่มีค่าความนำสูงก็ยิ่งมีมากขึ้นทำให้เกิดการเพิ่มการลดทอนกำลังในขณะที่มีการเดินทางของคลื่นภายในโพรงถ้ำที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีการหักเหซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ายกกำลังสองของความยาวคลื่นนั้นอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงถ้ำลดขนาดลง การแพร่คลื่นในโหมด TE และ TM ที่มีลำดับที่สูงขึ้น (High-order modes) ก็จะถูกกระตุ้นเข้าไปในโพรงถ้ำแทนความถี่ต่ำสุดในโหมดโดมิแนนท์ ทำให้การลดทอนของคลื่นความถี่ที่ออกแบบใช้งานในโหมดนี้เกิดการลดทอนมากขึ้นโดยผูกผันตามสัดส่วนของขนาดโพรงถ้ำที่ลดลง ยิ่งกว่านั้นหากเกิดกรณีที่โพรงของถ้ำมีทิศทางเปลี่ยนไปจากช่องทางตรงเป็นเลี้ยวโค้งหรือหักศอก ก็จะทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นความถี่โหมดโดมิแนนท์ซึ่งเกิดจากการการเปลี่ยนแปลงโหมดจากโพรงถ้ำที่เปลี่ยนเป็นทางโค้งเพิ่มเติมขึ้นอีก อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงถ้ำตามธรรมชาติไม่อาจกำหนดได้ว่าจะต้องใช้ค่ามาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงถ้ำเท่าใดจึงจะเหมาะสม เนื่องจากมีขนาดที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานที่รวมทั้งชนิดของหินที่ประกอบขึ้นเป็นโพรงถ้ำแต่ละแห่งก็ยิ่งแตกต่างกันด้วย ดังนั้นวิธีการออกแบบการวัดทดสอบที่ดีและเหมาะสมที่สุดก็คือ การวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุทั้งในระดับสายตา (LOS) และไม่ใช่ระดับสายตา (NLOS) ด้วยการพิจารณาค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่น (Propagation path loss) [2] เพื่อนำค่าการสูญเสียหรือค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นในแต่ละคลื่นความถี่ที่กำหนดมาพิจารณาหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุและอัตราขยายของระบบสายอากาศสำหรับย่านความถี่ที่ถูกคัดเลือกมาใช้กันอย่างเหมาะสมโดยการพิจารณาจากผลการวัดทดสอบที่ได้มาทั้งหมด

6.1 การวัดทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในถ้ำเชียงดาว

1) การวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS)

ถ้ำเชียงดาว อยู่ในบริเวณวัดถ้ำเชียงดาว ต.บ้านถ้ำ อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ เป็นถ้ำชนิดหินปูนที่มีเส้นทางเดินหลายลักษณะคล้ายบางบริเวณที่อยู่ภายในถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน อ.แม่สาย จ.เชียงราย มีระยะทางตลอดทางเดินในถ้ำแต่ละเส้นทางไม่เกิน 750 เมตร มีระยะทางสั้นกว่าของถ้ำขุนน้ำนางนอนและมีความสะดวกในการเดินทางเข้าออกถ้ำมากกว่าจึงสามารถปฏิบัติการวิจัยได้อย่างต่อเนื่องตลอดปี เนื่องจากปริมาณน้ำขังภายในถ้ำช่วงฤดูฝนน้อยกว่า สำหรับหินปูนที่เป็นองค์ประกอบของถ้ำหลวงเชียงดาวทางคณะผู้วิจัยได้นำตัวอย่างหินปูนไปเข้าห้องปฏิบัติการธรณีวิทยาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่ามีค่าความต้านทานของเนื้อหิน (rock resistivity) เฉลี่ยอยู่ที่ 505.3×10^6 โอห์มต่อเมตร ($\Omega\text{-m}$) ค่าความนำไฟฟ้า (rock conductivity) เฉลี่ยของเนื้อหินอยู่ที่ 0.0020×10^6 ซีเมนต์ต่อเมตร ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$) และค่าซึมซาบ (permeability) ในช่วงตั้งแต่ 0.008 – 0.021 md (milli Darcy) โดยอ้างอิงวิธีการวัดทดสอบและคำนวณจาก [10] และ [11] อย่างไรก็ตามในการวัดทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่นความถี่วิทยุนั้นไม่จำเป็นต้องทำการวัดทดสอบแบบ LOS ตลอดความยาวของโพรงถ้ำที่เป็นแนวตรง เนื่องจากต้องใช้กำลังส่งขาออกของเครื่องผลิตความถี่วิทยุ (RF Signal Generator) ในทุกย่านความถี่ค่อนข้างสูงมากและเกินขีดจำกัดจากข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องดังกล่าวที่มีอยู่ ดังนั้นในการวัดทดสอบจึงเลือกบริเวณของโพรงถ้ำที่มีขนาดของปากโพรงถ้ำตลอดระยะทางของการวัดทดสอบให้มีขนาดใกล้เคียงกันให้มากที่สุดโดยมีระยะทางยาวสุดไม่ต่ำกว่า 20 เมตร โดยมีขนาดของโพรงถ้ำเปลี่ยนแปลงจากประมาณ 6 เมตรไปสู่ขนาดความกว้างประมาณ 4 เมตร เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นในกรณีที่มีขนาดของโพรงทางตรงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดด้วย โดยกำหนดให้สายอากาศภาคส่งถูกติดตั้งอยู่ที่บริเวณพื้นที่ของโพรงที่มีความกว้าง 6 เมตร และใช้สายอากาศภาครับเริ่มต้นวัดทดสอบที่ทุก ๆ ระยะ 2 เมตร โดยผ่านเข้าไปบริเวณพื้นที่ของโพรงตรงที่มีขนาดความกว้างลดลง จนถึงตำแหน่งสุดท้ายที่สายอากาศภาครับและเครื่องมือวิเคราะห์แถบสเปกตรัมไม่สามารถวัดระดับความแรงของสัญญาณความถี่นั้นได้ ภาพการปฏิบัติงานไว้ในรูปที่ 11 และ 12 และผลการวัดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 – 25 และกราฟแสดงผลในรูปที่ 13 – 35



รูปที่ 11 แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ LOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF ภายในโพรงถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่



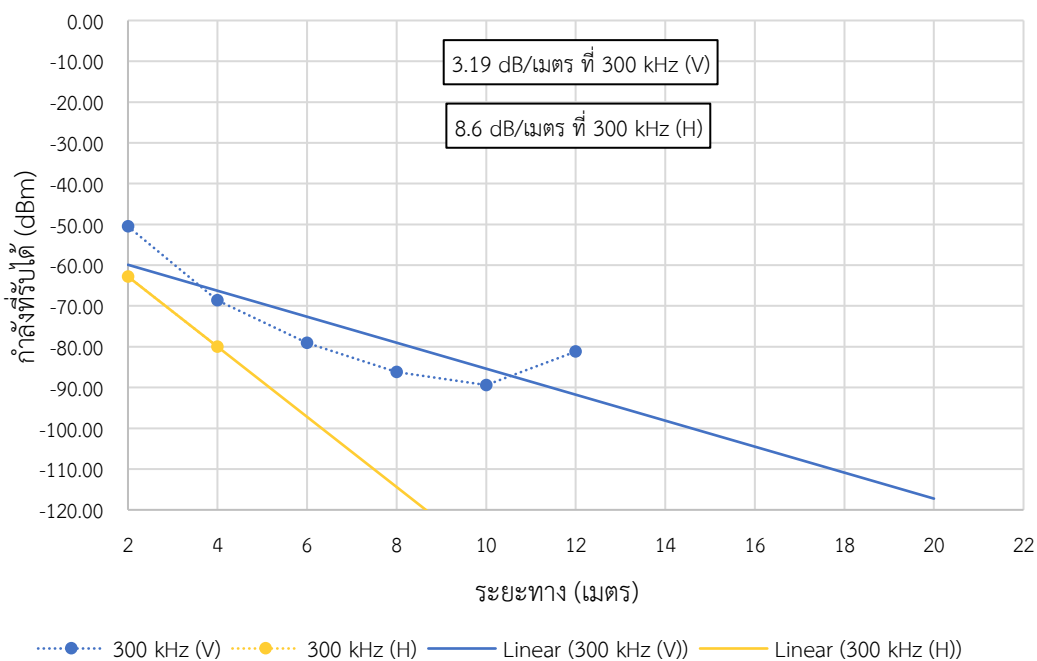
รูปที่ 12 แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ LOS ย่านความถี่ UHF ภายในถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่

ตารางที่ 3 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-50.50	-62.80
2	4	-68.60	-80.00
3	6	-79.10	-
4	8	-86.20	-
5	10	-89.40	-
6	12	-81.20	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟเชิงเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบแบบ LOS ทั้ง V-V (การโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่งและภาครับเป็นแบบแนวตั้ง) และ V-H (การโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่งเป็นแบบแนวตั้งและภาครับเป็นแบบแนวนอน) และคำนวณหาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในเส้นทางการแพร่คลื่นต่อระยะหนึ่งเมตร ดังแสดงในรูปที่ 13 จะทำให้เห็นพฤติกรรมดังกล่าวของคลื่นความถี่นั้นๆ ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่

เดียวกันในขณะที่มีการแพร่ออกไปในเส้นทางเดียวกันอีกด้วย ซึ่งผลการวัดทดสอบในรูปแบบของตารางและกราฟของความถี่อื่นที่เหลืออยู่ จะได้นำเสนออย่างต่อเนื่องจนครบทุกคลื่นความถี่แต่จะแทรกคำอธิบายปรากฏการณ์ของพฤติกรรมคลื่นในแต่ละกลุ่มความถี่ที่มีลักษณะการแพร่คล้ายกัน และท้ายสุดจะเป็นการอธิบายเชิงเปรียบเทียบของทุกคลื่นความถี่ในภาพรวมของแต่ละกรณีต่อไป

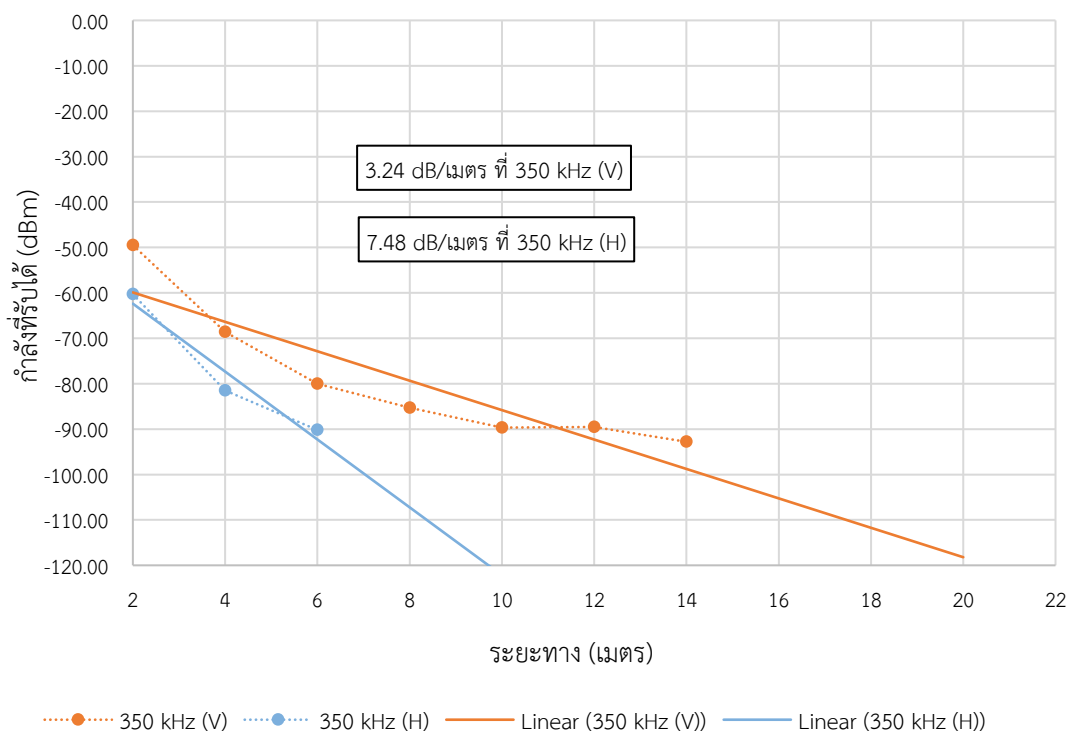


รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 4 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-49.50	-60.30
2	4	-68.60	-81.50
3	6	-80.00	-90.20
4	8	-85.30	-
5	10	-89.70	-
6	12	-89.50	-
7	14	-92.80	-
8	16	-	-

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

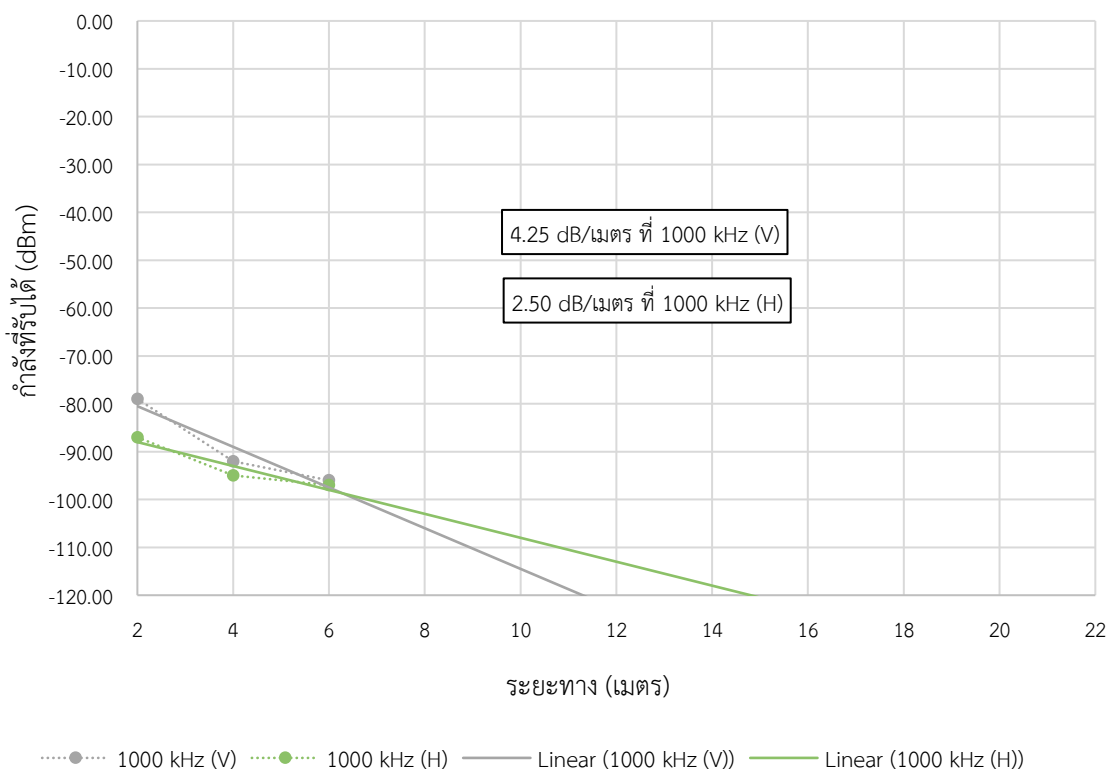
จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz และ 350 kHz ในโพรงถ้ำตามระยะทางแบบ LOS ที่มีหิ้งงอกหินย้อยกีดขวางน้อยที่สุดได้ถูกพล็อตในรูปที่ 13 และ 14 การวัดทดสอบดำเนินการที่ระยะห่างครั้งละ 2 เมตรระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับจนถึงระยะสุดท้ายที่ 20 เมตร โดยกำลังส่งจากเครื่องกำเนิดสัญญาณฯ เท่ากับ +20 dBm ทุกความถี่ และผ่านสายนำสัญญาณแบบสูญเสียต่ำ (Low-loss coaxial cable) 50 โอห์มเบอร์ LMR-240 ความยาว 2 เมตร มายังสายอากาศภาคส่ง ส่วนสายอากาศภาครับเป็นแบบแถบกว้างที่มีค่าอัตราขยายแตกต่างกันในแต่ละความถี่เป็นตัวรับสัญญาณ ดังนั้นค่าระดับความแรงของสัญญาณที่สายอากาศภาครับรับได้และส่งไปยังอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่เพื่อแสดงค่า จึงอาจไม่ใช่ค่าความแรงของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ณ ตำแหน่งนั้น เนื่องจากสายอากาศภาครับที่ใช้งานมีอัตราขยายค่าหนึ่งเฉพาะความถี่นั้นๆ และยังมี การสูญเสียไม่เท่ากันในสายนำสัญญาณที่ถูกต่อจากสายอากาศภาครับไปยังอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่อีก อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัตถุประสงค์ของการวัดค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่หรือค่าการสูญเสียจากการแพร่คลื่น (Propagation path loss) เท่านั้น ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ค่าระดับความแรงของสัญญาณที่เริ่มแผ่ออกมาจากสายอากาศและแพร่กระจายไปตลอดแนวโพรงทุกๆ ระยะ 2 เมตร ของการวัดทดสอบมาพิจารณาหาการสูญเสียจากการแพร่คลื่นหรือจากการส่งผ่านได้โดยตรง ทำให้ค่าระดับกำลังที่วัดได้จากสายอากาศภาครับผ่าน

สายนำสัญญาณจนถึงอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแถบความถี่จึงสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นแต่ละความถี่ที่เดินทางในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติที่เสมือนเป็นค่าคงที่ได้โดยไม่ขัดแย้งกัน หากพิจารณาการสูญเสียการส่งผ่านในรูปที่ 13 และ 14 จะเห็นว่าได้ใช้ความลาดเอียงของเส้นตรง (Linear-line) ช่วยในการพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในแต่ละความถี่ทั้งเงื่อนไขการวัดทดสอบแบบ V-V และ V-H หากความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันมากจะแสดงให้เห็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีค่าสูง และกรณีที่ความลาดเอียงของเส้นตรงมีความชันน้อยกว่าจะแสดงให้เห็นว่าเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่ำๆ ซึ่งจะสอดคล้องกับตัวเลขของค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่คำนวณได้ในทุกกรณี เมื่อพิจารณาในรูปที่ 13 จะเห็นว่าที่ความถี่ 300 kHz เมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-V จะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงมากถึง 3.19 dB/m ทำให้คลื่นแพร่ไปในอากาศผ่านโพรงถ้ำได้เพียงระยะ 12 เมตร เนื่องจากเมื่อตำแหน่งของสายอากาศภาครับอยู่ที่ระยะ 4-8 เมตรระดับของสัญญาณจะถูกลดทอน (Attenuation) ลงอย่างมากประมาณ 36 dB ซึ่งช่วงระยะดังกล่าวเป็นบริเวณที่ขนาดของโพรงถ้ำแคบลงเหลือประมาณ 3-4 เมตร จึงเกิดปรากฏการณ์เสมือนที่คลื่นมีขนาดลดลงส่งผลให้ความถี่ 300 kHz ต่ำกว่าความถี่ตัด (Cut-off frequency) ของขนาดโพรงที่ลดลงและส่งผลให้เกิดการลดทอนสูงมากซึ่งถือว่าค่อนข้างรุนแรง แต่เมื่อพ้นระยะ 8 เมตรออกไปแล้วขนาดของโพรงถ้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นและต่อเนื่อง ทำให้ระดับความแรงของสัญญาณมีการลดทอนต่ำลง แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งเพิ่มอีก 2 เมตร กลับพบว่าระดับของกำลังของสัญญาณที่รับได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 8 dBm ซึ่งอาจเกิดจากบริเวณนั้นห่างออกจากก้อนหินที่เคยเป็นอุปสรรคที่ระยะก่อนหน้า และอาจมีบางส่วนเกิดการสะท้อนเข้ามายังสายอากาศภาครับจึงทำให้ระดับของสัญญาณยกสูงขึ้น แต่เมื่อพ้นระยะ 12 เมตรออกไปก็ไม่สามารถรับสัญญาณได้อีกเลย

ขณะที่การส่งรับคลื่นแบบ V-H คลื่นสามารถแพร่เข้าไปในโพรงถ้ำได้เพียงแค่ระยะ 4 เมตร และมีการลดทอนลงอย่างรวดเร็วโดยมีการสูญเสียการส่งผ่านสูงถึง 8.6 dB/m เนื่องจากการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นในแนวนอนของคลื่นดิน (Ground wave) จะถูกลัดวงจรลงสู่พื้นดินและถูกซึมซับลงพื้นเป็นส่วนใหญ่ ขณะในกรณีของคลื่นความถี่ 350 kHz ในรูปที่ 14 พฤติกรรมการแพร่คลื่นจะคล้ายกับกรณีความถี่ 300 kHz นั่นคือมีการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-V และ V-H ค่อนข้างสูง (3.24 dB/m และ 7.48 dB/m) โดยที่ระยะ 4-8 เมตรระดับของสัญญาณจะถูกลดทอนลงอย่างสูงประมาณ 35.8 dB แต่มีระยะที่วัดสัญญาณได้เพิ่มเป็น 14 เมตร และมีพฤติกรรมเหมือนกับความถี่ 300 kHz ในกรณีวัดทดสอบแบบ V-H ดังนั้นคลื่นที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการแพร่คลื่นเข้าไปในโพรงถ้ำโดยตรง

ตารางที่ 5 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz แบบ LOS

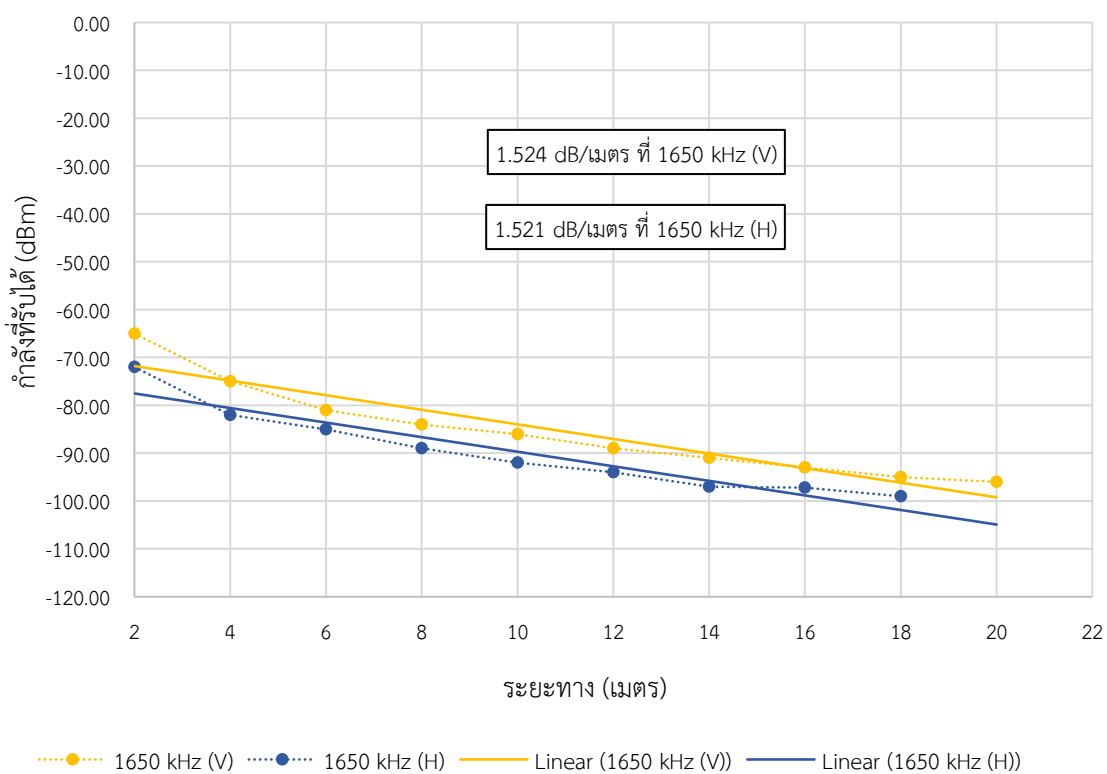
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-79.00	-87.00
2	4	-92.00	-95.00
3	6	-96.00	-97.00
4	8	-	-
5	10	-	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 6 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz แบบ LOS

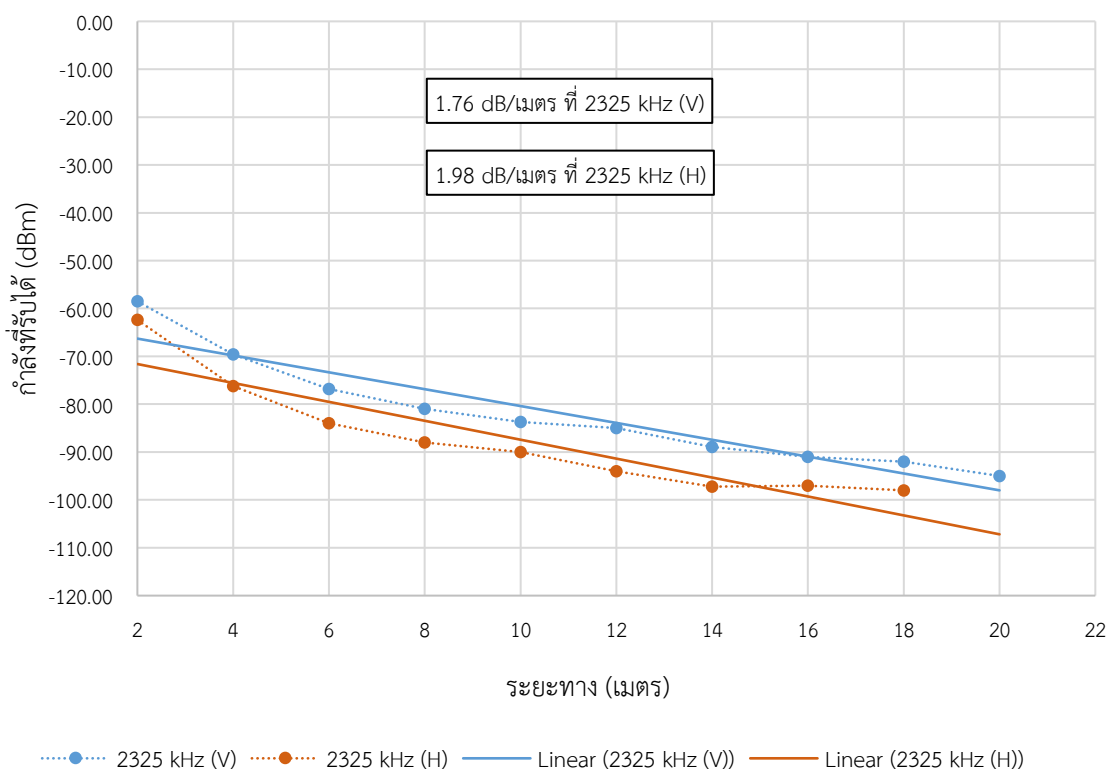
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-65.00	-72.00
2	4	-75.00	-82.00
3	6	-81.00	-85.00
4	8	-84.00	-89.00
5	10	-86.00	-92.00
6	12	-89.00	-94.00
7	14	-91.00	-97.00
8	16	-93.00	-97.20
9	18	-95.00	-99.00
10	20	-96.00	-



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 7 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz แบบ LOS

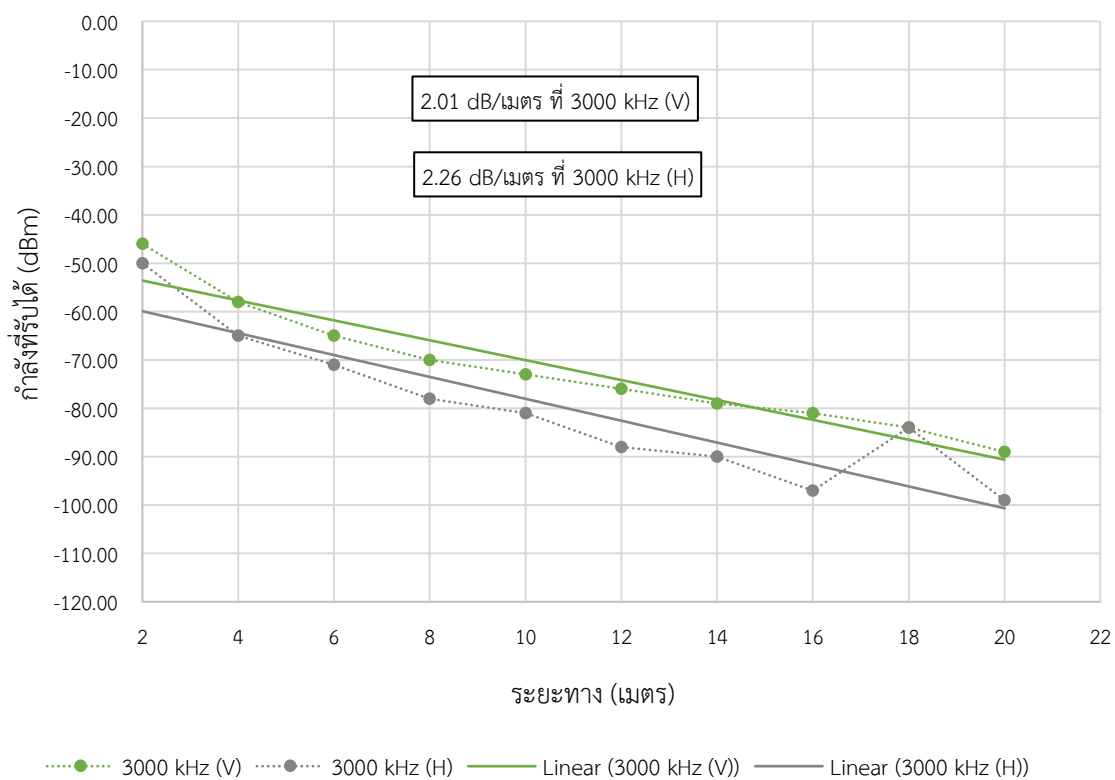
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-58.50	-62.40
2	4	-69.60	-76.20
3	6	-76.80	-84.00
4	8	-81.00	-88.00
5	10	-83.70	-90.00
6	12	-85.00	-94.00
7	14	-88.90	-97.20
8	16	-91.00	-97.00
9	18	-92.00	-98.00
10	20	-95.00	-



รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 8 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz แบบ LOS

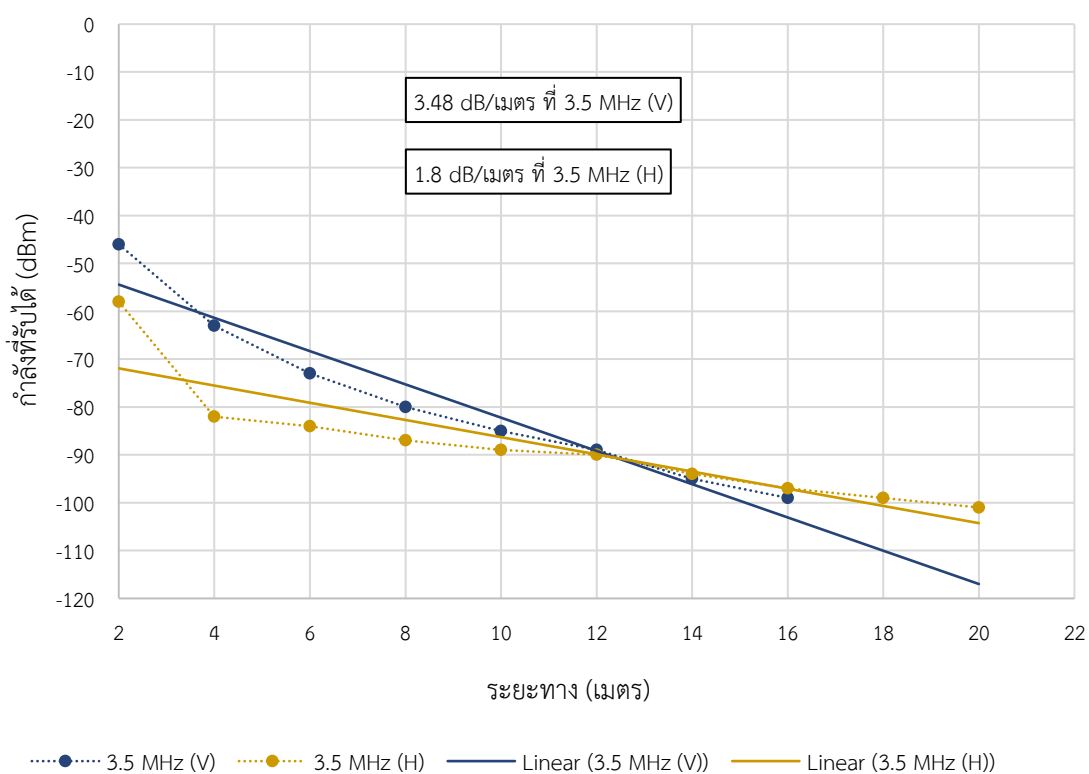
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46.00	-50.00
2	4	-58.00	-65.00
3	6	-65.00	-71.00
4	8	-70.00	-78.00
5	10	-73.00	-81.00
6	12	-76.00	-88.00
7	14	-79.00	-90.00
8	16	-81.00	-97.00
9	18	-84.00	-84.00
10	20	-89.00	-99.00



รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 9 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz แบบ LOS

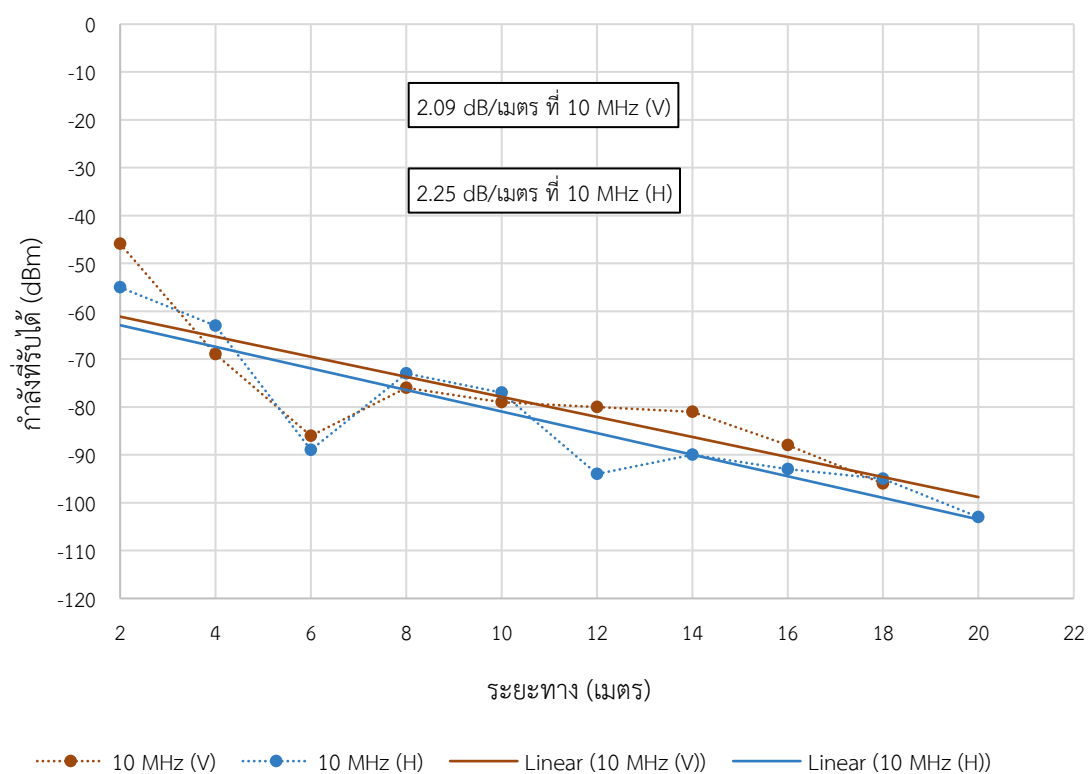
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46	-58
2	4	-63	-82
3	6	-73	-84
4	8	-80	-87
5	10	-85	-89
6	12	-89	-90
7	14	-95	-94
8	16	-99	-97
9	18	-	-99
10	20	-	-101



รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 10 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz แบบ LOS

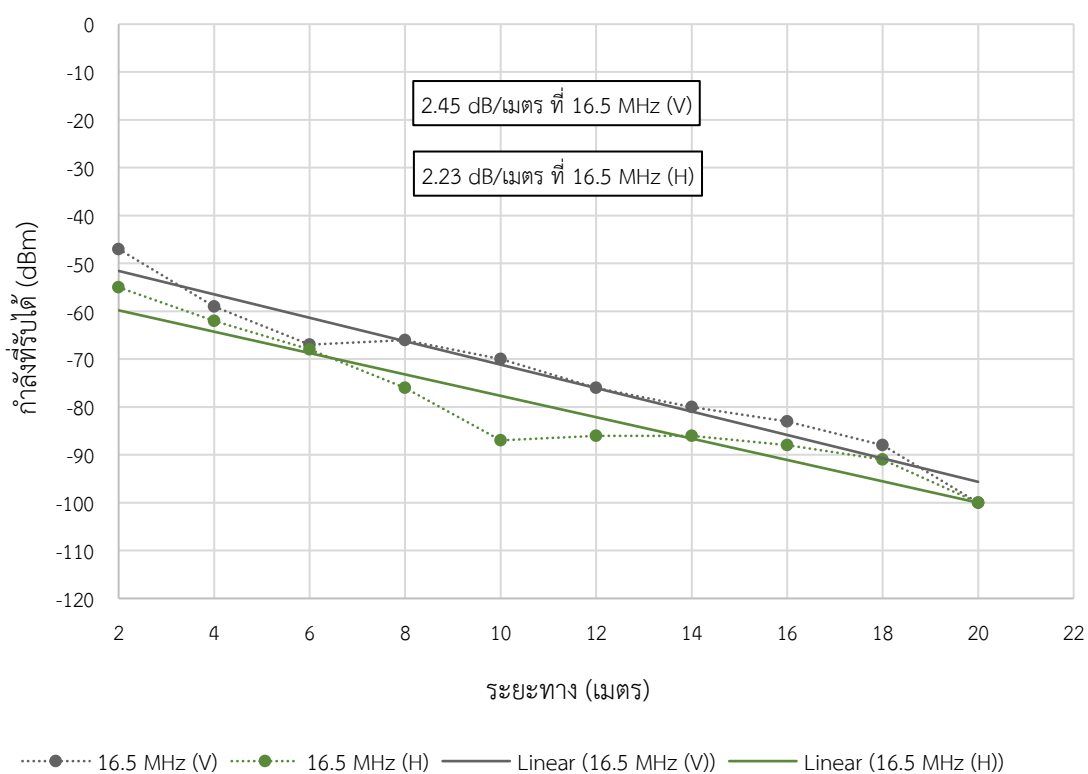
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-45.9	-55
2	4	-69	-63
3	6	-86	-89
4	8	-76	-73
5	10	-79	-77
6	12	-80	-94
7	14	-81	-90
8	16	-88	-93
9	18	-96	-95
10	20	-	-103



รูปที่ 20 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 11 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz แบบ LOS

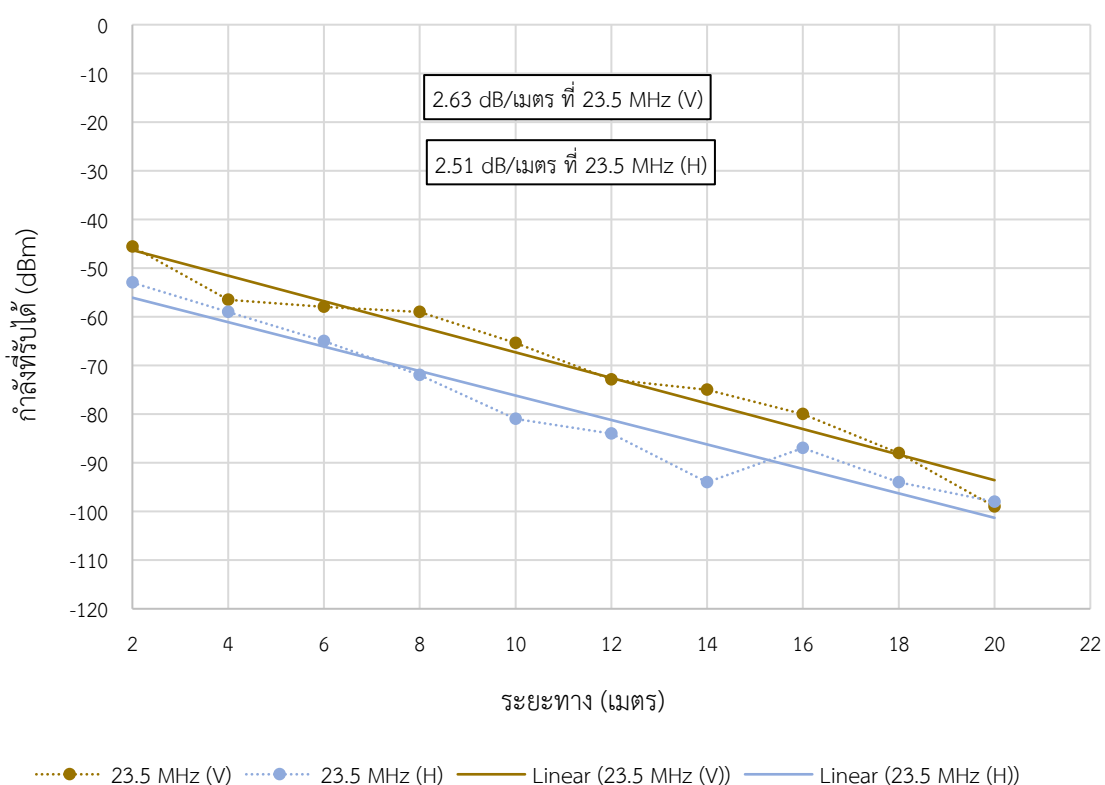
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-47	-55
2	4	-59	-62
3	6	-67	-68
4	8	-66	-76
5	10	-70	-87
6	12	-76	-86
7	14	-80	-86
8	16	-83	-88
9	18	-88	-91
10	20	-100	-100



รูปที่ 21 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 12 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz แบบ LOS

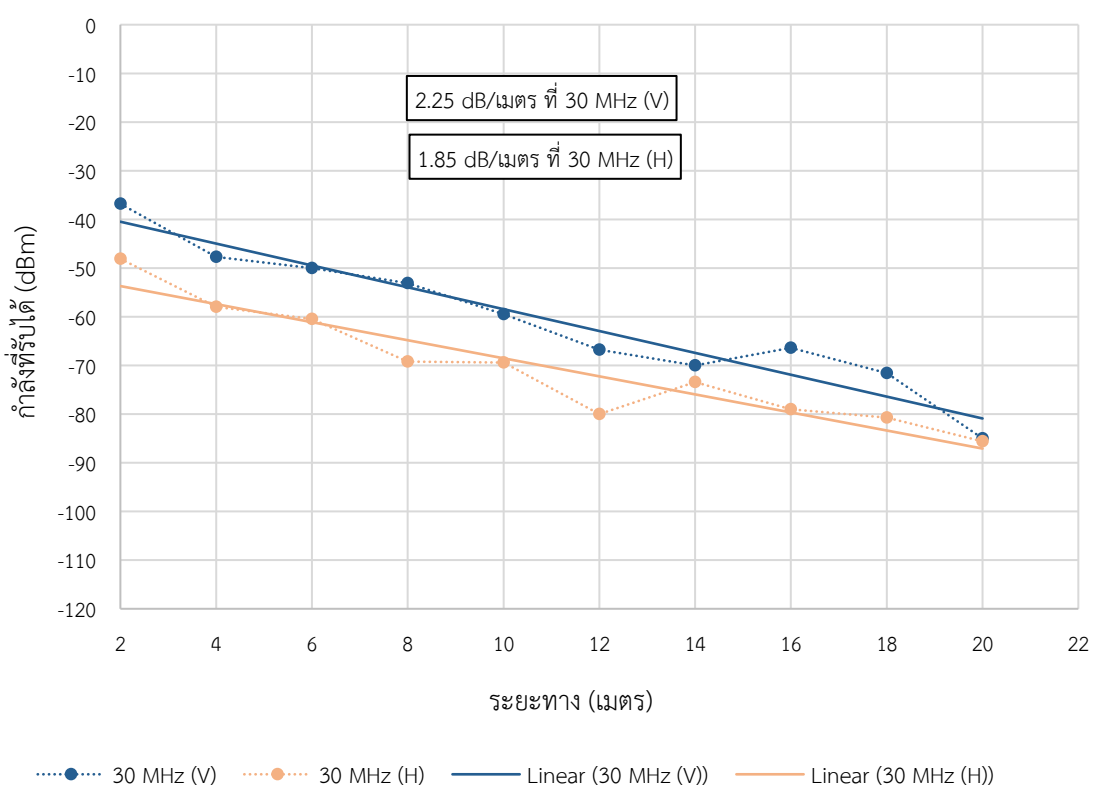
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-45.6	-53
2	4	-56.5	-59
3	6	-58	-65
4	8	-59	-72
5	10	-65.4	-81
6	12	-72.9	-84
7	14	-75	-94
8	16	-80	-87
9	18	-88	-94
10	20	-99	-98



รูปที่ 22 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 13 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz แบบ LOS

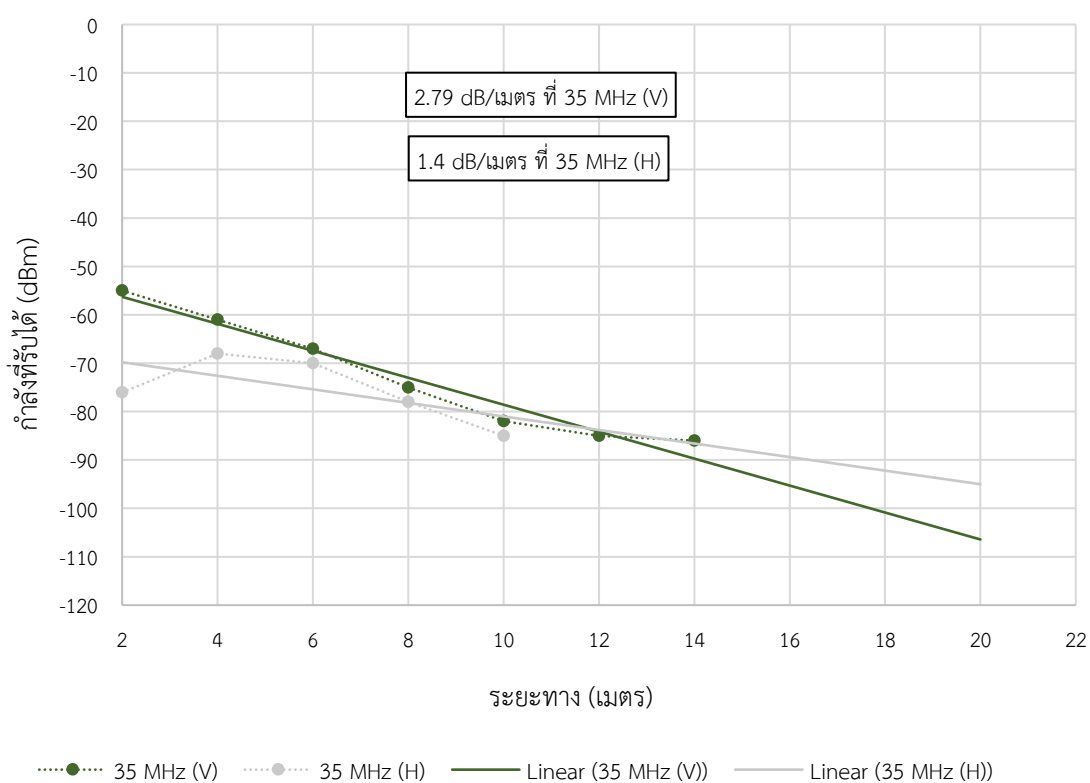
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-36.8	-48.1
2	4	-47.7	-58
3	6	-50	-60.5
4	8	-53.1	-69.2
5	10	-59.5	-69.4
6	12	-66.8	-80
7	14	-70	-73.4
8	16	-66.4	-79
9	18	-71.6	-80.7
10	20	-85	-85.6



รูปที่ 23 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 14 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz แบบ LOS

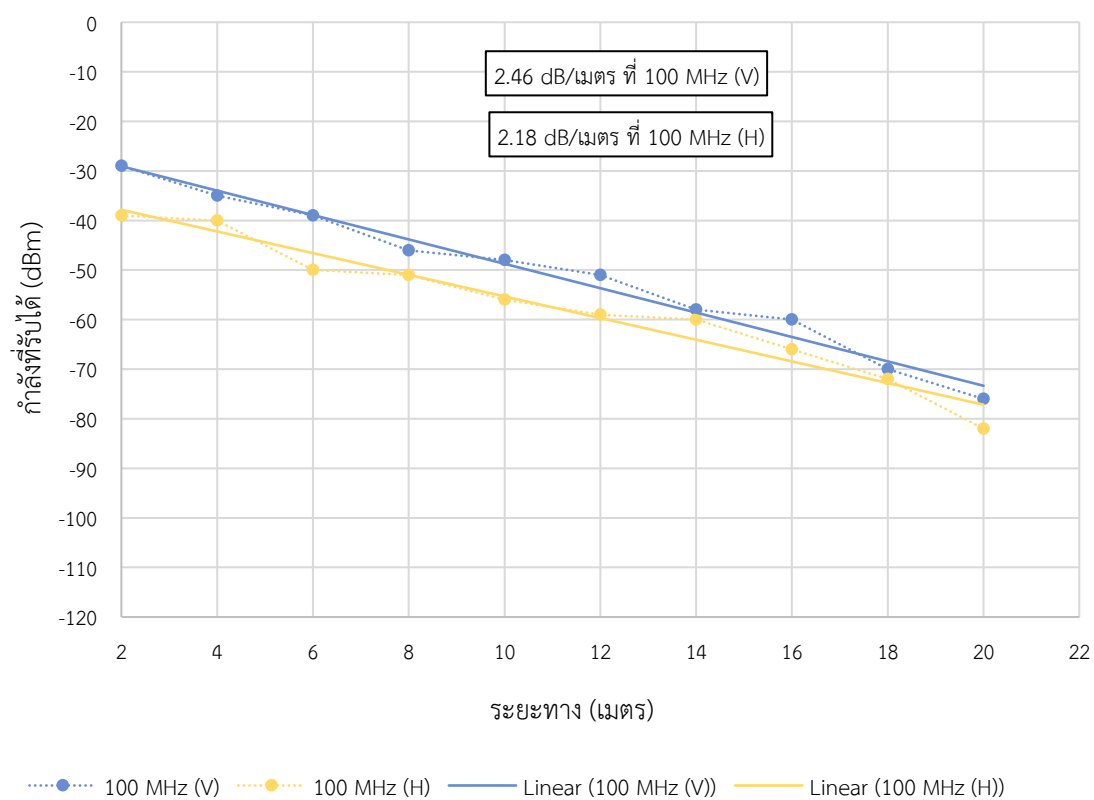
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-55	-76
2	4	-61	-68
3	6	-67	-70
4	8	-75	-78
5	10	-82	-85
6	12	-85	-
7	14	-86	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 24 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 15 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz แบบ LOS

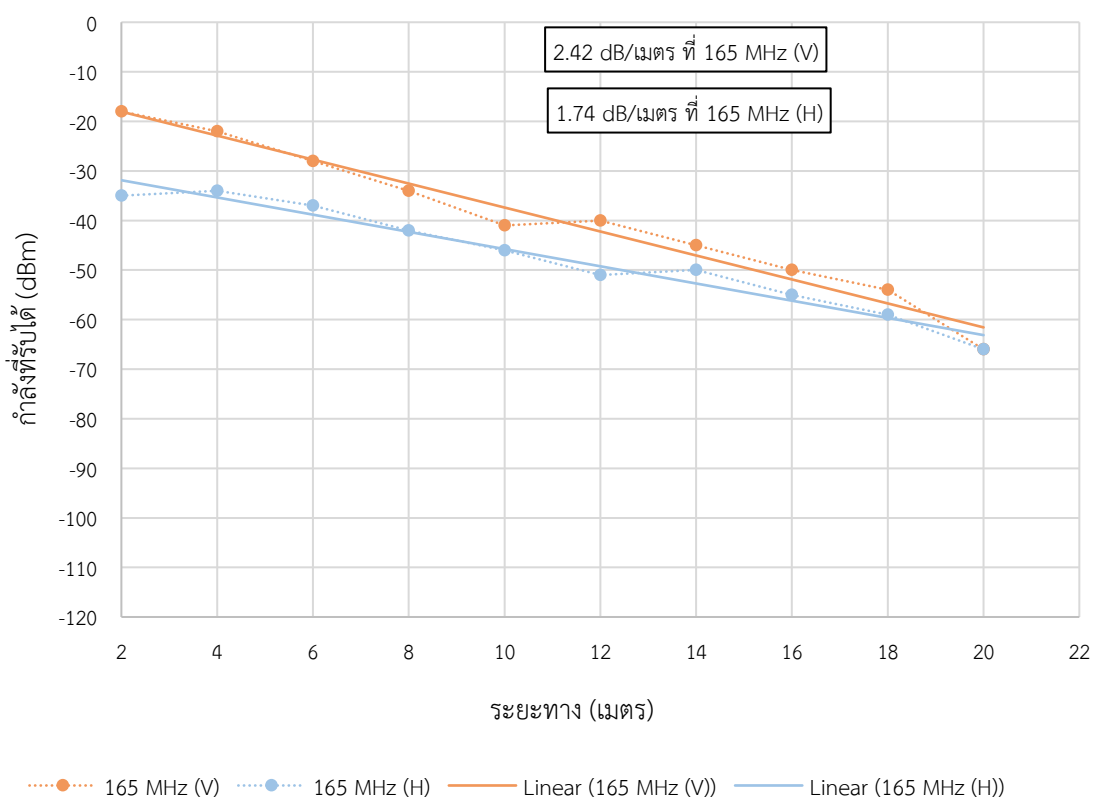
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-29	-39
2	4	-35	-40
3	6	-39	-50
4	8	-46	-51
5	10	-48	-56
6	12	-51	-59
7	14	-58	-60
8	16	-60	-66
9	18	-70	-72
10	20	-76	-82



รูปที่ 25 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 16 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz แบบ LOS

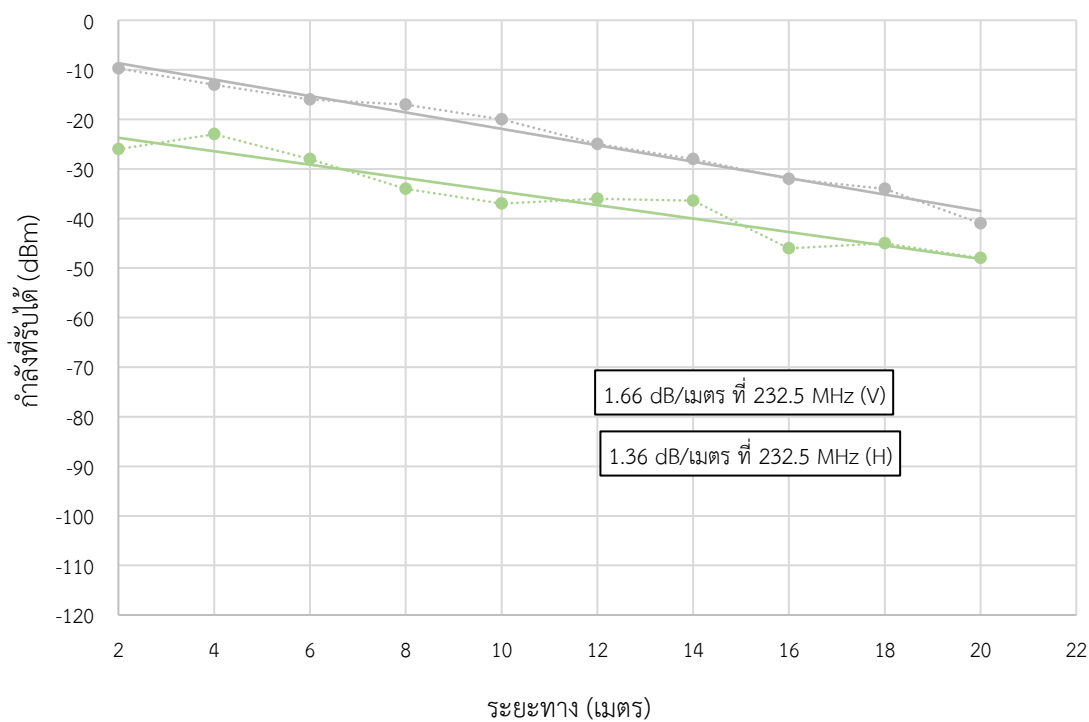
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-18	-35
2	4	-22	-34
3	6	-28	-37
4	8	-34	-42
5	10	-41	-46
6	12	-40	-51
7	14	-45	-50
8	16	-50	-55
9	18	-54	-59
10	20	-66	-66



รูปที่ 26 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 17 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-9.7	-26
2	4	-13	-23
3	6	-16	-28
4	8	-17	-34
5	10	-20	-37
6	12	-25	-36
7	14	-28	-36.4
8	16	-32	-46
9	18	-34	-45
10	20	-41	-48



.....●..... 232.5 MHz (V) ●..... 232.5 MHz (H) ——— Linear (232.5 MHz (V)) ——— Linear (232.5 MHz (H))

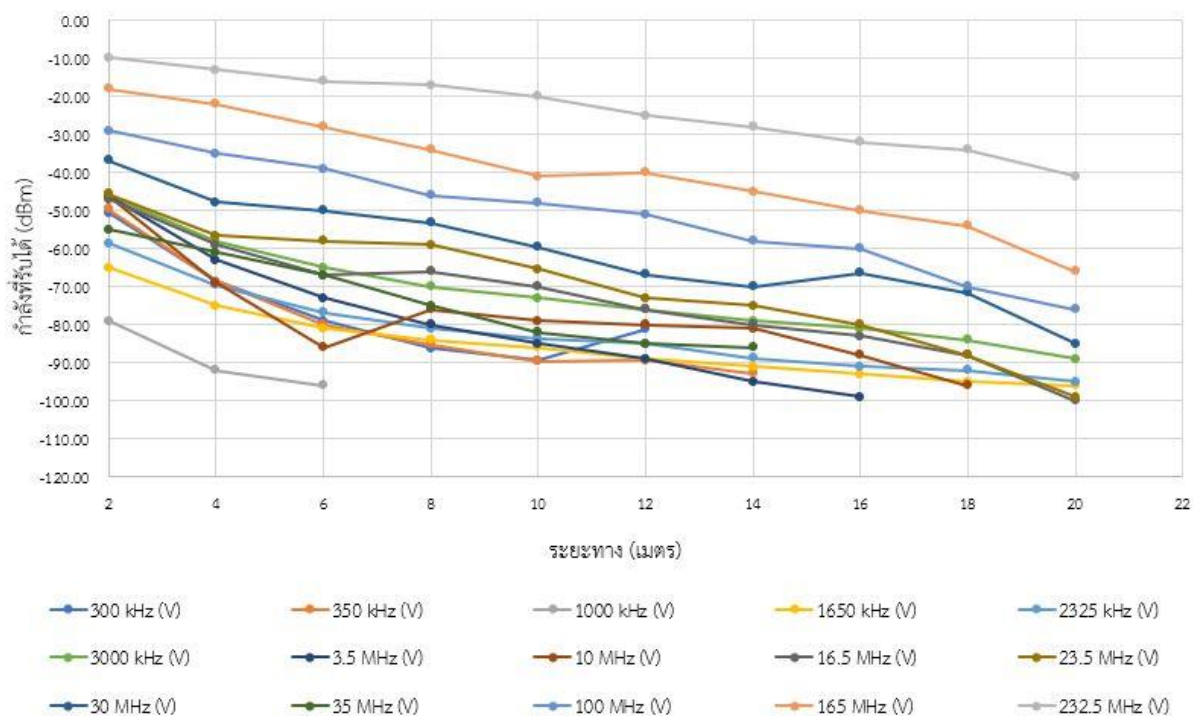
รูปที่ 27 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 5 - 17 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 15 - 27 พบว่าค่ากำลังที่วัดได้ภายในโพรงถ้ำหินปูนยังคงมีแนวโน้มไปตามความลาดเอียงแบบเส้นตรงที่ใช้ในการอ้างอิงกับค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในระยะหนึ่งเมตรเช่นเดียวกัน โดยพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นจากการวัดทดสอบแบบ V-V LOS โดยเรียงลำดับจากความถี่ตั้งแต่ 1000 kHz ถึง 232.5 MHz จำนวน 13 ความถี่ มีค่าเท่ากับ 4.25 dB/m, 1.524 dB/m, 1.76 dB/m, 2.01 dB/m, 3.48 dB/m, 2.09 dB/m, 2.45 dB/m, 2.63 dB/m, 2.25 dB/m, 2.79 dB/m, 2.46 dB/m, 2.42 dB/m และ 1.66 dB/m ตามลำดับ และในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H จะได้ค่ากำลังประมาณ 2.50 dB/m, 1.521 dB/m, 1.98 dB/m, 2.26 dB/m, 1.8 dB/m, 2.25 dB/m, 2.23 dB/m, 2.51 dB/m, 1.85 dB/m, 1.4 dB/m, 2.18 dB/m, 1.74 dB/m และ 1.36 dB/m ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H และไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำหินปูนที่มีสภาพแวดล้อมเดียวกัน เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้นำผลการวัดทดสอบในตาราง 3-17 ในกรณีเฉพาะที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V มาทำการสรุปรวมทุกความถี่ที่ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่งดังแสดงในตารางที่ 18 และรูปที่ 28 และการวัดทดสอบแบบ V-H ได้สรุปไว้ในตารางที่ 19 และรูปที่ 29 ตามลำดับอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 18 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS แต่ละความถี่

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-50.50	-49.50	-79.00	-65.00	-58.50	-46.00	-46	-45.9	-47	-45.6	-36.8	-55	-29	-18	-9.7
2	4	-68.60	-68.60	-92.00	-75.00	-69.60	-58.00	-63	-69	-59	-56.5	-47.7	-61	-35	-22	-13
3	6	-79.10	-80.00	-96.00	-81.00	-76.80	-65.00	-73	-86	-67	-58	-50	-67	-39	-28	-16
4	8	-86.20	-85.30	-	-84.00	-81.00	-70.00	-80	-76	-66	-59	-53.1	-75	-46	-34	-17
5	10	-89.40	-89.70	-	-86.00	-83.70	-73.00	-85	-79	-70	-65.4	-59.5	-82	-48	-41	-20
6	12	-81.20	-89.50	-	-89.00	-85.00	-76.00	-89	-80	-76	-72.9	-66.8	-85	-51	-40	-25
7	14	-	-92.80	-	-91.00	-88.90	-79.00	-95	-81	-80	-75	-70	-86	-58	-45	-28
8	16	-	-	-	-93.00	-91.00	-81.00	-99	-88	-83	-80	-66.4	-	-60	-50	-32
9	18	-	-	-	-95.00	-92.00	-84.00	-	-96	-88	-88	-71.6	-	-70	-54	-34
10	20	-	-	-	-96.00	-95.00	-89.00	-	-	-100	-99	-85	-	-76	-66	-41



รูปที่ 28 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS แต่ละความถี่

จากผลการวัดทดสอบที่พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS ของแต่ละความถี่ดังแสดงในตารางที่ 18 และรูปที่ 28 เมื่อเรียงลำดับจากค่าการสูญเสียการส่งผ่านจากค่าน้อยไปหาค่ามากกว่าพร้อมระบุความถี่ จะเรียงลำดับได้ดังนี้ 1.524 dB/m (1650 kHz), 1.66 dB/m (232.5 MHz), 1.76 dB/m (2325 kHz), 2.01 dB/m (3000 kHz), 2.09 dB/m (10 MHz), 2.25 dB/m (30 MHz), 2.42 dB/m (165 MHz), 2.45 dB/m (16.5 MHz), 2.46 dB/m (100 MHz), 2.63 dB/m (23.5 MHz), 2.79 dB/m (35 MHz), 3.19 dB/m (300 kHz), 3.24 dB/m (350 kHz), 3.48 dB/m (3.5 MHz) และ 4.25 dB/m (1000 kHz) จากผลการวัดทดสอบครั้งนี้ได้แบ่งข้อสังเกตออกเป็น 3 กลุ่มตามลำดับการสูญเสียการส่งผ่านดังนี้

1) ที่ความถี่ 1650 kHz (MF), 232.5 MHz (VHF) และ 2325 kHz (MF) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านอยู่ที่ 1.524 dB/m, 1.66 dB/m และ 1.76 dB/m ตามลำดับ

2) ที่ความถี่ 3000 kHz (MF), 10 MHz (HF), 30 MHz (HF), 165 MHz (VHF), 16.5 MHz (HF), 100 MHz (VHF), 23.5 MHz (HF) และ 35 MHz (VHF) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านอยู่ที่ 2.01 dB/m, 2.09 dB/m, 2.25 dB/m, 2.42 dB/m, 2.45 dB/m, 2.46 dB/m, 2.63 dB/m และ 2.79 dB/m ตามลำดับ

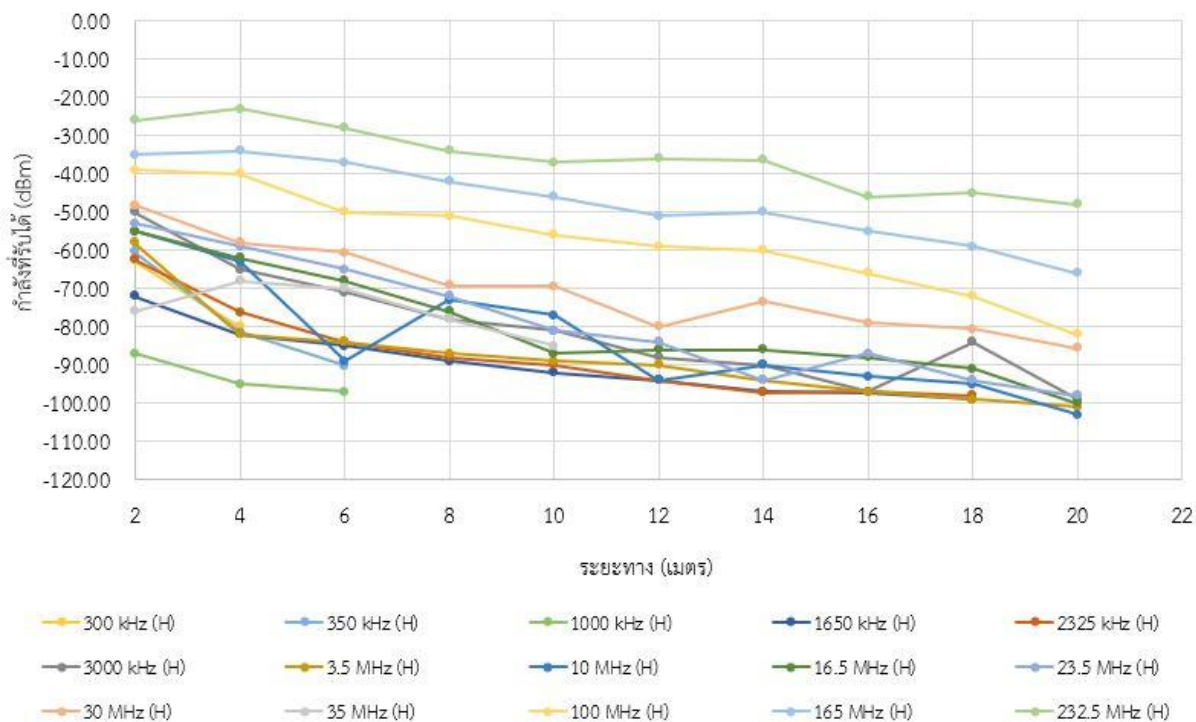
3) ที่ความถี่ 300 kHz (LF), 350 kHz (MF), 3.5 MHz (HF) และ 1000 kHz (MF) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านอยู่ที่ 3.19 dB/m, 3.24 dB/m, 3.48 dB/m และ 4.25 dB/m

