

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อ  
สายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD EFFECT ON THE DIELECTRIC  
LOSS IN 24 KV XLPE UNDERGROUND CABLE JOINTS

ณรงค์ ศรีสง่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อ  
สายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV



ณรงค์ ศรีสง่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV

Analysis of Electric Field Effect on the Dielectric Loss in 24 kV XLPE Underground Cable Joints

ชื่อ - นามสกุล

นายณรงค์ ศรีสง่า

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์รัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, ปร.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนตรี นาวงษ์, วศ.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์, Ph.D.)

วันที่ 4 เดือน เมษายน พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิล  
ใต้ดินชนิด XLPE 24 kV

ชื่อ – นามสกุล นายณรงค์ ศรีสง่า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV โดยวิเคราะห์การเชื่อมต่อกบราวน์แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด ทั้งแบบจุดต่อกบราวน์กลมและแบบจุดต่อกบราวน์เหลี่ยม รวมถึงวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างตัวนำและจุดต่อกบราวน์ เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน

การวิเคราะห์ผลจะใช้การจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบให้มีจุดต่อกบราวน์ที่ขั้วต่อของสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 24 kV แบบต่อกบราวน์ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด ทั้งแบบกบราวน์กลมและแบบกบราวน์เหลี่ยม และออกแบบจำลองความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและกบราวน์ เมื่อฉนวน XLPE มีความหนา 2.75, 5.50 และ 8.25 มม. โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าบริเวณจุดเชื่อมต่อกบราวน์ แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด ไม่ส่งผลกับค่าสนามไฟฟ้า แต่จุดต่อกบราวน์ที่เป็นเหลี่ยมจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดต่อกบราวน์ที่เป็นแบบกลม ส่วนการวิเคราะห์ระยะความหนาระหว่างตัวนำและกบราวน์จะพบว่าเมื่อผลต่อค่าของสนามไฟฟ้าอย่างชัดเจน ดังนั้นจุดต่อที่เหมาะสมคือจุดต่อกบราวน์แบบไม่ให้เกิดจุดแหลมคมที่บริเวณขั้วและการเพิ่มความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและกบราวน์จะส่งผลดีต่อค่าสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด

**คำสำคัญ :** สนามไฟฟ้า, ศักย์ไฟฟ้า, จุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน

Thesis Title            Analysis of Electric Field Effect on the Dielectric Loss in 24 kV XLPE  
                                  Underground Cable Joints

Name - Surname        Mr. Narong Srisa-Nga

Program                 Electrical Engineering

Thesis Advisor         Associate Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing.

Academic Year         2022

## ABSTRACT

This thesis presented an analysis of the electric field effect on the dielectric loss in the 24 kV XLPE underground cable joints. The study included the ground connection with 1-point grounding, 2-point grounding, and 3-point grounding with round ground connectors and rectangular ground connectors. The distances between the conductor and the grounding point were considered to determine the electric field and the electric potential in the underground cable joints.

The finite element simulation program was used to design 24 kV underground cable grounding joints consisted of 1-point grounding, 2-point grounding, and 3-point grounding with the round ground connectors and the rectangular ground connectors. In order to analyze and compare the electric field and the electric potential of each model, the XLPE insulation thicknesses were set at 2.75, 5.5 and 8.25 mm.

The analysis results pointed out that the number of the grounding points of 1-point, 2- points, or 3-points had no effect on the electric field. However, rectangular ground connectors showed the higher electric field strengths than the round ones. Regarding the distance between the conductor and the grounding point, the insulation thicknesses clearly affected the electric field. Therefore, the suitable underground cable joints should be the round ground connectors and the thicker insulation between the conductor and the grounding point could provide the finest electric field.

**Keywords:** electric field, electric potential, underground cable joints

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนทล นาวงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์และเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนพ้องและคณะครู-อาจารย์ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน รวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้อง หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ณรงค์ ศรีสง่า



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	20
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	20
1.2 วัตถุประสงค์.....	20
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย.....	21
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	21
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	21
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.1 บทนำ.....	23
2.2 ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	26
2.3 สายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable).....	26
2.4 โครงสร้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	27
2.5 ฉนวน XLPE.....	29
2.6 Cable Splicing.....	29
2.7 ชนิดของ Splicing .....	30
2.8 การต่อสายและการทำหัวสายเคเบิลใต้ดิน (Splice and Terminator).....	32
2.9 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า.....	34
2.10 อิเล็กโทรตทรวงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	37
2.11 ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential).....	41
2.12 สนามไฟฟ้า (Electric Field).....	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 ขั้นตอนและหลักการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน ( Cable Bonding ).....	46
2.14 โปรแกรม COMSOL Multiphysics.....	55
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	58
3.1 บทนำ.....	58
3.2 ขั้นตอนการดำเนินวิจัย.....	59
3.3 การศึกษาสาเหตุการระเบิดที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง.....	53
3.4 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย.....	75
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการจำลอง.....	76
4.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม.....	77
4.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม .....	85
4.3 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม .....	95
4.4 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมและเหลี่ยม.....	107
4.5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อ กราวนด์ 2 จุดที่ขนาดความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 ม.ม., 5.5 ม.ม. และ 8.25 ม.ม... ..	113
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	128
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	128
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน.....	129
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	129
บรรณานุกรม.....	130
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก .....	133

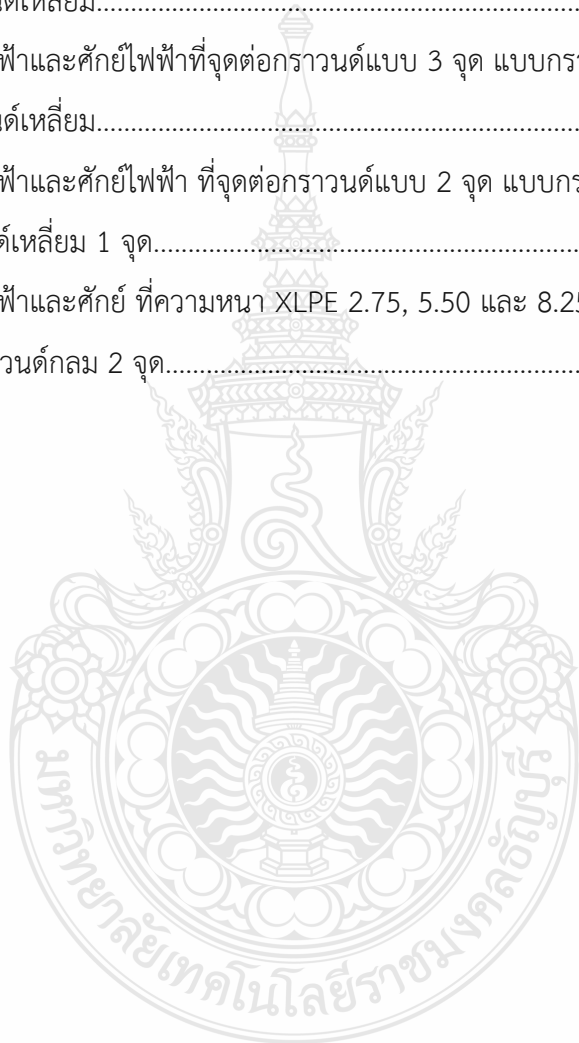


ภาคผนวก ข .....	137
ประวัติผู้เขียน.....	167



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม.....	83
ตารางที่ 2 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม.....	93
ตารางที่ 3 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม.....	105
ตารางที่ 4 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด แบบกราวนด์กลม 1 จุด และกราวนด์เหลี่ยม 1 จุด.....	111
ตารางที่ 5 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ ที่ความหนา XLPE 2.75, 5.50 และ 8.25 มม. แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด.....	125



## สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV .....	27
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Slip On Type.....	30
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Cold Shrink Type.....	31
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Heat Shrink Type.....	31
รูปที่ 2.5 แสดง Potential Field และ Electric Flux Lines.....	32
รูปที่ 2.6 แสดงผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนกะทันหัน.....	33
รูปที่ 2.7 แสดงผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบน จะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นที่ปลายสาย Shield...	33
รูปที่ 2.8 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	36
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ.....	37
รูปที่ 2.10 ทรงกระบอกซ้อนกันรวม.....	37
รูปที่ 2.11 รูปเสมือนของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม.....	39
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ .....	42
รูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้ารอบประจุ .....	43
รูปที่ 2.14 ผลของสนามไฟฟ้าไดอิเล็กตริกที่มีประจุไฟฟ้า.....	44
รูปที่ 2.15 ทิศของแรงที่สนามไฟฟ้ากระทำต่อประจุ.....	45
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนที่ 1 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	46
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนที่ 2 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	46
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนที่ 3 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	47
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนที่ 4 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	47
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนที่ 5 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	47
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนที่ 6 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	48
รูปที่ 2.22 ขั้นตอนที่ 7 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	48
รูปที่ 2.23 ขั้นตอนที่ 8 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	48
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนที่ 9 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	49
รูปที่ 2.25 ขั้นตอนที่ 10 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 ชั้นตอนที่ 11 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	49
รูปที่ 2.27 ชั้นตอนที่ 12 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	50
รูปที่ 2.28 ชั้นตอนที่ 13 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	50
รูปที่ 2.29 ชั้นตอนที่ 14 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	50
รูปที่ 2.30 ชั้นตอนที่ 15 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	51
รูปที่ 2.31 ชั้นตอนที่ 16 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	51
รูปที่ 2.32 ชั้นตอนที่ 17 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	51
รูปที่ 2.33 ชั้นตอนที่ 18 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	52
รูปที่ 2.34 ชั้นตอนที่ 19 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	52
รูปที่ 2.35 ชั้นตอนที่ 20 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	52
รูปที่ 2.36 ชั้นตอนที่ 21 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	53
รูปที่ 2.37 ชั้นตอนที่ 22 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	53
รูปที่ 2.38 ชั้นตอนที่ 23 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	53
รูปที่ 2.39 ชั้นตอนที่ 24 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	54
รูปที่ 2.40 ชั้นตอนที่ 25 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	54
รูปที่ 2.41 ชั้นตอนที่ 26 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน .....	54
รูปที่ 2.42 ภาพการจำลองสนามไฟฟ้า.....	55
รูปที่ 2.43 การออกแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Auto cad.....	55
รูปที่ 2.44 วิธีการนำไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม COMSOL Multiphysics.....	56
รูปที่ 2.45 วิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อนำไปวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าและ สนามไฟฟ้า.....	56
รูปที่ 2.46 วิธีการจำลองค่าสนามไฟฟ้า.....	57
รูปที่ 3.1 ชั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	58
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> .....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 เปิด Program Auto CAD.....	60
รูปที่ 3.4 จุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 1 จุด, 2 จุด และ 3 จุด.....	60
รูปที่ 3.5 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม.....	61
รูปที่ 3.6 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม.....	61
รูปที่ 3.7 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม.....	61
รูปที่ 3.8 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม.....	62
รูปที่ 3.9 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม.....	62
รูปที่ 3.10 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม.....	62
รูปที่ 3.11 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE 2.75 mm <sup>2</sup> .....	63
รูปที่ 3.12 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE 5.5 mm <sup>2</sup> .....	63
รูปที่ 3.13 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm <sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE 8.25 mm <sup>2</sup> .....	63
รูปที่ 3.14 เปิดโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5.....	64
รูปที่ 3.15 เลือกจำลอง 2 มิติ.....	64
รูปที่ 3.16 เลือกแบบจำลอง Select Physics คลิก AC/DC.....	64
รูปที่ 3.17 เลือกแบบจำลอง Electric Fields and Currents คลิก Electrostatics .....	65
รูปที่ 3.18 เลือกแบบจำลอง Select Physics คลิก Study.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.19 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics.....	66
รูปที่ 3.20 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics คลิกขวา Geometry → คลิก Import.....	67
รูปที่ 3.21 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics คลิก Browse เลือกไฟล์ที่ได้ทำการจำลองไว้ → คลิก Import.....	67
รูปที่ 3.22 เพิ่มวัสดุของแบบจำลอง → คลิก Add Material.....	68
รูปที่ 3.23 เพิ่มวัสดุ PVC ของแบบจำลอง.....	68
รูปที่ 3.24 เพิ่มวัสดุ XLPE ของแบบจำลอง.....	69
รูปที่ 3.25 เพิ่มวัสดุ Copper ของแบบจำลอง.....	69
รูปที่ 3.26 ตั้งค่าการจำลองสนามไฟฟ้า.....	70
รูปที่ 3.27 เลือกที่ตัวนำและตั้งค่าแรงดัน.....	70
รูปที่ 3.28 ตั้งค่า Ground.....	71
รูปที่ 3.29 การตั้งค่า Rang ของ Ground.....	71
รูปที่ 3.30 ค่าของศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์.....	72
รูปที่ 3.31 ค่าการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์.....	72
รูปที่ 3.32 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์.....	73
รูปที่ 3.33 ค่าของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์.....	73
รูปที่ 3.34 ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์.....	74
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงค่าการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์แบบ 2 จุด กลม.....	74
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงค่าการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์แบบ 2 จุด เหลี่ยม.....	75
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ 0 V.....	77
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ 0 V.....	77
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ 2000 V.....	78
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ 2000 V.....	78
รูปที่ 4.5 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	79
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ 0 V.....	80
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ 0 V.....	80
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ 2000 V.....	81
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ 2000 V.....	81
รูปที่ 4.11 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	82
รูปที่ 4.12 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	82
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V .....	83
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	84
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ 0 V .....	85
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ 0 V.....	85
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ 2000 V.....	86
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ 2000 V.....	86
รูปที่ 4.19 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1.....	87
รูปที่ 4.20 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุด 1.....	87
รูปที่ 4.21 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2.....	88
รูปที่ 4.22 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2.....	88







## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.55 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V.....	107
รูปที่ 4.56 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V.....	107
รูปที่ 4.57 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V.....	108
รูปที่ 4.58 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000V.....	108
รูปที่ 4.59 กราฟผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม.....	109
รูปที่ 4.60 กราฟผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม.....	109
รูปที่ 4.61 กราฟผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์เหลี่ยม.....	110
รูปที่ 4.62 กราฟผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่กราวนด์เหลี่ยม.....	110
รูปที่ 4.63 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	111
รูปที่ 4.64 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V.....	112
รูปที่ 4.65 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 2.75 มม. ....	113
รูปที่ 4.66 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 5.5 มม.....	113

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.67 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 8.25 มม. ....	114
รูปที่ 4.68 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 2.75 มม.....	114
รูปที่ 4.69 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 5.5 มม.....	115
รูปที่ 4.70 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 8.25 มม.....	115
รูปที่ 4.71 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 2.75 มม.....	116
รูปที่ 4.72 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 5.5 มม.....	116
รูปที่ 4.73 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 8.25 มม.....	117
รูปที่ 4.74 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 2.75 มม.....	117
รูปที่ 4.75 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 5.5 มม.....	118
รูปที่ 4.76 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 8.25 มม.....	118
รูปที่ 4.77 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม. ....	113
รูปที่ 4.78 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.....	119

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.79 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.....	120
รูปที่ 4.80 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.....	120
รูปที่ 4.81 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม. ....	121
รูปที่ 4.82 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.....	121
รูปที่ 4.83 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.....	122
รูปที่ 4.84 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.....	122
รูปที่ 4.85 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม. ....	123
รูปที่ 4.86 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.....	123
รูปที่ 4.87 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม. ....	124
รูปที่ 4.88 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V	
จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.....	124
รูปที่ 4.89 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่ความหนาของ XLPE แตกต่างกัน.....	126
รูปที่ 4.90 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความหนาของ XLPE แตกต่างกัน...	126

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีการพัฒนาและการลงทุนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมาทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชนโดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรม ด้านคมนาคมขนส่งต่างๆรวมทั้งธุรกิจด้านการโรงแรมและการท่องเที่ยวเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วมากและที่สำคัญคือการขยายตัวของชุมชนเมืองต่างๆทำให้เกิดความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากในการขับเคลื่อนระบบต่างๆในประเทศไทย จึงจำเป็นต้องขยายระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานและมีประสิทธิภาพเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงคือปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีทั้งระบบสายส่งทางอากาศ (Overhead Line System) และสายส่งใต้ดิน(Underground Cable System)

