

การศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ
สำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก



นายโชควิวัฒน์ พฤกษ์ชาติศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

A STUDY ON SUITABLE ELECTRODE CHARACTERISTICS FOR
EFFICIENCY IMPROVEMENT OF EARTH-GROUNDED ANTENNA



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Telecommunication and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ
สำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ.ดร.นุชนาฏ สันทาลุนัย)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายโชควิวัฒน์ พฤกษ์ชาติศิริ : การศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก (A STUDY ON SUITABLE ELECTRODE CHARACTERISTICS FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF EARTH-GROUNDED ANTENNA)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ,66 หน้า

คำสำคัญ: อิเล็กโทรด /การปรับปรุงประสิทธิภาพ / สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

การศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารภายในถ้ำได้มีการริเริ่มขึ้นสืบเนื่องจากเหตุการณ์ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นกับนักกีฬาฟุตบอลทีมเยาวชนและโค้ชรวม 13 คน ที่ติดอยู่ภายในถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ตำบลโป่งผา อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ได้สะท้อนให้เห็นปัญหาเกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสื่อสารไร้สายบนคลื่นความถี่ช่วง VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) ที่ถูกนำไปใช้งานภายในถ้ำ เพื่อติดต่อสื่อสารและช่วยเหลือผู้ประสบภัยด้วยระบบสื่อสารวิทยุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายด้วยคลื่นความถี่สูงจึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานภายในถ้ำ จากข้อจำกัดดังกล่าว การสื่อสารด้วยเทคโนโลยีรูปแบบฝังลงพื้นโลก (Through-The-Earth Communication : TTE) จึงเป็นตัวเลือกที่ดี เนื่องจากระบบ TTE เป็นการใช้อยู่ภายในรูปแบบฝังลงพื้นโลก โดยส่วนปลายสายอากาศจะฝังแท่งอิเล็กโทรดลงสู่พื้นตัวกลางที่เป็นสื่อในการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า ผ่านชั้นหินระหว่างภายนอกถ้ำและภายในถ้ำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กโทรดที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแท่งอิเล็กโทรดที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีต้องมีค่าความนำไฟฟ้าได้ดี เกิดจากชนิดของวัสดุ รูปทรง และความลึกที่ฝัง เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อใช้งานภายในถ้ำยังต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของวัสดุ จึงได้ออกแบบแท่งอิเล็กโทรดที่มีคุณลักษณะต่างๆ จำนวน 8 แบบ พบว่าแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ลักษณะแบบหน้าสัมผัสหกแฉกส่งผลทำให้ค่าความต้านทานและค่านำไฟฟ้าดีที่สุด ด้วยสมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นจะลดช่องว่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับเนื้อดิน โดยช่องว่างนี้จะทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าลักษณะของอิเล็กโทรดที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกได้ต่อไปในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2567

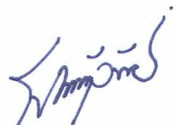
ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

CHOCKPWAT PHUEKCHATSIRI : A STUDY ON SUITABLE ELECTRODE CHARACTERISTICS
FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF EARTH-GROUNDED ANTENNA
THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF RANGSAN WONGSAN, D.Eng., 66 PP.

Keyword: ELECTRODE / EFFICIENCY IMPROVEMENT / EARTH-GROUNDED ANTENNA

The study of in-cave communication was initiated following the disaster in involving 13 youth football players and their coach, who were trapped inside Tham Luang-Khun Nam Nang Non cave, Pong Pha subdistrict, Mae Sai district, Chiang Rai province. This event revealed the limitations of wireless mobile communication systems on VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) frequencies, used inside the cave for communication and rescue operations. It became evident that these widely high-frequency radio communication systems were inadequate for subterranean environments. Consequently, Through-The-Earth (TTE) communication technology had emerged as a viable alternative. The TTE system involved the use of earth-grounded antenna, with electrodes placed into the medium to induce electric currents through the rock layers separating the cave's interior from the exterior. This thesis presented a study on the characteristics of electrodes to enhance the performance of earth-grounded antenna. Prior studies indicated that electrodes with good electrical conductivity was affected by factors such as material type, shape, and burial depth-exhibit. Moreover, the mechanical strength of the materials was also considered, particularly for use in cave environments. In this study, eight different electrodes designs were analyzed, with the third design, featuring a hexagonal surface, affected the most favorable results in terms of electrical resistance and conductivity. According to the hypothesis, a larger surface area reduces the gap between the electrode and the soil, such as gaps increase electrical resistance. Thus, the study on suitable electrode characteristics would enhance the efficiency of earth-grounded antenna in the future.

School of Telecommunication Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนาฏ สันทาลุนัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้คำชี้แนะ และคำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจที่ดีจาก ดร.พีรพันธ์ คำสาลี คุณอรรถวิท จันทอุปสี และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในส่วนต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

คุณดวงดาว ทวีศรีพ่ายพ หัวหน้างานของผู้วิจัยและเป็นที่ปรึกษาที่ดียิ่งเสมอมาตลอดระยะเวลาในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งคุณสุกานดา ทองตัน ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดา และญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์จนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

โชคภิวัฒน์ พฤกษ์ชาติศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2.1 หลักการเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านพื้นโลก (Through-the-Earth: TTE)	3
2.2.2 รูปแบบการส่งข้อมูลจากพื้นดินสู่ใต้ดิน (Downlink)	6
2.2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลจากใต้ดินสู่พื้นดิน (Uplink)	7
2.2.4 ทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์	7
2.2.5 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก	8
2.2.6 หลักการเกี่ยวกับอิมพีแดนซ์ในการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์	10
2.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร TTE ในรูปแบบย่านความถี่ต่ำมากโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สรุป.....	17
3 การออกแบบแท่งอิเล็กโทรด.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 การศึกษาการออกแบบและคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้า.....	18
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและการทดสอบประสิทธิภาพ ของอิเล็กโทรด.....	19
3.1 โปรแกรมออกแบบแท่งอิเล็กโทรด (SOLIDWORKS).....	19
3.2 โปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Studio Suite).....	20
3.2.2 การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด.....	20
3.1 การศึกษาคุณสมบัติและการออกแบบอิเล็กโทรด.....	20
แท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด.....	21
แท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด.....	22
แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon.....	23
แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog.....	24
แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y.....	25
แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1.....	26
แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2.....	27
แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3.....	28
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของแท่งอิเล็กโทรด.....	29
3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแท่งอิเล็กโทรด โดยใช้โปรแกรม CST Studio Suite.....	29
3.3.2 การจำลองแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 8 รูปแบบ.....	30
3.4 สรุป.....	42
4 ผลการทดสอบ.....	43
4.1 บทนำ.....	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์	43
4.2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์	43
	เครื่องมือวัดแอลซีอาร์มิเตอร์ (LCR Meter)	43
4.2.2	ขั้นตอนการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์	44
4.2.3	ผลการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์	46
4.3	การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่จริง	48
4.3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์	48
4.3.2	ขั้นตอนการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์	49
4.3.3	ผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz	52
4.4	สรุป	56
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัย	57
5.1	สรุปผลการวิจัย	57
5.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัย	58
	บรรณานุกรม	59
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	61
	ประวัติผู้เขียน	66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด..... 21
3.2	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด..... 22
3.3	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon..... 23
3.4	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog..... 24
3.5	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y..... 25
3.6	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1..... 26
3.7	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2..... 27
3.8	แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3..... 28
3.9	แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้โปรแกรม CST Studio Suite..... 41
4.1	แสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องมือวัด LCR รุ่น BK Precision 895..... 44
4.2	แสดงผลการทดลองค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความนำไฟฟ้า..... 46
4.3	แสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องวัดค่าความแรงของสัญญาณ..... 49
4.4	แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรด ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ณ อำเภอทรายทอง จังหวัดเชียงราย..... 53
4.5	แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรด ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ณ อำเภอวังแดง จังหวัดพิษณุโลก..... 55

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงแผนผังของระบบสื่อสาร TTE.....	4
2.2	แสดงการผสมผสานการสื่อสาร TTE รูปแบบแนวตั้งและแนวนอน.....	5
2.3	รูปแบบการส่งสัญญาณรูปแบบ Downlink.....	6
2.4	รูปแบบการส่งสัญญาณรูปแบบ Uplink.....	7
2.5	แสดงหลักการทำงานของสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก.....	9
2.6	(ก) แสดงภาพสมอบกที่ใช้เป็นแท่งอิเล็กทรอนิกส์โลหะ และ (ข) วิธีการเพิ่มจำนวนอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.7	แสดงการจำลองอิมพีแดนซ์ในการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.8	แสดงระบบการวัด TTE ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ ต้นแบบของ NIOSH.....	12
2.9	แสดง Block diagram ของระบบการวัด TTE.....	13
2.10	แสดงการติดตั้งแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ในตำแหน่งพื้นดินตามการทดสอบที่ 1-3.....	14
2.11	แสดงภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่รับสัญญาณ.....	15
2.12	แสดงผลลัพธ์จากการวัดค่าความต้านทานตามจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน.....	15
2.13	แสดงการจำลองการวัดค่าความต้านทานตามความลึกของอิเล็กทรอนิกส์.....	16
2.14	แสดงการวัดค่าความต้านทานตามวิธีการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์.....	17
3.1	แบบไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	19
3.2	หน้าต่างโปรแกรมออกแบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	19
3.3	หน้าต่างโปรแกรมการจำลองการทำงานของแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	20
3.4	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์แบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง.....	21
3.5	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์แบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง.....	22
3.6	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง..... 24
3.8	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง..... 25
3.9	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 1 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง..... 26
3.10	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง..... 27
3.11	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ที่ใช้งานจริง..... 28
3.12	ภาพจำลองดินทรายแห้งในโปรแกรม CST Studio Suite..... 29
3.13	ภาพจำลองการเลือกชนิดดิน Loamy Soil ในโปรแกรม CST Studio Suite..... 29
3.14	ภาพจำลองโดยเปรียบเทียบกับแท่งอิเล็กทรอนิกส์หลักที่ใช้งานจริง..... 30
3.15	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด..... 31
3.16	แผนภาพสมิทชาร์ตแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด..... 31
3.17	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด..... 31
3.18	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรปิด..... 32
3.19	แผนภาพสมิทชาร์ตแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรปิด..... 32
3.20	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบเก็บประจุ วงจรปิด..... 33
3.21	โครงสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon..... 33
3.22	แผนภาพสมิทชาร์ตแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon..... 34
3.23	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon..... 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.24	โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog.....	35
3.25	แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog.....	35
3.26	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog.....	35
3.27	โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y.....	36
3.28	แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y.....	36
3.29	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y.....	37
3.30	โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1.....	37
3.31	แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1.....	38
3.32	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1.....	38
3.33	โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2.....	39
3.34	แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2.....	39
3.35	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2.....	39
3.36	โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3.....	40
3.37	แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3.....	40
3.38	รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3.....	41
4.1	LCR Meter รุ่น BK Precision 894.....	43
4.2	แสดงภาพการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดทั้ง 8 รูปแบบ.....	44
4.3	แสดงภาพถ่ายดาวเทียมพื้นที่การทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด.....	45
4.4	เครื่องมือรุ่น BK Precision 894 ที่ใช้ในการทดลองวัดค่าความต้านทาน ของอิเล็กโทรด.....	45
4.5	แสดงการทดลองวัดค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด.....	46
4.6	เครื่องมือวัด Rohde & Schwarz Spectrum Rider FPN.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	(ก) การใช้งานแท่งอิเล็กโทรดจริงที่ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก และ (ข) การใช้งานแท่งอิเล็กโทรดจริงที่ถ้ำทรายทอง จังหวัดเชียงราย.....50
4.8	รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon.....50
4.9	รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2.....50
4.10	รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3.....51
4.11	ไดอะแกรมรูปแบบการทดลองหาค่าประสิทธิภาพ การรับสัญญาณของอิเล็กโทรด.....51
4.12	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ณ ถ้ำทรายทอง จังหวัดเชียงราย....52
4.13	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 ณ ถ้ำทรายทอง จังหวัดเชียงราย.....52
4.14	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ณ ถ้ำทรายทอง จังหวัดเชียงราย.....53
4.15	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ณ ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก...54
4.16	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 ณ ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก.....54
4.17	การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ณ ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก.....55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารภายในถ้ำได้มีการริเริ่มขึ้นสืบเนื่องจากเหตุการณ์ภัยพิบัติที่เกิดขึ้นกับนักกีฬาฟุตบอลทีมเยาวชนและโค้ชรวม 13 คน ที่ติดอยู่ภายในถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ตำบลโป่งผา อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ซึ่งได้สะท้อนให้เห็นปัญหาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสื่อสารไร้สายบนคลื่นความถี่ช่วง VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น เมื่อนำคลื่นความถี่นี้มาใช้งานภายในถ้ำพบว่าการแพร่กระจายคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านผนังถ้ำได้ เนื่องจากผนังถ้ำเป็นตัวสะท้อนคลื่นและภายในมีสิ่งกีดขวางจากสภาพแวดล้อมภายในถ้ำที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถคาดเดาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลื่นวิทยุความถี่สูงที่ใช้กันในระบบวิทยุรับ-ส่ง ซึ่งหากมีการใช้ความถี่ต่ำ จำเป็นต้องใช้สายอากาศที่มีความยาวมาก จึงทำให้ไม่สามารถนำสายอากาศความถี่ต่ำที่มีความยาวไปใช้งานภายในถ้ำได้ จึงจำเป็นต้องขอให้เป็นวงกลมหรือเหลี่ยม อีกทั้งยังมีข้อจำกัดเรื่องระยะทางของคลื่นที่จะแพร่กระจายออกไปภายในโพรงถ้ำ การสื่อสารภายในถ้ำหรือผ่านพื้นดินจึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยี Through-The-Earth (TTE) ซึ่งเป็นระบบสื่อสารที่สำคัญสำหรับใช้งานภายในถ้ำโดยการส่งคลื่นวิทยุความถี่ต่ำประเภทหนึ่งที่ใช้การส่งผ่านชั้นดินและหินโดยผ่านสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก จึงแตกต่างจากระบบวิทยุทั่วไปที่ใช้งานที่ความถี่สูงในการส่งสัญญาณซึ่งถูกจำกัดให้อยู่ในแบบแนวสายตา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของอิเล็กโทรด เพื่อออกแบบและทดสอบอิเล็กโทรดให้มีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก โดยใช้หลักการของเทคโนโลยี TTE โดยการใช้การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่เกิดที่ปลายแท่งอิเล็กโทรด สะสมประจุไฟฟ้าชั่วลบไปหาชั่วบวกจึงทำให้เกิดเส้นแรงสนามไฟฟ้าจนถึงปลายแท่งอีกด้านของอิเล็กโทรด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอคุณลักษณะของพื้นที่ผิวและชนิดวัสดุของอิเล็กโทรด ซึ่งได้ออกแบบและทดสอบสมมติฐานเพื่อออกแบบและทดสอบอิเล็กโทรดให้มีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก รวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการทดลองภายในถ้ำอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของอิเล็กโทรด

1.2.2 เพื่อออกแบบและทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 สามารถอธิบายถึงคุณลักษณะของพื้นที่ผิวและชนิดวัสดุของอิเล็กทรอนิกส์

1.3.2 สามารถออกแบบและทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

1.3.3 จากองค์ความรู้เรื่องคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ สามารถนำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ทดสอบและวิเคราะห์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

1.4.2 สร้างแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและออกแบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับย่านความถี่ต่ำในระบบ TTE

1.5.2 จำลองและทดสอบแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก โดยใช้พื้นดินร่วนแห้งซึ่งเป็นชนิดของดินที่พบได้ทั่วไปในประเทศ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้รับองค์ความรู้และสามารถนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์

1.6.2 การศึกษาอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเทคโนโลยีอื่นๆ ได้

1.6.3 ได้รับองค์ความรู้เรื่องการสื่อสารย่านความถี่ต่ำภายในถ้ำ เพื่อนำมาพัฒนาระบบสื่อสารภายในถ้ำให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

1.6.4 เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ความสามารถในการสื่อสารเป็นสิ่งสำคัญของความปลอดภัยในการปฏิบัติการในเหมืองถ่านหินและในถ้ำ เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยวิทยุแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัด และไม่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้ในเหตุการณ์ภัยพิบัติ หลักการของระบบ TTE จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยการสร้างสายอากาศสำหรับภายในถ้ำ ซึ่งหลักการของระบบ TTE มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสื่อสารในถ้ำต่อไปในอนาคต วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาเพื่อสร้างแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสายอากาศภายในถ้ำ และสามารถออกแบบแท่งอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถใช้กับระบบ TTE ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการออกแบบและการพัฒนาแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้งานกับระบบ TTE เพื่อระบบสื่อสารที่ใช้งานในถ้ำนั้นสามารถนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต ดังนั้นจึงได้ดำเนินการสำรวจและศึกษาปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของหลักการ TTE และทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ทราบถึงแนวทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อและได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เช่น ฐานข้อมูล IEEE เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่นๆ เช่น ห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ และนำผลการสืบค้นที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

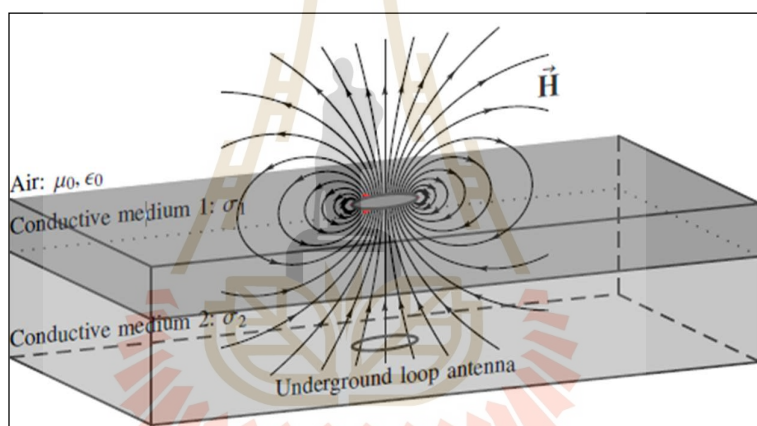
สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ออกแบบสายอากาศภายในถ้ำ รวมถึงระบบ TTE เพื่อทำหน้าที่สื่อสารภายในถ้ำ โดยเป็นการสร้างแบบจำลองสายอากาศย่านความถี่ต่ำและการพัฒนาแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้งานร่วมกับระบบ TTE เพื่อระบบสื่อสารที่ใช้งานภายในถ้ำ และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาพัฒนาระบบดังกล่าว

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 หลักการเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านพื้นโลก (Through-The-Earth: TTE)

ความสำคัญของระบบการสื่อสารในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ได้มีการเติบโตและพัฒนาขึ้น อย่างมากในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา จากจุดเริ่มต้นที่มีการจัดการระบบการสื่อสารผ่านระบบการส่งงานด้วยเสียง

ภายในย่านความถี่ที่จำกัด ซึ่งถือเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการติดต่อกับคนงานเหมืองโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในสถานการณ์ฉุกเฉิน จนได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างแพร่หลายในความพยายามเพื่อปรับปรุงระบบ และพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีความทันสมัยผ่านการสื่อสารแบบไร้สายที่เชื่อถือได้ โดยแนวทางที่นักวิจัยได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องคือการสื่อสารภายในเหมืองใต้ดินผ่านโครงสร้างพื้นฐานการสื่อสารแบบดั้งเดิม ซึ่งประกอบด้วยสายเคเบิล และตัวกระจายสัญญาณแบบไร้สาย แต่เนื่องจากสภาพแวดล้อมของเหมืองมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจึงส่งผลให้โครงสร้างการสื่อสารแบบเดิมมีข้อจำกัดเป็นจำนวนมาก นักวิจัยจึงได้มีการคิดค้นรูปแบบ การสื่อสารไร้สายแบบระยะไกลโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) พร้อมด้วยสายอากาศแผ่กระจาย และตัวกลางส่งสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณผ่านชั้นดินและหิน รวมถึงการนำหลักการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างการเชื่อมโยงระหว่างพื้นผิวและเหมืองใต้ดิน เรียกว่าระบบการสื่อสารผ่านโลก หรือ TTE ดังแสดงในรูปที่ 2.1



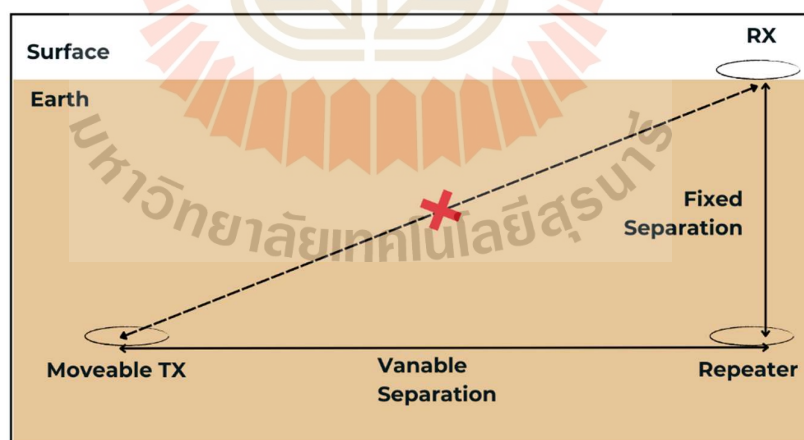
รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของระบบสื่อสาร TTE