จะเห็นว่าตลอดแนวโครงข่ายหิโนนระยะ 20 เมตร ซึ่งมีค่าความชื้นขบแม่เหล็กต่ำ (0.008 – 0.021 md) โกล้เคียงอากาศ และมีค่าความนำของเนื้อหิโนนต่ำ ($0.0020 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) ทำให้พฤติกรรมการแพร่คลื่นตรงหรือแพร่ในอากาศว่าง (Direct wave or Free-space propagation) ของคลื่นแบบ LOS จะสามารถแพร่เข้าไปในโครงข่ายหิโนนได้ง่ายกว่าหิโนนทราญ โดยสังเกตจากการสูญเสียการส่งผ่านในควมถี่สองกลุ่มแรกมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 1.524 dB/m ถึง 1.76 dB/m และ 2.01 dB/m ถึง 2.79 dB/m ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม

ในทางปฏิบัติจริงจะไม่สามารถนำมาใช้ในการส่งรับสัญญาณระยะไกลมากกว่า 200 เมตร นอกจากใช้กำลังส่งขาออก (output power) ของภาคส่งของเครื่องวิทยุสื่อสารค่อนข้างสูง และภาครับต้องออกแบบให้มีความไว (sensitivity) ที่ต่ำมากๆ เนื่องจากระดับสัญญาณรบกวนภายในถ้ำมีค่าสูงกว่าในอากาศว่าง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่ความถี่กลุ่มสามจะเห็นว่าเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านค่อนข้างสูง (แต่ต่ำกว่ากรณีถ้ำหินทราย) เนื่องจากเป็นความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) และ MF ต้นแถบ (350 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิว (Ground waves or Surface wave propagation) ได้ดี จึงมีการซึมซับลงสู่พื้นถ้ำและผนังถ้ำค่อนข้างสูงกว่าความถี่กลุ่มอื่นที่มีความถี่สูงกว่า ยกเว้นที่ความถี่ 3.5 MHz ซึ่งเป็นย่าน HF ต้นแถบ ที่มีผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมของโพรงถ้ำและอาจสอดคล้องกับความยาวคลื่นของความถี่นี้พอดี จนทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นมากกว่าความถี่ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ได้ทำการวัดทดสอบซ้ำแล้วแต่ยังคงให้ผลการทดสอบใกล้เคียงค่าเดิม

ตารางที่ 19 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS แต่ละความถี่

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-62.80	-60.30	-87.00	-72.00	-62.40	-50.00	-58	-55	-55	-53	-48.1	-76	-39	-35	-26
2	4	-80.00	-81.50	-95.00	-82.00	-76.20	-65.00	-82	-63	-62	-59	-58	-68	-40	-34	-23
3	6	-	-90.20	-97.00	-85.00	-84.00	-71.00	-84	-89	-68	-65	-60.5	-70	-50	-37	-28
4	8	-	-	-	-89.00	-88.00	-78.00	-87	-73	-76	-72	-69.2	-78	-51	-42	-34
5	10	-	-	-	-92.00	-90.00	-81.00	-89	-77	-87	-81	-69.4	-85	-56	-46	-37
6	12	-	-	-	-94.00	-94.00	-88.00	-90	-94	-86	-84	-80	-	-59	-51	-36
7	14	-	-	-	-97.00	-97.20	-90.00	-94	-90	-86	-94	-73.4	-	-60	-50	-36.4
8	16	-	-	-	-97.20	-97.00	-97.00	-97	-93	-88	-87	-79	-	-66	-55	-46
9	18	-	-	-	-99.00	-98.00	-84.00	-99	-95	-91	-94	-80.7	-	-72	-59	-45
10	20	-	-	-	-	-	-99.00	-101	-103	-100	-98	-85.6	-	-82	-66	-48



รูปที่ 29 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS แต่ละความถี่

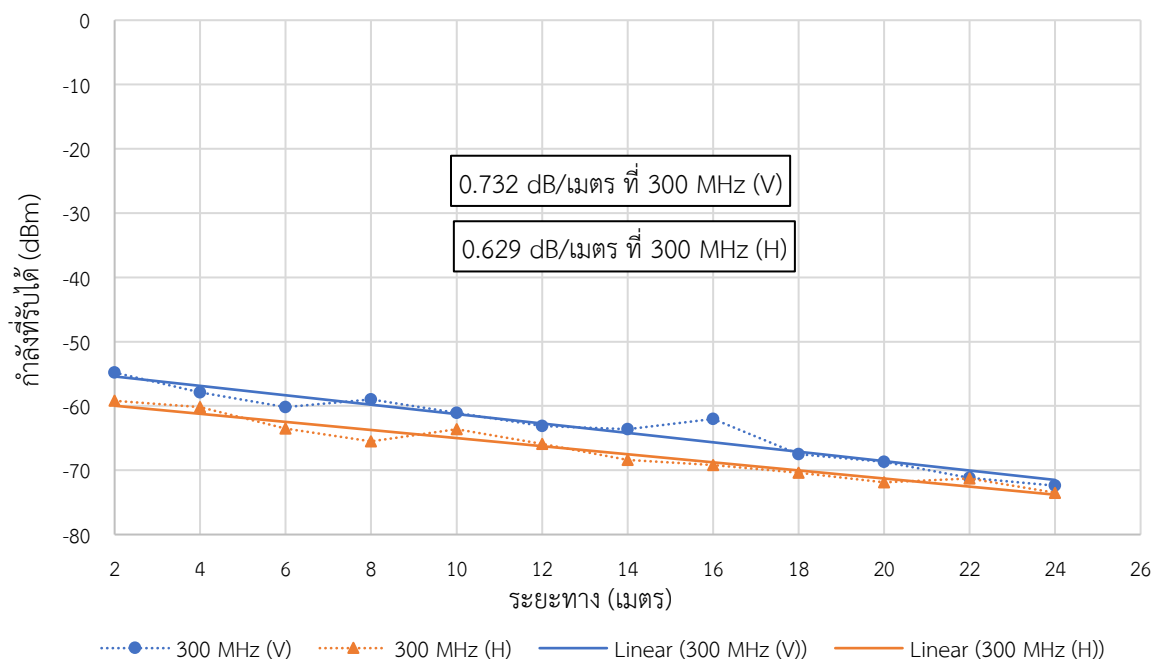
จากผลการวัดทดสอบที่พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS ของแต่ละความถี่ดังแสดงในตารางที่ 19 และรูปที่ 29 เมื่อเรียงลำดับจากค่าการสูญเสียการส่งผ่านจากค่าน้อยไปหาค่ามากกว่าพร้อมระบุความถี่ จะเรียงลำดับได้ดังนี้ 1.36 dB/m (232.5 MHz), 1.4 dB/m (35 MHz), 1.521 dB/m (1650 kHz), 1.74 dB/m (165 MHz), 1.8 dB/m (3.5 MHz) 1.85 dB/m (30 MHz), 1.98 dB/m (2325 kHz), 2.18 dB/m (100 MHz), 2.23 dB/m (16.5 MHz), 2.25 dB/m (10 MHz), 2.26 dB/m (3000 kHz), 2.50 dB/m (1000 kHz), 2.51 dB/m (23.5 MHz), 7.48 dB/m (350 kHz) และ 8.6 dB/m (300 kHz) จากผลการวัดทดสอบและการคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านพบว่าที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz ยังคงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V และค่ามีการสูญเสียการส่งผ่านฯ สูงขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากการโพลาไรซ์แนวนอนที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเลี้ยวเบนของคลื่นที่กระทบกับสิ่งแวดล้อมมีทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าขนานกับพื้นถ้าทำให้เกิดการลัดวงจรกับพื้นถ้าและถูกซึมซาบลงสู่พื้นมากขึ้น ซึ่งมีความน่าสนใจมากในกรณีที่มีความจำเป็นต้องส่งคลื่นความถี่กลุ่มนี้จากภายนอกถ้าผ่านเนื้อหินปูนลงสู่โพรงถ้า ส่วนความถี่กลุ่มที่นอกเหนือจากสองความถี่นี้ยังคงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V แต่มีข้อสังเกตคือ มีจำนวนถึง 8 ความถี่ที่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงจากเดิม ได้แก่ ความถี่ 3.5 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ซึ่งเป็นกลุ่มความถี่ย่าน HF และ VHF โดยตั้งสมมุติฐานว่าอาจเกิดจากการสะท้อนของคลื่นที่ตกกระทบกับสิ่งกีดขวางในโพรงถ้าที่มีมุมเอียงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์จากแนวตั้งไปเป็นแนวนอน ส่งผลให้การวัดแบบ V-H มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังที่รับได้จากตารางที่ 18

และ 19 จะได้ข้อสรุปว่าการส่งรับคลื่นในทุกย่านความถี่ด้วยการโพลาไรซ์แบบ V-V ในภาพรวมยังคงให้ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้สูงกว่าแบบ V-H อย่างแน่นอน

ผลการวัดทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ย่าน UHF ที่ความถี่ 300 MHz, 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ได้จากการดำเนินการในภาคสนามเป็นครั้งแรกก่อนที่จะดำเนินการในย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF ตามที่ได้นำเสนอผลในตารางและรูปภาพทั้งหมดที่ผ่านมาซึ่งเวลาขณะนั้นสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับในย่านความถี่ UHF ยังไม่ถูกส่งเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบและสร้างสายอากาศควอเตอร์เวฟโมโนโพลกราวด์เพลนทั้ง 6 ความถี่ขึ้นมาใช้งานทดแทน ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสายอากาศทั้งหมดผ่านการวัดทดสอบคุณสมบัติด้านการเรโซแนนซ์ความถี่และอัตราขยายในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยก่อนนำมาใช้งานจริงในภาคสนาม ด้วยคุณสมบัติของสายอากาศที่ถูกออกแบบให้ทำงานได้ดีเฉพาะความถี่ที่กำหนดและถูกป้อนด้วยกำลังส่งของแต่ละความถี่เท่ากับ +20 dBm หรือ 100 มิลลิวัตต์ (เท่ากับกรณีของสายอากาศแถบกว้างที่ใช้ในการวัดทดสอบคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VHF) จะเห็นว่าค่ากำลังของสัญญาณที่สายอากาศภาครับสามารถรับได้ที่ตำแหน่งสองเมตรแรกจะมีค่าสูงกว่าในกรณีของย่านความถี่ที่ต่ำกว่าได้อย่างชัดเจน จึงได้ขยายระยะทางวัดทดสอบออกไปอีกเป็น 24 เมตร อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุในถ้ำของโครงการนี้ได้สนใจเฉพาะค่าการสูญเสียการส่งผ่านๆ ต่อระยะทางหนึ่งเมตร ดังนั้นไม่ว่าระดับของกำลังคลื่นวิทยุแต่ละความถี่ที่แผ่ออกมาจากสายอากาศ (EIRP) จะมีค่าแตกต่างกัน จึงไม่มีผลต่อการคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านๆ ต่อระยะทางหนึ่งเมตรที่ต้องการ

ตารางที่ 20 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-54.8	-59.2
2	4	-57.9	-60.2
3	6	-60.2	-63.5
4	8	-59	-65.5
5	10	-61.1	-63.6
6	12	-63.1	-65.9
7	14	-63.6	-68.4
8	16	-62	-69.2
9	18	-67.5	-70.4
10	20	-68.7	-71.9
11	22	-71.2	-71.3
12	24	-72.4	-73.5



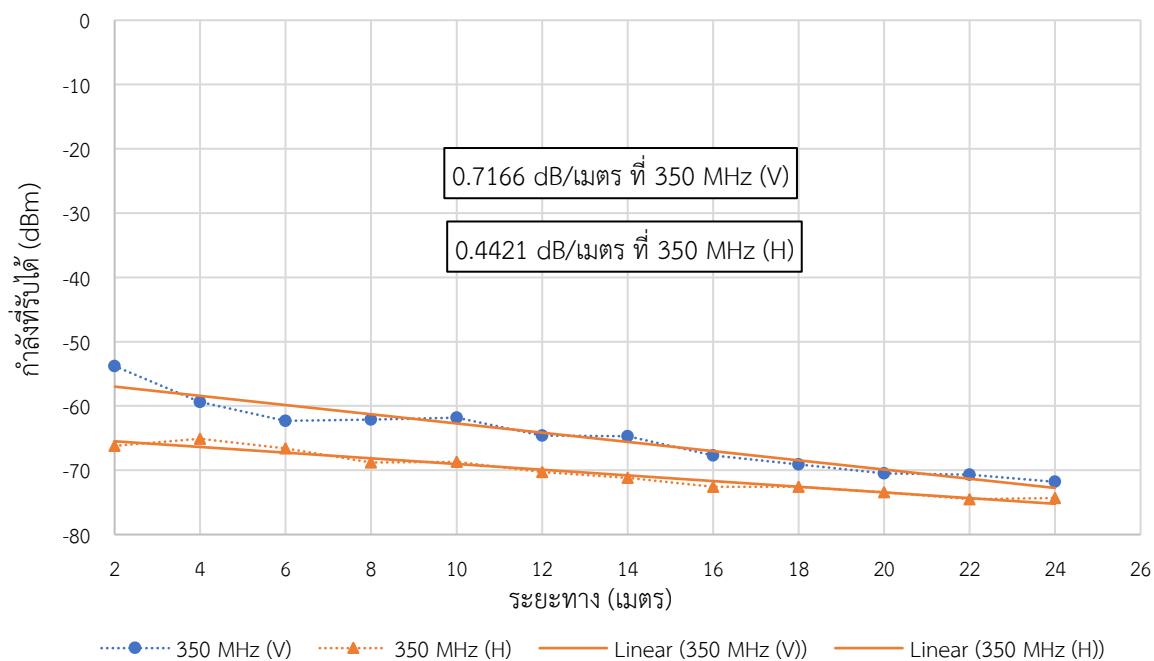
รูปที่ 30 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ในโพรงถ้ำตามระยะทางแบบ LOS ที่มีหิ้งงอกหินย้อยกีดขวางน้อยที่สุดได้ถูกพล็อตในรูปที่ 30 การวัดทดสอบดำเนินการที่ระยะห่างครึ่งละ 2 เมตรระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับจนถึงระยะสุดท้ายที่ 24 เมตร เช่นเดียวกันทุกความถี่ โดยค่า EIRP ที่ส่งออกจากสายอากาศภาคส่งซึ่งได้ทำการวัดทดสอบที่ระยะ 2.7 เมตร ภายในห้องปราศจากการสะท้อนของห้องปฏิบัติการสายอากาศของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ทุกความถี่ได้มีการปรับตั้งให้มีค่าเท่ากันทั้งหมดที่ -29.9 dBm โดยการใช้สายอากาศภาครับแบบแถบกว้างที่มีค่าอัตราขยายแตกต่างกันในแต่ละความถี่เป็นตัวรับสัญญาณ ดังนั้นค่า EIRP ที่ใช้อ้างอิงเริ่มต้นดังกล่าวจะเป็นค่าที่มีการหักออกของค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ (transmission line loss) และชดเชยค่าอัตราขยายของสายอากาศของทางฝั่งสายอากาศภาครับไว้ทั้งหมดแล้ว ดังนั้นค่ากำลังที่วัดได้จากสายอากาศภาครับผ่านสายนำสัญญาณจนไปถึงอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแถบความถี่ที่วัดได้จะสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมของคลื่นแต่ละความถี่ที่เดินทางในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติที่เสมือนเป็นค่าคงที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น หากพิจารณาการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นความถี่ 300 MHz ในรูปที่ 30 จะเห็นว่าความลาดเอียงแบบเส้นตรง (linear line) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง (free space) ที่ปกติ ค่อนข้างจะชันทับบนตำแหน่งของค่ากำลังที่เกิดการสูญเสียในแต่ละระยะ 2 เมตร ที่ได้วัดทดสอบภายในโพรงถ้ำดังกล่าว และเมื่อนำมาคำนวณในรูปของค่าความลาดชันของการสูญเสียในเส้นทาง (path loss slope) การเดินทางของคลื่น จะได้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นความถี่ 300 MHz ในกรณีแบบ V-V LOS ประมาณ 0.732 dB/m (decibel/meter) และประมาณ 0.629 dB/m ในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H อย่างไรก็ตามค่าตัวเลขการสูญเสียนี้นับเป็นค่าที่มีการสูญเสียต่ำสุดอย่างเดียวไม่ได้ แต่จะต้องพิจารณาค่ากำลังที่รับได้ระหว่าง V-V และ V-H ในแต่ละระยะ 2 เมตรด้วยว่าค่าใดมีค่ากำลังสูงกว่ากัน ดังนั้นจากรูปที่ 30 จึงต้องสรุปเพิ่มเติมด้วยการส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H แม้ว่าจะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรต่ำกว่าแบบ V-V ก็ตาม และสามารถสรุปได้ว่าจะไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่น

ความถี่ 300 MHz ภายในโพรงถ้ำหินปูนที่ใกล้เคียงแนวเส้นตรงและไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างทางเดินในโพรงถ้ำหินปูน อย่างไรก็ตามพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวที่ความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz จะมีลักษณะที่คล้ายกัน ในที่นี้จึงขอรายงานผลในรูปของตารางและรูปภาพต่อเนื่องจนครบทุกความถี่และอภิปรายผลการวัดทดสอบเพียงครั้งเดียว

ตารางที่ 21 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz แบบ LOS

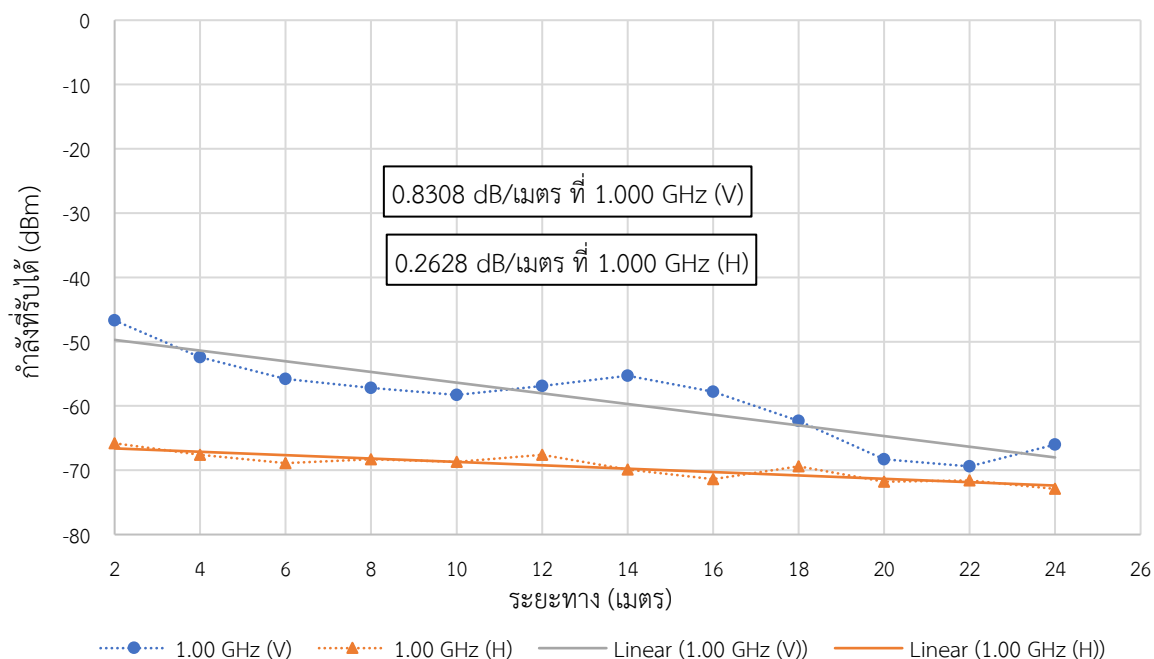
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-53.8	-66.2
2	4	-59.4	-65.1
3	6	-62.3	-66.6
4	8	-62.1	-68.8
5	10	-61.8	-68.7
6	12	-64.6	-70.3
7	14	-64.7	-71.2
8	16	-67.7	-72.6
9	18	-69.1	-72.6
10	20	-70.5	-73.4
11	22	-70.7	-74.5
12	24	-71.8	-74.3



รูปที่ 31 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 22 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz แบบ LOS

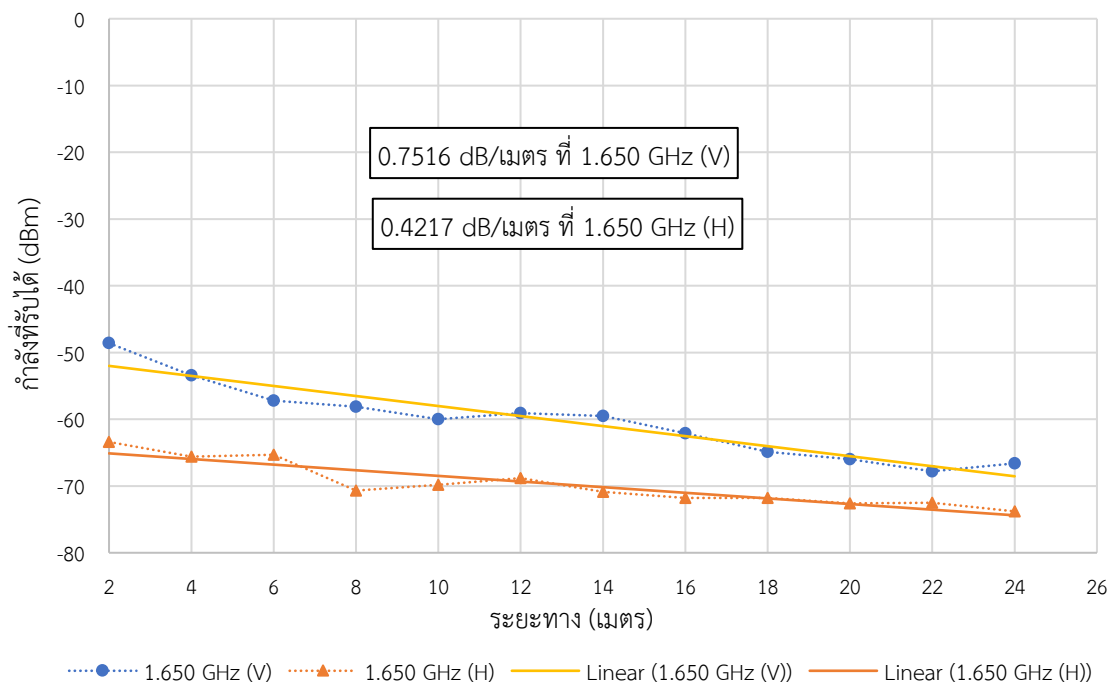
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46.7	-65.8
2	4	-52.4	-67.6
3	6	-55.8	-68.9
4	8	-57.2	-68.3
5	10	-58.3	-68.7
6	12	-56.9	-67.6
7	14	-55.3	-69.9
8	16	-57.8	-71.4
9	18	-62.3	-69.4
10	20	-68.3	-71.8
11	22	-69.4	-71.6
12	24	-66	-72.9



รูปที่ 32 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 23 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz แบบ LOS

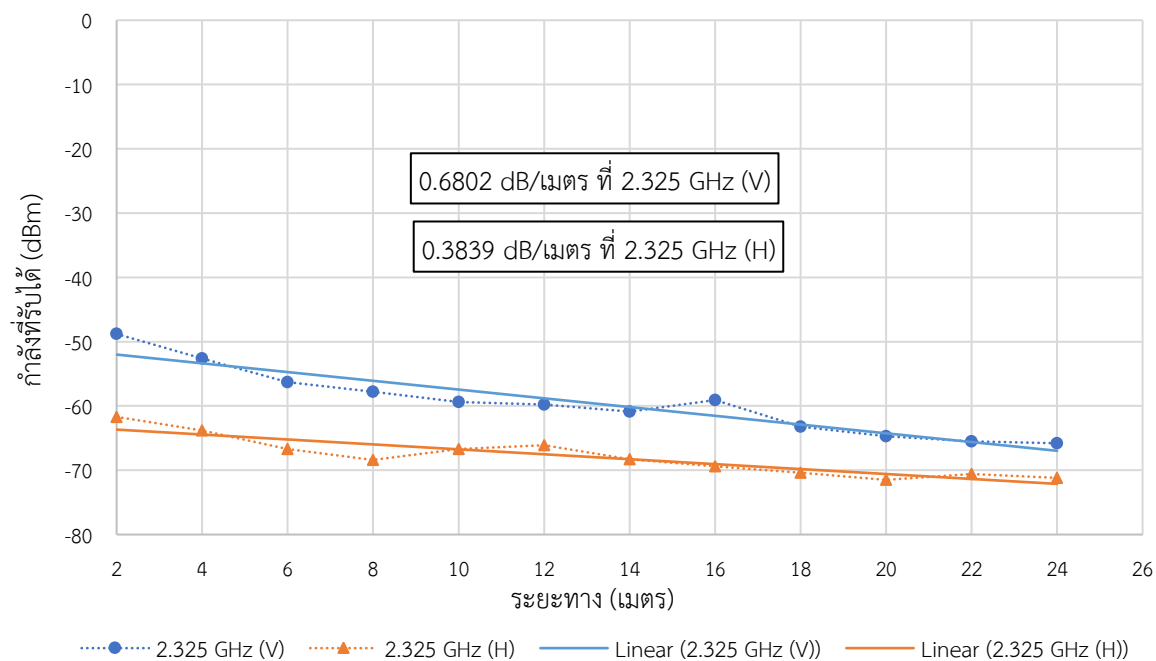
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-48.6	-63.4
2	4	-53.4	-65.6
3	6	-57.2	-65.3
4	8	-58.1	-70.7
5	10	-60	-69.8
6	12	-59.1	-68.8
7	14	-59.5	-70.9
8	16	-62.1	-71.8
9	18	-64.9	-71.8
10	20	-66	-72.6
11	22	-67.8	-72.5
12	24	-66.6	-73.8



รูปที่ 33 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 24 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz แบบ LOS

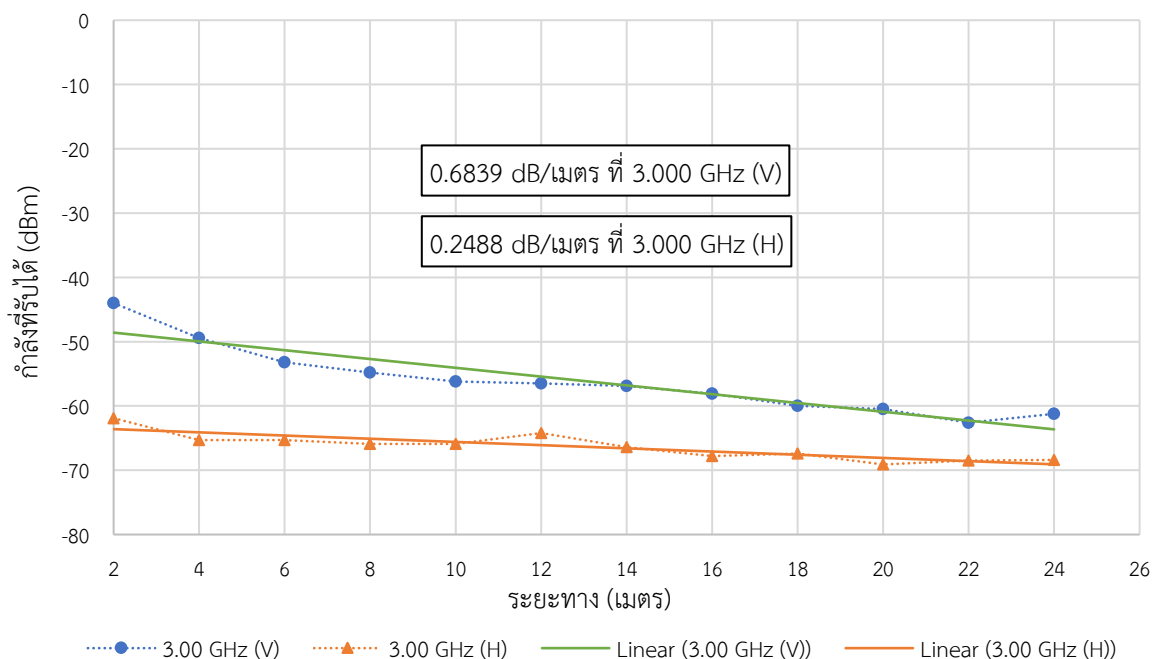
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-48.8	-61.7
2	4	-52.6	-63.8
3	6	-56.3	-66.7
4	8	-57.8	-68.4
5	10	-59.4	-66.7
6	12	-59.8	-66.1
7	14	-60.9	-68.3
8	16	-59.1	-69.4
9	18	-63.2	-70.4
10	20	-64.7	-71.5
11	22	-65.5	-70.6
12	24	-65.8	-71.2



รูปที่ 34 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 25 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-44	-61.9
2	4	-49.4	-65.3
3	6	-53.2	-65.3
4	8	-54.8	-65.9
5	10	-56.2	-65.9
6	12	-56.5	-64.2
7	14	-56.9	-66.4
8	16	-58.1	-67.8
9	18	-60	-67.4
10	20	-60.5	-69.1
11	22	-62.6	-68.5
12	24	-61.2	-68.4

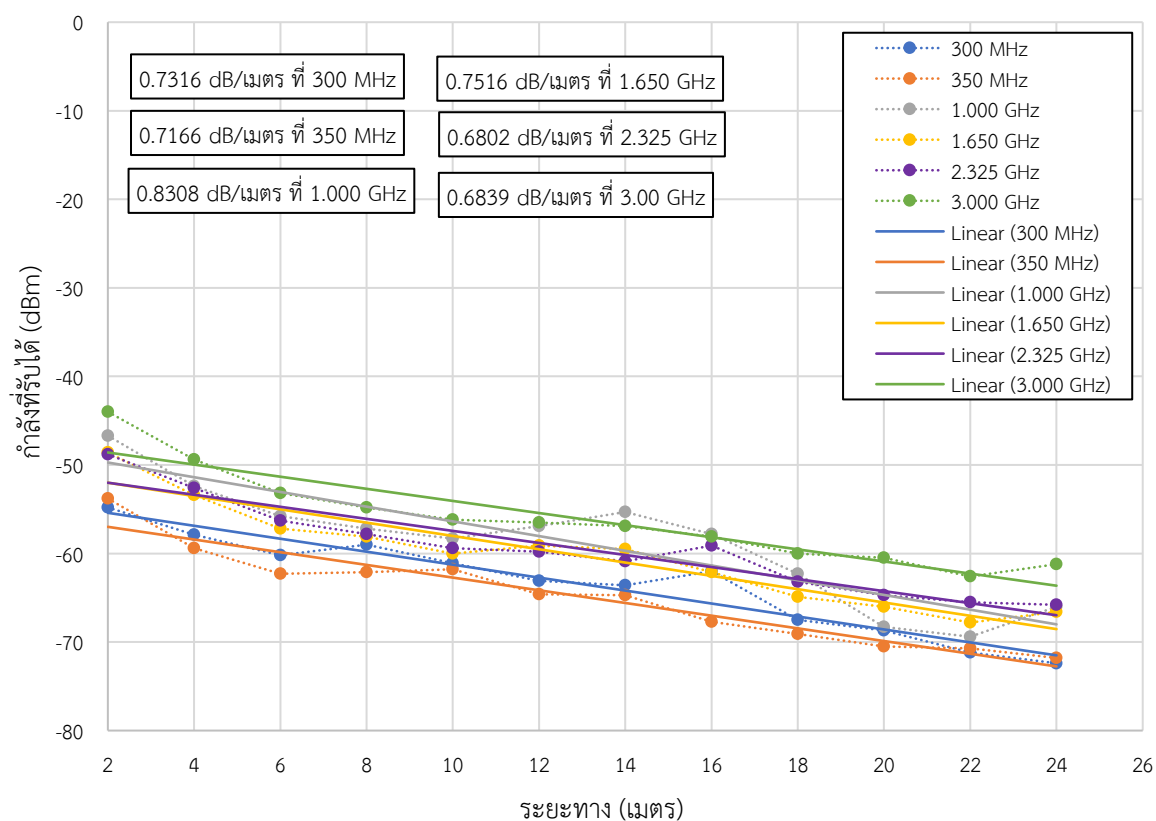


รูปที่ 35 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 21 - 25 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ดังแสดงในรูปที่ 31 - 35 พบว่าค่ากำลังที่วัดได้ภายในโพรงถ้ำหินปูนยังคงมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความลาดเอียงแบบเส้นตรงซึ่งเป็นค่าที่คำนวณในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศสว่างที่เกิดการสูญเสียในแต่ละระยะ 2 เมตรเช่นเดิม และเมื่อนำมาคำนวณในรูปของค่าความลาดชันของการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่น จะได้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นความถี่กรณีแบบ V-V LOS ประมาณ 0.7166 dB/m, 0.8308 dB/m, 0.7516 dB/m, 0.6802 dB/m, 0.6839 dB/m และในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H จะได้ค่ากำลังประมาณ 0.629 dB/m, 0.2628 dB/m, 0.4217 dB/m, 0.3839 dB/m, 0.2488 dB/m ที่ความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H และไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำหินปูนที่มีสภาพแวดล้อมเหมือนกัน เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้นำผลการวัดทดสอบในตารางที่ 20 - 25 ในกรณีเฉพาะที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V มาทำการสรุปรวมทุกความถี่ที่ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 26 และรูปที่ 36 สำหรับกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H ได้แสดงไว้ในตารางที่ 27 และรูปที่ 37 ตามลำดับ

ตารางที่ 26 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1 GHz (dBm)	1.650 GHz (dBm)	2.325 GHz (dBm)	3 GHz (dBm)
1	2	-54.8	-53.8	-46.7	-48.6	-48.8	-44
2	4	-57.9	-59.4	-52.4	-53.4	-52.6	-49.4
3	6	-60.2	-62.3	-55.8	-57.2	-56.3	-53.2
4	8	-59	-62.1	-57.2	-58.1	-57.8	-54.8
5	10	-61.1	-61.8	-58.3	-60	-59.4	-56.2
6	12	-63.1	-64.6	-56.9	-59.1	-59.8	-56.5
7	14	-63.6	-64.7	-55.3	-59.5	-60.9	-56.9
8	16	-62	-67.7	-57.8	-62.1	-59.1	-58.1
9	18	-67.5	-69.1	-62.3	-64.9	-63.2	-60
10	20	-68.7	-70.5	-68.3	-66	-64.7	-60.5
11	22	-71.2	-70.7	-69.4	-67.8	-65.5	-62.6
12	24	-72.4	-71.8	-66	-66.6	-65.8	-61.2

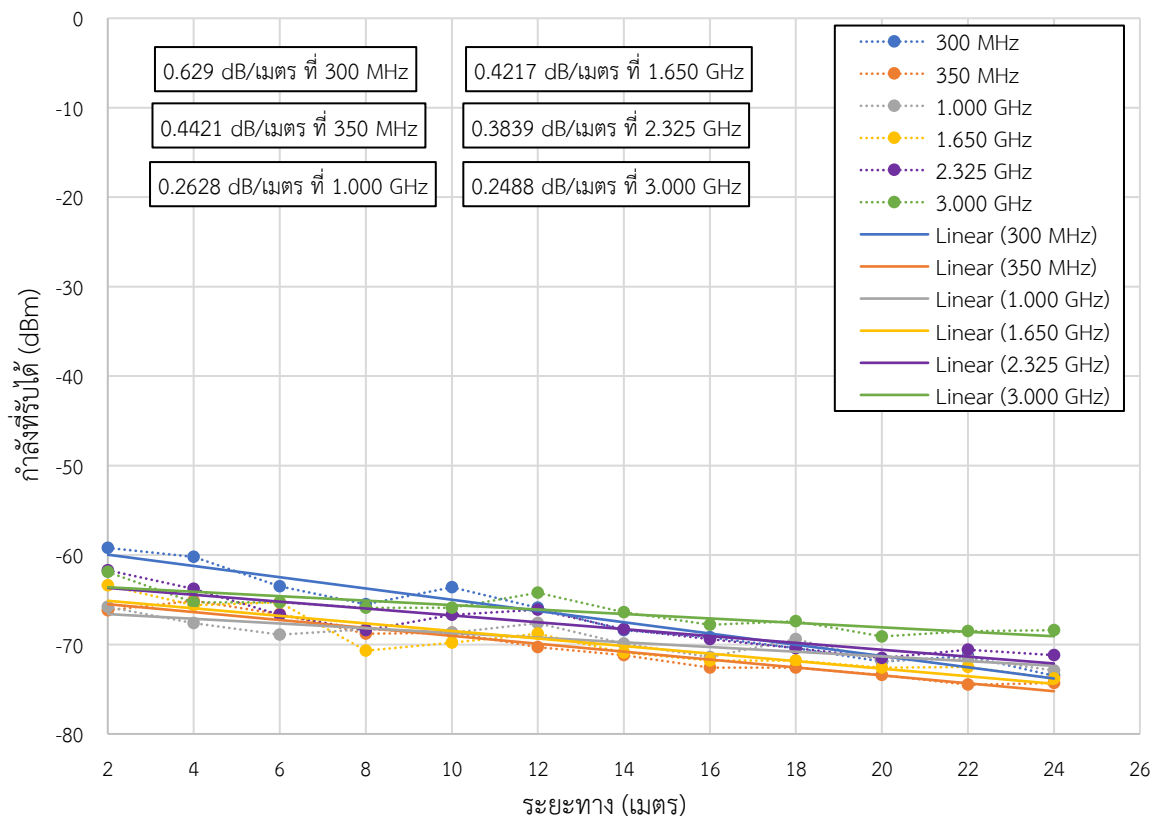


รูปที่ 36 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS

จากผลการวัดทดสอบที่พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS ของแต่ละความถี่ดังแสดงในรูปที่ 36 เมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ เท่ากับ 0.7316 dB/m @300 MHz, 0.7166 dB/m @350 MHz, 0.8308 dB/m @1000 MHz, 0.7516 dB/m @1650 MHz, 0.6802 dB/m @2325 MHz และ 0.6839 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ จากข้อมูลผลการวัดทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่มีความถี่ต่ำกว่าจะรองรับโหมดการกระจายพลังงานลงสู่ชั้นหินและชั้นดินที่อยู่ล้อมรอบโพรงถ้ำหินปูนนี้ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพมากกว่าความถี่สูง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความถี่ในการวัดทดสอบที่สูงขึ้นจะปรากฏการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นในเส้นทางแบบ LOS ของโพรงถ้ำมีค่าลดต่ำลง ซึ่งมีสาเหตุจากเกิดการสะสมกักเก็บพลังงานไว้ภายในโพรงถ้ำมากขึ้นและเกิดการส่งผ่านด้วยการสะท้อนผนังโพรงถ้ำไปยังปลายทางที่ทำการวัดทดสอบได้ดีกว่า

ตารางที่ 27 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1 GHz (dBm)	1.650 GHz (dBm)	2.325 GHz (dBm)	3 GHz (dBm)
1	2	-59.2	-66.2	-65.8	-63.4	-61.7	-61.9
2	4	-60.2	-65.1	-67.6	-65.6	-63.8	-65.3
3	6	-63.5	-66.6	-68.9	-65.3	-66.7	-65.3
4	8	-65.5	-68.8	-68.3	-70.7	-68.4	-65.9
5	10	-63.6	-68.7	-68.7	-69.8	-66.7	-65.9
6	12	-65.9	-70.3	-67.6	-68.8	-66.1	-64.2
7	14	-68.4	-71.2	-69.9	-70.9	-68.3	-66.4
8	16	-69.2	-72.6	-71.4	-71.8	-69.4	-67.8
9	18	-70.4	-72.6	-69.4	-71.8	-70.4	-67.4
10	20	-71.9	-73.4	-71.8	-72.6	-71.5	-69.1
11	22	-71.3	-74.5	-71.6	-72.5	-70.6	-68.5
12	24	-73.5	-74.3	-72.9	-73.8	-71.2	-68.4

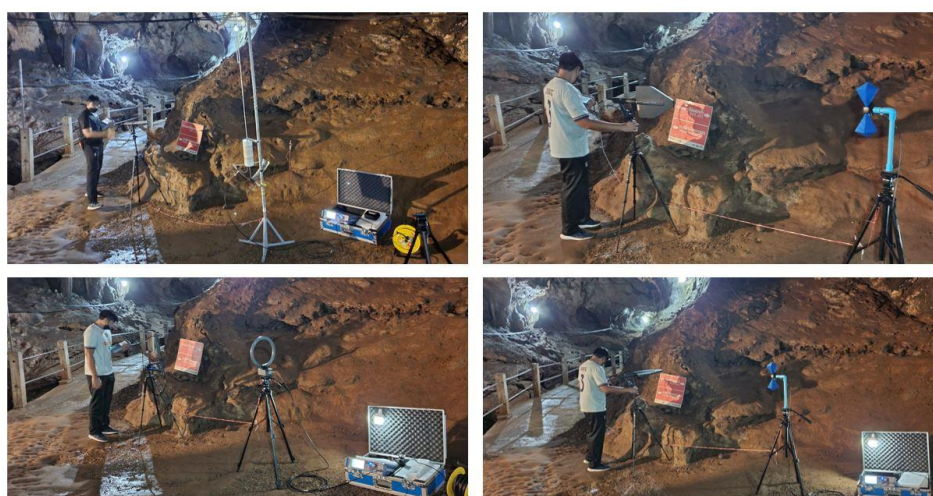


รูปที่ 37 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H LOS

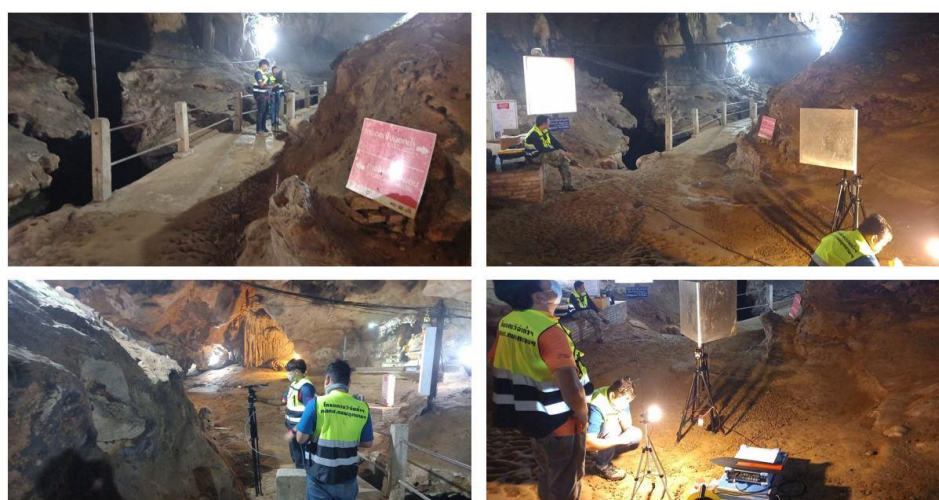
อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS ของแต่ละความถี่มาแสดงเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 37 จะเห็นว่าพฤติกรรมของคลื่นในเรื่องของการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการวัดทดสอบแบบ V-V LOS คือมีการสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.629 dB/m @300 MHz, 0.4421 dB/m @350 MHz, 0.2628 dB/m @1000 MHz, 0.4217 dB/m @1650 MHz, 0.3839 dB/m @2325 MHz และ 0.2488 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตอยู่สองประเด็นคือ พบว่าที่ความถี่ 300 MHz ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดของการวัดทดสอบความถี่ย่าน UHF ชุดนี้ หากส่งกำลังด้วยการโพลาไรซ์แนวตั้งและรับกำลังด้วยสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบแนวนอนจะเกิดการสูญเสียเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะต้นทางกับปลายทางมากกว่าความถี่อื่น และข้อสังเกตที่สองก็คือ กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อสายอากาศภาครับมีการโพลาไรซ์แบบแนวนอนจะมีระดับความชันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง และมีระดับของค่ากำลังที่ระยะไกลสุดที่ 24 เมตร มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละความถี่ที่ทดสอบ จึงอาจเป็นข้อสมมุติฐานอีกประการหนึ่งในการออกแบบสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับของโครงการวิจัยนี้ว่าจะเลือกการโพลาไรซ์เป็นแบบใดจึงจะมีความเหมาะสมที่สุด

2) การวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา (NLOS)

การวัดทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่คลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา หรือ NLOS นั้น ทางผู้วิจัยได้เลือกลักษณะของโพรงถ้ำที่เป็นแนวโค้งคล้ายรูปตัวแอล (L-bend) ที่ปรากฏอย่างชัดเจนว่ามีส่วนโค้งของผนังทำมาเป็นอุปสรรคขัดขวางการเดินทางของคลื่นทุกความถี่เดิมที่ถูกกำหนดขึ้นมาตั้งแต่แรก ดังแสดงในรูปที่ 38 และ 39 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของคลื่นความถี่วิทยุแต่ละความถี่เมื่อถูกส่งผ่านไปโพรงถ้ำที่มีทิศทางไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงโดยสังเกตจากการสูญเสียการส่งผ่านจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับตามแนวโค้งของโพรงถ้ำครึ่งละ 2 เมตรจนกระทั่งไม่สามารถรับสัญญาณได้เลย ในการวัดทดสอบรูปแบบ NLOS นี้ได้ทำการวัดทดสอบทั้งแบบ V-V และ V-H เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นแต่ละความถี่ไปในคราวเดียวกัน



รูปที่ 38 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ NLOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF ภายในถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่

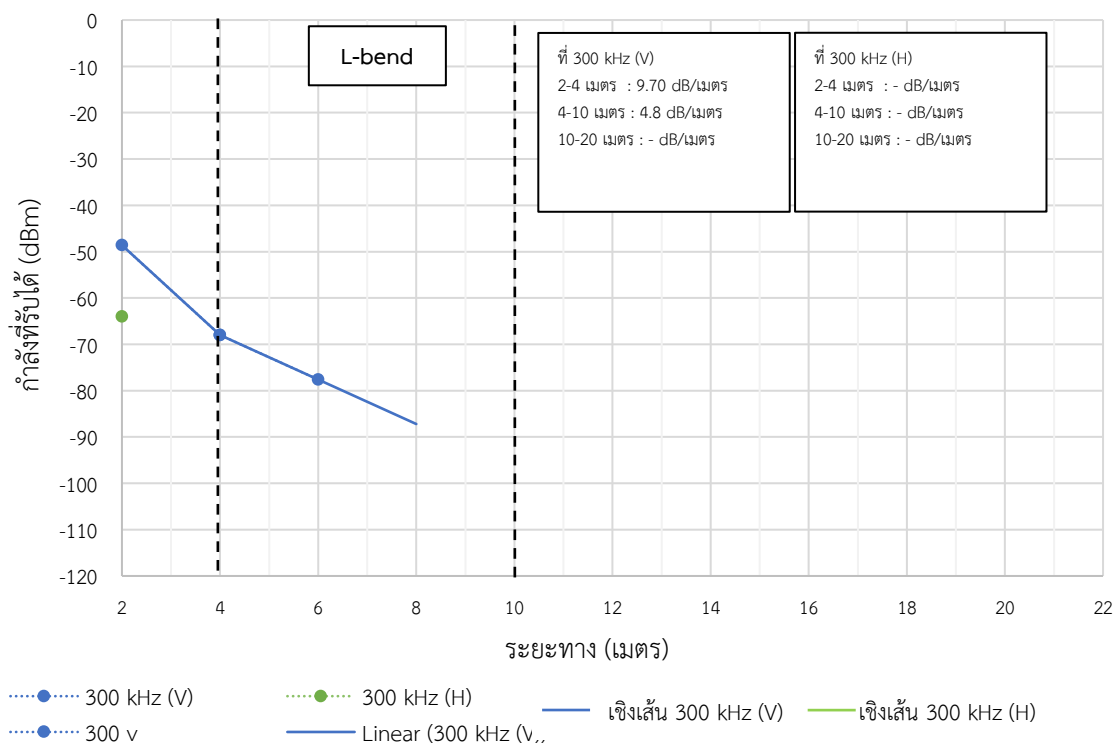


รูปที่ 39 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ NLOS ย่านความถี่ UHF ภายในถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่

ในการวัดทดสอบแบบ NLOS ตลอดความโค้งของโพรงถ้ำยังคงต้องใช้กำลังส่งขาออกของเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุอยู่ที่ +20 dBm ในทุกย่านความถี่เหมือนกับการวัดทดสอบแบบ LOS โดยใช้การโพลาไรซ์ทั้งแบบ V-V และ V-H และเริ่มต้นวัดทดสอบที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับเท่ากับ 2 เมตร แล้วเพิ่มระยะขึ้นไปอีกครั้งละ 2 เมตร จนถึงตำแหน่งสุดท้ายที่สายอากาศภาครับและเครื่องมือวิเคราะห์แถบสเปกตรัมความถี่ไม่สามารถวัดสัญญาณได้ โดยใช้วิธีการวัดทดสอบที่ได้เคยแสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยผลการวัดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 28 – 42 และกราฟแสดงผลในรูปที่ 40 – 54

ตารางที่ 28 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz แบบ NLOS

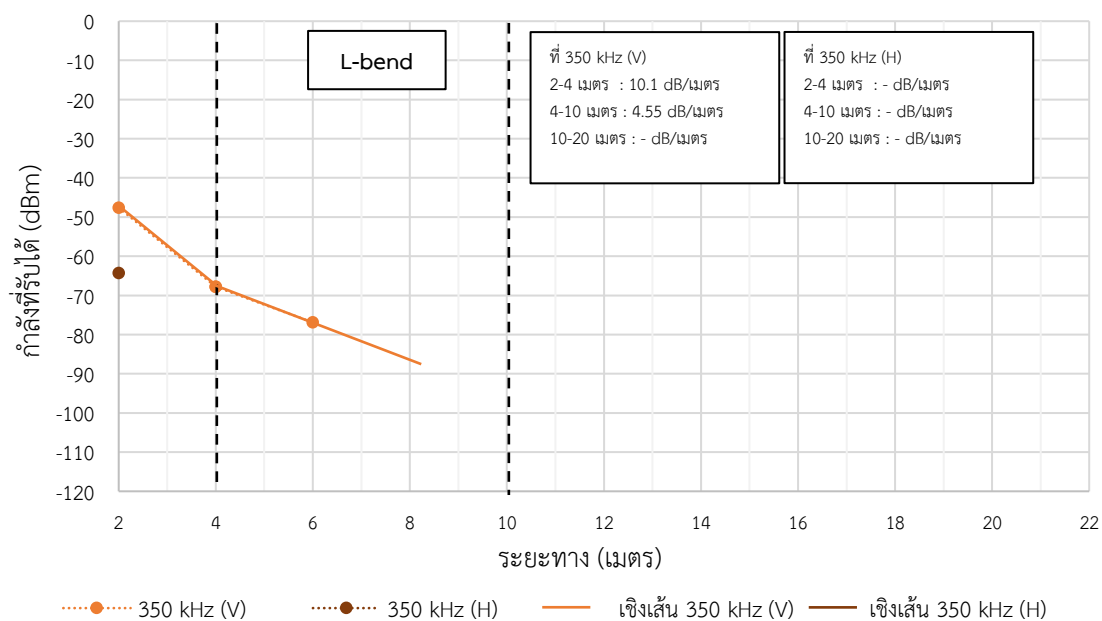
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-48.6	-64
2	4	-68	-
3	6	-77.6	-
4	8	-	-
5	10	-	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 40 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 29 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz แบบ NLOS

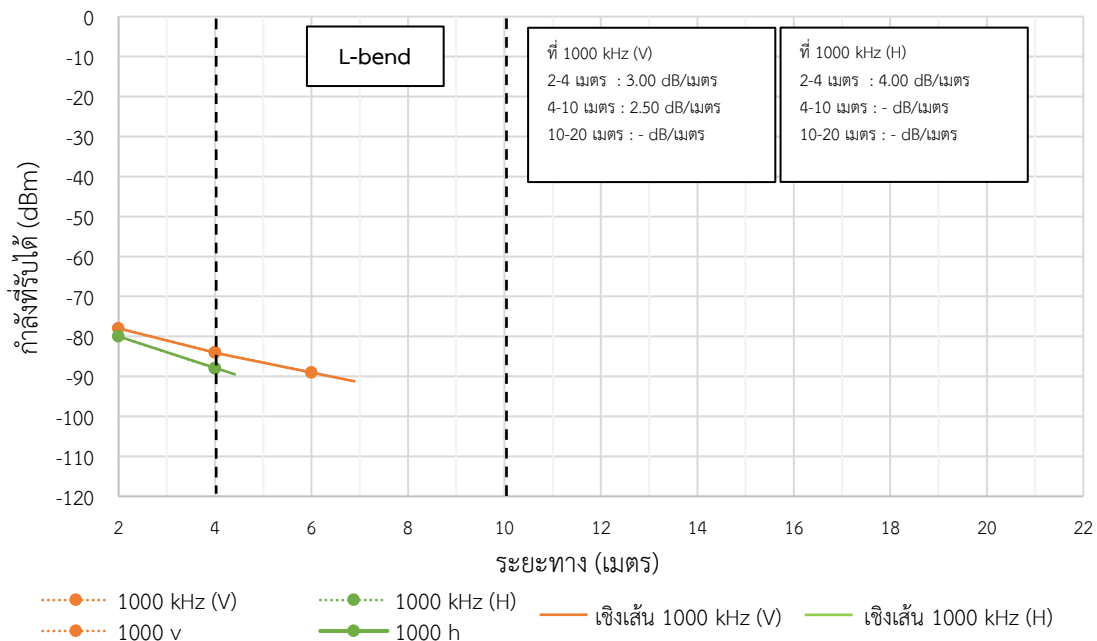
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-47.6	-64.3
2	4	-67.8	-
3	6	-76.9	-
4	8	-	-
5	10	-	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 41 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 30 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-78	-80
2	4	-84	-88
3	6	-89	-
4	8	-	-
5	10	-	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-

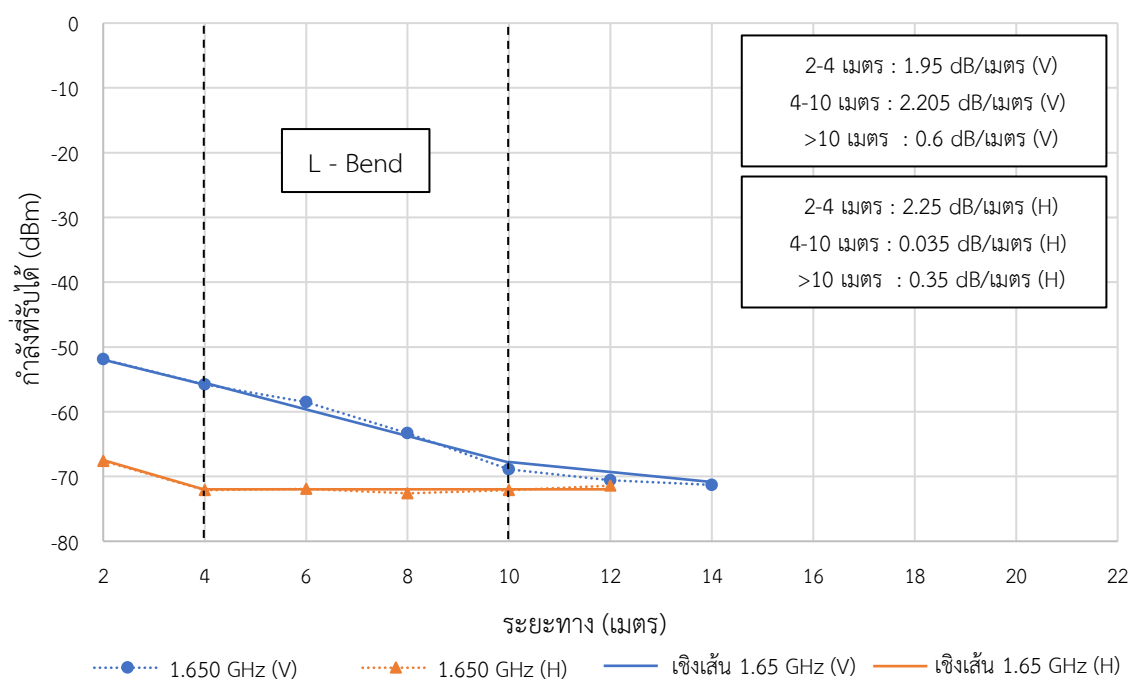


รูปที่ 42 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz, 350 kHz และ 1000 kHz ได้ถูกพล็อตในรูปที่ 40 ถึง 42 จะเห็นว่าเมื่อวัดทดสอบแบบ V-V ทั้งสามความถี่มีความลาดเอียงของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเมื่ออยู่ในช่วงของ L-bend เท่ากับ 9.70 dB/m, 10.1 dB/m และ 3.0 dB/m ตามลำดับ ซึ่งสูงมากที่สองความถี่แรก ในขณะที่ความถี่ 1000 kHz อาจมีการสูญเสียการส่งผ่านที่ต่ำกว่าแต่ก็ไม่สามารถแพร่คลื่นออกไปในระยะ 6 เมตร เท่ากันทั้งหมด และหากพิจารณาระดับการลดทอนของสัญญาณของทั้งสามความถี่จะพบว่ามีการลดลงถึง 29 dB, 29.3 dB และ 11 dB ตามลำดับ ในขณะที่การวัดทดสอบแบบ V-H ของทั้ง 300 kHz และ 350 kHz สามารถวัดค่ากำลังของสัญญาณได้แค่ที่ระยะ 2 เมตรเท่ากัน ขณะที่ความถี่ 1000 kHz มีระยะของการวัดเพิ่มขึ้นไปถึงเพียง 4 เมตร เมื่อพ้นระยะนี้ก็จะวัดค่ากำลังของสัญญาณต่อไปอีกไม่ได้เลย ซึ่งปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงการซึมทรานของคลื่นลงสู่ผนังถ้าที่เป็นส่วนโค้งและกีดขวางเส้นทางแบบ LOS เป็นหลักและเมื่อทดลองเปลี่ยนทิศทางของสายอากาศมารับไปทิศทางอื่นโดยรอบก็ไม่สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้เช่นกัน ย่อมแสดงว่าทั้งสามความถี่นี้ก็ไม่เกิดการสะท้อนบนผนังถ้าห็นปูนที่อยู่บริเวณนั้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นคลื่นที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการแพร่คลื่นเข้าไปในโพรงถ้าโดยตรง เพราะย่อมพบกับสภาพแวดล้อมที่เป็นทั้งแบบ LOS และ NLOS อย่างแน่นอน

ตารางที่ 31 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz แบบ NLOS

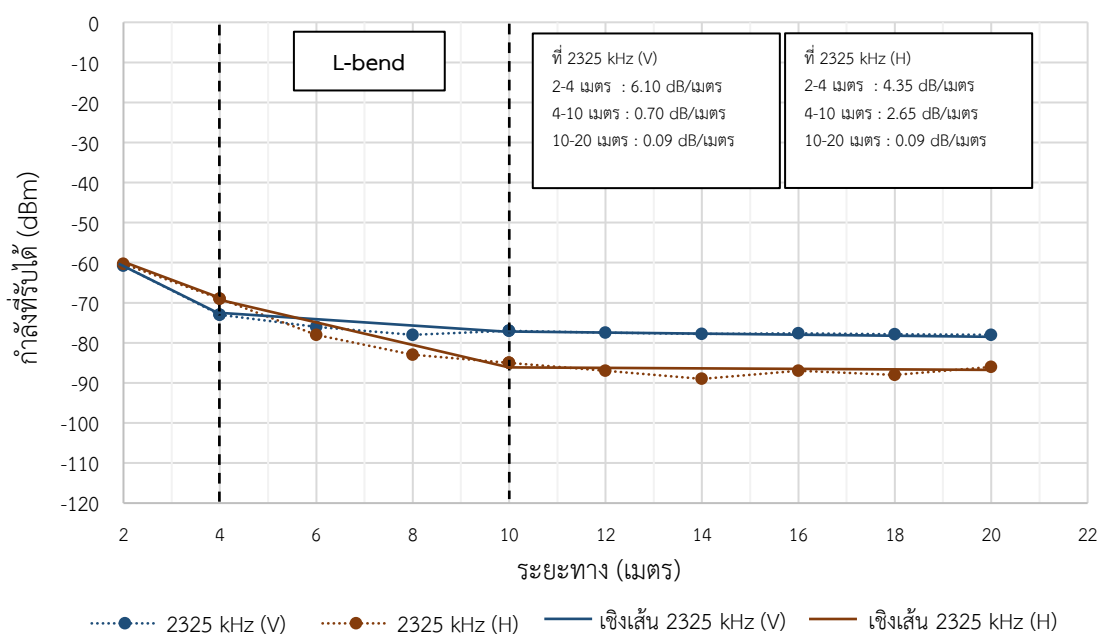
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-69.7	-79.9
2	4	-81	-79
3	6	-86	-89
4	8	-87	-
5	10	-86.2	-
6	12	-86.9	-
7	14	-87	-
8	16	-86.8	-
9	18	-87	-
10	20	-87.3	-



รูปที่ 43 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 32 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz แบบ NLOS

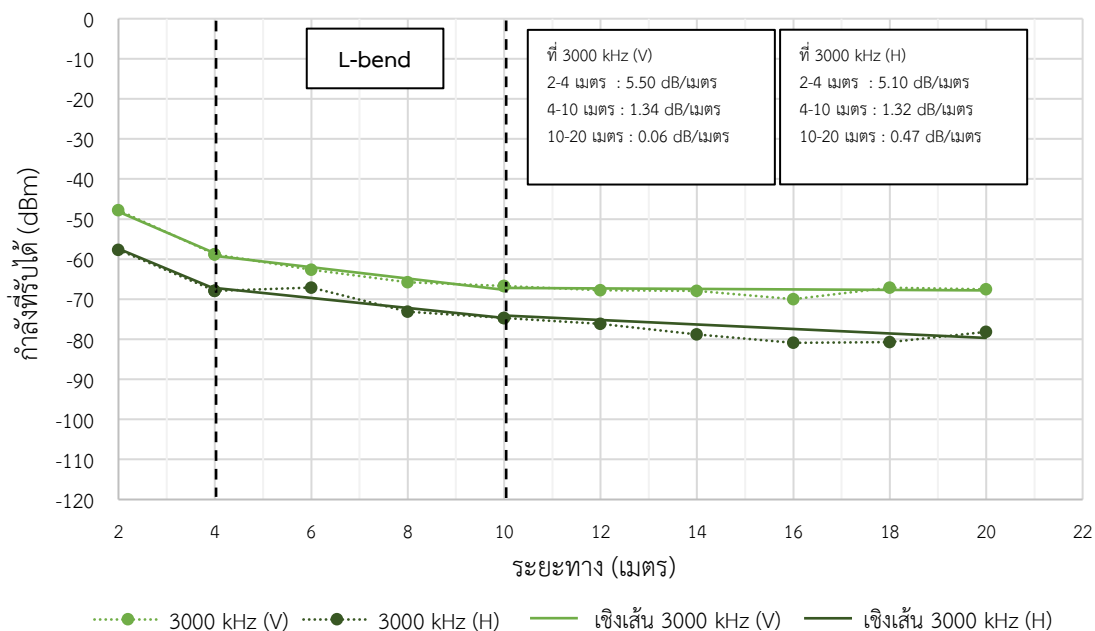
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-60.8	-60.3
2	4	-73	-69
3	6	-76	-78
4	8	-78	-83
5	10	-77	-85
6	12	-77.5	-87
7	14	-77.8	-89
8	16	-77.6	-87
9	18	-77.9	-88
10	20	-78	-86



รูปที่ 44 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 33 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz แบบ NLOS

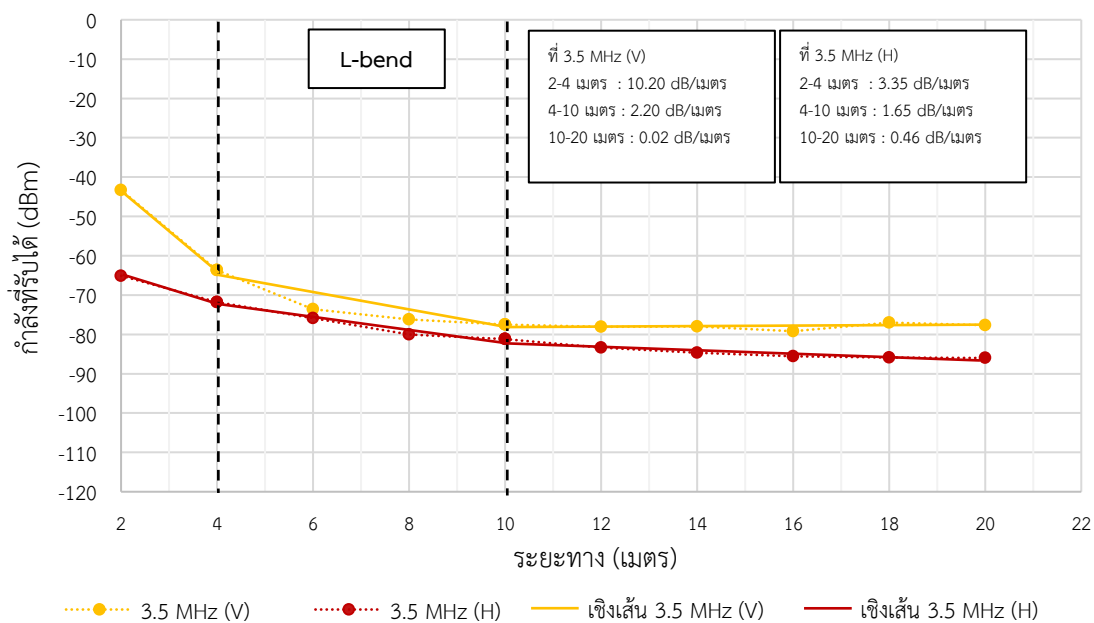
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่รับได้ โพลาไรซ์ V-V (dBm)	กำลังที่รับได้ โพลาไรซ์ V-H (dBm)
1	2	-47.8	-57.7
2	4	-58.8	-67.9
3	6	-62.7	-67.1
4	8	-65.8	-73.1
5	10	-66.7	-74.7
6	12	-67.8	-76.2
7	14	-67.9	-78.8
8	16	-70	-80.9
9	18	-67.1	-80.7
10	20	-67.5	-78.2



รูปที่ 45 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 34 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz แบบ NLOS

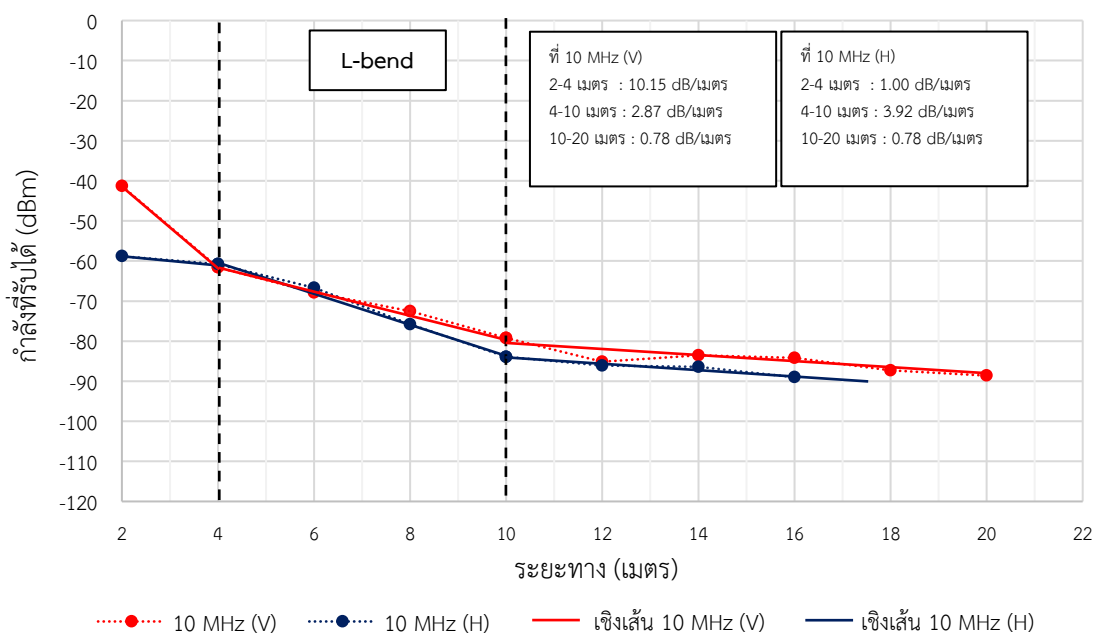
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-43.3	-65.1
2	4	-63.7	-71.8
3	6	-73.6	-75.9
4	8	-76.2	-80
5	10	-77.5	-81.2
6	12	-78.1	-83.4
7	14	-78	-84.7
8	16	-79.2	-85.6
9	18	-77	-85.9
10	20	-77.7	-86



รูปที่ 46 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 35 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz แบบ NLOS