จากการศึกษาวิจัยบริเวณจุดต่อสายเคเบิลที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้พบว่าตรงบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลที่เกิดฉนวนชำรุดฉีกขาดหรือบริเวณที่มีการตัดสายเคเบิลมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงสุด ณ จุดนั้นๆ และจะส่งผลให้ฉนวนบริเวณจุดดังกล่าวเกิดการชำรุดเสียหาย และเกิดการลัดวงจรขึ้น ส่งผลให้เกิดการระเบิดที่จุดขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาวิธีการลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลใต้ดิน โดยเน้นไปที่จุดต่อลงกราวนด์แบบ 1 จุดต่อและ 2 จุดต่อ รวมถึงค่าความหนาของฉนวนโดยศึกษาระยะห่างระหว่างตัวนำและจุดต่อลงกราวนด์ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 กิโลโวลต์ที่ถูกต้อง เพื่อนำไปใช้ในการติดตั้งจริง และลดความเสียหายจากการลัดวงจรในระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV แบบต่อกราวนด์ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด

1.2.2 ศึกษาระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวนด์และเปรียบเทียบค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน

1.2.3 เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการกำหนดขั้นตอนและวิธีการควบคุมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ณ บริเวณขั้วต่อกราวนด์อย่างเหมาะสม

### 1.3 สมมุติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อของสายเคเบิลใต้ดินโดยหาวิธีลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณดังกล่าวของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV เพื่อยืดอายุการใช้งานของฉนวนให้สามารถใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้นและเป็นข้อมูลในการลดการเกิดเบรคดาวน์ในระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินในอนาคต

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลโครงสร้างและรูปแบบการต่อสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูงพิกัด 24 kV

1.4.2 ออกแบบโมเดลในการจำลองรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อของสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน

1.4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบของการต่อสายกราวด์และผลของระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์เพื่อเป็นแนวทางในการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อกราวด์ของระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน

### 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าทางด้านทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

1.5.3 ออกแบบและจำลองผลของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

1.5.4 วิเคราะห์ผลการจำลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี

1.5.5 สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง

1.5.6 จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เรียนรู้โครงสร้างและรูปแบบการต่อสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน พิกัด 24 kV

1.6.2 สามารถนำค่าของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ได้ไปวิเคราะห์และเป็นข้อมูลในการออกแบบขั้วต่อของระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน พิกัด 24 kV ได้

1.6.3 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจศึกษาวิจัยเรื่องค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่บริเวณขั้วต่อกราวด์ของระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน พิกัด 24 kV

1.6.4 สามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงในการพิจารณารูปแบบการต่อสายเคเบิลใต้ดินในระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินในอนาคต



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าจนทำให้เกิดการลัดวงจรที่บริเวณจุดต่อของระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีทฤษฎีและวรรณกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

Supawud Nedphokaew (2019)[1]และคณะได้วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของแรงดัน 24 kV พร้อมใช้โปรแกรมวิเคราะห์ Partial Discharge งานวิจัยนี้แสดงการเปรียบเทียบการปล่อยประจุบางส่วน PD ในสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน XLPE ระหว่างสายเคเบิลที่ใช้กับสายเคเบิลใหม่ และวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 5.3 สรุปได้ว่า สายไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากกว่าสายไฟฟ้าใหม่ การเกิด Discharge ของสายไฟฟ้าที่ใช้มีค่ามากกว่าสายไฟฟ้าใหม่ เนื่องจากการลอกชั้นเซมิคอนดักเตอร์อาจทำให้บางส่วน Discharge และนำไปสู่การ เบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์

M. Kumar (2017)[2] ได้นำเสนอการใช้วิธีเชิงตัวเลข Finite Element (FEM) เป็นวิธีการที่ได้รับการกล่าวถึงและใช้ค้นหาความเครียดของสนามไฟฟ้า 2 มิติและพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่า การกระจายแรงดัน, สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าแรงสูงของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้วัสดุฉนวนที่แตกต่างกัน อย่างแรกคือ Cross Linked Polyethylene (XLPE) และสองคือ Ethylene Propylene (EPR) ด้วยวิธีของ Finite Element (FEM) เป็นที่สังเกตว่าสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ฉนวนชนิด XLPE จะดีกว่าเนื่องจากความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าแบบที่ใช้ฉนวนชนิด EPR

I.A. Metwally (2016)[3] วิเคราะห์การออกแบบและพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าและค้นหาคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการยึดอายุการใช้งานของข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน โดยการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าการแสดงให้เห็นจุดเหมาะสมที่สุดในการเลือกคุณสมบัติของวัสดุร่วม ที่สามารถลดผลกระทบของสนามไฟฟ้าผลที่ได้จากงานวิจัยจุดต่อสายใต้ดิน พิกัดแรงดัน 33KV พบว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ จะขึ้นอยู่กับความหนาและส่วนประกอบของฉนวนแต่ละชั้นในจุดต่อสาย ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนเอทิลีนโพรพิลีน ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มความหนาของชั้น XLPE สามารถช่วยลดสนามไฟฟ้าและความหนาของฉนวน



เอทิลีนโพรพิลีน ลดลงซึ่งเป็นแนวทางและวิธีการลดความเครียดของสนามไฟฟ้าในการออกแบบจุดต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน

Chenet *et al.* (2009)[4] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้ารอบบริเวณขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินขณะที่ทำการจ่ายโหลด 110 kV โดยพิจารณาการติดตั้งกรวยลดความเครียดที่ คลอบคลุมด้านนอกของชั้น กิ่งตัวนำ 3 ระยะคือ 50 มิลลิเมตร 46 มิลลิเมตร และ 73 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรวยลดความเครียดที่ครอบคลุมส่วนของชั้น กิ่งตัวนำด้านนอกมากกว่า 60 มิลลิเมตร ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่บิดเบี้ยว และมีความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงมากเป็นอันตรายต่อฉนวน จากนั้น ทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน พบว่าการรวยลดความเครียดชนิดที่สามมีค่าดิสชาร์จบางส่วนสูงมาก

Cârstea (2007)[5] ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์ต่างๆทั้ง ในทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ ของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ติดตั้ง อยู่ในหลอดควบคุม โดยศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพค่าความสามารถในการเก็บประจุ (Permitivity) ของวัสดุ

Gang *et al.* (2006)[6] ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน และเสนอให้เห็นถึงจุดอ่อนในการออกแบบกรวยลดความเครียด เช่น การเชื่อมต่อกันระหว่างกรวยลดความเครียดกับสายเคเบิล ความผิดปกติของขั้วต่อสายเคเบิลอันเนื่องมาจากมีแรงภายนอกมากกระทำ ฯลฯ

C. Stancu *et al.*(2006)[7]ได้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนโพลีเอทิลีนของสายไฟแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง ซึ่งถูกคำนวณในกรณีที่ไม่มีและในที่มีของ WaterTrees การคำนวณจะคำนึงถึงตัวแปรหลักจากการเปิดเครื่องใช้งานและค่าแรงดันสูงสุดใน 1 ชั่วโมงผลที่ได้จากงานวิจัย พบว่าการกระจายสนามไฟฟ้าไปตามทิศทางของ Water Trees มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนั้นค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าคือค่าที่เกิดจากการเปิดสวิตช์แรงดันไฟฟ้าและค่อยๆลดลงตามเวลา อย่างไรก็ตามการลดลงไม่เกิน 10% หลังจากเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง และพบว่ามี การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นประจุพื้นที่และชั้นประจุ (เนื่องจากสิ่งสกปรกจากน้ำ) นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าทั้งในบริเวณใกล้เคียงด้านในชั้น semicon และด้านหน้า Water Trees

Strobl *et al.* (2001)[8] ได้อธิบายเกี่ยวกับวิวัฒนาการของการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และความสำคัญของกรวยลดความเครียดที่ใช้ในระดับแรงดันปานกลาง โดยกล่าวถึงการควบคุมความเครียดทางไฟฟ้าว่าเป็นการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในชั้นของฉนวนให้อยู่ใน

ระดับต่ำกว่าระดับที่จะเกิดการเบรคดาวนภายในฉนวนและจะใช้หลักการดังกล่าวนี้มาออกแบบกรวยลดความเครียดโดยใช้วัสดุที่แตกต่างกัน รวมถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้ออกมาเป็นกราฟ

ศุภกร มงคลลักษณ์ 2556[9] การป้องกันการระเบิดของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินขนาด 115 kV โดยการลดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน ศึกษาวิธีการลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลรวมถึงการติดตั้งขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินขนาด 115 kV ที่ถูกต้องเพื่อนำไปใช้ในการติดตั้งจริง และลดความเสียหายจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังจากการทดลองสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อลงจาก 9.27 kV/m ให้เหลือเพียง 3.87 kV/m ซึ่งทำให้ปลอดภัยจากการลัดวงจรไฟฟ้า

ธนากร และคณะ (2551)[10] เสนอการศึกษาการใช้กรวยลดความเครียดเพื่อใช้ทดสอบหาตีสหาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงพิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 มิลลิเมตร 12 เซนติเมตร โดยชูเปอร์ลีนไนลอนกลิ้งขึ้นรูปสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบคาปาซิทีฟสเตรสคอนโทรลบริเวณปลายสายเคเบิลในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาขนาดของกรวยลดความเครียดและการกระจายของสนามไฟฟ้าโดยกรวยลดความเครียดที่ออกแบบสร้างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.86 เซนติเมตรยาว 12 เซนติเมตรซึ่ง มีขนาดที่สั้นกว่าขั้วต่อสายแบบที่ออกแบบโดยมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถึงร้อยละ 40 และไม่ต้องใช้ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากกรวยลดความเครียดจะช่วยลดการหักเหของความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายซึ่งจะช่วยทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวลดลงโดยสามารถลดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายได้ 7.67 kV และสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าตีสหาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ทั้งในห้องทดสอบและในสถานที่ติดตั้งได้ตามมาตรฐาน IEC60502-2 และ IEC 60270 เนื่องจากขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กเคลื่อนย้ายสะดวกมีต้นทุนการสร้างต่ำ

ปฎิภาณ (2551)[11] ได้นำเสนอการออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบกรวยลดความเครียดเพื่อใช้ทดสอบหาตีสหาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัดแรงดัน 24 kV โดยใช้ชูเปอร์ลีนไนลอนกลิ้งขึ้นรูปสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งควบคุมแบบคาปาซิทีฟสเตรสคอนโทรล บริเวณปลายสายเคเบิล โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองหาขนาดของกรวยลดความเครียด และการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยขั้วต่อสายแบบกรวยลดความเครียดที่ออกแบบสร้างมีขนาดสั้นกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีมิติที่เหมาะสม ถึง ร้อยละ 40 และไม่ต้องใช้ฉนวนควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าสามารถทดสอบหาค่าตีสหาร์จบางส่วนได้ใกล้เคียงกับขั้วต่อสายแบบทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และใช้ในการทดสอบหาตีสหาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC60270 เนื่องจากขั้วต่อสายมีขนาดเล็กใช้ต้นทุนการสร้างต่ำใช้ระยะเวลาการปกสายเคเบิลสั้นเป็นการลดการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ

## 2.2 ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

สายส่งจ่ายหรือระบบจำหน่ายที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อาจแบ่งตามลักษณะโครงสร้างและฉนวนออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขึงในอากาศ (Overhead Line System) และแบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System)[12]

### 1) สายส่งจ่ายแบบขึงในอากาศ (Overhead Line System)

สายส่งจ่ายแบบขึงในอากาศใช้อากาศเป็นฉนวนหลักมีข้อดีที่อากาศเป็นฉนวนที่กลับคืนสภาพความเป็นฉนวนได้เอง หลังจากการเกิดดีสชาร์จหรือเบรกดาวนผ่านไป การใช้ระบบสายไฟฟ้าแบบขึงอากาศจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม มลภาวะ(Pollution) การเกิดโคโรนารบกวน ระบบสื่อสาร ความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า และระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้า ที่สำคัญก็คือมีผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

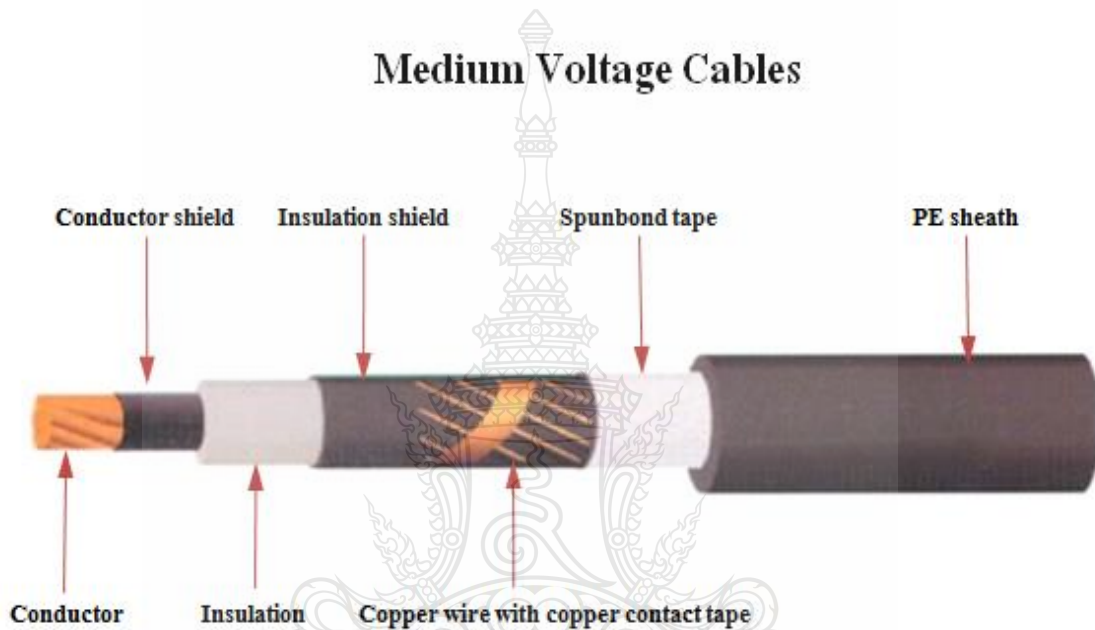
### 2) สายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System)

สายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดินจะเป็นระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลว หรือฉนวนก๊าซอัดความดัน เพื่อให้ทนต่อแรงดันได้สูงโดยความหนาของฉนวนไม่ต้องมากนัก เนื่องจากในบางกรณีมีที่ว่างไม่มากพอที่จะเดินสายส่งจ่ายแบบขึงในอากาศ เช่นบริเวณในเมืองใหญ่ๆ ย่านชุมชน หรือในกรณีที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อม ความสวยงามของภูมิทัศน์ ปัญหานี้ อาจแก้ได้โดยการใช้สายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดิน เพราะเคเบิลมีขนาดเล็ก ทนแรงดันได้สูง สามารถติดตั้งใต้พื้นดินได้ การวางสายเคเบิลติดตั้งในอากาศได้ เช่น ในอุโมงค์ โดยมีชั้นรองรับอย่างมั่นคง หรือวางในราง หรือร่องที่ทำไว้เพื่อวางสายเคเบิลโดยเฉพาะ หรือฝังในดินโดยตรง หรือวางใต้ท้องทะเล การต่อสายส่งจ่ายแบบเคเบิลใต้ดินเข้ากับสายส่งจ่ายแบบขึงในอากาศจะต้องต่อผ่านหัวเคเบิล(Cable Termination) ข้อดีของการใช้สายเคเบิลใต้ดิน ทำให้ดูเรียบร้อย ปลอดภัยจากฟ้าผ่าโดยตรง ให้ความปลอดภัยสูงแก่คนและสิ่งแวดลอม

## 2.3 สายเคเบิลใต้ดิน ( Undergroud Cable)

สายเคเบิลใต้ดินที่มีใช้งานของการไฟฟ้าจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกันก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ใช้ชนิดฉนวนกระดาษและก๊าซ ฉนวนกระดาษและน้ำมัน ฉนวน Cross Linked Polyethylene (XLPE), Polyethylene (PE) แต่ในช่วงหลังนี้ ส่วนใหญ่ นิยมใช้สายเคเบิลชนิดฉนวน Cross Linked Polyethylene (XLPE) มากขึ้น ซึ่งจากเดิมสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน Low pressure oil fill ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้งานได้อย่างมีความเชื่อถือสูงตลอด 40 กว่าปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามในช่วงการติดตั้งและการใช้งานยังจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีความสามารถและประสบการณ์สูงอีกทั้งยังมีระบบการควบคุมที่ยุ่งยาก และเมื่อเกิดน้ำมันรั่ว อาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรและเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา

ฉะนั้น ฉนวน Cross Linked Polyethylene (XLPE) จึงถูกนำมาใช้งานมากขึ้นเนื่องจากการติดตั้งและการใช้งาน รวมถึงเรื่องการรักษาไม่ยุ่งยาก ปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินที่ กฟผ. ใช้งานเป็นชนิดฉนวน Cross Linked Polyethylene (XLPE) ทั้งระดับแรงดันปานกลาง (Medium voltage cables) 22–33 kV และแรงดันสูง (High voltage cables) 115 kV (กฟผ. จัดหาสายเคเบิลตามสเปคเลขที่ R-777/2539 สำหรับสาย 22-33 kV และสเปคเลขที่ R-500/2544 สำหรับสาย 115 kV) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [12]