ที่มา: Carreño et al. (2016)

แนวคิดเกี่ยวกับรูปแบบการสื่อสาร TTE ถือเป็นเทคนิคที่นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาและความพยายามในการใช้แนวคิดของการสื่อสารแบบ TTE เพื่อเปิดการใช้งานการเชื่อมโยงแบบ Non-Line of Sight (NOLS) หรือการส่งสัญญาณการสื่อสารระหว่างสถานี่ฐานกับสถานีลูกข่าย โดยมีสิ่งกีดขวางระหว่างระยะทางการส่งเพื่อเผยแพร่ความลึกของพื้นผิว จากการสำรวจของนักวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ไม่มีแนวทางใดที่สามารถรายงานระบบการสื่อสารอย่างครอบคลุมภายในเหมือง ตามแนวคิดของ TTE ที่เชื่อถือได้เนื่องจากปัญหาและข้อจำกัดต่างๆ เช่น การนำไฟฟ้าของแร่เสี่ยงจากภายนอกที่คลื่นความถี่ต่ำ และความลึกที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ TTE โดยความแรงของสัญญาณจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความลึกของเหมือง

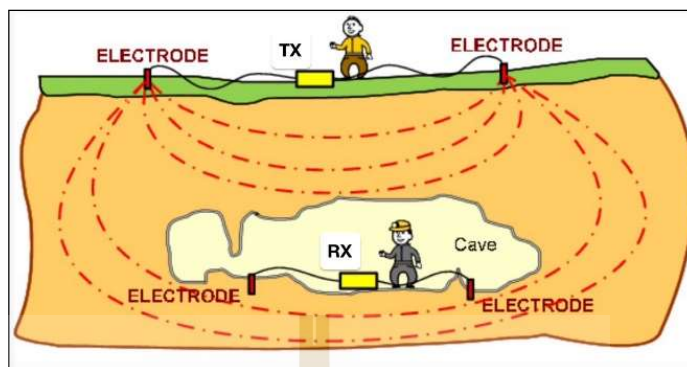
และการเพิ่มขึ้นของเสียงรบกวน ดังนั้นนักวิจัยจึงมีการเพิ่มความแรงของสัญญาณที่เครื่องส่งสัญญาณหรือขนาดของสายอากาศ เพื่อให้ครอบคลุมได้ดีขึ้นและเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งการแก้ปัญหาด้วยวิธีดั้งเดิมนี้ยังถือว่ามีย่อจำกัดเป็นจำนวนมาก

ในปี 2549 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้มีการออกพระราชบัญญัติเมืองแรโดยกำหนดให้มีการติดตั้งระบบติดตามทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารในกรณีเกิดอุบัติเหตุรูปแบบการสื่อสารสองทางสำหรับเมืองถ่านหินทั้งหมดโดยใช้ระบบการสื่อสารแบบไร้สาย TTE แต่เนื่องด้วยความกังวลเกี่ยวกับข้อจำกัดของประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ และช่วงการส่งสัญญาณ ทางสถาบันแห่งชาติเพื่อความปลอดภัยและอาชีวอนามัย (NIOSH) จึงได้มีการทดลองการสื่อสารที่เมืองถ่านหินโดยใช้รูปแบบการจัดเรียงสายอากาศแบบ TX และ RX โดยใช้ระบบต้นแบบที่มีชื่อว่า NIOSH TTE ซึ่งในระบบนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสายอากาศจากเดิมที่เป็นรูปแบบ TX รวมถึงเพื่อระบุลักษณะสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นผิวและใต้ดินและตรวจสอบความเป็นไปได้ของการสื่อสาร TTE ในลักษณะแนวนอนและข้อเปรียบเทียบกับ การสื่อสาร TTE แบบแนวตั้ง จากการทดสอบดังกล่าวพบว่าระบบการสื่อสาร TTE แบบแนวนอนภายในอุโมงค์สามารถเข้าถึงระยะทางได้ค่อนข้างมากและสามารถสร้างการสื่อสารที่เชื่อถือได้มากขึ้น ในขณะที่การสื่อสาร TTE แบบแนวตั้งมีช่วงการส่งสัญญาณที่สั้นและอาจถูกจำกัดโดยปัจจัยต่างๆ เช่น การติดตั้งสายอากาศ TX พื้นผิว ทำให้นักวิจัยได้ข้อสรุปจากการทดสอบนี้โดยการผสมผสานรูปแบบการสื่อสาร TTE ทั้งในรูปแบบแนวตั้งและแนวนอนเพื่อเพิ่มระยะและประสิทธิภาพการสื่อสารให้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการผสมผสานการสื่อสาร TTE รูปแบบแนวตั้งและแนวนอน
ที่มา: Yan et al. (2015)

2.2.2 รูปแบบการส่งข้อมูลจากพื้นดินสู่ใต้ดิน (Downlink)

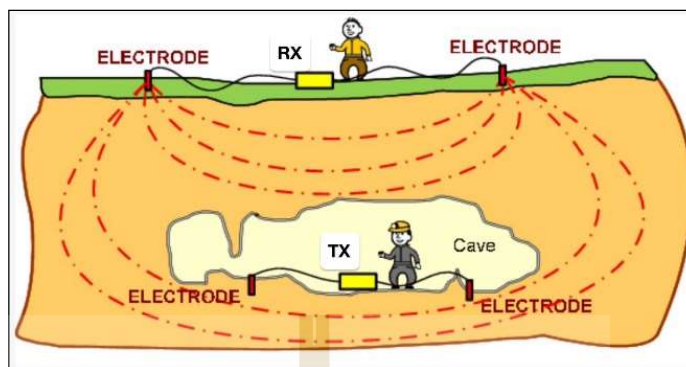


รูปที่ 2.3 รูปแบบการส่งสัญญาณรูปแบบ Downlink

ที่มา: Antonio Muñoz and Arturo Mediano. (2012)

จากรูปที่ 2.3 ในการส่งสัญญาณรูปแบบ Downlink สายอากาศ TX จะถูกติดตั้งอยู่บนพื้นดิน ในขณะที่สายอากาศ RX จะถูกติดตั้งไว้ใต้ดินหรือเคลื่อนที่ภายในทางเข้าเหมือง โดยบุคลากรภาคพื้นดินส่งสัญญาณสู่ใต้ดินผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดใหญ่พอสมควร เพื่อให้แน่ใจว่าการสื่อสารจะประสบความสำเร็จและมีเสถียรภาพ สายอากาศ RX ที่อยู่ใต้ดินจะถูกเคลื่อนย้ายโดยเพิ่มระยะครั้งละ 50 ฟุต จากเครื่องส่งสัญญาณบนพื้นผิว จากนั้นบุคลากรภาคพื้นดินจะทดสอบโดยการส่งสัญญาณผ่านคลื่นความถี่จำนวน 7 ความถี่ ได้แก่ 150, 330, 570, 990, 1,770, 3,150 และ 9,810 Hz ตามลำดับ โดยแต่ละความถี่จะถูกส่งเป็นเวลา 3 วินาที ทำให้การทดสอบในแต่ละระยะใช้เวลาส่งทั้งหมด 27 วินาที จากการทดสอบการรับสัญญาณที่สายอากาศ RX พบว่าเมื่อส่งสัญญาณจากสายอากาศ TX ด้วยกระแสสูงสุด สายอากาศ RX จะสามารถตรวจจับสัญญาณได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz เท่านั้น (Yan et al., 2015)

2.2.3 รูปแบบการส่งข้อมูลจากใต้ดินสู่พื้นดิน (Uplink)



รูปที่ 2.4 รูปแบบการส่งสัญญาณรูปแบบ Uplink

ที่มา: Antonio Muñoz and Arturo Mediano. (2012)

จากรูปที่ 2.4 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Uplink มีโครงสร้างคล้ายกับการส่งสัญญาณรูปแบบ Downlink เพียงแต่สายอากาศ TX จะถูกฝังลงที่ใต้ดิน ในขณะที่สายอากาศ RX จะอยู่บนพื้นผิวดิน เมื่อเริ่มการส่งสัญญาณจะปล่อยกระแสไฟฟ้าจากสายอากาศ TX โดยมีสายอากาศ RX บนพื้นผิวดินเป็นตัวรับสัญญาณ โดยรูปแบบการส่งแบบ Uplink จะถูกใช้งานภายในเหมืองเพื่อสื่อสารกับบุคลากรบนพื้นดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดกำลังส่งหรือกระแสไฟให้มีความเหมาะสม ผลการทดสอบการรับสัญญาณรูปแบบ Uplink พบว่าแม้ว่าจะมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูง ที่สายอากาศ TX แต่สายอากาศ RX ที่รับสัญญาณอยู่บนพื้นดินสามารถรับสัญญาณที่ความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz เท่านั้น และความแรงของสัญญาณจะลดลงเมื่อการเคลื่อนย้ายจุดรับสัญญาณของสายอากาศ RX ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่า ช่วงการส่งสัญญาณรูปแบบ Uplink จะลดลงอาจเนื่องมาจากเสียงรบกวนรอบข้างที่เพิ่มขึ้น หรือปัจจัยอื่นๆใต้ดินที่ส่งผลให้การส่งสัญญาณขึ้นไป ที่พื้นผิวดินได้รับความเสียหาย (Yan et al., 2015)

2.2.4 ทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการสื่อสารผ่านพื้นโลกหรือ TTE นักวิจัยได้มีการทดสอบและศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ TTE รวมถึงการคำนึงถึงความไวของตัวรับสัญญาณ ความยาวและการวางรูปแบบของสายอากาศเครื่องส่งสัญญาณ ความถี่ในการทำงานและกระแสไฟฟ้าที่ส่ง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการสื่อสาร นักวิจัยจึงได้วิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าของระบบสื่อสาร TTE และพบว่าการใช้อิเล็กโทรดเป็นอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อในการส่งสัญญาณโดยตรงผ่านพื้นดินช่วยให้กระแสไฟฟ้าผ่านลงสู่พื้นดินถึงเครื่องรับ โดย

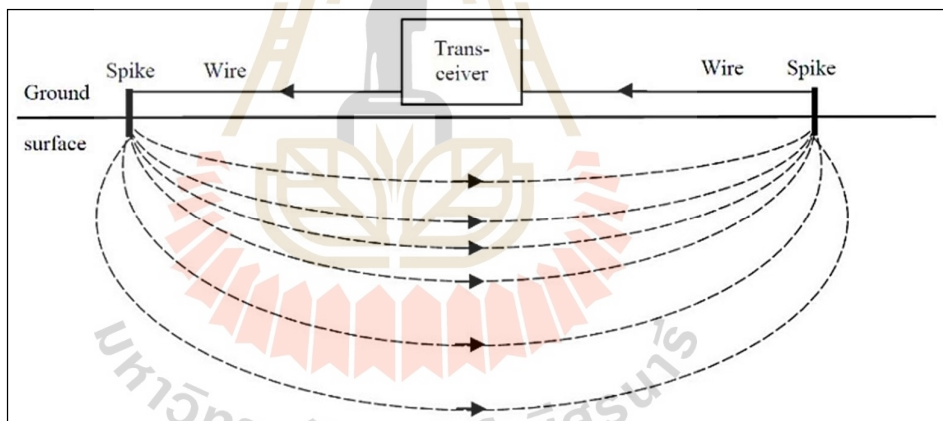
มีช่วงการส่งข้อมูลขนาดใหญ่มากกว่า 350 เมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการสื่อสารฉุกเฉิน รวมถึงการสื่อสารระหว่างคนงานในเมืองใต้ดินและพื้นดิน

สถาบันแห่งชาติเพื่อความปลอดภัยและอาชีวอนามัย ได้ทำการทดลองการสื่อสารแบบไร้สายรูปแบบ TTE จากพื้นผิวสู่ใต้ดินโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบที่เหมือนถ่านหิน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินการสูญเสียเส้นทางการส่งสัญญาณและปรับปรุงความถี่ในการทำงานที่เหมาะสม เนื่องจากสภาพแวดล้อมการทำงานเมืองใต้ดินสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของสัญญาณวิทยุ การทำความเข้าใจว่าโลกส่งผลต่อการแพร่กระจายของสัญญาณอย่างไรเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินระบบการสื่อสารที่ใช้ในกรณีฉุกเฉินของเมือง ข้อกำหนดประการหนึ่งของพระราชบัญญัติการปรับปรุงเมืองและการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินฉบับใหม่ (พระราชบัญญัติเมืองแร่ 2549) คือการติดตั้งระบบการสื่อสารสองทางและระบบติดตามทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเมืองถ่านหินใต้ดินทั้งหมด เนื่องจากเป็นหนึ่งในวิธีการสื่อสารไร้สายแบบ TTE สำหรับอุตสาหกรรมเมืองแร่ ระบบ TTE โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างการสื่อสารโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านจากเครื่องส่งสัญญาณ TX และตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เครื่องรับสัญญาณ RX โดยในระหว่าง การสื่อสาร สัญญาณจะถูกส่งจากพื้นผิวสู่ใต้ดิน (Downlink) หรือการส่งสัญญาณจากใต้ดินสู่พื้นผิว (Uplink) นักวิจัยจำเป็นต้องเข้าใจรูปแบบสนามไฟฟ้าภายในโลกที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณ เพื่อให้สามารถเลือกรูปแบบของสัญญาณที่เหมาะสม การวางแผนสัมพันธ์ของ TX และ RX และความถี่ในการทำงานเพื่อให้บรรลุการเชื่อมโยงการสื่อสารที่ประสบความสำเร็จ

2.2.5 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก

หลักการของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบลงบนหินหรือดิน โดยที่คลื่นตกกระทบไม่ได้หมดหรือหายไปในพื้นที่ที่พื้นผิว แต่จะซึมซาบลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยที่ความยาวคลื่นของความถี่วิทยุส่งผ่านทะลุเข้าไป หากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอจะเกิดการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone ที่ใช้ความถี่ 87 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร แต่เนื่องด้วยความยาวคลื่นเดินทางผ่านใต้ดินทำให้ความยาวคลื่นลดลงเหลือเพียงหลักร้อยเมตร จึงจำเป็นต้องออกแบบให้ความยาวคลื่นใต้ดินมีขนาดมากกว่าเดิม เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำผ่านทะลุได้ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตร ด้วยหลักการที่กล่าวมานี้จึงนำมาใช้กับคลื่นความถี่ 350 kHz ซึ่งสามารถใช้งานได้ในลักษณะเดียวกัน แม้ว่าความถี่จะสูงกว่า 87 kHz ของวิทยุสื่อสาร HeyPhone แต่จากการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นแล้วพบว่า คลื่น 350 kHz เมื่อถูกนำมาใช้งานกับถ่านหินปูนในประเทศไทยจะมีการลดทอนในชั้นหินปูนต่ำกว่าความถี่ 87 kHz

ในขณะที่ใช้กับถ้ำดินทรายจะมีค่าการลดทอนที่สูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นการเลือกใช้ความถี่ 350 kHz มาออกแบบระบบสื่อสารแบบ TTE และสายอากาศที่ใช้งาน เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนต่อค้างคาวที่อยู่ในถ้ำได้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกจะมีรูปแบบโครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยใช้เพียงเส้นลวดตัวนำเพียงสองเส้นที่มีความยาวแต่ละเส้นไม่ต่ำกว่า $1/100$ เท่าของความยาวคลื่น หรือประมาณ 8.57 เมตร ของความถี่ 350 kHz ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของสายอากาศขนาดเล็กที่มีอัตราขยายต่ำโดยใช้วิธีการเหนี่ยวนำประจุที่เกิดการสะสมที่ปลายของเส้นลวดตัวนำเพื่อปล่อยลงสู่พื้นโลกในรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสลับที่ความถี่ 350 kHz จึงแตกต่างจากเทคนิคการแพร่คลื่นในอากาศว่างปกติ สนามไฟฟ้างกล่าวเมื่อถูกปล่อยจากปลายเส้นลวดด้านหนึ่งลงสู่พื้นโลกจะเกิดการเหนี่ยวนำในชั้นดินหรือหินไปสู่ปลายสายทองแดงอีกด้านหนึ่งก่อนกลับไปสู่เครื่องส่งวิทยุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในพื้นที่โลกจะใช้เส้นทางแรกที่สั้นที่สุดระหว่างจุดที่เชื่อมต่อพื้นโลกทั้งสองจุด โดยมีอีกส่วนหนึ่งที่เกิดการเหนี่ยวนำแผ่ออกไปในส่วนที่ลึกลงไปในพื้นโลกเป็นแท่งอิเล็กโทรดต่อที่ปลายทั้งสองของเส้นลวดและฝังลงพื้นดินในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

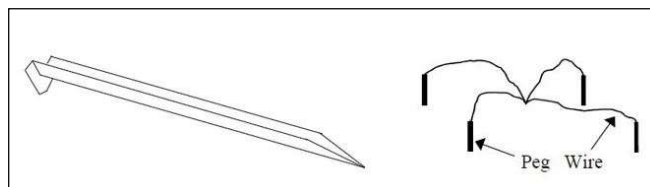


รูปที่ 2.5 แสดงหลักการทำงานของสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก

ที่มา: Chris Trayner. (2002)

สำหรับแท่งอิเล็กโทรดโลหะที่ใช้สำหรับฝัง (Spike) ลงพื้นดิน ได้เลือกใช้แท่งสมอบกขนาดเล็กที่ใช้สำหรับยึดเต็นท์ (Tent peg) ที่มีความยาว 19 เซนติเมตร จากร้านค้าอุปกรณ์เต็นท์ที่มีจำหน่ายทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถนำมาใช้ทดแทนได้โดยง่ายกรณีหากเกิดการหักงอหรือสูญหายขณะปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม และสามารถเพิ่มจำนวนของแท่งโลหะในกรณีที่ต้องการให้เกิด การเหนี่ยวนำเส้นแรงไฟฟ้าในพื้นที่โลกได้มากขึ้น โดยเชื่อมต่อกันรูปแบบดาว (Star) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจากการวัดทดสอบพบว่า การเชื่อมต่อรูปแบบดาวโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดจำนวน 6 แท่ง

และกำหนดให้แต่ละแท่งถูกตอกให้ห่างกันอย่างน้อย 6 นิ้ว โดยใช้สายทองแดงยาว 50 เซนติเมตร เชื่อมต่อแต่ละแท่งมายังแท่งโลหะที่อยู่ปลายเส้นลวดนำกระแส จะทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแท่งเดียวอย่างชัดเจน เนื่องจากให้ค่าความต้านทานที่ปลายเส้นลวดตัวนำต่ำกว่า



(ก)

(ข)

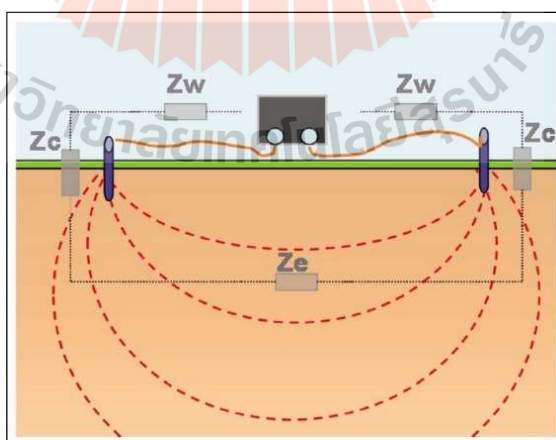
รูปที่ 2.6 (ก) แสดงภาพสมอบกที่ใช้เป็นแท่งอิเล็กโทรดโลหะ และ

(ข) วิธีการเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรด

ที่มา: Chris Trayner. (2002)

2.2.6 หลักการเกี่ยวกับอิมพีแดนซ์ในการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรด

ในการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวนำในการส่งสัญญาณ เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านสายอากาศและผ่านพื้นดินนั้น สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังอิเล็กโทรดที่เป็นตัวรับสัญญาณใต้พื้นดิน ซึ่งในระหว่างที่มีการส่งสัญญาณจะมีอิมพีแดนซ์เกิดขึ้น โดยแบ่งได้เป็น 3 องค์ประกอบ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ (Z_w) อิมพีแดนซ์ของการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับพื้นดิน (Z_c) และอิมพีแดนซ์ของพื้นโลก (Z_e) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการจำลองอิมพีแดนซ์ในการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรด

ที่มา: Bataller et al. (2010)