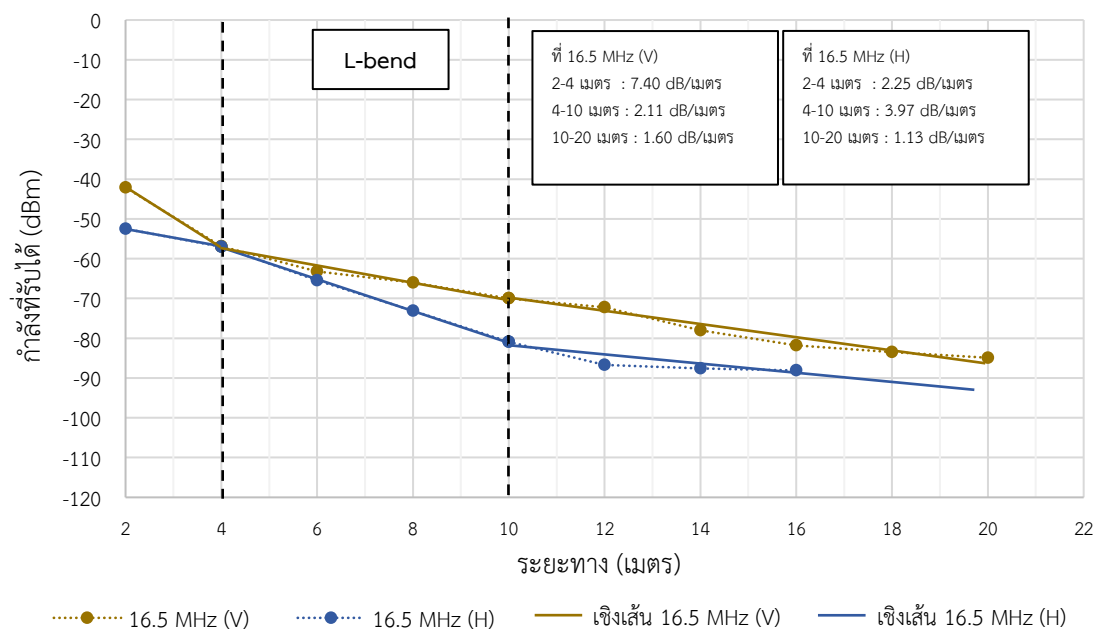
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-41.3	-58.8
2	4	-61.6	-60.8
3	6	-67.9	-66.7
4	8	-72.5	-75.8
5	10	-79.2	-83.9
6	12	-85.1	-86.1
7	14	-83.5	-86.4
8	16	-84.2	-89
9	18	-87.3	-
10	20	-88.6	-



รูปที่ 47 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 36 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz แบบ NLOS

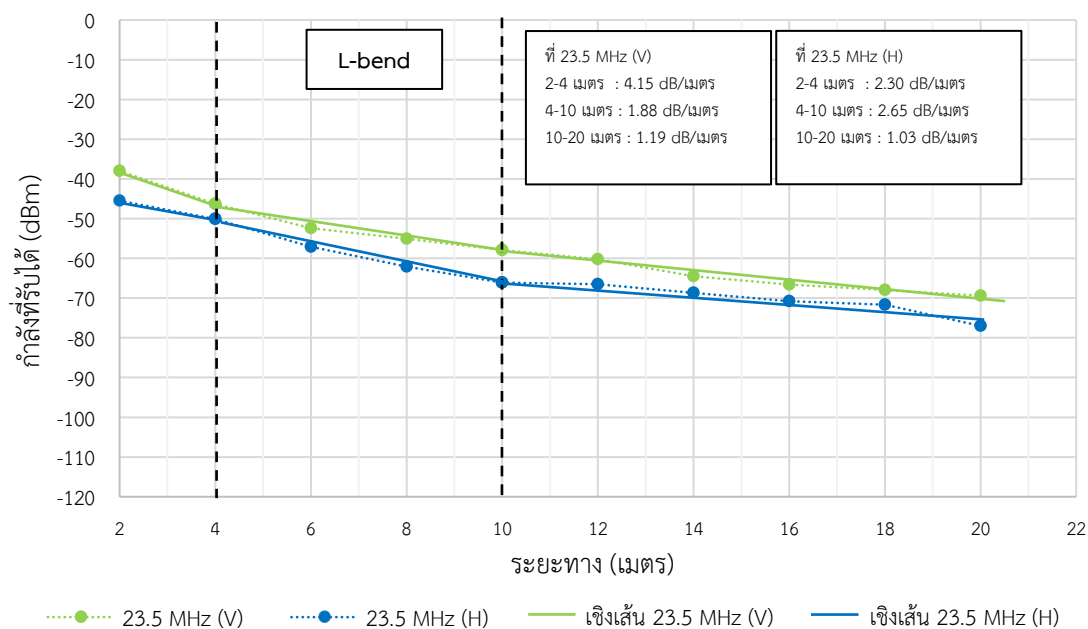
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-42.1	-52.5
2	4	-56.9	-57
3	6	-63.2	-65.5
4	8	-66	-73.1
5	10	-70	-80.9
6	12	-72.2	-86.7
7	14	-78	-87.6
8	16	-81.8	-88.1
9	18	-83.5	-
10	20	-84.9	-



รูปที่ 48 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 37 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz แบบ NLOS

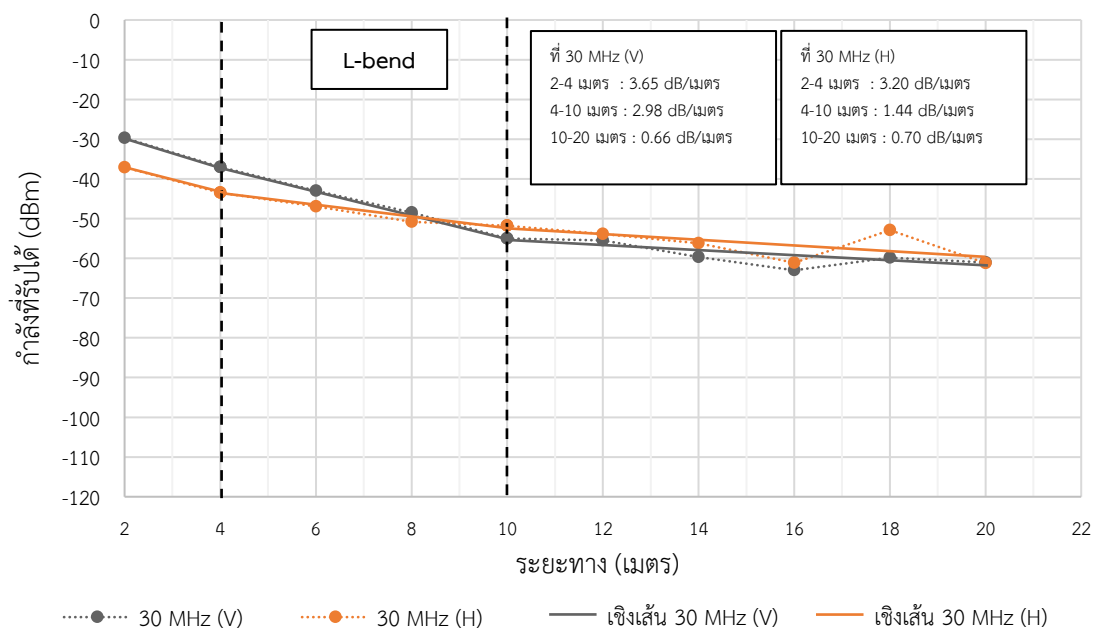
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-38	-45.5
2	4	-46.3	-50.1
3	6	-52.4	-57.1
4	8	-55.1	-62.1
5	10	-57.9	-66.1
6	12	-60.2	-66.5
7	14	-64.5	-68.7
8	16	-66.6	-70.8
9	18	-68	-71.7
10	20	-69.4	-77



รูปที่ 49 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 38 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz แบบ NLOS

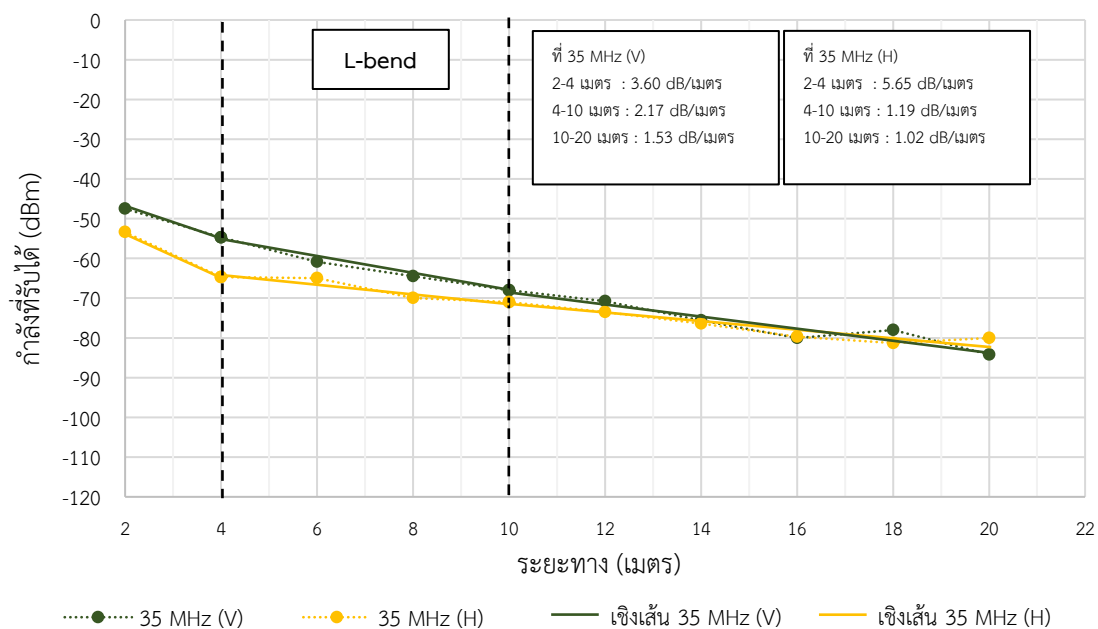
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-29.7	-37.1
2	4	-37	-43.5
3	6	-43	-46.9
4	8	-48.5	-50.8
5	10	-55	-51.8
6	12	-55.5	-53.9
7	14	-59.7	-56.2
8	16	-63	-61.1
9	18	-59.8	-52.9
10	20	-61	-61.2



รูปที่ 50 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 39 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz แบบ NLOS

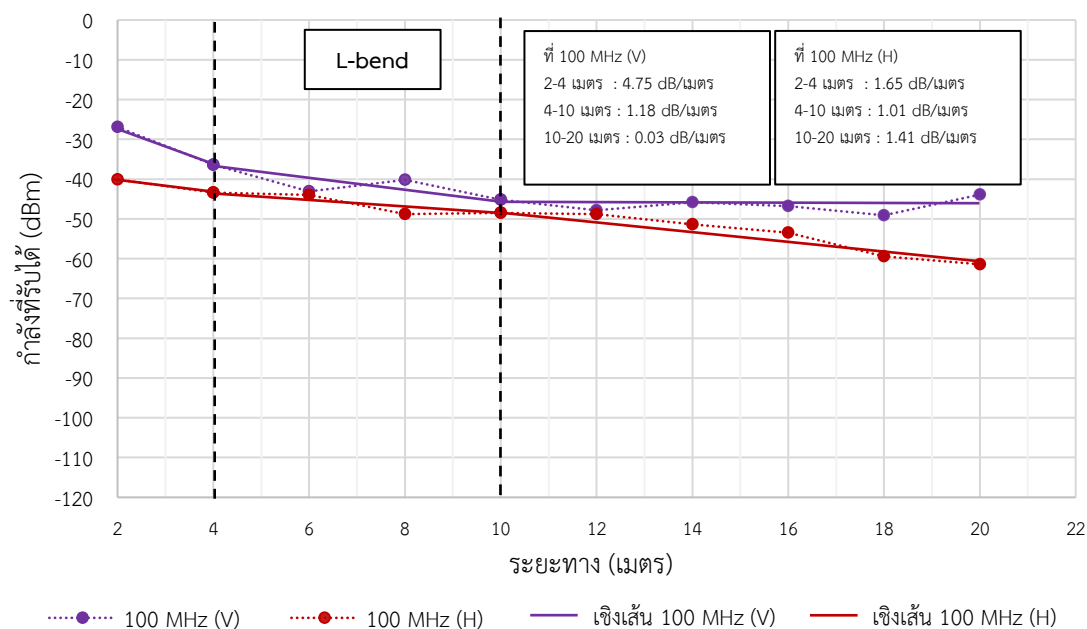
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-47.5	-53.4
2	4	-54.7	-64.7
3	6	-60.9	-65
4	8	-64.5	-70
5	10	-68	-71
6	12	-70.8	-73.5
7	14	-75.6	-76.4
8	16	-80	-79.7
9	18	-78	-81.3
10	20	-84.2	-80



รูปที่ 51 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 40 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz แบบ NLOS

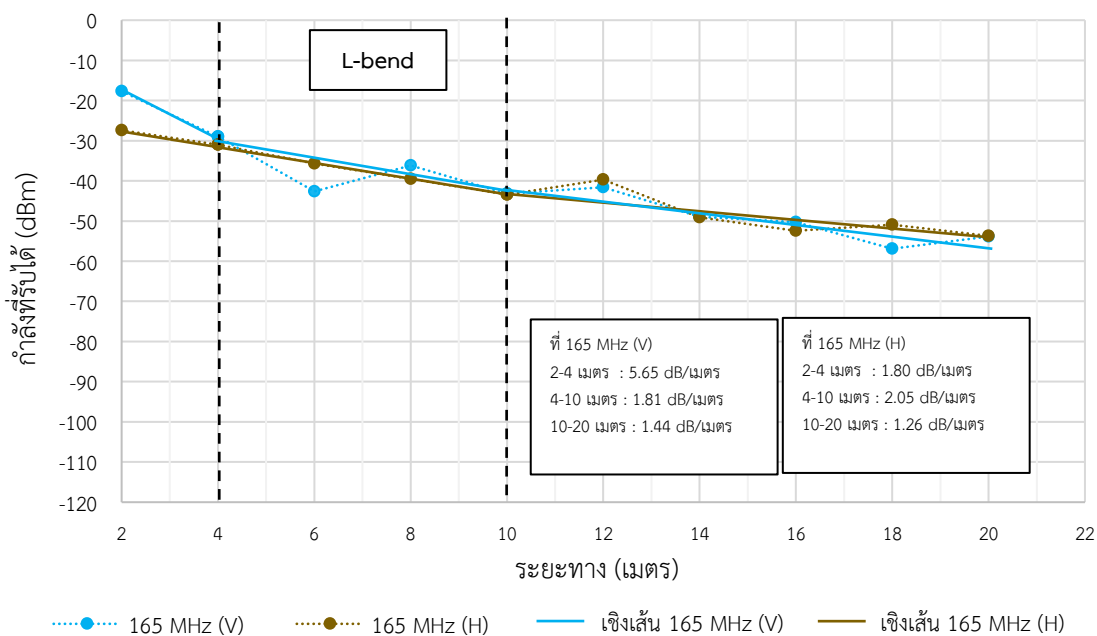
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-26.9	-40.1
2	4	-36.4	-43.4
3	6	-43.1	-44
4	8	-40.2	-48.8
5	10	-45.2	-48.5
6	12	-47.8	-48.8
7	14	-45.8	-51.4
8	16	-46.8	-53.5
9	18	-49.1	-59.4
10	20	-43.9	-61.4



รูปที่ 52 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 41 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz แบบ NLOS

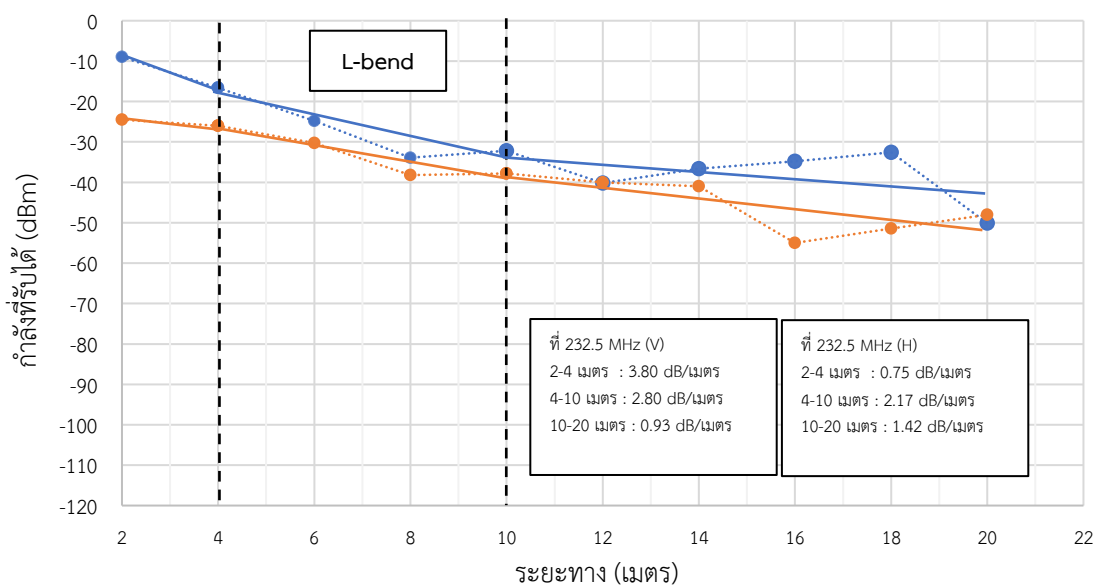
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-17.7	-27.4
2	4	-29	-31
3	6	-42.6	-35.7
4	8	-36.2	-39.5
5	10	-43.2	-43.4
6	12	-41.6	-39.7
7	14	-48.9	-49.1
8	16	-50.3	-52.4
9	18	-56.9	-50.9
10	20	-53.9	-53.7



รูปที่ 53 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 42 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-9	-24.5
2	4	-16.6	-26
3	6	-24.8	-30.3
4	8	-33.9	-38.2
5	10	-32.2	-37.8
6	12	-40.2	-40
7	14	-36.6	-41
8	16	-34.8	-55
9	18	-32.6	-51.4
10	20	-50.1	-48



.....●..... 232.5 MHz (V) ●..... 232.5 MHz (H) —●— เชิงเส้น 232.5 MHz (V) —●— เชิงเส้น 232.5 MHz (H)

รูปที่ 54 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

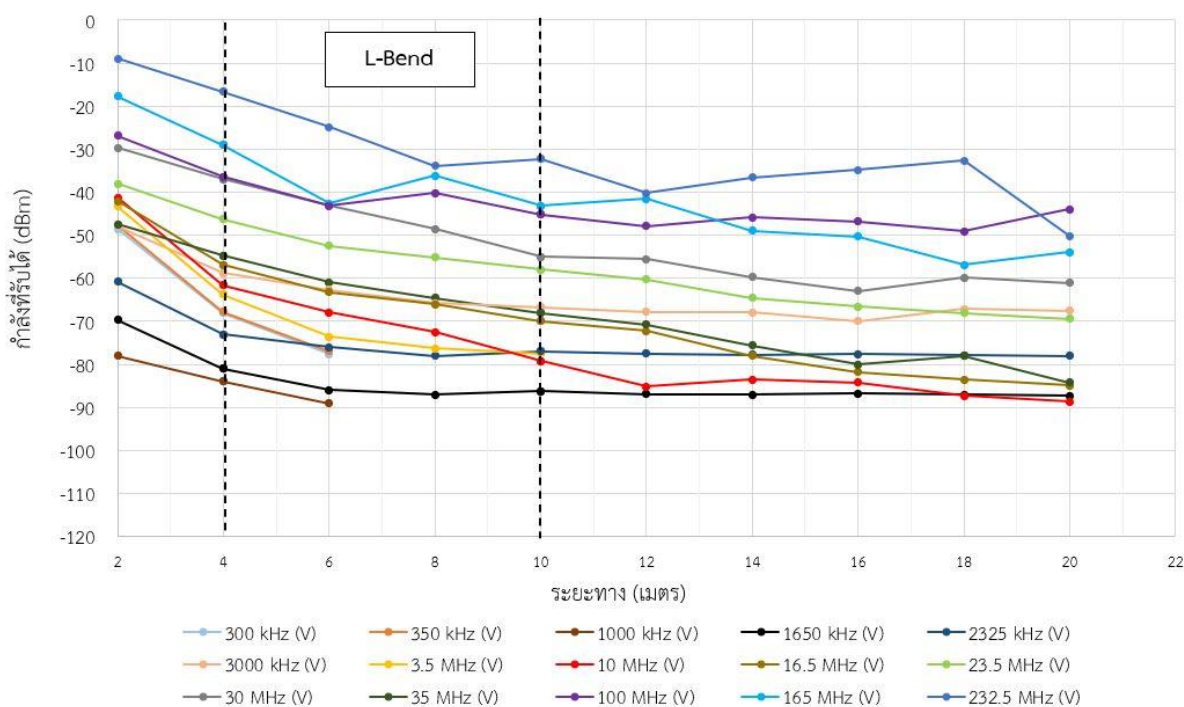
จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ได้ถูกพล็อตในรูปที่ 43 - 54 จะเห็นว่าเมื่อวัดทดสอบแบบ V-V ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อเรียงลำดับจากน้อยไปหามากที่เกิดขึ้นบริเวณ L-bend (ระยะ 4-10 เมตร) จะได้ตามลำดับดังนี้ 3.60 dB/m (35 MHz), 3.65 dB/m (30 MHz), 3.80 dB/m (232.5 MHz), 4.15 dB/m (23.5 MHz), 4.75 dB/m (100 MHz), 5.50 dB/m (3000 kHz), 5.65 dB/m (1650 kHz), 5.65 dB/m (165 MHz), 6.10 dB/m (2325 kHz), 7.4 dB/m (16.5 MHz), 10.15 dB/m (10 MHz) และ 10.20 dB/m (3.5 MHz) จะเห็นว่าความถี่ย่าน VHF ส่วนใหญ่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่ำกว่าความถี่ย่าน MF และ HF แต่ค่าที่ปรากฏก็ยังมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติที่เกิดขึ้นกับความถี่ย่าน VHF เมื่อการวัดทดสอบเป็นแบบ V-V เนื่องจากคลื่นส่วนใหญ่เมื่อตกกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีความนำไฟฟ้าอยู่ด้วยมักจะสะท้อนไปในทิศทางอื่นตามเหลี่ยมมุมของผนังถ้ำและอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ด้วย แต่ก็มีบางทิศทางที่ถูกส่งไปถึงสายอากาศภาครับ ในขณะที่ความถี่ย่าน MF เมื่อพบสิ่งกีดขวางที่เป็นผนังถ้ำจะเกิดปรากฏการณ์ซึมซาบลงในเนื้อหินปูนและบางส่วนแพร่ไปตามผิวของผนังถ้ำ ทำให้มีการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่า ส่วนความถี่ย่าน HF นั้นจะมีพฤติกรรมการแพร่แบบคลื่นฟ้าและสามารถสะท้อนกับตัวกลางที่แตกต่างกันได้ ทำให้การแพร่คลื่นออกไปส่วนใหญ่สะท้อนผนังถ้ำที่กีดขวางไปในทิศทางอื่น ทำให้สายอากาศภาครับรับค่ากำลังได้ต่ำลงอย่างชัดเจน

หลังจากที่ปรับสายอากาศภาครับให้อยู่ในแนวอน (V-H) ค่ากำลังของสัญญาณความถี่ชุดเดียวกันที่รับได้และนำมาคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่าน จากนั้นเรียงลำดับค่าดังกล่าวจากน้อยไปหามากจะได้ตามลำดับดังนี้ -0.45 dB/m (1650 kHz), 0.75 dB/m (232.5 MHz), 1.0 dB/m (10 MHz), 1.65 dB/m (100 MHz), 1.80 dB/m (165 MHz), 2.25 dB/m (16.5 MHz), 2.30 dB/m (23.5 MHz), 3.20 dB/m (30 MHz), 3.35 dB/m (3.5 MHz), 4.35 dB/m (2325 kHz), 5.10 dB/m (3000 kHz), 5.65 dB/m (35 MHz), และ เมื่อพิจารณาถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่า ที่ความถี่ 1650 MHz ระดับของสัญญาณซึ่งรับได้ที่ระยะ 4 เมตรมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 2 เมตร จากนั้นระดับของสัญญาณลดลงมากถึง 10 dB และจากนั้นไม่สามารถรับค่ากำลังได้เลย ทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่คำนวณได้มีค่า -0.45 dB/m แต่พบว่าความถี่ย่าน HF และ VHF กลับให้ค่ากำลังที่รับได้มีค่าสูงขึ้นเกือบทุกความถี่ (ยกเว้นความถี่ 35 MHz ที่ยังมีค่าการสูญเสียสูงขึ้นกว่าเดิม) ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าคลื่นความถี่ทั้งสองย่านนี้เมื่อกระทบกับผนังถ้ำที่เป็นหินปูนมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนของการโพลาไรซ์ตามเหลี่ยมมุมของผนังถ้ำได้สูง แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านจะมีค่าต่ำกว่าแบบ V-V ก็ตาม แต่ค่ากำลังที่รับได้ของ V-H จะมีค่าต่ำกว่าไม่น้อยกว่า 10 dB จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการติดต่อสื่อสารในถ้ำหินปูน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้นำผลการวัดทดสอบในตารางที่ 28 - 42 โดยแยกกรณีที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V และแบบ V-H มาทำการสรุปรวมทุกความถี่ที่ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 43 และรูปที่ 55 และตารางที่ 44 และรูปที่ 56 ตามลำดับ

ตารางที่ 43 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V NLOS แต่ละความถี่ (ระยะ L-bend เท่ากับ 10 เมตร)

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-48.6	-47.6	-78	-69.7	-60.8	-47.8	-43.3	-41.3	-42.1	-38	-29.7	-47.5	-26.9	-17.7	-9
2	4	-68	-67.8	-84	-81	-73	-58.8	-63.7	-61.6	-56.9	-46.3	-37	-54.7	-36.4	-29	-16.6
3	6	-77.6	-76.9	-89	-86	-76	-62.7	-73.6	-67.9	-63.2	-52.4	-43	-60.9	-43.1	-42.6	-24.8
4	8	-	-	-	-87	-78	-65.8	-76.2	-72.5	-66	-55.1	-48.5	-64.5	-40.2	-36.2	-33.9
5	10	-	-	-	-86.2	-77	-66.7	-77.5	-79.2	-70	-57.9	-55	-68	-45.2	-43.2	-32.2
6	12	-	-	-	-86.9	-77.5	-67.8	-78.1	-85.1	-72.2	-60.2	-55.5	-70.8	-47.8	-41.6	-40.2
7	14	-	-	-	-87	-77.8	-67.9	-78	-83.5	-78	-64.5	-59.7	-75.6	-45.8	-48.9	-36.6
8	16	-	-	-	-86.8	-77.6	-70	-79.2	-84.2	-81.8	-66.6	-63	-80	-46.8	-50.3	-34.8
9	18	-	-	-	-87	-77.9	-67.1	-77	-87.3	-83.5	-68	-59.8	-78	-49.1	-56.9	-32.6
10	20	-	-	-	-87.3	-78	-67.5	-77.7	-88.6	-84.9	-69.4	-61	-84.2	-43.9	-53.9	-50.1



รูปที่ 55 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V NLOS แต่ละความถี่

เมื่อนำค่ากำลังของคลื่นวิทยุที่วัดทดสอบเฉพาะแบบ V-V NLOS มาทำการเปรียบเทียบกับตารางที่ 43 ซึ่งเป็นกรณีของถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) สิ่งที่น่าสนใจก็คือค่าการลดทอนของกำลังคลื่นความถี่วิทยุทุกความถี่ที่เกิดขึ้นช่วงระยะตั้งแต่ 2-10 เมตร ซึ่งต้องพบกับอุปสรรคกีดขวางในช่วง L-bend ระยะ 4-10 เมตร พบว่าเกิดค่าการลดทอนกำลังเรียงลำดับตามความถี่ดังนี้ 29 dB @300 kHz, 19.3 dB @350 kHz, 11 dB @1000 kHz, 16.5 dB @1650 kHz, 16.2 dB @2325 kHz, 18.9 dB @3000 kHz, 34.2 dB @3.5 MHz, 37.9 dB @10 MHz, 27.9 dB @16.5 MHz, 19.9 dB @23.5 MHz, 25.3 dB @30 MHz, 20.5 dB @35 MHz, 18.3 dB @100 MHz, 25.5 dB @165 MHz และ 23.3 dB @232.5 MHz ตามลำดับ

หากพิจารณาเป็นกลุ่มความถี่ที่มีพฤติกรรมคล้ายกัน ได้แก่

1) กลุ่มความถี่ 300 kHz, 350 kHz, 1000 kHz และ 1650 kHz ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิวสามารถจะแพร่คลื่นในอากาศได้แค่ระยะสั้นๆ และมีค่าการลดทอนที่ระยะ 6 เมตร เท่ากับ 29 dB, 19.3 dB, 11 dB, และ 16.3 dB ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุจากการที่คลื่นความถี่กลุ่มนี้ถูกซึมซับโดยผนังถ้ำหินปูนที่เกิดขวางมากกว่าความถี่อื่น โดยความถี่ 300 kHz ถูกซึมซับลงในพื้นที่ของหินปูนมากที่สุด (ค่าการลดทอนสูงสุด) จึงมีเพียงกำลังบางส่วนที่รับได้ในอากาศว่างโดยสายอากาศภาครับมีค่าต่ำมากและมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงมากกว่ากลุ่มความถี่อื่น

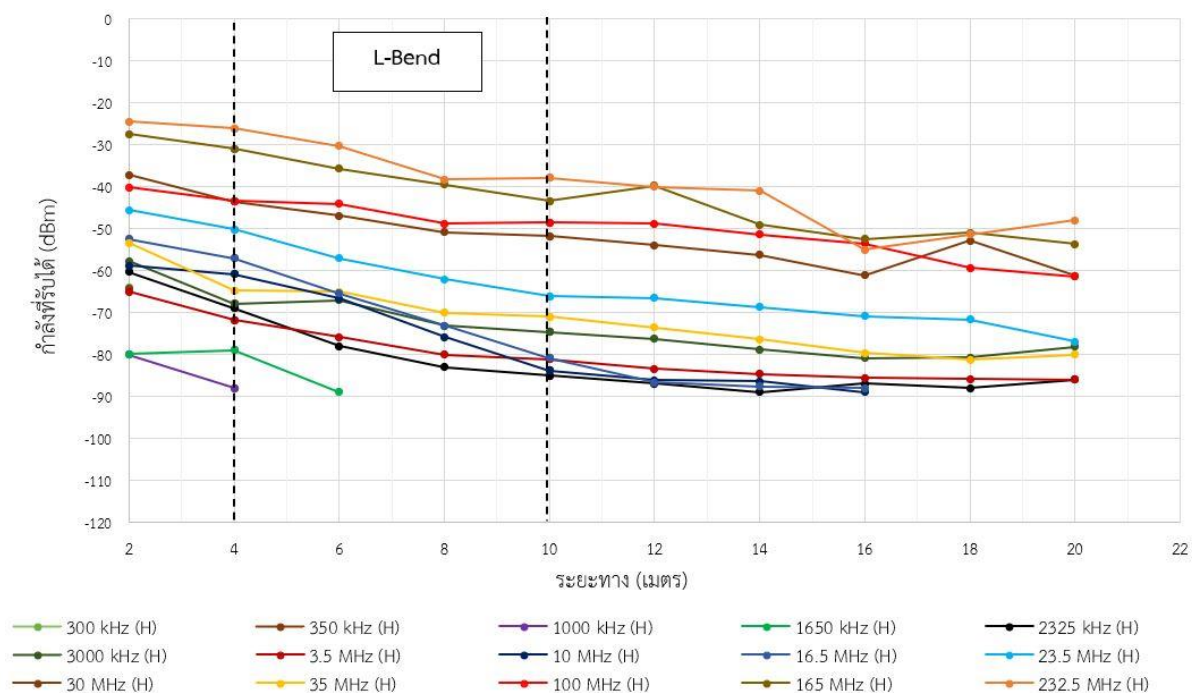
2) กลุ่มความถี่ที่ค่าการลดทอนที่ระยะ 10 เมตร ไม่เกิน 20 dB ได้แก่ ความถี่ 2325 kHz, 3000 kHz, 23.5 MHz และ 100 MHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ MF, HF และ VHF และมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นฟ้าและคลื่นในอากาศว่าง เมื่อนำมาใช้ในโพรงถ้ำที่มีสิ่งกีดขวางหรือมีความคดเคี้ยวไม่เป็นเส้นตรงของถ้ำหินปูนจะเกิดการลดทอนอย่างมากเป็นร้อยละ (20 dB) ในระยะทางเพียงแค่ 10 เมตร ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการรับส่งคลื่นเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารในโพรงถ้ำ

3) กลุ่มความถี่ที่ค่าการลดทอนที่ระยะ 10 เมตร มากกว่า 20 dB ได้แก่ ความถี่ 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ HF และ VHF และยังคงมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นฟ้าและคลื่นในอากาศว่าง แต่มีการลดทอนที่ระยะ 10 เมตรสูงกว่ามาก โดยเฉพาะที่ความถี่ 10 MHz และ 35 MHz มีค่าการลดทอนสูงมากในหลักพันเท่า (37.9 dB และ 34.2 dB) ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการรับส่งคลื่นเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารในโพรงถ้ำ

อย่างไรก็ตาม ในกรณีการวัดทดสอบพฤติกรรมของคลื่นความถี่แบบ NLOS คณะผู้วิจัยให้ความสนใจในส่วนของค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นกับแต่ละคลื่นความถี่มากกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านซึ่งเหมาะสำหรับการส่งผ่านคลื่นแบบ LOS เนื่องจากในการปรับตั้งอุปกรณ์โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในการส่งและรับคลื่นจะมีตำแหน่งอยู่ใกล้กับส่วนที่เป็นผนังถ้ำมากกว่าแบบ LOS เพราะต้องการศึกษาเรื่องของพฤติกรรมการส่งผ่านที่อาจเกิดขึ้นบนผิวของผนังถ้ำซึ่งอาจเกิดจากการเลี้ยวเบน (Diffraction) จากการสะท้อน (Reflection) หรือจากการเหนี่ยวนำ (Induction) ในเนื้อหินปูนในรูปของการซึมซาบ (Absorption) ก็เป็นไปได้ ดังนั้นการส่งและรับคลื่นโดยอยู่คนละฝั่งของผนังถ้ำที่เป็นสิ่งกีดขวาง ค่าการลดทอนเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางจึงมีความสำคัญมากกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่ใช้ในการวัดทดสอบแบบ LOS

ตารางที่ 44 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H NLOS แต่ละความถี่ (ระยะ L-bend เท่ากับ 10 เมตร)

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-64	-64.3	-80	-79.9	-60.3	-57.7	-65.1	-58.8	-52.5	-45.5	-37.1	-53.4	-40.1	-27.4	-24.5
2	4	-	-	-88	-79	-69	-67.9	-71.8	-60.8	-57	-50.1	-43.5	-64.7	-43.4	-31	-26
3	6	-	-	-	-89	-78	-67.1	-75.9	-66.7	-65.5	-57.1	-46.9	-65	-44	-35.7	-30.3
4	8	-	-	-	-	-83	-73.1	-80	-75.8	-73.1	-62.1	-50.8	-70	-48.8	-39.5	-38.2
5	10	-	-	-	-	-85	-74.7	-81.2	-83.9	-80.9	-66.1	-51.8	-71	-48.5	-43.4	-37.8
6	12	-	-	-	-	-87	-76.2	-83.4	-86.1	-86.7	-66.5	-53.9	-73.5	-48.8	-39.7	-40
7	14	-	-	-	-	-89	-78.8	-84.7	-86.4	-87.6	-68.7	-56.2	-76.4	-51.4	-49.1	-41
8	16	-	-	-	-	-87	-80.9	-85.6	-89	-88.1	-70.8	-61.1	-79.7	-53.5	-52.4	-55
9	18	-	-	-	-	-88	-80.7	-85.9	-	-	-71.7	-52.9	-81.3	-59.4	-50.9	-51.4
10	20	-	-	-	-	-86	-78.2	-86	-	-	-77	-61.2	-80	-61.4	-53.7	-48



รูปที่ 56 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H NLOS แต่ละความถี่

จากตารางที่ 44 ได้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังของคลื่นวิทยุที่วัดทดสอบเฉพาะแบบ V-H NLOS โดยยังคงพิจารณาค่าการลดทอนของกำลังคลื่นความถี่วิทยุทุกความถี่ที่เกิดขึ้นช่วงระยะตั้งแต่ 2-10 เมตร เช่นเดียวกัน จากค่ากำลังที่รับได้ในตารางพบว่าเกิดค่าการลดทอนกำลังเรียงลำดับตามความถี่ดังนี้ ที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz (ไม่สามารถคำนวณได้), 8 dB @1000 kHz (วัดค่าสุดท้ายได้ที่ระยะ 4 เมตร), 9.1 dB @1650 kHz (วัดค่าสุดท้ายได้ที่ระยะ 6 เมตร) และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับกรวัดทดสอบแบบ V-V ความถี่ที่เหลือทั้งหมดจึงคำนวณค่าการลดทอนที่ระยะ 10 เมตร ซึ่งเป็นขอบเขตของ L-bend ได้ดังนี้ 24.7 dB @2325 kHz, 17 dB @3000 kHz, 16.1 dB @3.5 MHz, 25.1 dB @10 MHz, 28.4 dB @16.5 MHz, 20.6 dB @23.5 MHz, 14.7 dB @30 MHz, 17.6 dB @35 MHz, 8.4 dB @100 MHz, 16 dB @165 MHz และ 13.3 dB @232.5 MHz ตามลำดับ,

หากพิจารณาเป็นกลุ่มความถี่ที่มีพฤติกรรมคล้ายกัน ได้แก่

1) กลุ่มความถี่ 300 kHz, 350 kHz, 1000 kHz และ 1650 kHz ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบ คลื่นดินหรือคลื่นผิวสามารถจะแพร่คลื่นในอากาศได้แค่ระยะสั้นๆ ค่าการลดทอนของความถี่ 1000 kHz และ 1650 kHz สามารถคำนวณได้เพียงที่ระยะ 4 และ 6 เมตร เท่ากับ 8 dB และ 9.1 dB ตามลำดับ จึงแสดงว่าการลดทอนสูงกว่าแบบ V-V ทั้งสามความถี่

2) กลุ่มความถี่ที่ค่าการลดทอนที่ระยะ 10 เมตร ไม่เกิน 20 dB ได้แก่ ความถี่ 3000 kHz, 3.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ MF, HF และ VHF และมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นฟ้าและคลื่นในอากาศว่าง เมื่อนำมาใช้ในโครงข่ายที่มีสิ่งกีดขวางหรือมีความคดเคี้ยวไม่เป็นเส้นตรงของถ้ำหินปูนจะเกิดการสะท้อนกับผนังถ้ำหินปูนตามสภาพแวดล้อม ทำให้การโพลาริเซชันเปลี่ยนเป็นแนวอนส่งผลให้ค่ากำลังที่รับได้มีระดับที่สูงขึ้นและมีค่าการลดทอนต่ำกว่าแบบ V-V อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าการลดทอนในกรณีจะลดลงแต่ระดับของค่ากำลังในระยะทางเพียงแค่ 10 เมตรก็ยังคงอยู่

ระหว่าง 8.4 dB ถึง 17.6 dB ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการรับส่งคลื่นเพื่อใช้สำหรับการสื่อสารในโพรงถ้ำ เช่นเดียวกับกรณีของการส่งรับคลื่นความถี่แบบ V-V

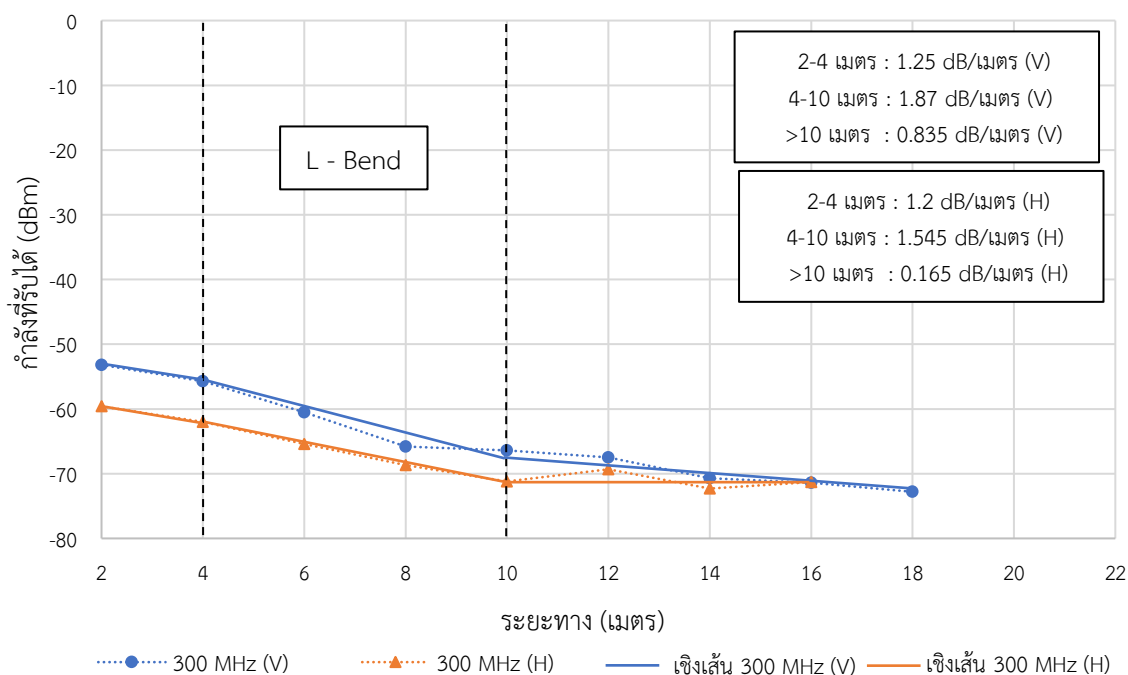
3) กลุ่มความถี่ที่ค่าการลดทอนที่ระยะ 10 เมตร มากกว่า 20 dB ได้แก่ ความถี่ 2325 kHz, 10 MHz, 16.5 MHz และ 23.5 MHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ MF, HF และ VHF และมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบ คลื่นฟ้าและคลื่นในอากาศว่างแต่มีการลดทอนที่ระยะ 10 เมตรสูงเกินไป โดยที่ความถี่ 10 MHz และ 16.5 MHz มีค่าการลดทอนสูงมากเช่นเดียวกับกรณีการส่งรับคลื่นแบบ V-V จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการ สื่อสารในโพรงถ้ำ

สำหรับผลการวัดทดสอบแบบ NLOS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ย่าน UHF ที่ความถี่ 300 MHz, 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ซึ่งได้จากการดำเนินการ ภาคสนามเป็นครั้งแรกก่อนที่จะดำเนินการในย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF โดยใช้สายอากาศควอเตอร์ เวฟโมโนโพลกราวด์เพลนทั้ง 6 ความถี่ขึ้นมาใช้งานทดแทนเช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ LOS ตามที่ ได้นำเสนอไปแล้วข้างต้น ซึ่งยังคงใช้กำลังส่งของแต่ละความถี่เท่ากับ +20 dBm หรือ 100 มิลลิวัตต์ (เท่ากับ กรณีของสายอากาศแถบกว้างที่ใช้ในการวัดทดสอบคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VHF) และด้วย คุณสมบัติของสายอากาศที่ถูกออกแบบให้ทำงานได้ดีเฉพาะความถี่ที่กำหนด ส่งผลให้ค่ากำลังของสัญญาณที่ สายอากาศภาครับสามารถรับได้ที่ตำแหน่งสองเมตรแรกมีค่าสูงกว่าในกรณีของย่านความถี่ที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการส่งและรับคลื่นในเส้นทางที่ไม่อยู่ในระดับแนวสายตาทำให้การแพร่คลื่นเดินทางได้ใน ระยะใกล้กว่ากรณีของ LOS จึงได้ลดระยะการทดสอบลงมาให้อยู่ภายใน 20 เมตร ซึ่งไม่ส่งผลต่อการคำนวณ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ ต่อระยะทางหนึ่งเมตร ดังนั้นไม่ว่าระดับของกำลังคลื่นวิทยุแต่ละความถี่ที่แผ่ ออกมาจากสายอากาศ (EIRP) จะมีค่าแตกต่างกัน จึงไม่มีผลต่อการคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ ต่อ ระยะทางหนึ่งเมตรที่ต้องการ

อย่างไรก็ตามการวัดทดสอบคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ NLOS ตลอดความโค้งของโพรงถ้ำยังคง ต้องใช้กำลังส่งขาออกของเครื่องผลิตความถี่วิทยุ (RF signal generator) ในทุกย่านความถี่เหมือนกับการวัด ทดสอบแบบ LOS โดยใช้การโพลาริซทั้งแบบ V-V และ V-H และเริ่มต้นวัดทดสอบที่ระยะห่างระหว่าง สายอากาศภาคส่งและภาครับเท่ากับ 2 เมตร แล้วเพิ่มระยะขึ้นไปอีกครั้งละ 2 เมตร จนถึงตำแหน่งสุดท้ายที่ 20 เมตร โดยผลการวัดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 45 – 50 และกราฟแสดงผลในรูปที่ 57 – 62

ตารางที่ 45 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-53.2	-59.6
2	4	-55.7	-62
3	6	-60.5	-65.4
4	8	-65.8	-68.7
5	10	-66.4	-71.2
6	12	-67.5	-69.3
7	14	-70.7	-72.3
8	16	-71.4	-71.3
9	18	-72.8	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



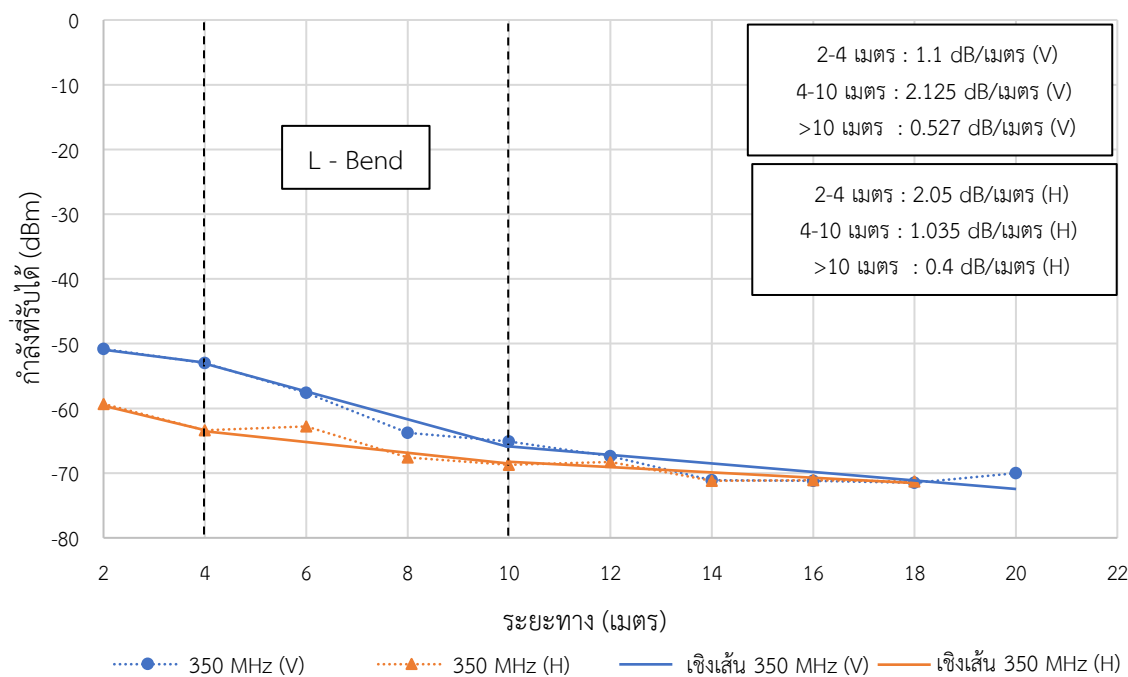
รูปที่ 57 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

จากกราฟในรูปที่ 57 ได้กำหนดช่วงระยะทางระหว่าง 4 – 10 เมตร เป็นช่วงของ L-bend ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาว่าช่วงระยะทาง 6 เมตรในช่วงดังกล่าวก็คือ ช่วงโค้งที่มีลักษณะคล้ายตัวแอลที่เป็นอุปสรรคในการกีดขวางการเดินทางของคลื่นความถี่ต่อเนื่องจากที่มีลักษณะเป็นแบบ LOS ที่เกิดขึ้นในช่วง 2 – 4 เมตรนั่นเอง อย่างไรก็ตามการวัดทดสอบแบบ NLOS ยังจำเป็นต้องใช้เส้นความลาดเอียงแบบเส้นตรงซึ่งเป็นค่าที่คำนวณในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่างปกติของ LOS มาซ้อนทับบนตำแหน่งของค่ากำลังที่เกิดการสูญเสียในแต่ละระยะ 2 เมตร เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับการวัดทดสอบภายในโพรงถ้าแนวตรงเนื่องจากต้องพิจารณาเทียบกับค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีระยะทางเสถียร (Stabilization distance) ที่เกิดขึ้นก่อนและหลังจากส่วนของผนังโค้งของถ้ำ ดังนั้นหากพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นที่ได้แสดงในรูปที่ 57 ซึ่งเป็นผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ที่ความถี่ 300 MHz จะเห็นว่าผลการวัดทดสอบแบบ V-V นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพบสิ่งกีดขวางที่เป็นส่วนโค้งของผนังถ้ำที่ตำแหน่งระยะ 4 เมตรจนถึง 10 เมตร ซึ่งมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ สูงถึง 10.7 dB หรือประมาณ 1.87 dB/m ในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>10 เมตร) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ จะลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 0.835 dB/m ซึ่งมีความลาดชันของค่าการสูญเสียดังกล่าวคล้ายกับช่วงระยะทำายๆ ของการวัดทดสอบแบบ V-V LOS ที่ได้แสดงไปแล้วก่อนหน้านี้

สำหรับกรณีที่เปลี่ยนการโพลาริซชันของสายอากาศภาครับให้เป็นแบบแนวนอนหรือที่เรียกว่าวิธีการวัดทดสอบแบบ V-H นั้นที่ปรากฏในกราฟเดียวกันนี้ พบว่าที่ความถี่เดียวกันค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพบสิ่งกีดขวางที่เป็นส่วนโค้งของผนังถ้ำที่ตำแหน่งระยะ 4 เมตรจนถึง 10 เมตรเช่นเดียวกันกับการวัดทดสอบแบบ V-V แต่มีค่าลดต่ำลงประมาณ 9.2 dB หรือประมาณ 1.545 dB/m (สูญเสียน้อยกว่าแบบ V-V) ในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>10 เมตร) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ จะลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 0.835 dB/m ซึ่งมีความลาดชันคล้ายกับช่วงระยะทำายๆ ของการวัดทดสอบแบบ V-H LOS ที่ได้แสดงไปแล้วเช่นเดียวกัน และต่อไปนี้จะป็นรายงานการวัดทดสอบของห้าความถี่ที่เหลืออยู่ ได้แก่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ในรูปของผลการวัดในตารางบันทึกและแสดงเป็นกราฟอย่างต่อเนื่องกันไปโดยจะอภิปรายผลการวัดทดสอบทั้งหมดที่ได้ในตอนทำายอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 46 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz แบบ NLOS

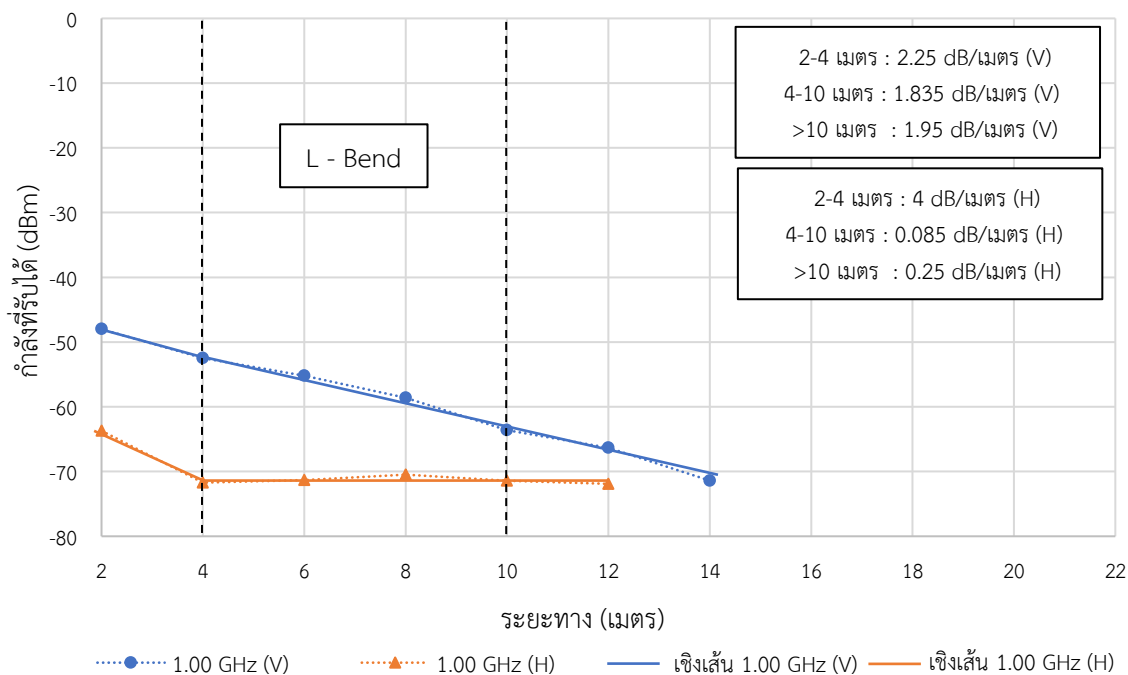
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-50.8	-59.3
2	4	-53	-63.4
3	6	-57.6	-62.8
4	8	-63.8	-67.6
5	10	-65.1	-68.7
6	12	-67.4	-68.3
7	14	-71.1	-71.2
8	16	-71.2	-71.1
9	18	-71.5	-71.3
10	20	-70	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 58 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 47 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz แบบ NLOS

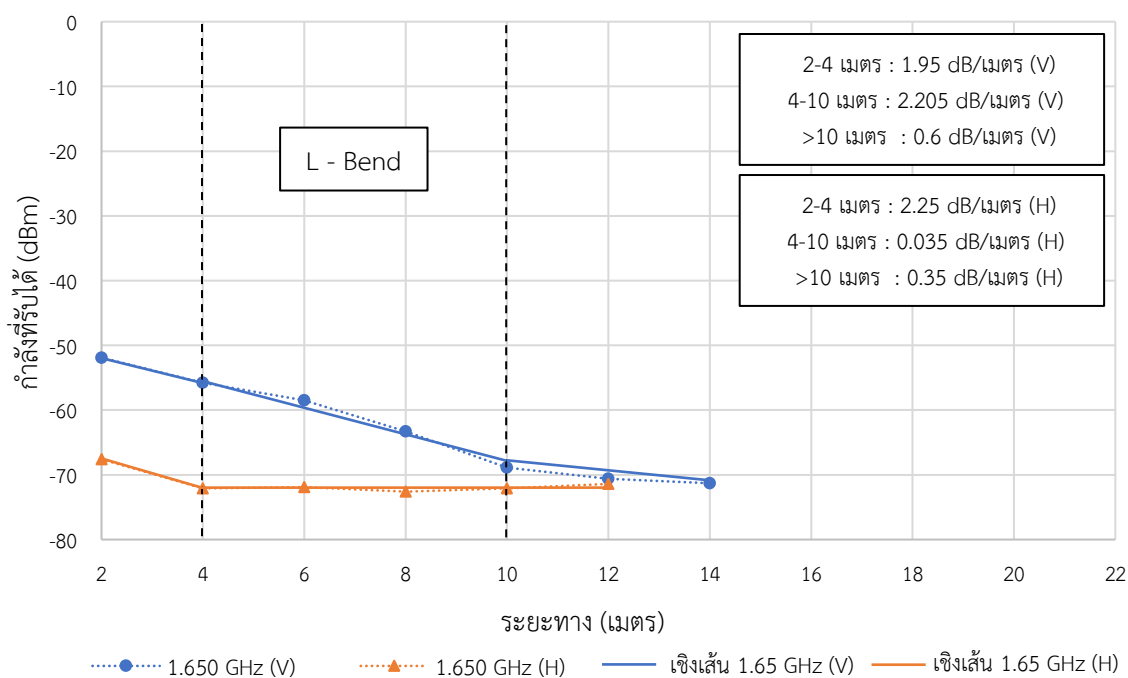
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-48	-63.7
2	4	-52.5	-71.7
3	6	-55.2	-71.3
4	8	-58.6	-70.5
5	10	-63.6	-71.4
6	12	-66.3	-71.9
7	14	-71.4	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 59 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 48 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz แบบ NLOS

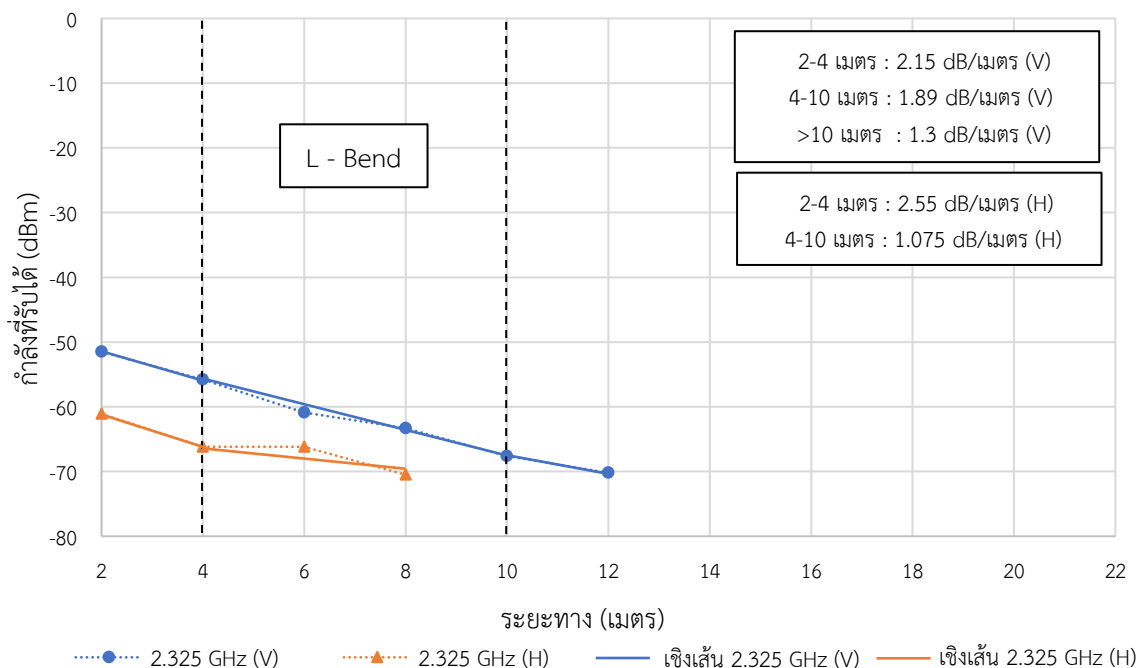
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51.9	-67.6
2	4	-55.8	-72.1
3	6	-58.5	-71.9
4	8	-63.3	-72.6
5	10	-68.9	-72.1
6	12	-70.6	-71.4
7	14	-71.3	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 60 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 49 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz แบบ NLOS

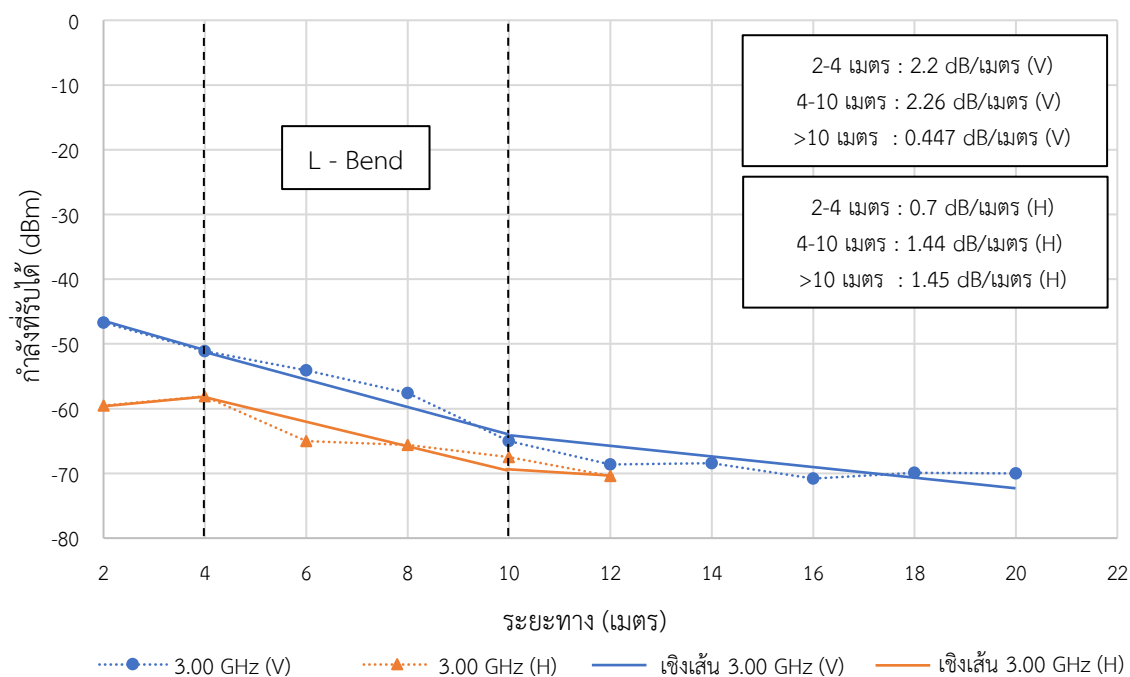
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51.5	-61.1
2	4	-55.8	-66.2
3	6	-60.9	-66.2
4	8	-63.3	-70.5
5	10	-67.6	วัดค่าไม่ได้
6	12	-70.2	วัดค่าไม่ได้
7	14	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 61 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 50 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46.7	-59.5
2	4	-51.1	-58.1
3	6	-54.1	-65
4	8	-57.6	-65.6
5	10	-65	-67.5
6	12	-68.6	-70.4
7	14	-68.4	วัดค่าไม่ได้
8	16	-70.8	วัดค่าไม่ได้
9	18	-69.9	วัดค่าไม่ได้
10	20	-70	วัดค่าไม่ได้



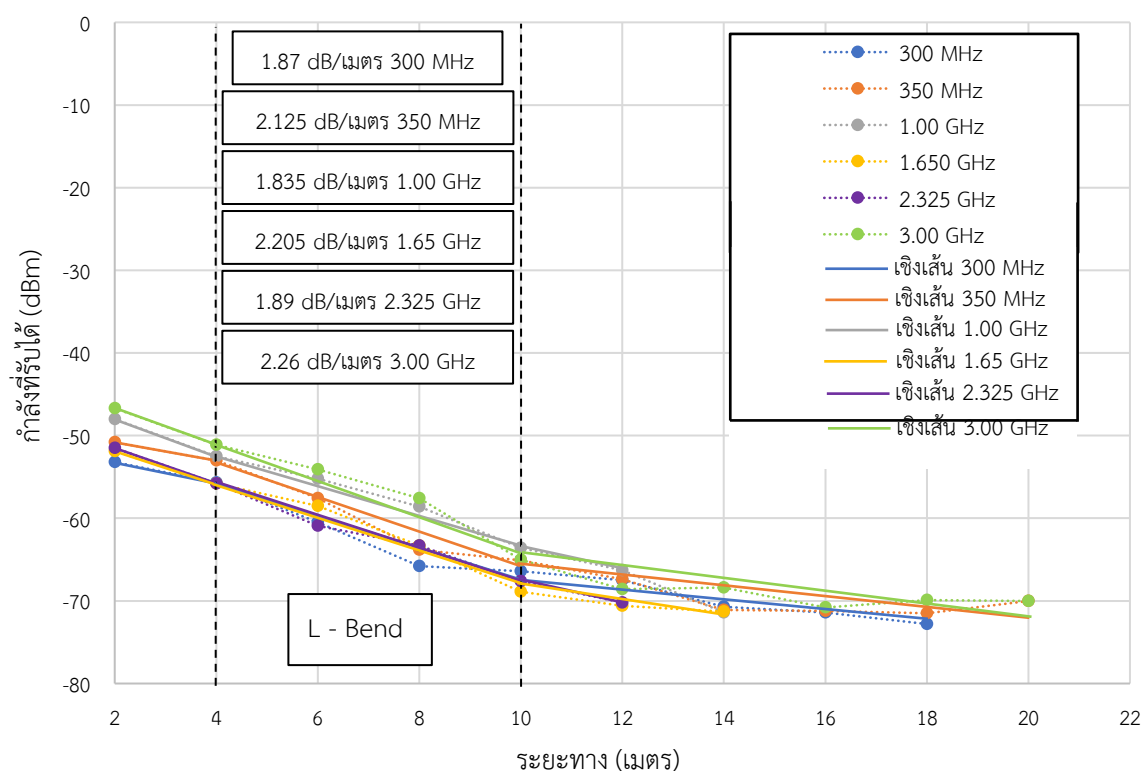
รูปที่ 62 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 46 – 50 และเมื่อนำแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 58 – 62 ซึ่งยังคงเป็นผลของการวัดทดสอบแบบ NLOS จะเห็นว่าผลการวัดทดสอบแบบ V-V นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพบสิ่งกีดขวางที่เป็นส่วนโค้งของผนังถ้ำที่ตำแหน่งระยะ 4 เมตรจนถึง 10 เมตร เหมือนกันทุกความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อเรียงตามลำดับความถี่จากต่ำไปสูงจะมีค่าประมาณ 12.1 dB, 11.1 dB, 13.1 dB, 11.8 dB และ 13.9 dB ที่ความถี่ 350 MHz 1000 MHz 1650 MHz 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ และเมื่อคำนวณให้เป็นค่าอัตราสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่จะได้เท่ากับ 2.125 dB/m @350 MHz, 1.835 dB/m @1000 MHz, 2.205 dB/m @1650 MHz, 1.89 dB/m @2325 MHz และ 2.26 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ และในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>10 เมตร) การสูญเสียการส่งผ่านจะลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.527 dB/m, 1.95 dB/m, 0.6 dB/m, 1.3 dB/m และ 0.447 dB/m ที่ความถี่ 350 MHz 1000 MHz 1650 MHz 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าตั้งแต่ความถี่ 1000 MHz ขึ้นไป เมื่อพ้นจากระยะ L-bend ไปสู่ระยะ LOS ที่ระยะ 12 – 14 เมตร คลื่นความถี่ดังกล่าวจะไม่สามารถผ่านไปถึงที่ตำแหน่งท้ายสุดของการวัดทดสอบที่ระยะ 20 เมตรได้เลย (หมายเหตุ: ค่ากำลังของคลื่นทุกความถี่ที่มีระดับต่ำกว่า -75 dBm เครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแถบความถี่ที่มีอยู่จะไม่สามารถวัดค่าได้เลย)