รูปที่ 2.1 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV[12]

## 2.4 โครงสร้างของสายไฟฟ้าใต้ดิน

1) Conductor (ตัวนำ) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า ทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง มีหลายลักษณะดังนี้

1.1) Solid Conductor ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ไม่นิยมใช้ในสายขนาดใหญ่ เนื่องจากติดตั้งได้ยาก

1.2) Round Strand Conductor (ตัวนำตีเกลียว) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าทั่วไปและสายเปลือย

1.3) Compact Strand Conductor (ตัวนำอัดแน่น) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่วไปโดยการนำตัวนำตีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มจะช่วยลดวัสดุที่นำมาหุ้มได้

1.4) Segmental Conductor ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินขนาดใหญ่ที่ต้องการให้มี Current Carrying Capacity สูง แต่ละ Segment จะประกอบด้วยตัวนำที่เกลียวแล้วอัดให้เป็นรูป Segment โดยแต่ละ Segment จะหุ้มด้วยฉนวน ข้อดีของตัวนำชนิดนี้ก็คือมี AC Resistance ต่ำ เนื่องจาก Wire ในแต่ละ Segment มีการ Transpose เข้าออกระหว่างส่วนนอกและส่วนในของตัวนำ ทำให้ Skin Effect Factor ต่ำ

1.5) Hollow Core Conductor ใช้เป็นตัวนำของ Oil Fill Cable โดยใช้ท่อกกลางตัวนำในการส่งน้ำมัน ปัจจุบันมีการนำมาใช้กับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ Solid Dielectric ที่ต้องการนำกระแสสูงๆ โดยใช้น้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในท่อกกลางตัวนำเพื่อระบายความร้อน

2) Conductor Screen ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งอาจเป็นผ้าอาบ Carbon หรือเป็น Extrude Layer ของสารสังเคราะห์พวกพลาสติกผสมตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีศักดาไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด Partial Discharge

3) Insulation (ฉนวน) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่กันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ คุณภาพของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) หรือ Polyethylene (PE) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงต่ำ, Oil Impregnated Paper, Crosslinked Polyethylene (XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงสูง

4) Insulation Screen ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Conductor Screen คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของ Insulation และ Metallic Screen วัสดุที่ใช้ทำ Insulation Screen จะเหมือนกับ Conductor Screen

5) Metallic Screen ทำหน้าที่เป็น Ground สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูงและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร บางครั้ง Metallic ยังทำหน้าที่เป็น Mechanical Protection หรือทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) หรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับ Oil Fill Cable Metallic Screen อาจเป็น Tape หรือ Wire ทำด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียมหรืออาจจะเป็น Lead Sheath (ปลอกตะกั่ว) หรือ Corrugate Aluminum Sheath (ปลอกอะลูมิเนียมลูกฟูก)

6) Reinforcement หรือ Armour เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อ Mechanical Force จากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้น้ำหรือสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง บางครั้งยังใช้เป็นตัวรับแรงดึงในการลากสายด้วย วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ Steel Tape, Steel Wire หรือ Aluminum Wire

7) Non Metallic Sheath หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Jacket ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทก เสียดสีต่างๆขณะติดตั้งสายเคเบิล วัสดุที่ใช้ทำมี PVC, PE

## 2.5 ฉนวน XLPE

เนื่องจากสายเคเบิลใต้ดินที่ กฟภ. จัดหามาใช้งานเป็นแบบฉนวน XLPE ทั้งหมด(ไม่นับรวม สาย Submarine Cable) ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงในเรื่องของฉนวน XLPE เท่านั้น ฉนวน XLPE ได้จากการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก Thermoplastic ไปเป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายอย่าง (วิธีการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Crosslinking) ปกติโมเลกุลของ PE จะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) ยึดเกาะกันเป็นสายยาวโดยไม่มีแรงยึดเกาะกันระหว่างสาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนสายโมเลกุลของ C-H นี้จะเคลื่อนที่ไปมาได้(เพราะไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุล)เป็นผลให้เกิดละลายขึ้นนั่นเอง เมื่อทำให้เกิด Crosslink (ทำได้หลายวิธีเช่น การใช้สารเคมีเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาหรือใช้ Radiation เป็นต้น) คือทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene แรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุลนี้เองที่เป็นตัวทำให้ XLPE ไม่ละลายเมื่อได้รับความร้อน [13]

### ข้อดีของฉนวน XLPE

- 1) ทนอุณหภูมิได้สูงคือ 90°C
- 2) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือ มี Dielectric Loss ต่ำ และมี Dielectric Strength สูง
- 3) มีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก
- 4) ทนต่อสารเคมีดีกว่า PE/PVC
- 5) ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

## 2.6 Cable Splicing

เหตุผลที่ต้องมีการต่อสายเคเบิลใต้ดิน

- 1) ต้องการสายเคเบิลที่มีความยาวมาก
- 2) สายเคเบิลเกิดความบกพร่องหลังการติดตั้งสายเคเบิล
- 3) เคเบิลได้รับความเสียหายจากอุบัติเหตุ
- 4) การต่อสายเคเบิลแบบแยกสามทาง (T- Tap)

ปัจจุบันการติดตั้ง Terminator ไม่ยุ่งยาก เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตได้จัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆให้พร้อมปัญหาหลักของการติดตั้ง Terminator คือขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลฯ ( Cable preparation ) ซึ่งการลอก Jacket , Semi Conducting Layer และ Wire Screen ต้องอาศัยความละเอียด ประณีต ต้องไม่ทำให้ Insulation เกิดบาดแผลจากการลอกสายเพราะจะนำไปสู่การเกิด Partial Discharge ที่บริเวณบาดแผลนั้นจนลามไปถึงการเกิด Insulation Breakdown ได้รวมถึงขณะทำการทำความสะอาดผิว Insulation ก็จะต้องระมัดระวังไม่ให้มีเศษของ Semi Conducting และเศษผงอื่นๆติดอยู่เด็ดขาด เพราะจะทำให้เกิด Partial Discharge เช่นกัน [14]

ส่วนสายดินที่จะต่อลงดินให้ยึดตามขนาดของสาย Wire Screen เช่น สาย 240 และ 400 mm<sup>2</sup> ใช้สายดินขนาด 25 mm<sup>2</sup> การต่อสายเคเบิลฯนอกจากจะต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าแล้วยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของส่วนประกอบต่างๆของสายไฟฟ้าอีกด้วยโดยอาศัยหลักการที่ว่าทำทุกส่วนของชุดต่อสายให้เหมือนกับสายเคเบิลฯมากที่สุดนั่นเอง

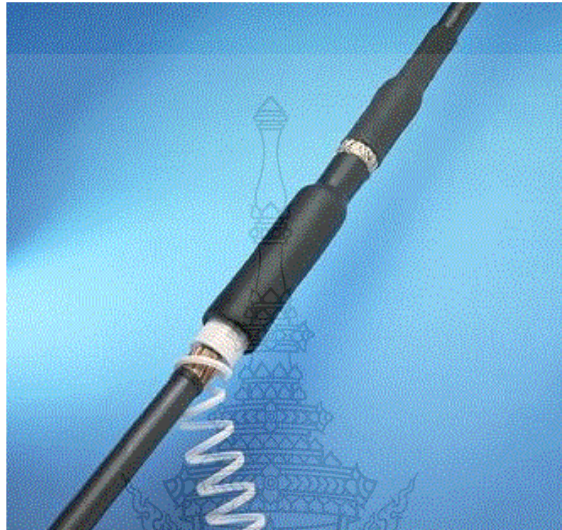
## 2.7 ชนิดของ Splicing

2.7.1) Slip On Type เป็นชุดต่อสายสำเร็จรูปมาจากโรงงานผลิตมีการทดสอบก่อนนำมาจำหน่าย การต่อสายต้องเตรียมลอกสายเคเบิลฯยาวกว่าอีกข้างหนึ่งเพื่อให้ชุดต่อสายเคลื่อนตัวไปพักไว้ก่อนการเชื่อมหลอดต่อสายไฟ แต่ละรุ่นจะใช้ได้เฉพาะของขนาดสายเคเบิลนั้น ๆ ซึ่งต้องมีขนาดฉนวนเหมาะสมกันพอดี



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Slip On Type[14]

2.7.2) Cold Shrink Type เป็นชุดต่อสายสำเร็จรูปมาจากโรงงานผลิตมีการทดสอบก่อนนำมาจำหน่ายงานการต่อสายจะมีระยะเตรียมสาย 2 ข้างเท่ากัน ในหนึ่งรุ่นใช้กับสายเคเบิลฯได้หลายขนาดสามารถป้องกันความชื้น น้ำ ทางกล และ สารเคมี ขั้นตอนการติดตั้งน้อยไม่ซับซ้อนไม่ต้องใช้เครื่องเป่าความร้อน ปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติ ทำให้สามารถติดตั้งในบริเวณที่แคบได้



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Cold Shrink Type[14]

2.7.3) Heat Shrink Type เป็นชุดต่อสายที่เป็นชิ้นส่วนมาจากโรงงานผู้ผลิตในหนึ่งรุ่นใช้กับสายเคเบิลฯได้หลายขนาดมีข้อเสียคือต้องใช้เครื่องมือเป่าไฟและความร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้ ต้องใช้ความเชี่ยวชาญมากในการเป่าไฟเพื่อให้การหดสม่ำเสมออีกทั้งมีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันหลายชิ้นส่วน หลายขั้นตอน



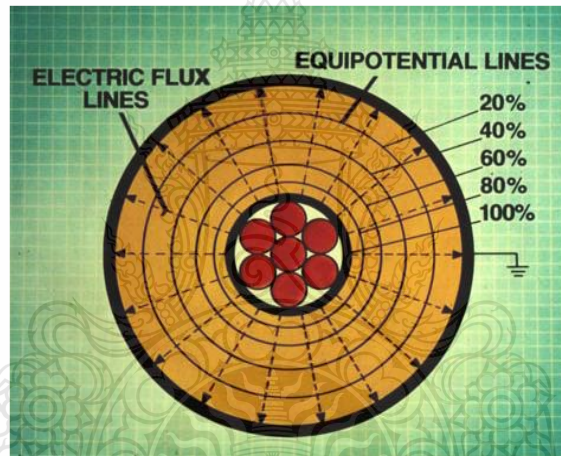
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Heat Shrink Type[14]



การทำ Terminator และ Splice ในปัจจุบันทันสมัยขึ้น ซึ่งการประกอบง่ายพอจะศึกษาจากคู่มือบริษัทผู้ผลิตได้แต่ที่ยากคือขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลฯดังที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งต้องใช้ประสบการณ์และความชำนาญเป็นอย่างมาก

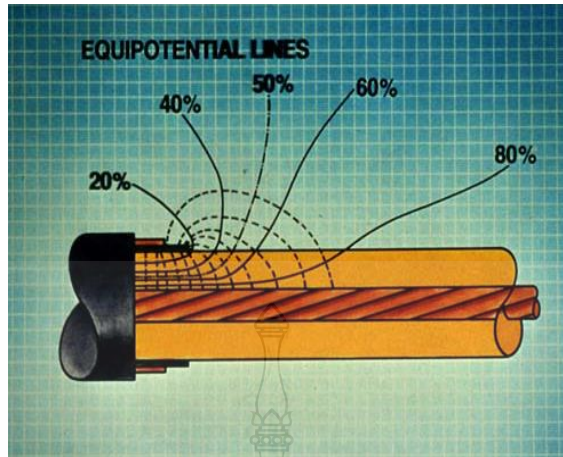
## 2.8 การต่อสายและการทำหัวสายเคเบิลใต้ดิน (Splice and Terminator)

สายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่มีการตัดต่อสาย เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ทำให้มีเส้นแรงไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวของสายจากตัวนำไปยังสาย Shield (ถูกต่อลงดิน) และเกิดเส้นสมศักย์ (เส้นแสดงระดับแรงดันที่มีค่าเท่ากัน) คงที่ไปตลอดความยาวสายเช่นเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอซึ่งมีค่าไม่เท่ากันจากตัวนำไปยังสาย Shield ดังแสดงตามรูปที่ 2.5 [15]



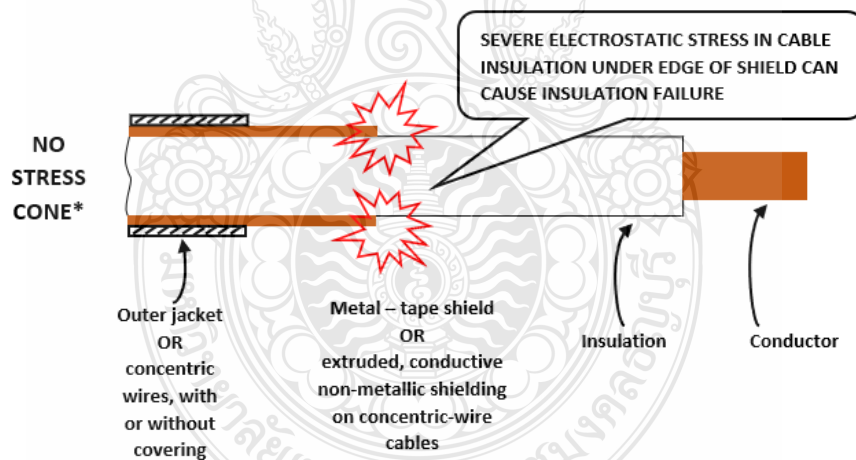
รูปที่ 2.5 แสดง Potential Field และ Electric Flux Lines[15]

เมื่อสายเคเบิลใต้ดินมีการตัดต่อสาย สายตัวนำที่ถูกปกคลุมจนออกจำเป็นต้องรักษาระยะระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield (ถูกต่อลงดิน) ให้มีค่ามากพอ เพื่อไม่ให้เกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำไปยัง Shield กรณีนี้สายตัวนำจะถูกคั่นด้วยฉนวนซึ่งมีความหนาแน่นไม่มากเท่า นั้นซึ่งในกรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างกระทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนกะทันหัน[15]

ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่น และตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง จะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่ายดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบน จะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นที่ปลายสาย Shield[15]

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้ จึงต้องทำการลด Stress ที่เกิดที่ปลายสาย Shield ก่อนการนำสายเคเบิลที่มี Shield ดังกล่าวไปใช้งาน โดยการทำให้ Stress Relief Cone ตามรูปที่ 2.6 หรือใช้ High Permittivity Material ตามรูปที่ 2.7 ที่ปลายสาย Shield ซึ่งนำไปสู่การทำ Termitor และ Splice

## 2.9 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าเกิดจากการจ่ายแรงดันสูง (high voltage) ให้ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (electrode) โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration) สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (non-uniform field) สำหรับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly non-uniform field) และไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) ลักษณะของ อิเล็กโทรดของสนามไฟฟ้าแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.8 ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศจะพบว่าแรงดันเบรกดาวน์ (breakdown voltage) จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดวางระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้เท่ากันก็ตาม[16]

### 2.9.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอคือสนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด เช่น ในช่องระหว่างอิเล็กโทรดแผ่นขนาน (parallel plate) ในรูปที่ 2.8 (ก) จะสามารถคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (maximum electric field strength) ได้จาก

$$E_{\max} = E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E_{\max}$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

$E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่าง อิเล็กโทรด

$V$  คือ แรงดันที่จ่ายให้ระหว่างอิเล็กโทรด

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

### 2.9.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

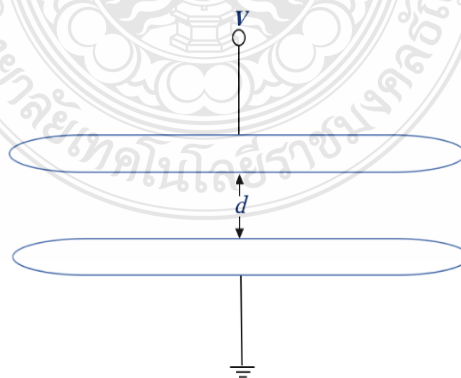
สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือความเข้มสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทาง เรขาคณิต (geometry) ของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น ลักษณะ การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.8 (ข) โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวของ อิเล็กโทรดทรงกลมสามารถคำนวณได้จากสมการ[16]

$$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*} \quad (2.2)$$

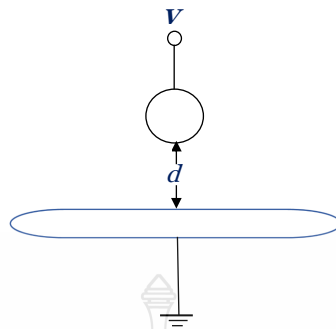
เมื่อ  $\eta^*$  คือ ตัวประกอบการใช้ประโยชน์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) หาได้จาก