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงแบบจำลองอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในการสื่อสารระบบ TTE โดยใช้ อิเล็กโทรดเป็นตัวนำส่งสัญญาณ จะเห็นได้ว่ามีความซับซ้อนมาก และพบว่าอิมพีแดนซ์เกิดขึ้น เมื่อมีการสัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดกับพื้นดิน อิมพีแดนซ์ระหว่างหน้าสัมผัส ของอิเล็กโทรดกับพื้นดินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปแบบ ขนาด และวัสดุของอิเล็กโทรด คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของดินโดยรอบ ความลึกของการปักอิเล็กโทรดลงในดิน รวมถึงความถี่ของคลื่นนำส่ง สัญญาณ โดยองค์ประกอบของการเกิดอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 ประเภท สามารถพิจารณาจากอิมพีแดนซ์ หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดทั้งสิ้น โดยองค์ประกอบที่ 1 ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ประกอบเป็น อิเล็กโทรด องค์ประกอบที่ 2 อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากการประสานกันระหว่างสารละลายที่เคลือบ หน้าสัมผัสของตัวอิเล็กโทรดกับพื้นผิวดิน และองค์ประกอบที่ 3 อิมพีแดนซ์จากพื้นโลกที่เกิดขึ้นจาก อิเล็กโทรดเมื่อสัมผัสกับพื้นดินรอบๆ ในระยะทางสั้นๆ การหาปริมาณอิมพีแดนซ์ในการจำลอง การสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรดถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะในกรณีที่ค่า อิมพีแดนซ์ระหว่างพื้นผิวหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดกับพื้นดินมีปริมาณที่สูง จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้า ที่ผ่านไปในดินจนถึงอิเล็กโทรดที่เป็นตัวรับสัญญาณนั้นมีปริมาณน้อย การศึกษาองค์ประกอบ ที่ก่อให้เกิดอิมพีแดนซ์จึงถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับนักวิจัย เพื่อให้การออกแบบจำลองการสื่อสาร รูปแบบ TTE เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร TTE ในรูปแบบย่านความถี่ต่ำมากโดยใช้ อิเล็กโทรด

Damiano et al.,(2017) ได้ศึกษาและทดลองรูปแบบการสื่อสาร TTE ในรูปแบบ ELF ผ่านงานวิจัยเรื่อง Simulation and Measurement of Through-the-earth (TTE), Extremely Low Frequency Signals using Copper-clad, Steel Rods โดยได้มีการนำเสนอความหมาย และความสำคัญของระบบสื่อสาร TTE ในรูปแบบ ELF อ้างอิงจากพระราชบัญญัติเหมืองแร่เกี่ยวกับการ สื่อสารระหว่างบุคลากรใต้ดินและพื้นผิวผ่านระบบการสื่อสารซึ่งแต่เดิมใช้ระบบการสื่อสารในย่าน ความถี่ที่สูงมาก จึงส่งผลให้โครงสร้างพื้นฐานในการสื่อสารได้รับความเสียหาย รวมถึงการสูญเสีย พลังงานในการส่งผ่านข้อมูล และภายหลังจากการทดลองการส่งผ่านข้อมูลจากพื้นดินสู่ใต้ดินพบว่า ย่านความถี่ต่ำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารและส่งผ่านข้อมูล เนื่องจากย่านความถี่ต่ำ ELF สามารถเดินทางผ่านโลกได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างพื้นฐานที่อาจเสี่ยงต่อความเสียหายและ การลดทอนกระแสไฟฟ้านั่นเอง

โดยทั่วไปการสื่อสารรูปแบบ ELF เกี่ยวข้องกับการต่อสายอากาศโดยใช้เส้นทางความ ต่ำแทนที่ต่ำที่สุดและการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่า 1 แอมป์ ผ่านการเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดเพื่อส่ง สัญญาณลงสู่ใต้ดิน ระบบการสื่อสาร ELF พื้นฐานประกอบด้วยตัวรับส่งสัญญาณ ELF หนึ่งตัว

ที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดสองอันที่แยกจากกันด้วยระยะห่างที่กำหนด โดยในการสร้างสัญญาณ ELF ในโลกจำเป็นต้องสร้างความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดบนพื้นดินทั้งสองอัน หรืออิเล็กโทรดที่ใช้อาจมีจำนวนและโครงสร้างของวัสดุที่ต่างกัน หรือในกรณีที่ยากที่สุดคือการใช้อิเล็กโทรดอย่างน้อยหนึ่งอันปักลงบนพื้นดินเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดและแพร่กระจายผ่านตัวดินไปตามระยะทาง โดยมีอิเล็กโทรดอีกหนึ่งชุดที่อยู่ห่างออกไปใต้ดินเป็นตัวรับสัญญาณ สัญญาณที่ส่งผ่านถึงเครื่องตรวจจับสัญญาณใต้ดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ย่านความถี่ การนำไฟฟ้าของดิน ความยาวของเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ และกระแสไฟฟ้าของเครื่องส่งสัญญาณ โดยแปรผันกับค่าความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจากเครื่องส่งสัญญาณจึงต้องถูกขยายให้สามารถปล่อยกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด เพื่อให้มีช่วงการส่งข้อมูลถึงตัวรับสัญญาณได้ดีที่สุด โดยกระแสไฟฟ้าของเครื่องส่งสัญญาณจะถูกกำหนดโดย อิมพีแดนซ์ของระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพเพื่อรับรองความปลอดภัยทางไฟฟ้าแม้จะไม่ได้ส่งผลต่อระบบการสื่อสาร แต่ระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดทอนความต้านทานได้ นอกจากนี้ในวิจัยยังมีการตรวจสอบค่าความต้านทานหน้าผิวสัมผัสของอิเล็กโทรดภายใต้การสื่อสาร TTE รูปแบบ ELF และการนำเสนอการวัดเพื่อระบุลักษณะความต้านทานของอิเล็กโทรดภายใต้ระบบการสื่อสาร TTE โดยระบบการวัดประกอบด้วยแบตเตอรี่ 12 โวลต์ อุปกรณ์สำหรับขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีความถี่สูงขึ้น หัววัดกระแสไฟฟ้าที่ปรับเทียบแล้ว ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้า และตัวควบคุม เพื่อรวบรวมข้อมูลและส่งผ่านข้อมูลไปยังระบบคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

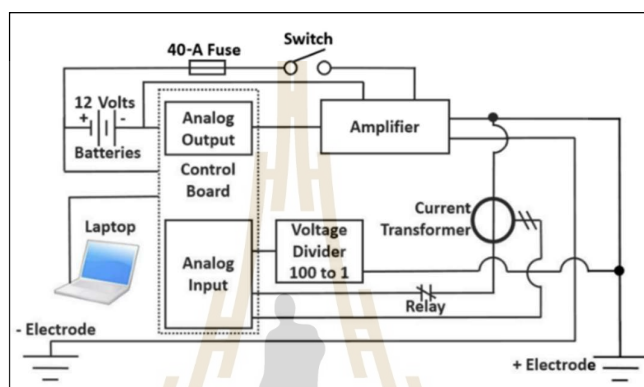


รูปที่ 2.8 แสดงระบบการวัด TTE ที่ใช้อิเล็กโทรด ดันแบบของ NIOSH

ที่มา: Damiano et al. (2016)

ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อทดสอบค่าความต้านทานของการสื่อสาร TTE รูปแบบ ELF โดยใช้อิเล็กโทรด จะเลือกใช้แท่งอิเล็กโทรดเหล็กหุ้มทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.58 เซนติเมตร ซึ่งขนาดของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ถือเป็นขนาดมาตรฐานสำหรับการเชื่อมต่อผ่านพื้นดินของระบบไฟฟ้าตามแหล่งที่อยู่อาศัยภายในสหรัฐอเมริกา

โดยอิเล็กโทรดแต่ละแท่งจะถูกเชื่อมต่อโดยใช้สายชาร์จแบบหนีบขนาด 60 แอมป์ที่ถูกหนีบไว้กับตัวนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยลวดทองแดงแบบตีเกลียวหุ้มฉนวน โดยที่จุดศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดแต่ละแท่งจะเชื่อมต่อกับขั้วลบและขั้วบวก เพื่อส่งผ่านข้อมูลไปยังแผงควบคุมที่ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณแบบอนาล็อกหรือการแสดงค่าเป็นตัวเลข เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้า สัญญาณที่ส่งผ่านจะถูกตรวจสอบผ่านการป้อนข้อมูลแบบอนาล็อกที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า โดยจะวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยตรงจากอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดง Block diagram ของระบบการวัด TTE

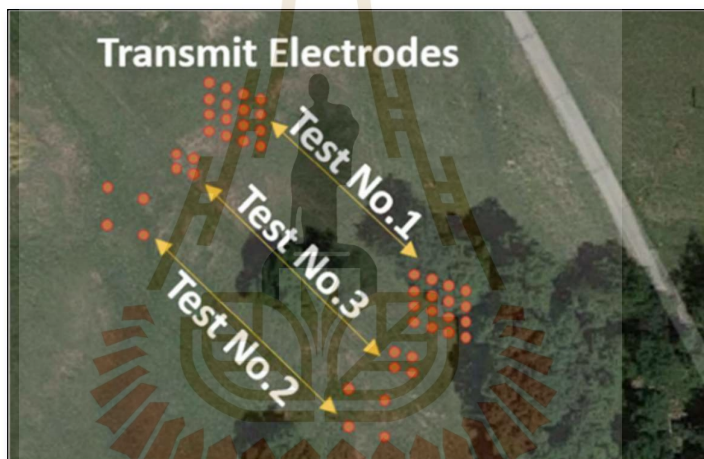
ที่มา: Damiano et al. (2016)

การดำเนินการทดลองระบบการสื่อสาร TTE ในย่านความถี่แบบ ELF โดยใช้แท่งอิเล็กโทรดได้มีการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานและประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณผ่านแท่งอิเล็กโทรดโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ได้แก่

(1) การทดสอบที่ 1 : จำนวนของแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทาน หมายถึง การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนแท่งอิเล็กโทรดที่มีความลึกคงที่โดยแท่งอิเล็กโทรดแต่ละแท่งจะถูกปักลงดินโดยมีระยะห่างจากกันเป็นสองเท่าของความลึกที่แท่งอิเล็กโทรดปักลงดินหรือประมาณ 2.4 เมตร ในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อลดการส่งสัญญาณที่อาจเกิดจากแท่งอิเล็กโทรดที่อยู่ติดกัน

(2) การทดสอบที่ 2 : ความลึกของการปักแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทาน หมายถึง การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงความลึกของแท่งอิเล็กโทรดแต่ละอัน ในการทดสอบนี้จะใช้แท่งอิเล็กโทรดเพียง 4 แท่งจากอิเล็กโทรดทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบครั้งที่ 1 จากนั้นปักแท่งอิเล็กโทรดแต่ละแท่งให้มีระยะห่างกันประมาณ 4.8 เมตร โดยแท่งอิเล็กโทรดทั้งหมดจะถูกตอกลงสู่พื้นดินโดยเริ่มต้นความลึกที่ 0.3 เมตร และแท่งถัดไปจะเพิ่มความลึกขึ้นแท่งละ 0.3 เมตรไปจนครบตามจำนวนอิเล็กโทรดทั้งหมด โดยอิเล็กโทรดแท่งที่ 4 จะถูกปักลงพื้นดินที่ความลึก 1.2 เมตร

(3) การทดสอบที่ 3 : วิธีการติดตั้งแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทาน หมายถึง การทดสอบโดยใช้อิเล็กโทรดจำนวน 4 แท่ง จากการทดสอบหมายเลข 1 เพื่อเปรียบเทียบกับ อิเล็กโทรดที่ติดตั้งใหม่จำนวน 4 แท่งที่มีความยาวเท่ากันทุกประการ โดยเปลี่ยนรูปแบบการปักลงดิน กล่าวคืออิเล็กโทรดเดิมจะทำการปักลงดินโดยตรง ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ติดตั้งใหม่จะใช้วิธีการขุดเจาะ หน้าพื้นดินและนำดินที่ร่วนออกให้มีลักษณะเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร จากนั้น ใช้สว่านยาว 1 เมตร เพื่อเจาะรูนำก่อนการปักสู่พื้นดินจนครบตามจำนวนของอิเล็กโทรดแล้วจึงนำ สารละลายที่ผสมระหว่างน้ำกับคอปเปอร์ซัลเฟต หรือสารละลาย CuSO_4 (ใช้ในการสำรวจธรณี ฟิสิกส์เพื่อปรับปรุงการสัมผัสพื้นดิน) เทลงในรูที่เจาะไว้จนสารละลายเกิดความอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ (ระดับของสารละลายยังคงมองเห็นได้ใกล้พื้นผิวเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที) จากนั้นปักแท่ง อิเล็กโทรดในรูที่มีสารละลายโดยปักให้ลึกลงไปจากเดิมประมาณ 0.2 เมตร



รูปที่ 2.10 แสดงการติดตั้งแท่งอิเล็กโทรด ในตำแหน่งพื้นดินตามการทดสอบที่ 1-3

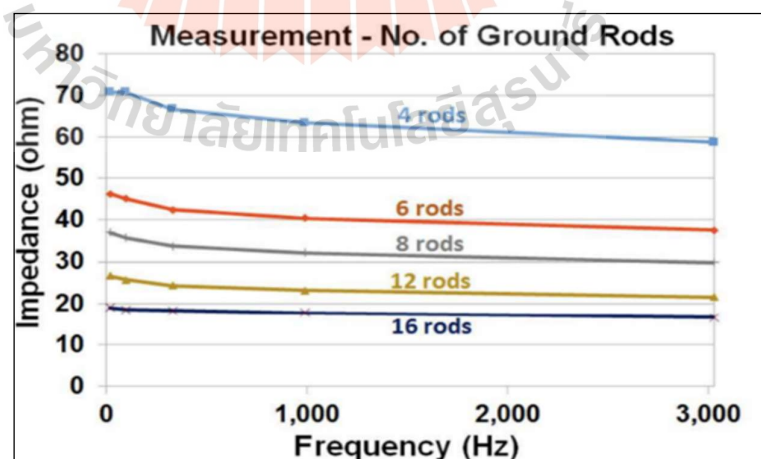
ที่มา: Damiano et al. (2016)

ในการดำเนินการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ระบบการวัดการส่งสัญญาณที่คล้ายกันโดยติดตั้ง ระบบให้ห่างออกไป 365 เมตร โดยมีโครงสร้างของอุปกรณ์ในตำแหน่งรับประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ และการตั้งค่ารูปแบบเดียวกัน กล่าวคือ บริเวณที่ใช้เป็นตำแหน่งรับสัญญาณจะประกอบด้วย อิเล็กโทรดจำนวน 2 คู่ ที่มีความยาว 1.2 เมตร จำนวนคู่ละ 8 แท่ง ที่ปักลงสู่พื้นดินโดยตรง ในลักษณะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีระยะห่างกัน 60 เมตร ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตโดยเครื่องส่ง สัญญาณจะถูกวัดตามช่วงเวลาและบันทึกไว้ โดยการใช้งานระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับจะใช้วิทยุ ความถี่สูงแบบพกพาโดยตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ เพื่อบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.11



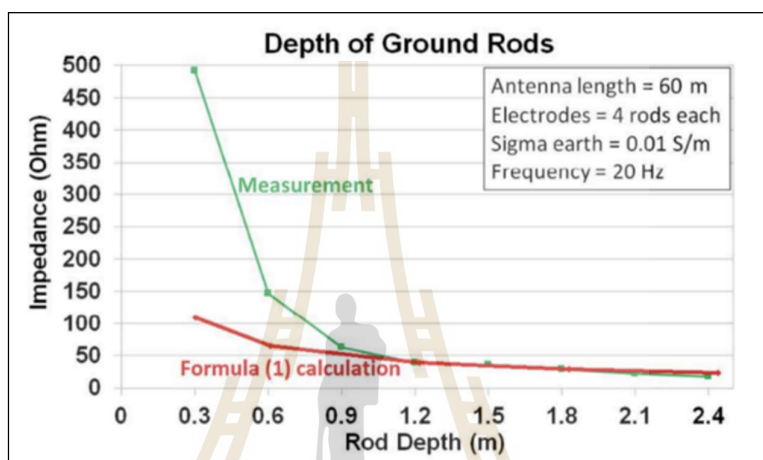
รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่รับสัญญาณ จุดสีส้มระบุตำแหน่งของแท่งอิเล็กโทรด
ที่มา: Damiano et al. (2016)

ผลจากการสอบที่ 1 จำนวนของแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทาน :วัสดุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานของระบบ TTE มีความแตกต่างกันตามจำนวนอิเล็กโทรดอย่างไร ความถี่ที่เลือกใช้คือ 20, 100, 330, 990 และ 3030 Hz โดยความถี่ที่เลือกใช้ในการวัดค่าความต้านทานนี้ครอบคลุมช่วงที่สูงกว่า ELF เพื่อพิจารณาว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามการใช้ความถี่หรือไม่ และการเปลี่ยนแปลงนั้นอยู่ในระดับใด โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบพบว่า สัดส่วนค่าความต้านทานแปรผกผันกับจำนวนแท่งของอิเล็กโทรด กล่าวคือ เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานที่ลดลงในแต่ละระดับตามจำนวนของอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 2.12



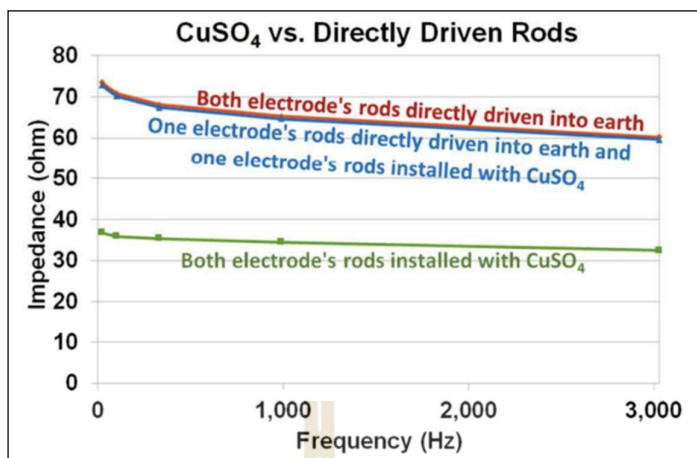
รูปที่ 2.12 แสดงผลลัพธ์จากการวัดค่าความต้านทานตามจำนวนอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน
ที่มา: Damiano et al. (2016)

ผลการทดสอบที่ 2 ความลึกของการปักแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทานสำหรับการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนเฉพาะความลึกของอิเล็กโทรดแต่ละแท่งบนระบบ TTE และการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นในระบบโดยใช้คลื่นความถี่เท่ากับการทดสอบครั้งที่ 1 ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 20 ถึง 3000 Hz โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานน้อยกว่า 5 % เมื่ออยู่ในความถี่ที่สูงกว่า 3000 Hz และความลึกของแท่งอิเล็กโทรดเกิน 1.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการจำลอง-การวัดค่าความต้านทานตามความลึกของอิเล็กโทรด
ที่มา: Damiano et al. (2016)

ผลการทดสอบที่ 3 วิธีการติดตั้งแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าความต้านทาน วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือเพื่อวัดค่าความต้านทานของระบบการส่งสัญญาณ TTE เมื่ออิเล็กโทรดถูกปักลงดินโดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่ อิเล็กโทรดเดิมจะทำการตอกลงพื้นดินโดยตรงโดยใช้ค้อนขนาดใหญ่หรือใช้สว่านเจาะและปักอิเล็กโทรดลงสู่พื้นดิน ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบนี้ใช้การเจาะหน้าดินให้เป็นรูและเทสารละลาย CuSO_4 ก่อนปักอิเล็กโทรดลงสู่พื้นดินตามรูที่เจาะไว้โดยที่ดินรอบๆ แท่งอิเล็กโทรดยังคงเปียกในระหว่างการทดสอบ จากนั้นวัดค่าความต้านทาน โดยใช้คลื่นความถี่เดียวกับการทดสอบครั้งที่ 1 ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อิเล็กโทรดที่มีการเทสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ลงในรูก่อนการปักอิเล็กโทรดลงดินช่วยลดค่าความต้านทานได้เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดที่ปักลงดินโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานตามวิธีการติดตั้งอิเล็กโทรด

ที่มา: Damiano et al. (2016)

จากผลการทดสอบเพื่อวัดค่าความต้านทานในระบบสื่อสาร TTE ผ่านการทดสอบทั้ง 3 วิธี สามารถสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานโดยรวมของอิเล็กโทรดบนพื้นผิวสามารถลดลงได้โดย 1) ใช้แท่งอิเล็กโทรดหลายแท่ง 2) เพิ่มความลึกของแท่งอิเล็กโทรด และ 3) การใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) ช่วยลดค่าความต้านทาน ได้ซึ่งการวัดที่น่าเสนอในบทความนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อช่วยให้นักวิจัยเข้าใจข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับอิเล็กโทรดของระบบ TTE รวมถึงการปรับปรุงและการออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อให้ระบบการสื่อสาร TTE มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป (Damiano et al., 2017)

2.3 สรุป

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงหลักการ ความเป็นมาและความสำคัญของการสื่อสารระบบ TTE การพัฒนารูปแบบการสื่อสารโดยใช้รูปแบบ ELF เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารระหว่างพื้นดินและใต้ดิน รวมถึงการทดลองการสื่อสาร TTE โดยใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวกลางในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าจากพื้นดินสู่ใต้ดิน ในบทที่ 3 จะเป็นการนำเสนอการศึกษาการออกแบบอิเล็กโทรดประเภทต่างๆ รูปแบบของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการส่งและรับสัญญาณ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ และการออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร TTE ต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบแท่งอิเล็กโทรด