สำหรับกรณีที่เปลี่ยนการโพลาริซของสายอากาศภาครับให้เป็นแบบแนวนอนหรือที่เรียกว่าวิธีการวัดทดสอบแบบ V-H นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นกับทุกความถี่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพบสิ่งกีดขวางที่เป็นส่วนโค้งของผนังถ้ำที่ตำแหน่งระยะ 4 เมตรจนถึง 10 เมตร เช่นเดียวกับกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V แต่จะมีระดับของค่ากำลังที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการโพลาริซของคลื่นความถี่ที่ใช้ในการทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก สำหรับการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-H เรียงตามลำดับความถี่จากต่ำไปสูงจะมีค่าประมาณ 5.3 dB, 0.3 dB, 0 dB, 4.3 dB, และ 9.4 dB ที่ความถี่ 350 MHz 1000 MHz 1650 MHz 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ และเมื่อคำนวณให้เป็นค่าอัตราสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่จะได้เท่ากับ 1.035 dB/m @350 MHz, 0.085 dB/m @1000 MHz, 0.35 dB/m @1650 MHz, 1.075 dB/m @2325 MHz และ 1.44 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ และในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>10 เมตร) การสูญเสียการส่งผ่านจะลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.4 dB/m, 0.25 dB/m, 0.35 dB/m, 1.075 dB/m และ 1.45 dB/m ที่ความถี่ 350 MHz 1000 MHz 1650 MHz 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ และเช่นเดียวกันได้พบว่าตั้งแต่ความถี่ 1000 MHz ขึ้นไป เมื่อพ้นจากระยะ L-bend ไปสู่ระยะ LOS ที่ระยะประมาณ 12 – 14 เมตร คลื่นความถี่ดังกล่าวจะไม่สามารถผ่านไปถึงที่ตำแหน่งท้ายสุดของการวัดทดสอบที่ระยะ 20 เมตรได้เลยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบปรากฏการณ์ที่ผิดปกติในกรณีของคลื่นความถี่ตั้งแต่ 1000 MHz 1650 MHz และ 2325 MHz จะเกิดการลดทอนหรือสูญเสียอย่างมากเมื่อคลื่นเริ่มเดินทางเข้าสู่ระยะแรกๆ ของสิ่งกีดขวางที่เป็นผนังโค้งของถ้ำ ทำให้กำลังของคลื่นความถี่ที่ส่งมาถึงที่ระยะ 10 เมตรตามแนวโค้งเป็นต้นไปไม่สามารถวัดทดสอบด้วยเครื่องมือวัดที่มีอยู่ได้ ทำให้ตัวเลขของผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ NLOS ในบริเวณที่เป็นช่วง L-bend ที่ความถี่ตั้งแต่ 1000 MHz ขึ้นไปไม่สามารถเชื่อถือได้ว่าเป็นค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากมีค่าที่ต่ำมากเกินไป และมีค่าใกล้เคียงกันตลอดแนวโค้งของผนังถ้ำ

ตารางที่ 51 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V NLOS

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-53.2	-50.8	-48	-51.9	-51.5	-46.7
2	4	-55.7	-53	-52.5	-55.8	-55.8	-51.1
3	6	-60.5	-57.6	-55.2	-58.5	-60.9	-54.1
4	8	-65.8	-63.8	-58.6	-63.3	-63.3	-57.6
5	10	-66.4	-65.1	-63.6	-68.9	-67.6	-65
6	12	-67.5	-67.4	-66.3	-70.6	-70.2	-68.6
7	14	-70.7	-71.1	-71.4	-71.3	วัดค่าไม่ได้	-68.4
8	16	-71.4	-71.2	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-70.8
9	18	-72.8	-71.5	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-69.9
10	20	วัดค่าไม่ได้	-70	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-70

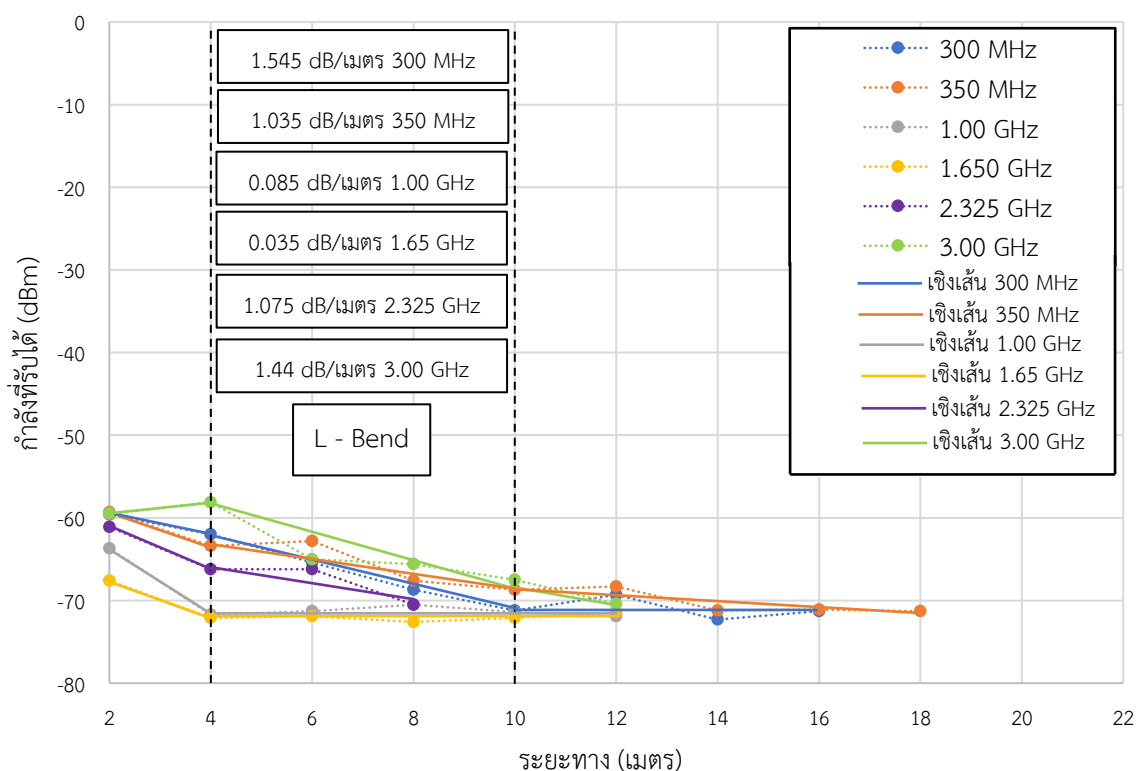


รูปที่ 63 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V NLOS

เมื่อนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-V NLOS มาเปรียบเทียบกับกัน ดังแสดงในรูปที่ 63 พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ที่เราสนใจก็คือช่วงตำแหน่งที่คลื่นวิทยุแต่ละความถี่ต้องพบกับอุปสรรคกีดขวางจากโครงสร้างของผนังถ้ำที่มีลักษณะเป็นแนวโค้งใกล้เคียงอักษรแอล (ในช่วง L-bend ของกราฟ) ซึ่งถือว่าเป็นตำแหน่งวิกฤตเพิ่มเติมขึ้นมาจากลักษณะของโพรงถ้ำที่เป็นแนวตรงและได้ถูกวัดทดสอบแล้วในรูปแบบของ LOS แต่เมื่อโพรงของถ้ำมีการเปลี่ยนจากแนวตรงมาเป็นแนวโค้งที่ใกล้เคียงอักษรตัวแอล หรือทิศทางการส่งผ่านคลื่นวิทยุเปลี่ยนรูปแบบเป็น NLOS ซึ่งแน่นอนว่าตำแหน่งจุดเปลี่ยนจาก LOS ไปสู่ NLOS ย่อมทำให้เกิดการสูญเสียหรือเกิดการลดทอนกำลังของคลื่นความถี่วิทยุค่อนข้างสูง (ถ้าเป็นภายในท่อนำคลื่นตัวนำสมบูรณ์ก็คือเกิดการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนโหมดการเดินทางของคลื่นนั่นเอง) ดังนั้นการพิจารณาอัตราการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นบริเวณ L-bend จึงมีความน่าสนใจมากที่สุดจากผลการวัดทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 5.43 เมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่เท่ากับ 1.87 dB/m @300 MHz, 2.125 dB/m @350 MHz, 1.835 dB/m @1000 MHz, 2.205 dB/m @1650 MHz, 1.89 dB/m @2325 MHz และ 2.26 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ จากข้อมูลผลการวัดทดสอบดังกล่าว จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นบนสภาพแวดล้อมของผนังถ้ำที่เหมือนกันและมีการสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตรมีค่าเรียงลำดับจากน้อยไปหามากก็คือที่ความถี่ 1000 MHz (1.835 dB/m), 300 MHz (1.87 dB/m), 2325 MHz (1.89 dB/m), 350 MHz (2.125 dB/m), 1650 MHz (2.205 dB/m) และ 3000 MHz (2.26 dB/m) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของค่ากำลังตั้งแต่เริ่มต้นที่มีการส่งออกจากสายอากาศภาคส่งด้วยค่า EIRP ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละความถี่ จะยังคงเห็นว่าคลื่นความถี่สูงสุดที่ 3000 MHz ที่มีการส่งผ่านในเส้นทางโพรงถ้ำที่เป็นแบบ LOS ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าความถี่อื่น ซึ่งมีสาเหตุจากเกิดการสะสมกักเก็บพลังงานไว้ภายในโพรงถ้ำที่มีแนวตรงมากกว่าและเกิดการส่งผ่านด้วยการสะท้อนผนังโพรงถ้ำไปยังปลายทางที่ทำการวัดทดสอบได้ดีกว่า แต่ขณะที่ถูกส่งผ่านสิ่งกีดขวางแบบเดียวกันในรูปแบบ NLOS พบว่ามีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตร ณ บริเวณนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามยังพบอีกว่าคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 300 MHz และ 350 MHz แม้ว่าในช่วงเริ่มต้นของการส่งแบบ LOS ภายในโพรงถ้ำจะมีระดับของค่ากำลังงานต่ำกว่าของความถี่ 1000 MHz และ 3000 MHz ก็ตาม แต่เมื่อถูกส่งผ่านออกไปในเส้นทางที่เป็น LOS <-> NLOS <-> LOS จะยังคงมีค่ากำลังเมื่อถึงจุดวัดทดสอบปลายทางใกล้เคียงกับความถี่ 3000 MHz ได้เช่นกัน

ตารางที่ 52 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านทุกคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H NLOS

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-59.6	-59.3	-63.7	-67.6	-61.1	-59.5
2	4	-62	-63.4	-71.7	-72.1	-66.2	-58.1
3	6	-65.4	-62.8	-71.3	-71.9	-66.2	-65
4	8	-68.7	-67.6	-70.5	-72.6	-70.5	-65.6
5	10	-71.2	-68.7	-71.4	-72.1	วัดค่าไม่ได้	-67.5
6	12	-69.3	-68.3	-71.9	-71.4	วัดค่าไม่ได้	-70.4
7	14	-72.3	-71.2	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	-71.3	-71.1	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	-71.3	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 64 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H ตามเส้นทาง NLOS

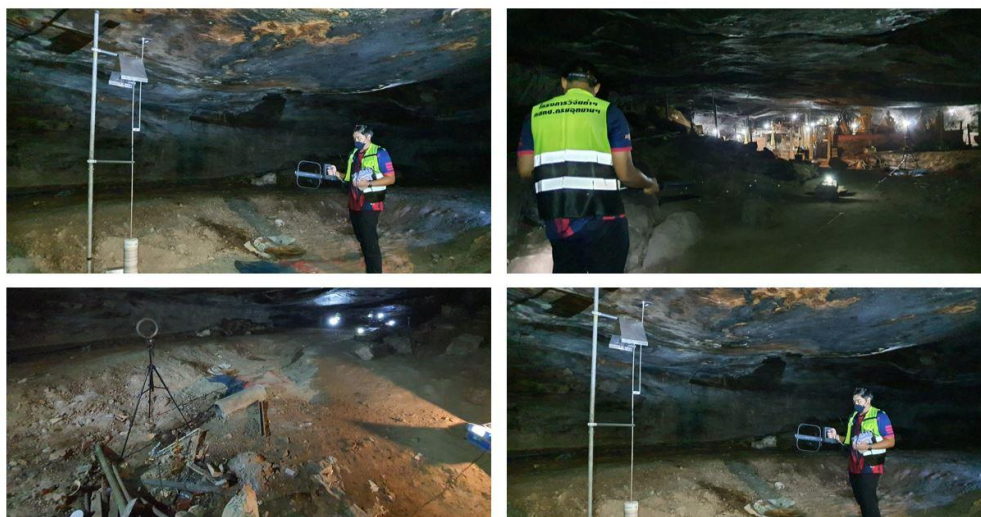
ในรูปที่ 64 เป็นการนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-H NLOS มาเปรียบเทียบกับอีกครั้งหนึ่งเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในเงื่อนไขเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับให้เปลี่ยนเป็นแนวนอน พบว่าเมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้น จะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่เท่ากับ 1.545 dB/m @300 MHz, 1.035 dB/m @350 MHz, 0.085 dB/m @1000 MHz, 0.35 dB/m @1650 MHz, 1.075 dB/m @2325 MHz และ 1.44 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ จากข้อมูลผลการวัดทดสอบดังกล่าวจะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นบนสภาพแวดล้อมของผนังถ้ำที่เหมือนกันและมีการสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตรมีค่าเรียงลำดับจากน้อยไปหามากก็คือที่ความถี่ 1000 MHz (0.085 dB/m), 1650 MHz (0.35 dB/m), 350 MHz (1.035 dB/m), 2325 MHz (1.075 dB/m), 3000 MHz (1.44 dB/m) และ 300 MHz (1.545 dB/m) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามได้พบว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 1000 MHz ขึ้นไป ค่ากำลังที่มีการส่งผ่านจากบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบ LOS ไปเป็นแบบ NLOS จะลดลงอย่างมาก (ยกเว้นที่ความถี่ 3000 MHz มีการยกระดับสูงขึ้นแบบผิดปกติ) เมื่อเทียบกับที่ความถี่ 300 MHz และ 350 MHz ดังนั้นจึงไม่อาจจะใช้ตัวเลขของอัตราการสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตรที่มีค่าต่ำมากๆ มาพิจารณาว่าเป็นค่าที่ถูกต้องได้ เนื่องจากทุกๆ ระยะ 2 เมตรที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ L-bend มีค่ากำลังที่รับได้ต่ำแบบผิดปกติและมีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ระยะ 4-10 เมตร อย่างไรก็ตามยังมีข้อสังเกตที่น่าสนใจก็คือ พฤติกรรมของคลื่นความถี่ 300 MHz และ 350 MHz เมื่อถูกส่งผ่านจากจุดเริ่มต้น LOS <-> NLOS <-> LOS ปลายทาง กลับมีความสามารถในการเลี้ยวเบนออกมาจากพื้นที่ NLOS ได้ไกลกว่าความถี่ 3000 MHz ที่เคยเกิดขึ้นเมื่อทำการวัดทดสอบด้วยรูปแบบ V-V NLOS

6.2 การวัดทดสอบการส่งผ่านของคลื่นความถี่วิทยุในถ้ำปาฏิหาริย์

1) การวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุในระดับสายตา (LOS)

ถ้ำปาฏิหาริย์หรือชื่อเดิมว่าถ้ำมืด อยู่ในบริเวณวัดถ้ำปาฏิหาริย์ ต.นาโพธิ์กลาง อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี เป็นถ้ำชนิดหินทรายที่มีเส้นทางเดินมีลักษณะเป็นโพรงถ้ำที่มีความกว้างตั้งแต่ 4-12 เมตร ความสูงของเพดานถ้ำตั้งแต่ 1-5 เมตร และมีระยะทางตลอดโพรงถ้ำที่คดเคี้ยวไปมาประมาณ 650 เมตร สำหรับหินทรายที่เป็นองค์ประกอบของถ้ำปาฏิหาริย์ทางคณะผู้วิจัยได้นำตัวอย่างหินทรายไปเข้าห้องปฏิบัติการธรณีวิทยาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่ามีค่าความต้านทานของเนื้อหิน (rock resistivity) เฉลี่ยอยู่ที่ 0.8186×10^6 โอห์มต่อเมตร ($\Omega\text{-m}$) ค่าความนำไฟฟ้า (rock conductivity) เฉลี่ยของเนื้อหินอยู่ที่ 1.2305×10^6 ซีเมนต์ต่อเมตร ($\text{S}\text{-m}^{-1}$) และค่าซึมซาบ (permeability) เท่ากับ 30.52 md โดยอ้างอิงวิธีการวัดทดสอบและคำนวณจาก [2] และ [3] โดยอ้างอิงวิธีการวัดทดสอบจาก [2] และ [3] ในถ้ำนี้ไม่มีกระแสไฟฟ้าภายในต้องใช้เครื่องปั่นไฟจากภายนอกที่ได้จัดเตรียมไปด้วย มีความสะดวกในการเดินทางเข้าออกถ้ำแต่มีค้ำค้ำภายในถ้ำจำนวนมากคอยบิรบกวนการปฏิบัติงานตลอดเวลา รวมทั้งบริเวณพื้นถ้ำจะมีจำนวนมูลค้างคาวสะสมจำนวนมากทำให้มีฝุ่นและเกิดกลิ่นคล้ายแก๊สที่ไม่สะดวกต่อการหายใจ ในการปฏิบัติการวัดทดสอบได้ใช้กระบวนการทุกขั้นตอนและเครื่องมือทุกชนิดเช่นเดียวกับการปฏิบัติงานภายในถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่ ที่ได้เคยแสดงไว้ในรูปที่ 8 และได้แสดงภาพในขณะปฏิบัติการวัดทดสอบไว้ในรูปที่ 65 และ 66 โดยในการวัดทดสอบแบบ LOS ภายในโพรงถ้ำนี้ยังคงกำหนดตำแหน่งของการวัดทดสอบไว้ที่สถานที่เดียวกันกับที่

ได้นำเสนอผลไว้ในรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ที่ผ่านมา และยังคงกำหนดตำแหน่งสุดท้ายของสายอากาศภาครับให้อยู่ที่ระยะห่าง 24 เมตรเช่นเดิม เมื่อวัดจากสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งอยู่ที่ปากโพรงถ้ำเป้าหมาย จากนั้นจึงแสดงผลการวัดทดสอบไว้ในตารางที่ 5.36 – 5.52 และกราฟแสดงผลค่ากำลังที่วัดได้เพื่อนำไปสู่การอภิปรายวิเคราะห์ไว้ในรูปที่ 5.44 – 5.60



รูปที่ 65 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VHF แบบ LOS ภายในถ้ำปาฏิหาริย์



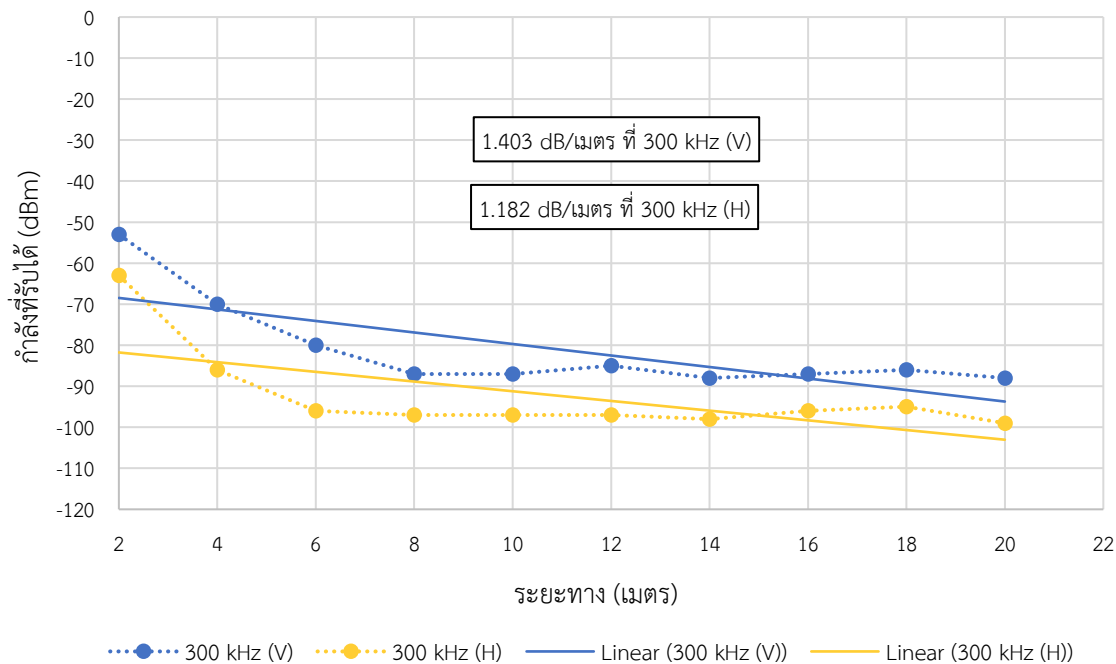
รูปที่ 66 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ LOS ภายในถ้ำปาฏิหาริย์

ตารางที่ 53 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-53	-63
2	4	-70	-86
3	6	-80	-96
4	8	-87	-97
5	10	-87	-97
6	12	-85	-97
7	14	-88	-98
8	16	-87	-96
9	18	-86	-95
10	20	-88	-99

จากผลการทดสอบที่ถูกรับบันทึกไว้ในตารางที่ 53 ผู้วิจัยได้ทำการวัดทดสอบโดยใช้กระบวนการเช่นเดียวกับการวัดทดสอบที่ใช้ในถ้าหลวงเชียงดาว จ.เชียงใหม่ โดยยังกำหนดค่ากำลังส่งของเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุให้คงที่ทุกความถี่ที่ +20 dBm หรือ 100 mW เช่นเดิม เพื่อวัดทดสอบพฤติกรรมการสะท้อน/การเลี้ยวเบนของคลื่นความถี่วิทยุ การสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุในเส้นทางการแพร่คลื่น และการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่เดียวกันในขณะเดินทางออกไปในเส้นทางเดียวกัน จากนั้นนำมาพล็อตเป็นกราฟเชิงเปรียบเทียบระหว่างการวัดทดสอบแบบ LOS ทั้ง V-V และ V-H จะทำให้เห็นพฤติกรรมดังกล่าวของคลื่นตามความถี่ที่กำหนดได้อย่างครบถ้วนและชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 67

จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz ในโพรงถ้าตามระยะทางแบบ LOS ที่มีหิ้งอกหินย้อยกีดขวางน้อยที่สุดได้ถูกพล็อตในรูปที่ 67 จะเห็นว่าความลาดเอียงแบบเส้นตรง (Linear line) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง (Free space) ระยะ 2 เมตรแรก ค่าระดับความแรงของคลื่นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดในโพรงถ้าประมาณ 20 dB ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากส่วนของความยาวคลื่นของคลื่นความถี่ 300 kHz ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นพื้นผิว (Surface wave) เป็นส่วนใหญ่ และมีคุณสมบัติเป็นคลื่นตรง (Direct wave) ที่แพร่ในอากาศได้บ้างแต่ไม่มีประสิทธิภาพเท่าใดนัก จึงทำให้สายอากาศภาครับสามารถรับส่วนที่เป็นคลื่นพื้นผิวที่เกิดจากแผ่นหินทรายที่อยู่ติดกับผนังถ้าทางด้านขวาซึ่งมีระยะใกล้กับสายอากาศภาครับและมีเฟสใกล้เคียงกับคลื่นตรงที่ระยะ 2 เมตร ส่งผลให้ระดับความแรงของคลื่นที่รับได้ ณ ตำแหน่งนี้มีค่าสูงขึ้นกว่าค่าที่คำนวณในสภาวะอากาศว่าง (ปรากฏการณ์นี้จะหมดไปเมื่อมีการวัดทดสอบด้วยความถี่ที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด) แต่เมื่อตำแหน่งของสายอากาศภาครับอยู่ที่ระยะ 4-10 เมตร

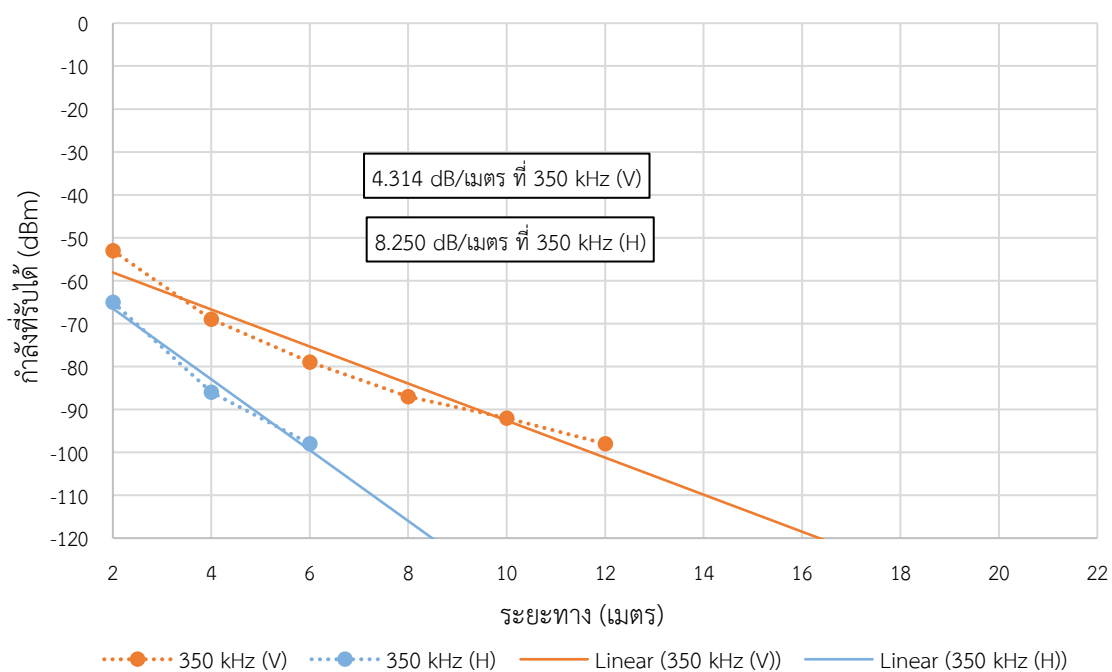


รูปที่ 67 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ระดับของสัญญาณจะลดลงอย่างเป็นนัยสำคัญ เนื่องจากตำแหน่งของสายอากาศภาครับเริ่มอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของโพรงถ้าจึงรับสัญญาณที่เป็นส่วนของคลื่นตรงเป็นหลักทำให้ประสิทธิภาพการรับสัญญาณลดลง และเมื่อพ้นระยะ 10 เมตรออกไป ระดับความสูงของถ้าจะเริ่มลดลงขณะที่ระดับของสัญญาณที่รับได้ก็ลดลงจนต่ำสุดและมีระดับที่ใกล้เคียงกันจนถึงระยะ 20 เมตร (V-V = -88 dBm, V-H = -99 dBm) เมื่อนำมาคำนวณในรูปของค่าความลาดชันของการสูญเสียในเส้นทาง (path loss slope) การเดินทางของคลื่น จะได้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นที่ ความถี่ 300 kHz ในกรณีแบบ V-V LOS ประมาณ 1.403 dB/m (decibel/meter) และกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H มีค่าประมาณ 1.182 dB/m อย่างไรก็ตามระดับความแรงของสัญญาณที่วัดทดสอบแบบ V-V มีค่าสูงกว่าการทดสอบแบบ V-H ตลอดระยะทาง จึงสรุปได้ว่าการส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V มีประสิทธิภาพสูงมากกว่า แม้ว่าจะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรต่ำกว่าก็ตาม นอกจากนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ 300 kHz ภายในโพรงถ้า หินทรายที่ใกล้เคียงแนวเส้นตรงและไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างทางเดินในโพรงถ้าด้วย และยังพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวที่ความถี่ 350 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ก็มีลักษณะที่คล้ายกัน ดังนั้นจึงขอรายงานผลในรูปของตารางและรูปภาพของทุกความถี่จนครบทั้งหมด และอภิปรายผลการวัดทดสอบในกรณี LOS เพียงครั้งเดียวในตอนท้ายของขั้นตอนนี้

ตารางที่ 54 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz แบบ LOS

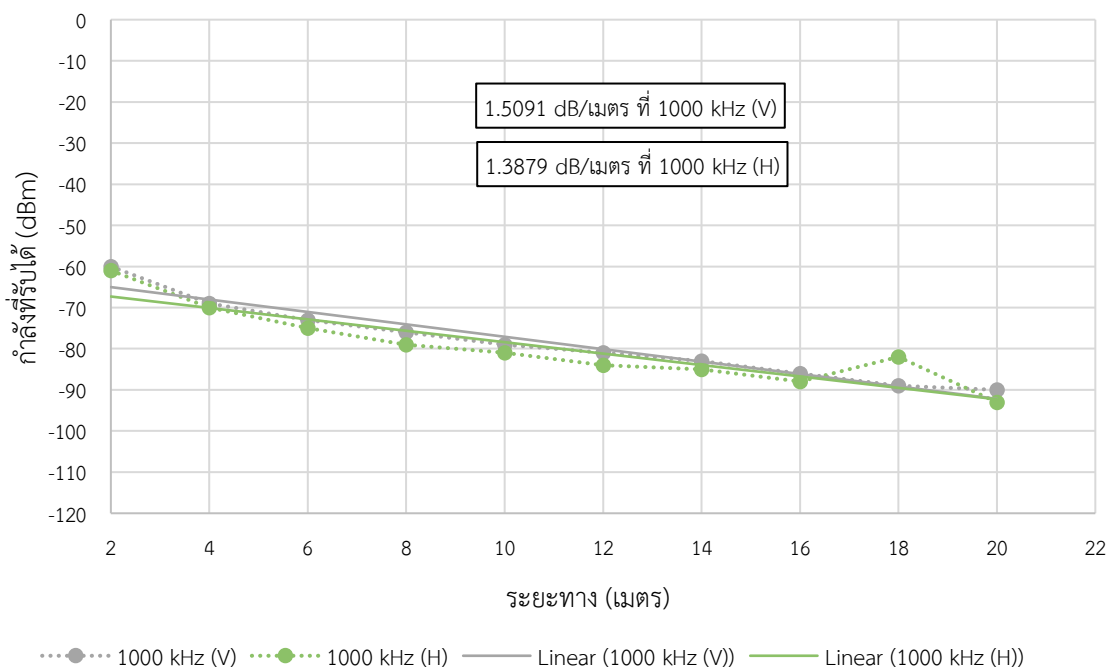
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-53	-65
2	4	-69	-86
3	6	-79	-98
4	8	-87	-
5	10	-92	-
6	12	-98	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 68 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 55 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz แบบ LOS

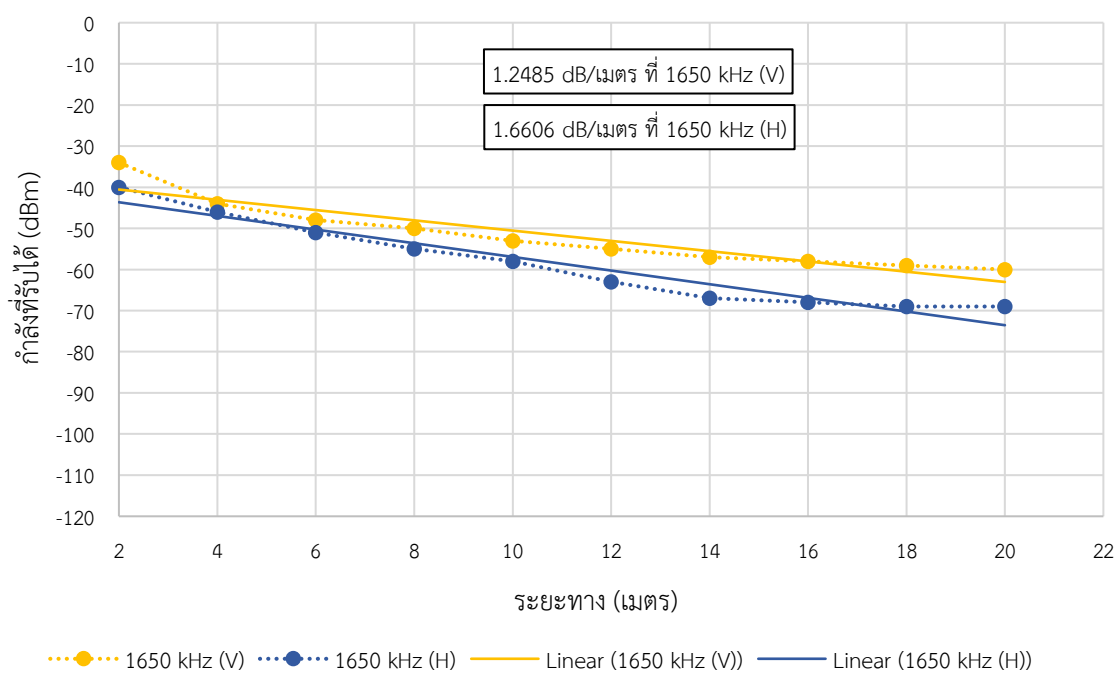
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่รับได้ โพลาริไรซ์ V-V (dBm)	กำลังที่รับได้ โพลาริไรซ์ V-H (dBm)
1	2	-60	-61
2	4	-69	-70
3	6	-73	-75
4	8	-76	-79
5	10	-79	-81
6	12	-81	-84
7	14	-83	-85
8	16	-86	-88
9	18	-89	-82
10	20	-90	-93



รูปที่ 69 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 56 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz แบบ LOS

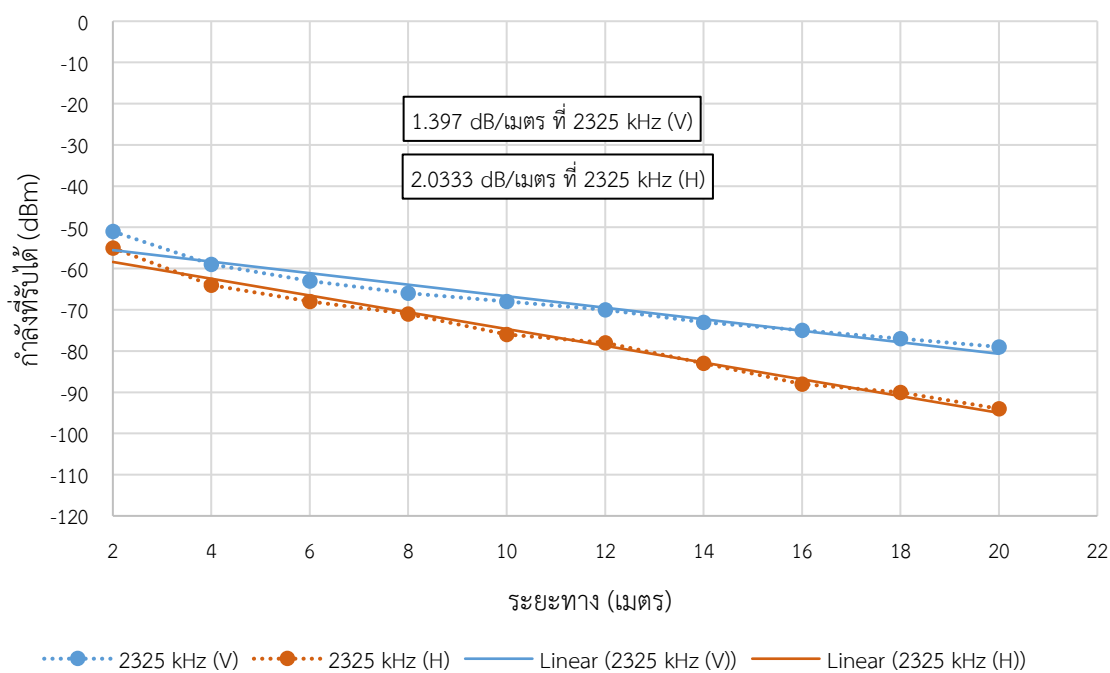
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่รับได้ โพลาริไรซ์ V-V (dBm)	กำลังที่รับได้ โพลาริไรซ์ V-H (dBm)
1	2	-34	-40
2	4	-44	-46
3	6	-48	-51
4	8	-50	-55
5	10	-53	-58
6	12	-55	-63
7	14	-57	-67
8	16	-58	-68
9	18	-59	-69
10	20	-60	-69



รูปที่ 70 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 57 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz แบบ LOS

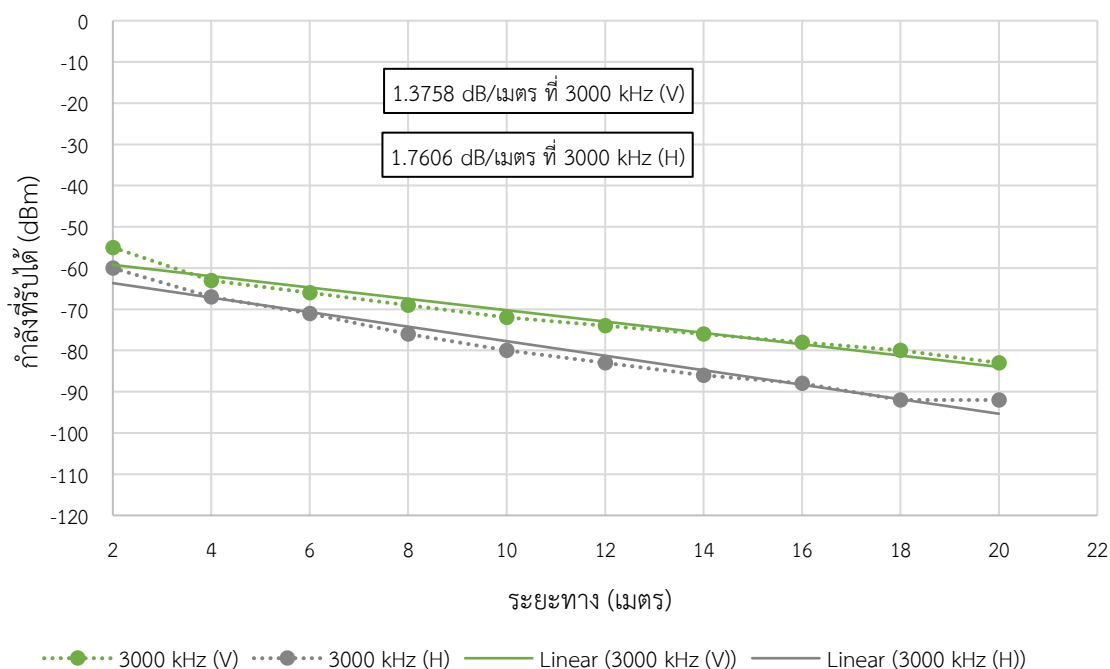
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51	-55
2	4	-59	-64
3	6	-63	-68
4	8	-66	-71
5	10	-68	-76
6	12	-70	-78
7	14	-73	-83
8	16	-75	-88
9	18	-77	-90
10	20	-79	-94



รูปที่ 71 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 58 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz แบบ LOS

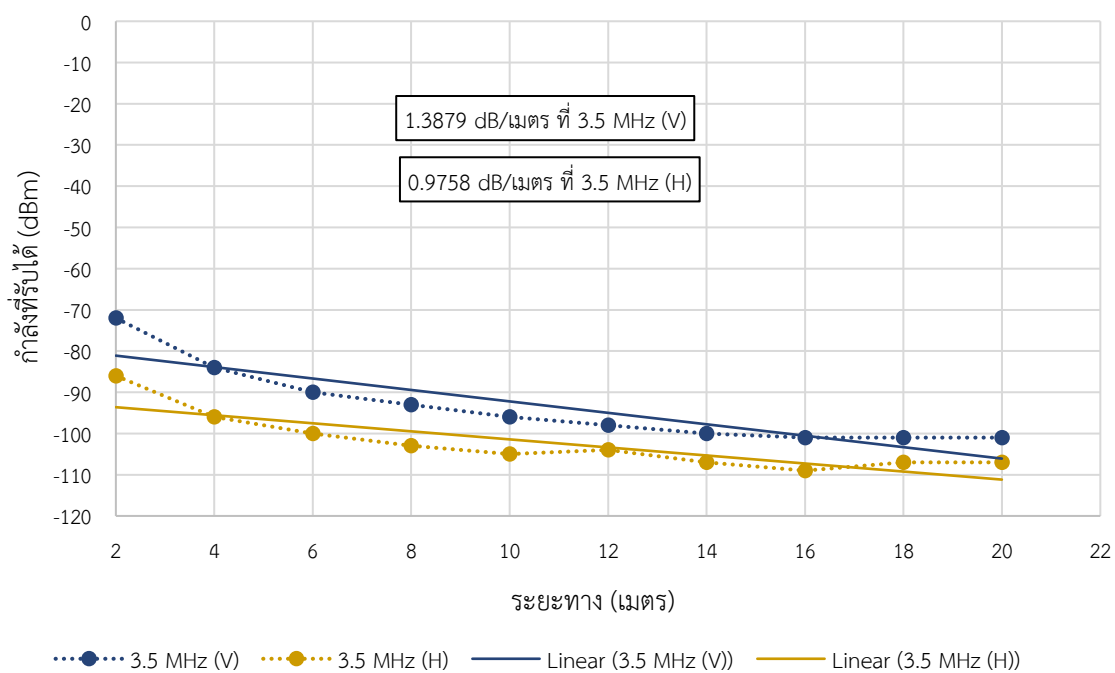
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-55	-60
2	4	-63	-67
3	6	-66	-71
4	8	-69	-76
5	10	-72	-80
6	12	-74	-83
7	14	-76	-86
8	16	-78	-88
9	18	-80	-92
10	20	-83	-92



รูปที่ 72 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 59 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz แบบ LOS

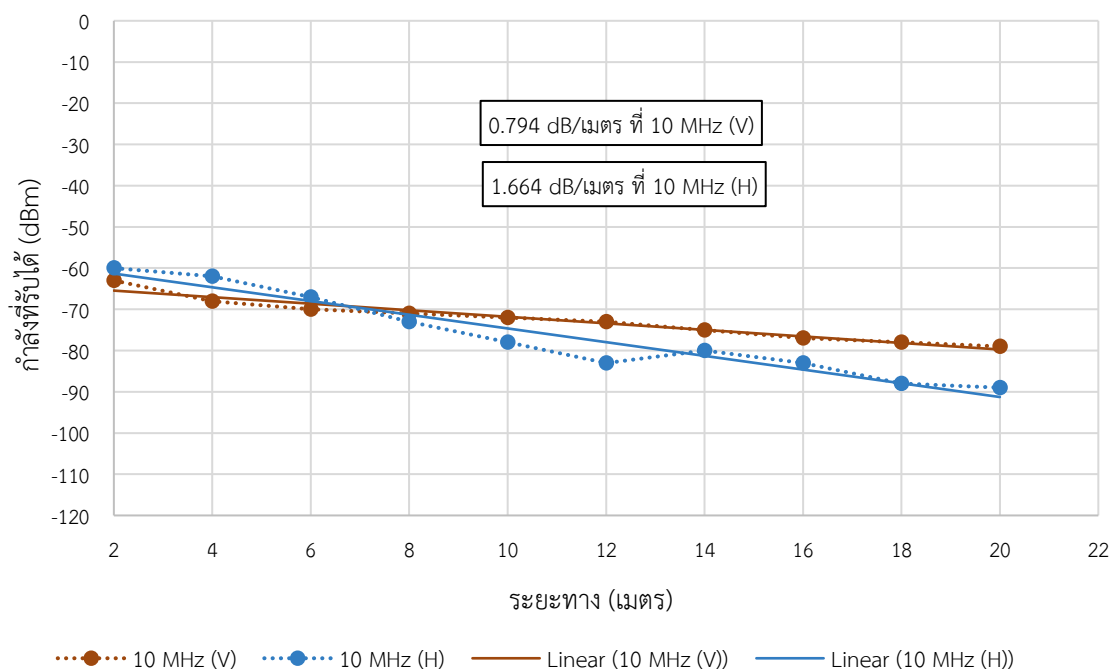
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-72	-86
2	4	-84	-96
3	6	-90	-100
4	8	-93	-103
5	10	-96	-105
6	12	-98	-104
7	14	-100	-107
8	16	-101	-109
9	18	-101	-107
10	20	-101	-107



รูปที่ 73 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 60 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz แบบ LOS

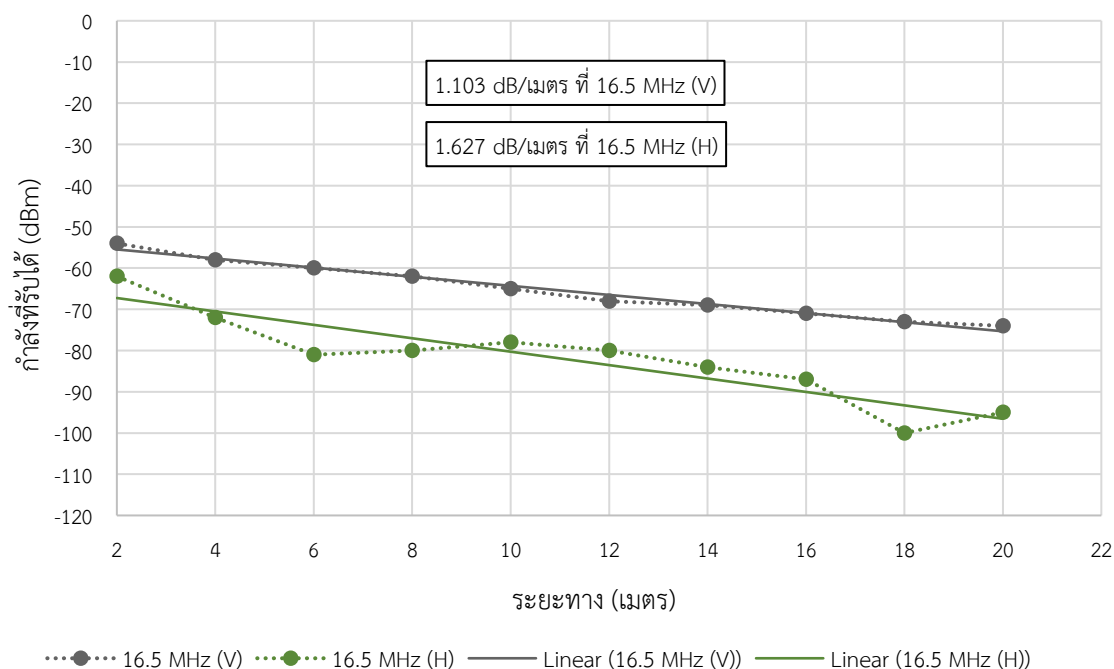
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-63	-60
2	4	-68	-62
3	6	-70	-67
4	8	-71	-73
5	10	-72	-78
6	12	-73	-83
7	14	-75	-80
8	16	-77	-83
9	18	-78	-88
10	20	-79	-89



รูปที่ 74 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 61 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz แบบ LOS

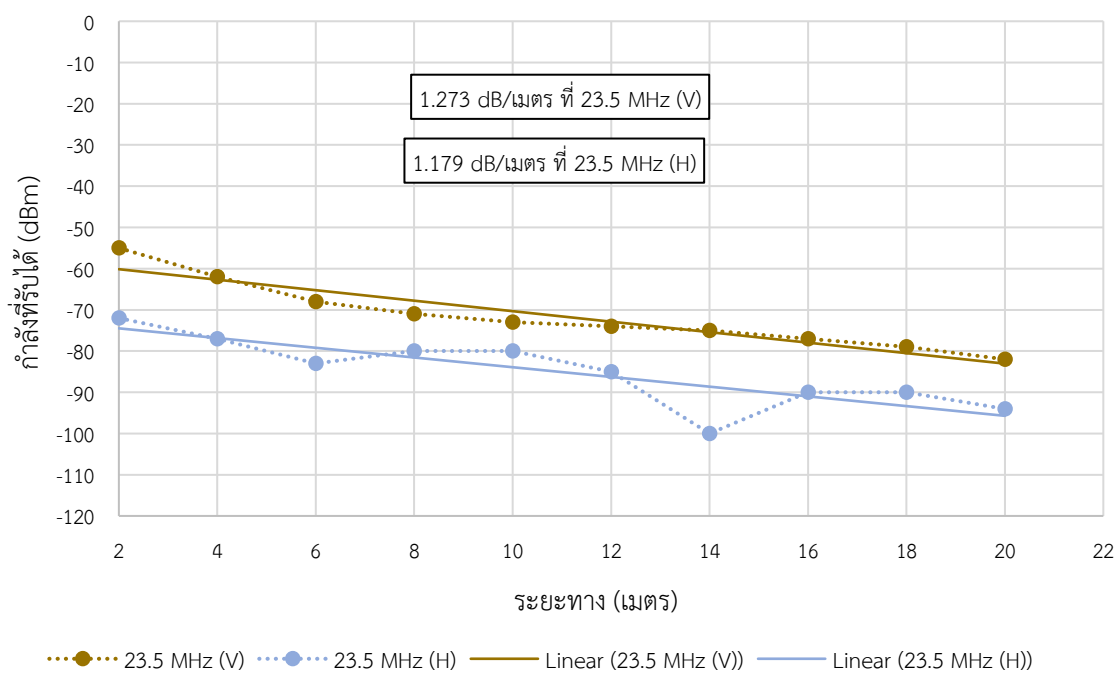
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-54	-62
2	4	-58	-72
3	6	-60	-81
4	8	-62	-80
5	10	-65	-78
6	12	-68	-80
7	14	-69	-84
8	16	-71	-87
9	18	-73	-100
10	20	-74	-95



รูปที่ 75 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 62 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz แบบ LOS

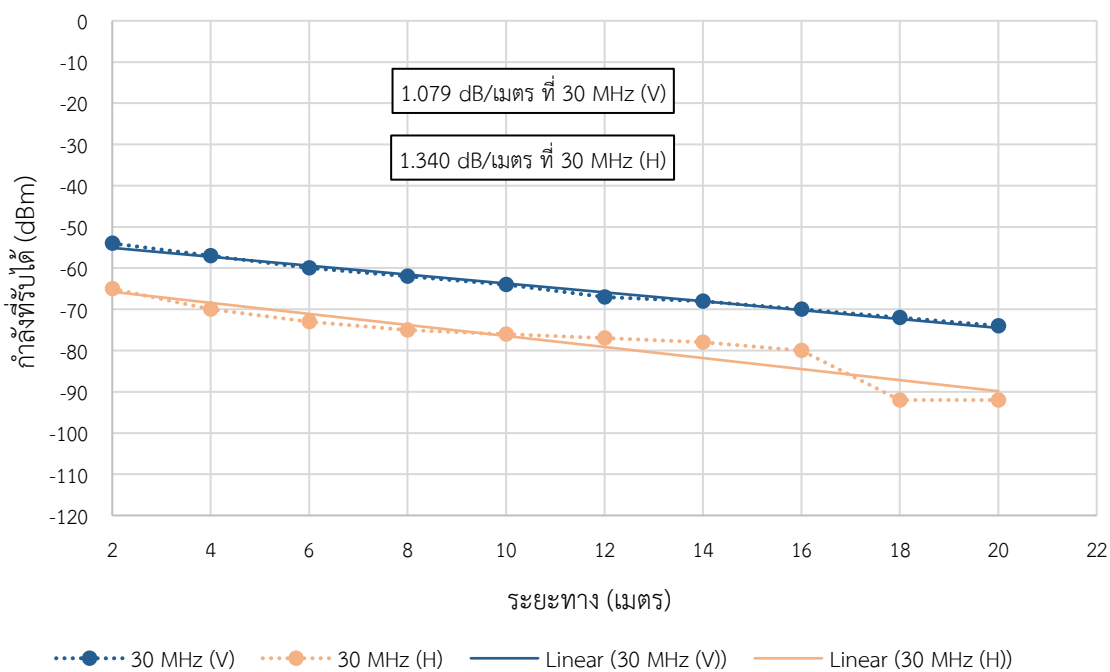
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-55	-72
2	4	-62	-77
3	6	-68	-83
4	8	-71	-80
5	10	-73	-80
6	12	-74	-85
7	14	-75	-100
8	16	-77	-90
9	18	-79	-90
10	20	-82	-94



รูปที่ 76 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 63 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz แบบ LOS

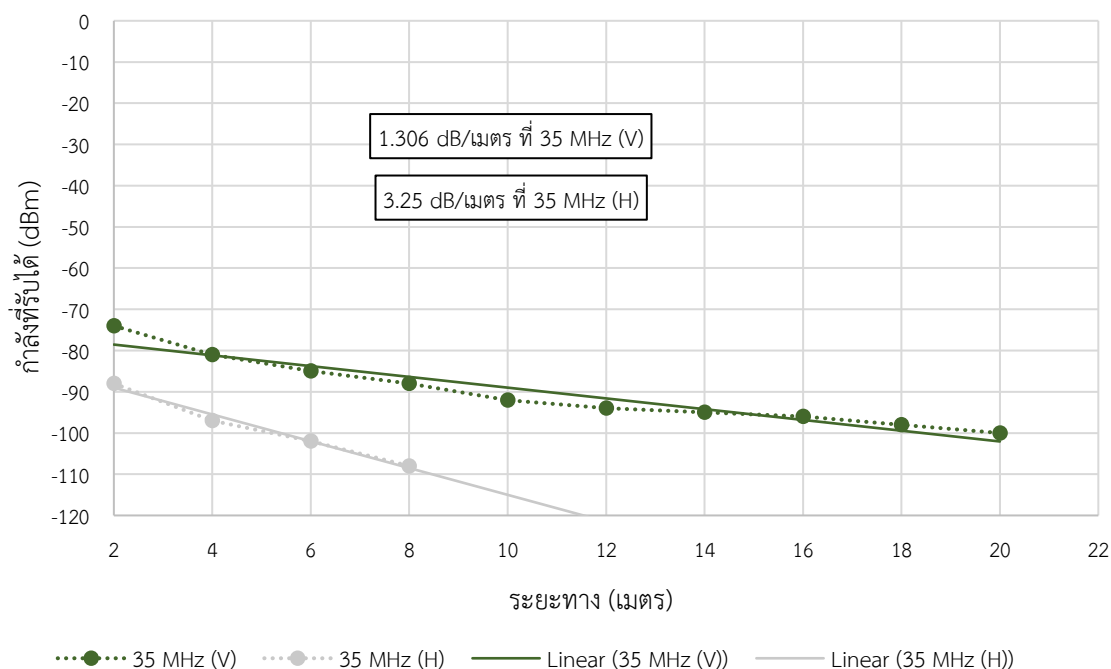
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-54	-65
2	4	-57	-70
3	6	-60	-73
4	8	-62	-75
5	10	-64	-76
6	12	-67	-77
7	14	-68	-78
8	16	-70	-80
9	18	-72	-92
10	20	-74	-92



รูปที่ 77 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 64 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz แบบ LOS

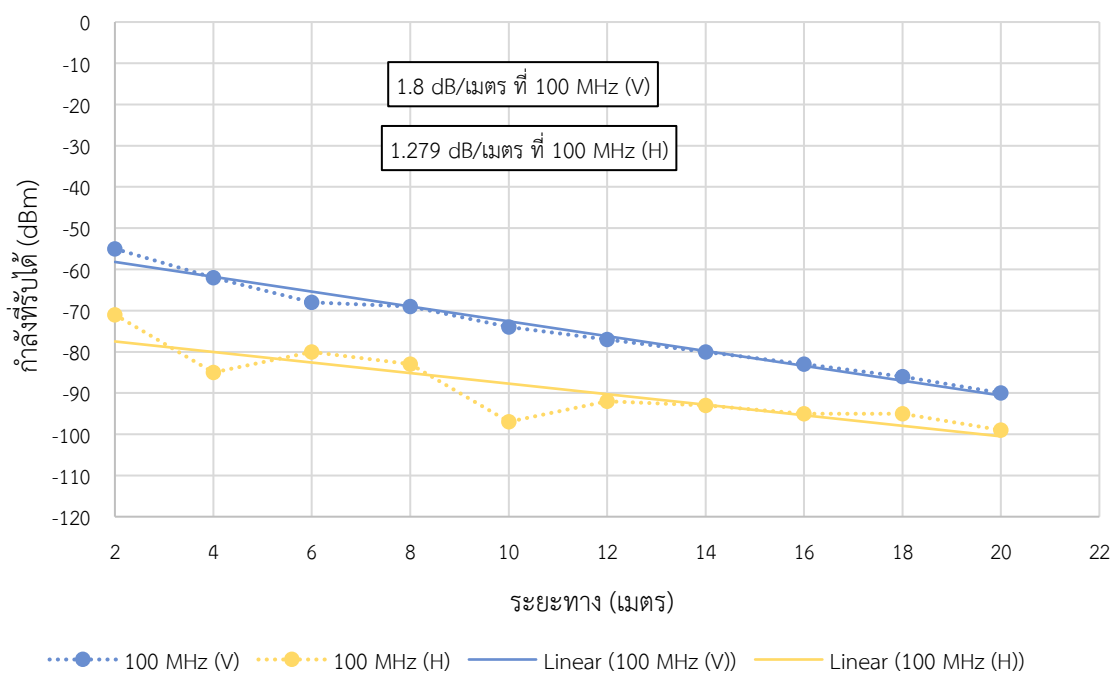
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-74	-88
2	4	-81	-97
3	6	-85	-102
4	8	-88	-108
5	10	-92	-
6	12	-94	-
7	14	-95	-
8	16	-96	-
9	18	-98	-
10	20	-100	-



รูปที่ 78 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 65 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz แบบ LOS

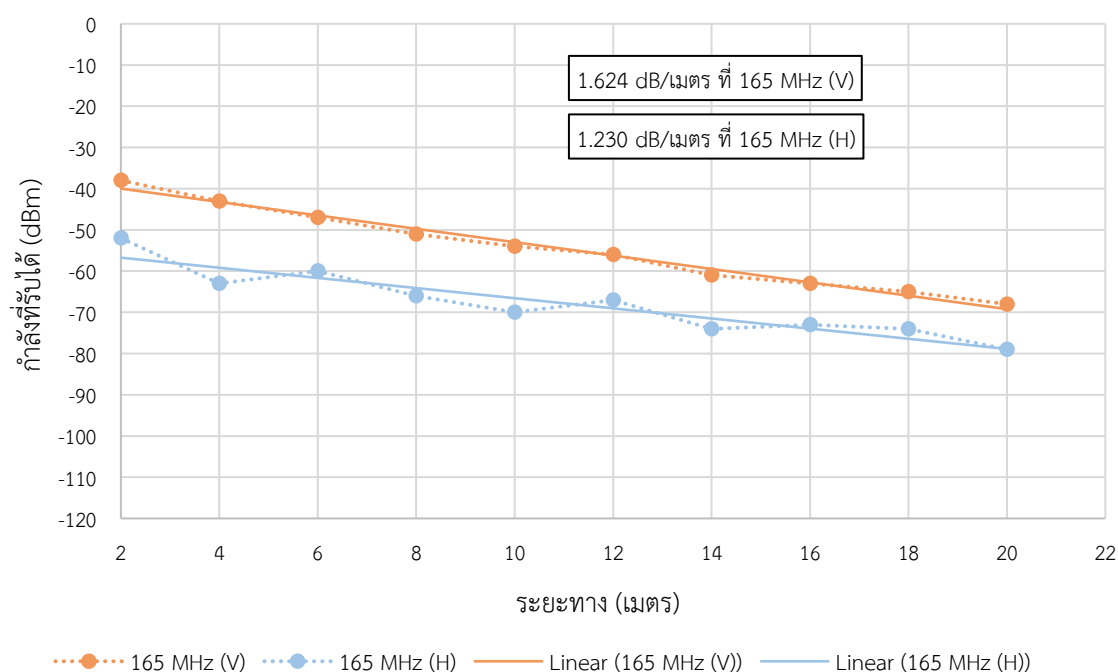
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-55	-71
2	4	-62	-85
3	6	-68	-80
4	8	-69	-83
5	10	-74	-97
6	12	-77	-92
7	14	-80	-93
8	16	-83	-95
9	18	-86	-95
10	20	-90	-99



รูปที่ 79 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 66 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz แบบ LOS

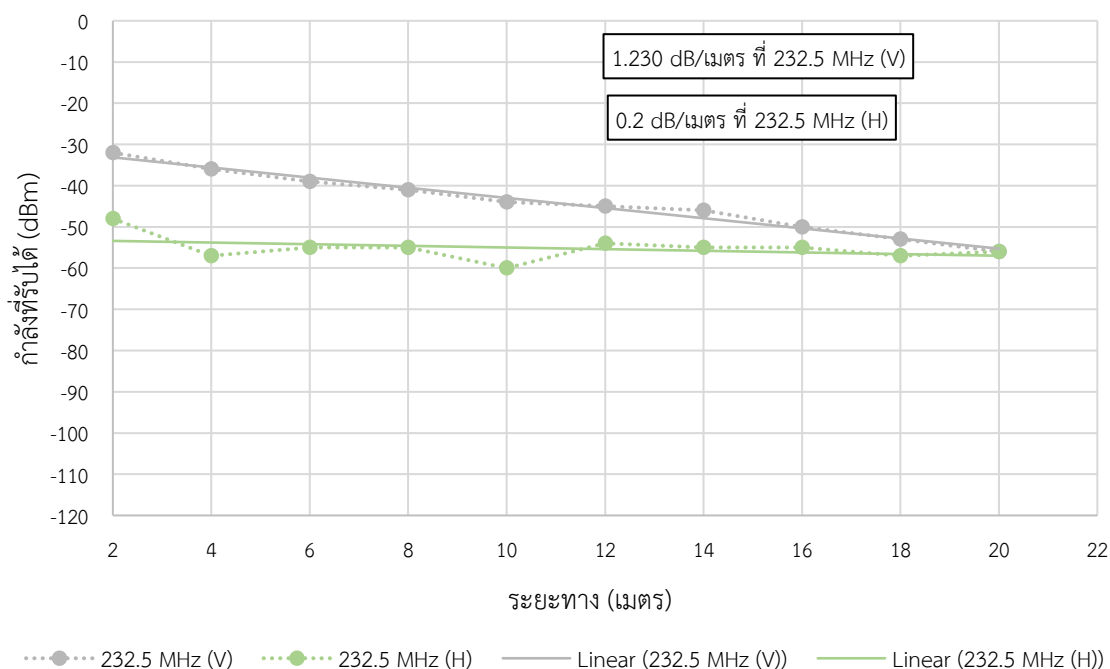
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-38	-52
2	4	-43	-63
3	6	-47	-60
4	8	-51	-66
5	10	-54	-70
6	12	-56	-67
7	14	-61	-74
8	16	-63	-73
9	18	-65	-74
10	20	-68	-79



รูปที่ 80 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 67 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-32	-48
2	4	-36	-57
3	6	-39	-55
4	8	-41	-55
5	10	-44	-60
6	12	-45	-54
7	14	-46	-55
8	16	-50	-55
9	18	-53	-57
10	20	-56	-56

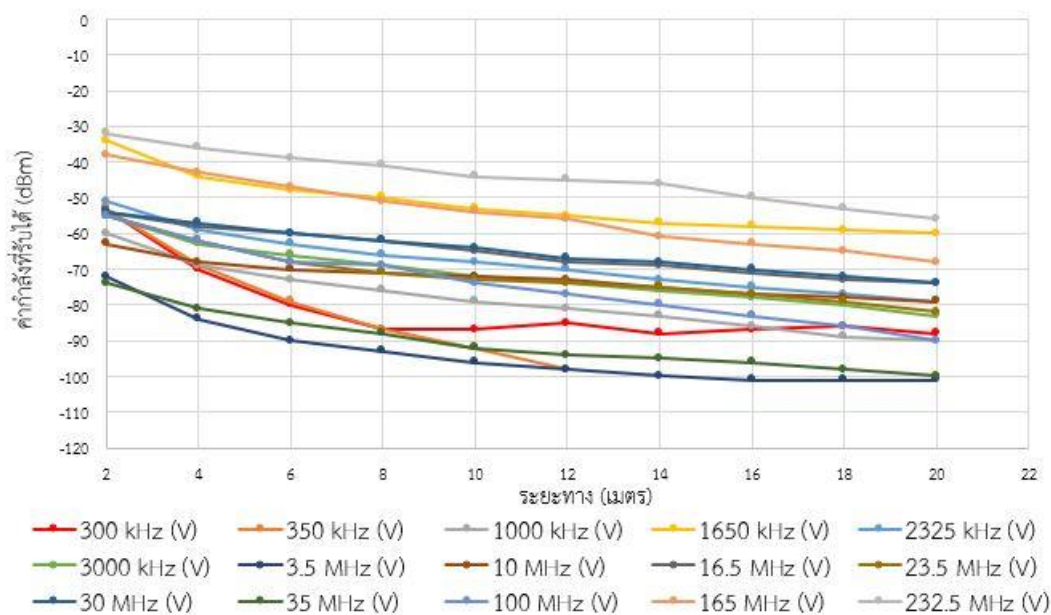


รูปที่ 81 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 54 – 67 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 68 - 81 พบว่าค่ากำลังที่วัดได้ภายในโพรงถ้ำหินทรายยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทางทิศทางเดียวกันกับความลาดเอียงแบบเส้นตรงซึ่งเป็นค่ากำลังที่ได้คำนวณภายใต้เงื่อนไขของอากาศว่างทุกๆ ระยะ 2 เมตรเช่นเดิม และเมื่อนำมาคำนวณในรูปของค่าความลาดชันของการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่น จะได้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นความถี่กรณีแบบ V-V LOS ประมาณ 1.403 dB/m, 4.314 dB/m, 1.5091 dB/m, 1.2485 dB/m, 1.397 dB/m, 1.3758 dB/m, 1.3879 dB/m, 0.794 dB/m, 1.103 dB/m, 1.273 dB/m, 1.079 dB/m, 1.306 dB/m, 1.8 dB/m, 1.642 dB/m และ 1.230 dB/m และในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H จะได้ค่ากำลังประมาณ 1.182 dB/m, 8.250 dB/m, 1.3879 dB/m, 1.6606 dB/m, 2.0333 dB/m, 1.7606 dB/m, 0.9758 dB/m, 1.664 dB/m, 1.627 dB/m, 1.179 dB/m, 1.340 dB/m, 3.25 dB/m, 1.279 dB/m, 1.230 dB/m และ 0.2 dB/m ที่ความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz 350 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ตามลำดับ ในขณะที่การส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H และไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำหินปูนที่มีสภาพแวดล้อมเหมือนกัน และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบ จึงได้นำผลการวัดทดสอบในตาราง 53 ถึง 67 แยกกรณีเฉพาะที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V มาสรุปรวมทุกความถี่ที่ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่งดังแสดงในตารางที่ 68 และรูปที่ 82 และกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H ได้สรุปรวมเอาไว้ในตารางที่ 69 และรูปที่ 83 ตามลำดับ

ตารางที่ 68 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-53	-53	-60	-34	-51	-55	-72	-63	-54	-55	-54	-74	-55	-38	-32
2	4	-70	-69	-69	-44	-59	-63	-84	-68	-58	-62	-57	-81	-62	-43	-36
3	6	-80	-79	-73	-48	-63	-66	-90	-70	-60	-68	-60	-85	-68	-47	-39
4	8	-87	-87	-76	-50	-66	-69	-93	-71	-62	-71	-62	-88	-69	-51	-41
5	10	-87	-92	-79	-53	-68	-72	-96	-72	-65	-73	-64	-92	-74	-54	-44
6	12	-85	-98	-81	-55	-70	-74	-98	-73	-68	-74	-67	-94	-77	-56	-45
7	14	-88	-	-83	-57	-73	-76	-100	-75	-69	-75	-68	-95	-80	-61	-46
8	16	-87	-	-86	-58	-75	-78	-101	-77	-71	-77	-70	-96	-83	-63	-50
9	18	-86	-	-89	-59	-77	-80	-101	-78	-73	-79	-72	-98	-86	-65	-53
10	20	-88	-	-90	-60	-79	-83	-101	-79	-74	-82	-74	-100	-90	-68	-56



รูปที่ 82 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

จากผลการวัดทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V LOS ภายในโพรงถ้ำหินทรายที่มีขนาดความกว้างของโพรงถ้ำประมาณ 15 เมตร (ความสูงเพดานถ้ำประมาณ 3 เมตร) ณ จุดติดตั้งสายอากาศส่ง และมีความกว้างค้อยๆ ลดลงเหลือประมาณ 8 เมตร ที่ปลายทางของการวัดที่ระยะ 20 เมตร (ความสูงเพดานถ้ำประมาณ 1.20 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 82 เมื่อนำค่าการสูญเสียการส่งผ่านทั้งหมดมาเรียงลำดับจากค่าน้อยสุดไปหาค่ามากที่สุดของแต่ละความถี่จะได้ดังนี้ 0.794 dB/m (10 MHz), 1.079 dB/m (30 MHz), 1.103 dB/m (16.5 MHz), 1.230 dB/m (232.5 MHz), 1.2485 dB/m (1650 kHz), 1.273 dB/m (23.5 MHz), 1.3758 dB/m (3000 kHz), 1.3879 dB/m (3.5 MHz), 1.306 dB/m (35 MHz), 1.397 dB/m (2325 kHz), 1.403 dB/m (300 kHz), 1.5091 dB/m (1000 kHz), 1.624 dB/m (165 MHz), 1.8 dB/m (100 MHz) และ 4.314 dB/m (350 kHz) ตามลำดับ โดยผลการวัดทดสอบครั้งนี้ได้พบข้อสังเกตอย่างมีนัยสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ 1) ที่ความถี่ 10 MHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่ำสุดที่ 0.794 dB/m 2) ที่ความถี่ 350 kHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงสุดที่ 4.314 dB/m และ 3) ที่ความถี่นอกเหนือจากนี้จะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่าน ตั้งแต่ 1.079 dB/m ถึง 1.624 dB/m