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 1 \leq \eta^* \leq 1 \quad (2.3)$$

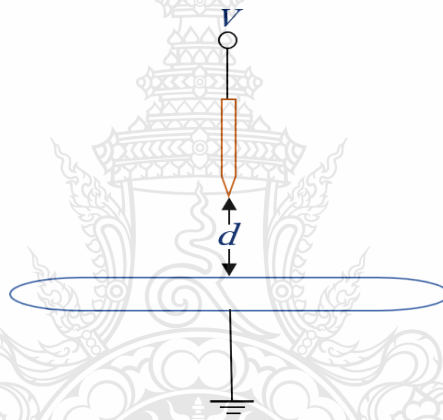
เมื่อ  $E_{av}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $V/d$  สำหรับในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณใกล้ผิวอิเล็กโทรดที่มีผิวน้อยที่สุด เช่น ขั้วอิเล็กโทรดปลายแหลมดังในรูปที่ 2.8 (ค) เมื่อเพิ่มระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ตามแนวระนาบจะพบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังความสัมพันธ์ของการเปรียบเทียบการกระจายความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2.9 อิเล็กโทรดแบบ (ค) นี้ถึงแม้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตามการเบรกดาวนจะยังไม่เกิดแต่จะเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเข้มไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าลดลงและไม่เกิดโคโรนาดีสชาร์จ ฉะนั้น ในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ที่เรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้านี้วัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวนเรียกว่ากระแส โคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดีสชาร์จ (pre-discharge current)



(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ[16]

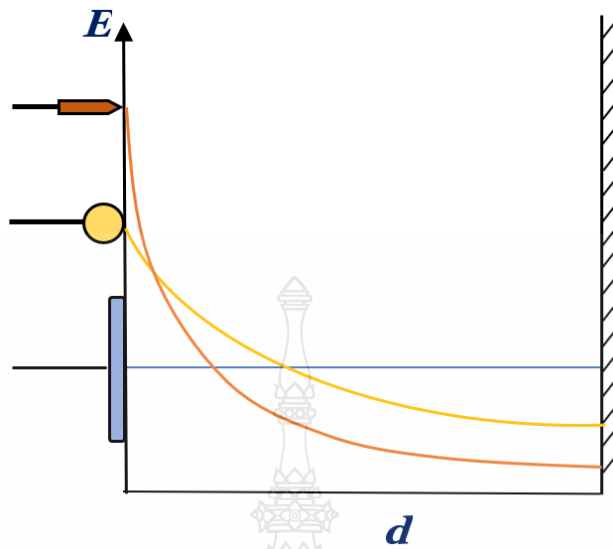


(ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย[16]



(ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง[16]

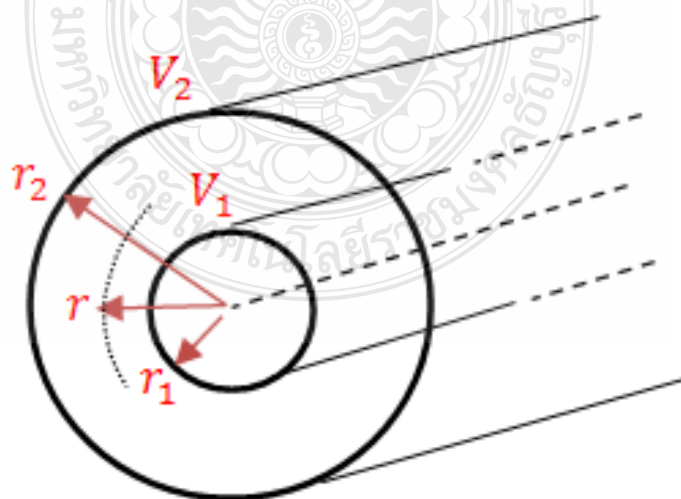
รูปที่ 2.8 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบกระจายสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ[16]

### 2.10 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

เมื่ออิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน เส้นของฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ฉะนั้น โดยอาศัยการอินทิเกรตสมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์  $Q = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A}$  สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันที่มีความยาว  $l$  รัศมี  $r$  ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ทรงกระบอกซ้อนกัน[17]

และ  $E = D / \epsilon$  จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r$  ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.4)$$

และค่าของแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนทั้ง สอง คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.5)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.6)$$

จึงได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่  $r_1 \leq r \leq r_2$

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.7)$$

ฉะนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อนด้านในสุดนั้น คือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.8)$$

จากนิยามค่าแฟกเตอร์ของสนามไฟฟ้า คือ  $\eta^* = E_{av} / E_{\max}$

โดยที่  $E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad (2.9)$

ดังนั้น  $\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.10)$

ค่าความจุสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันรวมคำนวณจาก  $Q = CU$  ในสมการ (2.11) จะได้

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.11)$$

เมื่อ

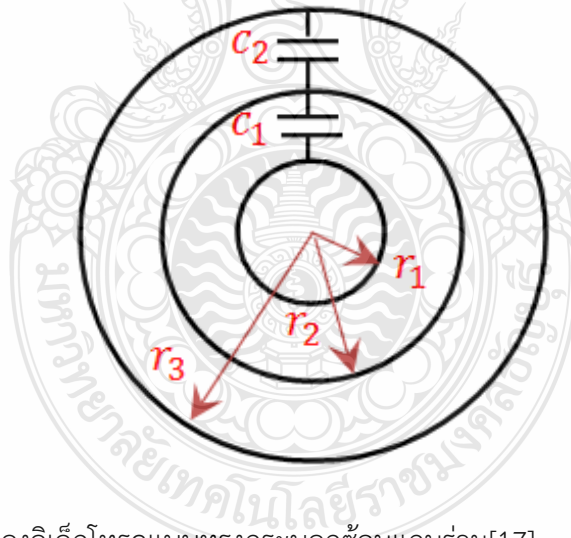
$Q$  คือ ค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

$C$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ (ฟารัด)

$\epsilon$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนแต่ละชั้น

$l$  คือ ความยาวของฉนวน (เมตร )

การที่สายไฟฟ้าใต้ดินมีฉนวนที่ต่างกันเป็นไดอิเล็กทริกนั้น ย่อมจะทำให้เกิดรอยต่อของชั้นฉนวนที่แตกต่างกันขึ้นและจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าได้และค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นของฉนวน จากรูปที่ 2.11 ให้  $r_1$  เป็นรัศมีทรงกระบอกด้านใน  $r_2$  เป็นรัศมีของทรงกระบอกในชั้น ที่ 2 และ  $r_3$  เป็นรัศมีด้านนอกทรงกระบอก



รูปที่ 2.11 รูปเสมือนของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม[17]

ลักษณะของอิเล็กโทรดดังกล่าวจากรูปที่ 2.11 จะเสมือนว่ามีคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกันคือ  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้ดังนี้



$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$C_1$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของหลอดแก้ว (ฟารัดต่อเมตร)

$C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ (ฟารัดต่อเมตร)

$\epsilon_1$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของหลอดแก้ว

$\epsilon_2$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ

ดังนั้น สามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารวมได้จากสมการ

$$C_t = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $C_t$  คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม (ฟารัดต่อเมตร)

ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนแก้วและอากาศแต่ละชั้น ต่ออันดับกัน ดังนั้นประจุของตัวเก็บประจุยอมเท่ากัน คือ

$$Q_1 = Q_2 = Q_t = C_t U \quad (2.14)$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นของฉนวนที่รัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากความสัมพัทธ์เมื่อ  $x$  คือ รัศมีที่ระยะใดๆ (มิลลิเมตร)

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_t \cdot U}{2\pi\epsilon_x r_x} \quad (2.15)$$

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 \cdot U}{r_x \epsilon_x \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.16)$$

อัตราส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r_x$  และ  $r_{x+1}$  จะได้

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x} \quad (2.17)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้น จะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น คือ ในฉนวนชั้นที่ 1  $E_{\max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_1, \epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1\max} = \frac{\epsilon_2 \cdot U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad \text{เมื่อ } r_x = r_1, \epsilon_x = \epsilon_1 \quad (2.18)$$

และในฉนวนชั้น ที่ 2  $E_{\max}$  เกิดขึ้น ที่  $r = r_2, \epsilon = \epsilon_2$

$$E_{2\max} = \frac{\epsilon_1 \cdot U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad \text{เมื่อ } r_x = r_2, \epsilon_x = \epsilon_2 \quad (2.19)$$

อัตราความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2 \cdot r_2}{\epsilon_1 \cdot r_1} \quad (2.20)$$

## 2.11. ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

จากโครงสร้างของเคเบิลใต้ดินเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวนำทองแดงตามขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าและเกราะป้องกันลวดทองแดงที่มีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นศูนย์จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแล้ว โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากับความชันของศักย์ไฟฟ้าซึ่งแสดงไว้ในสมการ 2.21[18]

$$E = -\nabla V \quad (2.21)$$

เมื่อ  $E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

$V$  คือ ศักย์ไฟฟ้า

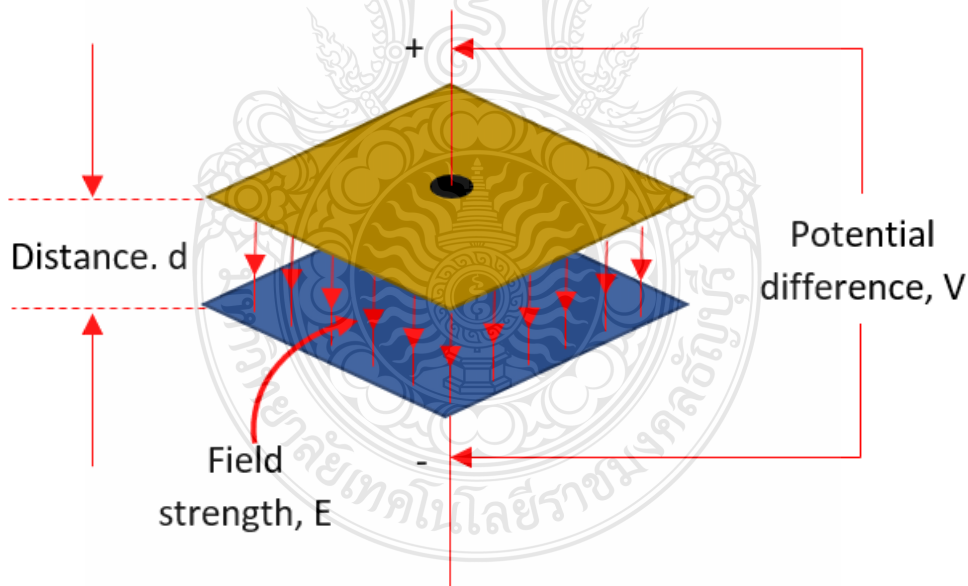
โดยที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าและการซึมผ่านของวัสดุสามารถหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ดังสมการที่ 2.22

$$\nabla E = \rho v \epsilon \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\rho v$  คือ ความหนาแน่นประจุของวัสดุที่ใช้สำหรับตัวนำ

$\epsilon$  คือ ค่าคงที่การเป็นฉนวนของวัสดุ

ซึ่งลักษณะโครงสร้างสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินจะมีคุณลักษณะเป็นคาปาซิเตอร์ ซึ่งคุณลักษณะของคาปาซิเตอร์พิจารณาได้จาก แผ่นตัวนำ (parallel conductive plates) 2 แผ่น กั้นกลางด้วยไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นฉนวน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ[18]

สำหรับฉนวน (Dielectric) สามารถทำมาจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าทั้งหลายเช่น พลาสติก ยาง เซรามิก แก้วฉนวนแต่ละชนิดซึ่งเราสามารถวัดค่าความเป็นฉนวนได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับวัสดุต่างๆ โดยที่ค่าความจุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$C = \epsilon_r \frac{A}{4\pi d} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $C$  คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ หน่วยคือ Farad

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

$\epsilon_r$  คือ dielectric's relative permittivity

ทั้งนี้  $\epsilon_r$  เป็นค่าคงที่ของฉนวน ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนนั้น ๆ เช่น เราจะเห็นได้ว่า ยิ่งหรือ  $A$  มีค่ามากก็จะทำให้สามารถเพิ่มความจุของตัวเก็บประจุทำให้  $\epsilon_r$  มีค่าความจุมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหาก มีระยะห่าง ( $d$ ) ระหว่างแผ่นตัวนำมากก็จะทำให้ตัวเก็บประจุมีค่าน้อย

## 2.12 สนามไฟฟ้า (Electric Field)

สนามไฟฟ้า (Electric Field ; E) หมายถึงบริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้าซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึงหรือบริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าทดสอบเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้าทดสอบนั้นตามจุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าต้นกำเนิดสนาม จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้าคือนิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ต่อเมตร [18]

ประจุไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือประจุลบและประจุบวก

ประจุลบ คือประจุที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน

ประจุบวก คือประจุที่ประกอบไปด้วยโปรตอน

ประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ประจุเหมือนกันจะผลักรัน

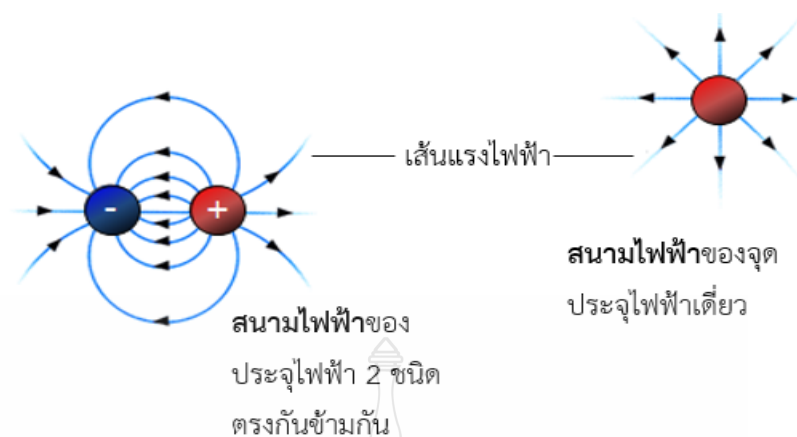


ก. ทิศของสนามไฟฟ้ารอบจุดประจุบวก



ข. ทิศของสนามไฟฟ้ารอบจุดประจุลบ

รูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้ารอบประจุ [18]



รูปที่ 2.14 ผลของสนามไฟฟ้าต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า [18]

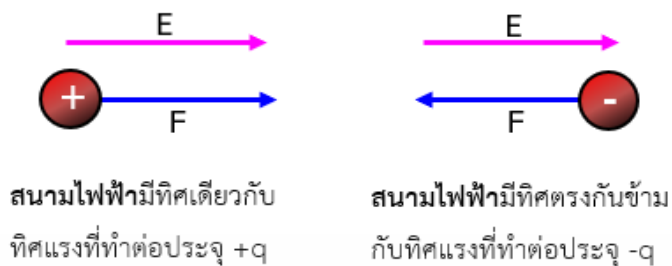
สมบัติของเส้นแรงไฟฟ้า มีดังนี้

- 1) เส้นแรงไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากประจุบวก
- 2) เส้นแรงไฟฟ้ามีทิศพุ่งเข้าหาประจุลบ
- 3) แนวเส้นแรงตั้งฉากกับผิวของวัตถุที่มีประจุ
- 4) เส้นแรงไฟฟ้าไม่ตัดกัน
- 5) เส้นแรงไฟฟ้าสิ้นสุดที่ผิวนอกของตัวนำ (ภายในตัวนำไม่มีเส้นแรงไฟฟ้า) แต่เส้นแรงไฟฟ้า

สามารถผ่านฉนวนไฟฟ้าได้

ทิศของแรงที่สนามไฟฟ้ากระทำต่อประจุ

- 1) ถ้าประจุก่อนกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก และประจุนำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก ทิศของแรง  $F$  จะอยู่ในทิศเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$
- 2) ถ้าประจุก่อนกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก และประจุนำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ ทิศของแรง  $F$  จะอยู่ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า  $E$
- 3) ถ้าประจุก่อนกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ และประจุนำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก ทิศของแรง  $F$  จะอยู่ในทิศเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$
- 4) ถ้าประจุก่อนกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ และประจุนำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ ทิศของแรง  $F$  จะอยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$



รูปที่ 2.15 ทิศของแรงที่สนามไฟฟ้ากระทำต่อประจุ [18]

นิยามทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้ากำหนดไว้ดังนี้ กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) กล่าวว่า แรงกระทำระหว่างอนุภาคมีประจุสองอนุภาค มีค่าเท่ากับ

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$\epsilon_0$  คือ เปรอริมิตติวิตี้ของตัวกลาง ที่  $\epsilon_0 \epsilon_r$

$\epsilon_r$  คือ เปรอริมิตติวิตี้สัมพัทธ์(ไม่มีหน่วย)

$\epsilon_0$  คือ (อ่านว่า เอปสิลอน-นอท) คือ สภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งเป็นค่าคงตัวทางฟิสิกส์ตัวหนึ่งเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$

$q_1$  และ  $q_2$  คือ ประจุไฟฟ้าของอนุภาคแต่ละตัว

$\hat{r}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ซึ่งชี้จากอนุภาคตัวหนึ่งไปอีกตัว

$\vec{F}$  คือ แรงไฟฟ้ามีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$\vec{E}$  คือ สนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)

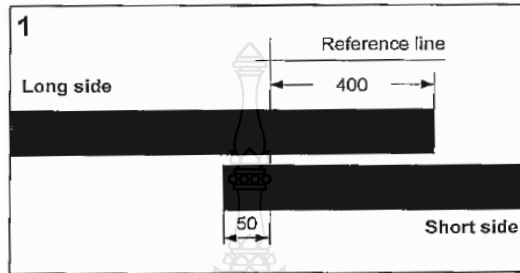
$r$  คือ ระยะทางระหว่างอนุภาคทั้งสองมีหน่วยเป็นเมตร (m)

$\epsilon_0$  มีหน่วยเป็น  $\text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$

## 2.13 ขั้นตอนและหลักการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน ( Cable Bonding )

ขั้นตอนการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน ( Cable Bonding ) มีดังนี้ [19]

- 1) วัดสายเคเบิลที่จะต่อ และทำเครื่องหมายเส้นอ้างอิงตามที่แสดงในรูปที่ 2.16  
( ข้อควรระวัง : ตรวจสอบปลายสายว่ามีความชื้นเข้าหรือไม่ก่อนดำเนินการต่อสายเคเบิล)



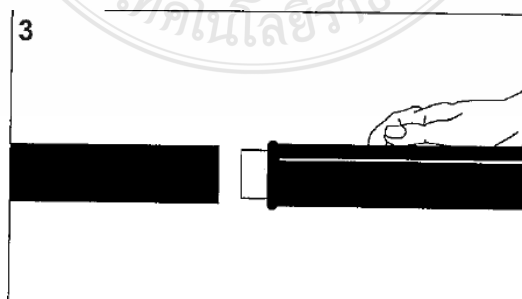
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนที่ 1 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

- 2) เช็ดทำความสะอาดและขจัดคราบไขมันด้านปลายสายทั้ง 2 เส้นที่ความยาว 1.5 เมตร



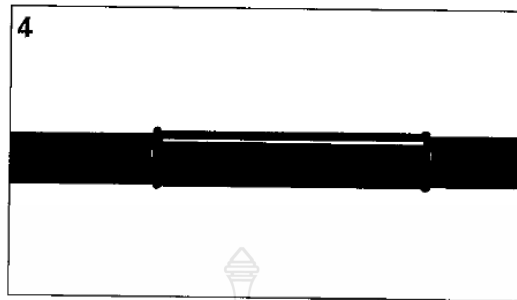
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนที่ 2 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

- 3) เสียบปลอก Rayvolve กับสายเคเบิล



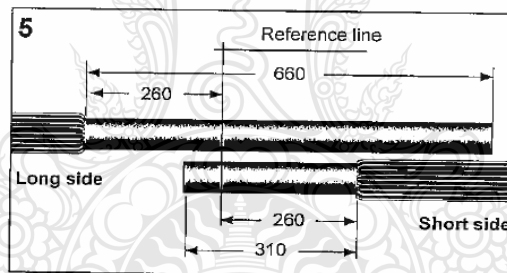
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนที่ 3 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

4) ดึงไว้เหนือปลายสายเคเบิลประมาณ 1 เมตร



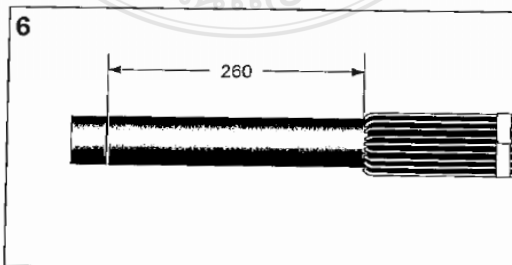
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนที่ 4 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

5) ปลอกสายเคเบิลยาว 660 มิลลิเมตร (ด้านยาว) และปลอกสายเคเบิลยาว 310 มิลลิเมตร (ด้านสั้น) งอสายกราวนด์กลับเข้าที่ด้านบนจนวนที่เหลือ ยึดสายไฟชั่วคราวด้วยเทปพันสายทำความสะอาดส่วนที่เหลือประมาณ 600 มิลลิเมตรและทำเครื่องหมายเส้นอ้างอิง



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนที่ 5 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

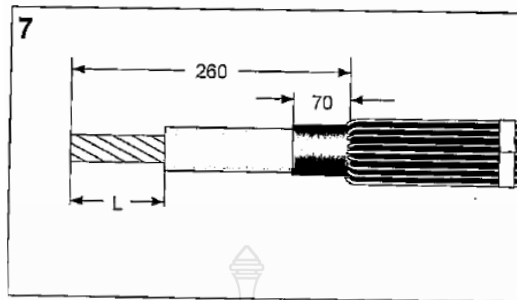
6) ตัดแกนกลางด้วยเลื่อยตัดขนาด 260 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนที่ 6 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

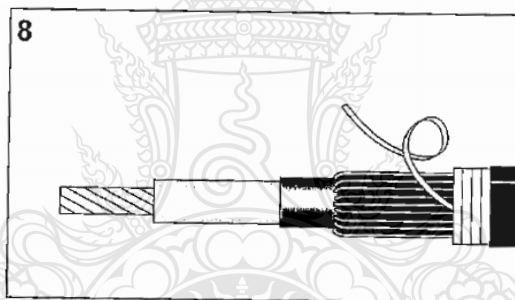


7) ปลอกฉนวน XLPE ออกตามขนาดตามคู่มือที่ระบุในรูปที่ 2.22



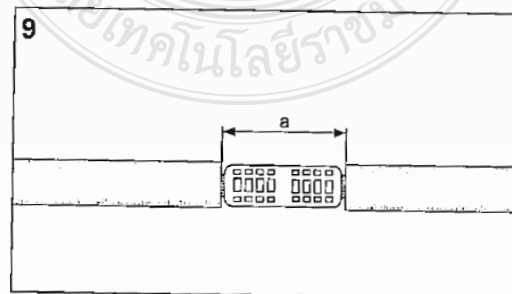
รูปที่ 2.22 ขั้นตอนที่ 7 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

8) เลื่อนโมดูลข้อต่อไปเหนือปลายสายเคเบิลเพื่อให้ปลดล๊อคแถบของเกลียวยึดซีไปทางปลายสายเคเบิล ดูให้แถบปลดของเกลียวอยู่ในตำแหน่งด้วยมีช่องว่างเพียงพอสำหรับการโอเวอร์ฮีท



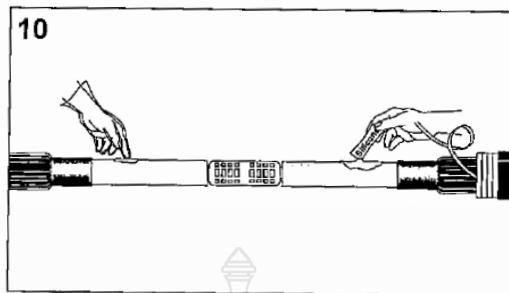
รูปที่ 2.23 ขั้นตอนที่ 8 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

9) เชื่อมต่อตัวนำโดยการใช้เครื่องมือที่ได้มาตรฐานโดยระยะ a ต้องไม่เกิน 180 มิลลิเมตร



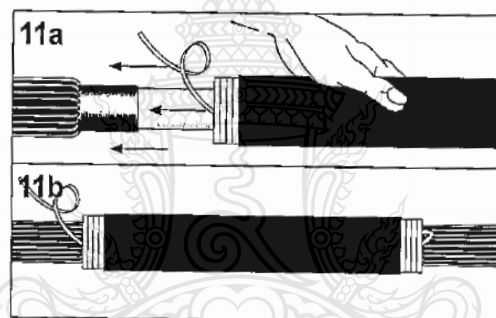
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนที่ 9 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

10) ทาจาระบีบริเวณรอยต่อด้วยเพื่อเป็นซิลิโคนฟิล์มบาง ๆ



รูปที่ 2.25 ขั้นตอนที่ 10 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

11) เลื่อนโมดูลข้อต่อให้อยู่กึ่งกลางระหว่างจุดต่อสายเคเบิล



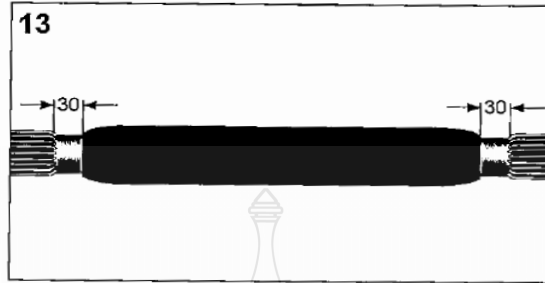
รูปที่ 2.26 ขั้นตอนที่ 11 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

12) คลายเกลียวโดยหมุนทวนเข็มนาฬิกาตามที่แสดงในรูปที่ 2.27 ตรวจสอบตำแหน่งของข้อต่อส่วนท้ายของข้อต่อควรห่างออกไป 30 มิลลิเมตรจากปลายด้านนอก



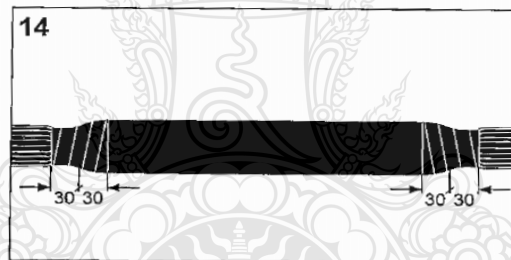
รูปที่ 2.27 ขั้นตอนที่ 12 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

13) ตัวข้อต่อได้รับการติดตั้งอย่างถูกต้องหากมีระยะห่าง 30 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองข้างของสายเคเบิล



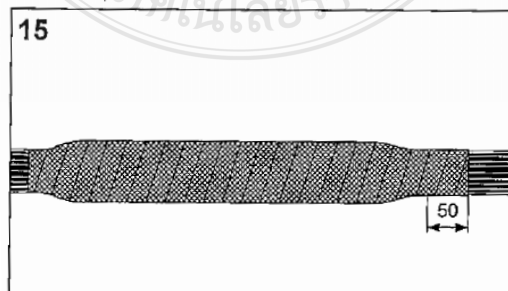
รูปที่ 2.28 ขั้นตอนที่ 13 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

14) พันเทปพันสายแบบหนา ( S1061 ) ที่ข้อต่อทั้งสองข้าง ทับตัวข้อต่อและปิดตัวฉนวนของสายเคเบิล 30 มิลลิเมตร



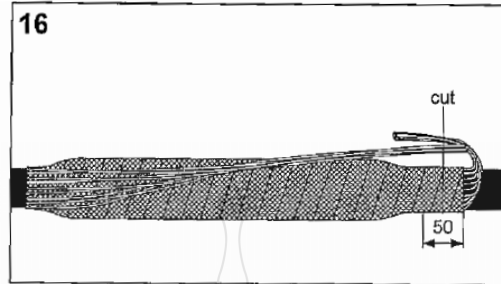
รูปที่ 2.29 ขั้นตอนที่ 14 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

15) นำตาข่ายทองแดงพันทับที่บริเวณจุดต่อสายเคเบิล สำหรับด้านที่ใส่ปลอก Rayvolve ให้พันตาข่ายทองแดงไป 50 มิลลิเมตรดังรูปที่ 2.30



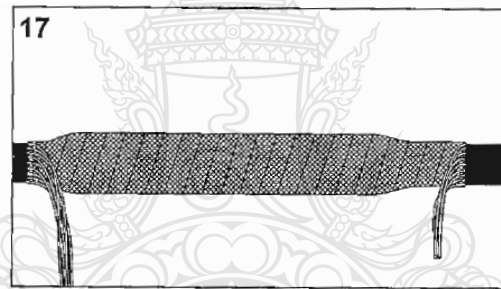
รูปที่ 2.30 ขั้นตอนที่ 15 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

16) งอสายกราวด์กลับเหนือพื้นที่รอยต่อบนตาข่ายทองแดง รวมสายไฟเข้าด้วยกันและตัดออกจากส่วนกลางบนตาข่ายทองแดง



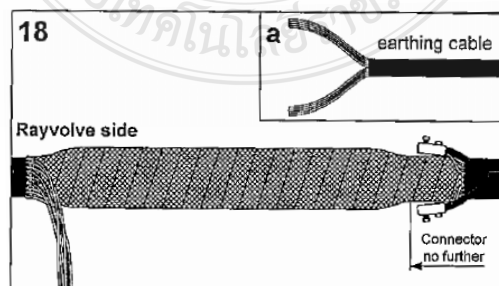
รูปที่ 2.31 ขั้นตอนที่ 16 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

17) รวมสายไฟเข้าด้วยกันทั้ง 2 ข้างของสายเคเบิล



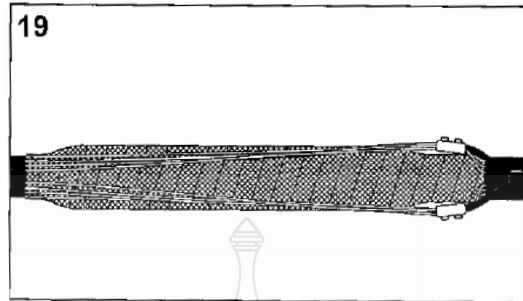
รูปที่ 2.32 ขั้นตอนที่ 17 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

18) แบ่งสายกราวด์ออกเป็น 1 – 2 เส้น ( ตามความเหมาะสม ) รวบรวมสายไฟเข้าตัว ขั้วต่อสายแต่ละตัวตามที่แสดง ตรวจสอบให้แน่ใจว่าขั้วต่ออยู่บนและล่างตาข่ายทองแดง



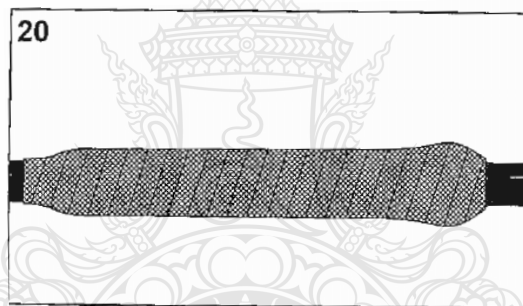
รูปที่ 2.33 ขั้นตอนที่ 18 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

19) แบ่งสายกราวนด์ที่เหลือออกเป็นเส้นเท่า ๆ กัน ใส่สายกราวนด์เข้าหาตัวข้อต่อสายแต่ละ  
ตัว



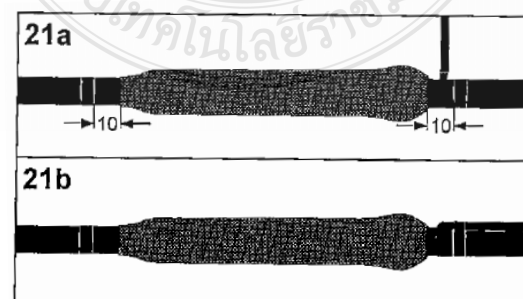
รูปที่ 2.34 ขั้นตอนที่ 19 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

20) พันตาข่ายทองแดงทับตัวสายกราวนด์อีกชั้นดังรูปที่ 2.35



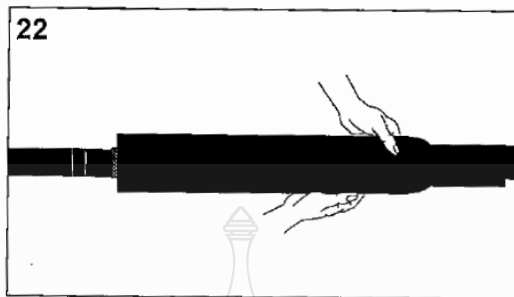
รูปที่ 2.35 ขั้นตอนที่ 20 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

21) พันเทปพันสายบนสายเคเบิลด้านนอกทั้งสองด้านห่างจากปลายตาข่ายทองแดง 10  
มิลลิเมตร ด้านข้างพร้อมมอสายกราวนด์กลับแล้วพันเทปรอบ ๆ