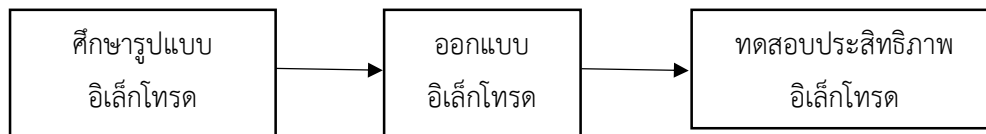
3.1 บทนำ

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการสื่อสารไร้สายแบบ TTE การออกแบบโครงสร้างการสื่อสารโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำแบบ ELF รวมถึงการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองการสื่อสารแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรด ในบทนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ ที่มีการทดสอบและนำไปใช้ในการทดลองเพื่อนำไปสู่การออกแบบสายอากาศอิเล็กโทรดสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสาร TTE โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้สายอากาศมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นได้ดี โดยในบทนี้ยังได้นำเสนอขั้นตอนการจำลองสายอากาศอิเล็กโทรดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดให้มีความเหมาะสมมากขึ้น

3.2 การศึกษาการออกแบบและคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้า

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรด ที่ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าได้ดีภายในดิน ผู้วิจัยได้นำหลักการและผลการทดสอบประสิทธิภาพของแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด แท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog และแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y มาเป็นอิเล็กโทรดที่ใช้ในการอ้างอิง โดยในบทนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของอิเล็กโทรดและสมมติฐานการทำงานของอิเล็กโทรด ซึ่งมีตัวแปรหลักสำคัญ กล่าวคือ ช่องอากาศที่อยู่ระหว่างดินกับพื้นที่หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดที่มีค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor) นั้น มีผลทำให้ค่าความต้านทานสูงและความนำไฟฟ้าต่ำ จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบแท่งอิเล็กโทรดเพื่อทดลองและศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบและประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบอิเล็กโทรด คือ เพื่อต้องการเพิ่มพื้นที่หน้าสัมผัสกับพื้นดินโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความลึกในการปักอิเล็กโทรด หรือการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรด จนนำมาสู่การออกแบบอิเล็กโทรดโดยมีขั้นตอนประกอบด้วย การออกแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างโมเดล และการออกแบบการจำลองเพื่อวัดค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 และแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3

โดยมีขั้นตอนการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1

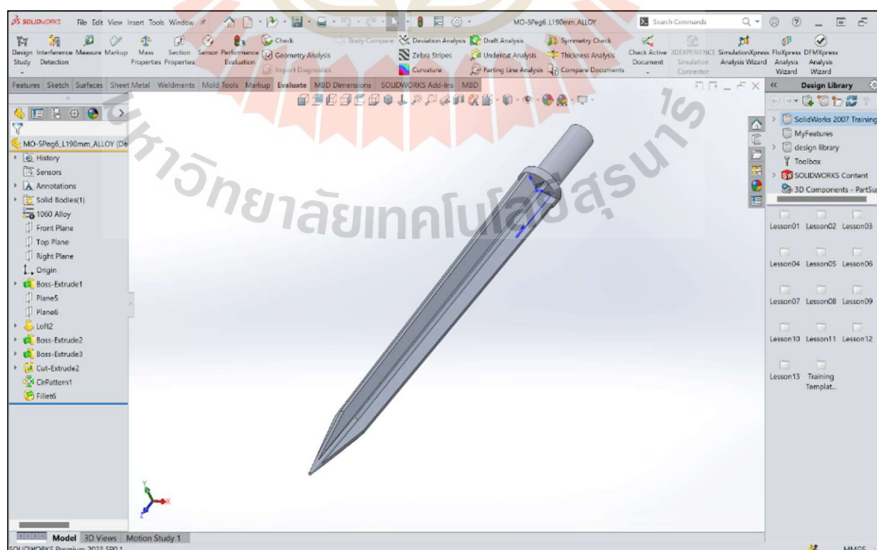


รูปที่ 3.1 แบบไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบแห่งอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1.1 โปรแกรมออกแบบแห่งอิเล็กทรอนิกส์ (SOLIDWORKS)

SOLIDWORKS เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งช่วยจำลองการสร้างชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม SOLIDWORKS เนื่องจากในการออกแบบงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์รายละเอียดของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงองค์ประกอบเกี่ยวกับพื้นที่หน้าสัมผัสกับพื้นดินเพื่อลดความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆ ดังนั้นโปรแกรม SOLIDWORKS จึงถือเป็นโปรแกรมที่มีความเหมาะสม เพราะสามารถช่วยวิเคราะห์ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานได้ง่าย จึงช่วยให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

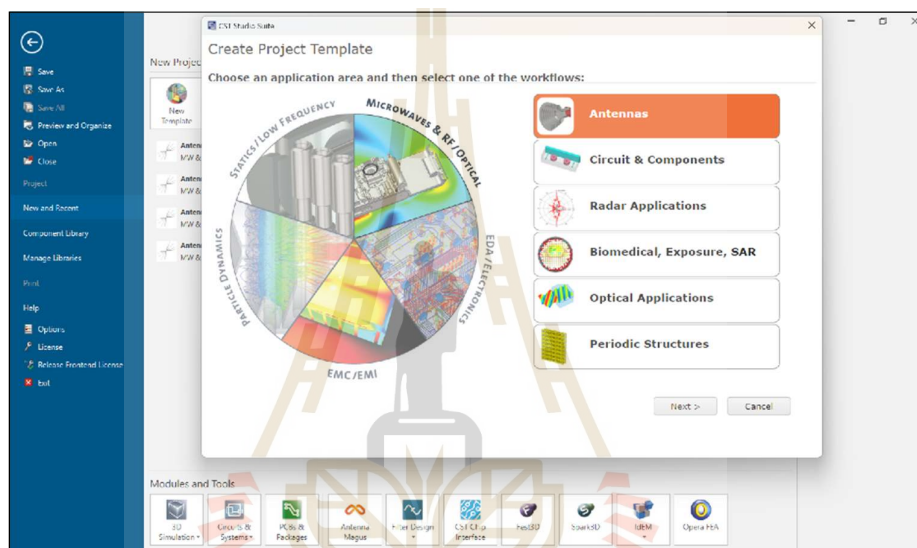


รูปที่ 3.2 หน้าต่างโปรแกรมออกแบบแห่งอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา : โปรแกรมการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ SOLIDWORKS

3.2.1.2 โปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Studio Suite)

โปรแกรม CST Studio Suite เป็นโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อออกแบบการจำลองและการวิเคราะห์แท่งอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปใช้ในการสื่อสารระบบ TTE ที่ใช้คลื่นความถี่ต่ำ ซึ่งรูปแบบการจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการสร้างต้นแบบเสมือนจริงและเปรียบเทียบคุณสมบัติของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบไว้แต่ละประเภท เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบ ช่วยลดกระบวนการออกแบบจำลองทางกายภาพ และสามารถนำผลการทดสอบมาปรับแก้ให้เหมาะสมกับปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ดังตัวอย่างรูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของโปรแกรม CST Studio Suite



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรมการจำลองการทำงานของแท่งอิเล็กทรอนิกส์

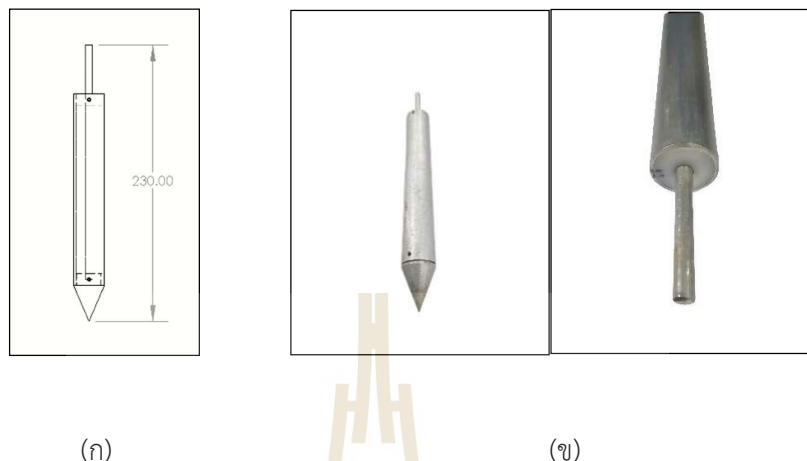
ที่มา : โปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Studio Suite)

3.2.2 การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์

3.2.2.1 การศึกษาคุณสมบัติและการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์เริ่มจากการศึกษาจากคุณสมบัติและลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon เป็นอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบและนำมาเป็นแนวคิดในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการศึกษาประสิทธิภาพผ่านโปรแกรม SOLIDWORKS โดยมีรายละเอียดและคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละประเภท ดังนี้

(1) แท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด



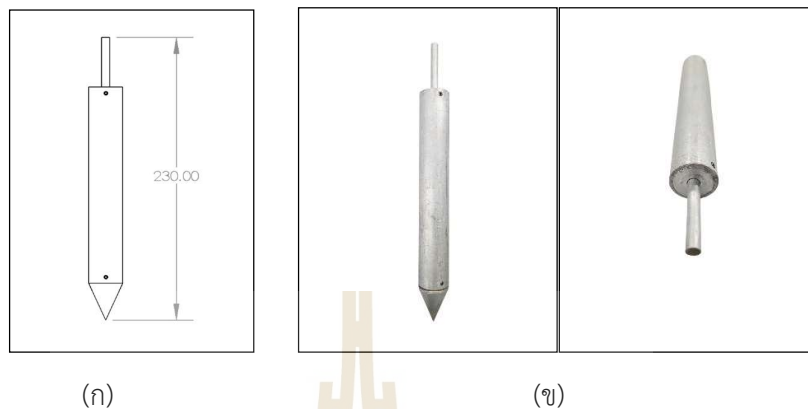
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

การศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเหมือนกับจรวด กล่าวคือ มีช่วงปลายแหลม และช่วงกลางเป็นลักษณะทรงกระบอก ลักษณะผิวเรียบแบบสม่ำเสมอ และปลายด้านบนมีแผ่นพลาสติกแข็งสีขาว เรียกว่า ซุปเปอร์ลีน (Superlen) เหตุผลที่ใช้ซุปเปอร์ลีน เพราะคุณสมบัติของอิเล็กโทรดแบบนี้มีความแข็งแรง ยึดหยุ่น และไม่เสียรูปทรงง่าย เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี มีลักษณะเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงกว่าแบบอื่น จากรูปที่ 3.4 ได้มีการวิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดพบว่า หากพื้นที่หน้าตัดมากสามารถลดค่าความต้านทานได้ดี จึงออกแบบอิเล็กโทรดแบบนี้ให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดค่าความต้านทาน แต่เมื่อนำมาทำการทดสอบพบว่าค่าความนำไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากผิวด้านนอกไม่ได้เชื่อมต่อกัน ทีมนักฟิสิกส์จึงแนะนำให้ใช้สารแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าเก็บประจุไฟฟ้า จึงนำอิเล็กโทรดมาใส่สารแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) โดยเคลือบไว้บริเวณผิวของอิเล็กโทรดและนำไปทดสอบอีกครั้ง ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด มีค่าการจัดเก็บประจุไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยแสดงข้อมูลของ แท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	46693 mm ²	87 g.	23 cm.	อลูมิเนียม

(2) แท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด



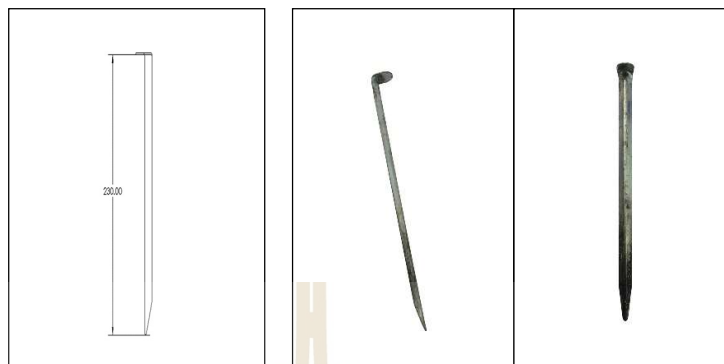
รูปที่ 3.5 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง (ข)

ภายหลังการออกแบบแท่งอิเล็กโทรดและพบปัญหาเกี่ยวกับผิวตัวนำภายนอกของอิเล็กโทรดที่ไม่เชื่อมต่อกันส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น จึงได้มีการออกแบบอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุวงจรปิด เพื่อไม่ให้มีรอยเชื่อมต่อ ดังตัวอย่างจากรูปที่ 3.5 ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบอิเล็กโทรดโดยเปลี่ยนซูเปอร์ลีนที่อยู่ด้านบนของแท่งอิเล็กโทรดให้เป็นอลูมิเนียมเพื่อให้ค่าความต้านทานน้อยลง และแท่งอิเล็กโทรดจะสามารถนำกระแสได้ดีขึ้น แต่เมื่อนำอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด ไปทำการทดสอบพบว่า ค่าความนำไฟฟ้ายังต่ำมากเกินไป โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	46693 mm ²	87 g.	23 cm.	อลูมิเนียม

(3) แท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon



(ก)

(ข)

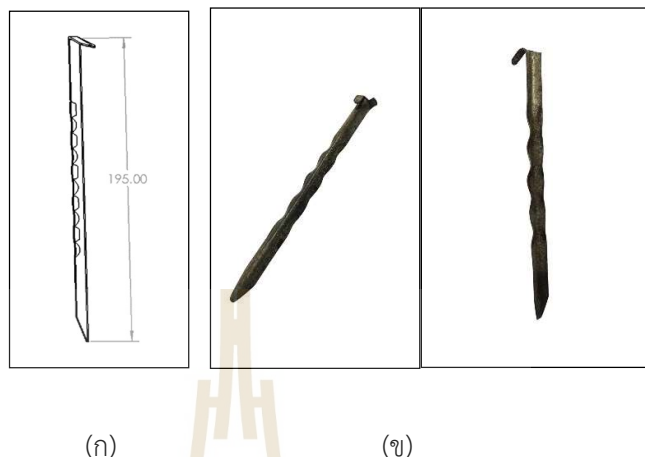
รูปที่ 3.6 โครงสร้างแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

จากรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบอิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ผ่านโปรแกรม SOLIDWORKS ซึ่งถือเป็นรูปแบบอิเหล็กโทรดต้นแบบที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โดยเป็นอิเหล็กโทรดที่เคยมีการนำมาใช้งานจริง และเป็นอิเหล็กโทรดที่สามารถพบได้เป็นจำนวนมากตามร้านค้าที่จำหน่ายอุปกรณ์สำหรับเดินป่า โดยชื่อเรียก Decathlon นั้นมาจากชื่อร้านที่จำหน่ายอุปกรณ์ชนิดนี้ อิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon มีลักษณะทางกายภาพเป็นแท่งอลูมิเนียมรูปตัว V มีขนาดหน้าตัดบาง หัวตะขอขนาดใหญ่ น้ำหนักเบาและมีความทนทาน เหมาะสำหรับพื้นดินนิ่มหรือร่วน จึงมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเหล็กโทรดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลของแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	9341 mm ²	17.39 g.	20 cm.	เหล็ก

(4) แท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog



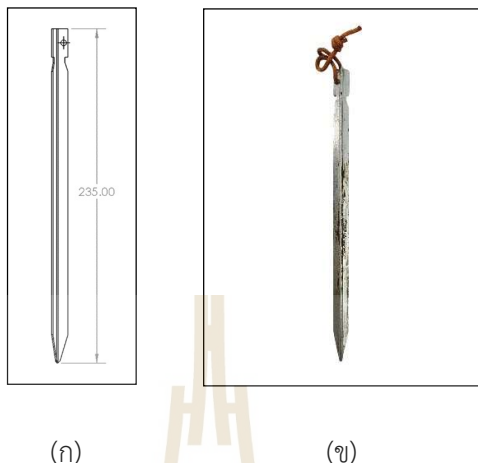
รูปที่ 3.7 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

จากรูปที่ 3.7 เป็นการออกแบบโครงสร้างอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog ผ่านโปรแกรม SOLIDWORKS ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดที่มีการสั่งซื้อจากประเทศอังกฤษ โดยมีลักษณะคล้ายกับอิเล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon กล่าวคือ เป็นแท่งอลูมิเนียมรูปตัว V ที่มีขนาดหน้าตัดบาง น้ำหนักเบา สามารถยึดเกาะได้ดีเป็นพิเศษ และมีความทนทานเหมาะสมสำหรับพื้นดินนิ่มหรือร่วน แต่มีความแตกต่างกันบริเวณส่วนบนหัวตะขอ โดยมีลักษณะเป็นก้าน 2 ก้าน และส่วนของแท่งอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นลอนคลื่น ความยาว 177 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักอุปกรณ์รวม 17 กรัม จากคุณสมบัติเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงนำแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog มาออกแบบผ่านโปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และทำการทดสอบผ่านโปรแกรม CST Studio Suite ก่อนนำไปใช้งานจริง โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	9151 mm ²	17 g.	17.7 cm	อลูมิเนียม

(5) แท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y



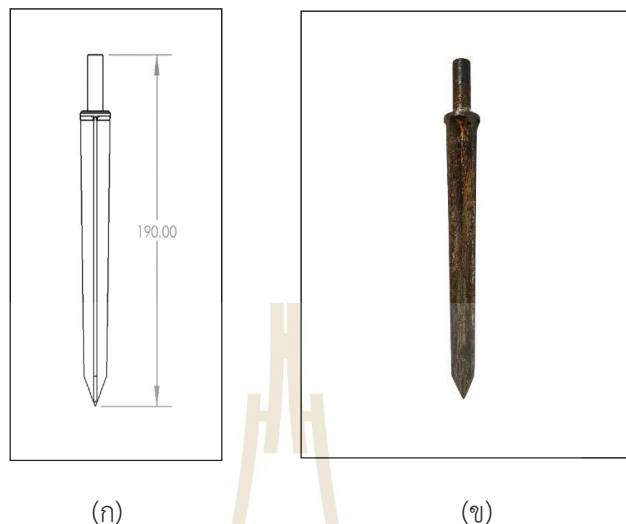
รูปที่ 3.8 โครงสร้างแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon และแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog จากการตั้งสมมติฐานของผู้วิจัยในการเพิ่มหน้าสัมผัสช่วยลดค่าความต้านทาน จึงได้มีการศึกษาและออกแบบแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y (รูปที่ 3.8) ซึ่งมีความแตกต่างคือเป็นแท่งอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยหน้าตัดทั้งหมด 3 ด้าน มีลักษณะเป็นเข็มและมีตะขอหรือรูที่ปลายด้านบน โดยปกติเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดติดกับพื้น สามารถใช้ติดกับวัสดุของเต็นท์โดยตรงหรือผ่านการเชื่อมต่อกับเชือกที่ติดกับเต็นท์ จากการศึกษาแบบของแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y พบว่าลักษณะของอิเหล็กโทรดเป็นแท่งลวดที่มีลักษณะเป็น 3 แฉก และเมื่อนำมาทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพพบว่า อิเหล็กโทรดรูปแบบนี้มีข้อเสียเรื่องความทนทานต่อการใช้งาน เนื่องจากอลูมิเนียมยังมีขนาดบางจึงไม่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่แข็งหรือมีโครงสร้างเป็นหินเพราะอาจเกิดความเสียหายต่ออิเหล็กโทรดได้ จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบแท่งอิเหล็กโทรดรูปแบบอื่นต่อไป โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเหล็กโทรดดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลของแท่งอิเหล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	10145 mm ²	12.96 g.	23 cm	อลูมิเนียม

(6) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1



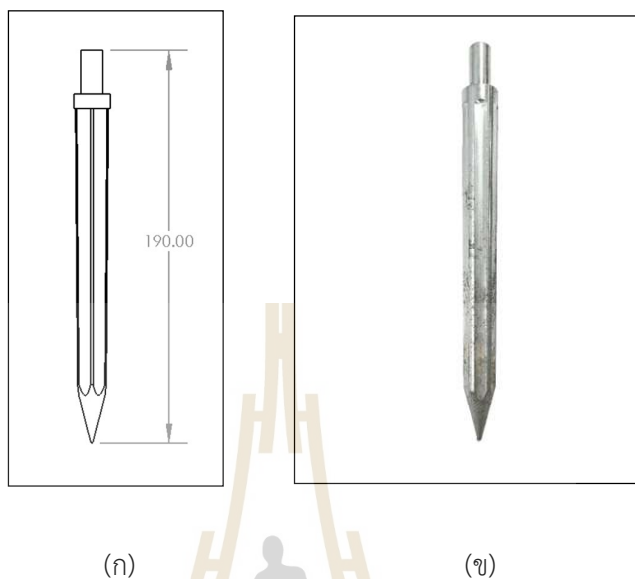
รูปที่ 3.9 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

จากรูปที่ 3.9 แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 มีลักษณะเป็นตัว X ได้รับแนวคิดในการออกแบบตามลักษณะและคุณสมบัติของแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y จากการทดสอบและข้อจำกัดที่พบในอิเล็กโทรดอ้างอิง#3 รูปแบบ Y ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 จากการตั้งสมมติฐานของผู้วิจัย โดยการเพิ่มรัศมีของอิเล็กโทรดให้กว้างขึ้น และเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้มากขึ้น และมีพื้นที่เรียบสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเป็นการเพิ่มการนำกระแสให้ไหลผ่านได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของอิเล็กโทรดได้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบผ่านโปรแกรม SOLIDWORKS และนำไปทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรม CST Studio Suite โดยจากการนำไปทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 พบว่าผลที่ออกมาเป็นไปตามสมมติฐาน กล่าวคือ อิเล็กโทรดมีค่าความต้านทานลดน้อยลงในขณะที่มีค่าการนำกระแสได้ดีขึ้น ผู้วิจัยจึงนำผลการศึกษาการออกแบบและทดลองอิเล็กโทรดไปใช้ในการออกแบบอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	18543 mm ²	224 g.	19 cm	เหล็ก