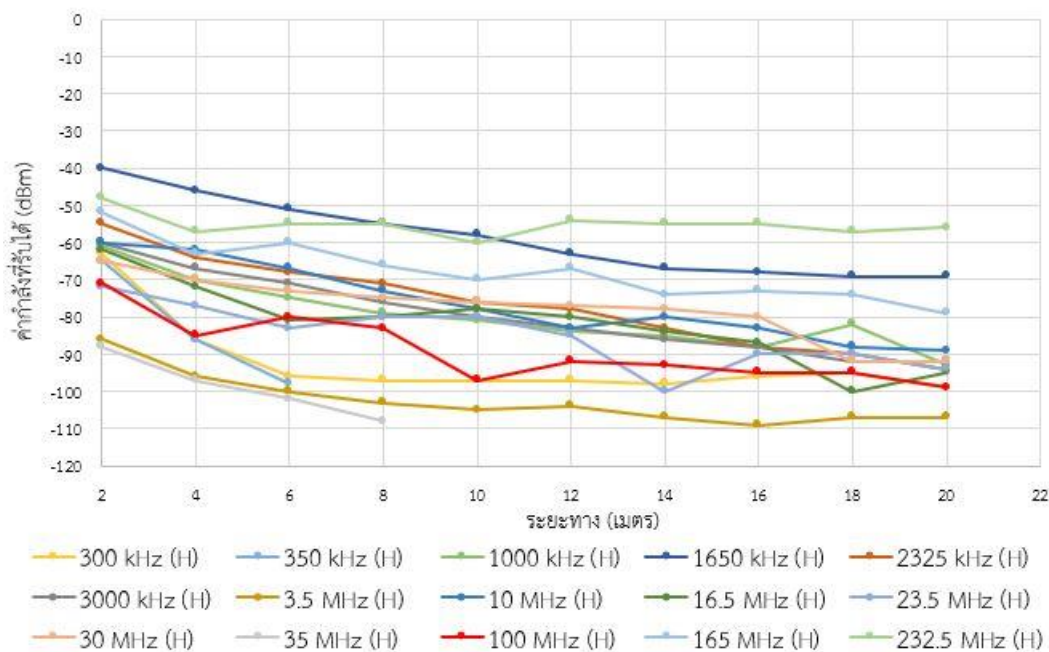
หากเริ่มพิจารณาจากความกว้างของโพรงถ้ำ ณ ตำแหน่งติดตั้งสายอากาศภาคส่ง จะพบว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น (Half-wavelength) ของความถี่ 10 MHz จะเท่ากับ 15 เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของถ้ำบริเวณดังกล่าว จึงอาจเปรียบเสมือนเป็น Dominant mode ของโหมดการแพร่คลื่นแบบ TE (Transverse Electric) ที่ถูกส่งผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide) จึงทำให้สามารถส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz นี้เข้าไปในโพรงถ้ำโดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรต่ำที่สุด ในขณะที่ความถี่สูงกว่า 10 MHz จะมีลักษณะใกล้เคียงกับการแพร่คลื่นในโหมดที่สูงกว่า (Higher-order modes) ทำให้มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ LOS สูงขึ้นและมากกว่าที่ความถี่ 10 MHz ส่วนกรณีของความถี่ที่ต่ำกว่า 10 MHz ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของการแพร่คลื่น ได้แก่ 1) ความถี่ที่ต่ำกว่า 2 MHz (300 kHz, 350 kHz, 1000 kHz, 1235 kHz และ 1650 kHz) ซึ่งมีการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่น

ดินหรือคลื่นผิว (Ground waves or surface wave propagation) และ 2) ความถี่สูงกว่า 2 MHz (2325 kHz, 3000 kHz และ 3500 kHz จะมีการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้า (Skywave propagation) และคลื่นอากาศ (Free-space propagation) ทำให้คลื่นความถี่ใน 2 กลุ่มนี้ยังคงสามารถแพร่เข้าไปในโพรงถ้ำได้ด้วยการสะท้อนที่ผิวของโพรงและพื้นผิวของถ้ำหินทรายโดยใช้การโพลาริซ์แบบแนวตั้ง (หากส่งด้วยการโพลาริซ์แนวนอนจะทำให้องค์ประกอบสนามไฟฟ้าลัดวงจรกับพื้นดิน) ทำให้ผลรวมกำลังของคลื่นสามารถรับได้ด้วยสายอากาศภาครับ ณ ตำแหน่งที่กำหนด อย่างไรก็ตามการส่งและรับคลื่นที่มีการแพร่แบบคลื่นดินโดยใช้วิธีแบบ LOS ก็ยังไม่สามารถกระทำได้ในระยะไกลตามที่ต้องการเนื่องจากการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรยังมีค่าสูงมาก

นอกจากนี้ยังพบปรากฏการณ์ของการแพร่คลื่นที่ความถี่ 350 kHz แบบ LOS ในโพรงถ้ำหินทรายจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงมากถึง 4.314 dB/m ซึ่งในขั้นต้นคณะผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าที่ความถี่ 350 kHz นี้ น่าจะเกิดผลกระทบจากโครงสร้างของโพรงถ้ำหินทรายมากกว่าความถี่อื่นๆ จึงทำให้เกิดการสูญเสียการส่งผ่านฯ มากผิดปกติ ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัดทดสอบด้วยการส่งผ่านจากพื้นผิวภายนอกถ้ำผ่านชั้นหินทรายกลับเข้าไปในโพรงถ้ำอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 69 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-63	-65	-61	-40	-55	-60	-86	-60	-62	-72	-65	-88	-71	-52	-48
2	4	-86	-86	-70	-46	-64	-67	-96	-62	-72	-77	-70	-97	-85	-63	-57
3	6	-96	-98	-75	-51	-68	-71	-100	-67	-81	-83	-73	-102	-80	-60	-55
4	8	-97	-	-79	-55	-71	-76	-103	-73	-80	-80	-75	-108	-83	-66	-55
5	10	-97	-	-81	-58	-76	-80	-105	-78	-78	-80	-76	-	-97	-70	-60
6	12	-97	-	-84	-63	-78	-83	-104	-83	-80	-85	-77	-	-92	-67	-54
7	14	-98	-	-85	-67	-83	-86	-107	-80	-84	-100	-78	-	-93	-74	-55
8	16	-96	-	-88	-68	-88	-88	-109	-83	-87	-90	-80	-	-95	-73	-55
9	18	-95	-	-82	-69	-90	-92	-107	-88	-100	-90	-92	-	-95	-74	-57
10	20	-99	-	-93	-69	-94	-92	-107	-89	-95	-94	-92	-	-99	-79	-56

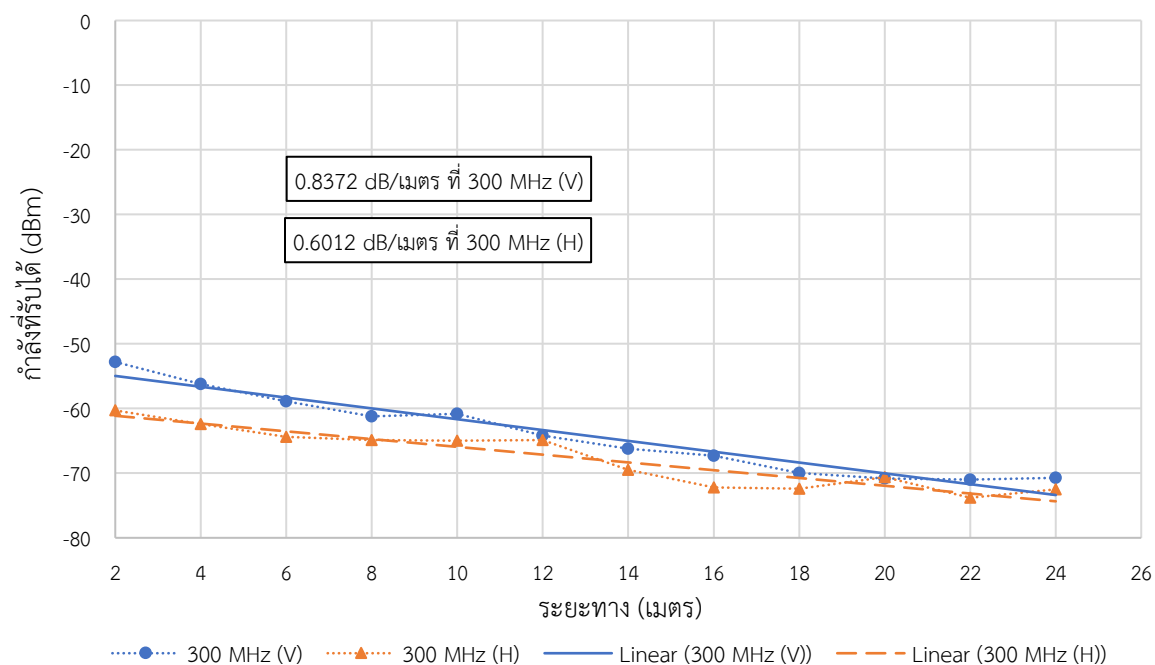


รูปที่ 83 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

ในรูปที่ 83 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H LOS ของแต่ละความถี่เข้าด้วยกัน จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ยังคงมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการวัดทดสอบแบบ V-V LOS คือมีการสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น เท่ากับ 1.182 dB/m @300 kHz, 8.250 dB/m @350 kHz, 1.3879 dB/m @1000 kHz, 1.6606 dB/m @1650 kHz, 2.0333 dB/m @2325 kHz, 1.7606 dB/m @3000 kHz, 0.9758 dB/m @3.5 MHz, 1.664 dB/m @10 MHz, 1.627 dB/m @16.5 MHz, 1.179 dB/m @23.5 MHz, 1.340 dB/m @30 MHz, 3.25 dB/m @35MHz, 1.279 dB/m @100 MHz, 1.230 dB/m @165 MHz และ 0.2 dB/m @232.5 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตเช่นเดิมว่าที่ความถี่ 350 kHz จะเกิดพฤติกรรมเช่นเดียวกับกรณีของการวัดทดสอบแบบโพลาไรซ์ V-V แต่เกิดการสูญเสียการส่งผ่านมากกว่าเกือบ 4 dB ในขณะที่ความถี่อื่นก็เช่นเดียวกันจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านอยู่ระหว่าง 0.2 dBm/m ถึง 3.25 dBm/m อย่างไรก็ตามหากส่งกำลังด้วยการโพลาไรซ์แนวตั้งและรับกำลังด้วยสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบแนวนอนจะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่าแบบการโพลาไรซ์แนวตั้งทั้งภาครับและภาคส่ง จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการสื่อสารด้วยการโพลาไรซ์แบบ V-H อย่างแน่นอน

ตารางที่ 70 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-52.8	-60.3
2	4	-56.2	-62.4
3	6	-58.9	-64.4
4	8	-61.2	-64.9
5	10	-60.8	-65
6	12	-64.2	-64.9
7	14	-66.2	-69.5
8	16	-67.3	-72.2
9	18	-70	-72.4
10	20	-70.8	-70.6
11	22	-71	-73.8
12	24	-70.7	-72.5

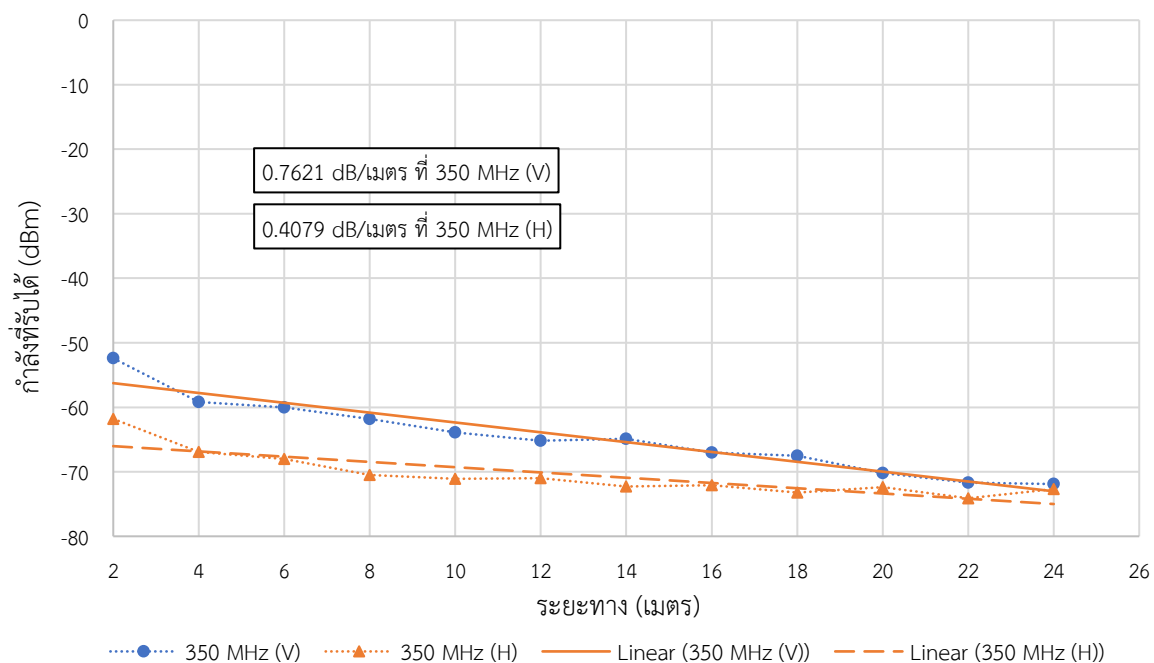


รูปที่ 84 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ในโพรงถ้ำหินทรายตามระยะทางแบบ LOS ของวัดถ้ำป่าภูหิหารีย์จะไม่มีหिनงอกหินย้อยกีดขวางเหมือนกับภายในโพรงถ้ำเชียงดาว แต่จะแตกต่างกันเรื่องของโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างกว่าและมีความสูงของเพดานถ้ำค่อนข้างต่ำ ผลการวัดทดสอบด้วยคลื่นความถี่ 300 MHz แบบ V-V LOS ที่ถูกบันทึกลงในตารางที่ 70 ได้ถูกพล็อตและแสดงในรูปที่ 84 โดยการวัดทดสอบดำเนินการที่ระยะห่างครั้งละ 2 เมตรระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับจนถึงระยะสุดท้ายที่ 24 เมตรเช่นเดียวกับที่วัดทดสอบภายในโพรงถ้ำหินปูนในถ้ำเชียงดาว เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปของเส้นความชันการสูญเสียการส่งผ่านในเส้นทางของคลื่นความถี่ 300 MHz ในรูปที่ 5.46 จะเห็นว่าความลาดเอียงแบบเส้นตรงค่อนข้างจะซ้อนทับบนตำแหน่งของค่ากำลังที่เกิดการสูญเสียในแต่ละระยะ 2 เมตรที่วัดทดสอบภายในโพรงถ้ำ และเมื่อคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านในเส้นทางการเดินทางของคลื่น ความถี่ 300 MHz ในกรณีแบบ V-V LOS จะได้ค่าประมาณ 0.8372 dB/m และ 0.6012 dB/m ในกรณีแบบ V-H อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าการส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V คงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H แม้ว่า จะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรสูงกว่าแบบ V-V ก็ตาม แสดงว่าไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ 300 MHz ภายในโพรงถ้ำหินทรายเมื่อการส่งและรับคลื่นเป็นแบบโพลาไรซ์เดียวกัน

ตารางที่ 71 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz แบบ LOS

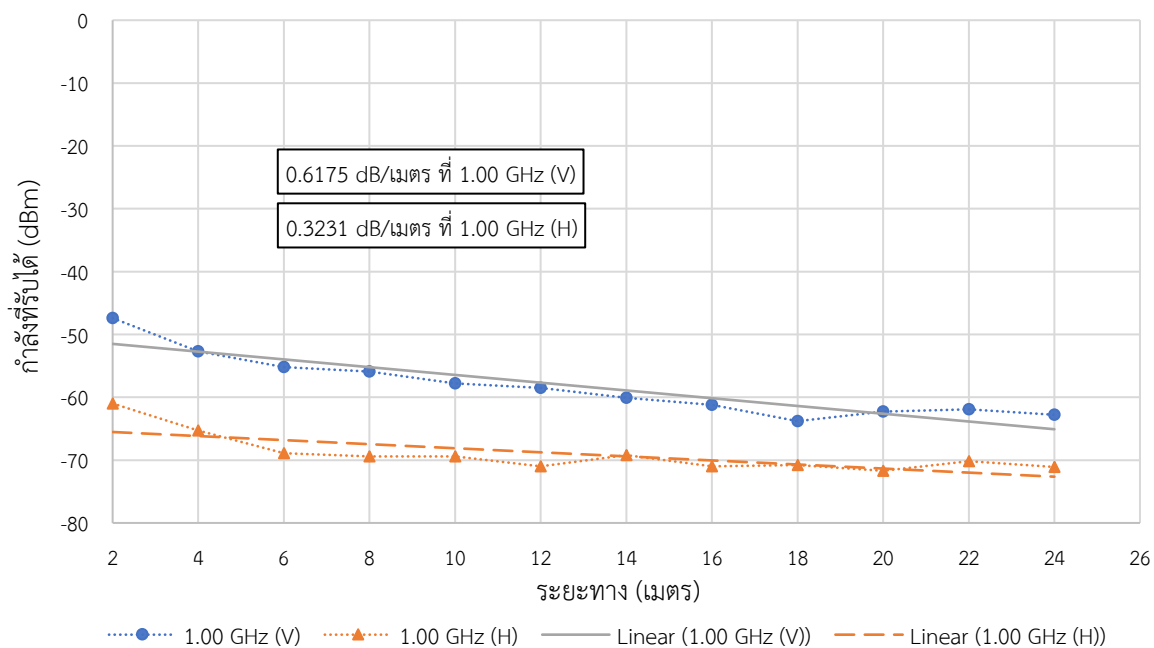
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-52.4	-61.8
2	4	-59.2	-66.9
3	6	-60	-68
4	8	-61.8	-70.5
5	10	-63.9	-71.1
6	12	-65.2	-71
7	14	-64.9	-72.3
8	16	-67	-72.1
9	18	-67.5	-73.2
10	20	-70.2	-72.4
11	22	-71.7	-74.1
12	24	-71.9	-72.7



รูปที่ 85 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 72 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz แบบ LOS

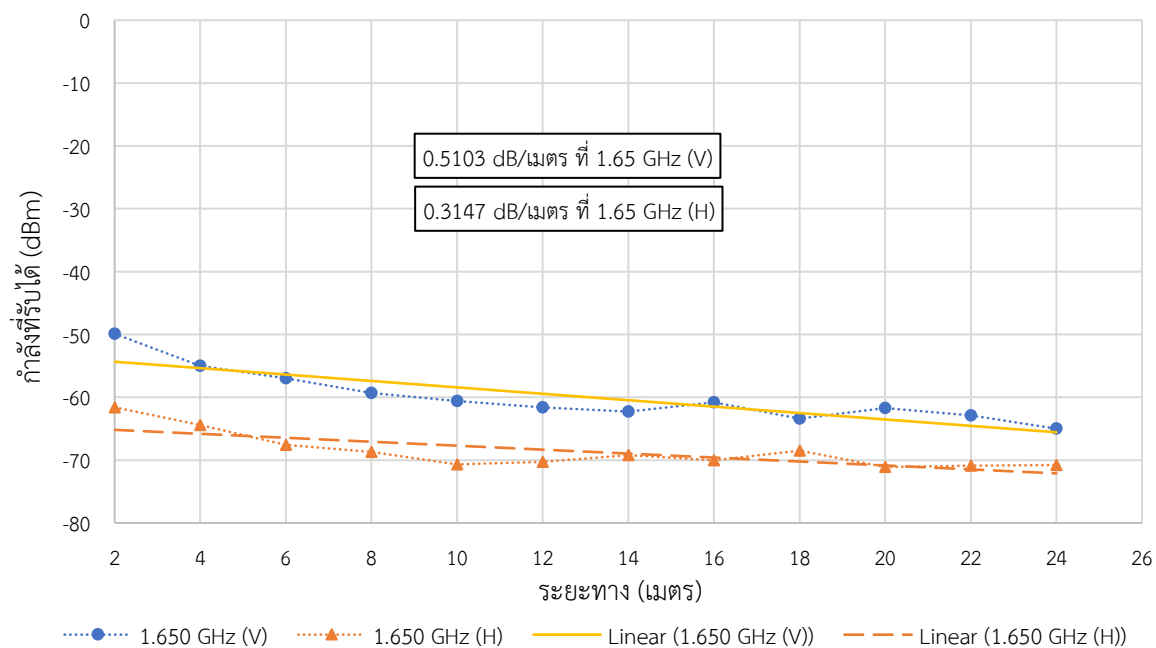
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-47.4	-61
2	4	-52.7	-65.3
3	6	-55.2	-68.9
4	8	-55.9	-69.4
5	10	-57.8	-69.4
6	12	-58.5	-71
7	14	-60.1	-69.2
8	16	-61.2	-71
9	18	-63.8	-70.8
10	20	-62.3	-71.7
11	22	-61.9	-70.2
12	24	-62.8	-71.1



รูปที่ 86 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 73 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz แบบ LOS

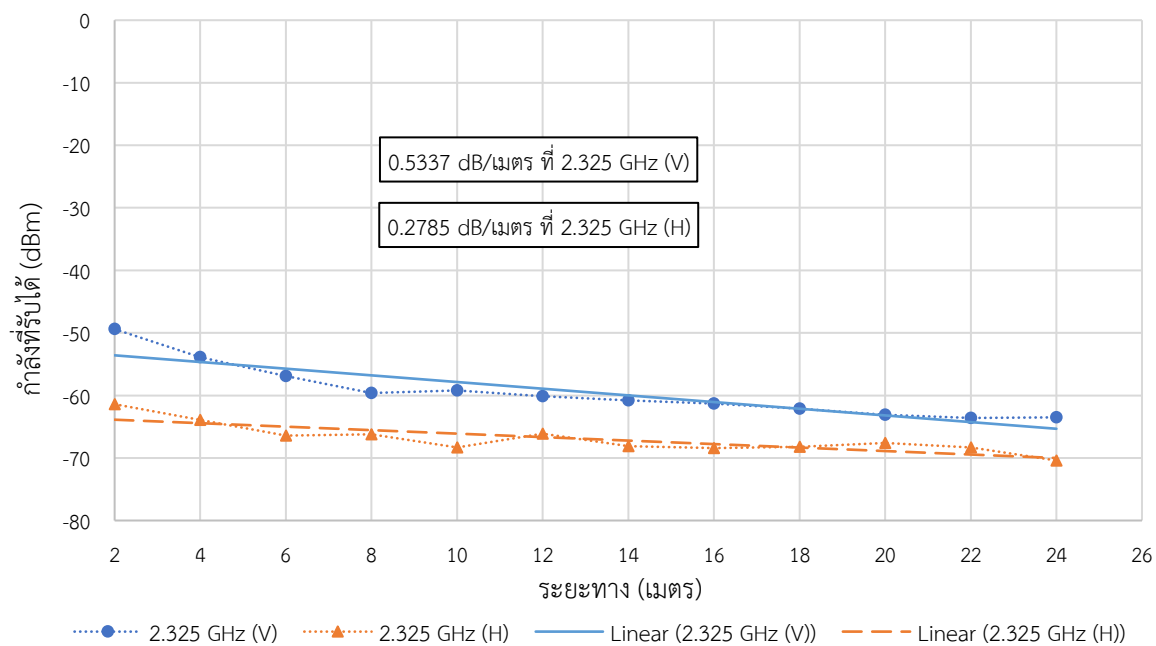
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-49.9	-61.6
2	4	-55.0	-64.4
3	6	-57.0	-67.6
4	8	-59.3	-68.7
5	10	-60.6	-70.7
6	12	-61.6	-70.3
7	14	-62.3	-69.2
8	16	-60.8	-70.0
9	18	-63.4	-68.5
10	20	-61.7	-71.1
11	22	-62.9	-70.9
12	24	-65.0	-70.8



รูปที่ 87 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 74 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz แบบ LOS

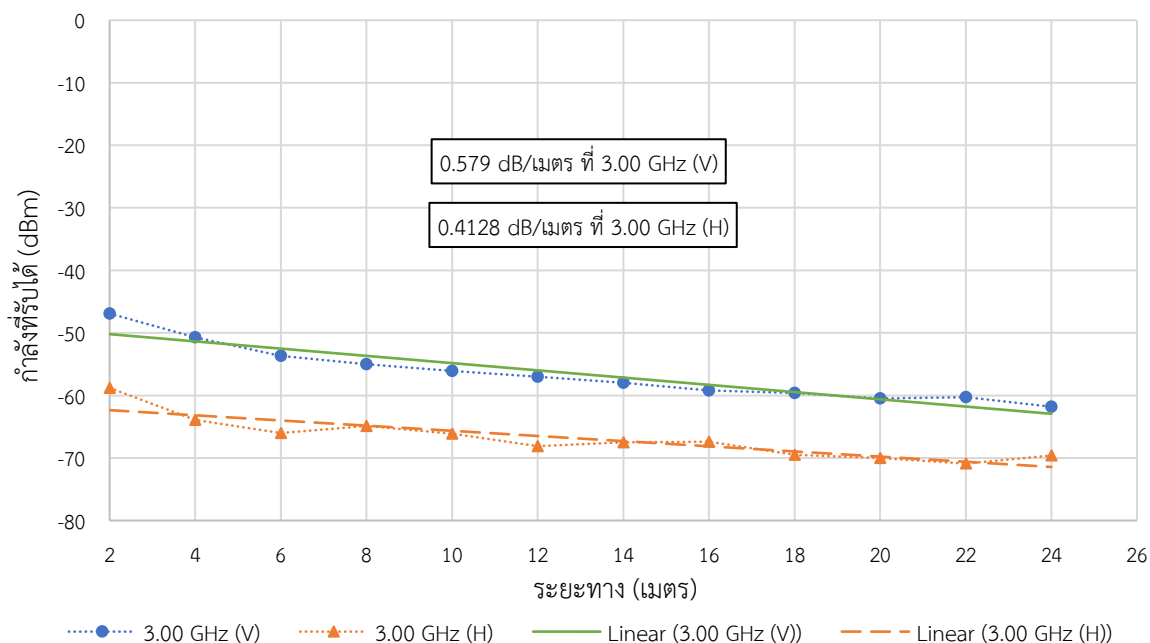
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-49.4	-61.4
2	4	-53.9	-63.9
3	6	-56.9	-66.4
4	8	-59.6	-66.2
5	10	-59.2	-68.3
6	12	-60.1	-66.1
7	14	-60.8	-68.1
8	16	-61.3	-68.4
9	18	-62.1	-68.2
10	20	-63.1	-67.6
11	22	-63.6	-68.3
12	24	-63.5	-70.4



รูปที่ 88 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

ตารางที่ 75 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz แบบ LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46.9	-58.8
2	4	-50.7	-63.9
3	6	-53.7	-66
4	8	-55	-64.9
5	10	-56.1	-66.1
6	12	-57	-68.1
7	14	-58	-67.5
8	16	-59.2	-67.4
9	18	-59.6	-69.5
10	20	-60.5	-70
11	22	-60.3	-70.9
12	24	-61.8	-69.6

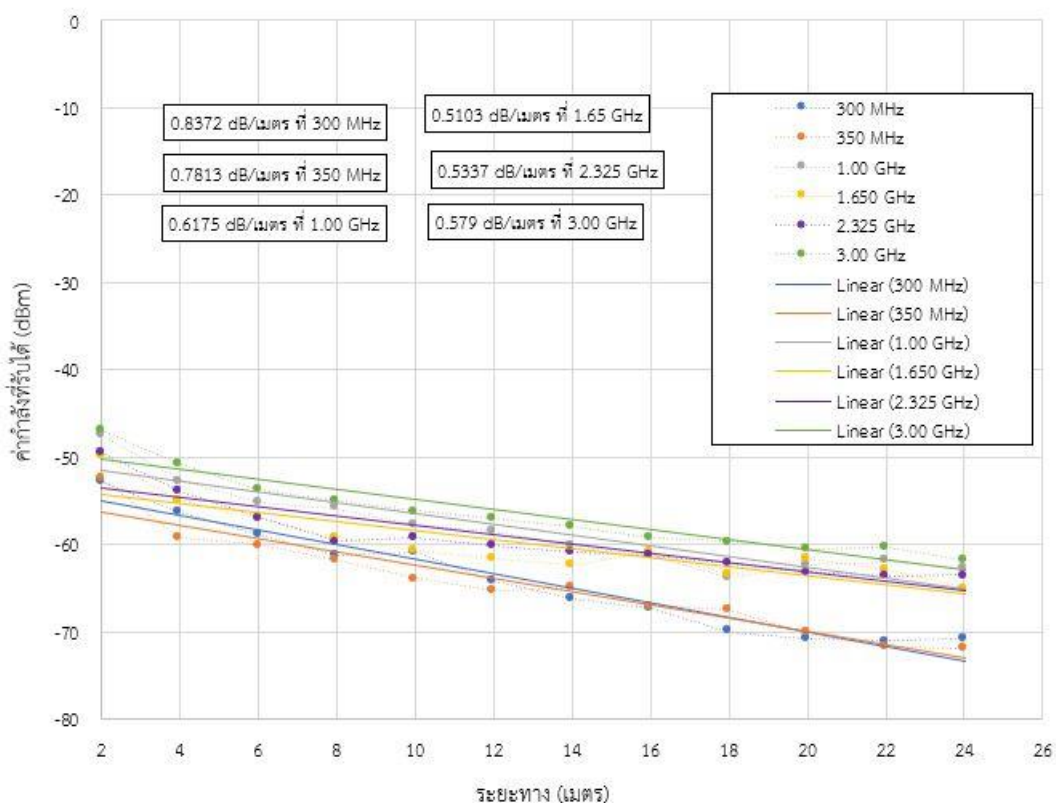


รูปที่ 89 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz ตามระยะทางแบบ LOS

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 71 – 75 เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ดังแสดงในรูปที่ 85 - 89 พบว่าค่ากำลังที่วัดได้ภายในโพรงถ้ำหินทรายยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทางทิศทางเดียวกันกับความลาดเอียงแบบเส้นตรงซึ่งเป็นค่ากำลังที่ได้คำนวณภายใต้เงื่อนไขของอากาศว่างทุกๆ ระยะ 2 เมตร เช่นเดิม และเมื่อนำมาคำนวณในรูปของค่าความลาดชันของการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่น จะได้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านของคลื่นความถี่กรณีแบบ V-V LOS ประมาณ 0.7621 dB/m, 0.6175 dB/m, 0.5103 dB/m, 0.5337 dB/m, 0.579 dB/m และในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-H จะได้ค่ากำลังประมาณ 0.4079 dB/m, 0.3231 dB/m, 0.3147 dB/m, 0.2785 dB/m, 0.4128 dB/m ที่ ความถี่ 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ ในขณะที่การส่งและรับกำลังของคลื่นแบบ V-V ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ V-H และไม่เกิดเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นความถี่ภายในโพรงถ้ำหินปูนที่มีสภาพแวดล้อมเหมือนกัน และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบจึงได้นำผลการวัดทดสอบในตารางที่ 71 – 75 แยกกรณีเฉพาะที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V มาสรุปรวมไว้ในตารางที่ 76 และแสดงเป็นกราฟอีกครั้งหนึ่งในรูปที่ 90 และกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H ได้ถูกนำมาสรุปรวมทุกความถี่ไว้ในตารางที่ 77 และกราฟรูปที่ 91 ตามลำดับ

ตารางที่ 76 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-52.8	-52.4	-47.4	-49.9	-49.4	-46.9
2	4	-56.2	-59.2	-52.7	-55	-53.9	-50.7
3	6	-58.9	-60	-55.2	-57	-56.9	-53.7
4	8	-61.2	-61.8	-55.9	-59.3	-59.6	-55
5	10	-60.8	-63.9	-57.8	-60.6	-59.2	-56.1
6	12	-64.2	-65.2	-58.5	-61.6	-60.1	-57
7	14	-66.2	-64.9	-60.1	-62.3	-60.8	-58
8	16	-67.3	-67	-61.2	-60.8	-61.3	-59.2
9	18	-70	-67.5	-63.8	-63.4	-62.1	-59.6
10	20	-70.8	-70.2	-62.3	-61.7	-63.1	-60.5
11	22	-71	-71.7	-61.9	-62.9	-63.6	-60.3
12	24	-70.7	-71.9	-62.8	-65	-63.5	-61.8

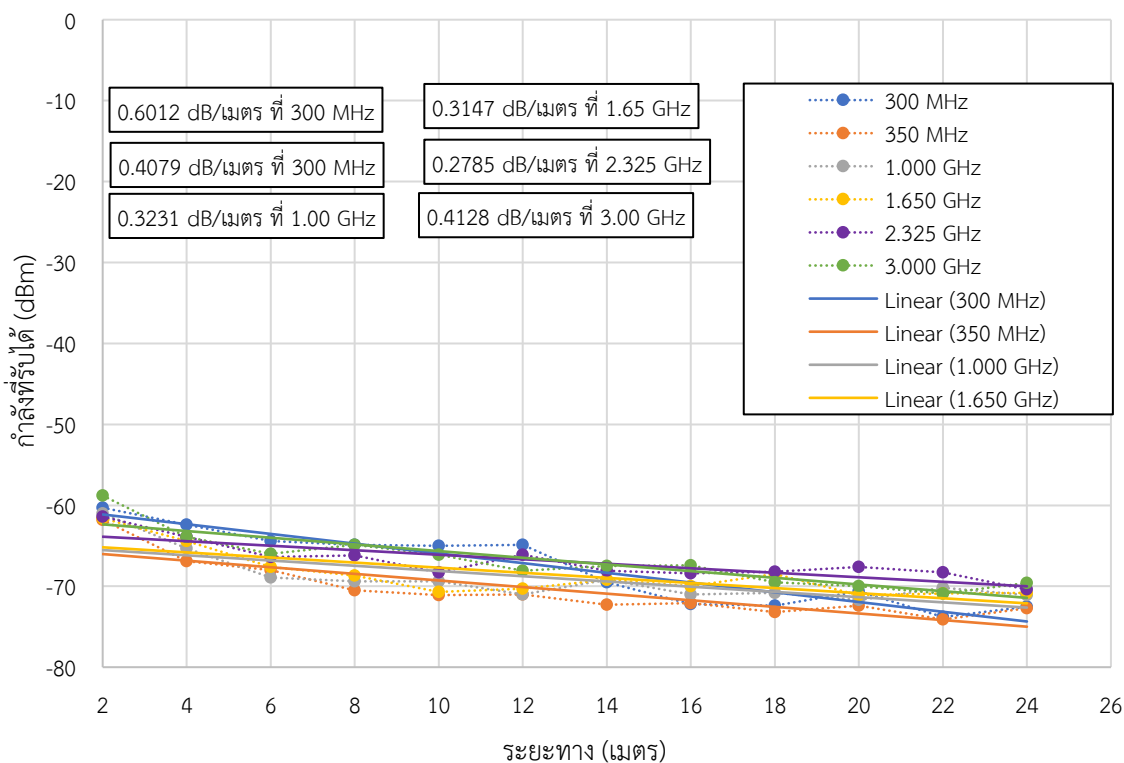


รูปที่ 90 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS

จากผลการวัดทดสอบที่พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS ของแต่ละความถี่เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 90 เมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่เท่ากับ 0.8372 dB/m @300 MHz, 0.7813 dB/m @350 MHz, 0.6175 dB/m @1000 MHz, 0.5103 dB/m @1650 MHz, 0.5337 dB/m @2325 MHz และ 0.5790 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ จากข้อมูลผลการวัดทดสอบนี้ยังคงแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของคลื่นความถี่วิทยุที่มีความถี่ต่ำกว่า จะสามารถรองรับโหมดการกระจายพลังงานลงสู่ชั้นดินและชั้นดินที่อยู่ล้อมรอบโพรงถ้าหินทรายนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าความถี่สูงเช่นเดียวกับโพรงถ้าหินปูน และเมื่อการวัดทดสอบใช้ความถี่ที่สูงขึ้นจะปรากฏการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นในเส้นทางแบบ LOS ของโพรงถ้ามีค่าลดต่ำลง ซึ่งมีสาเหตุจากเกิดการสะสมกักเก็บพลังงานไว้ภายในโพรงถ้ามากขึ้นและเกิดการส่งผ่านด้วยการสะท้อนผนังโพรงถ้าไปยังปลายทางที่ทำการวัดทดสอบได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามยังพบอีกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรตั้งแต่ความถี่ 1000 MHz ขึ้นไปจะมีค่าต่ำกว่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในโพรงถ้าหินปูน ในขณะที่ความถี่ 300 MHz และ 350 MHz จะมีการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่าที่เกิดขึ้นในโพรงถ้าหินปูนเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 77 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V LOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-60.3	-61.8	-61	-61.6	-61.4	-58.8
2	4	-62.4	-66.9	-65.3	-64.4	-63.9	-63.9
3	6	-64.4	-68	-68.9	-67.6	-66.4	-66
4	8	-64.9	-70.5	-69.4	-68.7	-66.2	-64.9
5	10	-65	-71.1	-69.4	-70.7	-68.3	-66.1
6	12	-64.9	-71	-71	-70.3	-66.1	-68.1
7	14	-69.5	-72.3	-69.2	-69.2	-68.1	-67.5
8	16	-72.2	-72.1	-71	-70	-68.4	-67.4
9	18	-72.4	-73.2	-70.8	-68.5	-68.2	-69.5
10	20	-70.6	-72.4	-71.7	-71.1	-67.6	-70
11	22	-73.8	-74.1	-70.2	-70.9	-68.3	-70.9
12	24	-72.5	-72.7	-71.1	-70.8	-70.4	-69.6

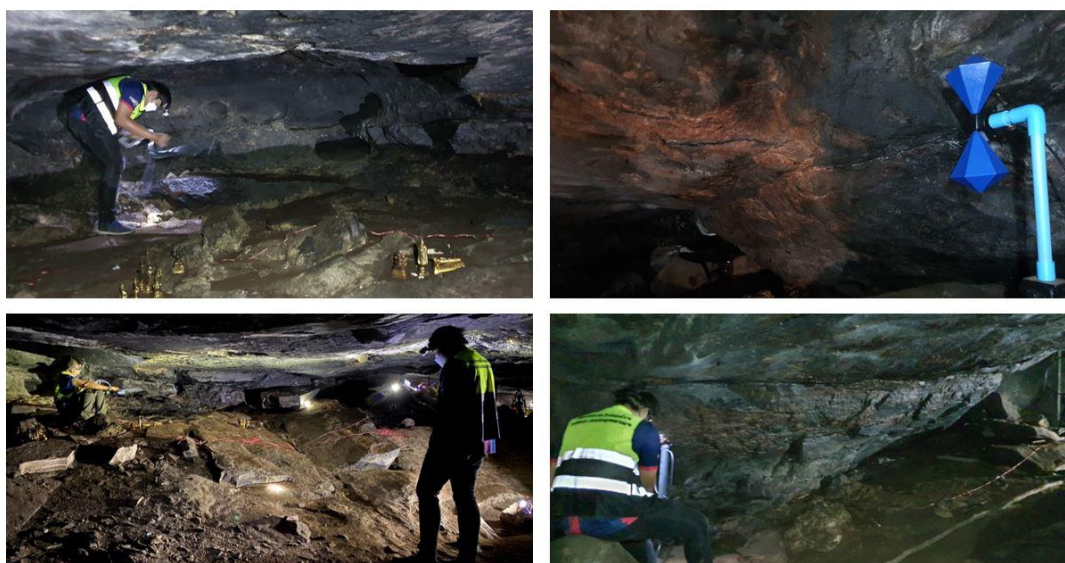


รูปที่ 91 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H LOS

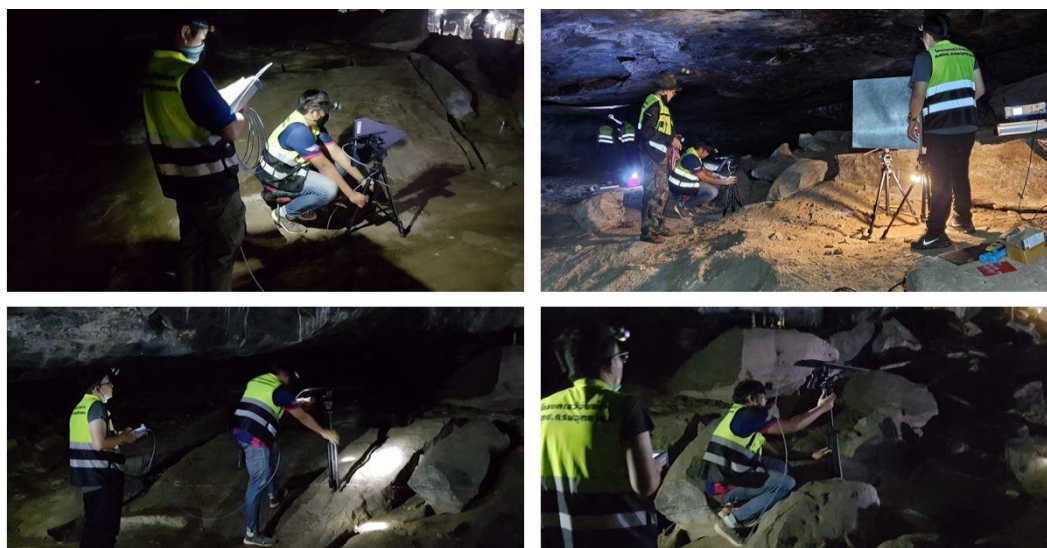
ในรูปที่ 91 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H LOS ของแต่ละความถี่เข้าด้วยกัน จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ยังคงมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการวัดทดสอบแบบ V-V LOS คือมีการสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.6012 dB/m @300 MHz, 0.4079 dB/m @350 MHz, 0.3231 dB/m @1000 MHz, 0.3147 dB/m @1650 MHz, 0.2785 dB/m @2325 MHz และ 0.4128 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตเช่นเดิมว่าที่ความถี่ 300 MHz ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดของการวัดทดสอบในวงงานนี้ หากส่งกำลังด้วยการโพลาไรซ์แนวตั้งและรับกำลังด้วยสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบแนวนอนจะเกิดการสูญเสียเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะต้นทางกับปลายทางมากกว่าความถี่อื่น และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อสายอากาศภาครับเปลี่ยนเป็นแบบโพลาไรซ์แนวนอนจะมีระดับความชันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง แต่มีระดับของค่ากำลังที่ระยะไกลสุดที่ 24 เมตร ของความถี่ตั้งแต่ 1000 MHz ขึ้นไปมีค่าสูงกว่าที่ความถี่ 300 MHz และ 350 MHz

2) การวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา (NLOS)

ในส่วนของการวัดทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียการส่งผ่านในเส้นทางการแพร่คลื่นความถี่วิทยุที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา หรือ NLOS ในกรณีของถ้ำหินทรายของวัดถ้ำปาฏิหาริย์นั้น ลักษณะของโพรงถ้ำที่เป็นแนวโค้งคล้ายรูปตัวแอล (L-bend) มากที่สุดได้ถูกเลือกมาใช้เป็นพื้นที่ทดสอบ แม้ว่าบริเวณที่เป็นแนวโค้งของผนังถ้ำจะไม่เหมือนกับกรณีของถ้ำหินปูนของวัดถ้ำเชียงดาวทุกประการก็ตาม เนื่องจากทั้งสองถ้ำมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงได้เลือกบริเวณที่มีรัศมีความโค้งให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 92 และ 93 แต่สภาพความแตกต่างของส่วนที่เป็นแนวโค้งที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ บริเวณดังกล่าวมีเพดานที่ต่ำกว่ามาก และแนวโค้งไม่ได้เกิดจากโครงสร้างของผนังถ้ำเพียงชั้นเดียวแต่ประกอบขึ้นจากก้อนหินทรายหลายขนาดที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันประกอบกันขึ้นมา นอกจากนี้ยังมีส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างแนวโค้งกับเพดานของถ้ำอยู่ประมาณ 50 - 100 เซนติเมตร ทำให้คณะผู้วิจัยต้องลดความสูงของทั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับลงมาอีกประมาณ 50 เซนติเมตร เพื่อให้ลำคลื่นหลักของสายอากาศทั้งสองฝั่งอยู่ในระยะช่องว่างดังกล่าว และเพื่อให้การปรับตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดทดสอบอยู่ในเงื่อนไชของการเป็นการส่งผ่านแบบ NLOS ให้มากที่สุดด้วย จากนั้นทำการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับตามแนวโค้งของโพรงถ้ำครึ่งละ 2 เมตรจนกระทั่งไม่สามารถรับสัญญาณได้เลย และในการวัดทดสอบรูปแบบ NLOS นี้ยังคงทำการวัดทดสอบทั้งแบบ V-V และ V-H เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของคลื่นแต่ละความถี่ไปในคราวเดียวกัน



รูปที่ 92 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ NLOS ความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VHF ภายในถ้ำปาฏิหาริย์

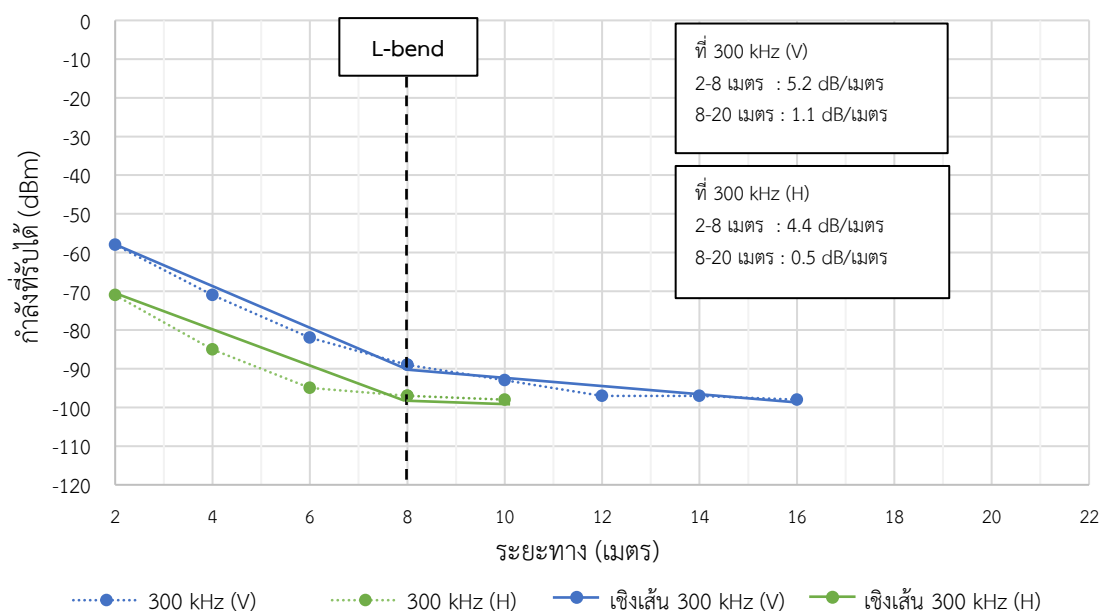


รูปที่ 93 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวัดทดสอบแบบ NLOS ความถี่ย่าน UHF ภายในถ้ำปาฎิหารีย์

ในการวัดทดสอบแบบ NLOS ตลอดความโค้งของโพรงถ้ำปาฎิหารีย์โดยใช้วิธีการและกระบวนการเหมือนกับที่ได้ปฏิบัติมาแล้วที่ถ้ำเชียงดาวทุกประการ โดยผลการวัดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 78 – 92 และกราฟแสดงผลในรูปที่ 94 – 108

ตารางที่ 78 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-58	-71
2	4	-71	-85
3	6	-82	-95
4	8	-89	-97
5	10	-93	-98
6	12	-97	-
7	14	-97	-
8	16	-98	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 94 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

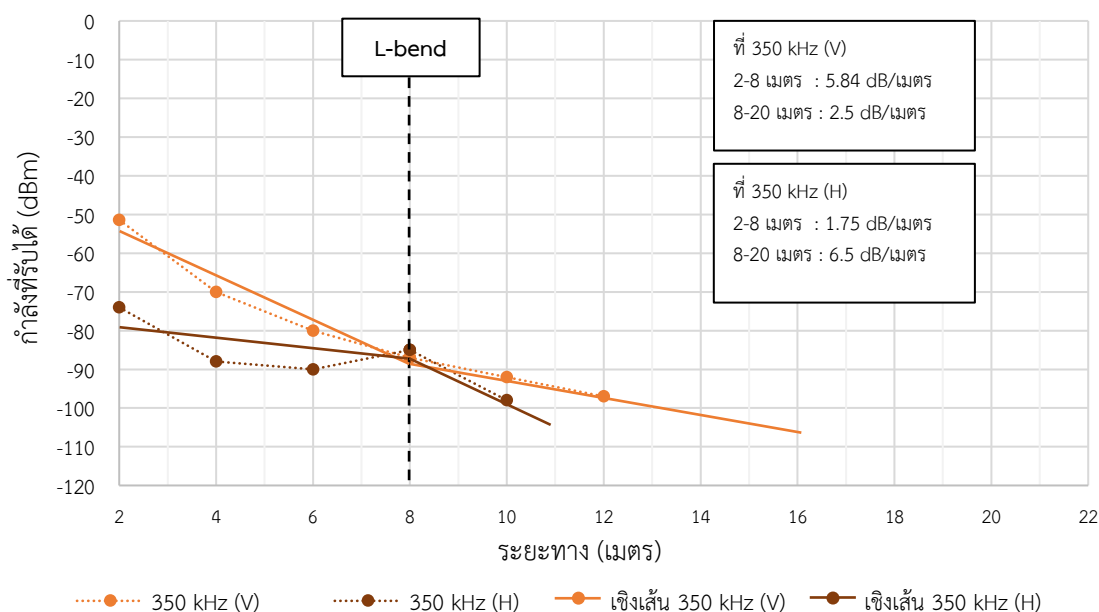
จากกราฟผลการวัดทดสอบในรูปที่ 94 ซึ่งทดสอบที่ความถี่ 300 kHz โดยในกราฟได้กำหนดช่วงระยะทางระหว่าง 8 – 12 เมตร ซึ่งใกล้เคียงสภาพแวดล้อมจริงของแนวโค้งหรือช่วงที่ใช้ชื่อตำแหน่งว่า L-bend ของผนังถ้ำหินทรายที่ใช้เป็นพื้นที่ทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาว่าช่วงระยะทาง 4 เมตร คือช่วงโค้งที่มีลักษณะคล้ายตัวแอลที่เป็นอุปสรรคในการกีดขวางการเดินทางของคลื่นความถี่ต่อเนื่องจากที่มีลักษณะเป็นแบบ LOS ที่เกิดขึ้นในช่วง 2 – 8 เมตรนั่นเอง อย่างไรก็ตามการวัดทดสอบแบบ NLOS ยังจำเป็นต้องใช้เส้นความลาดเอียงแบบเส้นตรงที่แสดงให้เห็นถึงค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ ในแต่ละช่วงระยะทางว่ามีค่าน้อยเพียงใดในระยะทุก 2 เมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้เช่นเดียวกับการวัดทดสอบภายในโพรงถ้ำแนวตรง และใช้พิจารณาเทียบกับค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีระยะทางเสถียร (stabilization distance) ที่เกิดขึ้นก่อนและหลังจากส่วนของผนังโค้งของถ้ำ จากรูปที่ 94 เมื่อพิจารณาผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ของความถี่ 300 kHz จะเห็นว่าผลการวัดทดสอบแบบ V-V นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรจะมีค่าสูงมาก (5.2 dB/m) ในช่วง LOS จนถึงระยะ 8 เมตร คล้ายคลึงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับความถี่ 350 kHz ที่ได้วัดทดสอบแบบ LOS ก่อนหน้านั้น ซึ่งอาจมาจากสาเหตุที่สายอากาศภาคส่งถูกติดตั้งใกล้ชิดผนังถ้ำทางด้านแนวโค้งมากกว่าทำให้เกิดการดูดซับคลื่นลงสู่ผนังถ้ำมากยิ่งขึ้น และเมื่อแพร่คลื่นมายังจุดเริ่มต้นของแนวโค้งจนถึงระยะ 16 เมตร จะเห็นว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านได้ลดลงมาอยู่ที่ 1.1 dB/m ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีของ LOS ที่เคยวัดได้เท่ากับ 1.182 dB/m แต่ระยะทางรวมรับสัญญาณได้ระยะแค่ 16 เมตร เนื่องจากระดับกำลังของคลื่นลดลงอย่างมากเมื่อเดินทางทางมาถึงตำแหน่ง L-bend ที่ระยะ 8 เมตรเสียก่อน แต่จุดที่น่าสังเกตก็คือเมื่อพ้นจากตำแหน่ง L-bend มาแล้วจะเห็นว่าความลาดเอียงการลดลงของระดับสัญญาณจะมีความชันน้อยมาก ซึ่งตั้งสมมุติฐานได้ว่าเกิดจากพฤติกรรมของการแพร่คลื่นแบบพื้นผิวของคลื่นวิทยุความถี่ต่ำตามที่เคยกล่าวไปแล้ว ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับกรณีการทดสอบแบบ V-H เช่นเดียวกัน แต่แตกต่างในเรื่องของระดับของสัญญาณที่มีค่าต่ำกว่าแบบ V-V จึงแพร่

คลื่นออกไปได้เพียงระยะ 10 เมตร แม้ว่าช่วง 2 - 8 เมตร และ >8 เมตร จะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่ำกว่าแบบ V-V ก็ตาม

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลการวัดทดสอบแบบ NLOS มีจำนวนถึง 15 ชุดความถี่ ซึ่งมีพฤติกรรมการแพร่คลื่นคล้ายคลึงกันเป็นกลุ่ม ดังนั้นจึงจะนำเสนอผลการวัดทดสอบในรูปของตารางและกราฟของกลุ่มที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกันพร้อมวิจารณ์ผลประกอบภาพไปที่ละกลุ่มจนครบทุกคลื่นความถี่ และสรุปผลในขั้นตอนสุดท้ายของขั้นตอนการวัดทดสอบอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 79 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51.4	-74
2	4	-70	-88
3	6	-80	-90
4	8	-87	-85
5	10	-92	-98
6	12	-97	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-

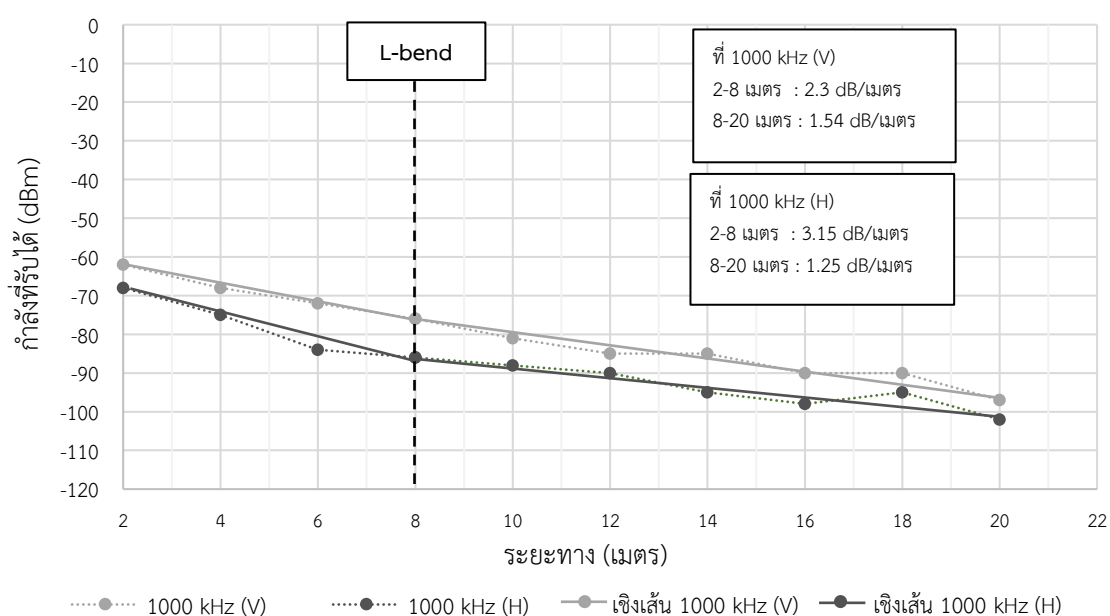


รูปที่ 95 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

จากผลการวัดทดสอบที่ความถี่ 350 kHz จากค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ในตารางที่ 5.54 และกราฟในรูปที่ 95 จะเห็นว่าในกรณีการส่งและรับสัญญาณแบบ V-V จะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านจนถึงตำแหน่ง L-bend เท่ากับ 5.84 dB/m ซึ่งใกล้เคียงกับที่ความถี่ 300 kHz และเมื่อผ่านจากตำแหน่งนี้แล้วค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 2.5 dB/m ซึ่งสูงกว่ากรณีความถี่ 300 kHz แต่ที่น่าสังเกตก็คือในกรณีที่เป็นการวัดทดสอบแบบ V-H ที่ระยะก่อนถึง 8 เมตร ค่าการสูญเสียการส่งผ่านกลับลดลงเหลือ 1.75 dB/m ทั้งนี้หากพิจารณาจากสภาพแวดล้อมจริงพบว่าสายอากาศภาคส่งถูกติดตั้งใกล้แผ่นหินทรายขนาดใหญ่ที่วางเอียงขึ้นเข้าหาผนังถ้าทางด้านขวาซึ่งอาจส่งผลทำให้การโพลาไรซ์ของคลื่นแบบแนวตั้งไปตกกระทบและเปลี่ยนทิศทางเป็นแนวนอนตามลักษณะโครงสร้างของแผ่นหินดังกล่าวและส่งผลทำให้การวัดทดสอบแบบ V-V มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงขึ้น ในขณะที่พ้นตำแหน่ง L-bend ไปแล้วกลับมีระดับของสัญญาณลดลงอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถรับสัญญาณได้ที่ระยะ 11 เมตร แตกต่างจากการส่งรับสัญญาณแบบ V-V ที่ยังคงรับสัญญาณได้จนถึงระยะ 16 เมตร ซึ่งอาจเกิดจากมีพื้นที่เปิดในการรับสัญญาณในการโพลาไรซ์แบบแนวตั้งได้มากขึ้น

ตารางที่ 80 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz แบบ NLOS

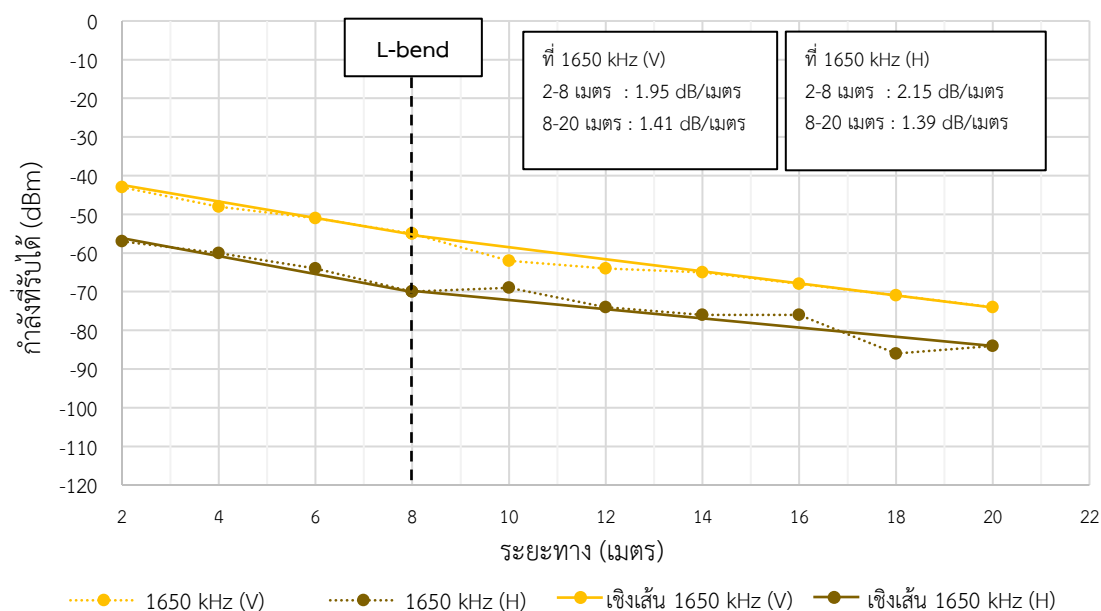
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-62	-68
2	4	-68	-75
3	6	-72	-84
4	8	-76	-86
5	10	-81	-88
6	12	-85	-90
7	14	-85	-95
8	16	-90	-98
9	18	-90	-95
10	20	-97	-102



รูปที่ 96 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 81 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz แบบ NLOS

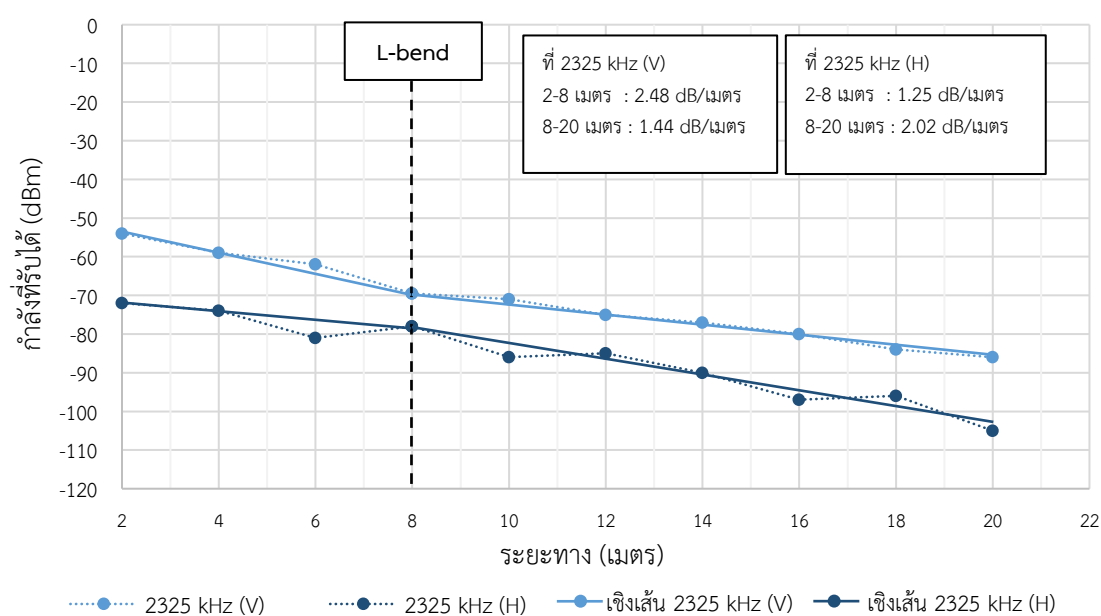
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-43	-57
2	4	-48	-60
3	6	-51	-64
4	8	-55	-70
5	10	-62	-69
6	12	-64	-74
7	14	-65	-76
8	16	-68	-76
9	18	-71	-86
10	20	-74	-84



รูปที่ 97 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 82 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz แบบ NLOS

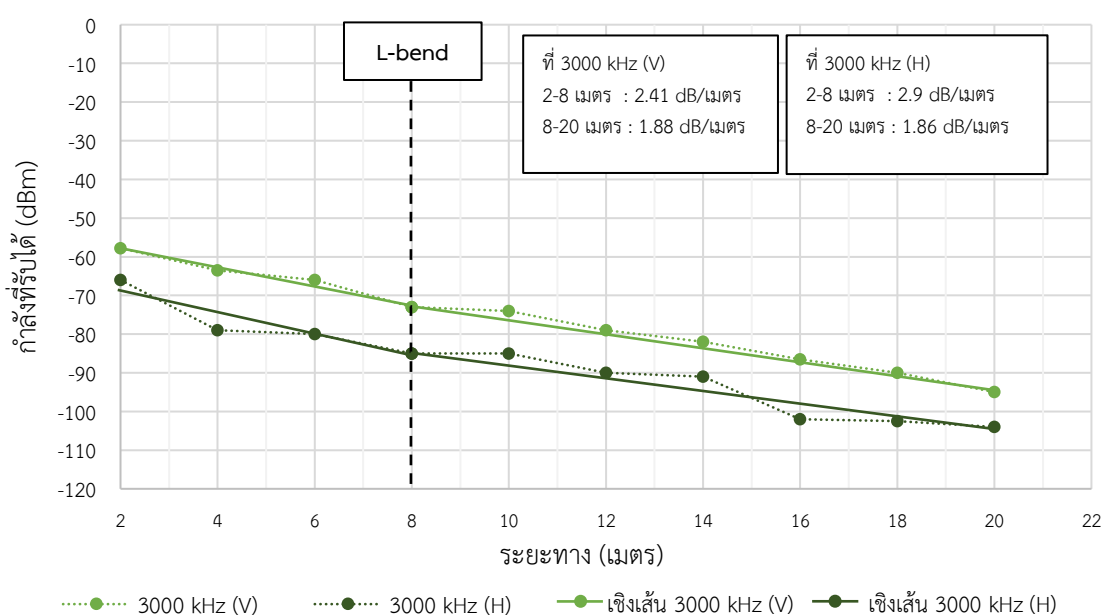
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-54	-72
2	4	-59	-74
3	6	-62	-81
4	8	-69.5	-78
5	10	-71	-86
6	12	-75	-85
7	14	-77	-90
8	16	-80	-97
9	18	-84	-96
10	20	-86	-105



รูปที่ 98 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 83 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-57.8	-66
2	4	-63.5	-79
3	6	-66	-80
4	8	-73	-85
5	10	-74	-85
6	12	-79	-90
7	14	-82	-91
8	16	-86.5	-102
9	18	-90	-102.5
10	20	-95	-104

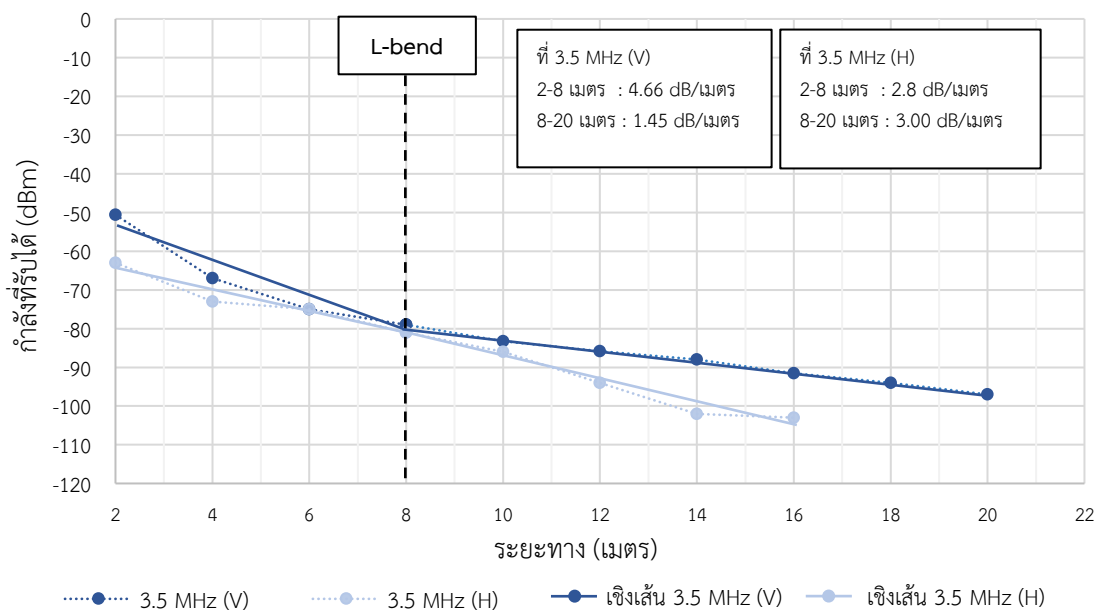


รูปที่ 99 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 kHz ตามระยะทางแบบ NLOS

สำหรับผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ที่ย่านความถี่ 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz ตามตารางที่ 80 – 83 และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 96 – 99 จะเห็นว่าพฤติกรรมการแพร่คลื่นคล้ายคลึงกันทั้งช่วงก่อนถึงตำแหน่ง L-bend โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-V เท่ากับ 2.3 dB/m, 1.95 dB/m, 2.48 dB/m และ 2.41 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 1.54 dB/m, 1.41 dB/m, 1.44 dB/m, 1.88 dB/m ตามลำดับ โดยมีความชันน้อยกว่าค่าที่วัดได้ที่ระยะ <8 เมตร ในขณะที่ค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H เท่ากับ 3.15 dB/m, 2.15 dB/m, 1.25 dB/m และ 2.9 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 1.25 dB/m, 1.39 dB/m, 2.02 dB/m, 1.86 dB/m ตามลำดับ โดยมีความชันน้อยกว่าค่าที่วัดได้ที่ระยะ <8 เมตร ในกลุ่มความถี่ชุดนี้จะเห็นว่ามีการสูญเสียการส่งผ่านก่อนตำแหน่ง L-bend แบบ V-V จะมีความชันสูงกว่าแบบ V-H ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการลดทอนของสัญญาณสูงกว่าแบบ V-H ในทางกลับกันเมื่อพ้นตำแหน่ง L-bend ออกไป การลดทอนของสัญญาณแบบ V-H จะสูงกว่าแบบ V-V ซึ่งน่าจะเกิดจากการติดตั้งสายอากาศภาคส่งอยู่ใกล้กับผนังถ้าด้านขวาที่มีแผ่นหินทรายขนาดใหญ่วางเอียงยกขึ้นหาผนังและผู้วิจัยจำลองให้เป็นเสมือนโครงสร้างที่ทำให้เกิด L-bend ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริไซซ์ได้

ตารางที่ 84 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz แบบ NLOS

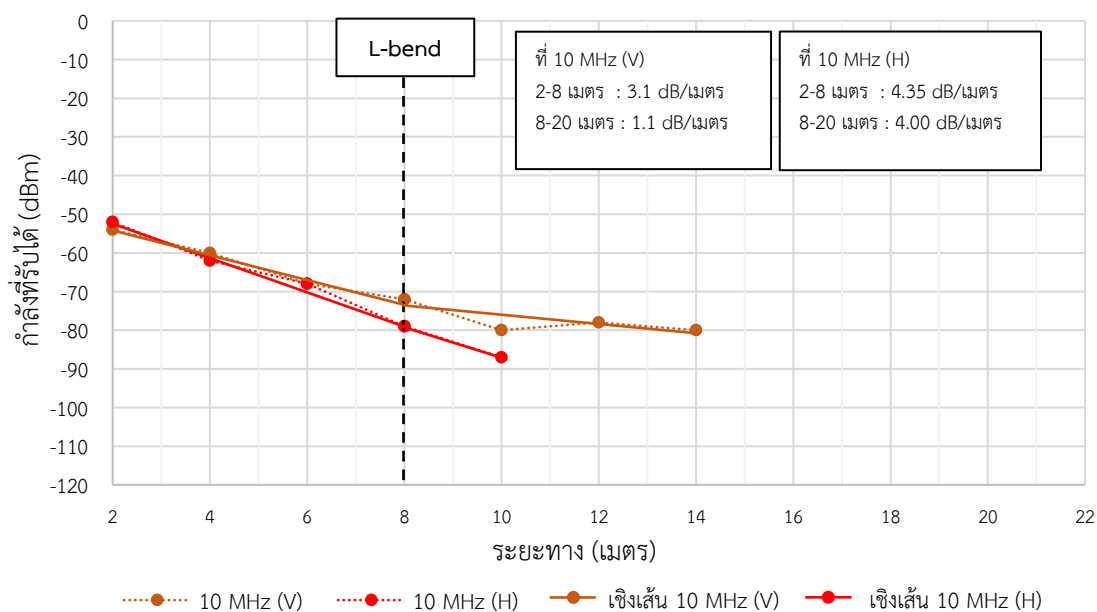
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-50.6	-63
2	4	-67	-73
3	6	-75	-75
4	8	-79	-81
5	10	-83.3	-86
6	12	-85.8	-94
7	14	-88	-102
8	16	-91.5	-103
9	18	-94	
10	20	-97	



รูปที่ 100 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 85 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz แบบ NLOS

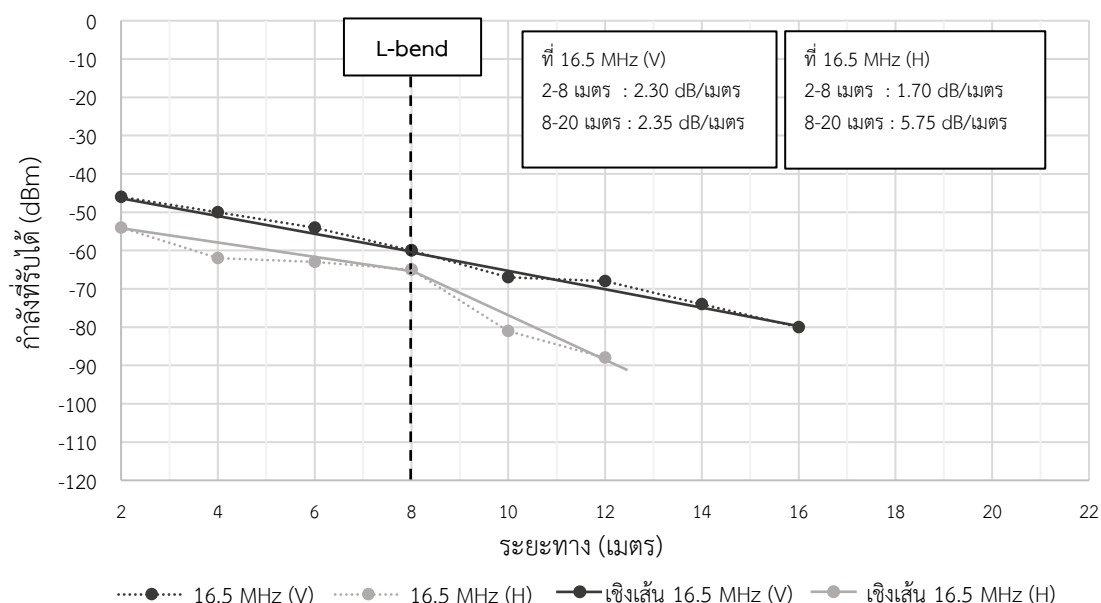
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-54	-52
2	4	-60	-62
3	6	-68	-68
4	8	-72	-79
5	10	-80	-87
6	12	-78	-
7	14	-80	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 101 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 10 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 86 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-46	-54
2	4	-50	-62
3	6	-54	-63
4	8	-60	-65
5	10	-67	-81
6	12	-68	-88
7	14	-74	-
8	16	-80	-
9	18	-	-
10	20	-	-

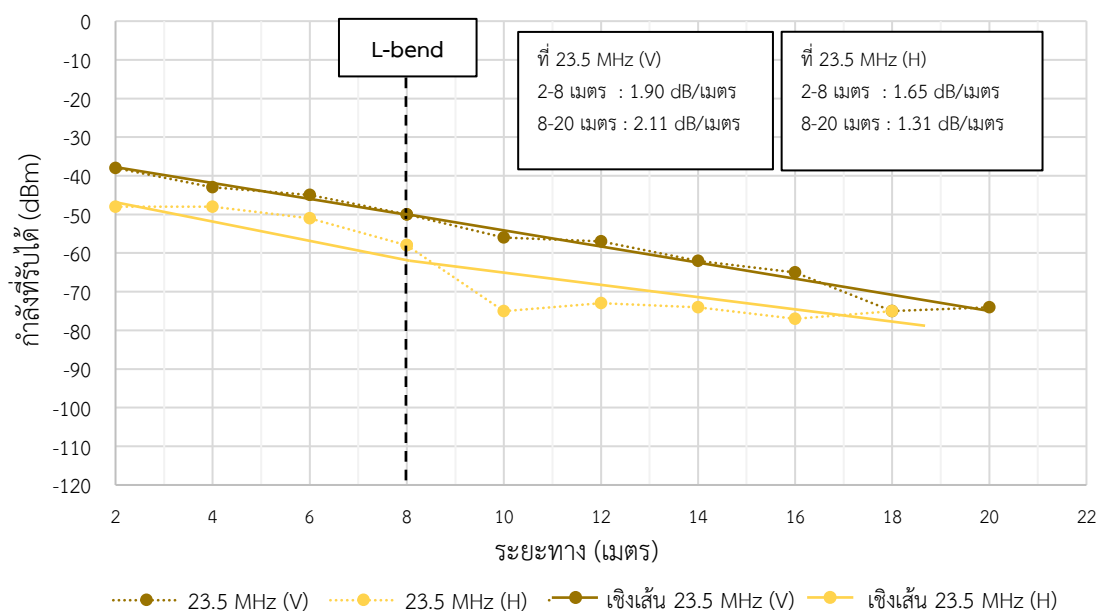


รูปที่ 102 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 16.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

สำหรับผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ที่ย่านความถี่ 3.5 MHz, 10 MHz, และ 16.5 MHz ตามตารางที่ 84 – 86 และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 100 – 102 จะเห็นว่าพฤติกรรมการแพร่คลื่นในกลุ่มนี้จะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่าในกลุ่มความถี่ 1000 kHz ถึง 3000 kHz ทั้งช่วงก่อนถึงตำแหน่ง L-bend โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-V เท่ากับ 4.66 dB/m, 3.1 dB/m, และ 2.30 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 1.45 dB/m, 1.1 dB/m และ 2.35 dB/m ตามลำดับ โดยมีความชันน้อยกว่าค่าที่วัดได้ที่ระยะ <8 เมตร ที่ความถี่ 3.5 MHz สามารถรับสัญญาณได้ถึงระยะ 20 เมตร ในขณะที่ความถี่ 10 MHz และ 16.5 MHz รับสัญญาณได้ที่ระยะเพียงแค่ 14 เมตร และ 16 เมตร ตามลำดับ สำหรับค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H เท่ากับ 2.8 dB/m, 4.35 dB/m และ 1.70 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 3.0 dB/m, 4.0 dB/m และ 5.75 dB/m ตามลำดับ โดยมีความชันที่ไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับที่วัดได้ที่ระยะ L-bend และมีระยะการส่งคลื่นทั้งสามความถี่สั้นกว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V (16, 10 และ 12 เมตรตามลำดับ) ทั้งสามความถี่นี้จึงไม่เหมาะสำหรับแพร่คลื่นภายในถ้ำที่มีลักษณะคดเคี้ยวอย่างแน่นอน

ตารางที่ 87 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz แบบ NLOS

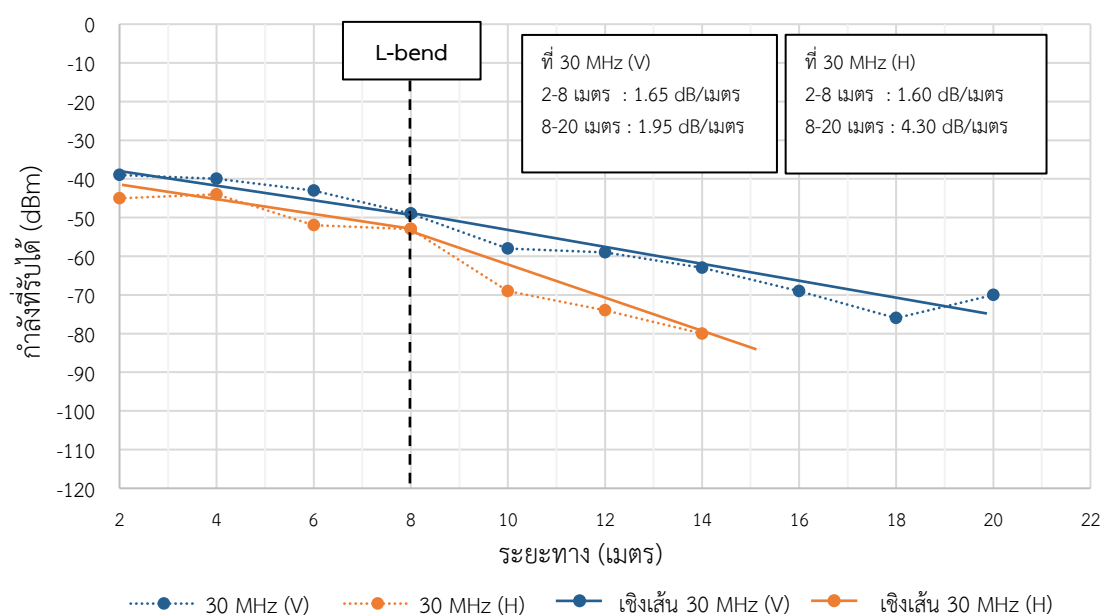
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-38	-48
2	4	-43	-48
3	6	-45	-51
4	8	-50	-58
5	10	-56	-75
6	12	-57	-73
7	14	-62	-74
8	16	-65	-77
9	18	-75	-75
10	20	-74	



รูปที่ 103 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 23.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 88 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz แบบ NLOS

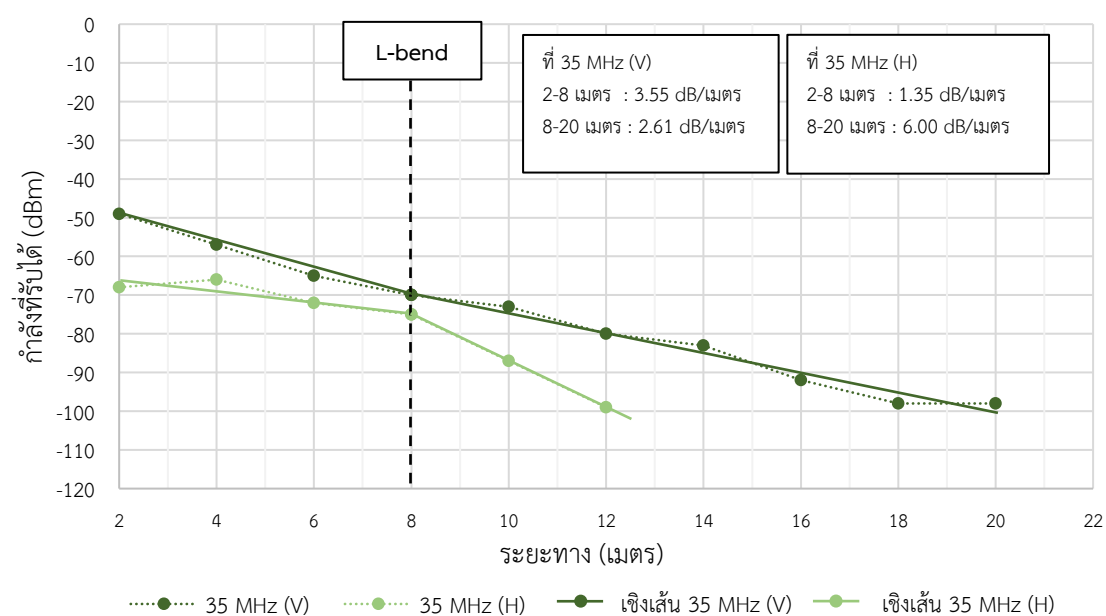
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-39	-45
2	4	-40	-44
3	6	-43	-52
4	8	-49	-53
5	10	-58	-69
6	12	-59	-74
7	14	-63	-80
8	16	-69	-
9	18	-76	-
10	20	-70	-



รูปที่ 104 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 30 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 89 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz แบบ NLOS

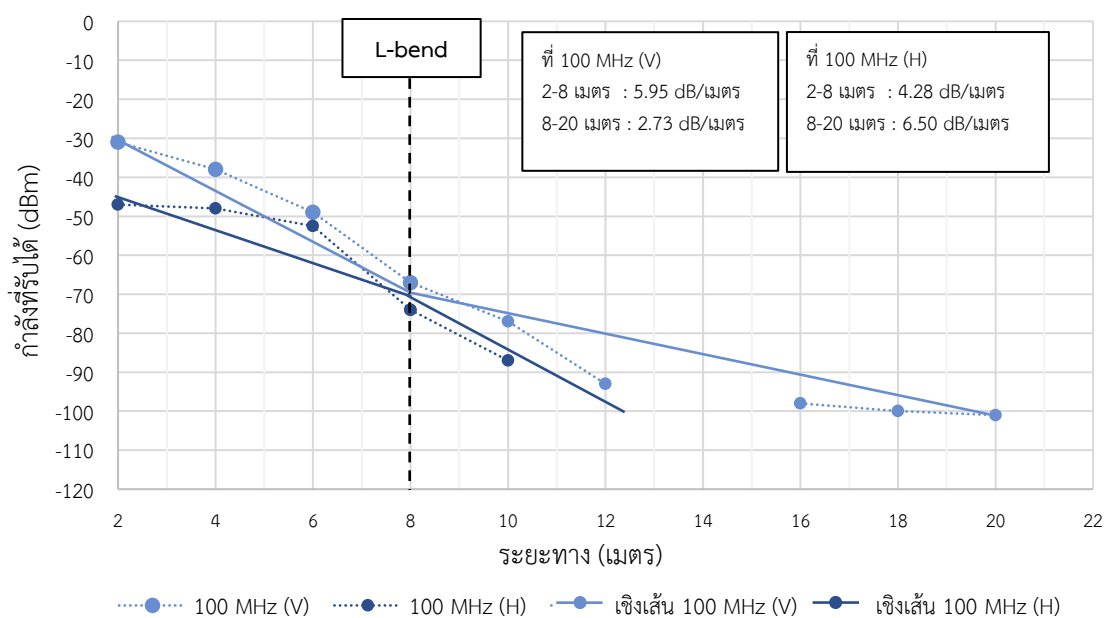
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-49	-68
2	4	-57	-66
3	6	-65	-72
4	8	-70	-75
5	10	-73	-87
6	12	-80	-99
7	14	-83	-
8	16	-92	-
9	18	-98	-
10	20	-98	-



รูปที่ 105 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 35 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 90 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz แบบ NLOS

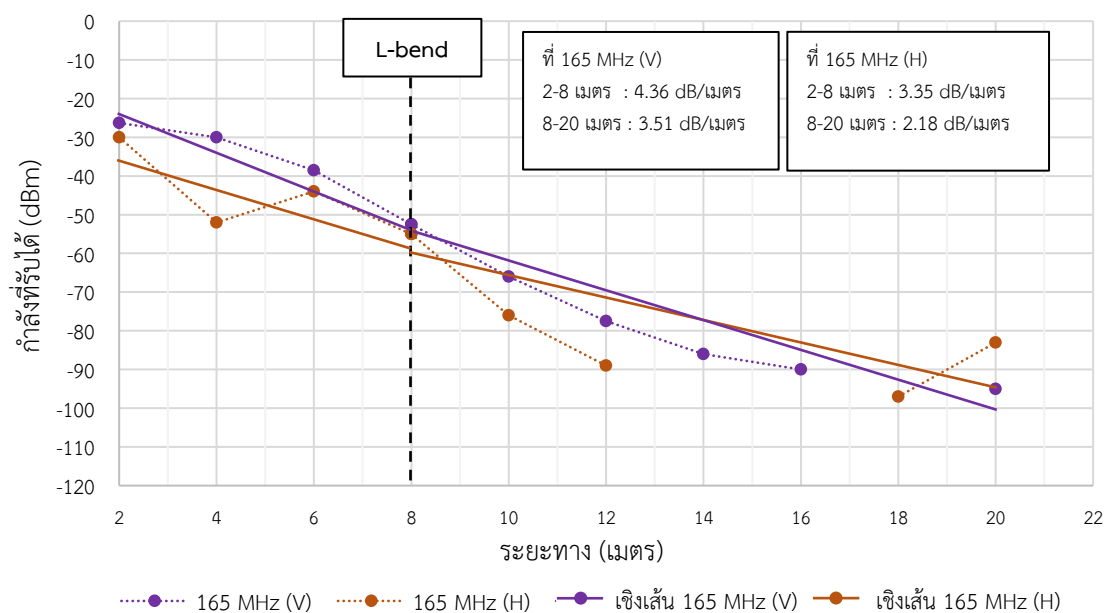
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-31	-47
2	4	-38	-48
3	6	-49	-52.5
4	8	-67	-74
5	10	-77	-87
6	12	-93	-
7	14	-	-
8	16	-98	-
9	18	-100	-
10	20	-101	-



รูปที่ 106 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 100 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 91 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz แบบ NLOS

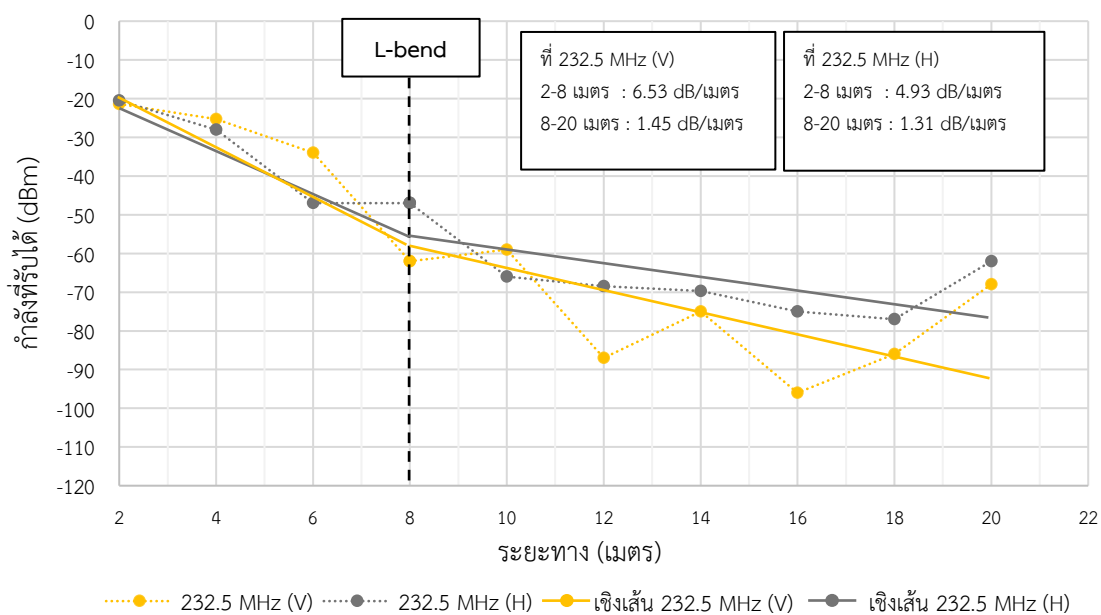
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-26.3	-30
2	4	-30	-52
3	6	-38.5	-44
4	8	-52.5	-55
5	10	-66	-76
6	12	-77.5	-89
7	14	-86	-
8	16	-90	-
9	18	-	-97
10	20	-95	-83



รูปที่ 107 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 165 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 92 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-21.4	-20.5
2	4	-25.3	-28
3	6	-34	-47
4	8	-62	-47
5	10	-59	-66
6	12	-87	-68.5
7	14	-75	-69.7
8	16	-96	-75
9	18	-86	-77
10	20	-68	-62

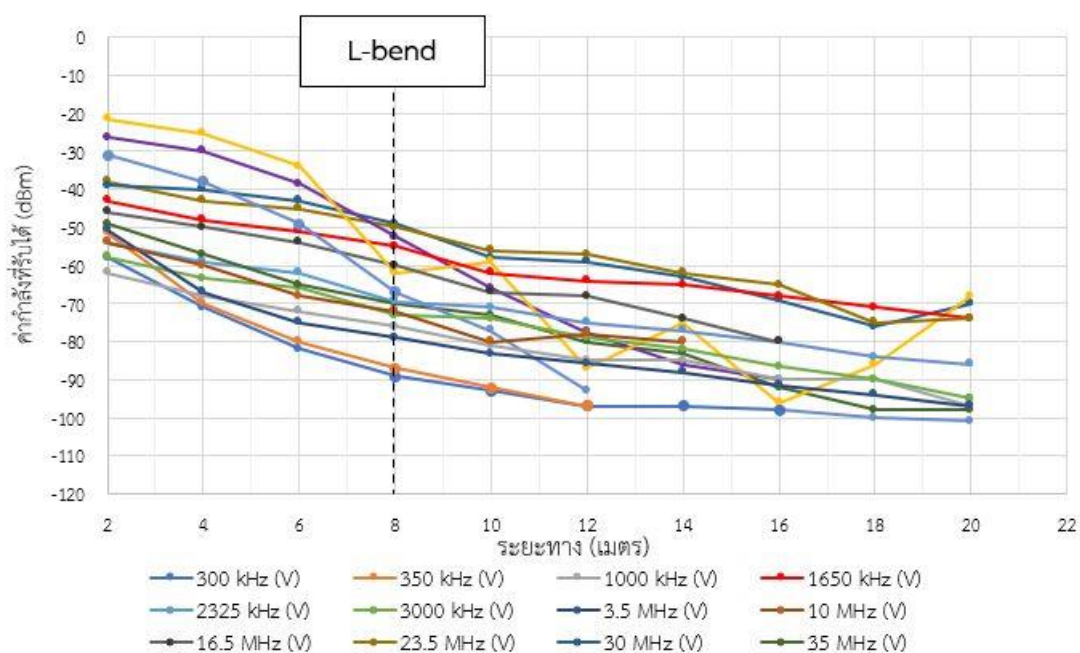


รูปที่ 108 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 232.5 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

สำหรับผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ที่ย่านความถี่ 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz และ 232.5 MHz ตามตารางที่ 87 – 92 และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 103 – 108 จะเห็นว่าพฤติกรรมการแพร่คลื่นคล้ายคลึงกันทั้งช่วงก่อนถึงตำแหน่ง L-bend โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-V เท่ากับ 1.90 dB/m, 1.65 dB/m, 3.55 dB/m, 5.95 MHz, 4.36 dB/m และ 6.53 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 2.11 dB/m, 1.95 dB/m, 2.61 dB/m, 2.73 dB/m, 3.51 dB/m และ 1.45 dB/m ตามลำดับ โดยยังมีความชันน้อยกว่าค่าที่วัดได้ที่ระยะ <8 เมตร ในขณะที่ค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H เท่ากับ 1.65 dB/m, 1.60 dB/m, 1.35 dB/m, 4.28 dB/m, 3.35 dB/m และ 4.93 dB/m ตามลำดับ และเมื่อพ้นออกจากตำแหน่ง >8 เมตรออกไปแล้วจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านลดลงเหลือ 1.31 dB/m, 4.30 dB/m, 6.0 dB/m, 6.50 dB/m, 2.18 dB/m และ 1.31 dB/m ตามลำดับ โดยมีความชันน้อยกว่าค่าที่วัดได้ที่ระยะ <8 เมตร ในกลุ่มความถี่ชุดนี้ จะเห็นว่าที่ความถี่ 23.5 MHz และ 30 MHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านก่อนตำแหน่ง L-bend แบบ V-V จะมีความชันน้อยกว่าความถี่อื่น ซึ่งแสดงถึงค่าการสูญเสียมีค่าต่ำแม้ว่าจะมีการแพร่คลื่นไปกระทบกับแนวโค้งของผนังถ้ำและเมื่อผ่านพ้นตำแหน่ง L-bend ออกไปแล้วสายอากาศก็ยังสามารถรับสัญญาณได้ที่ระยะ 20 เมตร ในขณะที่ความถี่ที่สูงมากกว่า (35 MHz ถึง 232.5 MHz) จะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านในช่วงพบกัสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง L-bend ค่อนข้างสูง (3.55 dB/m – 6.53 dB/m) แม้ว่าเมื่อพ้นระยะดังกล่าวไปแล้วจะสามารถแพร่คลื่นไปถึงที่ระยะ 20 เมตรก็ตาม ส่วนการวัดทดสอบแบบ V-H นั้น พบว่าที่พฤติกรรมที่เหมือนกับแบบ V-V ในกรณีที่เป็นความถี่ 23.5 MHz, 30 MHz และ 35 MHz แต่หลังจากพ้นระยะ L-bend ออกไประดับของสัญญาณจะต่ำมากและแพร่ได้ในระยะที่ใกล้กว่าแบบ V-V ยกเว้นที่ความถี่ 165 MHz และ 232.5 MHz จะสามารถแพร่คลื่นได้ต่อเนื่องจนถึงระยะ 20 เมตร ซึ่งอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมที่เป็นพื้นที่โล่งขึ้นจึงสามารถแพร่คลื่นแบบ LOS ได้มากขึ้น สรุปก็คือคลื่นความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อพบกับสิ่งกีดขวางที่เป็นผนังหินทราย จะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านสูงขึ้น จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในถ้ำที่มีความแคบแคว และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบจึงได้นำผลการวัดทดสอบในตารางที่ 78 – 92 แยกเฉพาะกรณีที่ทำกรวัดทดสอบแบบ V-V มาสรุปรวมไว้ในตารางที่ 93 และแสดงเป็นกราฟอีกครั้งหนึ่งในรูปที่ 109 และกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H ได้ถูกนำมาสรุปรวมทุกความถี่ไว้ในตารางที่ 94 และกราฟรูปที่ 110 ตามลำดับ

ตารางที่ 93 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V NLOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-58	-51.4	-62	-43	-54	-57.8	-50.6	-54	-46	-38	-39	-49	-31	-26.3	-21.4
2	4	-71	-70	-68	-48	-59	-63.5	-67	-60	-50	-43	-40	-57	-38	-30	-25.3
3	6	-82	-80	-72	-51	-62	-66	-75	-68	-54	-45	-43	-65	-49	-38.5	-34
4	8	-89	-87	-76	-55	-69.5	-73	-79	-72	-60	-50	-49	-70	-67	-52.5	-62
5	10	-93	-92	-81	-62	-71	-74	-83.3	-80	-67	-56	-58	-73	-77	-66	-59
6	12	-97	-97	-85	-64	-75	-79	-85.8	-78	-68	-57	-59	-80	-93	-77.5	-87
7	14	-97	-	-85	-65	-77	-82	-88	-80	-74	-62	-63	-83	-	-86	-75
8	16	-98	-	-90	-68	-80	-86.5	-91.5	-	-80	-65	-69	-92	-98	-90	-96
9	18	-	-	-90	-71	-84	-90	-94	-	-	-75	-76	-98	-100	-	-86
10	20	-	-	-97	-74	-86	-95	-97	-	-	-74	-70	-98	-101	-95	-68



รูปที่ 109 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VHF แบบ V-V NLOS

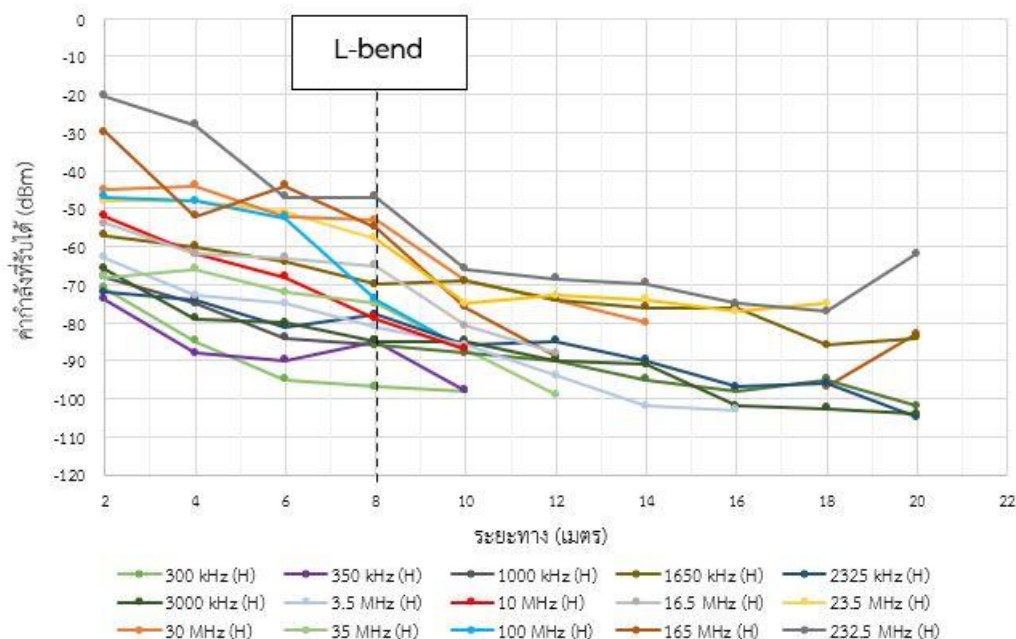
เมื่อนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-V NLOS ของถ้าหินทรายจากตารางที่ 93 มาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟดังแสดงในรูปที่ 109 พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ที่เราสนใจก็คือ ช่วงตำแหน่งที่คลื่นวิทยุแต่ละความถี่ต้องพบกับอุปสรรคกีดขวางในช่วง L-bend ผลการวัดทดสอบเมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่เท่ากับ 5.2 dB/m @300 kHz, 5.984 dB/m @350 kHz, 2.30 dB/m @1000 kHz, 1.95 dB/m @1650 kHz, 2.48 dB/m @2325 kHz, 2.41 dB/m @3000 kHz, 4.66 dB/m @3.5 MHz, 3.1 dB/m @10 MHz, 2.30 dB/m @16.5 MHz, 1.90 dB/m @23.5 MHz, 1.65 dB/m @30 MHz, 3.55 dB/m @35 MHz, 5.95 dB/m @100 MHz, 4.36 dB/m @165 MHz และ 6.53 dB/m @232.5 MHz ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลจากการวัดทดสอบบนผนังถ้าหินปูนแนวโค้ง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นจากระดับน้อยไปหา มากก็ได้ผลดังนี้ ที่ความถี่ 30 MHz (1.65 dB/m), 23.5 MHz (1.90 dB/m), 1650 kHz (1.95 dB/m), 1000 kHz (2.30 dB/m), 16.5 MHz (2.30 dB/m), 3000 kHz (2.41 dB/m), 2325 kHz (2.48 dB/m), 10 MHz (3.1 dB/m), 35 MHz (3.55 dB/m), 165 MHz (4.36 dB/m), 3.5 MHz (4.66 dB/m), 300 kHz (5.2 dB/m), 100 MHz (5.95 dB/m), 350 kHz (5.984 dB/m) และ 232.5 MHz (6.53 dB/m) ตามลำดับ จากการเรียงลำดับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเมื่อโพรงถ้าเริ่มมีสภาพแวดล้อมเป็น LNOS และใช้การโพลาริซแบบ V-V ซึ่งภาพรวมให้ประสิทธิภาพดีที่สุด พบว่ากลุ่มความถี่ที่เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านตั้งแต่ 1.65 dB/m ถึง 3.55 dB/m จะอยู่ในย่านความถี่ HF (ยกเว้นความถี่ 35 MHz เป็นย่าน VHF แยกต้น) ส่วนกลุ่มความถี่ที่เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านตั้งแต่ 4.36 dB/m ถึง 6.53 dB/m จะเป็นความถี่ที่อยู่ทั้งในย่าน LF (300 kHz), MF (350 kHz), HF (3.5 MHz) และ VHF (100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz) ซึ่งหากพิจารณาจากคุณสมบัติของการแพร่คลื่นในแต่ละย่านความถี่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ คลื่นความถี่ LF จะเป็นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิว

ย่านความถี่ HF จะเป็นแบบคลื่นฟ้า และย่านความถี่ VHF จะเป็นแบบคลื่นตรงหรือแบบแพร่ในอากาศว่าง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่มีค่าค่อนข้างสูง จะสามารถบ่งบอกถึงปรากฏการณ์ได้ว่า

- 1) กรณีของคลื่นความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) เกิดจากการที่คลื่นแพร่ลงสู่ผิวน้ำถ้าที่เป็นสิ่งกีดขวางและไม่สามารถผ่านมายังบริเวณที่เป็น LOS หลังจากพ้นระยะ L-bend ได้มากพอ
- 2) กรณีของย่านความถี่ MF ช่วงต้นแถบ (350 kHz) จะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน
- 3) กรณีของย่านความถี่ HF แม้ธรรมชาติจะเป็นการแพร่แบบคลื่นฟ้าแต่จะเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบน (diffraction) ของคลื่นได้ดีกว่าความถี่ย่านอื่นจึงมีความชันของค่าการสูญเสียการส่งผ่านน้อยกว่า แต่ก็ประสบปัญหาหลังจากเปลี่ยนสภาพแวดล้อมมาทำการวัดทดสอบแบบ LOS หรือบริเวณพื้นที่หลังจากพ้น L-bend แล้ว ก็ยังมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะทางหนึ่งเมตรสูงกว่าในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่างและมีค่าแตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของความถี่นั้นๆ เมื่อเทียบกับขนาดของโพรงถ้ำ ผนัง บริเวณที่ทำการวัดทดสอบ และ
- 4) กรณีของย่านความถี่ VHF จะประสบปัญหาจากสิ่งกีดขวางบริเวณ L-bend มากที่สุดเนื่อง แต่จะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านมากหรือน้อยอย่างไรนั้นจะต้องพิจารณาจากค่าความนำของสิ่งกีดขวางที่มีผลต่อความถี่นั้นๆ ด้วย

ตารางที่ 94 ผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้จากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H NLOS ย่านความถี่ LF, MF, HF และ VHF

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	16.5 MHz (dBm)	23.5 MHz (dBm)	30 MHz (dBm)	35 MHz (dBm)	100 MHz (dBm)	165 MHz (dBm)	232.5 MHz (dBm)
1	2	-71	-74	-68	-57	-72	-66	-63	-52	-54	-48	-45	-68	-47	-30	-20.5
2	4	-85	-88	-75	-60	-74	-79	-73	-62	-62	-48	-44	-66	-48	-52	-28
3	6	-95	-90	-84	-64	-81	-80	-75	-68	-63	-51	-52	-72	-52.5	-44	-47
4	8	-97	-85	-86	-70	-78	-85	-81	-79	-65	-58	-53	-75	-74	-55	-47
5	10	-98	-98	-88	-69	-86	-85	-86	-87	-81	-75	-69	-87	-87	-76	-66
6	12	-	-	-90	-74	-85	-90	-94	-	-88	-73	-74	-99	-	-89	-68.5
7	14	-	-	-95	-76	-90	-91	-102	-	-	-74	-80	-	-	-	-69.7
8	16	-	-	-98	-76	-97	-102	-103	-	-	-77	-	-	-	-	-75
9	18	-	-	-95	-86	-96	-102.5	-	-	-	-75	-	-	-	-97	-77
10	20	-	-	-102	-84	-105	-104	-	-	-	-	-	-	-	-83	-62

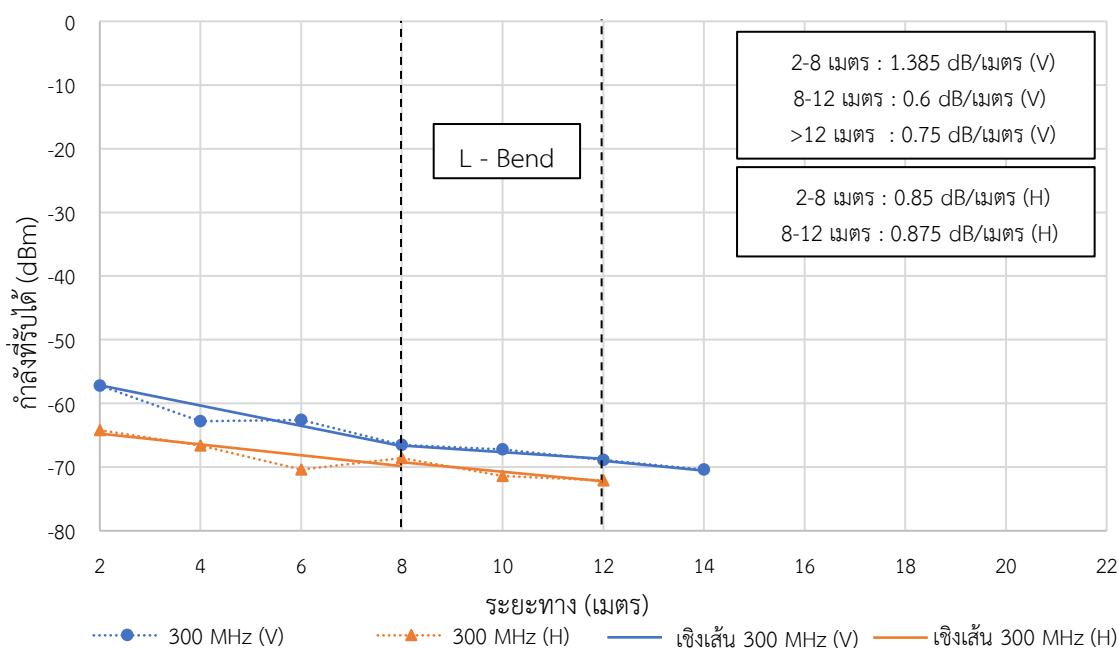


รูปที่ 110 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF และ VLF แบบ V-H NLOS

ในรูปที่ 110 เป็นการนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-H NLOS ซึ่งได้จากค่ากำลังที่รับได้ในตารางที่ 94 มาเปรียบเทียบกับกันเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในเงื่อนไขเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับให้เปลี่ยนเป็นแนวนอน เมื่อเรียงลำดับค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นจากค่าต่ำสุดไปหาสูงสุดจะสามารถสรุปได้ดังนี้ ที่ความถี่ 2325 kHz (1.25 dB/m), 35 MHz (1.35 dB/m), 30 MHz (1.60 dB/m), 23.5 MHz (1.65 dB/m), 16.5 MHz (1.70 dB/m), 350 kHz (1.75 dB/m), 1650 kHz (2.15 dB/m), 3.5 MHz (2.8 dB/m), 3000 kHz (2.9 dB/m), 1000 kHz (3.15 dB/m), 165 MHz (3.35 dB/m), 100 MHz (4.28 dB/m), 10 MHz (4.35 dB/m), 300 kHz (4.4 dB/m), และ 232.5 MHz (4.93 dB/m) ตามลำดับ จะเห็นว่ากลุ่มความถี่ที่เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านตั้งแต่ 1.25 dB/m ถึง 2.9 dB/m ในกรณีที่เป็นการวัดทดสอบแบบ V-H จะมีทั้งย่านความถี่ MF และ HF ซึ่งอาจเกิดจากการเลี้ยวเบนและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ด้วย ในขณะที่กลุ่มความถี่ที่เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านตั้งแต่ 3.15 dB/m ถึง 4.93 dB/m ยังคงเป็นความถี่ในย่าน VHF (100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz) ส่วนใหญ่นอกนั้นจะเป็นความถี่ทั้งย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) ย่านความถี่ MF (1000 kHz) และย่านความถี่ HF (10 MHz) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างผกผันและทำนายให้แม่นยำค่อนข้างยาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนการรับสัญญาณโดยใช้วิธีเลือกการโพลาไรซ์ที่ตรงกันข้ามกับที่คลื่นถูกส่งออกมาจากสายอากาศภาคส่งที่อยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมที่ไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามค่าระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ด้วยการโพลาไรซ์แบบ V-H แม้ว่าจะอยู่ในความถี่ใดและด้วยเงื่อนไขใดก็ตามจะยังคงมีระดับที่ต่ำกว่าแบบ V-V เสมอ จึงไม่ใช่ทางเลือกที่จะนำมาใช้พิจารณาในการใช้งานจริงทางปฏิบัติ

ตารางที่ 95 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-57.2	-64.2
2	4	-62.8	-66.6
3	6	-62.6	-70.4
4	8	-66.5	-68.6
5	10	-67.2	-71.4
6	12	-68.9	-72.1
7	14	-70.4	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



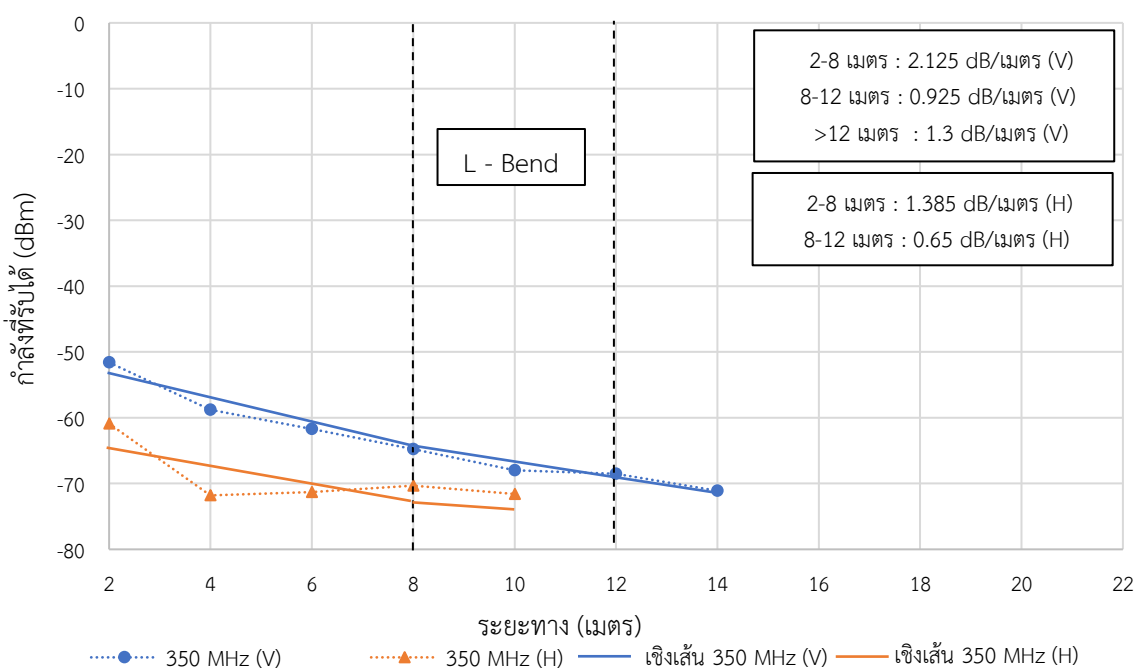
รูปที่ 111 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 300 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

จากกราฟผลการวัดทดสอบแบบ NLOS ของความถี่ 300 MHz ในรูปที่ 111 จะเห็นว่าผลการวัดทดสอบแบบ V-V นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ จะเพิ่มขึ้นไม่สูงมาก (จากตำแหน่งระยะ 8 เมตร มาถึง 12 เมตร) ประมาณ 2.4 dB เมื่อคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านในช่วง L-bend จะมีค่า 0.6 dB/m ในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>12 เมตร) การสูญเสียการส่งผ่านฯจะลดลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 0.75 dB/m ซึ่งมีความลาดชันของการสูญเสียการส่งผ่านฯคล้ายกับช่วงระยะทำายๆ ของการวัดทดสอบแบบ V-V

LOS (0.8372 dB/m) ที่ได้แสดงไปแล้ว สำหรับกรณีที่เปลี่ยนการวัดทดสอบเป็นแบบ V-H นั้น พบว่าที่ความถี่ 300 MHz เดียวกันนี้ ค่ากำลังที่รับได้ในบริเวณที่เป็น L-bend ค่าลดต่ำลงประมาณ 3.5 dB หรือมีค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านที่ระยะ 8-12 เมตร อยู่ที่ประมาณ 0.875 dB/m 2 (สูญเสียสูงกว่าแบบ V-V) ในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>12 เมตร) ค่ากำลังของคลื่นความถี่นี้จะลดลงอย่างมากจนไม่สามารถวัดค่าต่อไปได้อีก

ตารางที่ 96 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz แบบ NLOS

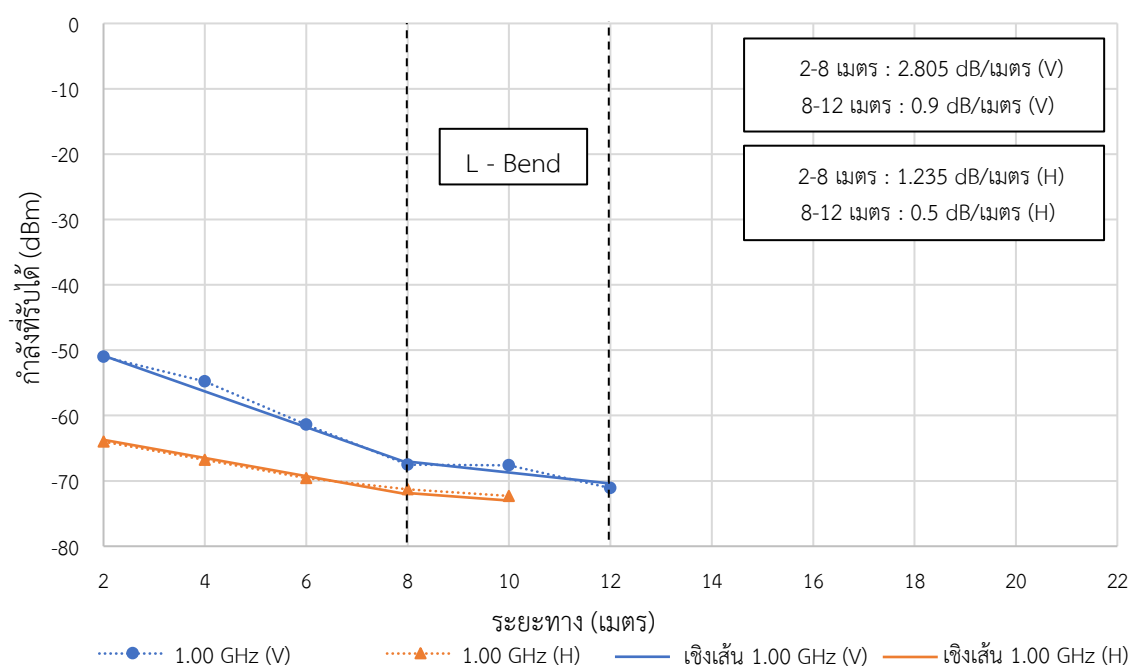
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51.6	-60.9
2	4	-58.8	-71.8
3	6	-61.7	-71.3
4	8	-64.8	-70.3
5	10	-68	-71.6
6	12	-68.5	วัดค่าไม่ได้
7	14	-71.1	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 112 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 350 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 97 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz แบบ NLOS

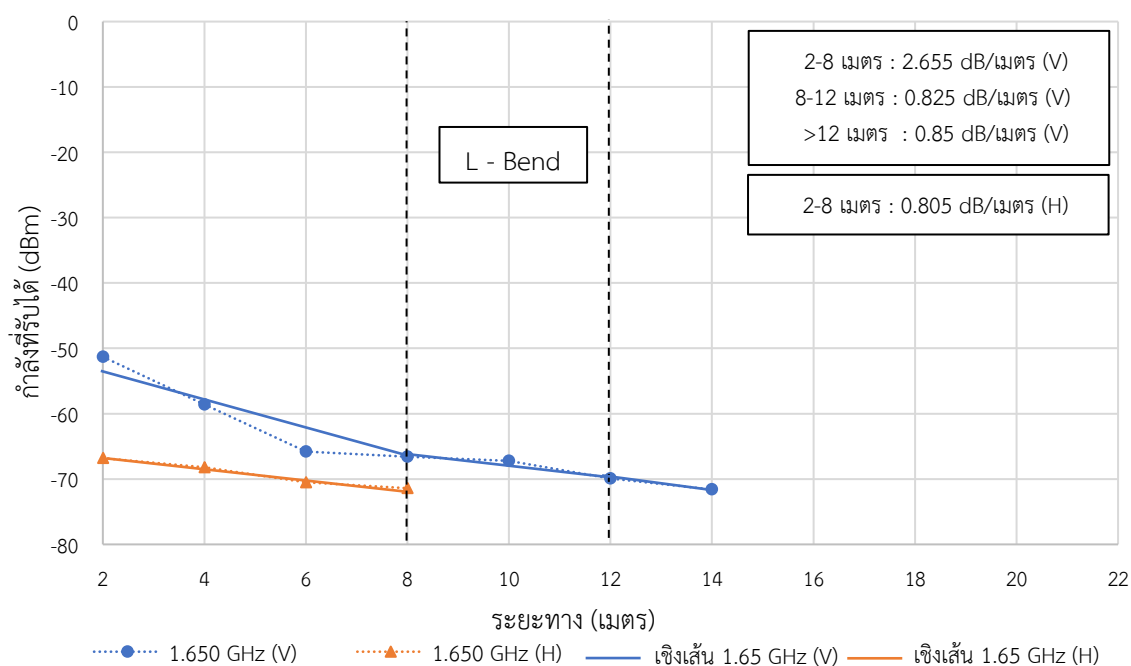
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51	-64
2	4	-54.8	-66.8
3	6	-61.4	-69.6
4	8	-67.5	-71.3
5	10	-67.6	-72.3
6	12	-71.1	วัดค่าไม่ได้
7	14	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 113 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1000 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 98 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz แบบ NLOS

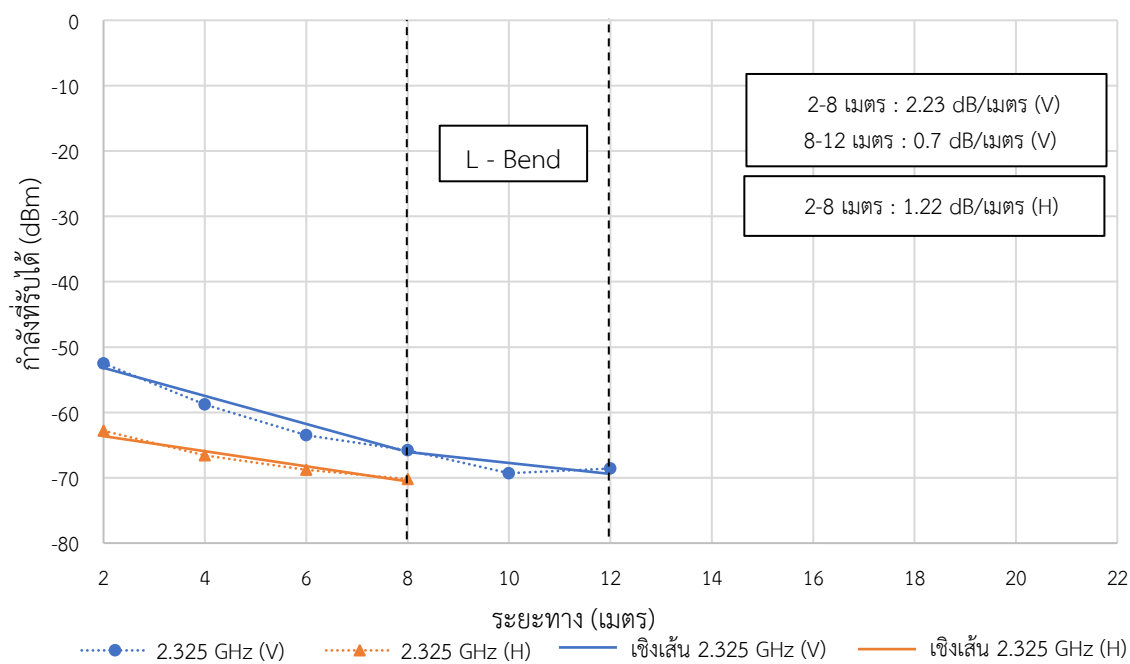
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-51.3	-66.8
2	4	-58.6	-68.2
3	6	-65.8	-70.5
4	8	-66.6	-71.4
5	10	-67.2	วัดค่าไม่ได้
6	12	-69.9	วัดค่าไม่ได้
7	14	-71.6	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 114 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 1650 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 99 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz แบบ NLOS

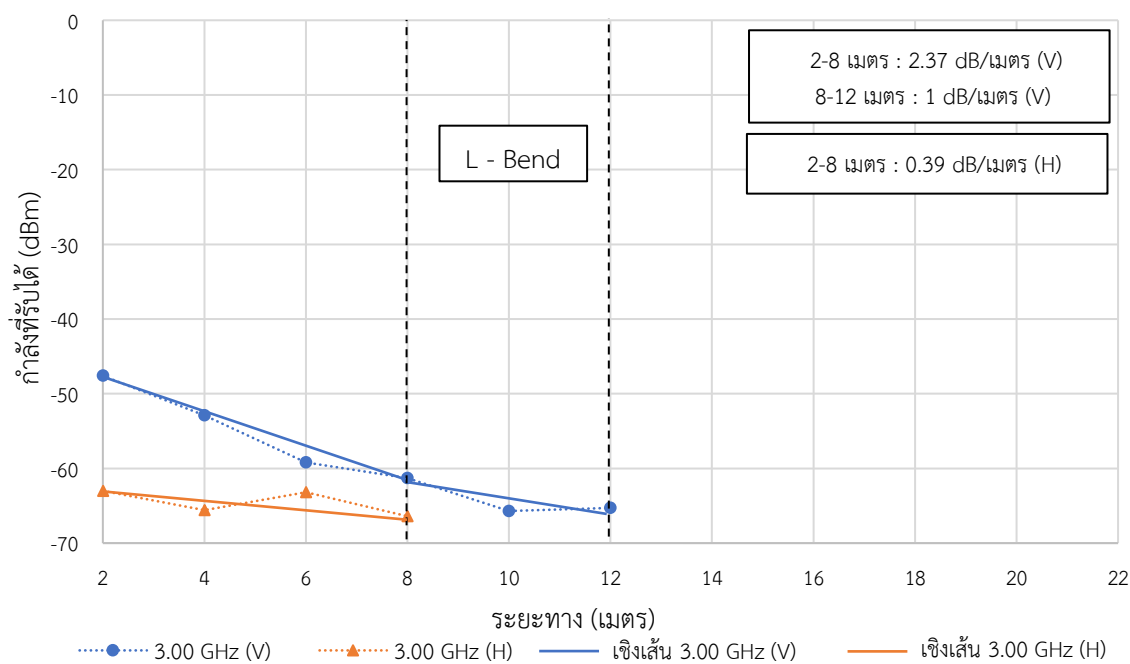
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-52.5	-62.8
2	4	-58.8	-66.6
3	6	-63.5	-68.8
4	8	-65.8	-70.2
5	10	-69.3	วัดค่าไม่ได้
6	12	-68.6	วัดค่าไม่ได้
7	14	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 115 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 2325 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

ตารางที่ 100 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้ V-V (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้ V-H (dBm)
1	2	-47.6	-63
2	4	-52.9	-65.6
3	6	-59.2	-63.2
4	8	-61.3	-66.4
5	10	-65.7	วัดค่าไม่ได้
6	12	-65.3	วัดค่าไม่ได้
7	14	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 116 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ 3000 MHz ตามระยะทางแบบ NLOS

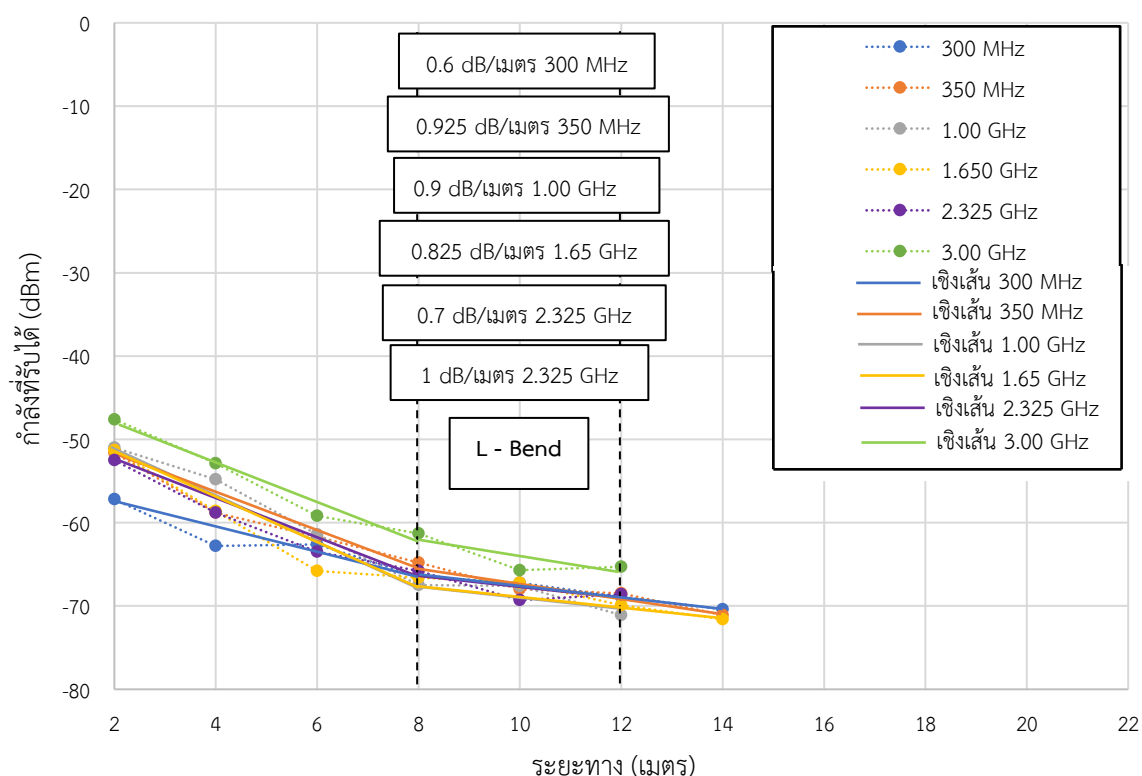
จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 96 – 100 และเมื่อนำแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 112 – 116 ซึ่งยังคงเป็นผลของการวัดทดสอบแบบ NLOS จะเห็นว่าผลการวัดทดสอบแบบ V-V นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นลาดชันของค่าการสูญเสียในอากาศว่างเมื่อพบกับสิ่งกีดขวางคล้ายส่วนโค้งของผนังถ้าที่ตำแหน่งระยะ 8 เมตรจนถึง 12 เมตร เหมือนกันทุกความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีการสูญเสีย

การส่งผ่านฯเมื่อเรียงตามลำดับความถี่จากต่ำไปสูงจะมีค่าประมาณ 3.7 dB, 3.6 dB, 3.3 dB, 2.8 dB และ 4.0 dB ที่ความถี่ 350 MHz 1000 MHz 1650 MHz 2325 MHz และ 3000 MHz ตามลำดับ และเมื่อคำนวณให้เป็นค่าอัตราสูญเสียการส่งผ่านจะได้เท่ากับ 0.925 dB/m @350 MHz, 0.9 dB/m @1000 MHz, 0.825 dB/m @1650 MHz, 0.7 dB/m @2325 MHz และ 1.0 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ และในขณะที่พ้นจากระยะ NLOS ไปสู่ระยะ LOS (>12 เมตร) ค่ากำลังที่ถูกส่งออกจากสายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับจะลดต่ำลงมากกว่า -75 dBm ทำให้เครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแถบความถี่ไม่สามารถวัดค่าได้ ยกเว้นที่ความถี่ 300 MHz, 350 MHz และ 1650 MHz ยังสามารถรับค่ากำลังได้ที่ระยะ 14 เมตรอยู่ที่ระดับ -70.4 dBm, -71.1 dBm และ -71.6 dBm หรือคำนวณเป็นการสูญเสียการส่งผ่านฯต่อหนึ่งเมตรจะมีค่าประมาณ 0.75 dB/m, 1.3 dB/m และ 0.85 dB/m ตามลำดับ ส่วนคลื่นความถี่นอกจากนี้จะไม่สามารถผ่านไปถึงที่ตำแหน่งท้ายสุดของการวัดทดสอบที่ระยะ 20 เมตรได้

ในกรณีที่เปลี่ยนการวัดทดสอบมาเป็นแบบการโพลาริซ V-H นั้น ค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่ระยะ L-bend จะเกิดขึ้นต่ำกว่าในกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H เล็กน้อย และพบว่าค่ากำลังที่สายอากาศภาครับรับได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จาก V-V เกินสองเท่า (-3 dB) ตลอดเส้นทางและเกิดขึ้นกับทุกความถี่ (ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่มีการโพลาริซมาตรงกัน) ทำให้ค่าระดับกำลังของคลื่นความถี่เมื่อเดินทางมาพบสิ่งกีดขวางที่อยู่เป็นแนวโค้งของผนังถ้ำที่ตำแหน่งระยะ 8-12 เมตร ไม่สามารถเดินทางต่อไปได้สักความถี่เดียว ทั้งนี้ไม่อาจสรุปผลจากการวัดทดสอบเปรียบเทียบโดยตรงกับผนังถ้ำหินปูนส่วนที่เป็น L-bend ของถ้ำเชียงดาวได้เนื่องจากรูปแบบของเส้นทางที่เป็นแบบ NLOS แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงมาก และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเชิงเปรียบเทียบจึงได้นำผลการวัดทดสอบในตารางที่ 95 – 100 แยกเฉพาะกรณีที่ทำการวัดทดสอบแบบ V-V มาสรุปรวมไว้ในตารางที่ 101 และแสดงเป็นกราฟอีกครั้งหนึ่งในรูปที่ 117 และกรณีการวัดทดสอบแบบ V-H ได้ถูกนำมาสรุปรวมทุกความถี่ไว้ตารางที่ 102 และกราฟรูปที่ 118 ตามลำดับ

ตารางที่ 101 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-V NLOS ย่านความถี่ UHF

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-57.2	-51.6	-51	-51.3	-52.5	-47.6
2	4	-62.8	-58.8	-54.8	-58.6	-58.8	-52.9
3	6	-62.6	-61.7	-61.4	-65.8	-63.5	-59.2
4	8	-66.5	-64.8	-67.5	-66.6	-65.8	-61.3
5	10	-67.2	-68	-67.6	-67.2	-69.3	-65.7
6	12	-68.9	-68.5	-71.1	-69.9	-68.6	-65.3
7	14	-70.4	-71.1	วัดค่าไม่ได้	-71.6	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้

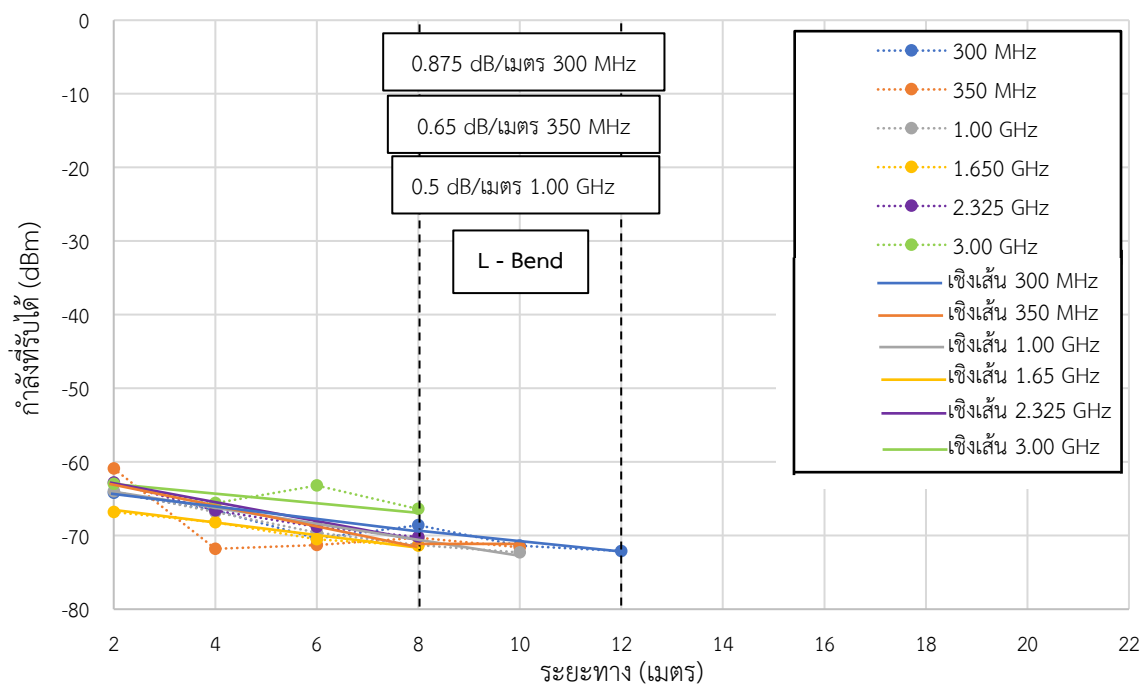


รูปที่ 117 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-V NLOS

เมื่อนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-V NLOS ของถ้ำหินทรายมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 117 พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ที่เราสนใจก็คือ ช่วงตำแหน่งที่คลื่นวิทยุแต่ละความถี่ต้องพบกับอุปสรรคกีดขวางในช่วง L-bend ผลการวัดทดสอบเมื่อเรียงลำดับจากความถี่ต่ำไปยังความถี่ที่สูงขึ้นจะมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่เท่ากับ 0.6 dB/m @300 MHz, 0.925 dB/m @350 MHz, 0.9 dB/m @1000 MHz, 0.825 dB/m @1650 MHz, 0.7 dB/m @2325 MHz และ 1.06 dB/m @3000 MHz ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลจากการวัดทดสอบบนผนังถ้ำหินปูนแนวโค้ง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นจากระดับน้อยไปหามากก็จะได้ผลดังนี้ ที่ความถี่ 300 MHz (0.6 dB/m), 2325 MHz (0.7 dB/m), 1650 MHz (0.825 dB/m), 1000 MHz (0.9 dB/m), 350 MHz (0.925 dB/m), และ 3000 MHz (1.06 dB/m) ตามลำดับ และพบว่าคลื่นความถี่สูงสุดที่ 3000 MHz ยังคงให้ระดับของค่ากำลังการส่งผ่านสูงกว่าความถี่อื่นเมื่อมีการกำหนดค่า EIRP ที่แผ่ออกจากสายอากาศภาคส่งด้วยค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละความถี่ แต่เมื่อต้องพบกับสภาพแวดล้อมการวัดทดสอบแบบ NLOS ตามจริงที่มีอยู่ จะพบว่าขนาดของค่ากำลังในช่วง L-bend มีค่าต่ำกว่าที่เคยวัดได้จากการทดสอบแบบ LOS มาก ทำให้ไม่สามารถเดินทางต่อไปในระยะหลังจากตำแหน่ง 12 เมตรได้เช่นเดียวกับความถี่ 1000 MHz และ 2325 MHz ในขณะที่คลื่นความถี่ 300 MHz และ 350 MHz ยังสามารถเดินทางต่อไปหลังจากอยู่ในรูปแบบ NLOS ได้อีก 2 เมตร และหลังจากนั้นก็ไม่สามารถวัดค่ากำลังได้อีกต่อไป อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตรที่เกิดขึ้นในช่วง L-bend ในแต่ละความถี่จะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก

ตารางที่ 102 ผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ V-H NLOS ย่านความถี่ UHF

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 MHz (dBm)	350 MHz (dBm)	1000 MHz (dBm)	1650 MHz (dBm)	2325 MHz (dBm)	3000 MHz (dBm)
1	2	-64.2	-60.9	-64	-66.8	-62.8	-63
2	4	-66.6	-71.8	-66.8	-68.2	-66.6	-65.6
3	6	-70.4	-71.3	-69.6	-70.5	-68.8	-63.2
4	8	-68.6	-70.3	-71.3	-71.4	-70.2	-66.4
5	10	-71.4	-71.6	-72.3	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
6	12	-72.1	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
7	14	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
8	16	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
9	18	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้
10	20	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 118 กราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน UHF แบบ V-H NLOS

ในรูปที่ 118 เป็นการนำกราฟแสดงผลการวัดทดสอบในแต่ละความถี่แบบ V-H NLOS มาเปรียบเทียบกับเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ในเงื่อนไขเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับให้เปลี่ยนเป็นแนวนอน พบว่าจะสามารถคำนวณค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านในบริเวณ L-bend ได้ที่ความถี่ต่ำตั้งแต่ 300 MHz, 350 MHz และ 1000 MHz เท่านั้น เนื่องจากยังมีการเดินทางของคลื่นเข้าไปในบริเวณนั้น การสูญเสียการส่งผ่านต่อเมตรที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.875 dB/m, 0.65 dB/m และ 0.5 dB/m ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าตัวเลขของการสูญเสียดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าในกรณี V-V NLOS แต่ระดับของค่ากำลังที่เกิดขึ้นก็มีค่าต่ำมาก ๆ จึงไม่สามารถจะเดินทางต่อไปมากกว่าระยะ 8-10 เมตรได้ แม้จะมีความถี่ 300 MHz เพียงความถี่เดียวที่เดินทางต่อไปได้อีก 2 เมตรก็ตาม ดังนั้นการใช้งานคลื่นความถี่วิทยุทั้งหกความถี่แบบ V-H NLOS ในถ้าหินทรายจึงอาจไม่ประสบผลสำเร็จเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ V-V NLOS

เพื่อเป็นการแสดงการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขของค่าการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่เกิดขึ้นต่อระยะทางหนึ่งเมตรแบบ V-V/V-H LOS และ V-V/V-H LOS ที่เกิดจากการวัดทดสอบในถ้าหินปูนของวัดถ้ำเชียงดาวและในถ้าหินทรายของวัดถ้ำป่าภูทิว คณะผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลที่ได้จากการวัดทดสอบมาสรุปไว้อีกครั้งหนึ่งในตารางที่ 5.47 และ 5.48 เพื่อประกอบคำอธิบายผลที่ได้กล่าวไปทั้งหมดแล้วข้างต้น

7. สรุปผลการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารในถ้ำทั้งสองแห่งและ ทุกย่านความถี่

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการนำผลสรุปค่าการสูญเสียการส่งผ่านและค่าการลดทอนของทุกย่านความถี่ที่เกิดขึ้นทั้งในถ้ำเชียงดาวและถ้ำป่าฎิหารีย์ ได้แก่ ความถี่ 300 kHz, 350 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz, 3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz, 30 MHz, 35 MHz, 100 MHz, 300 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz, 300 MHz, 350 MHz, 1000 MHz, 1650 MHz, 2325 MHz และ 3000 MHz จากนั้นจะเป็นการสังเคราะห์ว่าความถี่ใดที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นคลื่นความถี่สำหรับระบบวิทยุสื่อสารทั้งในถ้ำหินปูนและหินทรายตามวัตถุประสงค์

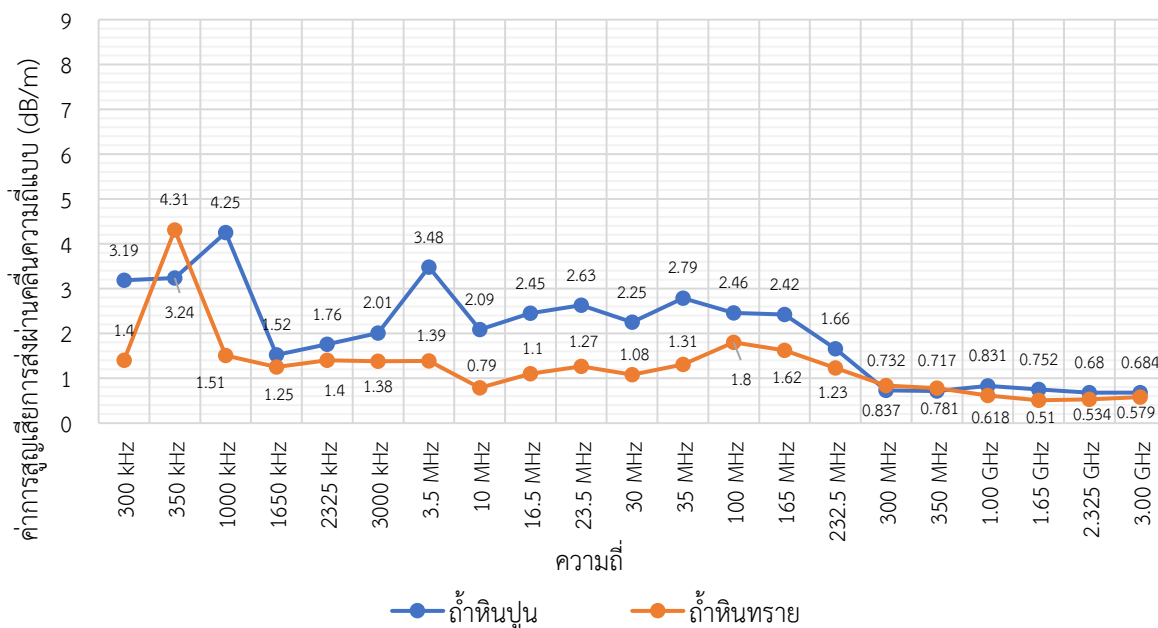
จากตารางที่ 103 ถึง 106 จะเป็นข้อมูลการการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขของค่าการสูญเสียต่อระยะทางหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนเนื่องจากการส่งผ่านที่เกิดขึ้นแบบ V-V/V-H LOS และ V-V/V-H NLOS ที่เกิดจากการวัดทดสอบในถ้ำหินปูนของวัดถ้ำเชียงดาวและในถ้ำหินทรายของวัดถ้ำป่าฎิหารีย์ที่ระยะทาง 20 เมตรเท่ากัน และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงได้นำมาพล็อตเป็นกราฟแยกได้ 4 กรณีนี ดังแสดงในรูปที่ 119 ถึง 126

ตารางที่ 103 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ LOS ระหว่างถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) และถ้ำหินทราย (ถ้ำปาฏิหาริย์)

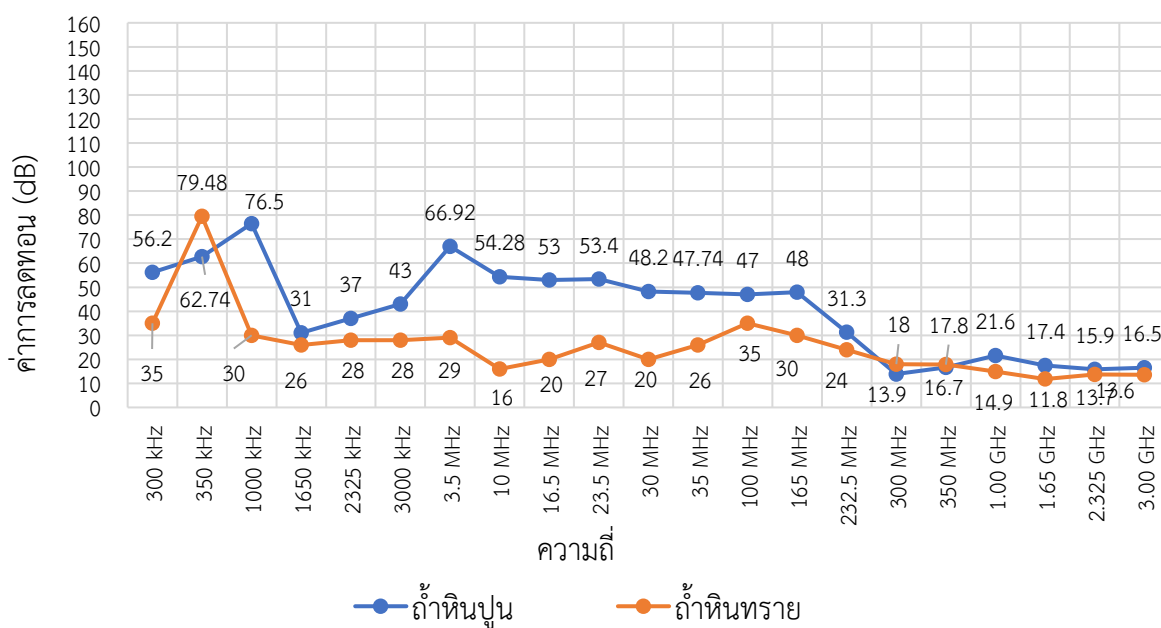
ความถี่	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ LOS (dB/m)			
	V-V Polarization		V-H Polarization	
	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย
300 kHz	3.19	1.40	8.6	1.18
350 kHz	3.24	4.31	7.48	8.25
1000 kHz	4.25	1.51	2.5	1.39
1650 kHz	1.52	1.25	1.52	1.66
2325 kHz	1.76	1.40	1.98	2.03
3000 kHz	2.01	1.38	2.26	1.76
3.5 MHz	3.48	1.39	1.8	0.98
10 MHz	2.09	0.79	2.25	1.66
16.5 MHz	2.45	1.10	2.23	1.63
23.5 MHz	2.63	1.27	2.51	1.18
30 MHz	2.25	1.08	1.85	1.34
35 MHz	2.79	1.31	1.4	3.25
100 MHz	2.46	1.80	2.18	1.28
165 MHz	2.42	1.62	1.74	1.23
232.5 MHz	1.66	1.23	1.36	0.2
300 MHz	0.732	0.837	0.629	0.601
350 MHz	0.717	0.781	0.442	0.408
1.00 GHz	0.831	0.618	0.263	0.323
1.65 GHz	0.752	0.510	0.422	0.315
2.325 GHz	0.680	0.534	0.384	0.279
3.00 GHz	0.684	0.579	0.249	0.413

ตารางที่ 104 เปรียบเทียบค่าการลดทอนของการส่งผ่านคลื่นที่ระยะทาง 20 เมตร แบบ LOS ระหว่าง
 ถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) และถ้ำหินทราย (ถ้ำปาฏิหาริย์)

ความถี่	ค่าการลดทอนแบบ LOS (dB) ระยะ 20 เมตร			
	V-V Polarization		V-H Polarization	
	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย
300 kHz	56.2	35	154.8	36
350 kHz	62.74	79.48	134.62	148.5
1000 kHz	76.5	30	45	32
1650 kHz	31	26	30.04	29
2325 kHz	37	28	39.56	39
3000 kHz	43	28	49	32
3.5 MHz	66.92	29	43	21
10 MHz	54.28	16	48	29
16.5 MHz	53	20	45	33
23.5 MHz	53.4	27	45	22
30 MHz	48.2	20	37.5	27
35 MHz	47.74	26	23	59
100 MHz	47	35	43	28
165 MHz	48	30	31	27
232.5 MHz	31.3	24	22	8
300 MHz	13.9	18	12.7	10.3
350 MHz	16.7	17.8	7.2	10.6
1.00 GHz	21.6	14.9	6	10.7
1.65 GHz	17.4	8.8	9.2	9.5
2.325 GHz	15.9	13.7	9.8	6.2
3.00 GHz	16.5	13.6	7.2	8.2



รูปที่ 119 กราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านของทุกความถี่แบบ V-V LOS ของถ้าหิ้นปูน (ถ้าหลวงเชียงดาว) และถ้าหิ้นทราย (ถ้าปาฎิหารีย์)



รูปที่ 120 กราฟเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะทาง 20 เมตร ของทุกความถี่แบบ V-V LOS ของถ้าหิ้นปูน (ถ้าหลวงเชียงดาว) และถ้าหิ้นทราย (ถ้าปาฎิหารีย์)

จากรูปที่ 119 ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และในรูปที่ 120 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าการลดทอนการการส่งผ่านรวมในระยะทาง 20 เมตร ซึ่งเป็นการพิจารณาเฉพาะการวัดทดสอบแบบแนวสายตา (Line of Sight: LOS) ที่มีการโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวตั้งทั้งภาครับและภาคส่ง (V-V Polarization) ซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบวิทยุสื่อสารโทรคมนาคมทั่วไป จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้ำหินปูนและหินทรายพบว่า

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตร แบบ LOS ภายในโพรงถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าถ้ำหินทรายทุกย่านความถี่ ยกเว้นที่ความถี่ 350 kHz และ 300 MHz ซึ่งเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุด

2) ที่ความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) และย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตร ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นดินหรือแบบคลื่นผิว (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) หากส่งผ่านตัวกลางที่เป็นดินหรือหินที่มีค่าความนำไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กสอดคล้องกับความถี่และความยาวคลื่น จะเกิดการเหนี่ยวนำหรือซึมซาบเข้าไปในเนื้อตัวกลางนั้นมากกว่าที่จะแพร่คลื่นออกไปในแนวระดับสายตา ทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูงในกรณีของการวัดทดสอบแบบ LOS อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตที่มีนัยสำคัญคือ ที่ความถี่ 350 kHz ภายในโพรงถ้ำหินทรายจะเกิดค่าการสูญเสียและลดทอนสูงกว่าภายในโพรงถ้ำหินปูนเพียงความถี่เดียว

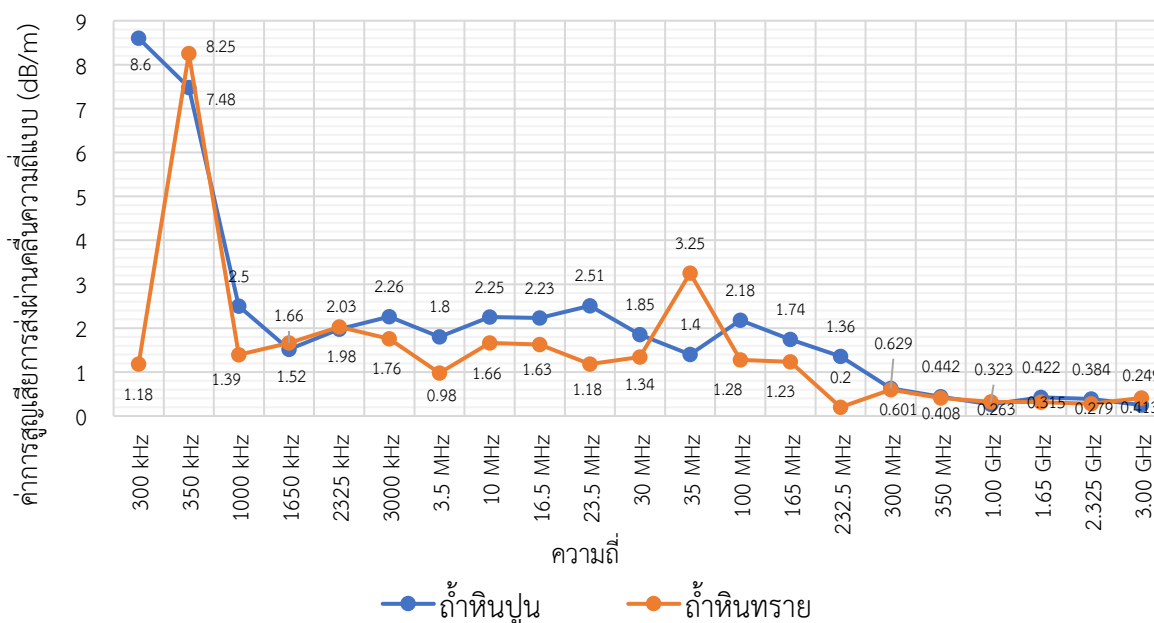
3) ที่ความถี่ย่าน MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิว แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เป็นหินปูนหรือหินทราย ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดี แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ต้นแถบ ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้มีค่าการสูญเสียและการลดทอนมากกว่าอีกสองความถี่ทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย

4) ที่ความถี่ย่าน HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือส่วนโค้งของโลกได้ดี จึงทำให้มีการใช้คลื่นความถี่นี้ในระบบวิทยุสื่อสารระยะไกลที่อยู่บนพื้นผิวโลก อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างจากธรรมชาติที่ควรเป็นของคลื่นความถี่นี้ เนื่องจากมีการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอไม่เท่าใดนัก แม้ว่าเกิดการสูญเสียและการลดทอนระยะ 20 เมตร ไม่สูงเท่ากับย่านความถี่ LF ปลายแถบหรือ MF ต้นแถบก็ตาม แต่ก็ยากที่หวังผลการส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทได้

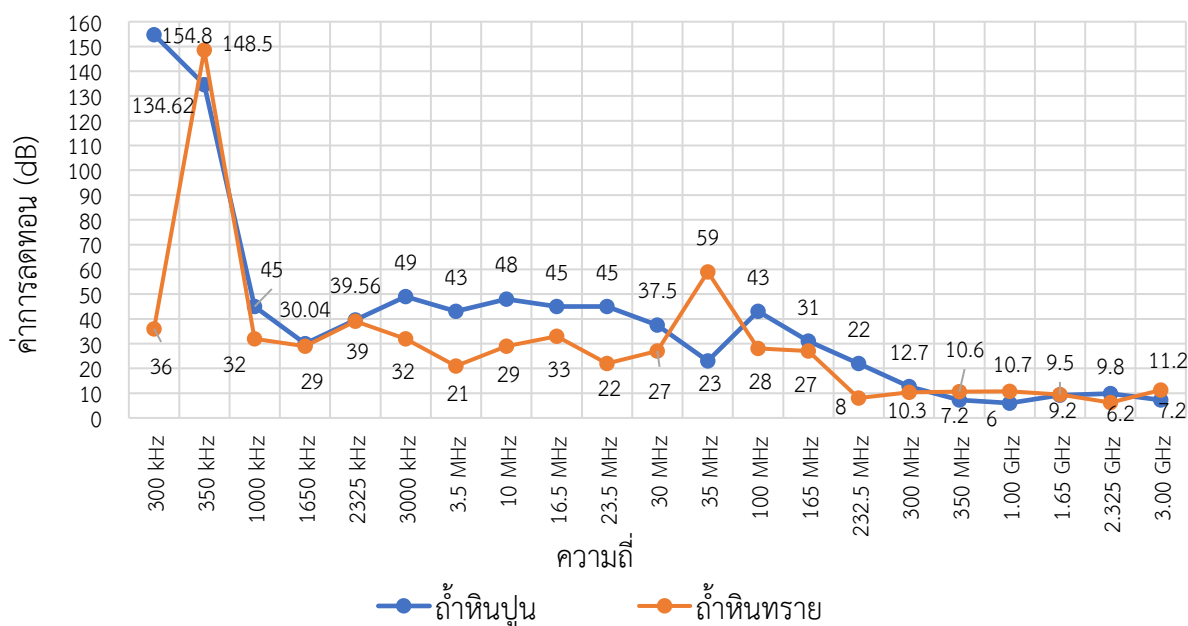
5) ที่ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง ซึ่งสามารถแพร่คลื่นได้ดีในภูมิภาคที่โล่งโดยคลื่นต้องอยู่ในแนวระดับสายตาและมีการสูญเสียในอากาศว่างเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำพบว่าเกือบทุกความถี่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านในถ้ำหินปูนอยู่ระหว่าง 0.837 dB/m ถึง 2.79 dB/m ในขณะที่วัดทดสอบในถ้ำหินทรายจะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านต่ำกว่า (0.732 dB/m ถึง 1.8 dB/m) ซึ่งค่าการลดทอนระยะ 20 เมตรก็มีลักษณะคล้ายกัน โดยที่ความถี่ 300 MHz มีค่าการสูญเสียและการลดทอนต่ำสุดทั้งในโพรง

ถ้าแบบหिनปูนและหिनทราย แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนก็คือ ยิ่งความถี่ในย่าน VHF นี้มีค่าสูงขึ้นกลับมีค่าการสูญเสียและการลดทอนลดลงที่ระยะทางเท่ากัน ซึ่งตั้งสมมุติฐานว่าเนื่องจากความยาวของคลื่นมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างกว่าได้ดีขึ้นแต่ยังคงเกิดการซึมลึกลงผิว (Skin depth) จึงเกิดการลดทอนในอากาศว่างสูงกว่าย่านความถี่ UHF

6) ที่ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่างเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นได้ดีในภูมิประเทศที่โล่งและอยู่ในแนวระดับสายตา สำหรับความถี่ในย่าน UHF นี้เมื่อทำการทดสอบในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทพบว่ามีค่าการสูญเสียและการลดทอนในระยะทาง 20 เมตรค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการวัดทดสอบในถ้ำหिनปูนและหिनทราย โดยมีสาเหตุมาจากสมมุติฐานขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่ในย่าน UHF นี้ได้ และมีค่าการซึมลึกลงผิวต่ำกว่าย่านความถี่ VHF นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงบ้าง เนื่องจากเมื่อคลื่นดังกล่าวแพร่ไปกระทบกับสิ่งกีดขวางในถ้ำและเกิดการสะท้อนไปยังจุดที่ติดตั้งสายอากาศภาครับ อาจทำให้เกิดการเสริมและหักล้างเฟสของคลื่นได้ อย่างไรก็ตามการลดทอนที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 8.8 dB ถึง 21.6 dB ซึ่งเกิดขึ้นในระยะทาง 20 เมตรยังถือว่าสูงอยู่มาก หากต้องการส่งรับคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหिनที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นแบบ LOS ซึ่งความถี่ในย่าน UHF ไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ นอกจากจะนำมาใช้โพรงถ้ำที่เป็นแนวตรงใกล้เคียงเงื่อนไขแบบ LOS หรือภายในถ้ำขนาดใหญ่ที่มีหिनอกหिनน้อยที่สุด



รูปที่ 121 กราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านของทุกความถี่แบบ V-H LOS ของถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) และถ้ำหินทราย (ถ้ำปาฏิหาริย์)



รูปที่ 122 กราฟเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะทาง 20 เมตร ของทุกความถี่แบบ V-H LOS ของถ้าหิ้นปูน (ถ้าหลวงเชียงดาว) และถ้าหิ้นทราย (ถ้าป่าภูหารีย์)

จากรูปที่ 121 และ 122 เป็นการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนการส่งผ่านรวมในระยะทาง 20 เมตร ยังคงเป็นการวัดทดสอบแบบแนวสายตา (Line of Sight: LOS) แต่ให้สายอากาศภาครับมีการโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวนอน (V-H Polarization) เพื่อพิจารณาว่าแต่ละคลื่นความถี่มีการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ในขณะที่แพร่ภายในโพรงถ้าหิ้นปูนและหิ้นทรายหรือไม่ ซึ่งปัจจัยหลักมาจากการสะท้อนของคลื่นบนผนังถ้าหรือสิ่งกีดขวางที่มีอยู่ตามทางเดินของโพรงถ้า จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้าหิ้นปูนและหิ้นทรายพบว่า

1) ความถี่ส่วนใหญ่ยังคงเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตร แบบ LOS ภายในโพรงถ้าหิ้นปูนจะมีค่าสูงกว่าถ้าหิ้นทราย ยกเว้นที่ความถี่ 350 kHz และ 35 MHz ซึ่งเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุด

2) ที่ความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) และย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz) เมื่อมีการแพร่คลื่นในโพรงถ้าหิ้นปูนจะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตร สูงกว่าค่าที่ได้การวัดทดสอบแบบ V-V มาก ในขณะที่ความถี่ 300 kHz ภายในถ้าหิ้นทรายค่าดังกล่าวยังคงใกล้เคียงกับกรณีของ V-V แสดงว่ามีเกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์ในขณะที่เหนี่ยวนำผ่านเนื้อหิ้นทรายด้วย แต่ที่ความถี่ 350 kHz ในโพรงถ้าหิ้นทรายยังคงเกิดการสูญเสียและการสูงทอนสูงกว่าการแพร่คลื่นในโพรงถ้าหิ้นปูนและมีค่าสูงกว่าการส่งและรับคลื่นแบบ V-H แต่ในกรณีของความถี่ 1000 kHz กลับพบว่ามีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนลดลงเมื่อแพร่ในถ้าหิ้นปูน แสดงว่ามีการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของคลื่นเกิดขึ้นด้วย ทำให้สายอากาศภาครับในแนวนอนสามารถรับค่ากำลังของคลื่นได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเดียวกันจะพบว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V ยังให้ค่าระดับที่สูงกว่าแบบ V-H ขณะที่เมื่อคลื่นความถี่นี้แพร่ในโพรงถ้าหิ้นทรายกลับพบว่ามีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนไม่แตกต่างจากกรณีของการทดสอบแบบ V-H มากนัก

3) ที่ความถี่ย่าน MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) แม้ว่าจะมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เป็นหินปูนหรือหินทรายก็ตาม แต่เมื่อวัดทดสอบแบบ V-H จะเห็นว่าที่ความถี่ 1650 MHz และ 2325 kHz มีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนลดลงอย่างใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของการโพลาไรซ์ด้วยจากสภาพแวดล้อมในโพรงถ้ำด้วย ในขณะที่ความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้มีค่าการสูญเสียและการลดทอนสูงกว่าอีกสองความถี่ทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายเช่นเดียวกับกรณีของการวัดทดสอบแบบ V-V แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเดียวกันจะพบว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V ยังให้ค่าระดับที่สูงกว่าแบบ V-H

4) ที่ความถี่ย่าน HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) เมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-H พบว่ามีแนวโน้มของพฤติกรรมการแพร่คลื่นในรูปแบบเดียวกับการวัดทดสอบแบบ V-V แต่มีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนที่ต่ำกว่าทั้งในกรณีของถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย โดยค่าที่วัดได้ในถ้ำหินปูนมีค่าสูงกว่าในถ้ำหินทรายเกือบทุกความถี่ ยกเว้นที่ความถี่ 35 MHz ที่วัดทดสอบในถ้ำหินทรายกลับพบว่ามีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนสูงมากกว่าในถ้ำหินปูน ซึ่งอาจเกิดจากโพลาไรซ์ในแนวนอนของคลื่นความถี่นี้ ถูกดูดซับลงสู่พื้นถ้ำมากกว่าความถี่อื่น แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเดียวกันจะพบว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V ยังให้ค่าระดับที่สูงกว่าแบบ V-H เช่นกัน

5) ที่ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) เมื่อเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับให้อยู่ในแนวนอนเพื่อรับคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แนวตั้ง (V-H) จะมีแนวโน้มของการเกิดการสูญเสียและการลดทอนเหมือนกับกรณีที่สายอากาศภาครับกับภาคส่งมีการโพลาไรซ์แนวตั้งเหมือนกัน (V-V) เพียงแต่มีค่าต่ำกว่าซึ่งไม่ได้หมายความว่า จะสามารถส่งและรับสัญญาณได้ไกลกว่าแบบ V-V เนื่องจากค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเดียวกันจะพบว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V อยู่ดี ยังให้ค่าระดับกำลังต่ำกว่าแบบ V-H

6) ที่ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่างเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF เมื่อทำการทดสอบทั้งในโพรงถ้ำหินปูนและหินทรายด้วยการโพลาไรซ์แบบ V-H พบว่ามีการสูญเสียและการลดทอนในระยะทาง 20 เมตรของทุกความถี่มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-V แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเดียวกันจะพบว่าการส่งรับคลื่นแบบ V-V ยังให้ค่าระดับที่สูงกว่าแบบ V-H เช่นเดียวกับกลุ่มความถี่ย่านที่ต่ำกว่า ดังนั้นหากต้องการใช้คลื่นความถี่ย่าน UHF ในการติดต่อสื่อสารในโพรงถ้ำชนิดใดก็ตาม ยังคงต้องใช้การโพลาไรซ์แบบ V-V และโพรงถ้ำต้องเป็นแนวตรงใกล้เคียงเงื่อนไขแบบ LOS หรือภายในโถงถ้ำขนาดใหญ่ที่มีหินงอกหินย้อยน้อยที่สุด

ตารางที่ 105 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ NLOS ระหว่างถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) และถ้ำหินทราย (ถ้ำปาฏิหาริย์)

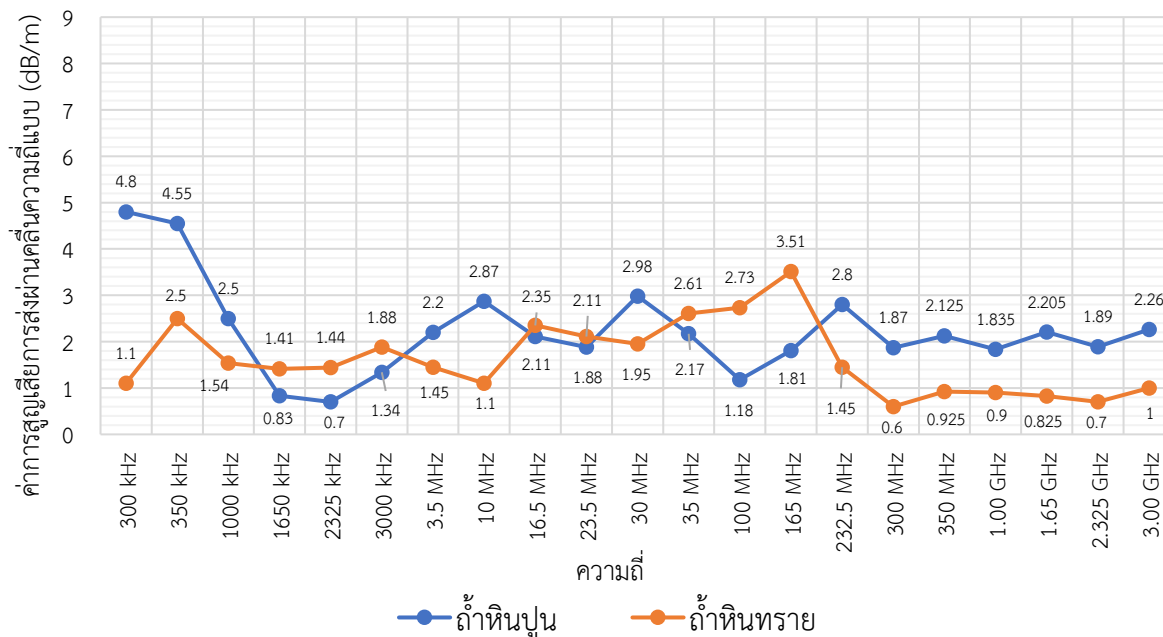
ความถี่	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านคลื่นความถี่แบบ NLOS (dB/m)			
	V-V Polarization		V-H Polarization	
	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย
300 kHz	4.8	1.1	4.2	0.5
350 kHz	4.55	2.5	8.55	6.5
1000 kHz	2.5	1.54	2.21	1.25
1650 kHz	0.83	1.41	5.00	1.39
2325 kHz	0.70	1.44	2.65	2.02
3000 kHz	1.34	1.88	1.32	1.86
3.5 MHz	2.20	1.45	1.65	3.00
10 MHz	2.87	1.1	3.92	4.00
16.5 MHz	2.11	2.35	3.97	5.75
23.5 MHz	1.88	2.11	2.65	1.31
30 MHz	2.98	1.95	1.44	4.30
35 MHz	2.17	2.61	1.19	6.00
100 MHz	1.18	2.73	1.01	6.50
165 MHz	1.81	3.51	2.05	2.18
232.5 MHz	2.80	1.45	2.17	1.31
300 MHz	1.870	0.600	1.545	0.875
350 MHz	2.125	0.925	1.035	0.650
1.00 GHz	1.835	0.900	0.085	0.500
1.65 GHz	2.205	0.825	0.035	0.448
2.325 GHz	1.890	0.700	1.075	0.389
3.00 GHz	2.260	1.000	1.440	0.344

หมายเหตุ กรณี NLOS จะพิจารณาเฉพาะค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นในบริเวณ L-bend เท่านั้น

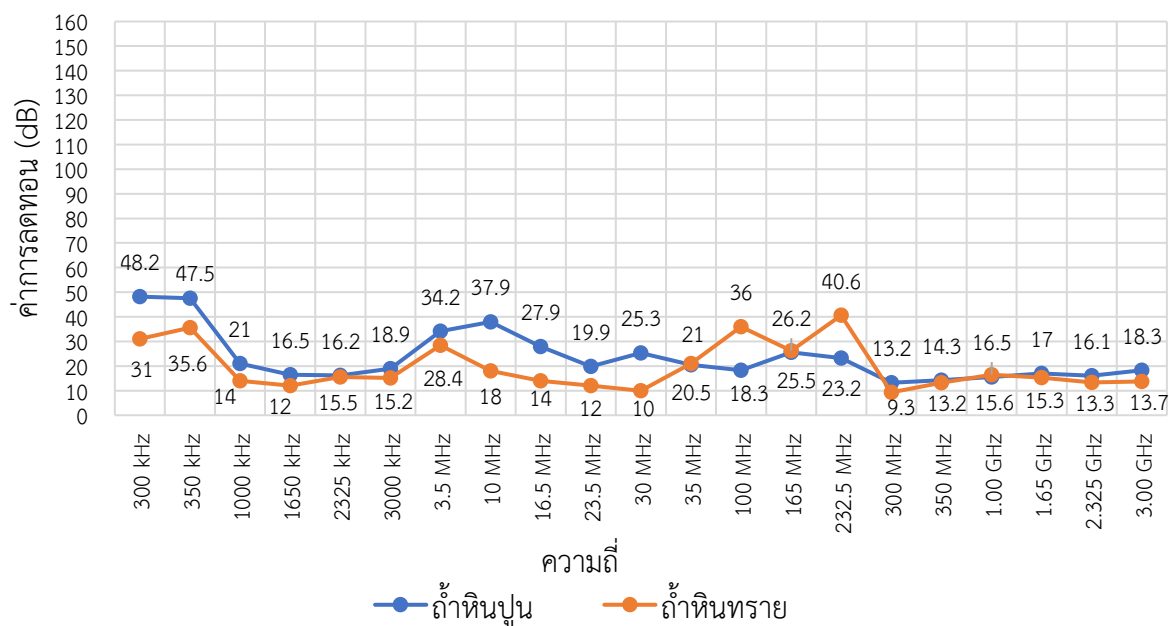
ตารางที่ 106 เปรียบเทียบค่าการลดทอนของคลื่นความถี่แบบ NLOS ระหว่างถ้ำหินปูน (ถ้ำหลวงเชียงดาว) และถ้ำหินทราย (ถ้ำปาฏิหาริย์)

ความถี่	ค่าการลดทอนแบบ NLOS (dB) ระยะ 10 เมตร และ 8 เมตร			
	V-V Polarization		V-H Polarization	
	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย	ถ้ำหินปูน	ถ้ำหินทราย
300 kHz	48.2	31	97.6	26
350 kHz	47.5	35.6	132.7	11
1000 kHz	21	14	21.26	18
1650 kHz	16.5	12	29.1	13
2325 kHz	16.2	15.5	24.7	6
3000 kHz	18.9	15.2	17	19
3.5 MHz	34.2	28.4	16.1	18
10 MHz	37.9	18	25.1	27
16.5 MHz	27.9	14	28.4	11
23.5 MHz	19.9	12	20.6	10
30 MHz	25.3	10	14.7	8
35 MHz	20.5	21	17.6	7
100 MHz	18.3	36	8.4	27
165 MHz	25.5	26.2	16	25
232.5 MHz	23.2	40.6	13.3	26.5
300 MHz	13.2	9.3	8.6	4.4
350 MHz	14.3	13.2	9.4	9.4
1.00 GHz	15.6	16.5	7.7	73
1.65 GHz	17	15.3	4.5	4.6
2.325 GHz	16.1	13.3	13.18	7.4
3.00 GHz	18.3	13.7	8	3.4

หมายเหตุ กรณี NLOS จะพิจารณาเฉพาะค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นในบริเวณ L-bend เท่านั้น



รูปที่ 123 กราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่ระยะทาง 10 และ 8 เมตร แบบ V-V NLOS ของถ้าหินปูน (ถ้าหลวงเชียงดาว) และถ้าหินทราย (ถ้าป่าภูหารีย์)



รูปที่ 124 กราฟเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะทาง 10 และ 8 เมตร แบบ V-V NLOS ของถ้าหินปูน (ถ้าหลวงเชียงดาว) และถ้าหินทราย (ถ้าป่าภูหารีย์) ตามลำดับ

ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่แพร่ในโพรงถ้ำนั้น จะพิจารณาจากผลการแพร่ของคลื่นที่มีสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติภายในโพรงถ้ำเป็นอุปสรรคขวางเส้นทางการแพร่คลื่นอยู่ เช่น ความคดเคี้ยวของโพรงถ้ำ ก้อนหินขนาดใหญ่ หรือหินงอกหินย้อยที่กีดขวางเส้นทางการแพร่ของคลื่นในแต่ละย่านความถี่ ดังนั้นในการพิจารณาจึงพิจารณาค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะจากจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งโค้งไปตามส่วนโค้งของผนังถ้ำที่เป็นสิ่งกีดขวางจนถึงระยะที่เป็นทางตรง โดยเรียกระยะนี้ว่า L-bend ซึ่งพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทดสอบภายในถ้ำหลวงเชียงดาว (หินปูน) จะมีระยะอยู่ที่ 10 เมตร และพื้นที่ที่ใช้ในการวัดทดสอบภายในถ้ำปฎิหารีย์ (หินทราย) จะมีระยะอยู่ที่ 8 เมตร โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านและค่าการลดทอนการส่งผ่าน (ที่ระยะ L-bend) ของทุกย่านความถี่ที่กำหนดแสดงไว้ในตารางที่ 105 และ 106 ตามลำดับ

จากรูปที่ 123 ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และในรูปที่ 124 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านในระยะทาง 10 เมตร (ถ้ำหินปูน) และ 8 เมตร (ถ้ำหินทราย) ซึ่งสอดคล้องของพื้นที่ที่มีอุปสรรคกีดขวางซึ่งถือว่าเป็นการส่งรับคลื่นแบบ NLOS โดยให้สายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับมีการโพลาไรซ์เป็นแบบแนวตั้งเหมือนกัน (V-V polarization) เพื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำหรือการซึมซาบของคลื่นในเนื้อของหินปูนและหินทราย การเลี้ยวเบน และการสะท้อนของคลื่นในแต่ละความถี่ จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้ำหินปูนและหินทรายพบว่า

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรเมื่อสิ้นสุดระยะ L-bend ของการวัดทดสอบแบบ V-V NLOS จะมีค่าสูงต่ำสลับกันไประหว่างภายในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย ดังแสดงในรูปที่ 123 ขณะที่ค่าการลดทอนการส่งผ่านด้วยระยะทางดังกล่าวในกรณีของถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าของถ้ำหินทรายตั้งแต่ความถี่ 300 kHz ถึง 30 MHz จากนั้นจะสลับมามีค่าต่ำกว่าตั้งแต่ความถี่ 35 MHz ถึง 232.5 MHz และขยับขึ้นสูงกว่าอีกครั้งจนถึงความถี่ 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 124

2) ที่ความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) และย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และ ค่าการลดทอนภายในเนื้อหินปูนที่กีดขวางสูงกว่าในเนื้อหินทราย โดยเฉพาะที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz มีค่าการสูญเสียต่อระยะหนึ่งเมตรสูงมากถึง 4.8 dB/m และ 4.55 dB/m ขณะที่การลดทอนการส่งผ่านจากจุดเริ่มต้นที่สายอากาศภาคส่งติดตั้งอยู่จนถึงจุดสิ้นสุดของระยะ L-bend มีค่าสูงมากเช่นกันอยู่ที่ 48.2 dB และ 47.5 dB ตามลำดับ เนื่องจากมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นดินหรือแบบคลื่นผิว (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) เมื่อส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่เป็นดินหรือหินจะเกิดการเหนี่ยวนำหรือซึมซาบเข้าไปในเนื้อตัวกลางนั้นมากกว่าที่จะแพร่คลื่นออกไปในแนวระดับสายตา ทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูงในกรณีของการวัดทดสอบแบบ NLOS และค่าการสูญเสียและการลดทอนการส่งผ่านในกรณีของถ้ำหินปูนมีค่าสูงกว่ากรณีของถ้ำหินทรายทั้งสามความถี่ อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่สูงขึ้นถึง 1000 kHz ค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนการส่งผ่านในระยะ L-bend จะมีค่าลดลงทั้งภายในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย ทั้งนี้อาจมีปัจจัยมาจากที่ความถี่ 1000 MHz การแพร่คลื่นจะเริ่มเปลี่ยนจากการซึมซาบลงเนื้อหินของผนังถ้ำเป็นการแพร่คลื่นบนพื้นผิวผนังถ้ำมากกว่า ทำให้สายอากาศภาครับซึ่งวางขนานและใกล้กับแนวผนังผนังถ้ำสามารถรับค่ากำลังที่แพร่ออกมาจากพื้นผิวของผนังถ้ำได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะผนังถ้ำหินปูนจะให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรต่ำกว่าผนังถ้ำหินทราย

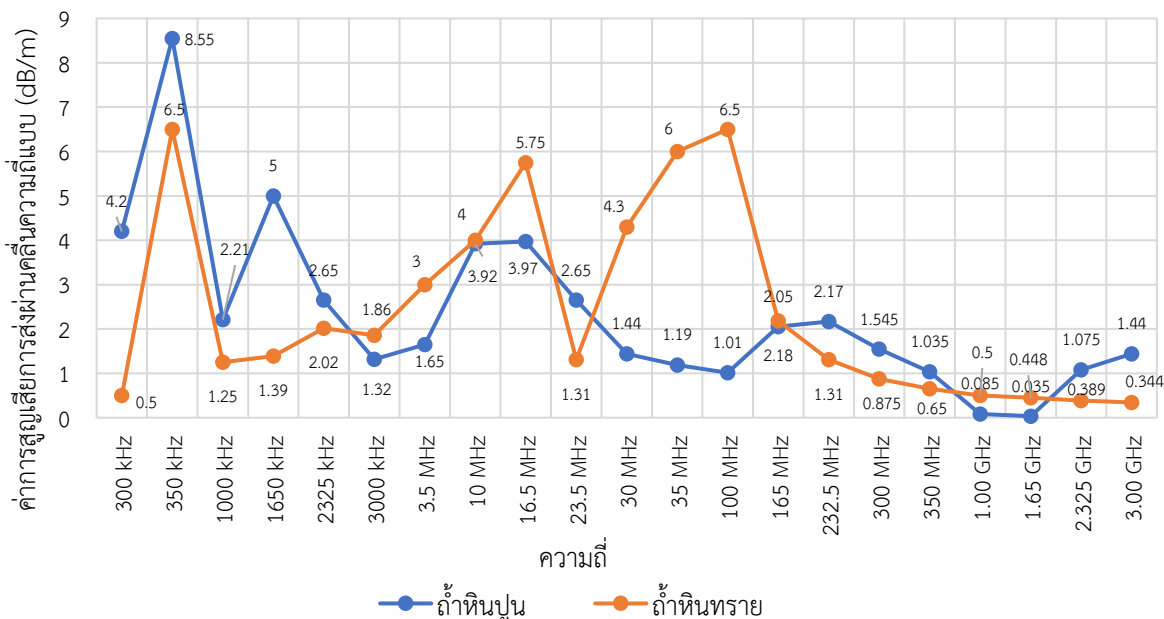
3) ที่ความถี่ย่าน MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิว และเช่นเดียวกันเมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผืนน้ำและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่กีดขวาง ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ขณะที่สายอากาศศรับอยู่ใกล้กับผืนน้ำและพื้นถ้ำได้ดีขึ้น แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งอยู่ย่านความถี่ MF ปลายแถบและ HF ต้นแถบ คุณสมบัติการแพร่คลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้ค่าการสูญเสียและการลดทอนเริ่มยกระดับขึ้นทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย แต่ในกรณี V-V NLOS นี้ มีข้อสังเกตว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เกิดขึ้นในถ้ำหินทรายจะสูงกว่าในถ้ำหินปูนเมื่อส่งด้วยคลื่นความถี่ชุดนี้ ในขณะที่ค่าการลดทอนเมื่อมีการแพร่คลื่นไปยังจุดสุดท้ายของบริเวณ L-bend จะมีค่าใกล้เคียงกัน

4) ที่ความถี่ ย่าน HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) แม้จะมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือส่วนโค้งของโลกได้ดี แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมเป็นแบบ NLOS จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผืนน้ำที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอในลักษณะของการกระเจิง (Scattering) แบบไร้ทิศทางมากกว่า ทำให้การสูญเสียและค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ความถี่มีค่าสูงขึ้นในกรณีของถ้ำหินปูนแต่มีค่าลดลงในกรณีของถ้ำหินทรายที่ความถี่ 10 MHz และมีค่าใกล้เคียงกันที่ความถี่ 16.5 MHz และ 23.5 MHz จากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงอีกครั้งหนึ่งที่ความถี่ 30 MHz (เช่นเดียวกับที่ความถี่ 10 MHz) จะเห็นว่าที่ความถี่ 23.5 MHz เกิดการสูญเสียการส่งผ่านบริเวณ L-bend มีค่าต่ำใกล้เคียงกันทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายและมีการลดทอนการส่งผ่านต่างกัน 7.9 dB ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากภายในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทมีสภาพแวดล้อมของสิ่งกีดขวางที่แตกต่างกันตลอดความยาวของโพรงถ้ำ การพิจารณาบริเวณ L-bend ตำแหน่งเดียวอาจจะใช้ไม่ได้กับบริเวณอื่นๆ จึงเป็นเรื่องยากที่จะใช้การส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำอย่างหวังผล

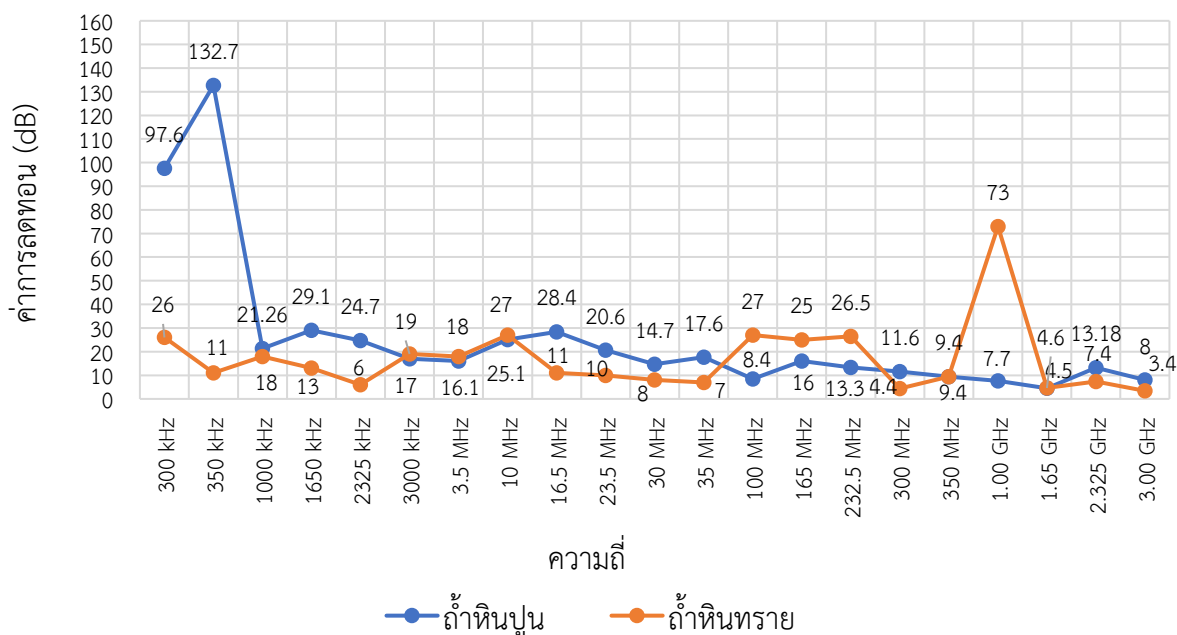
5) ที่ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) ซึ่งจะมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง เมื่อนำมาวัดทดสอบแบบ NLOS ซึ่งมีสิ่งกีดขวางเป็นผืนน้ำถ้ำและก้อนหินขนาดใหญ่ พบว่าเกือบทุกความถี่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านบริเวณ L-bend ในถ้ำหินปูนอยู่ระหว่าง 1.18 dB/m ถึง 2.8 dB/m ในขณะที่ในถ้ำหินทรายจะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่าที่ความถี่ 35 MHz, 100 MHz และ 165 MHz (2.61 dB/m ถึง 3.51 dB/m) ซึ่งค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นที่ปลายขอบเขตของ L-bend ก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นที่ 232.5 MHz และ 300 MHz ค่าการสูญเสียการส่งผ่านในถ้ำหินปูนจะมีค่าสูงกว่าในถ้ำหินปูนในขณะที่ค่าการลดทอนที่ปลายขอบเขต L-bend ที่เกิดขึ้นในถ้ำหินทรายยังคงมีค่าสูงกว่าในถ้ำหินทรายจนลดลงมาใกล้เคียงกับถ้ำหินปูนอีกครั้งที่ความถี่ 300 MHz

6) ที่ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่างเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF ซึ่งสามารถแพร่คลื่นแบบ LOS ได้ดีกว่าแบบ LNOS เมื่อทำการทดสอบในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทพบว่าการสูญเสียและการลดทอนการส่งผ่านในระยะของ L-bend สูงกว่ากรณีของ LOS โดยมีค่าใกล้เคียงทุกความถี่ ดังนั้นหากต้องการส่งรับคลื่นภายในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความคดเคี้ยวและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นทันทีทำให้ค่าระดับกำลังที่รับได้โดยสายอากาศศรับที่จุดสุดท้ายของ L-bend มีค่าต่ำเกินไป จึงไม่เหมาะสมที่จะ

ใช้ในระบบสื่อสารระยะไกลภายในโครงข่ายโทรคมนาคม โดย ยกเว้นจะออกแบบระบบเครื่องทวนสัญญาณ (repeater) ไว้ตามจุดต่างๆ ที่เป็นทางแยกหรือทางเลี้ยวภายในโครงข่าย



รูปที่ 125 กราฟเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่ระยะทาง 10 และ 8 เมตร แบบ V-H NLOS ของถ้าหिनปูน (ถ้าหลวงเซียงดาว) และถ้าหिनทราย (ถ้าปาฎิหารีย์)



รูปที่ 126 กราฟเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านที่ระยะทาง 10 และ 8 เมตร แบบ V-H NLOS ของถ้าหिनปูน (ถ้าหลวงเซียงดาว) และถ้าหिनทราย (ถ้าปาฎิหารีย์) ตามลำดับ

จากรูปที่ 125 ยังคงเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตร และในรูปที่ ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าการลดทอนการส่งผ่านในระยะเวลาทาง 10 เมตร (ถ้าหिनปูน) และ 8 เมตร

(ถ้าหินทราย) ซึ่งสุดขอบเขตของพื้นที่ที่มีอุปสรรคกีดขวาง (L-bend) ซึ่งถือว่าเป็นการส่งรับคลื่นแบบ NLOS โดยเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับมีการโพลาไรซ์เป็นแบบแนวนอน (V-H polarization) เพื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำหรือการซึมซาบของคลื่นในเนื้อของหินปูนและหินทราย การเลี้ยวเบน การสะท้อน และการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของคลื่นในแต่ละความถี่ จากกราฟเปรียบเทียบทั้งสองกรณีของทั้งถ้าหินปูนและหินทรายพบว่า

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรเมื่อสั้นสุดระยะ L-bend ของการวัดทดสอบแบบ V-H NLOS ภายในถ้าหินปูนและถ้าหินทรายจะมีค่าสูงต่ำสลับกันไป แต่ที่เห็นได้ชัดเจนนคือ มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรวัดทดสอบแบบ V-V ดังแสดงในรูปที่ 125 นอกจากนี้พบว่าในกรณีของถ้าหินทรายจะมีการสูญเสียการส่งผ่านฯ ดังกล่าวสูงกว่าที่ทำการวัดทดสอบในถ้าหินปูนอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าการลดทอนรวมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งท้ายสุดของ L-bend ในแต่ละความถี่จะมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีของ V-V NLOS ยกเว้นที่ ความถี่ 350 kHz (ถ้าหินปูน) และ 1.0 GHz (ถ้าหินทราย) โดยเฉพาะที่ความถี่ 350 kHz และที่ความถี่ 1650 kHz ในกรณีถ้าหินปูนจะเกิดค่าการสูญเสียสูงขึ้นจากเดิมถึง 4.17 dB ส่วนกรณีของถ้าหินทรายก็เกิดปรากฏการณ์ค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีค่าสูงขึ้นมากที่ความถี่ 16.6 MHz, 35 MHz และ 100 MHz

2) ที่ความถี่ย่าน LF ปลายแถบ (300 kHz) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านมีค่าแตกต่างจากกรณีการวัดทดสอบแบบ V-V เพียงเล็กน้อย แต่ค่าการลดทอนตลอดระยะของ L-bend ในถ้าหินปูนจะมีค่าสูงกว่าแบบ V-V ถึง 49.4 dB ซึ่งแสดงว่าคลื่นความถี่ 300 kHz เมื่อเหนี่ยวนำเข้าไปในเนื้อหินปูนจะไม่มีมีการเปลี่ยนโพลาไรซ์ แต่ถ้าเป็นเนื้อหินทรายจะมีการเปลี่ยนโพลาไรซ์ด้วยซึ่งทำให้ค่าการลดทอนฯ มีค่าต่ำกว่าที่วัดได้แบบ V-V ประมาณ 5 dB ขณะที่ย่าน MF ต้นแถบ (350 kHz) มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงที่สุดและสูงกว่าการวัดทดสอบแบบ V-V ประมาณ 4 dB ทั้งถ้าหินปูนและถ้าหินทราย และการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ในเนื้อหินทรายเช่นเดียวกับความถี่ 300 kHz ส่วนที่ความถี่ 1000 kHz มีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบ V-V (ทั้งถ้าหินปูนและถ้าหินทราย) แสดงว่านอกจากมีการแพร่บนผิวแล้วยังมีการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ตามรูปร่างของผนังถ้าด้วย

3) ที่ความถี่ย่าน MF (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) พบว่าเมื่อวัดทดสอบแบบ V-H NLOS ในถ้าหินปูนจะเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านยกระดับสูงขึ้นกว่าที่เกิดขึ้นในถ้าหินทรายทั้งสามความถี่ ขณะที่การสูญเสียการส่งผ่านฯ ที่เกิดขึ้นในถ้าหินทรายจะมีค่าสูงกว่ากรณีของ V-V NLOS เพียงเล็กน้อย แสดงว่าการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของคลื่นที่ย่านความถี่ MF จะเกิดขึ้นกับผนังถ้าหินทรายมากกว่าผนังถ้าหินปูน จึงส่งผลให้ค่าการลดทอนตลอดระยะบริเวณของ L-bend ที่เกิดขึ้นในถ้าหินปูนมีค่าสูงกว่าที่เกิดขึ้นในถ้าหินทราย

4) ที่ความถี่ย่าน HF (3.5 MHz, 10 MHz, 16.5 MHz, 23.5 MHz และ 30 MHz) เมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-H NLOS พบว่าในกรณีของถ้าหินทรายเกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่ากรณีของถ้าหินปูนเกือบทุกความถี่ ยกเว้นที่ความถี่ 23.5 MHz ที่มีค่าลดลงจากกรณีที่วัดทดสอบแบบ V-V ประมาณ 1.1 dB แต่ยังคงมีค่าการลดทอนรวมตลอดระยะ L-bend ใกล้เคียงกัน จึงอาจตั้งสมมุติฐานได้ว่า การสะท้อนของคลื่นย่านความถี่ HF สามารถสะท้อนบนผนังถ้าหินปูนได้ดีกว่าและสายอากาศภาครับอาจรับคลื่นที่มาจากการสะท้อนดังกล่าวได้จึงทำให้รับค่ากำลังได้สูงกว่า ในขณะที่คลื่นในย่านความถี่นี้เมื่อกระทบกับผนังถ้าหินทรายได้เกิดการซึมซับคลื่นเข้าสู่ผนังมากกว่าการสะท้อนออกไป จึงทำให้สายอากาศภาครับรับค่ากำลังได้น้อยกว่า

5) ที่ย่านความถี่ VHF (35 MHz, 100 MHz, 165 MHz, 232.5 MHz และ 300 MHz) เมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-H NLOS พบว่าในกรณีของถ้ำหินทรายจะเกิดค่าสูญเสียการส่งผ่านสูงกว่าที่เกิดขึ้นในถ้ำหินปูน ณ ที่ความถี่ 35 MHz, 100 MHz, 165 MHz เช่นเดียวกับกรณีของการวัดทดสอบแบบ V-V แต่มีค่าที่สูงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณีของถ้ำหินปูนนั้นค่าการสูญเสียการส่งผ่านแบบ V-H จะต่ำกว่ากรณีการวัดทดสอบแบบ V-V เกือบทุกความถี่ แต่ยกเว้นที่ความถี่ 165 MHz จะมีค่าสูญเสียสูงกว่าแบบ V-V ประมาณ 0.24 dB (ถือว่าใกล้เคียง) แสดงให้เห็นว่าผนังของถ้ำหินปูนสามารถเปลี่ยนการโพลาไรซ์ของคลื่นย่านความถี่ VHF ได้ง่ายกว่าผนังถ้ำหินทราย ทำให้สายอากาศภาครับรับค่ากำลังของคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แนวนอนได้สูงกว่าในแนวตั้ง ซึ่งยืนยันได้จากค่าการลดทอนรวมตลอดระยะของ L-bend ในถ้ำหินทรายมีค่าสูงกว่ากรณีของถ้ำหินปูนอย่างเห็นได้ชัด

6) ที่ย่านความถี่ UHF (350 MHz, 1 GHz, 1.65 GHz, 2.325 GHz และ 3.0 GHz) เมื่อทำการวัดทดสอบแบบ V-H NLOS พบว่าค่าสูญเสียการส่งผ่านในกรณีถ้ำหินปูนที่เคยสูงกว่าในกรณีถ้ำหินทรายประมาณ 1 dB ในทุกความถี่ ได้ค่อยๆ ลดลงมาจากกระทั่งมีค่าต่ำกว่าของถ้ำหินทรายที่ความถี่ 1 GHz และ 1.65 GHz และขยับขึ้นสูงกว่าอีกครั้งที่ความถี่ 2.325 GHz และ 3.0 GHz ในขณะที่ค่าการลดทอนรวมตลอดระยะของ L-bend ที่ความถี่ 1 GHz กรณีของถ้ำหินทรายกลับมีค่าสูงกว่าของถ้ำหินปูนและสูงกว่าในกรณีของการวัดทดสอบแบบ V-V ถึง 56.5 dB ซึ่งหากการปรับตั้งเครื่องมือวัดและตำแหน่งสายอากาศภาครับไม่เปลี่ยนแปลงกรณีเช่นนี้จะทำนายได้ว่าที่ความถี่ UHF ทั้งผนังถ้ำหินปูนและหินทรายสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ได้เนื่องจากค่าการลดทอนในระยะ L-bend มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ความถี่ 1.0 GHz เมื่อกระทบกับผนังถ้ำหินทรายจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนการโพลาไรซ์ เนื่องจากสายอากาศภาครับไม่สามารถใช้การโพลาไรซ์แบบแนวนอนรับค่ากำลังของคลื่นความถี่นี้ได้ อย่างไรก็ตามคลื่นความถี่ย่าน UHF ที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้สร้างระบบสื่อสารระยะใกล้ภายในโพรงถ้ำที่เป็นแนว LOS หรือภายในโถงถ้ำขนาดใหญ่ และใช้ระบบเครื่องทวนสัญญาณติดตั้งไว้ตามมุมทางแยกหรือทางโค้ง ก็คือความถี่ในช่วง 2.325 GHz- 3.0 GHz เพราะว่ามีค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนการส่งผ่านใกล้เคียงกันทั้งในถ้ำหินปูนและหินทราย

8. การวัดทดสอบเพิ่มเติมเพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ของการแพร่คลื่นระยะไกลในโพรงถ้ำ

8.1 การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นผิว

จากการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นความถี่ย่าน LF, MF, HF, VHF และ UHF โดยทำการวัดทดสอบภายในโพรงถ้ำหินปูนและถ้ำหินทรายที่ผ่านมามีทั้งหมดนั้น พบว่าทุกย่านความถี่เมื่อทำการวัดทดสอบโดยการสร้างสถานการณ์ให้เสมือนกับการส่งในอากาศว่างในแนวระดับสายตาหรือ LOS นั้น จะมีปรากฏการณ์ที่แตกต่างจากการส่งในอากาศว่างตามคุณสมบัติการแพร่คลื่นในแต่ละย่านความถี่อย่างมาก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ ยิ่งคลื่นความถี่สูงขึ้น (ความยาวคลื่นสั้นลง) จะสามารถแพร่ผ่านโพรงของถ้ำได้ดีกว่าที่ความต่ำโดยการสังเกตจากค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนการส่งผ่านรวมที่เกิดขึ้นในระยะ 20 เมตรเท่ากัน เนื่องจากลักษณะของโพรงถ้ำมีลักษณะเหมือนกับท่อนำคลื่นที่มีขนาดความกว้างและความสูงที่ไม่สม่ำเสมอจึงตอบสนองในการส่งผ่านคลื่นได้ดีในกรณีที่คลื่นความถี่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าขนาดของโพรงถ้ำบริเวณนั้นๆ นอกจากนี้องค์ประกอบของสสารที่ประกอบกันเป็นเนื้อหินปูนและหินทรายและที่ทำหน้าที่เสมือนกับผนังภายในของท่อนำคลื่นก็มีค่าความนำไฟฟ้า ค่าสภาพยอมไฟฟ้า และค่าซึมซาบแม่เหล็กแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งส่งผลต่อการสะท้อนและการซึมซาบของบางย่านความถี่ส่งผลให้ค่ากำลังของคลื่นที่ไปยังตำแหน่งของสายอากาศภาครับมีค่าที่ไม่มีความเสถียรอีกด้วย และส่งผลกระทบต่ออย่างมากเมื่อทำการทดลองส่งผ่านคลื่นแบบที่มีสิ่งกีดขวางเป็นส่วนโค้งของผนัง ก้อนหินทางธรรมชาติขนาดใหญ่ หินงอกหินย้อย หรือทางแยกในโพรงถ้ำมาเป็นอุปสรรคในเส้นทางการแพร่คลื่น ซึ่งเป็นกรณีที่ผู้วิจัยใช้คำว่า NLOS เป็นคำอ้างอิงตลอดรายงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งพบว่าเกิดการสูญเสียต่อหนึ่งเมตรและการลดทอนตลอดระยะทางของสิ่งกีดขวางที่กำหนดชื่อของบริเวณนั้นว่า L-bend สูงกว่าการทดสอบแบบ LOS มาก

ดังนั้นการที่จะใช้วิธีติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุภายในโพรงถ้ำที่มีระยะไกลจึงไม่สามารถจะใช้วิธีเลียนแบบการแพร่คลื่นแบบปกติในอากาศว่างได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดทดสอบเพิ่มเติมโดยใช้ธรรมชาติของการแพร่คลื่นที่สามารถแพร่ไปบนพื้นผิวของโพรงถ้ำและบนผนังถ้ำ โดยใช้ข้อสังเกตจากผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้รายงานแล้วว่าที่บ่งบอกชัดเจนว่าความถี่ย่าน MF ตั้งแต่ 1000 kHz ไปจนถึงความถี่ 3500 kHz ซึ่งอยู่ต้นแถบของย่านความถี่ HF ต้นแถบจะมีคุณสมบัติในการแพร่คลื่นบนพื้นผิวได้ดี นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งว่าที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ LF ปลายแถบและ MF ต้นแถบมีการแพร่คลื่นโดยใช้วิธีเหนี่ยวนำหรือซึมซาบลงในเนื้อหินปูนและเนื้อหินทรายได้ดี โดยการสังเกตจากในกรณีที่มีการวัดทดสอบแบบ V-V LNLOS ซึ่งเกิดการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรและการลดทอนรวมตลอดระยะทางของแนวโค้งของผนังถ้ำมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลจากพฤติกรรมที่ได้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นมาทั้งหมดอีกครั้งหนึ่ง

จากผลการวัดทดสอบที่ได้รายงานผ่านมา จะเห็นว่าการใช้คลื่นความถี่ในย่าน VHF ซึ่งมีพฤติกรรมการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้สร้างเครื่องวิทยุสื่อสารระยะ 500 เมตร ภายในโพรงถ้ำ เนื่องจากภายในมีสิ่งกีดขวางจากสภาพแวดล้อมภายในถ้ำที่ไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถคาดเดาได้ (ในกรณีที่ไม่เคยเข้าไปภายในโพรงถ้ำเป้าหมายเลย) ดังนั้นจึงทำการวัดทดสอบเพิ่มเติมในกรณีที่โพรงถ้ำมีลักษณะเป็น NLOS เพื่อสืบค้นพฤติกรรมในกรณีของคลื่นผิวที่มีการแพร่บนพื้นผิวทางเดินและบนผนังถ้ำของคลื่นความถี่ย่าน LF (ปลายแถบ), MF และ HF (ต้นแถบ) เฉพาะกรณีของถ้ำปาฏิหาริย์ เนื่องจากมีค่าการลดทอนและค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ ขณะทำการทดสอบแบบ NLOS ของ