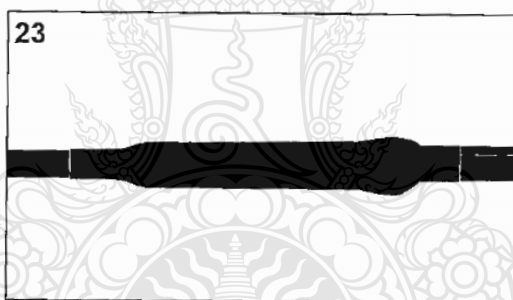
รูปที่ 2.36 ขั้นตอนที่ 21 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

22) ดึงปลอก Rayvolve มายังพื้นที่รอยต่อทั้งหมดจนถึงส่วนแรกของตาข่ายทองแดงดังรูป  
ที่ 2.37



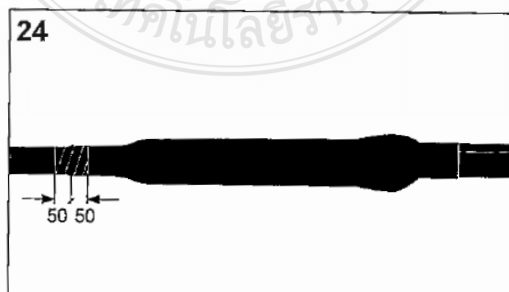
รูปที่ 2.37 ขั้นตอนที่ 22 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

23) ดึงปลอก Rayvolve ให้ยาวถึงตำแหน่งเทพพันสายทั้ง 2 ข้างของสายเคเบิล



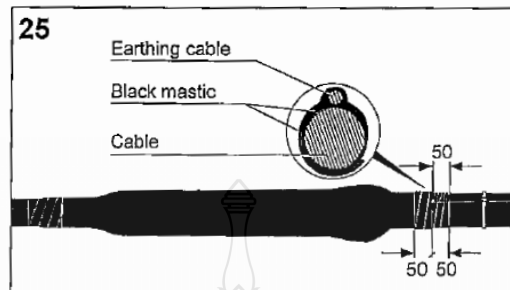
รูปที่ 2.38 ขั้นตอนที่ 23 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

24) พันเทพพันสายผิวดนริก Rayvolve เข้ากับสายเคเบิลด้านนอกตามที่แสดงในรูปที่ 2.39



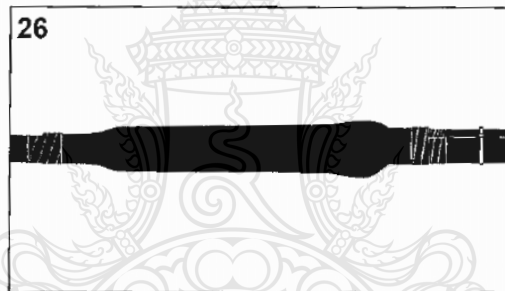
รูปที่ 2.39 ขั้นตอนที่ 24 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

25) พันเทปพันสายปิดผนึก Rayvolve เข้ากับสายเคเบิลและสายกราวนด์ 50 มิลลิเมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 2.40



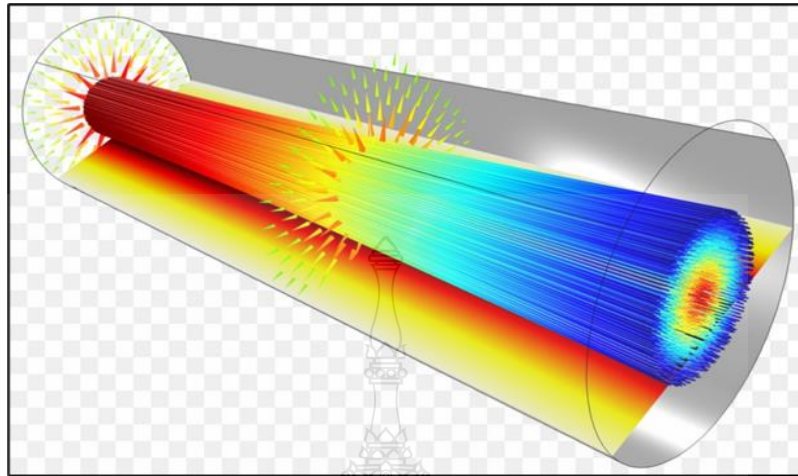
รูปที่ 2.40 ขั้นตอนที่ 25 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

26) การเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน ( Cable Bonding ) เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2.41 ขั้นตอนที่ 26 ของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดิน[19]

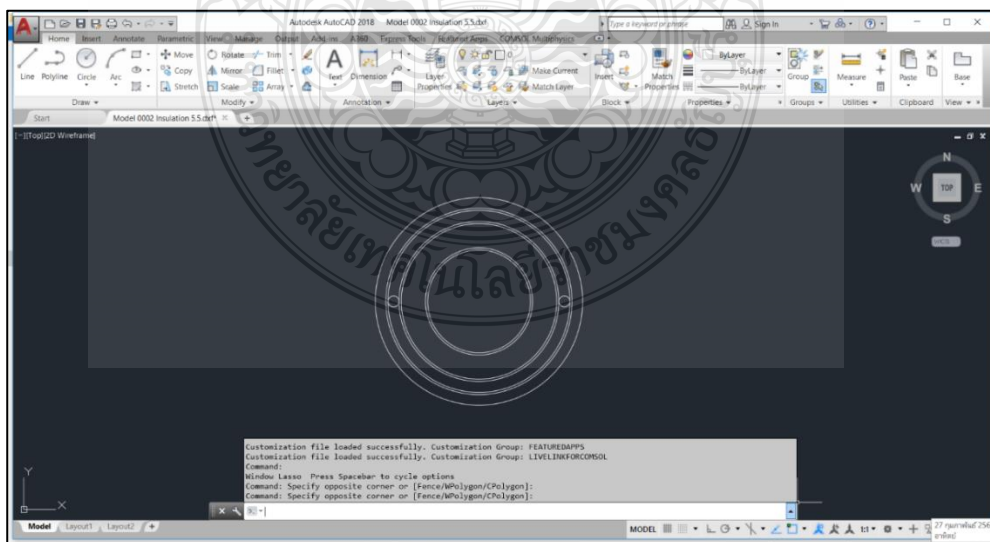
## 2.14 โปรแกรม Comsol Multiphysics



รูปที่ 2.42 ภาพการจำลองสนามไฟฟ้า [20]

โปรแกรม Comsol Multiphysics เป็นซอฟต์แวร์พื้นฐานการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ใช้ในการจำลอง (Simulation) และออกแบบ (Design) ปัญหาต่างๆเชิงฟิสิกส์เสมือนจริง ซึ่งการประมวลผลมีความยืดหยุ่นสูงกับการใช้งานและการกำหนดเงื่อนไขจึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขา

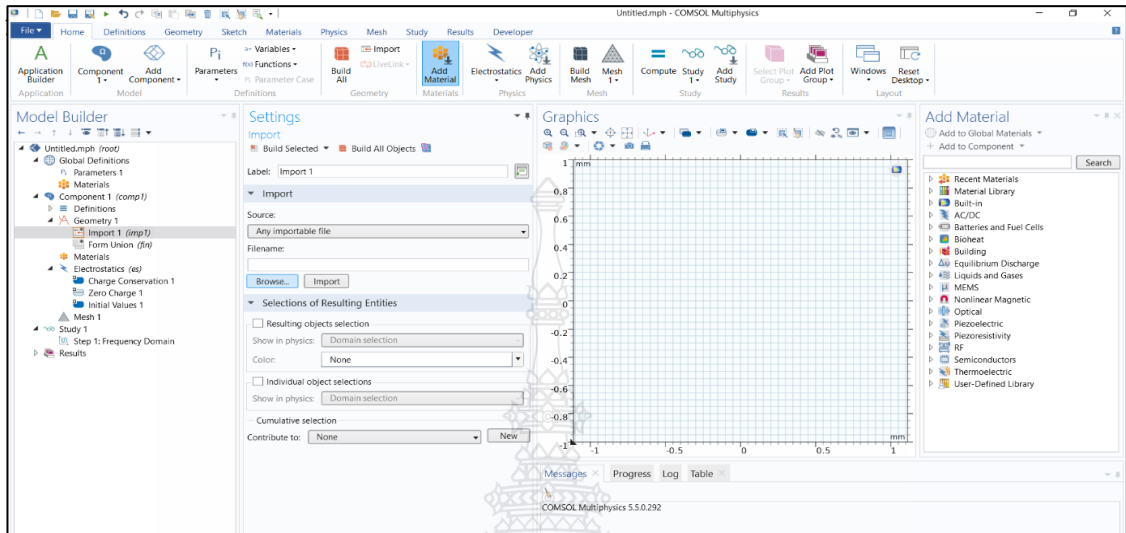
2.14.1 การออกแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าสามารถใช้โปรแกรม Auto cad มาร่วมด้วยดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 การออกแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Auto cad

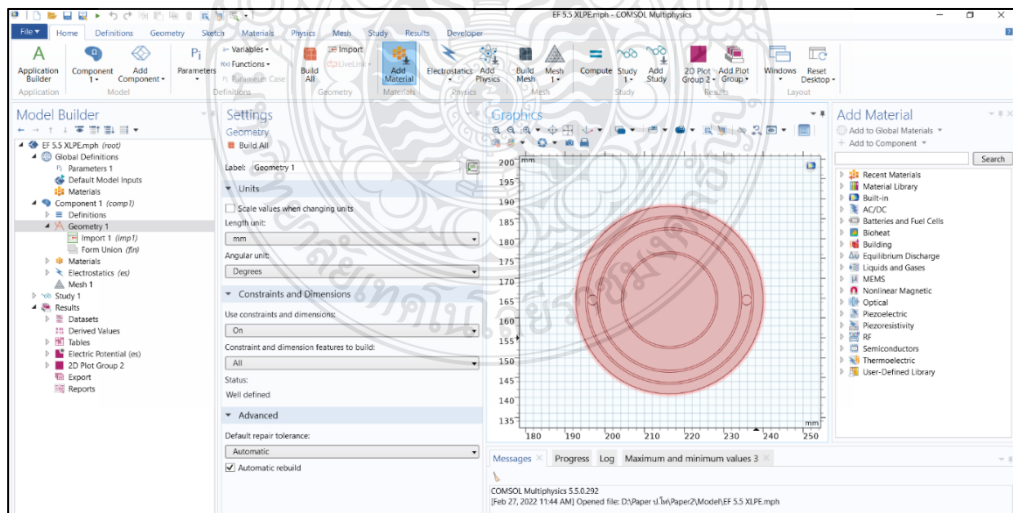


2..14.2 หลังจากออกแบบจำลองทำการนำไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol Multiphysics เพื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองดังรูปที่ 2.44



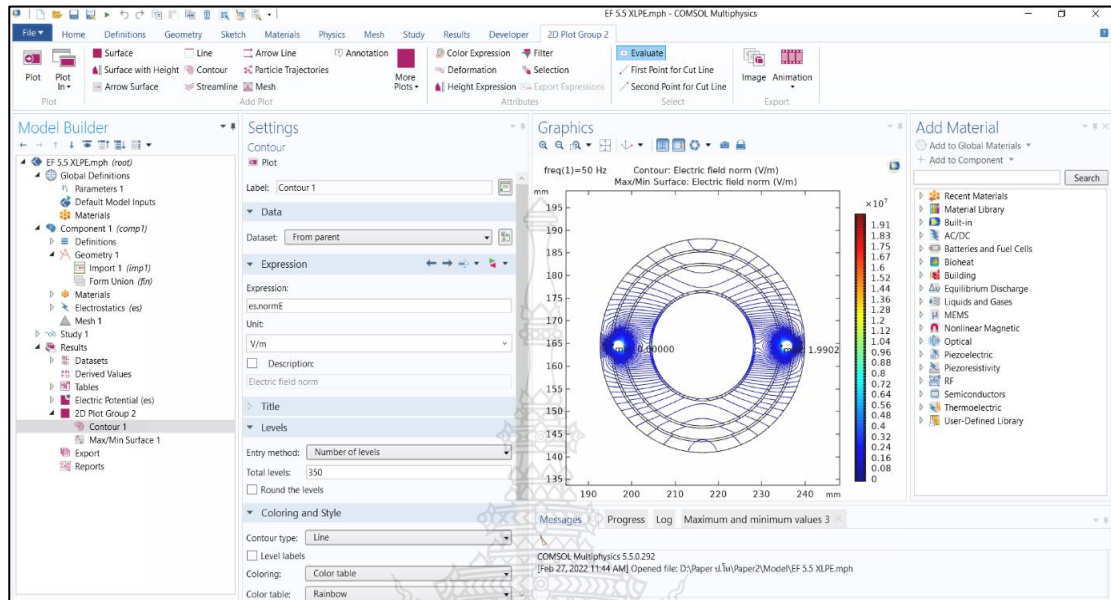
รูปที่ 2.44 วิธีการนำไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol Multiphysics

2.14.3 หลังจากไฟล์จากโปรแกรม Auto Cad เข้ามาในโปรแกรม Comsol Multiphysics ต่อจากนั้นเลือกติดตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุ สายไฟฟ้า แรงดัน ความถี่ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 วิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า

2.14.4 เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เรียบร้อยแล้วจึงเริ่มนำเนินการ กด Run Simulation ดังรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 วิธีการจำลองค่าสนามไฟฟ้า



## บทที่ 3

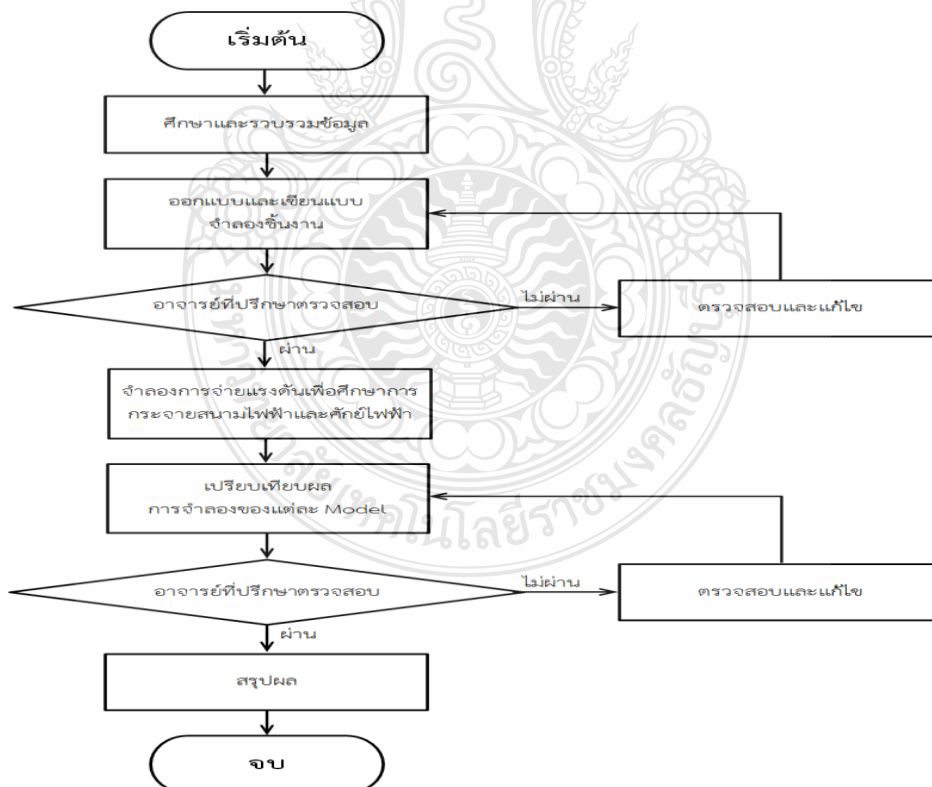
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV โดยใช้การเชื่อมต่อกราวด์แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุดและจำลองความหนาของฉนวนที่แตกต่างกันซึ่งได้จำลองหาค่าสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อสาย ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ภาพรวมและขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ตาม (Flow Chart) ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.1