(7) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2



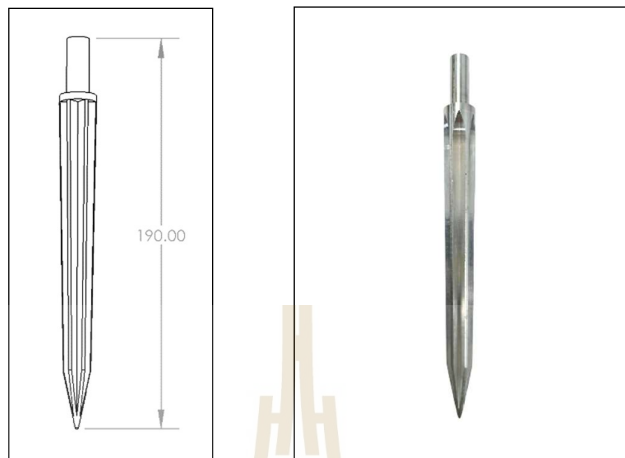
รูปที่ 3.10 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

จากรูป 3.10 เป็นการจำลองการออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 โดยใช้กรอบแนวคิดในการออกแบบตามลักษณะและคุณสมบัติของอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด ซึ่งจากเดิมอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด มีลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดที่เรียบเสมอกันจากสมมติฐานของผู้วิจัยและจากการศึกษาลักษณะอิเล็กโทรดรูปแบบวงจรปิดที่ช่วยนำกระแสได้ดี จึงนำมาสู่การออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบพื้นผิวและมีพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มร่องลึกของผิวอิเล็กโทรดเล็กน้อยเพื่อให้ดูแตกต่างจากแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด จากการออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 พบว่ามีข้อเสียกว่าอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่า ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ออกมา พบว่าเป็นไปตามสมมติฐาน นั่นคือค่าความต้านทานลดน้อยลงและมีค่าการนำกระแสได้ดี จึงนำไปสู่หัวข้อการเพิ่มคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	18156 mm ²	215 g.	19 cm	อลูมิเนียม

(8) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 (ก) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และ (ข) ใช้งานจริง

จากรูปที่ 3.11 เป็นการออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ซึ่งได้รับแนวคิดในการออกแบบ ตามลักษณะของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 จากการตั้งสมมติฐานของผู้วิจัย โดยการปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดให้เพิ่มขึ้นจากรูปแบบที่ 1 กล่าวคือ มีการเพิ่มรัศมีหน้าสัมผัสให้กว้างขึ้น เพิ่มพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด และทำให้พื้นที่เรียบสม่ำเสมอเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 แต่มีน้ำหนักเบากว่ารูปแบบที่ 1 ซึ่งการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในลักษณะนี้เป็นการเพิ่มการนำกระแสให้ไหลผ่านได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันยังเพิ่มความแข็งแรงของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 หลังจากการออกแบบอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ออกมาพบว่า เป็นไปตามสมมติฐาน นั่นคือค่าความต้านทานลดน้อยลงและมีค่าการนำกระแสได้ดี จึงนำไปสู่หัวข้อการเพิ่มคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดดังตารางที่ 3.8

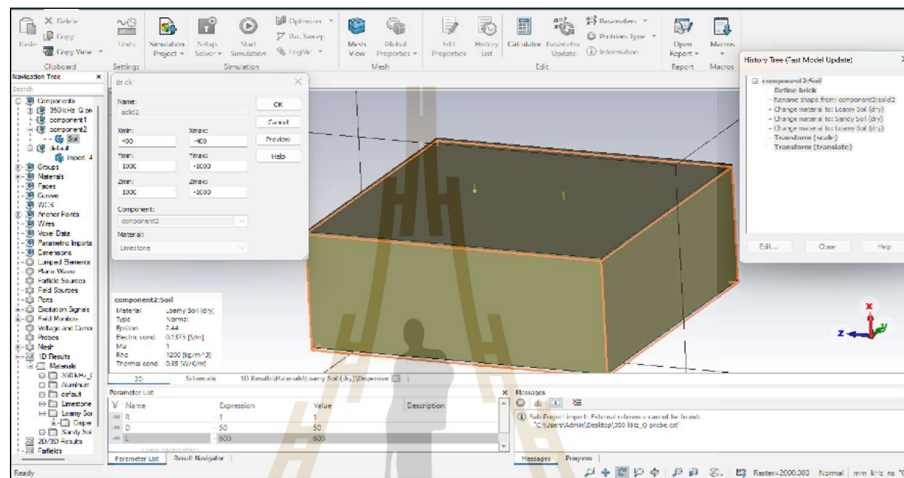
ตารางที่ 3.8 แสดงข้อมูลของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3

คุณลักษณะ	หน้าสัมผัส	น้ำหนัก	ความยาวแท่ง	ชนิดวัสดุ
ขนาดหรือค่า	27458 mm ²	106 g.	19 cm	อลูมิเนียม

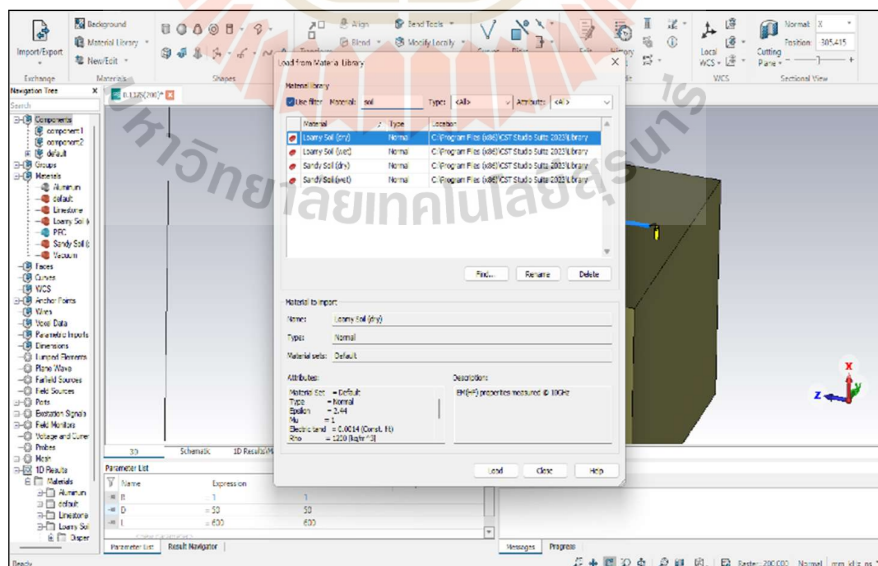
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของแท่งอิเล็กโทรด

3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแท่งอิเล็กโทรดโดยใช้โปรแกรม CST Studio Suite

(1) กำหนดตัวแปรโดยการสร้างดินทรายแห้งจำลองพื้นที่ กว้างXยาวXสูง ผ่านโปรแกรม CST Studio Suite ให้มีความใกล้เคียงกับพื้นที่ดินจริง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด ขั้นตอนการตั้งค่าดังรูปที่ 3.12

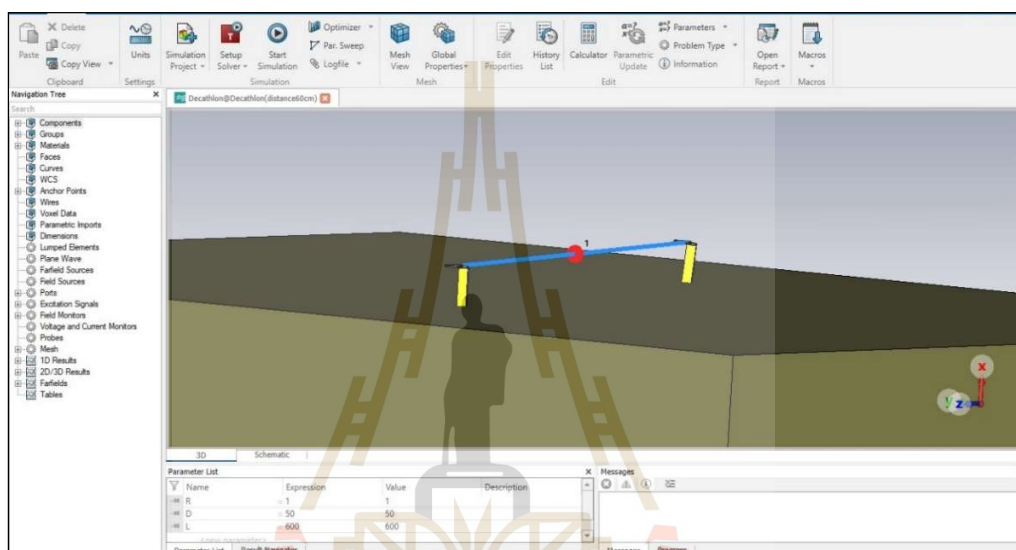


รูปที่ 3.12 ภาพจำลองดินทรายแห้งขนาด 40cmX10cmX10cm
ในโปรแกรม CST Studio Suite



รูปที่ 3.13 ภาพจำลองการเลือกชนิดดิน Loamy Soil (dry) ในโปรแกรม CST Studio Suite

(2) นำแท่งอิเล็กโทรดที่ออกแบบมาทั้ง 8 รูปแบบ นำมาปักลงดินจำลอง เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ซึ่งถือเป็นอิเล็กโทรดที่ถูกใช้งานจริงในเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ TTE โดยทำการปักแท่งอิเล็กโทรดที่ละแท่งจนครบทั้ง 8 รูปแบบ เพื่อวัดค่าความต้านทานและความนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรด โดยมีระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดประมาณ 60 เซนติเมตร ตามระยะสายทดสอบเครื่อง LCR Meter อิเล็กโทรดที่ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ภาพจำลองโดยเปรียบเทียบกับแท่งอิเล็กโทรดหลักที่ใช้งานจริง

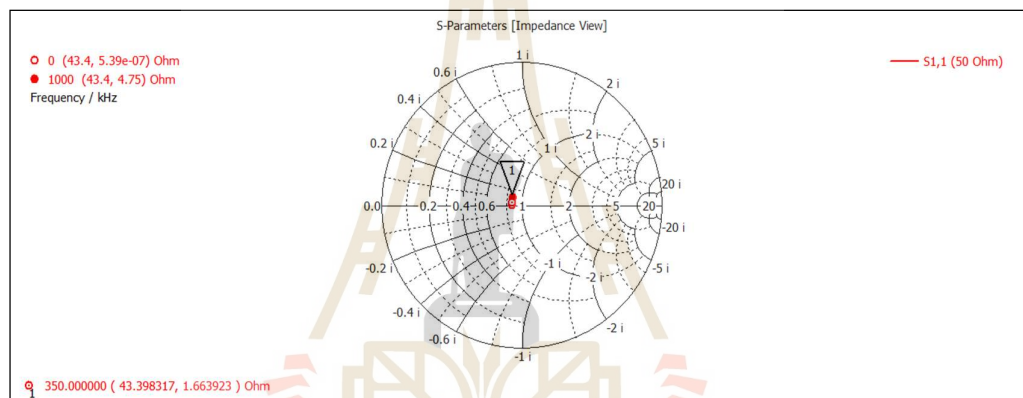
3.3.2 การจำลองแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 8 รูปแบบ

(1) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด

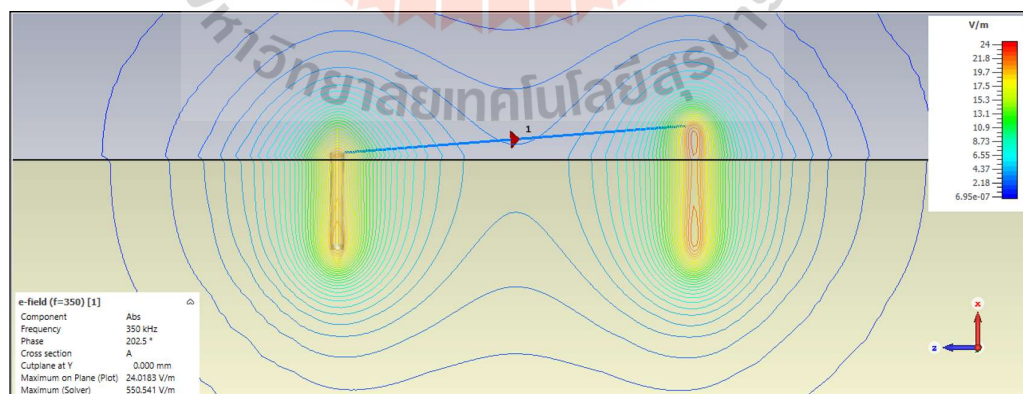
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.15 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $43.39 + jx1.66$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.16 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 โครงสร้างแท่งอเล็กโทรดรูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด



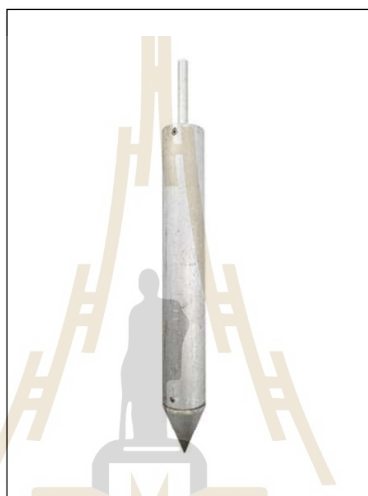
รูปที่ 3.16 แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอเล็กโทรดรูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด



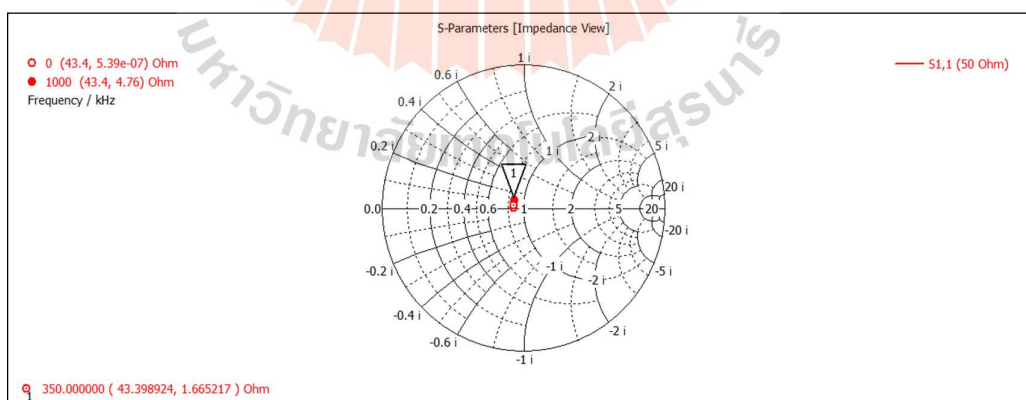
รูปที่ 3.17 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
แท่งอเล็กโทรดรูปแบบเก็บประจุ วงจรเปิด

(2) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด

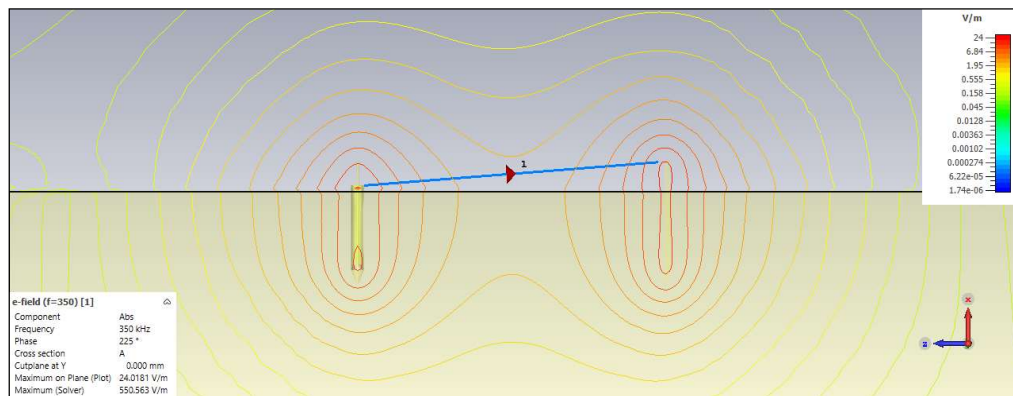
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.18 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $43.39 + jx1.66$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.19 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.18 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด



รูปที่ 3.19 แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด



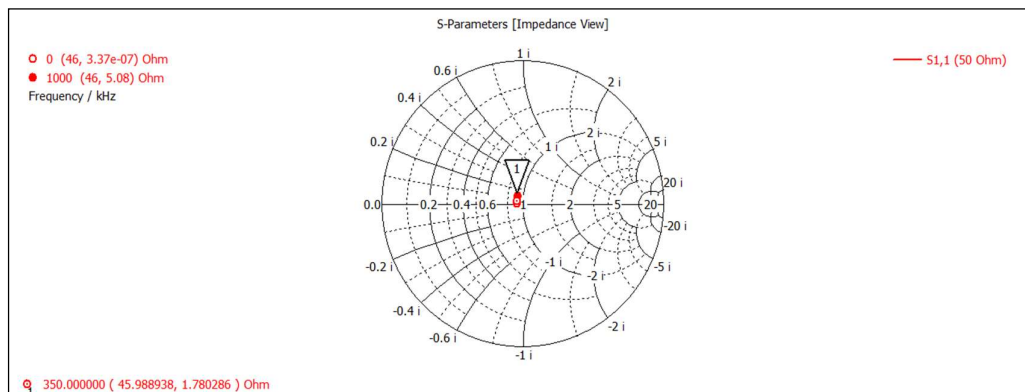
รูปที่ 3.20 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบเก็บประจุ วงจรปิด

(3) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon

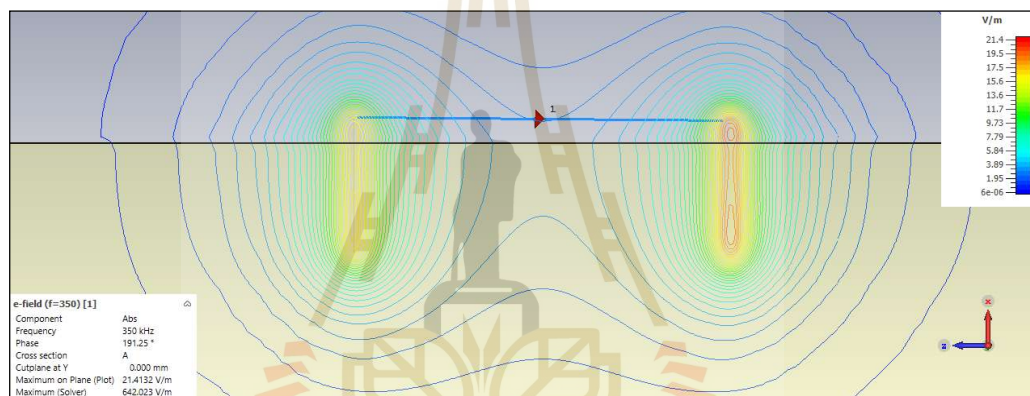
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.21 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $45.98 + jx1.78$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.22 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.21 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon



รูปที่ 3.22 แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon



รูปที่ 3.23 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)

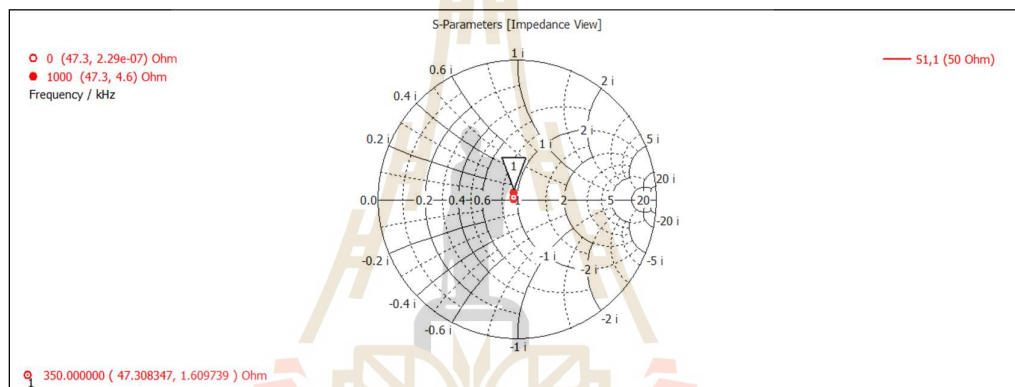
แท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon

(4) แท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog

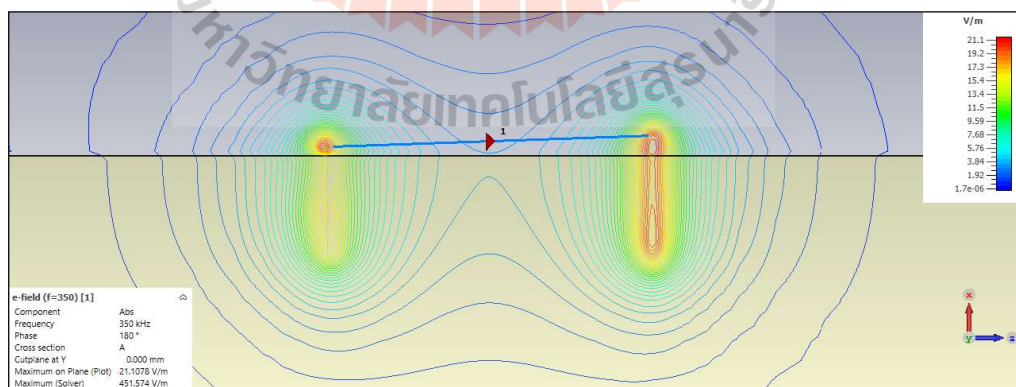
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปที่ 3.24 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ $47.30 + jx1.60$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.25 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม แบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.24 โครงสร้างแท่งอเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog



รูปที่ 3.25 แผนภาพสมิทชาร์ตแท่งอเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog



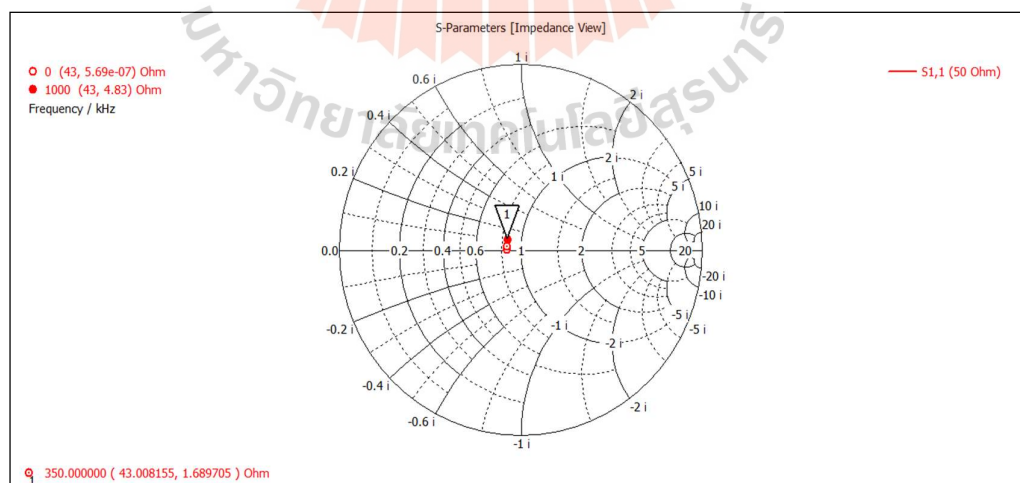
รูปที่ 3.26 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
ของแท่งอเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog

(5) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y

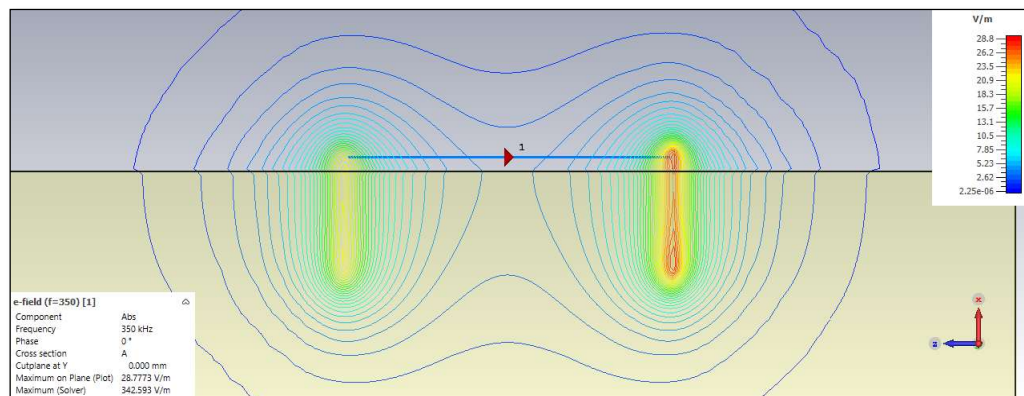
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.27 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $43 + jx1.68$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.28 ซึ่งใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม แบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.27 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y



รูปที่ 3.28 แผนภาพสมิทชาร์ทแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y



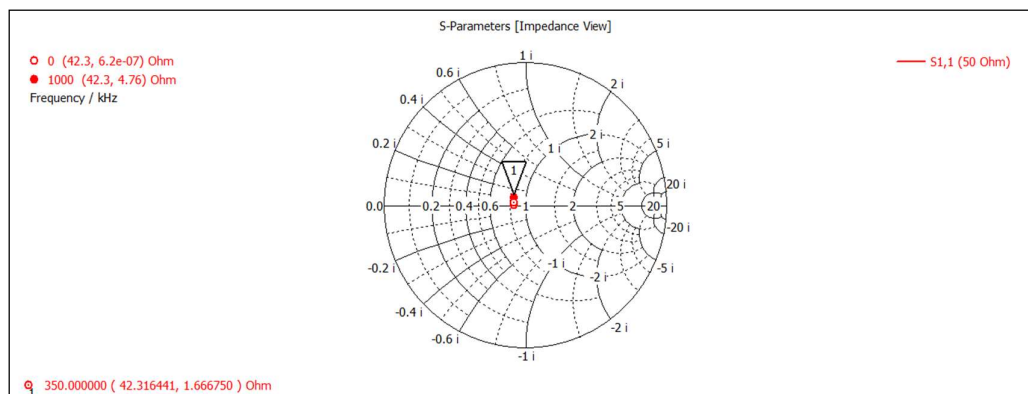
รูปที่ 3.29 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
ของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y

(6) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1

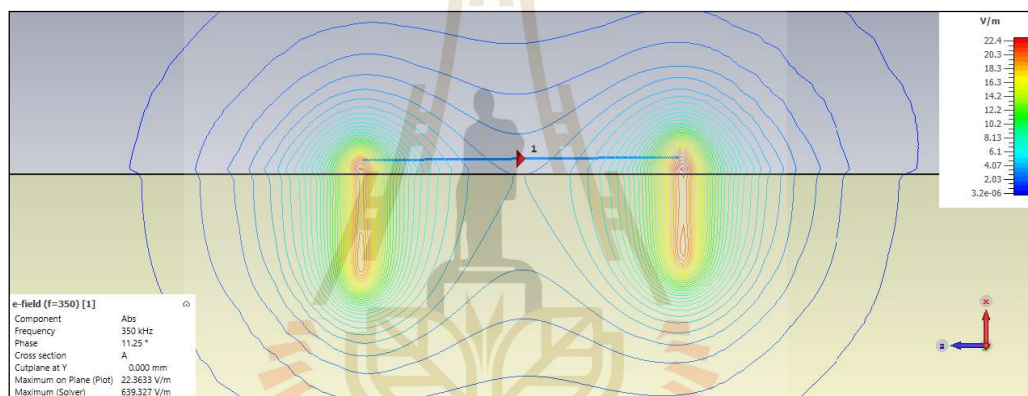
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.30 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $42.31 + jx1.66$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.31 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มและแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.30 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1



รูปที่ 3.31 แผนภาพสมิทชาร์ทของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1



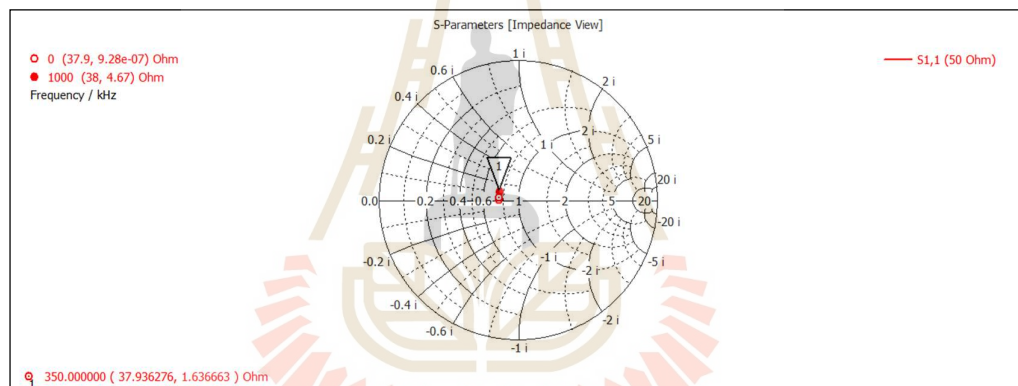
รูปที่ 3.32 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1

(7) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2

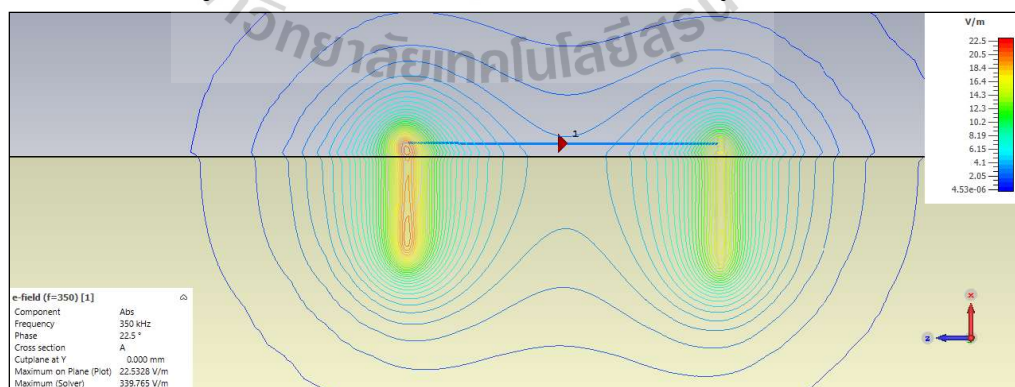
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.33 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $37.93 + jx1.63$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.34 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มและแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.33 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2



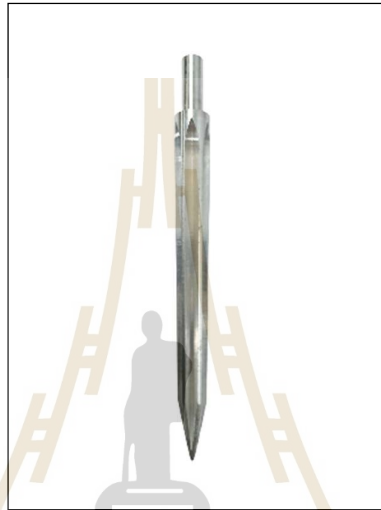
รูปที่ 3.34 แผนภาพสมิทชาร์ทของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2



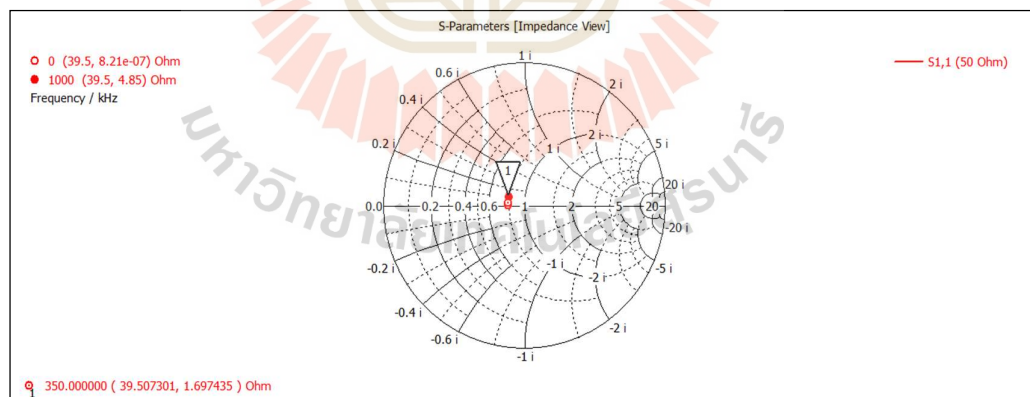
รูปที่ 3.35 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
ของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2

(8) แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3

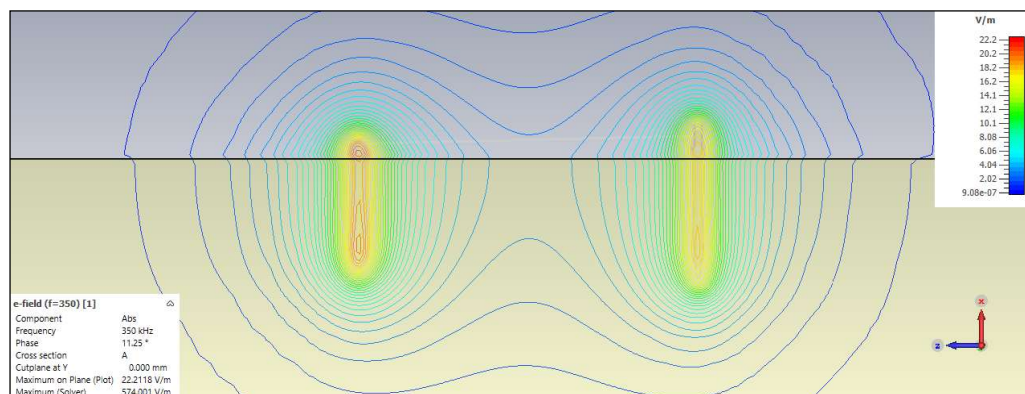
ใช้โปรแกรม CST Studio Suite ออกแบบและจำลองแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.36 ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด เท่ากับ $39.50 + j1.69$ โอห์ม ที่ความถี่ 350 kHz ดังแสดงรูปที่ 3.37 ซึ่งจะใกล้เคียงกับเครื่องรับที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มและแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field) ดังแสดงรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.36 โครงสร้างแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3.37 แผนภาพสมิทชาร์ทของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3.38 รูปแบบการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า (E-field)
 ของแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม
 CST Studio Suite

แท่งอิเล็กโทรด	R / Ω	jx / Ω
ตัวเก็บประจุ วงจรเปิด	43.39	1.66
ตัวเก็บประจุ วงจรปิด	49.81	1.82
รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon	45.98	1.78
รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog	47.30	1.60
รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y	43	1.68
รูปแบบที่ 1	42.31	1.66
รูปแบบที่ 2	37.93	1.63
รูปแบบที่ 3	39.50	1.69

จากตารางที่ 3.9 พบว่า อิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด ตามที่ศึกษาจากหลักการ
 ตัวเก็บประจุที่ตั้งสมมติฐานการสะสมประจุไฟฟ้าที่ปลายอิเล็กโทรด โดยใช้สารชนิดแบเรียมไททาเนต
 ใส่ไปในแท่งอิเล็กโทรดเพื่อเพิ่มการเก็บประจุได้อย่างเต็มที่ จากนั้นจึงปล่อยกระแสจากขั้วลบไปยัง
 ขั้วบวกพบว่า มีค่าความต้านทานต่ำ เท่ากับ $43.39 + jx1.66$ โอห์ม ในขณะที่อิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บ
 ประจุ วงจรปิด มีค่าความต้านทานมากกว่า เท่ากับ $49.81 + jx1.82$ โอห์ม และเมื่อพิจารณาค่าความ
 ต้านทานพบว่าอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด มีค่าความต้านทานดีกว่า ทำให้สมมติฐาน
 การใช้สารแบเรียมไททาเนตส่งผลให้ค่าความต้านทานลดลง ผู้วิจัยได้นำหลักการการเพิ่มหน้าสัมผัส

เพื่อลดค่าความต้านทานจึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon และรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองรูปแบบนี้มีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ มีสองหน้าสัมผัส แต่มีความแตกต่างที่วัสดุและความยาวของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ โดยอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon พบว่ามีค่าความต้านทาน เท่ากับ $45.98 + jx1.78$ โอห์ม ในขณะที่อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $47.30 + jx1.60$ โอห์ม สมมติฐานค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ต่ำกว่าอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon มีความยาวที่มากกว่าจึงมีพื้นที่สัมผัสมากกว่า ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มหน้าสัมผัสและออกแบบอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y พบว่ามีค่าความต้านทาน เท่ากับ $43 + jx1.68$ โอห์ม ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการเพิ่มหน้าสัมผัส ทำให้ค่าความต้านทานลดลงเมื่อเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon และอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมข้อมูลและนำมาพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 1 พบว่า ค่าความต้านทานเท่ากับ $42.31 + jx1.66$ โอห์ม ในขณะที่อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 มีค่าความต้านทานเท่ากับ $37.93 + jx1.63$ โอห์มและอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 ค่าความต้านทานเท่ากับ $39.50 + jx1.69$ โอห์ม ตามลำดับ ดังนั้นตามวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยเพื่อต้องการศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ เพื่อนำไปใช้งานจริงในการสื่อสารรูปแบบ TTE จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบทั้งหมด 8 รูปแบบ ผ่านโปรแกรม CST Studio Suite พบว่าแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด เท่ากับ $37.93 + jx1.63$ โอห์ม

3.5 สรุป

ตามเนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้ได้อธิบายถึงการศึกษาการออกแบบและคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อความต้านทาน โดยได้นำเสนอการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ตัวเก็บประจุ วงจรเปิด ตัวเก็บประจุ วงจรปิด รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y ซึ่งถือเป็นอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบที่นำไปสู่การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยใช้โปรแกรมการออกแบบ SOLIDWORKS จากนั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบทั้ง 8 รูปแบบ ไปทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรม CST Studio Suite ในบทต่อไปจะเป็นการนำเสนอการทดลองประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่จริงและการนำเสนอผลการทดลองการนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบและมีประสิทธิภาพดีที่สุดในงานจริงในการสื่อสารบนพื้นดินและภายในถ้าตามรูปแบบการสื่อสารแบบ TTE

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในการศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 8 รูปแบบ ผ่านการทดลองบนพื้นดินจริง โดยมีหลักการว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความต้านทานต่ำ และมีค่านำของกระแสไฟฟ้าสูงสามารถใช้งานได้ดี รวมถึงการนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการทดลองและมีค่าความต้านทานต่ำที่สุดไปใช้ในการทดลองประสิทธิภาพการรับสัญญาณผ่านรูปแบบ TTE ระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำในสถานที่จริง เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาและออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

4.2 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์

4.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์

4.2.1.1 เครื่องมือวัดแอลซีอาร์มิเตอร์ (LCR Meter)



รูปที่ 4.1 LCR Meter รุ่น BK Precision 894

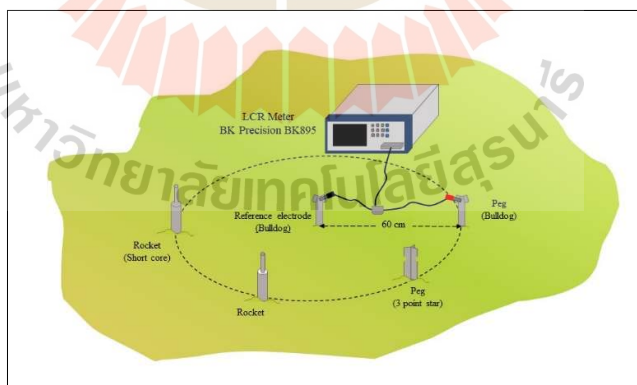
BK Precision 894 เป็นเครื่องวัด LCR ที่มีความแม่นยำสูง สามารถวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุและค่าความต้านทานไฟฟ้า ของอุปกรณ์และวัสดุ โดยสามารถวัดความถี่ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 500 kHz งานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้งานเครื่องมือวัดนี้มาใช้ในการทดลอง ซึ่งจะแสดงรูปอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1 และแสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องมือวัด LCR รุ่น BK Precision 894 ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องมือวัด LCR รุ่น BK Precision 895

คุณลักษณะ	ขนาดหรือค่า
ช่วงความถี่ทดสอบ	20 Hz – 500 kHz
ค่าอิมพีแดนซ์	50 Ω
คุณสมบัติการวัด	L, C, R
แหล่งจ่ายไฟ	110/220 VAC
น้ำหนัก	5kg

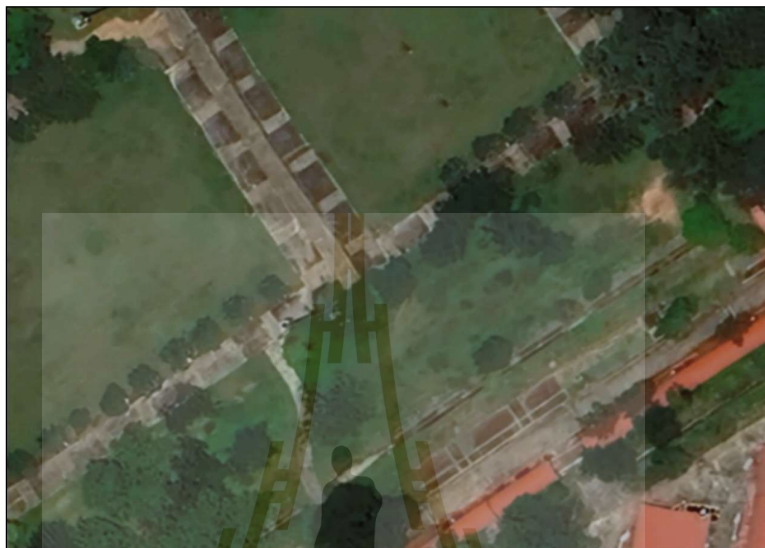
4.2.2 ขั้นตอนการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละรูปแบบที่ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบเพื่อวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละรูปแบบโดยใช้เครื่อง LCR Meter เป็นเครื่องมือในการวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเปรียบเทียบกันทั้งหมดจำนวน 8 รูปแบบ ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ดินแห่งที่เป็นที่โล่งแจ้ง จากนั้นดำเนินการทดลองโดยปักอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon เป็นอิเล็กทรอนิกส์หลัก แล้วนำอิเล็กทรอนิกส์ อีก 7 รูปแบบปักลงพื้นดินวนไปจนครบทุกรูปแบบ โดยมีระยะห่างจากแท่งอิเล็กทรอนิกส์หลักประมาณ 60 ซม. ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองแต่ละขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงภาพการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 8 รูปแบบ