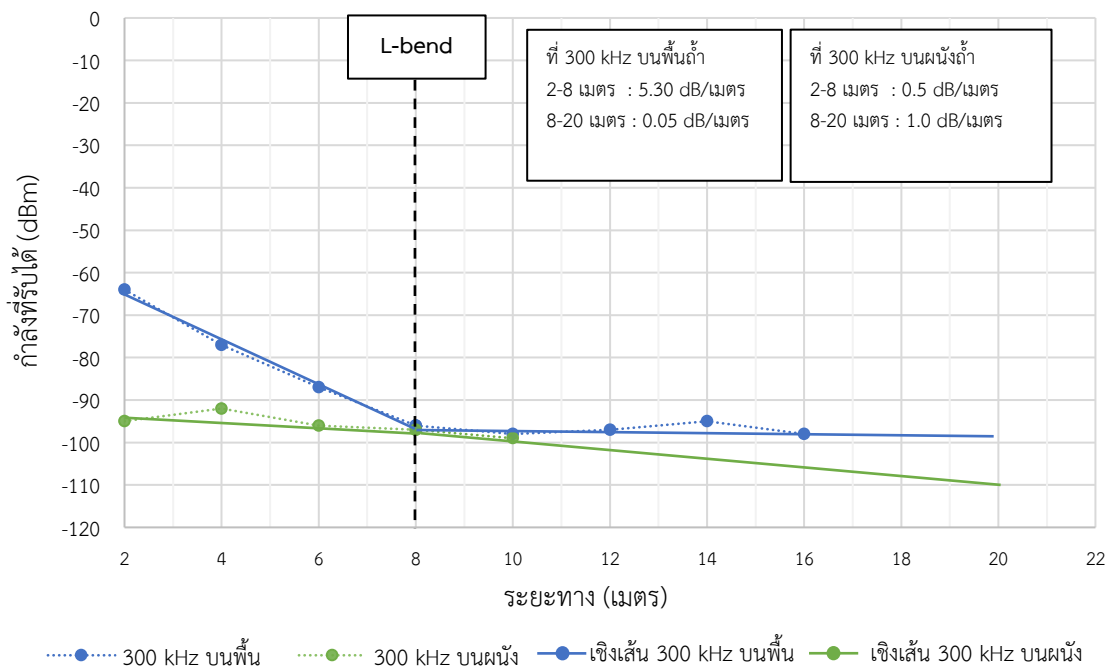
ความถี่ส่วนใหญ่ในย่านความถี่นี้ต่ำกว่ากรณีของถ้ำหินปูนเพิ่มเติมมาอีกกรณีหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 127 และได้บันทึกผลการวัดทดสอบและแสดงในรูปของกราฟไว้ในตารางที่ 107 – 113 และรูปที่ 128 – 138 ตามลำดับ



รูปที่ 127 การวัดทดสอบพฤติกรรมกรรมการแพร่คลื่นแบบคลื่นผิวโดยใช้ความถี่ย่าน LF, MF และ HF

ตารางที่ 107 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 300 kHz

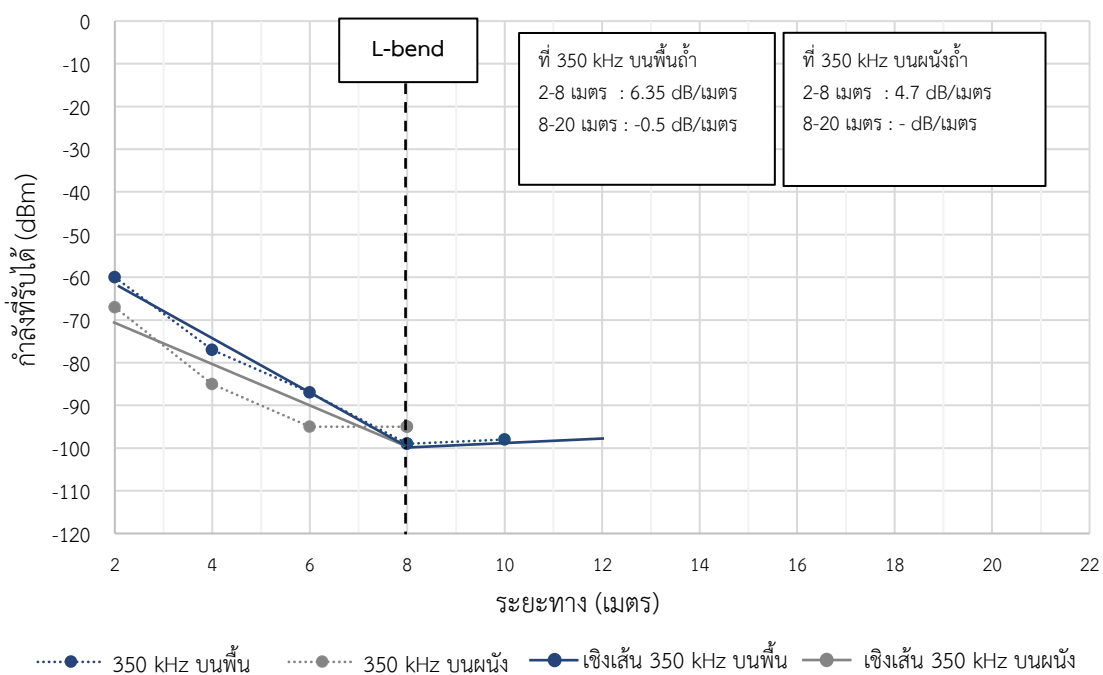
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นถ้ำ (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังถ้ำ (dBm)
1	2	-60	-67
2	4	-77	-85
3	6	-87	-95
4	8	-99	-95
5	10	-98	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 128 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 300 kHz

ตารางที่ 108 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 350 kHz

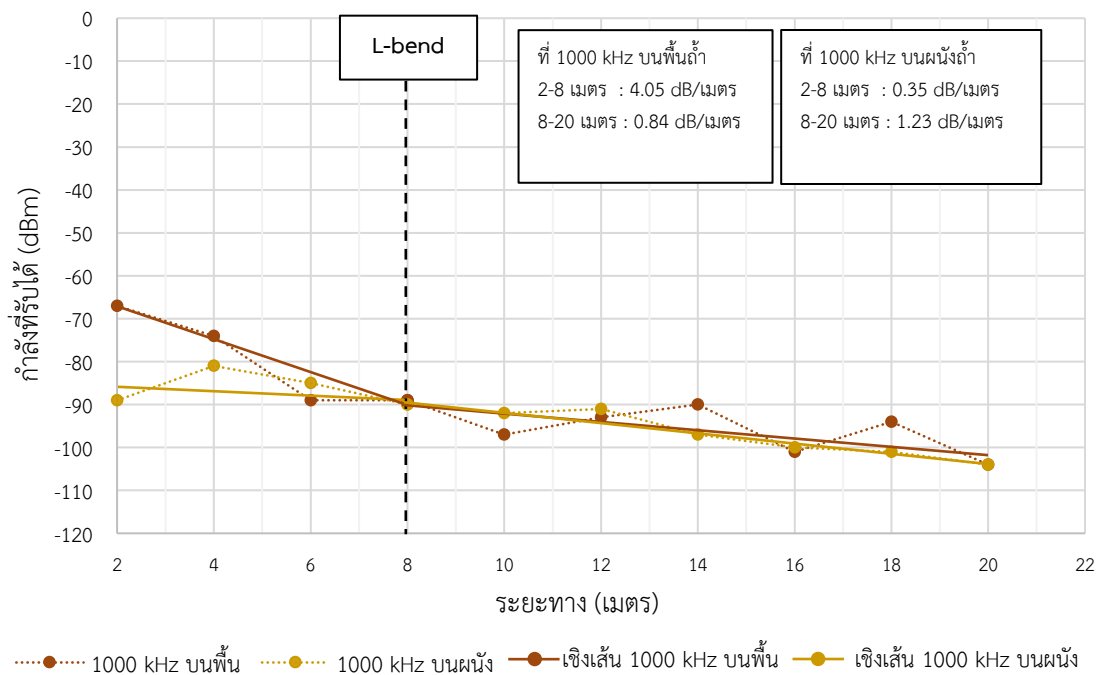
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่รับได้บนพื้นที่ (dBm)	กำลังที่รับได้บนผนัง (dBm)
1	2	-60	-67
2	4	-77	-85
3	6	-87	-95
4	8	-99	-95
5	10	-98	-
6	12	-	-
7	14	-	-
8	16	-	-
9	18	-	-
10	20	-	-



รูปที่ 129 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 350 kHz

ตารางที่ 109 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 1000 kHz

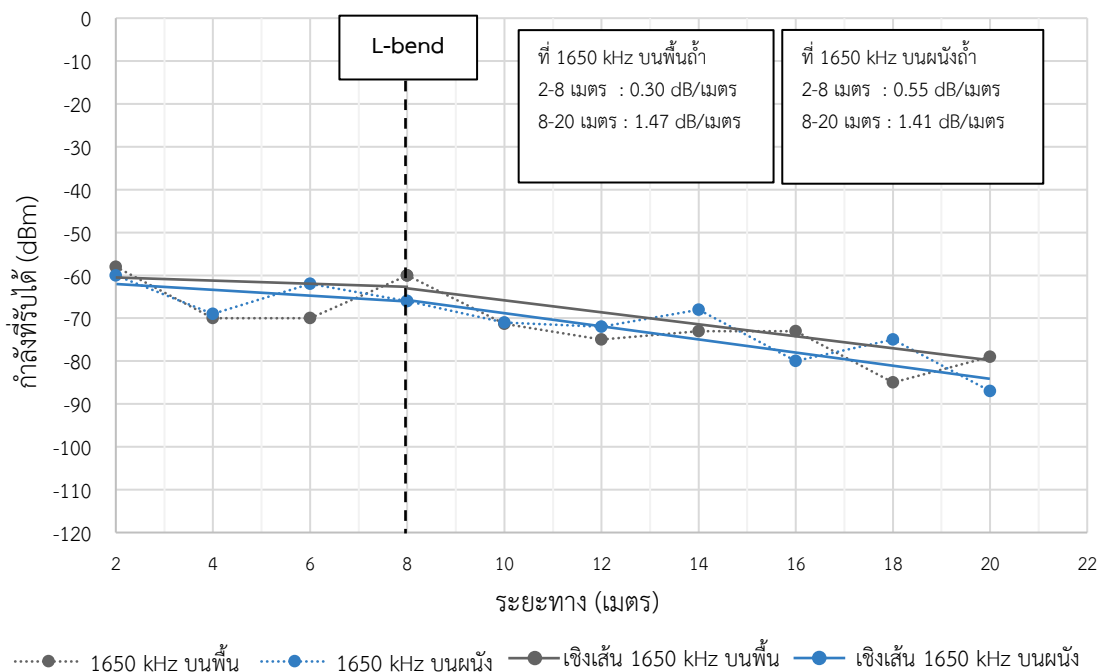
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นถ้ำ (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังถ้ำ (dBm)
1	2	-67	-89
2	4	-74	-81
3	6	-89	-85
4	8	-89	-90
5	10	-97	-92
6	12	-93	-91
7	14	-90	-97
8	16	-101	-100
9	18	-94	-101
10	20	-104	-104



รูปที่ 130 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 1000 kHz

ตารางที่ 110 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 1650 kHz

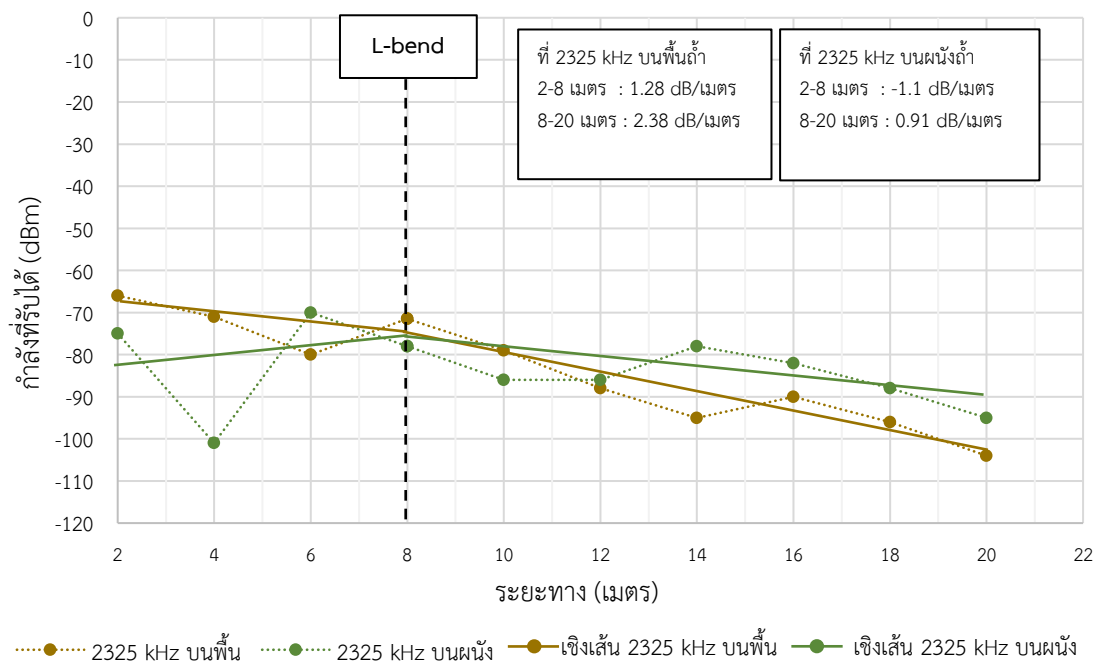
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นถ้ำ (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังถ้ำ (dBm)
1	2	-58	-60
2	4	-70	-69
3	6	-70	-62
4	8	-60	-66
5	10	-71.3	-71
6	12	-75	-72
7	14	-73	-68
8	16	-73	-80
9	18	-85	-75
10	20	-79	-87



รูปที่ 131 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 1650 kHz

ตารางที่ 111 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 2325 kHz

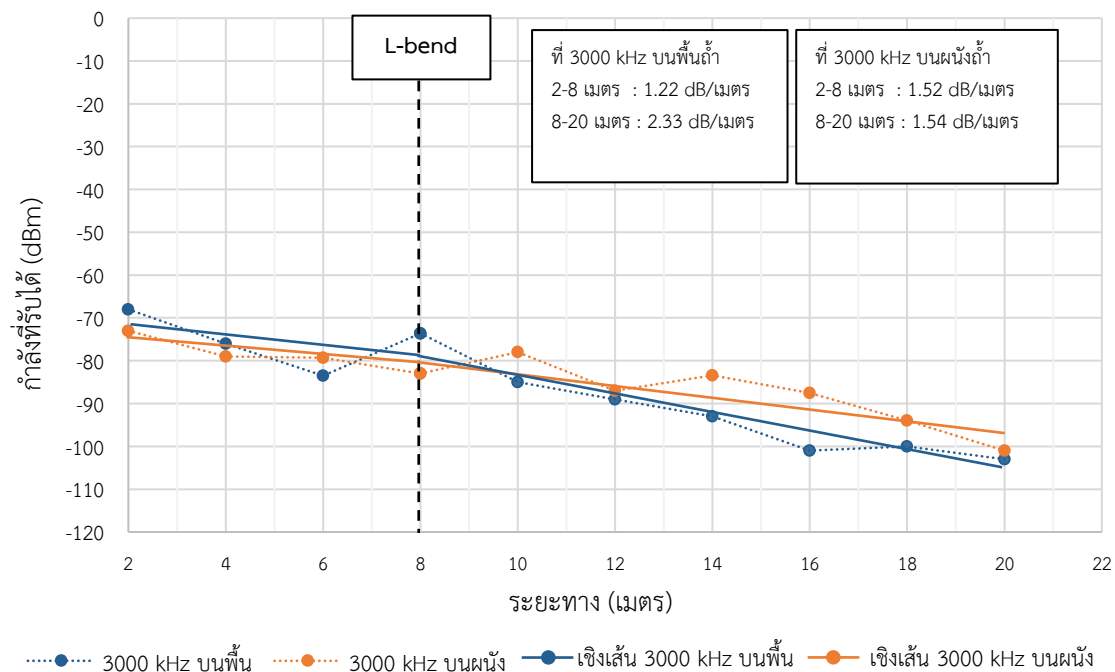
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นล่าง (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังล่าง (dBm)
1	2	-66	-75
2	4	-71	-101
3	6	-80	-70
4	8	-71.5	-78
5	10	-79	-86
6	12	-88	-86
7	14	-95	-78
8	16	-90	-82
9	18	-96	-88
10	20	-104	-95



รูปที่ 132 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 2325 kHz

ตารางที่ 112 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 3000 kHz

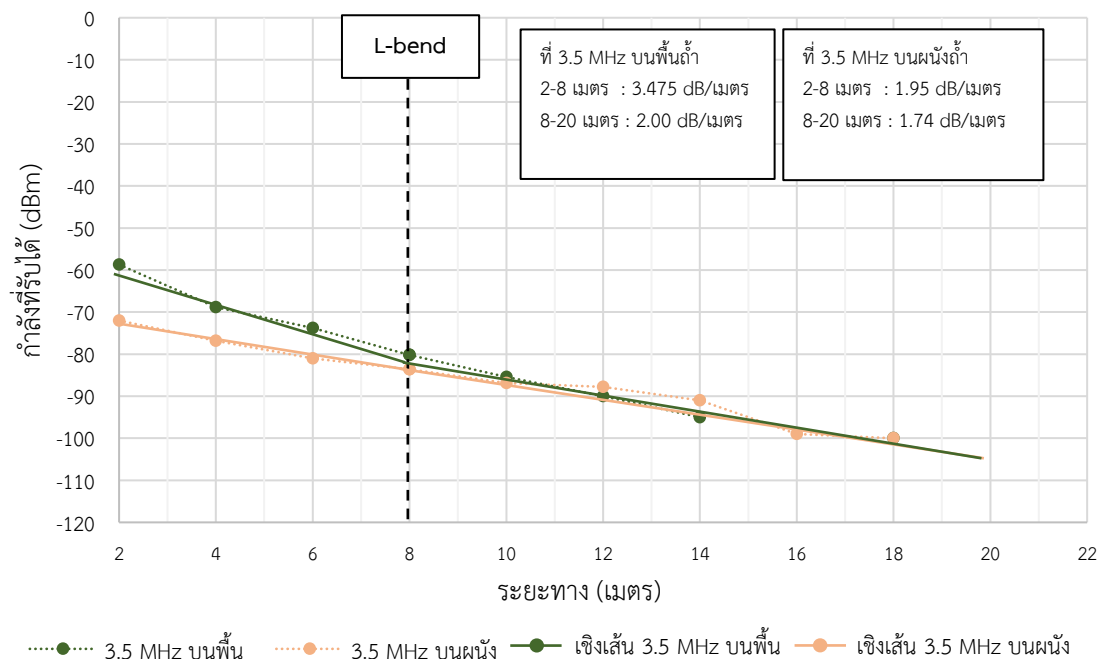
ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นถ้ำ (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังถ้ำ (dBm)
1	2	-68	-73
2	4	-76	-79
3	6	-83.5	-79.3
4	8	-73.6	-83
5	10	-85	-78
6	12	-89	-87
7	14	-93	-83.4
8	16	-101	-87.5
9	18	-100	-94
10	20	-103	-101



รูปที่ 133 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 3000 kHz

ตารางที่ 113 ผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 3.5 MHz

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	ค่ากำลังที่รับได้บนพื้นถ้ำ (dBm)	ค่ากำลังที่รับได้บนผนังถ้ำ (dBm)
1	2	-58.7	-72
2	4	-68.8	-76.8
3	6	-73.8	-81
4	8	-80.2	-83.6
5	10	-85.4	-86.9
6	12	-90	-87.8
7	14	-95	-91
8	16	-	-99
9	18	-100	-100
10	20	-	-

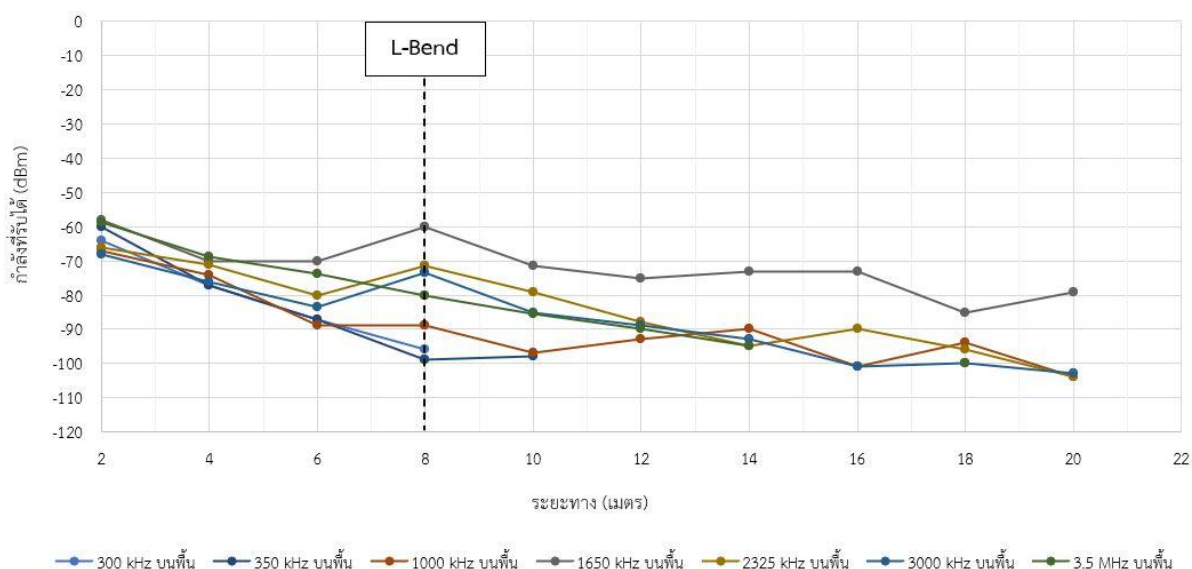


รูปที่ 134 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิวตามเส้นทางแบบแนว NLOS ที่ความถี่ 3.5 MHz

จากผลการวัดทดสอบในตารางที่ 107 ถึง 113 พบว่าที่ความถี่ 300 kHz, 350 kHz, 1000 kHz, 1650 kHz, 2325 kHz, 3000 kHz และ 3.5 MHz สามารถรับค่ากำลังของสัญญาณบนพื้นถ้ำได้สูงกว่าบนผนังถ้ำ และเมื่อนำกราฟแสดงค่าการสูญเสียการส่งผ่านฯ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 128 ถึง 134 มาพิจารณาค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นบนพื้นถ้ำช่วงบริเวณที่เป็น L-bend มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่าที่มากขึ้น (ค่าในวงเล็บ) จะปรากฏค่าดังนี้ ที่ความถี่ 1650 kHz (0.30 dB/m), 3000 kHz (1.22 dB/m), 2325 kHz (1.28 dB/m), 3.5 MHz (3.475 dB/m), 1000 kHz (4.05 dB/m), 300 kHz (5.30 dB/m) และ 350 kHz (6.35 dB/m) ขณะที่นำค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นบนผนังถ้ำช่วงบริเวณที่เป็น L-bend มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่าที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน จะปรากฏค่าดังนี้ ที่ความถี่ 1000 kHz (0.35 dB/m), 300 kHz (0.5 dB/m), 1650 kHz (0.55 dB/m), 3000 kHz (1.52 dB/m), 3.5 MHz (1.95 dB/m), 350 kHz (4.7 dB/m) และ 2325 kHz (-1.1 dB/m) อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่คำนวณได้จากผลการวัดระดับกำลังของสัญญาณที่ทุกระยะ 2 เมตร ไม่อาจนำมาพิจารณาเป็นหลักได้ เนื่องจากธรรมชาติของพื้นถ้ำหรือผนังถ้ำเป็นตัวกลางแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic media) ไม่เหมือนกับตัวกลางที่เป็นอากาศว่างซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวกลางเดี่ยวแบบไอโซทรอปิก (Isotropic media) ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีการคำนวณหาการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเส้นทาง หรือ Path loss ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากระยะทางและค่าระดับกำลังที่รับได้ด้วยสายอากาศภาครับเพื่อนำผลที่ได้มาทำนายความเป็นไปได้ของแต่ละคลื่นความถี่ว่ามีพฤติกรรมในการแพร่คลื่นแบบคลื่นผิวได้ดีเช่นไร โดยทำการเปรียบเทียบระดับความแรงของสัญญาณตามตารางที่ 114 และระยะของการรับสัญญาณได้ตามกราฟในรูปที่ 135

ตารางที่ 114 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิว (บนพื้นถ้ำ) แบบ NLOS

ลำดับ ที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)
1	2	-64	-60	-67	-58	-66	-68	-58.7
2	4	-77	-77	-74	-70	-71	-76	-68.8
3	6	-87	-87	-89	-70	-80	-83.5	-73.8
4	8	-96	-99	-89	-60	-71.5	-73.6	-80.2
5	10	-98	-98	-97	-71.3	-79	-85	-85.4
6	12	-97	-	-93	-75	-88	-89	-90
7	14	-95	-	-90	-73	-95	-93	-95
8	16	-98	-	-101	-73	-90	-101	-
9	18	-	-	-94	-85	-96	-100	-100
10	20	-	-	-104	-79	-104	-103	-



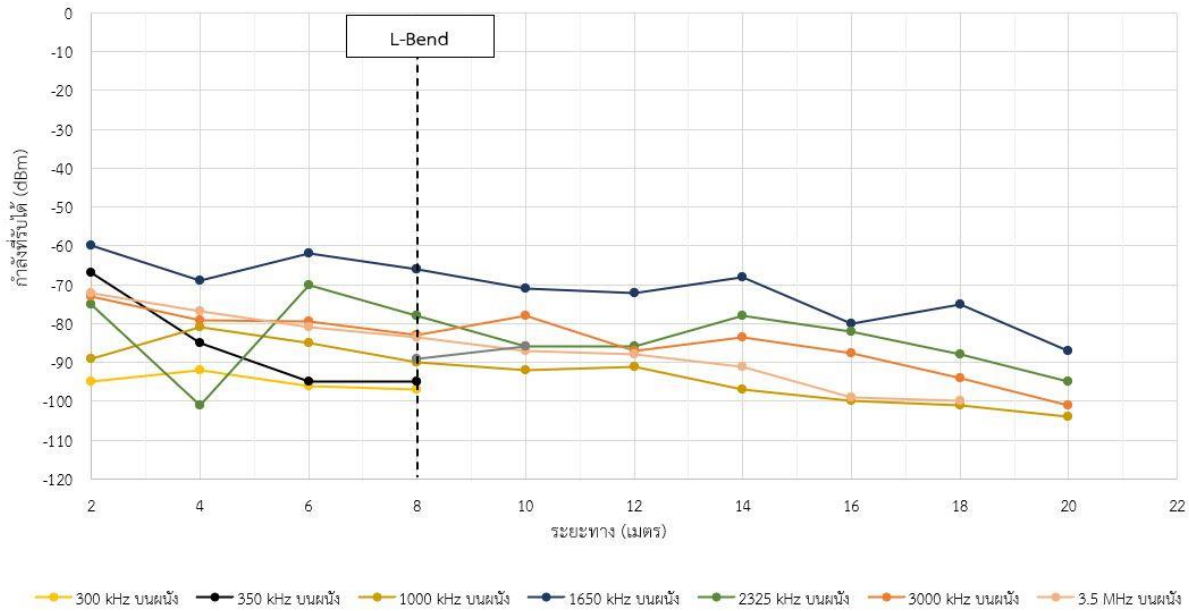
รูปที่ 135 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิว (บนพื้นถ้ำ) ตามเส้นทางแบบแนว NLOS

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังที่รับค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ด้วยสายอากาศภาครับแบบแอกทีฟทุกระยะ 2 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 114 จะเห็นว่าที่ความถี่ 300 kHz และ 350 kHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ LF ช่วงปลายแถบและ MF ช่วงต้นแถบ จะมีพฤติกรรมการแพร่บนพื้นผิวถ้ำได้ไม่ดีเท่ากับความถี่ย่าน MF ตั้งแต่กลางแถบจนถึงปลายแถบ (1650 kHz – 3000 kHz) และความถี่ย่าน HF ต้นแถบ (3.5 MHz) และเมื่อพิจารณาค่าการลดทอนของกำลังที่รับได้ด้วยสายอากาศภาครับที่เกิดขึ้นบนพื้นถ้ำ (แนวทางเดิน) ที่ระยะทาง 20 เมตร จะเกิดค่าการลดทอนรวมเท่ากับ >34 dB ที่ระยะ 16 เมตร (300 kHz), >38 dB ที่ระยะ 10 เมตร (350 kHz), 37 dB (1000 kHz), 21 dB (1650 kHz), 38 dB (2325 kHz), 35 dB (3000 kHz) และ >51 dB

ที่ระยะ 18 เมตร (3.5 MHz) อย่างไรก็ตามค่ากำลังที่รับได้ดังกล่าว ได้ถูกส่งออกมาจากสายอากาศแบบแถบกว้างที่มีค่าอัตราขยายไม่เท่ากันในแต่ละความถี่ที่กำหนด แม้ว่ากำหนดให้กำลังส่งที่ออกจากเครื่องกำเนิดคลื่นคงที่เท่ากับ +20 dBm ก็ตาม ดังนั้นจะนำค่ากำลังที่รับได้ปลายทางที่เท่ากันไม่ได้ จึงใช้วิธีพิจารณาค่าการลดทอนรวมที่เกิดขึ้นในเส้นทางที่กำหนด ด้วยเหตุผลนี้จะเห็นว่าที่ความถี่ 1650 kHz การแพร่คลื่นบนพื้นถ้าที่ระยะทาง 20 เมตรมีประสิทธิภาพดีกว่าความถี่อื่นที่เหลืออยู่ (สอดคล้องกับการทดสอบรับสัญญาณจากคลื่นวิทยุระบบ AM ในถ้ำทรายทอง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน อ.แม่สาย จ. เชียงราย ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2) อย่างไรก็ตามหากนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริงหากเลือกความถี่ย่านดังกล่าวมาใช้งานอาจต้องใช้กำลังส่งที่สูงมาก ซึ่งคงไม่ใช่ปัญหาสำหรับเครื่องส่งที่อยู่ภายนอกถ้ำ แต่คงเป็นไปได้ในกรณีที่ต้องนำเครื่องส่งกำลังสูงเข้าไปในถ้ำเพื่อติดต่อสื่อสารออกมายังภายนอกถ้ำ ยิ่งกว่านั้นการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ความถี่ย่าน MF สำหรับใช้งานเป็นสายอากาศภาคส่งก็จะกระทำได้ไม่ถนัดนัก แม้ว่าปัจจุบันจะมีเทคโนโลยีสายอากาศขนาดเล็ก (Small antenna) ก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถทำให้มีค่าอัตราขยายเทียบเท่าสายอากาศที่มีขนาดสอดคล้องกับความยาวคลื่นได้ ดังนั้นความถี่ที่น่าสนใจก็คือความถี่ในย่าน LF ซึ่งมีธรรมชาติของการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นดินที่สามารถซึมซาบลงไปในเนื้อดินและเนื้อหินได้ดี ดังเห็นได้จากค่ากำลังที่รับได้ที่ระยะ 2 เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีของความถี่ย่าน MF แต่กลับลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น (หมายเหตุ: ทำการวัดบนพื้นผิวถ้ำไม่สามารถวัดในเนื้อหิน/ดินของพื้นถ้ำได้) ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติในการซึมซาบผ่านพื้นผิวถ้ำได้ดีตามที่ตั้งสมมุติฐานไว้ ซึ่งได้ทำการวัดทดสอบกรณีดังกล่าวและแสดงผลไว้ในตารางที่ 115 และรูปที่ 136

ตารางที่ 115 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิว (บนผนังถ้ำ) แบบ NLOS

ลำดับที่	ระยะทาง (เมตร)	300 kHz (dBm)	350 kHz (dBm)	1000 kHz (dBm)	1650 kHz (dBm)	2325 kHz (dBm)	3000 kHz (dBm)	3.5 MHz (dBm)
1	2	-95	-67	-89	-60	-75	-73	-72
2	4	-92	-85	-81	-69	-101	-79	-76.8
3	6	-96	-95	-85	-62	-70	-79.3	-81
4	8	-97	-95	-90	-66	-78	-83	-83.6
5	10	-99	-	-92	-71	-86	-78	-86.9
6	12	-	-	-91	-72	-86	-87	-87.8
7	14	-	-	-97	-68	-78	-83.4	-91
8	16	-	-	-100	-80	-82	-87.5	-99
9	18	-	-	-101	-75	-88	-94	-100
10	20	-	-	-104	-87	-95	-101	-

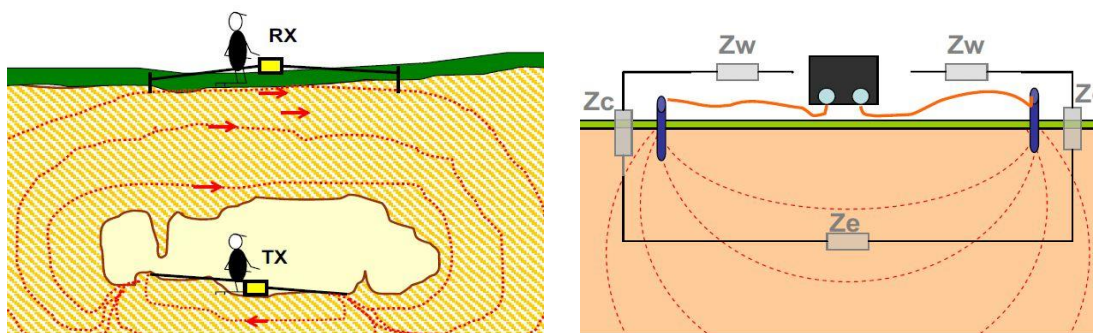


รูปที่ 136 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบการแพร่คลื่นผิว (บนผนังถ้ำ) ตามเส้นทางแบบแนว NLOS

จากการเปรียบเทียบค่ากำลังที่รับค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ด้วยสายอากาศภาครับแบบแอคทีฟทุก ระยะ 2 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 115 จะเห็นว่าที่ความถี่ตั้งแต่ 300 kHz - 3.5 MHz ระดับของสัญญาณที่รับได้ บนผนังถ้ำที่ระยะ 2 เมตรแรกจะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระยะเดียวกันที่วัดบนพื้นถ้ำ โดยมีค่าระหว่าง -60 dBm ถึง -95 dBm ทำให้คลื่นที่แพร่ออกไปบนผนังถ้ำที่ระยะไกลขึ้นมีค่าลดลงมากจนกระทั่งใกล้เคียงกับระดับของ ระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ที่ปรากฏบนเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัม และที่ความถี่ต่ำ 300 kHz สามารถวัดค่าได้เพียงระยะ 10 เมตร และมีค่ากำลังที่รับได้มีค่าต่ำมากๆ (-95 dBm) ตั้งแต่เริ่มต้น และ 350 kHz วัดค่าได้เพียงระยะ 8 เมตร แต่มีค่ากำลังที่วัดได้ที่ระยะแรกมีค่าสูงกว่าที่ 300 kHz ถึง 28 dB แต่ก็เกิดการลดทอน อย่างรวดเร็วกว่า เมื่อนำมาคำนวณค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตร จะมีค่าเท่ากับ >>4 dB ที่ระยะ 10 เมตร (300 kHz), >28 dB ที่ระยะ 10 เมตร (350 kHz), 15 dB (1000 kHz), 27 dB (1650 kHz), 20 dB (2325 kHz), 28 dB (3000 kHz) และ >28 dB ที่ระยะ 18 เมตร (3.5 MHz) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีบน พื้นถ้ำจะเห็นว่าที่ความถี่ 1650 kHz จะมีคุณสมบัติในการแพร่คลื่นทั้งบนพื้นถ้ำและบนผนังถ้ำได้ดีกว่าความถี่อื่น

8.2 การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นดิน

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดทดสอบพฤติกรรมของการแพร่คลื่นความถี่วิทยุที่ผ่านมาทั้งหมดพบว่า คลื่นความถี่ 300 kHz และ 350 kHz มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อระยะหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนการส่งผ่านตามระยะทางที่กำหนดที่สูงมากกว่าความถี่อื่น โดยเฉพาะการวัดทดสอบการส่งรับคลื่นแบบ NLOS โดยมีผนังหินปูนและหินทรายเป็นอุปสรรคขวางกั้นระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับยิ่งเกิดค่าการสูญเสียและค่าการลดทอนดังกล่าวสูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับการวัดทดสอบแบบ LOS ซึ่งหากตั้งสมมุติฐานตามพฤติกรรมของการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินของทั้งสองความถี่แสดงว่ามีการซึมซาบและเหนียวนำผ่านเนื้อหินมากกว่าความถี่อื่น และเมื่อสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีสื่อสารผ่านพื้นโลก TTE (Trough-The-Earth) Communications [12]-[16] พบว่านักวิจัยแต่ละกลุ่มได้มีการทำวิจัยโดยใช้วิธีดังกล่าวในย่านความถี่ VLF-LF เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นดินเป็นหลักและโพรงถ้ำที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งประเภทหินปูนและหินทราย โดยมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 137



รูปที่ 137 หลักการทำงานของระบบ TTE Communications: (ก) หลักการระบบสื่อสารผ่านพื้นโลก และ (ข) แบบจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

จากรูปที่ 137 อุปกรณ์ของระบบสื่อสารแบบ TTE [15] ทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับจะถูกเชื่อมต่อกับพื้นโลกโดยใช้สายเส้นลวดตัวนำสองคู่ที่วางอยู่บนพื้นโลกภายนอกถ้ำและในถ้ำ โดยที่ปลายของเส้นลวดแต่ละคู่จะมีแท่งอิเล็กโทรดโลหะ (metallic electrodes) ปักลงบนพื้นดิน ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์รวมของโหลดสำหรับเครื่องส่งจะครอบคลุมค่าอิมพีแดนซ์ที่กว้างมากๆ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักก็คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของเส้นลวด (Z_w) ค่าอิมพีแดนซ์ของดินและหิน (Z_e) และค่าอิมพีแดนซ์ของแท่งอิเล็กโทรด (Z_c) ที่สัมผัสกับเนื้อดินและเนื้อหิน โดยกระแสที่เหนียวนำลงสู่พื้นโลกจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของดิน (soil humidity) องค์กรประกอบทางเคมีของน้ำ (salinity) ที่อยู่ในดินและหิน ค่าความนำไฟฟ้าของเนื้อแร่หินปูนหรือหินทราย (mineral conductivity) อุณหภูมิ และค่าความพรุน (porosity) ของเนื้อแร่ อย่างไรก็ตามหลักการของระบบสื่อสารแบบ TTE นี้ได้ถูกทดลองและทดสอบอย่างจริงจังในประเทศอังกฤษมาตั้งแต่ก่อน ค.ศ. 1990 โดย Dr. David Gibson ซึ่งได้เผยแพร่ความรู้ลงในจดหมายข่าวที่เป็นของสมาคมนักวิจัยถ้ำกลุ่มเล็กๆ [17] ที่มีชื่อว่า British Cave Research Association (BCRA) ซึ่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ หัวหน้าโครงการวิจัยนี้เป็นสมาชิกสามัญของสมาคมฯ นี้

ด้วย และได้มีผลงานการออกแบบระบบวิทยุสื่อสารแบบ TTE ที่ความถี่ 87 kHz ในชื่อของ HeyPhone สำหรับการใช้งานในถ้ำมาเผยแพร่เฉพาะในกลุ่มสมาชิกของสมาคมตั้งแต่ปี 1992 [18]-[19]

ดังนั้นเพื่อเป็นการพิสูจน์พฤติกรรมการแพร่คลื่นแบบคลื่นดินของความถี่ย่าน LF และ MF ต้นแถบ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดทดสอบเพิ่มเติมโดยใช้หลักการสื่อสารแบบ TTE ซึ่งในครั้งนี้ได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัมความถี่ที่จัดทำมาใช้ในโครงการนี้แทนเครื่องส่งและเครื่องรับวิทยุก่อน โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz และได้จัดเตรียมแท่งอิเล็กโทรดและลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีความยาวเท่ากับที่ระบบของ HeyPhone ใช้งานมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 138 และ 139



รูปที่ 138 การวัดทดสอบการแพร่คลื่นความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ผ่านพื้นโลก (TTE) ที่ถ้ำหลวงเชียงดาว



รูปที่ 139 การวัดทดสอบการแพร่คลื่นความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ผ่านพื้นโลก (TTE) ที่ถ้ำปาฏิหาริย์



รูปที่ 140 แสดงเส้นทางและตำแหน่งพิกัดของโครงข่ายดาวจากมุมมองด้านบนภูเขา

จากรูปที่ 140 เป็นภาพถ่ายจากดาวเทียมแสดงให้เห็นพื้นที่บนภูเขาที่อยู่เหนือโครงข่ายดาว (ถ้าหินปูน) โดยมีจุดวงกลมเล็กๆ สีน้ำเงิน (ตำแหน่งที่ได้การวัดและคำนวณโดยเครื่องมือจากงานวิจัยในโครงการนี้) วางเรียงตามแนวโครงข่าย โดยปากทางเข้าถ้ำอยู่ที่จุดวงกลมสีน้ำเงินด้านล่างสุดที่อยู่มุมขวาและจุดวงกลมสีน้ำเงิน ด้านซ้ายสุดของภาพจะเป็นถ้ำน้ำซึ่งอยู่ปลายสุดของโครงข่ายดาว สำหรับการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและเครื่องกำเนิดสัญญาณจะอยู่ที่ตำแหน่งวงกลมสีเหลืองซึ่งอยู่บนภูเขานอกถ้ำ โดยมีจุดวงกลมสีแดงบอกถึงจุดที่มีการติดตั้งสายอากาศภาครับและเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัมแต่ละตำแหน่งภายในถ้ำ ในการวัดทดสอบครั้งนี้มีข้อจำกัด คือ เครื่องกำเนิดสัญญาณไม่สามารถจ่ายค่ากำลังสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ให้มีค่าเท่ากันได้ (+11 dBm และ +16 dBm) ดังนั้นเมื่อผ่านวงจรขยายกำลังภายนอก (External RF power amplifier) ที่คณะผู้วิจัยออกแบบและสร้างขึ้นมาจะทำให้กำลังส่งที่จ่ายให้กับสายอากาศชนิดฝังดิน (Grounded antenna) มีค่าเท่ากับ 38.1 dBm (6.456 วัตต์) และ 38.66 dBm (7.345 วัตต์) ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นในการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้ภายในถ้ำที่ระยะทางต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างถ้ำหินปูนกับถ้ำหินทราย ก็จะทำให้เห็นว่าคลื่นความถี่ไหนสามารถเหนี่ยวนำหรือแพร่ลงในพื้นที่ที่เป็นหินปูนหรือหินทรายได้ดีกว่ากัน และเห็นถึงความเป็นไปได้ในการรับส่งคลื่นระยะไกลภายในโครงข่ายทั้งสองประเภทมีความเป็นรูปธรรมชัดเจนมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามผลการวัดทดสอบด้วยวิธี TTE ในครั้งนี้ได้แสดงค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ ณ จุดต่างๆ ภายในโครงข่ายดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ไว้ในตารางที่ 116 และ 117 โดยมีกราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้เปรียบเทียบกับระยะทางกระจัด (Displacement distance) ซึ่งเป็นระยะทางที่คำนวณจากตำแหน่งที่สายอากาศภาคส่งติดตั้งอยู่บนภูเขาเหนือโครงข่าย (จุดวงกลมสีเหลือง) ไปยังตำแหน่งที่มีการติดตั้งสายอากาศภาครับบนพื้นดินที่เป็นเส้นทางเดินภายในถ้ำ (จุดวงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 140 และ 142 ตามลำดับ

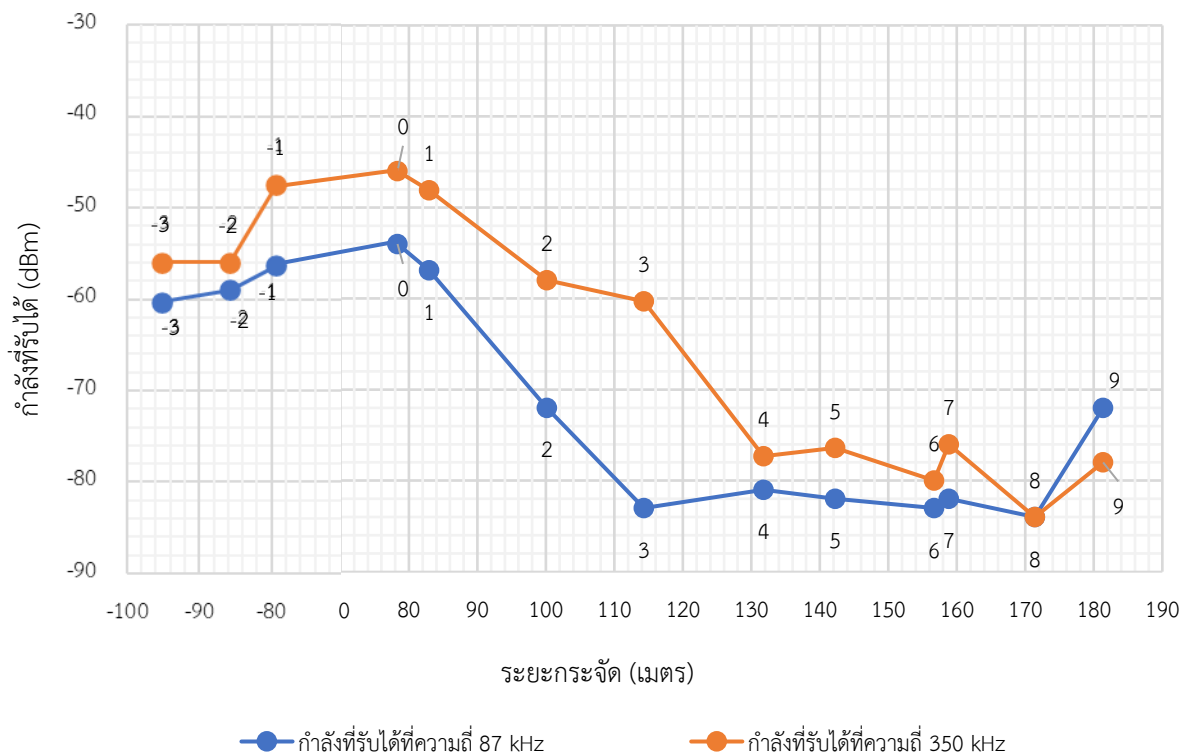
ตารางที่ 116 ผลการทดสอบการใช้คลื่นความถี่ส่งผ่านพื้นโลกที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ณ ถ้ำหลวง
เชียงดาว (ถ้ำหินปูน)

จุดที่	พิกัดตำแหน่ง		ระยะทาง บนพื้น ถ้ำ (เมตร)	ระยะ กระจัด (เมตร)	กำลังที่รับ ได้ที่ ความถี่ 87 kHz (dBm)	กำลังที่รับ ได้ที่ ความถี่ 350 kHz (dBm)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
-3	19.395347	98.92701437	70.05	95.22	-60.3	-56
-2	19.39550065	98.92692105	50.20	85.75	-59	-56
-1	19.39564602	98.92680935	30.12	79.33	-56.3	-47.5
0	19.39581483	98.92664443	0.00	78.33	-54	-46
1	19.39596713	98.92653878	20.32	82.96	-56.9	-48.1
2	19.39629444	98.92641868	40.58	100.15	-72	-58
3	19.3964286	98.9262944	60.28	114.29	-83	-60.3
4	19.39618744	98.92584454	80.14	131.76	-81	-77.3
5	19.39608404	98.9256904	180.34	142.23	-82	-76.4
6	19.39604779	98.92551143	200.34	156.69	-83	-80
7	19.39593364	98.9254631	220.28	158.80	-82	-76
8	19.39586538	98.9253326	240.32	171.37	-84	-84
9	19.39571473	98.92523141	260.29	181.36	-72	-78

หมายเหตุ เครื่องส่งอยู่ ณ พิกัดตำแหน่ง ละติจูด 19.39582253 องศาเหนือ ลองจิจูด 98.92682648 องศาตะวันออก ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 516 เมตร เชื่อมต่อด้วยวิธีเล็กโทรดแบบดาว (star topology) ทั้งหมดด้านละ 6 ตัว และภาครับใช้การเชื่อมต่อด้วยวิธีเล็กโทรดด้านละ 2 ตัว

จากตารางที่ 116 ได้แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้ 1) คอลัมน์แรกเป็นจุดหรือตำแหน่งที่ทำการวัด โดยจุดที่ 0 คือ ตำแหน่งแรกที่เริ่มทำการวัดทดสอบซึ่งจะใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการวัดระยะทางจริงตามแนวทางเดินภายในโพรงถ้ำ ตัวเลขตำแหน่งที่เป็นบวกแสดงถึงเส้นทางที่อ้างอิงจากจุด (จุดวงกลมสีเหลือง) ในทิศทางที่มุ่งไปที่ถ้ำน้ำซึ่งเป็นอยู่ปลายโพรงถ้ำหลวงเชียงดาว ขณะที่ตัวเลขตำแหน่งเป็นลบแสดงถึงเส้นทางที่อ้างอิงจากจุดที่ 0 ในทิศทางที่มุ่งออกมาทางปากถ้ำที่อยู่ในบริเวณวัดถ้ำหลวงเชียงดาว 2) สองคอลัมน์ถัดมาจะเป็นค่าพิกัดของตำแหน่ง 12 จุด (จุดวงกลมสีแดง) ที่อยู่ตามแนวโพรงถ้ำ (เส้นทางเดินจากปากถ้ำไปยังถ้ำน้ำ) ซึ่งเป็นค่าพิกัดที่คำนวณได้จากเครื่องมือระบุตำแหน่งในถ้ำที่พัฒนาโดยคณะผู้วิจัยเอง 3) คอลัมน์ที่สี่จะแสดงระยะทางจริงบนพื้นถ้ำไปตามแนวโพรงถ้ำที่ใช้ในการสำรวจโดยใช้เครื่องวัดระยะทางชนิดเลเซอร์ (Laser distance meter) วัดเทียบจากจุดที่ 0 ไปยังระยะถัดๆ ไปที่ใช้ติดตั้งสายอากาศภาครับบนพื้นทางเดินในถ้ำ 4) คอลัมน์ที่ห้าจะแสดงระยะกระจัดโดยอ้างอิงกับ

จุดวงกลมสีเหลืองซึ่งเป็นตำแหน่งพิกัดของการติดตั้งสายอากาศภาคส่งที่อยู่บนภูเขาเหนือโพรงถ้าหลวงเชียงดาว สำหรับใช้ในการพิจารณาระยะกระจัดที่คลื่นวิทยุแพร่แบบ TTE ผ่านเนื้อหินไปยังจุดที่ทำการวัดทดสอบในถ้ำแต่ละตำแหน่งโดยตรง และ 5) คอลัมน์ที่หกและเจ็ดที่คำนวณได้จากจุดที่ 0 ลากเส้นตรงไปยังจุดที่ทำการวัดแต่ละจุดโดยตรง และเมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อแสดงการเปรียบเทียบระยะกระจัดกับค่ากำลังที่รับได้ในแต่ละตำแหน่งจะได้ ภาพกราฟดังแสดงในรูปที่ 141 (หมายเหตุ จากระยะกระจัดในกราฟที่มีค่าติดลบนั้นหมายถึงมีทิศทางตรงกันข้ามกับระยะกระจัดที่มีค่าเป็นบวก โดยค่าระยะกระจัดที่แท้จริงที่พิจารณา ยังคงมีค่าเป็นบวกตามปกติ)



รูปที่ 141 กราฟแสดงผลการวัดค่ากำลังที่รับได้ในถ้ำเทียบกับระยะกระจัดจากการทดสอบการใช้คลื่นความถี่ส่งผ่านพื้นโลกที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ณ ถ้ำหลวงเชียงดาว (ถ้ำหินปูน)

เมื่อพิจารณาค่าในตารางที่ 116 ประกอบกับภาพมุมบนเหนือถ้ำในรูปที่ 140 และกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 141 พบว่าการแพร่คลื่นแบบ TTE ที่คลื่นความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ด้วยขนาดกำลังส่งประมาณ 38.1 dBm (6.456 วัตต์) และ 38.66 dBm (7.345 วัตต์) ตามลำดับ ส่งผ่านสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขา (จุดสีเหลือง) ที่ตำแหน่งพิกัดละติจูด 19.39582253 องศาเหนือ ลองจิจูด 98.92682648 องศาตะวันออก และถูกส่งผ่านชั้นดินและชั้นหินปูนเข้าไปถึงปลายสุดของโพรงถ้ำ (จุดที่ 9 ถ้ำน้ำ) ซึ่งมีระยะกระจัดเท่ากับ 181.36 เมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางจริงบนพื้นถ้ำที่เดินด้วยเท้าจากจุดที่ 0 ไปถึงจุดที่ 9 จะมีระยะทางเท่ากับ 260.29 เมตร โดยค่ากำลังที่วัดได้ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz มีค่า -72 dBm และ -78 dBm ตามลำดับ ขณะที่มีการส่งผ่านชั้นดินและชั้นหินปูนเข้าไปยังตำแหน่งปากทางเข้าถ้ำ (จุดที่ -3) ซึ่งมีระยะกระจัดเท่ากับ 95.22 เมตร แต่

เมื่อเทียบกับระยะทางจริงบนพื้นถ้ำที่เดินด้วยเท้าไปถึงจุดที่ -3 จะมีเป็นระยะทางเท่ากับ 70.05 เมตร โดยค่ากำลังที่วัดได้ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz มีค่า -60.3 dBm และ -56 dBm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะทางจริงบนพื้นถ้ำตั้งแต่ปากทางถ้ำไปจนถึงปลายสุดของโพรงถ้ำที่บริเวณถ้ำน้ำจะมีระยะทางเท่ากับ $70.05 + 260.29 = 330.34$ เมตร และหากพิจารณาระยะกระจัดที่คลื่นวิทยุแพร่แบบ TTE ผ่านเนื้อหินไปยังจุดที่ทำการวัดทดสอบในถ้ำ จะพบว่าตามลักษณะของแนวโพรงถ้ำและสภาพภูมิประเทศของภูเขาในกรณีของถ้ำหลวงเชียงดาว ทั้งคลื่นความถี่ 87 kHz และ 350 kHz สามารถแพร่ผ่านพื้นโลกลงไปโพรงถ้ำได้ไกลที่สุดที่ระยะกระจัด 181.36 เมตร และข้อสังเกตที่สำคัญที่ได้จากกราฟในรูปที่ 141 ก็คือ ที่ความถี่ 350 kHz นั้น ค่ากำลังที่สามารถรับได้ในโพรงถ้ำหินปูนจะสูงกว่าที่ความถี่ 87 kHz แสดงว่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นแบบ TTE ผ่านชั้นหินปูนที่ความถี่ 87 kHz มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน จึงมั่นใจว่าหากโพรงถ้ำมีระยะกระจัดที่ไกลกว่านี้ ทั้งสองคลื่นความถี่นี้ก็ยังสามารถแพร่คลื่นต่อไปได้ เนื่องจากค่ากำลังตำแหน่งสุดท้ายยังมีระดับสูงเพียงพอที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมยังสามารถรับสัญญาณและแสดงค่าได้สูงกว่าระดับพื้นสัญญาณรบกวน (Noise floor) ที่เกิดขึ้นภายในโพรงถ้ำ



รูปที่ 142 แสดงเส้นทางและตำแหน่งพิกัดของโพรงถ้ำปาฏิหาริย์จากมุมมองด้านบนภูเขา

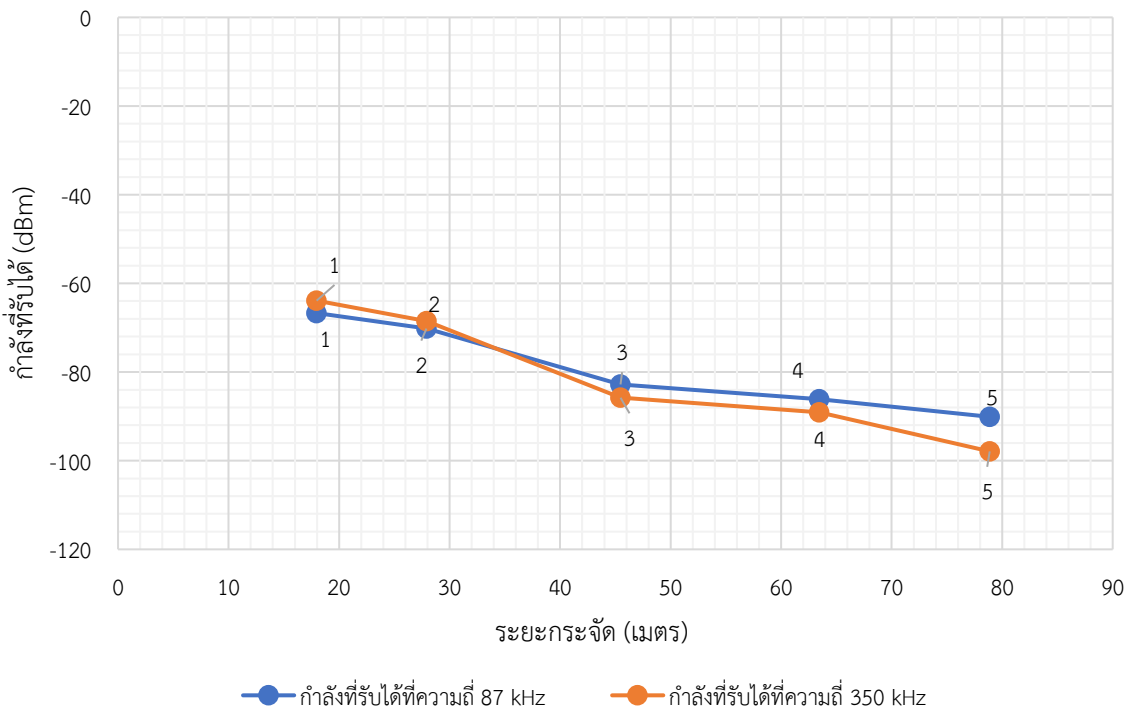
จากรูปที่ 142 เป็นภาพถ่ายจากดาวเทียมแสดงพื้นที่บนภูเขาที่อยู่เหนือโพรงถ้ำปาฏิหาริย์ซึ่งเป็นถ้ำหินทราย โดยจุดวงกลมเล็กๆ สีน้ำเงินจะวางเรียงตามแนวโพรงถ้ำเช่นเดิม โดยปากทางเข้าถ้ำอยู่ที่จุดวงกลมสีน้ำเงินด้านขวามุมล่างสุดและจุดวงกลมสีน้ำเงินด้านซ้ายสุดมุมซ้ายบนของภาพจะเป็นปลายสุดของโพรงถ้ำ ส่วนจุดวงกลมสีเหลืองคือตำแหน่งติดตั้งสายอากาศภาคส่งและเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งอยู่บนภูเขาภายนอกถ้ำ โดยมีจุดวงกลมสีแดงบอถึงจุดที่มีการติดตั้งสายอากาศภาครับและเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแต่ละตำแหน่งภายในถ้ำ โดยการวัดทดสอบการใช้คลื่นความถี่ส่งผ่านพื้นโลกผ่านชั้นหินทรายที่ถ้ำปาฏิหาริย์ได้ดำเนินการเมื่อวันที่ 13-14 สิงหาคม 2564 ก่อนดำเนินการที่ถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่ (6-10 กันยายน 2564) โดยวางแผนใช้กำลังส่ง

เช่นเดียวกับกรณีของถ้ำหลวงเชียงดาว นั่นคือ 38.1 dBm (6.456 วัตต์) และ 38.66 dBm (7.345 วัตต์) ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ตามลำดับ โดยการใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายให้กับเครื่องขยายกำลังที่สร้างขึ้นมา อย่างไรก็ตามการทดสอบเพิ่มเติมครั้งแรกที่ถ้ำปาฏิหาริย์ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอุปกรณ์ขยายกำลังที่ได้นำไปใช้งานเกิดขัดข้องไม่สามารถจ่ายกำลังได้ตามที่กำหนดและไม่สามารถซ่อมแซมแก้ไขที่หน้างานได้ จึงทำการทดสอบอย่างคร่าวๆ ได้เพียง 5 ตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งผลการวัดทดสอบได้บันทึกไว้ในตารางที่ 5.85 และมีกราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่ากำลังที่รับได้เปรียบเทียบกับระยะทางกระจัด ซึ่งเป็นระยะทางที่คำนวณจากตำแหน่งที่สายอากาศภาคส่งติดตั้งอยู่บนภูเขาเหนือโพรงถ้ำ (จุดวงกลมสีเหลือง) ไปยังตำแหน่งที่มีการติดตั้งสายอากาศภาครับบนพื้นดินที่เป็นเส้นทางเดินภายในถ้ำ (จุดวงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 142

ตารางที่ 117 ผลการทดสอบการใช้คลื่นความถี่ส่งผ่านพื้นโลกที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ (ถ้ำหินทราย)

จุดที่	พิกัดตำแหน่ง		ระยะทางบนพื้นถ้ำ (เมตร)	ระยะกระจัด (เมตร)	กำลังที่รับได้ที่ความถี่ 87 kHz (dBm)	กำลังที่รับได้ที่ความถี่ 350 kHz (dBm)
	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)				
1	15.60146499	105.5726716	15.07	17.97	-66.7	-63.9
2	15.60160526	105.5725858	35.21	27.90	-70.2	-68.5
3	15.60161396	105.5724075	54.59	45.47	-82.8	-85.8
4	15.60160966	105.5722299	73.69	63.44	-86.1	-89.1
5	15.60166376	105.5720933	93.52	78.87	-90.1	-97.9

หมายเหตุ เครื่องส่งอยู่ ณ พิกัดตำแหน่ง ละติจูด 15.60149457 องศาเหนือ ลองจิจูด 105.5728014 องศาตะวันออก ความสูงจากระดับน้ำทะเล 255.8 เมตร เชื่อมต่อข้อวิเอเล็กโทรดแบบดาว (star topology) ทั้งหมดด้านละ 6 ตัว และภาครับใช้การเชื่อมต่อข้อวิเอเล็กโทรดด้านละ 2 ตัว



รูปที่ 143 กราฟแสดงผลการวัดค่ากำลังที่รับได้ในถ้าเทียบกับระยะกระจัดจากการทดสอบการใช้คลื่นความถี่ส่งผ่านพื้นโลกที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz ณ ถ้าปาฏิหาริย์ (ถ้าหินทราย)

ตามที่บันทึกค่าไว้ในตารางที่ 117 ประกอบกับภาพมุมบนเหนือถ้าในรูปที่ 142 และกราฟเปรียบเทียบรูปที่ 143 พบว่าการแพร่คลื่นแบบ TTE ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz (หมายเหตุ เนื่องจากเครื่องขยายกำลังภายนอกขัดข้อง จึงไม่ทราบค่ากำลังส่งที่แท้จริงที่พื้นที่ปฏิบัติงานได้) ที่ส่งผ่านสายอากาศภาคส่งที่ติดตั้งบนภูเขา (จุดสี่เหลี่ยม) ที่ตำแหน่งพิกัดละติจูด 15.60149457 องศาเหนือ ลองจิจูด 105.5728014 องศาตะวันออก และถูกส่งผ่านชั้นดินและชั้นหินทรายเข้าไปถึงจุดที่ 5 ซึ่งมีระยะกระจัดเท่ากับ 78.87 เมตร เมื่ออ้างอิงกับตำแหน่งที่ติดตั้งสายอากาศภาคส่งภายนอกถ้า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางจริงบนพื้นถ้าที่เดินด้วยเท้าจากตำแหน่งพิกัดเดียวกับพิกัดที่ตั้งสายอากาศภายนอก (จุดวงกลมสี่เหลี่ยม) ไปถึงจุดที่ 5 จะมีระยะทางเท่ากับ 93.52 เมตร โดยค่ากำลังที่วัดได้ที่ความถี่ 87 kHz และ 350 kHz มีค่า -90.1 dBm และ -97.9 dBm ตามลำดับ และหากพิจารณาระยะกระจัดที่คลื่นวิทยุแพร่แบบ TTE ผ่านเนื้อหินไปยังจุดที่ทำการวัดทดสอบในถ้า จะพบว่าตามลักษณะของแนวโพรงถ้าและสภาพภูมิประเทศของภูเขาในกรณีของถ้าปาฏิหาริย์ ทั้งคลื่นความถี่ 87 kHz และ 350 kHz สามารถแพร่ผ่านพื้นโลกลงไปโพรงถ้าหินทรายได้เช่นเดียวกันกับกรณีถ้าหินปูน แต่ก็มีข้อสังเกตที่สำคัญที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5.110 ก็คือ ที่ความถี่ 350 kHz นั้น ค่ากำลังที่สามารถรับได้ในโพรงถ้าหินปูน (จุดที่ 1 ถึง 2) จะสูงกว่าที่ความถี่ 87 kHz เล็กน้อยในช่วงระยะกระจัดที่ใกล้กับตำแหน่งพิกัดของสายอากาศภาคส่ง แต่เมื่อระยะกระจัดขยายไปถึงจุดที่ 3 (45.47 เมตร) จนถึงจุดที่ 5 (78.87 เมตร) จะเห็นว่าค่ากำลังที่รับได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงว่าการสูญเสียจากการส่งผ่านคลื่นแบบ TTE ผ่านชั้นหินทรายของความถี่ 350 kHz จะมีค่าสูงกว่าที่ความถี่ 87 kHz อย่างชัดเจน

9. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

- [1] Larry G. Stolarczyk, "Emergency and Operational Low and Medium Frequency Band Radio Communications System for Underground Mines," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 27, NO. 4, July/August 1991.
- [2] Hsueh-Yuan Pao, "Probability Density Function for Waves Propagating in a Straight Rough Wall Tunnel," 2004 IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 20-25 June 2004, Monterey, California, USA.
- [3] J. Pingnot, R. Rieben, D. White, "Full Wave Analysis of RF Signal Attenuation in a Lossy Cave using a High Order Time Domain Vector Finite Element Method," *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, Honolulu, USA, 3-7 April 2005.
- [4] M. Rak and P. Pechac, "UHF propagation in caves and subterranean galleries," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 4, pp. 1134–1138, Apr. 2007.
- [5] Tomás Laborra, Leire Azpilicueta, Peio Lopez Iturri, Erik Aguirre and Francisco Falcone, "Estimation of wireless coverage in complex cave environments for speleology applications," 2014 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), Memphis, Tennessee, USA, 6-11 July 2014.
- [6] Michael D. Bedford and Gareth A. Kennedy, "Modeling Microwave Propagation in Natural Caves Passages," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 12, December 2014.
- [7] William Walsh, Jay Gao, "Communications in a Cave Environment," 2018 IEEE Aerospace Conference, Yellowstone Conference Center, USA, 3-10 March 2018.
- [8] Qi Ping Soo, Soo Yong Lim, and David Wee Gin Lim, "Investigation of rough surfaces for propagation modeling in caves," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, Massachusetts, USA, 8- 13 July 2018.
- [9] S. Y. Lim, Q. P. Soo, D. W. G. Lim, K. M. Yap, and S. L. Lau, "Propagation Measurement of a Natural Cave-Turned-Wine-Cellar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 17, No. 5, pp.743-746, May 2018.
- [10] Phanuphong Gaewmood, 2017, Study on Increasing Gas Production of Khorat Sandstone in L4/57 Block by Hydraulic Fracturing and Computer Simulation, Master Thesis, School of Geotechnology, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, pp. 144.
- [11] อัมพรศักดิ์ วรรณโกมล และ จงพันธ์ จงลักษณ์ณี, 2557, การวิเคราะห์ศักยภาพในการเป็นแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม

- ของหินคาร์บอนตยุคเพอร์เมียนด้านตะวันตกของแอ่งโคราช, รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [12] David V. Thiel, and Raj Mittra, "An Analysis of a Staked Dipole Probe on a Lossy Earth Plane Using the Finite-Difference Time-Domain Method," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 5, pp. 1357-1362, September 1997.
- [13] A.S. Eve, D.A. Keys and F.W. Lee, "The Penetration of Rock by Electromagnetic Waves and Audio Frequencies," Proceeding of the Institute of Radio Engineers, Vol. 17, No. 11, pp. 2072-2074. November 1929.
- [14] L. Van and C. Sunderman, "Electric Field of Grounded Horizontal Line Transmitter for Through-the-Earth Communication," 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), Vol. 31, March 22-26, 2015, Virginia, USA.
- [15] V. Bataller, A. Muoz, P. Molina, A. Mediano, J.A. Cuch and J.L. Villarroel, "Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications," Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, pp. 284-294, May 2009.
- [16] J. P. Carreño, L.S. Silva, S.O.A. Neves, L. Aguayo, A.J. Braga, A.N. Barreto, and L.GU. Garcia, "Through-The-Earth (TTE) Communications for Underground Mines," , Journal of Communications and Information Systems, Vol. 31, No. 1, pp. 164-176, May 2016.
- [17] David Gibson, "Cave Radio," Cambridge Underground, pp. 28-33, 1990.
- [18] David Gibson, "Cave Radio Design Part I," CREG Newsletter, No. 7, pp. 7-10, March 1992.
- [19] David Gibson, "Cave Radio Design Part II," CREG Newsletter, No. 8, pp. 4-16, March 1992.