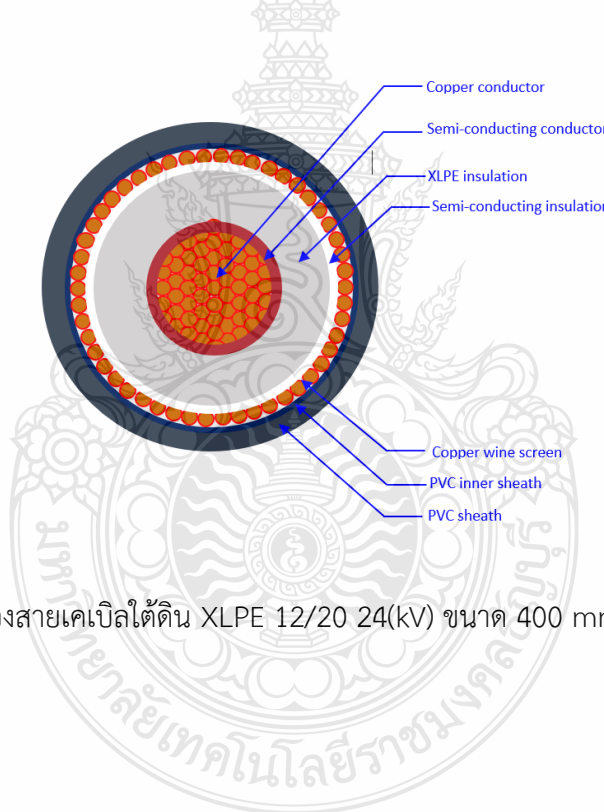


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

### 3.3 การศึกษาสาเหตุการระเบิดที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

การป้องกันการระเบิดที่จุดขั้วต่อสายในระบบสายเคเบิลใต้ดินจำเป็นต้องทราบถึงสาเหตุและปัจจัยที่จะส่งผลให้เกิดการระเบิดเสียก่อน ซึ่งสาเหตุหลักๆได้แก่ การติดตั้งที่ผิดวิธี และการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสาย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อเพื่อป้องกันการเกิดการรบกวนไปตามผิว จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาค่าระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวนำและกราวด์ที่บริเวณจุดต่อโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 ในการวิเคราะห์ที่บริเวณจุดต่อสาย XLPE 12/20 (24) kV ที่ความถี่ 50 Hz ขนาดสาย 400 mm<sup>2</sup> โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

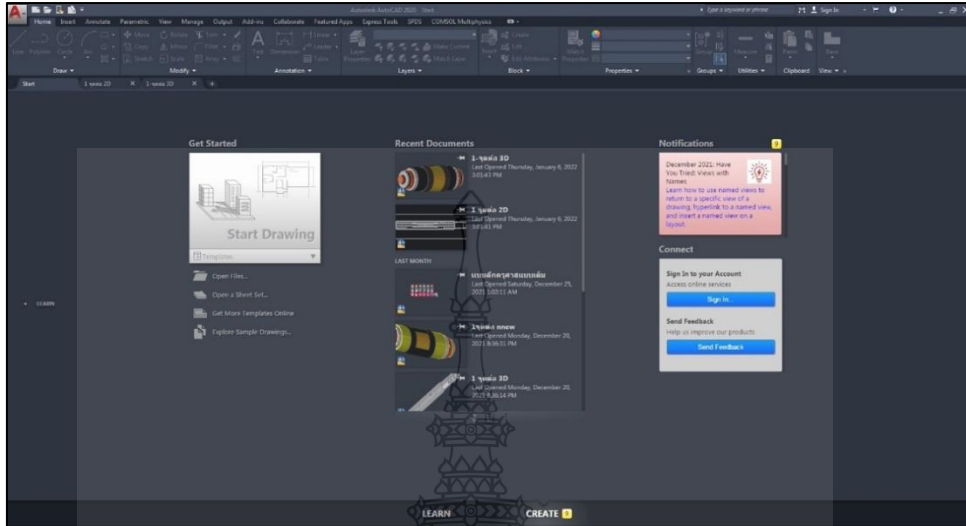
**ขั้นตอนที่ 1** เลือกจุดที่จะทำการวิจัยโดยเลือกบริเวณจุดต่อสาย XLPE 12/20 (24) kV ที่ความถี่ 50 Hz ขนาดสาย 400 mm<sup>2</sup>



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup>

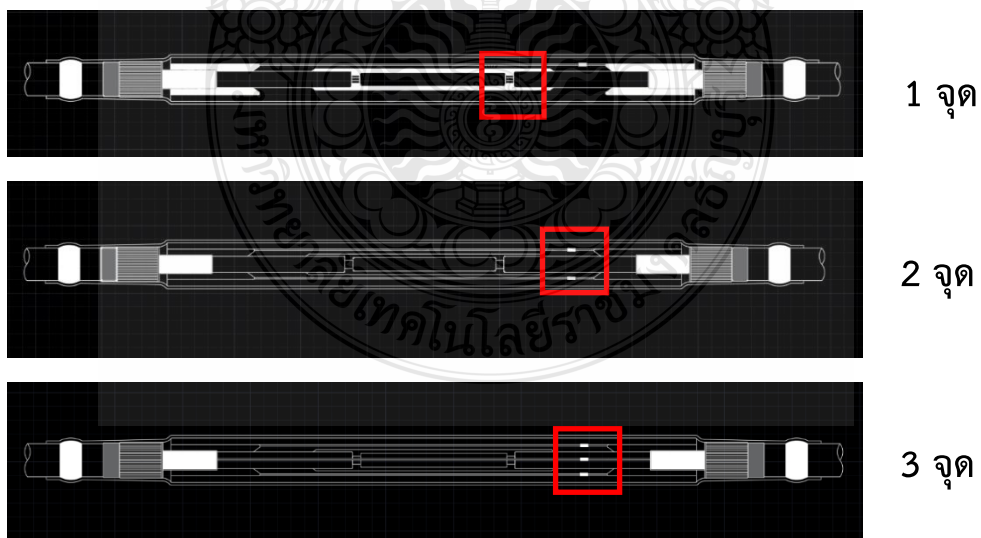
## ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบจำลอง

### 2.1 เปิดโปรแกรม AutoCAD → คลิก Start drawing

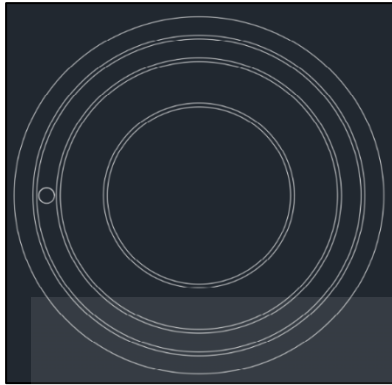


### รูปที่ 3.3 เปิด Program Auto CAD

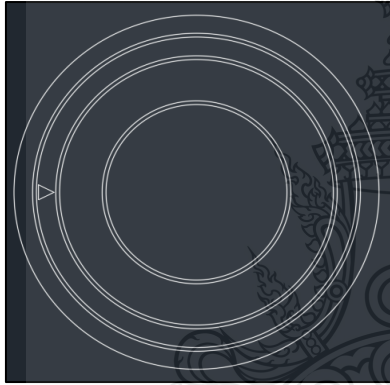
หลังจากเปิด Program Auto CAD ทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Auto Cad แล้ว Save เป็นไฟล์ (\*.dxf) แบบต่อกราวนด์ 1 จุด, 2 จุด และ 3 จุด และแยกเป็นแบบต่อกราวนด์กลม กับแบบต่อกราวนด์เหลี่ยม ตามรูปที่ 3.4 ถึง รูปที่ 3.13



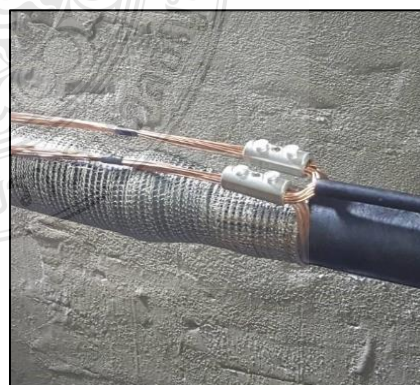
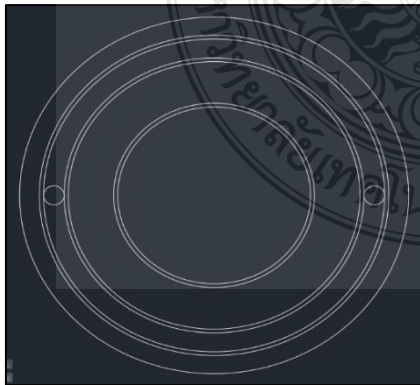
รูปที่ 3.4 จุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด  $400 \text{ mm}^2$  แบบต่อกราวนด์ 1 จุด, 2 จุด และ 3 จุด



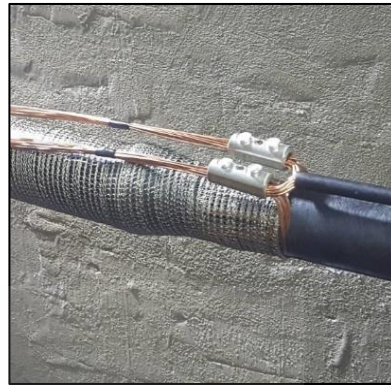
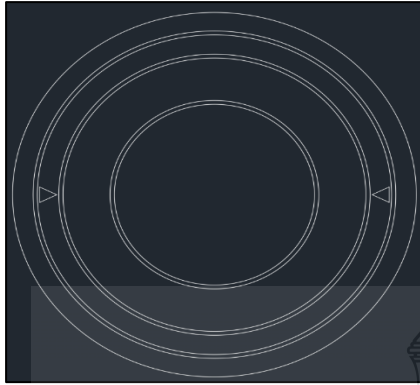
รูปที่ 3.5 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม



รูปที่ 3.6 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยม



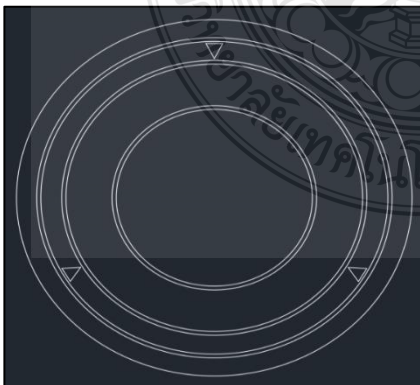
รูปที่ 3.7 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม



รูปที่ 3.8 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม



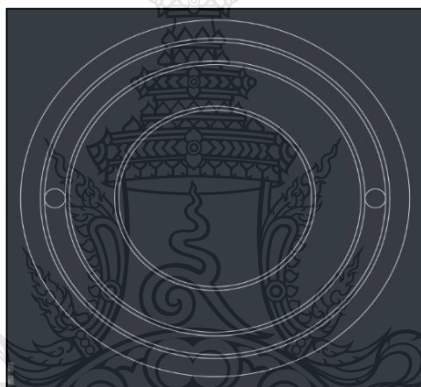
รูปที่ 3.9 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม



รูปที่ 3.10 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด 400 mm<sup>2</sup> แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม



รูปที่ 3.11 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด  $400 \text{ mm}^2$  แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE  $2.75 \text{ mm}^2$



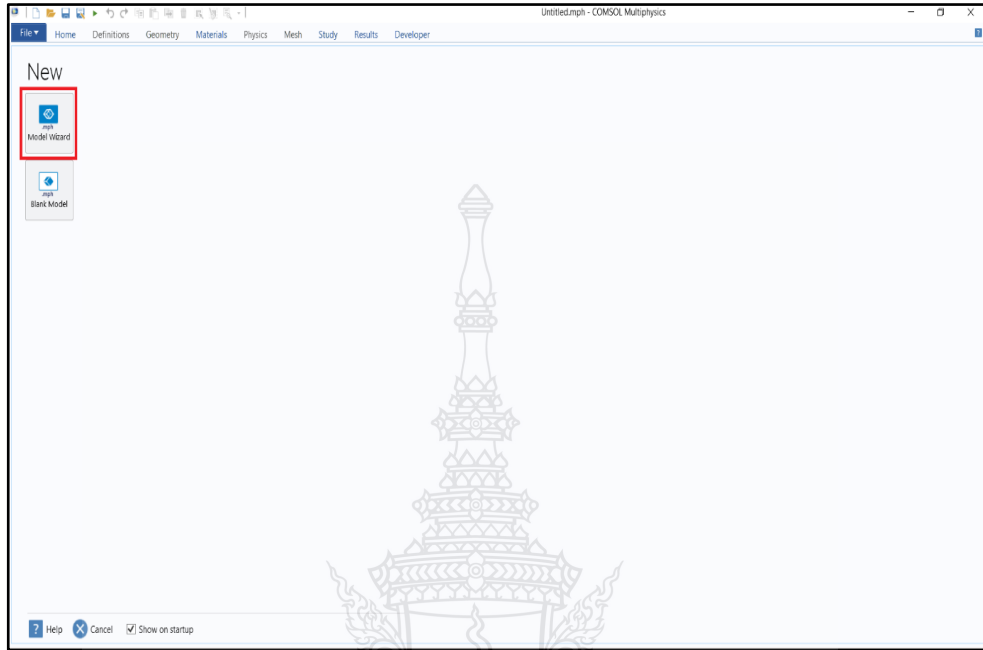
รูปที่ 3.12 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด  $400 \text{ mm}^2$  แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE  $5.5 \text{ mm}^2$



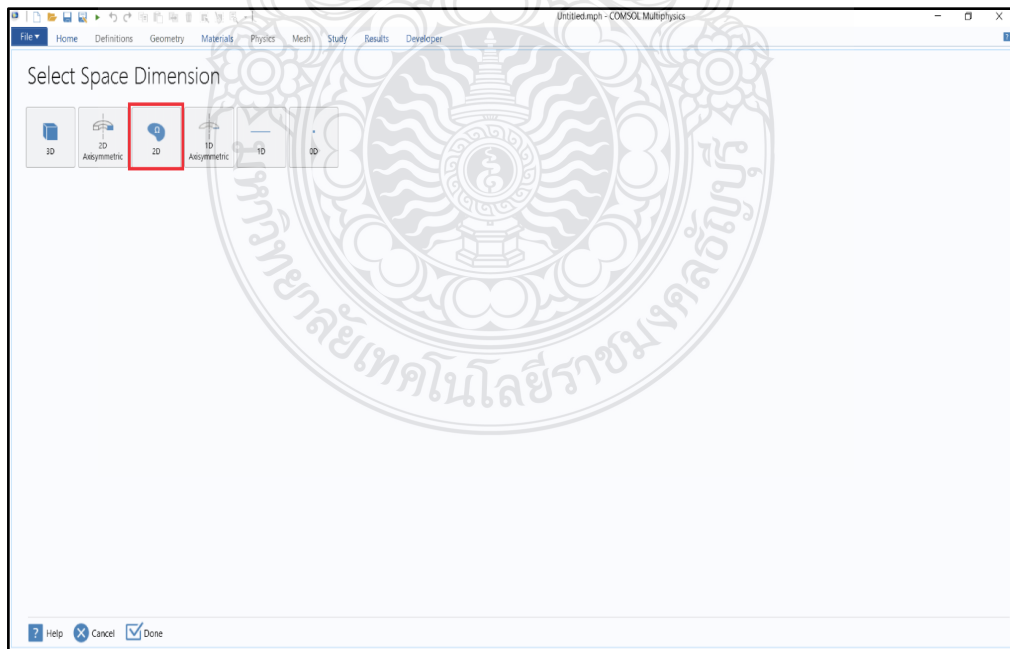
รูปที่ 3.13 แบบจำลองภาพตัดจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE 12/20 24(kV) ขนาด  $400 \text{ mm}^2$  แบบต่อกราวนด์กลม 2 จุด ที่ความหนา XLPE  $8.25 \text{ mm}^2$



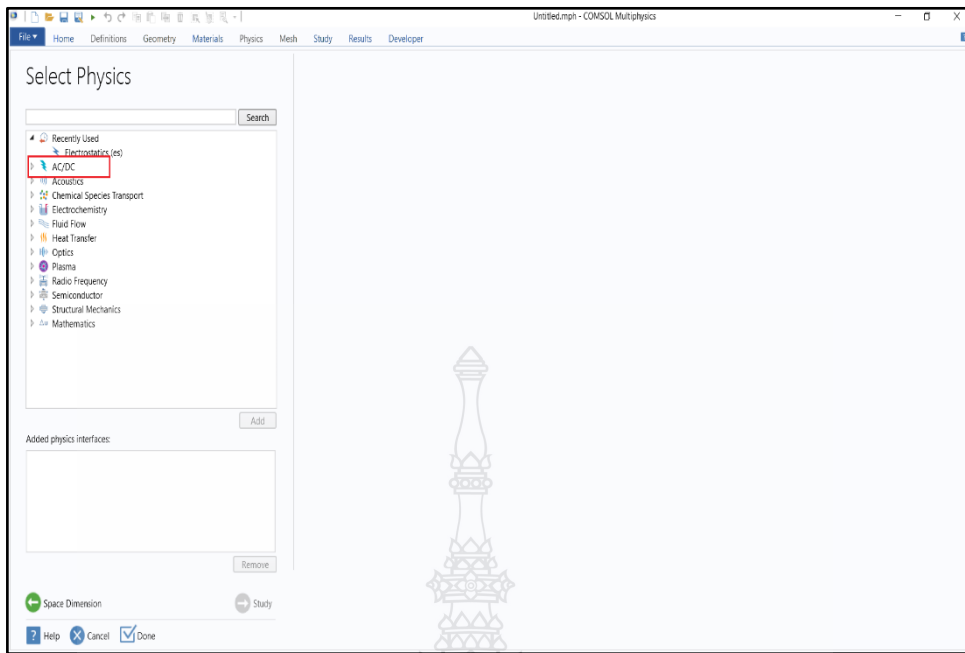
ขั้นตอนที่ 3 ทำการเปิดโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 แล้วจะปรากฏหน้าต่างต่างต่างตามรูปที่ 3.14 ถึง รูปที่ 3.17