- (1) กำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง โดยต้องมีพื้นที่เปิดโล่ง เพื่อต้องการลดปัจจัยต่างๆ เช่น ปัจจัยภูมิประเทศ ปัจจัยจากการสะท้อนของสัญญาณ ดังนั้นบริเวณที่เลือกใช้คือ สนามหญ้าภายในมหาวิทยาลัย ที่มีความเหมาะสมตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายดาวเทียมพื้นที่การทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์

- (2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 8 รูปแบบ ได้แก่
- 1) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด 2) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด 3) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon 4) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog 5) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y 6) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 1 7) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 และ 8) อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 โดยใช้เครื่องวัดค่าความต้านทาน (LCR Meter)



รูปที่ 4.4 เครื่องมือ รุ่น BK Precision 894 ที่ใช้ในการทดลองวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์

(3) ดำเนินการทดลองโดยปักอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง# 1 ยี่ห้อ Decathlon เป็นอิเล็กโทรดหลัก จากนั้นนำอิเล็กโทรดอีก 7 รูปแบบปักลงพื้นดินจนไปจนครบทุกรูปแบบ โดยมีระยะห่างจากอิเล็กโทรดหลักประมาณ 60 ซม. และนำเครื่องวัดค่าความต้านทาน (LCR Meter) มาวัดค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดแต่ละรูปแบบจนครบทั้ง 8 รูปแบบ



รูปที่ 4.5 แสดงการทดลองวัดค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด

4.2.3 ผลการทดลองค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองค่าความต้านทาน ค่าความเหนียวและค่าความนำไฟฟ้า

แท่งอิเล็กโทรด	R/Ω	jx/Ω	S/mS
ตัวเก็บประจุ วงจรเปิด	1940	-3970	0.0991
ตัวเก็บประจุ วงจรปิด	81.18	-4.069	12.28
รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon	82.23	-1.5	12.159
รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog	87.27	-6.81	11.38
รูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y	77.79	-2.74	12.85
รูปแบบที่ 1	81.59	-2.01	12.239
รูปแบบที่ 2	73.23	-1.25	13.645
รูปแบบที่ 3	71.61	-1.24	13.96

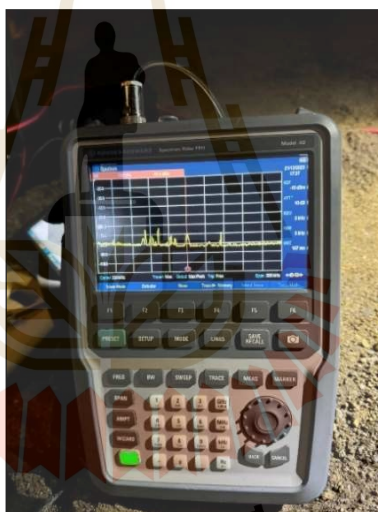
จากตารางที่ 4.2 พบว่า แท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด เมื่อวัดทดสอบค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดด้วยการฝังลงพื้นดินจริง พบว่าค่าความต้านทาน เท่ากับ $1940 - jx3970$ โอห์ม ซึ่งถือว่ามีความต้านทานที่สูงมาก และมีค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.0991 S/mS โดยสาเหตุเกิดจากเมื่อฝังอิเล็กโทรดลงพื้นดินจริง กระแสที่ไหลผ่านแท่งอิเล็กโทรดไปไม่ถึงดินบริเวณพื้นผิวที่อิเล็กโทรดสัมผัสอยู่ ทำให้ค่าความต้านทานสูงไม่เหมาะนำมาใช้ในงานวิจัย ในขณะที่อิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด มีค่าความต้านทานน้อยกว่า เท่ากับ $81.18 - jx4.069$ โอห์ม และค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 12.28 S/mS เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานพบว่าอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิดมีค่าความต้านทานต่ำกว่าแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด ทำให้สมมติฐาน การใช้สารแบเรียมไททาเนตเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานนั้นไม่เป็นจริง จากนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นที่หลักการการเพิ่มหน้าสัมผัสเพื่อลดค่าความต้านทาน จึงได้ทำการทดสอบอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $82.23 - jx1.5$ โอห์ม มีค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 12.159 S/mS อิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $87.27 - jx6.81$ โอห์ม และมีความนำไฟฟ้า เท่ากับ 11.38 S/mS อิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#3 รูปแบบ Y มีค่าความต้านทานเท่ากับ $77.79 - jx2.74$ โอห์ม มีค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 12.85 S/mS อิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $81.59 - jx2.01$ โอห์ม มีค่าความนำไฟฟ้า เท่ากับ 12.239 S/mS อิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $73.23 - jx1.15$ โอห์ม และมีความนำไฟฟ้า เท่ากับ 13.645 S/mS และอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 มีค่าความต้านทาน เท่ากับ $71.61 - jx1.24$ โอห์ม และมีความนำไฟฟ้า เท่ากับ 13.96 S/mS ตามลำดับ จากผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยวิธีการปักลงพื้นดินสามารถสรุปได้ว่า อิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรเปิด และแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบตัวเก็บประจุ วงจรปิด ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเพราะมีค่าความต้านทานสูง และจากการทดสอบค่าความต้านทานของโปรแกรม CST Studio Suite ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มหน้าสัมผัสส่งผลให้ค่าความต้านทานลดน้อยลง เมื่อนำมาสู่การทดลองหาประสิทธิภาพค่าความต้านทานจากพื้นดินจริง ดังนั้นอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 3 จึงเป็นอิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองการสื่อสารรูปแบบ TTE ระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดในระบบการสื่อสารรูปแบบ TTE

4.3 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่จริง

เนื่องจากระบบการสื่อสารไร้สายรูปแบบ TTE เป็นรูปแบบการสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำ ผู้วิจัยจึงได้นำอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการทดลองและพบว่ามีประสิทธิภาพในการนำมาใช้งานจริง ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 3 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและเปรียบเทียบค่าการรับสัญญาณกับอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ซึ่งเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในพื้นที่จริง โดยสถานที่ที่ผู้วิจัยเลือกใช้เป็นสถานที่ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ ถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย และถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก

4.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์

4.3.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความแรงของสัญญาณ (Spectrum Analyzer)



รูปที่ 4.6 เครื่องมือวัด Rohde & Schwarz Spectrum Rider FPN

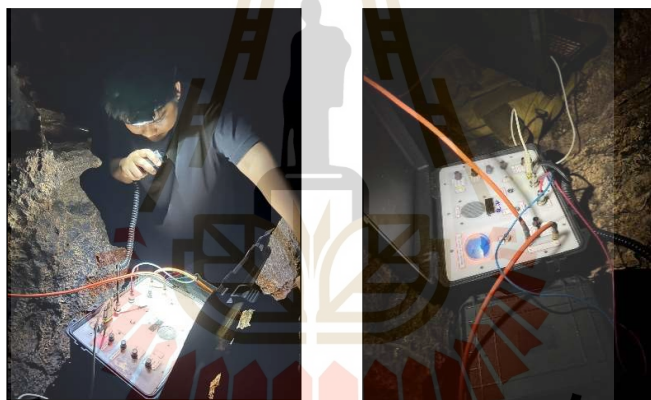
อุปกรณ์ที่นำมาใช้วิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ ทางผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือ Rohde & Schwarz Spectrum Rider FPN เป็นรุ่นที่ทางผู้วิจัยสามารถพกพาไปใช้งานในถ้ำได้ เนื่องจากในถ้ำมีพื้นที่การทำงานที่ค่อนข้างลำบาก เครื่องมือวัดดังรูปที่ 4.6 จึงเหมาะกับการทำงานของงานวิจัยนี้ โดยการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณภายในระบบ TTE ระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำนั้น ผู้วิจัยจำเป็นต้องนำเครื่องมือวัดไปทดสอบค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณภายในถ้ำ ซึ่งทางผู้วิจัยได้แสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องวิเคราะห์ค่าความแรงของสัญญาณ ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลทางเทคนิคเบื้องต้นของเครื่องค่าความแรงของสัญญาณ

ช่วงความถี่ทดสอบ	5 kHz – 2 GHz
ค่าอิมพีแดนซ์	50Ω
ค่าความไวในการรับ	- 120 dBm
แหล่งจ่ายไฟ	4.5 hr.
น้ำหนัก	2.5 kg

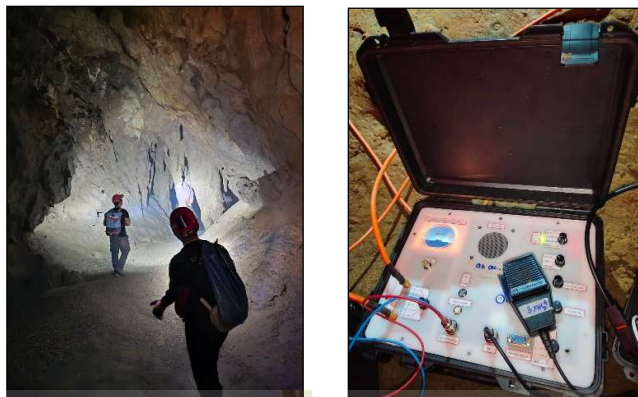
4.3.2 ขั้นตอนการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์

(1) สถานที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก และถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย ดังรูปที่ 4.7



(ก)

การใช้งานแท่งอิเล็กทรอนิกส์ (ก) ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก



(ข)

รูปที่ 4.7 การใช้งานแท่งอิเล็กโทรดจริง (ข) ถ้ำทรายทอง จังหวัดเชียงราย

2) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ (Decathlon) อิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 และอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ดังรูปที่ 4.8 – 4.10



รูปที่ 4.8 รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon

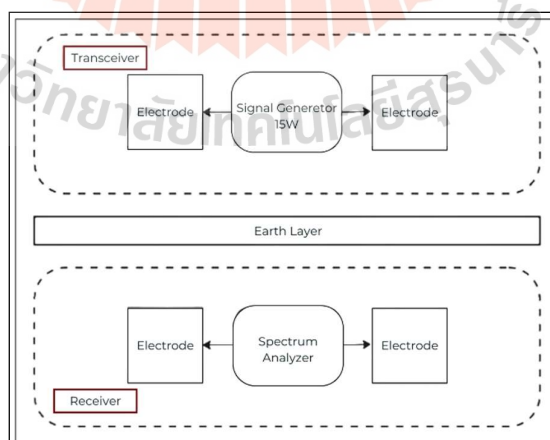


รูปที่ 4.9 รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.10 รูปแท่งอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3

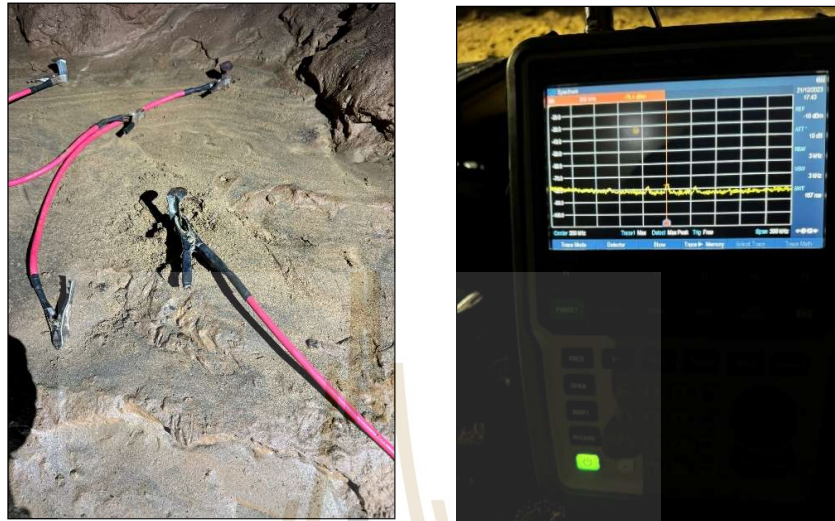
(3) ดำเนินการทดลองโดยร่วมกับทีมผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วางแผนการทำงานเพื่อออกแบบและเตรียมความพร้อมของระบบการทดลองการสื่อสารรูปแบบ TTE โดยใช้อิเล็กโทรดรูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon อิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 และ อิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 โดยการวางโครงสร้างการสื่อสารบนพื้นดินและภายในถ้ำ ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นแบ่งบุคลากรออกเป็นสองทีม โดยผู้วิจัยร่วมกับทีมนักวิจัยสำรวจพื้นที่ภายในถ้ำก่อนการวางระบบการทดลอง การสื่อสารเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณระหว่างพื้นดินสู่ภายในถ้ำ ดังรูปที่ 4.12-4.14 เป็นตัวอย่างรูปที่ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองระบบการทำงาน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ทั้ง 3 รูปแบบ ณ ถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จ.เชียงราย และรูปที่ 4.15-4.17 เป็นตัวอย่างรูปแสดงการดำเนินการทดลองระบบการทำงาน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ทั้ง 3 รูปแบบ ณ ถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก



รูปที่ 4.11 ไดอะแกรมรูปแบบการทดลองหาค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กโทรดผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz

4.3.3 ผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz

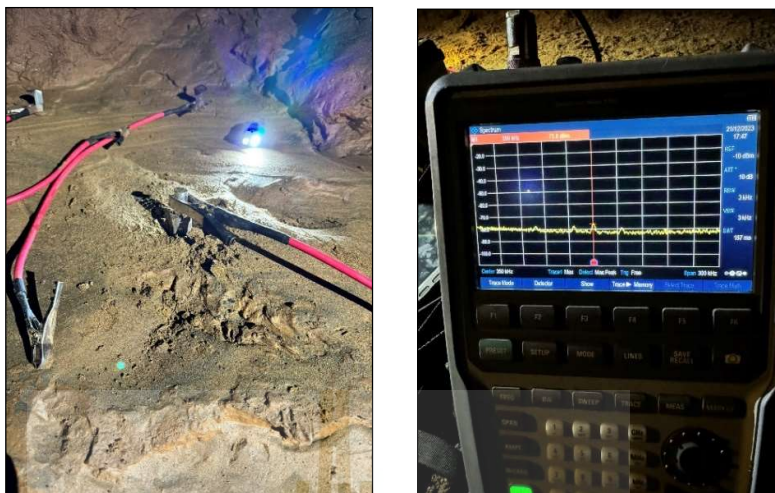
(1) สถานที่: ถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จ.เชียงราย



รูปที่ 4.12 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon



รูปที่ 4.13 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.14 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz

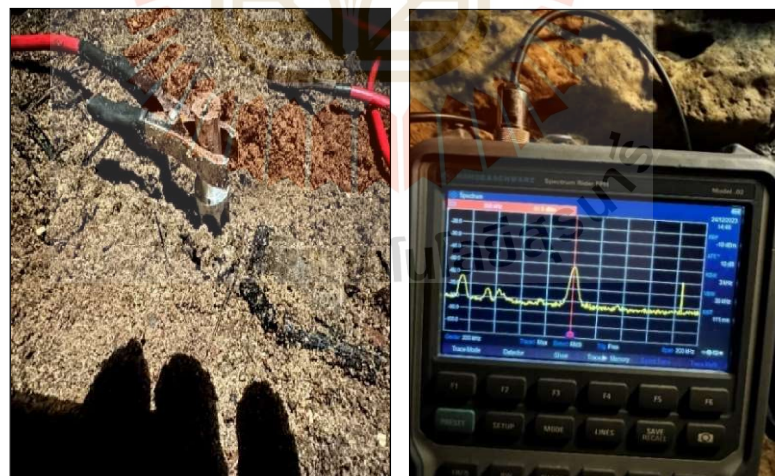
ความถี่ (Frequency) / kHz	อิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon	อิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 2	อิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 3
	Received Signal Power (dBm)	Received Signal Power (dBm)	Received Signal Power (dBm)
350	-76.4	-75.5	-74.7

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณโดยใช้เครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ของภาค TX ที่อยู่ด้านบนหลังคาถ้ำส่งมายังภาค RX ที่อยู่ภายในถ้ำ โดยเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ในแนวเดียวกัน เมื่อนำอิเล็กทรอนิกส์ต่อเข้าเครื่องวิเคราะห์ความแรงสัญญาณ พบว่าค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -76.4 เดซิเบล เมื่อเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นรูปแบบที่ 2 พบว่ามีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -75.5 เดซิเบล ในขณะที่อิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 3 มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -74.7 เดซิเบล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบรูปแบบที่ 3 สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon และอิเล็กทรอนิกส์แบบที่ 2

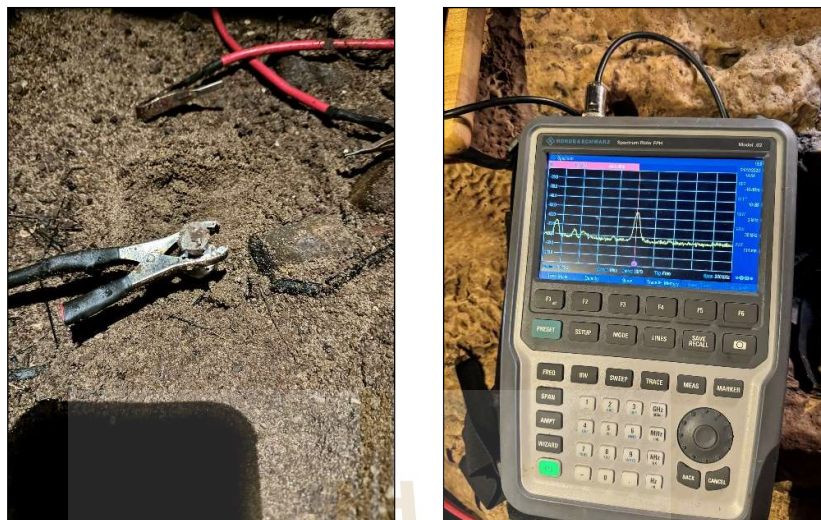
(2) สถานที่: ถ้ำพระวังแดง จ.พิษณุโลก



รูปที่ 4.15 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1
ยี่ห้อ Decathlon



รูปที่ 4.16 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.17 การวัดค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz ของแท่งอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์
ผ่านคลื่นความถี่ 350 kHz

ความถี่ (Frequency) / kHz	อิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
	Received Signal Power (dBm)	Received Signal Power (dBm)	Received Signal Power (dBm)
350	-65	-54	- 51.8

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณโดยใช้เครื่องส่งวิทยุความถี่ 350 kHz ของภาค TX ที่อยู่ด้านบนหลังคาถ้ำส่งมายังภาค RX ที่อยู่ในภายในถ้ำ โดยเครื่องส่งและเครื่องรับอยู่ในแนวเดียวกัน เมื่อนำอิเล็กทรอนิกส์ต่อเข้าเครื่องวิเคราะห์ความแรงสัญญาณ พบว่าค่าประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon มีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -65 เดซิเบล เมื่อเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นรูปแบบที่ 2 พบว่ามีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ -54 เดซิเบล ในขณะที่อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 พบว่ามีค่ากำลังที่รับได้เท่ากับ - 51.8 เดซิเบล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon และอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการทดลองประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบและผ่านการทดสอบประสิทธิภาพจำนวนทั้งสิ้น 8 รูปแบบในพื้นที่ดินจริง และการนำเสนอผลการทดลองการนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการออกแบบและมีประสิทธิภาพดีที่สุด กล่าวคืออิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 และอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบ 3 ไปใช้งานจริงในการสื่อสารบนพื้นดินและภายในถ้ำตามรูปแบบเทคโนโลยีการสื่อสาร TTE โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ที่ใช้งานจริง โดยหลังจากการทดลองบริเวณถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก และถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย พบว่า อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 และอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบและทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก และเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในอนาคต จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยจึงได้มีการศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของระบบการสื่อสารไร้สายรูปแบบ TTE ที่ถือได้ว่าเป็นระบบการสื่อสารที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอรูปแบบการสื่อสารไร้สายรูปแบบ TTE ซึ่งนักวิจัยได้มีการศึกษาและทดลองประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก การทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะและปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานและประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณผ่านแท่งอิเล็กทรอนิกส์โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ (1) หน้าสัมผัสของอิเล็กทรอนิกส์ส่งผลต่อค่าความต้านทาน (2) พื้นที่การปักแท่งอิเล็กทรอนิกส์ส่งผลต่อค่าความต้านทาน และ (3) วัสดุที่นำมาใช้งานที่มีผลต่อค่าความต้านทาน จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบการรับสัญญาณ ความแตกต่างของพื้นที่ของการปักอิเล็กทรอนิกส์ถ้าใกล้เคียงน้ำ ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพและค่าความต้านทานของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงนำมาสู่การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละประเภท จำนวนทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบอ้างอิง#2 ยี่ห้อ Bulldog และอิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง#3 รูปแบบ Y ซึ่งถือเป็นอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบที่มีการใช้งานจริง และกรอบแนวคิดในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆเพื่อหาประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง โดยการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นจากการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS จากนั้นนำไปทดสอบเพื่อวัดค่าความต้านทานผ่านโปรแกรม CST Studio Suite เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละรูปแบบ นอกจากนี้ เมื่อได้ผลการทดสอบจากโปรแกรม CST Studio Suite ได้มีการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 8 รูปแบบ ผ่านการทดลองบนพื้นดินใช้เครื่องวัดความต้านทาน (LCR Meter)

โดยมีหลักการว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความต้านทานต่ำ กระแสไฟฟ้าสูงสามารถใช้งานได้ดี จากการทดลองพบว่าอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 ลักษณะที่เป็นหกแฉก เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองการสื่อสารรูปแบบ TTE ระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 กับอิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ซึ่งถือเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ค่าความต้านทานต่ำ และเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานอยู่จริงในระบบการสื่อสารรูปแบบ TTE จึงได้นำไปสู่การทดลองประสิทธิภาพการรับสัญญาณผ่านรูปแบบ TTE ระหว่างพื้นดินและภายในถ้ำในสถานที่จริง โดยสถานที่ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย บริเวณถ้ำพระวังแดง จังหวัดพิษณุโลก และถ้ำทรายทอง ในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวงขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 3 สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 และอิเล็กทรอนิกส์อิเล็กทรอนิกส์แบบอ้างอิง#1 ยี่ห้อ Decathlon ที่มีการใช้งานอยู่จริง จากการทดลองดังกล่าวจึงถือเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากการนำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก ผู้วิจัยหวังว่าแนวคิด วิธีการศึกษา การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆ การทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละรูปแบบ รวมไปถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลจากการนำอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในพื้นที่จริงในระบบการสื่อสารแบบ TTE จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และแนวทางที่ดีแก่ผู้ที่มีความสนใจในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้การสื่อสารไร้สายรูปแบบ TTE มีประสิทธิภาพและบรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์ต่อไป

บรรณานุกรม

- Antonio Muñoz and Arturo Mediano. (2012). Output design considerations in wireless portable through-the-earth communications system using current injection. Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European
- Chris Trayner. (2002). CRO HeyPhone Communication System Technical Reference Manual (Temporary). Issue 3, pp. 1-39, 23 June 2002.
- Ekaterina Korolkova, Danil Kudinov, Konstantin Artemev, Wisam Farjow, and Xavier Fernando. (2018). Technological Advancement for A Novel Through-The-Earth Communication System. 2018 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Canada.
- Josua Peña Carreño, Sávio Oliveira de Almeida Neves, Leonardo Aguayo, and André Noll Barreto. (2016). Through-The-Earth (TTE) Communication for Underground Mines. ResearchGate article, July 2016.
- Lincan Yan, Carl Sunderman, Bruce Whisner, Nicholas Damiano, and Chenming Zhou. (2015). Antenna Arrangement Investigation for Through-the-Earth (TTE) Communications in Coal Mines. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). USA.
- Nicholas Damiano, Lincan Yan, Bruce Whisner, and Chenming Zhou. (2017). Simulation and Measurement of Through-the-earth (TTE), Extremely Low-Frequency Signals using Copper-clad, Steel Ground Rods. National Institute for Occupational Safety and Health Pittsburgh Mining Research Division. USA.
- Reyes Miguel, Chenming Zhou, Lincan Yan, Bruce Whisner, and Nicholas Damiano. (2016) E-Fields of Electrode-Based Through-The-Earth (TTE) Communication. Pittsburgh Mining Research Division. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). USA.

- Vanessa Bataller, Antonio Muñoz, Pilar MolinGaudó, Arturo Mediano, José A. Cuchí, and José L. Villarroel. (2010). Earth Impedance Model for Through-The-Earth Communication Applications with Electrodes. *Radio Science*, vol. 45, 2010.
- Vanessa Bataller, Antonio Muñoz, Pilar MolinGaudó, Arturo Mediano, José A. Cuchí, and José L. Villarroel. (2009). Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications. *Journal of Communications*, vol. 4, no.4, May 2009. Spain.
- Wu Xiao Wu and David V. Thiel. (1989). Electric Field Sensors in Electromagnetic Sounding. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 1, January 1989.



ภาคผนวก ก

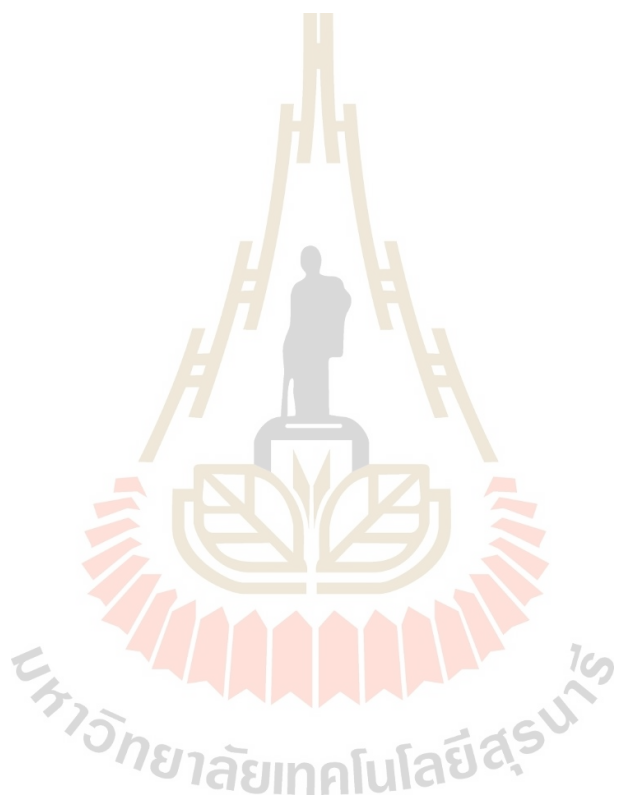
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Chokpiwat Pruekchatsiri, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan

Wongsan. (2023) An Experimental Study of Electrodes for Through-The-Earth
350 kHz MF Communication. 2023 IEEE International Symposium on Antennas
and Propagation (ISAP). Malaysia.



An Experimental Study of Electrodes for Through-The-Earth 350 kHz MF Communication



ABSTRACT

This paper proposes an experimental investigation of electrodes for Medium Frequency (MF) communication Through-The-Earth (TTE) at an operating frequency of 350 kHz. The electrodes are spiked into the ground at the end of each earth-grounded antenna lead. The experiment includes a transmitter system and a receiver system, and the received signal power, conductivity, and impedance are measured using a spectrum analyzer and an LCR meter when the type and number of electrodes are varied. The results show that different electrode types impact conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving greater signal power compared to other electrodes. Moreover, increasing the number of electrodes enhances the system's ability to receive higher signal power due to improved conductivity and lower impedance, bringing it closer to the impedance of the radio transceiver. These are the importance of selecting suitable electrode types and numbers for optimal signal transmission and receiving in TTE communication at 350 kHz.

Keywords : Medium frequency, Electrode, Through-The-Earth.

I. INTRODUCTION

For many years, researchers have studied and developed the Through-The-Earth (TTE) communication technique. Initially, this technique utilized radio signals below the VLF band transmitted by a large antenna on the earth's surface through the earth layer to the underground mine. Two electrodes connected to soil or rock at both the transmitter and receiver were used to discharge an electric current into the earth's surface. However, the electrical field generated from current intensity exponentially attenuates from the earth's surface, and this attenuation increases proportionally to the frequency. Hence, lower frequencies are ideal for TTE communications [1-3]. Nevertheless, frequencies within the range of 20-290 kHz used for cave communications can interfere with the subsistence of bats in the cave and, consequently, harm the cave environment. Therefore, opting for the lowest possible frequency at 350 kHz, the beginning of the MF band, was necessary to avoid this interference.

In TTE communication, the transmitter uses a pair of ground electrodes located at the end of an earth-grounded antenna to inject an AC current into the earth. The electrodes are connected by lines of current that create equipotential surfaces around them. The penetration of the current through the earth depends on the signal frequency and the conductivity of the soil [4]. Metallic rods are commonly used as electrodes for the surface unit, while copper braid immersed in water or buried in the mud is preferred for underground stations.

In this paper, we experiment with the impact of different electrode types and numbers on Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. They measure signal power, conductivity, and impedance and find that high-conductivity and low-impedance electrodes receive the highest signal power. Additionally, increasing the number of electrodes leads to higher signal power and lower impedance. The results show the significance of selecting appropriate electrode types and numbers to ensure efficient signal transmission and reception in TTE communication.

II. EXPERIMENTAL SYSTEM AND RESULTS

At first, the experimental setup for Through-The-Earth communication for measurement of the received signal power includes a transmitter system with an earth-grounded antenna featuring a V-shaped electrode and an SMI100B signal generator, as well as a receiver system with an earth-grounded antenna using a different type of electrodes such as V-shaped, Y-shaped, X-shaped and a Rider FPH spectrum analyzer, as shown in Fig. 1.



Fig. 1. TTE experimental system.

Fig. 2. The experimental area.

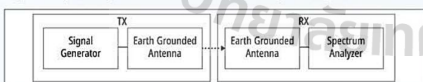


Fig. 3. The block diagram of the TTE experiment.



Fig. 4. The block diagram of the impedance and conductivity experiment.

Fig. 5. The 6 electrodes in star formation.

The experimental setup at the Suranaree University of Technology as shown in Fig. 2-4, involves transmitting waves through the earth from a grounded antenna with V-shaped electrodes at both ends, which is spiked into the earth and operates at a frequency of 350 kHz with a transmit power of 15 dBm. The distance between the transmitter and receiver systems is 30 m [4]. The receiving system includes a grounded antenna with different types of electrodes, including V-shaped, Y-shaped, and X-shaped, which were adjusted to measure the power received by a spectrum analyzer and to measure conductivity and impedance using B&K Precision 894 at 350 kHz. The impedance of the ground electrodes impedance model consists of wire impedance, earth impedance, and contact electrode impedance.

Table I shows that the V-shaped, Y-shaped, and X-shaped electrodes received signal powers of -54.8 dBm, -55.1 dBm, and -54.1 dBm, respectively.

The impedance values for the different electrode shapes were 239.8+j25.8 Ohm, 220.4+j39.4 Ohm, and 195.47+j39.4 Ohm, respectively. The conductivity values for the electrode shapes were 4.11 mS, 4.48 mS, and 4.91 mS, respectively. Therefore, the X-shaped electrode had the highest signal power due to its high conductivity and low impedance.

After that, we measured to investigate the effect of increasing the number of V-shaped electrodes on the received signal power, impedance, and conductivity. The experiment involved varying the number of V-shaped electrodes from 1 to 6 electrodes arranged in a star formation, as shown in Fig. 5.

Table II shows that increasing the number of electrodes led to higher conductivity and lower impedance. Specifically, with six V-shaped electrodes arranged in a star pattern, the received signal power increased by 6.1 dB to -48.7 dBm. Additionally, the impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver.

Table I. The Experimental Results

Type of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
V-shaped	-54.8	239.8+j25.8	4.11
Y-shaped	-55.1	220.4+j39.4	4.48
X-shaped	-54.1	195.47+j39.4	4.91

Table II. The Experimental Results of Increasing the Number of V-Shaped Electrodes

The number of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
1	-54.8	239.8+j25.8	4.11
2	-51.9	121.1+j98	6.7
3	-50.4	92.3+j62.9	7.39
4	-49.4	77.4+j64.8	7.6
5	-49.1	68.4+j65.6	7.61
6	-48.7	61.6+j66.2	7.73

III. CONCLUSIONS

This paper proposes an experimental investigation of electrode configurations for Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. The electrodes are connected to earth-grounded antennas and spiked into the ground. The experiment includes a transmitter and receiver system, with a spectrum analyzer and LCR meter used to measure received signal power, conductivity, and impedance for different electrode types and numbers. From the experimental results, we found that electrode type significantly affects conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving higher signal power than others. Additionally, increasing the number of electrodes improves the system's ability to receive higher signal power by enhancing conductivity and reducing impedance. The impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver. This experimental study is the importance of selecting appropriate electrode configurations for optimal signal transmission and reception in TTE communication at 350 kHz.

REFERENCES

- [1] T. D. Barkand, N. W. Damiano, and W. A. Shumaker, "Through-the-Earth, Two-Way, Mine Emergency, Voice Communication Systems," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006.
- [2] G. David, "Channel characterisation and system design for sub-surface communications," Lulu, com, 2010.
- [3] N. Damiano, L. Yan, B. Whisner, and C. Zhou, "Simulation and measurement of through-the-earth (TTE), extremely low-frequency signals using copper-clad, steel ground rods," 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, USA, 2016.
- [4] V. Estaleir, A. Muñoz, P. Molina, A. Mediano, J.A. Cuchí, and J.L. Villarro, "Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications," Journal of communications, vol. 4, no. 4, pp. 284-294, 2009.

Chokpiwat Pruekchatsiri*, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsang Wongsan

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*E-mail: tanglisson2013@gmail.com

An Experimental Study of Electrodes for Through-The-Earth 350 kHz MF Communication

Chokpiwat Pruekchatsiri*, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan
School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
*E-mail: tangibson2013@gmail.com

Abstract— This paper proposes an experimental investigation of electrodes for Medium Frequency (MF) communication Through-The-Earth (TTE) at an operating frequency of 350 kHz. The electrodes are spiked into the ground at the end of each earth-grounded antenna lead. The experiment includes a transmitter system and a receiver system, and the received signal power, conductivity, and impedance are measured using a spectrum analyzer and an LCR meter when the type and number of electrodes are varied. The results show that different electrode types impact conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving greater signal power compared to other electrodes. Moreover, increasing the number of electrodes enhances the system's ability to receive higher signal power due to improved conductivity and lower impedance, bringing it closer to the impedance of the radio transceiver. These are the importance of selecting suitable electrode types and numbers for optimal signal transmission and receiving in TTE communication at 350 kHz.

Keywords—Medium frequency, Electrode, Through-The-Earth.

I. INTRODUCTION

For many years, researchers have studied and developed the Through-The-Earth (TTE) communication technique. Initially, this technique utilized radio signals below the VLF band transmitted by a large antenna on the earth's surface through the earth layer to the underground mine. Two electrodes connected to soil or rock at both the transmitter and receiver were used to discharge an electric current into the earth's surface, and this attenuation increases proportionally to the frequency. Hence, lower frequencies are ideal for TTE communications [1-3]. Nevertheless, frequencies within the range of 20-290 kHz used for cave communications can interfere with the subsistence of bats in the cave and, consequently, harm the cave environment. Therefore, opting for the lowest possible frequency at 350 kHz, the beginning of the MF band, was necessary to avoid this interference.

In TTE communication, the transmitter uses a pair of ground electrodes located at the end of an earth-grounded antenna to inject an AC current into the earth. The electrodes are connected by lines of current that create equipotential surfaces around them. The penetration of the current through the earth depends on the signal frequency and the conductivity of the soil [4]. Metallic rods are commonly used as electrodes for the surface unit, while copper braid immersed in water or buried in the mud is preferred for underground stations.

In this paper, we experiment with the impact of different electrode types and numbers on Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. They measure signal power, conductivity, and impedance and find

that high-conductivity and low-impedance electrodes receive the highest signal power. Additionally, increasing the number of electrodes leads to higher signal power and lower impedance. The results show the significance of selecting appropriate electrode types and numbers to ensure efficient signal transmission and reception in TTE communication.

II. EXPERIMENTAL SYSTEM AND RESULTS

At first, the experimental setup for Through-The-Earth communication for measurement of the received signal power includes a transmitter system with an earth-grounded antenna featuring a V-shaped electrode and an SMB100B signal generator, as well as a receiver system with an earth-grounded antenna using a different type of electrodes such as V-shaped, Y-shaped, X-shaped, Tray-shaped and a Rider FPH spectrum analyzer, as shown in Fig. 1.

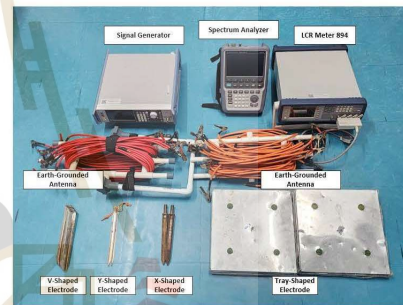


Fig. 1. TTE experimental system.



Fig. 2. The experimental area.

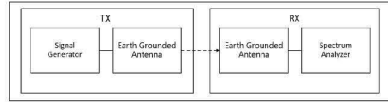


Fig. 3. The block diagram of the TTE experiment



Fig. 4. The block diagram of the impedance and conductivity experiment

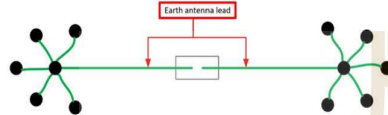


Fig. 5. The 6 electrodes in star formation.

The experimental setup at the Suranaree University of Technology as shown in Fig. 2-4, involves transmitting waves through the earth from a grounded antenna with V-shaped electrodes at both ends, which is spiked into the earth and operates at a frequency of 350 kHz with a transmit power of 15 dBm. The distance between the transmitter and receiver systems is 30 m. The receiving system includes a grounded antenna with different types of electrodes, including V-shaped, Y-shaped, X-shaped, and Tray-shaped, which were adjusted to measure the power received by a spectrum analyzer and to measure conductivity and impedance using B&K Precision 894 at 350 kHz.

Table I shows that the V-shaped, Y-shaped, X-shaped, and Tray-shaped electrodes received signal powers of -54.8 dBm, -55.1 dBm, -54.1 dBm, and -69.3 dBm, respectively.

The impedance values for the different electrode shapes were $239.8+j25.8$ Ohm, $220.4+j39.4$ Ohm, $195.47+j39.4$ Ohm, and $241.1+j1000$ Ohm, respectively. The conductivity values for the electrode shapes were 4.11 mS, 4.48 mS, 4.91 mS, and 0.261 mS, respectively. Therefore, the X-shaped electrode had the highest signal power due to its high conductivity and low impedance.

After that, we measured to investigate the effect of increasing the number of V-shaped electrodes on the received signal power, impedance, and conductivity. The experiment involved varying the number of V-shaped electrodes from 1 to 6 electrodes arranged in a star formation, as shown in Fig. 5.

Table II shows that increasing the number of electrodes led to higher conductivity and lower impedance. Specifically, with six V-shaped electrodes arranged in a star pattern, the received signal power increased by 6.1 dB to -48.7 dBm. Additionally, the impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver.

TABLE I. THE EXPERIMENTAL RESULTS

Type of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
V-shaped	-54.8	$239.8+j25.8$	4.11
Y-shaped	-55.1	$220.4+j39.4$	4.48
X-shaped	-54.1	$195.47+j39.4$	4.91
Tray-shaped	-69.3	$241.1+j1000$	0.261

TABLE II. THE EXPERIMENTAL RESULTS OF INCREASING THE NUMBER OF V-SHAPED ELECTRODES

The number of Electrodes	Received Signal Power (dBm)	Impedance (Ohm)	Conductivity (mS)
1	-54.8	$239.8+j25.8$	4.11
2	-51.9	$121.1+j58$	6.7
3	-50.4	$92.3+j62.9$	7.39
4	-49.4	$77.4+j64.8$	7.6
5	-49.1	$68.4+j65.6$	7.61
6	-48.7	$61.6+j66.2$	7.73

III. CONCLUSIONS

This paper proposes an experimental investigation of electrode configurations for Medium Frequency communication Through-The-Earth at 350 kHz. The electrodes are connected to earth-grounded antennas and spiked into the ground. The experiment includes a transmitter and receiver system, with a spectrum analyzer and LCR meter used to measure received signal power, conductivity, and impedance for different electrode types and numbers. From the experimental results, we found that electrode type significantly affects conductance and impedance, with higher conductivity and lower impedance electrodes receiving higher signal power than others. Additionally, increasing the number of electrodes improves the system's ability to receive higher signal power by enhancing conductivity and reducing impedance. The impedance value of the 6 electrodes is close to that of the radio transceiver, which is 50 Ohm. Therefore, no matching circuit is required before connecting to the radio transceiver. This experimental study is the importance of selecting appropriate electrode configurations for optimal signal transmission and reception in TTE communication at 350 kHz.

REFERENCES

- [1] T. D. Barkand, N. W. Damiano, and W. A. Shumaker, "Through-the-Earth, Two-Way, Mine Emergency, Voice Communication Systems," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006.
- [2] G. David, "Channel characterisation and system design for sub-surface communications," Lulu, com, 2010.
- [3] N. Damiano, L. Yan, B. Whisner, and C. Zhou, "Simulation and measurement of through-the-earth (TTE), extremely low-frequency signals using copper-clad, steel ground rods," 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, USA, 2016.
- [4] V. Bataller, A. Muñoz, P. Molina, A. Mediano, J.A. Cuchi, and J.L. Villarce, "Improving Medium Access in Through-The-Earth VLF-LF Communications," Journal of communications, vol. 4, no. 4, pp. 284-294, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นายโชควิวัฒน์ พุกษ์ชาติศิริ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2533 ที่จังหวัดสุโขทัย เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเทศบาลสวรรคโลกประชาสรรค์ จังหวัดสุโขทัย ชั้น ปวช.ปีที่ 1-3 ที่วิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย ชั้น ปวส.ปีที่ 1-2 วิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย ในปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อส.บ) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ด้วยเกรดเฉลี่ย 2.40 ในปีการศึกษา 2565 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ด้วยทุน OROG ของงานวิจัย