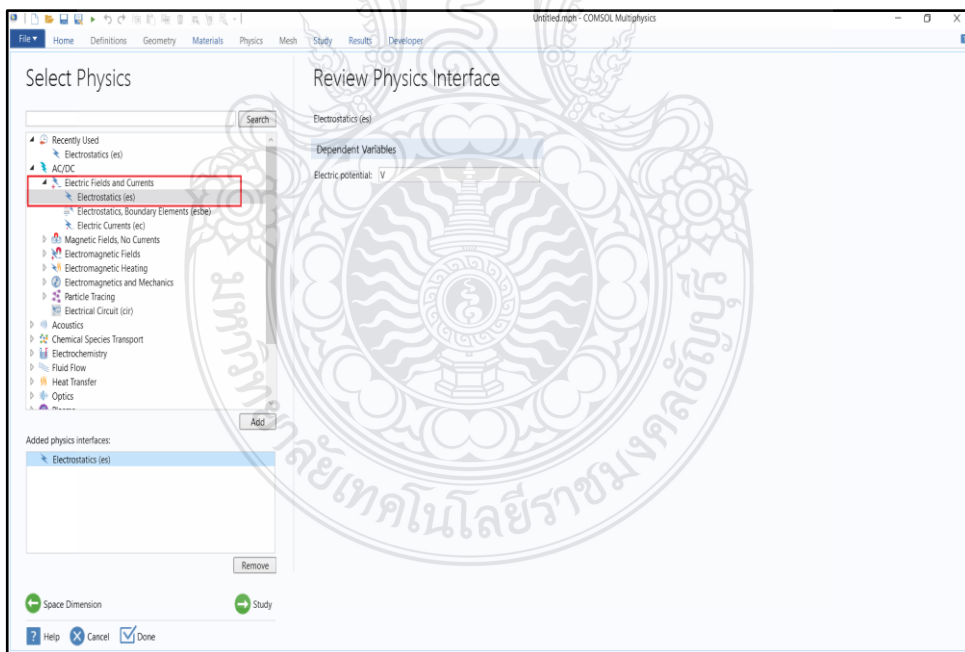
รูปที่ 3.14 เปิดโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5



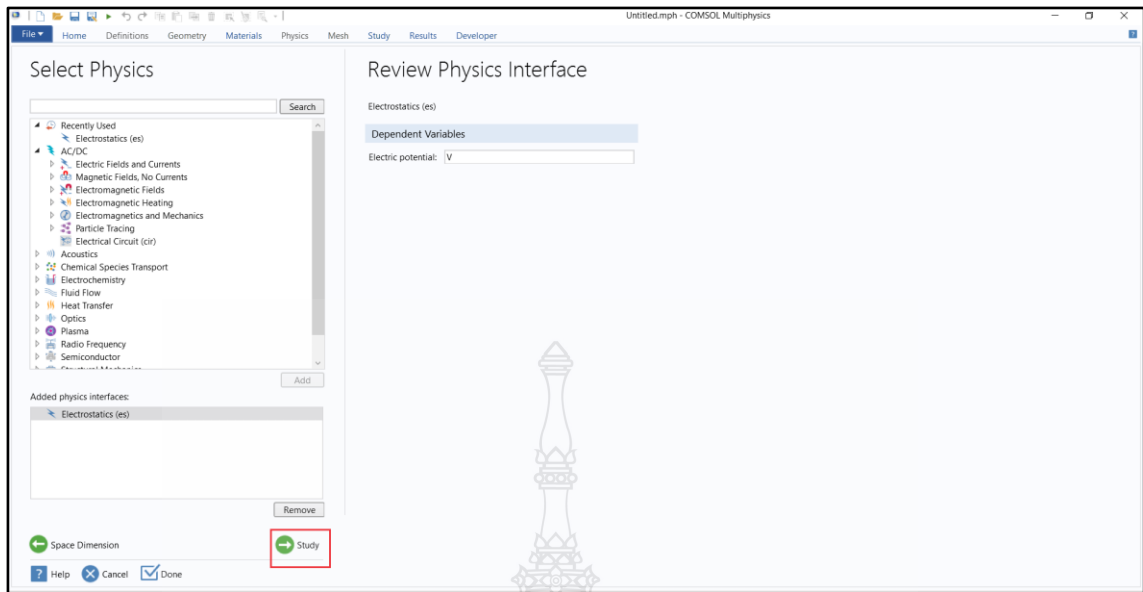
รูปที่ 3.15 เลือกจำลองแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.16 เลือกแบบจำลอง Select Physics คลิก AC/DC

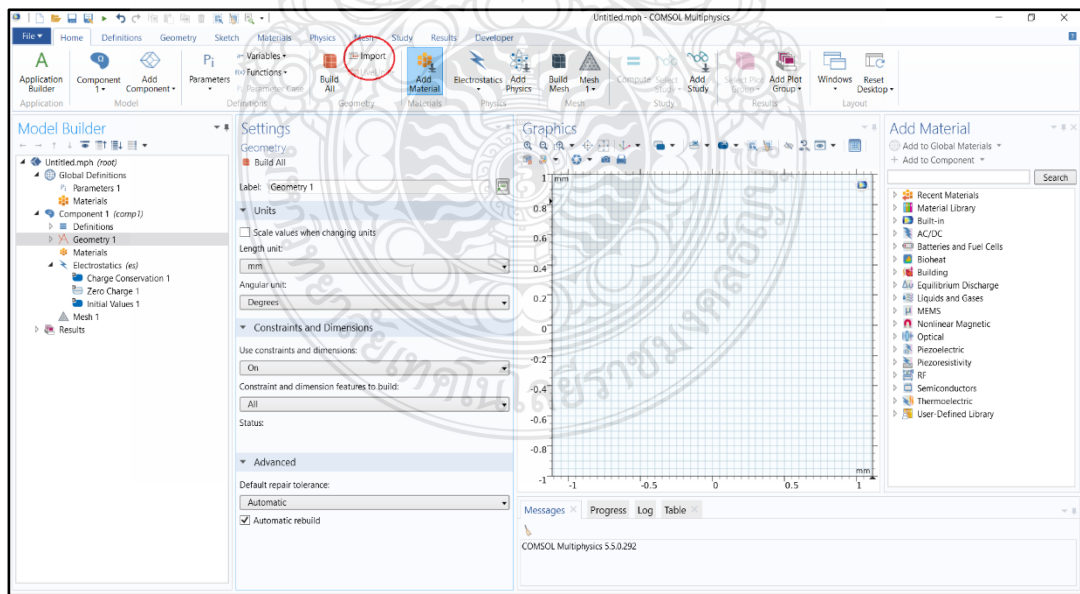


รูปที่ 3.17 เลือกแบบจำลอง Electric Fields and Currents คลิก Electrostatics

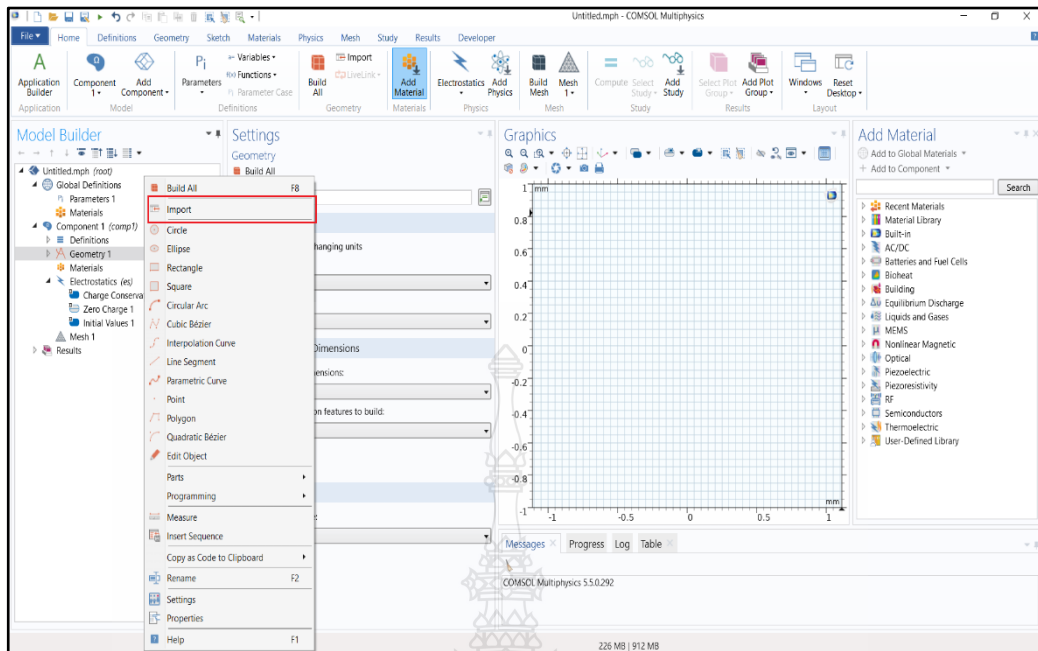


รูปที่ 3.18 เลือกแบบจำลอง Select Physics คลิก Study

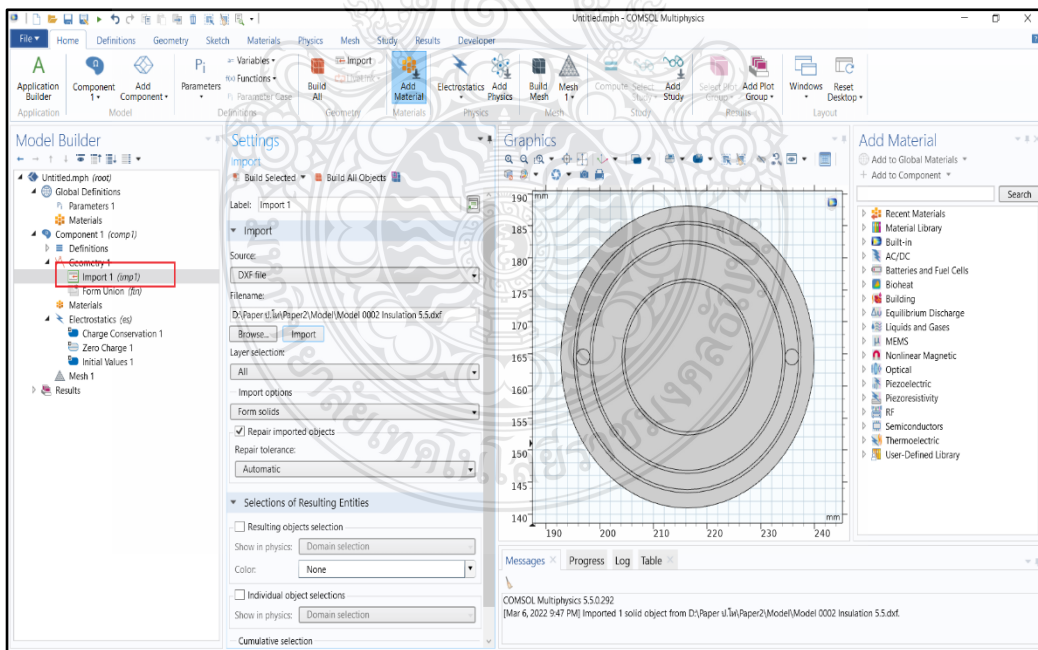
ขั้นตอนที่ 4 ทำการ Import ไฟล์ Auto Cad ที่ออกแบบข้างต้นเข้ามาในโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยทำการคลิกขวาที่ Geometry เลือก Import ซึ่งจะปรากฏตามรูปที่ 3.19 ถึงรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.19 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics

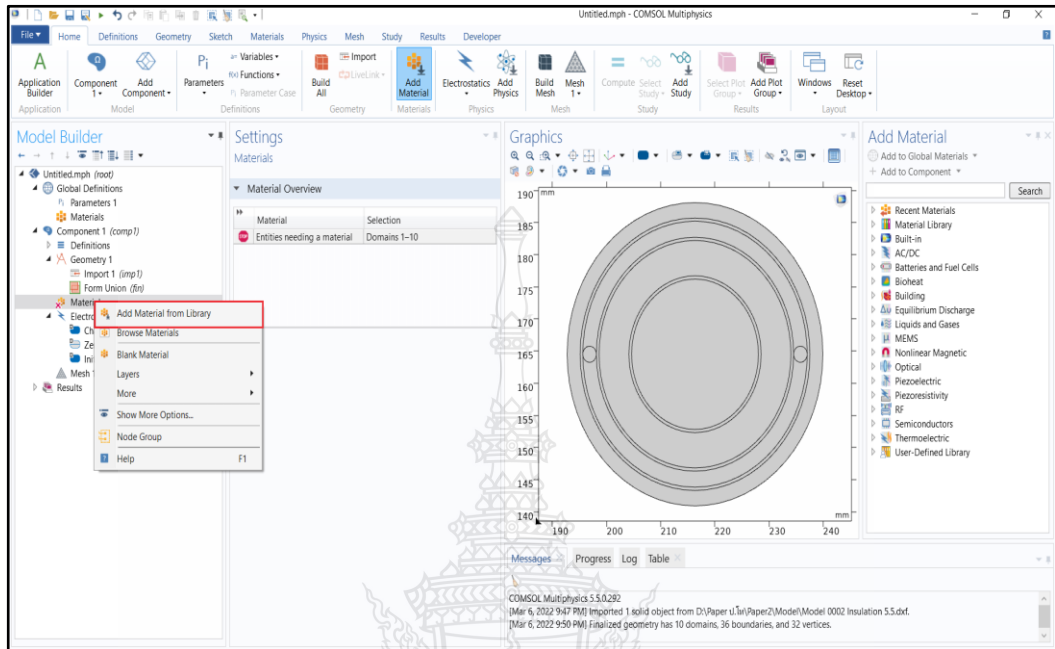


รูปที่ 3.20 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics คลิกขวา Geometry → คลิก Import

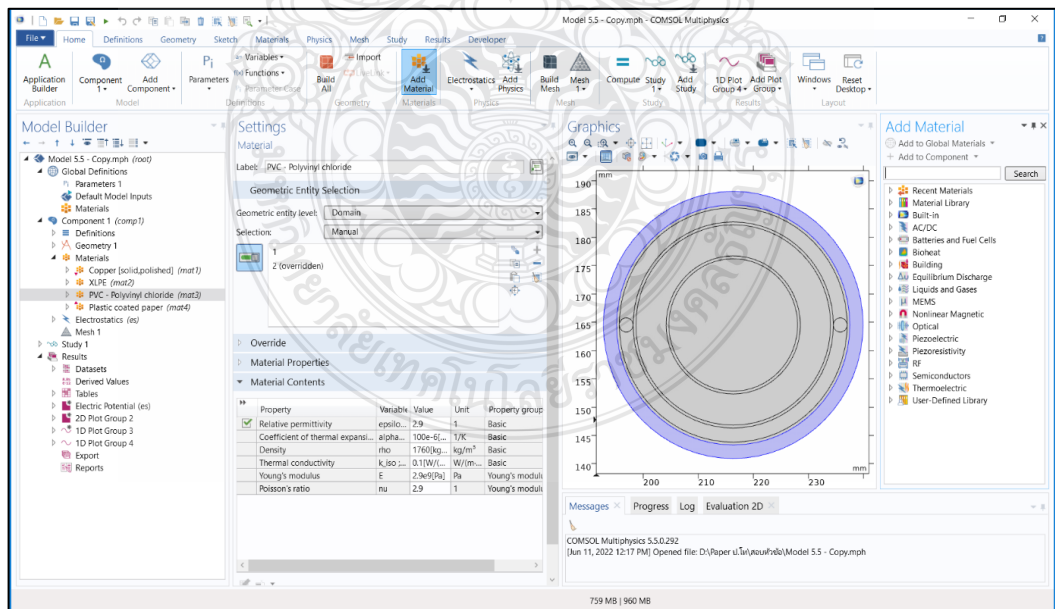


รูปที่ 3.21 การเลือกแบบจำลองลงในโปรแกรม Comsol Multiphysics คลิก Browse เลือกไฟล์ที่ได้ทำการจำลองไว้ → คลิก Import

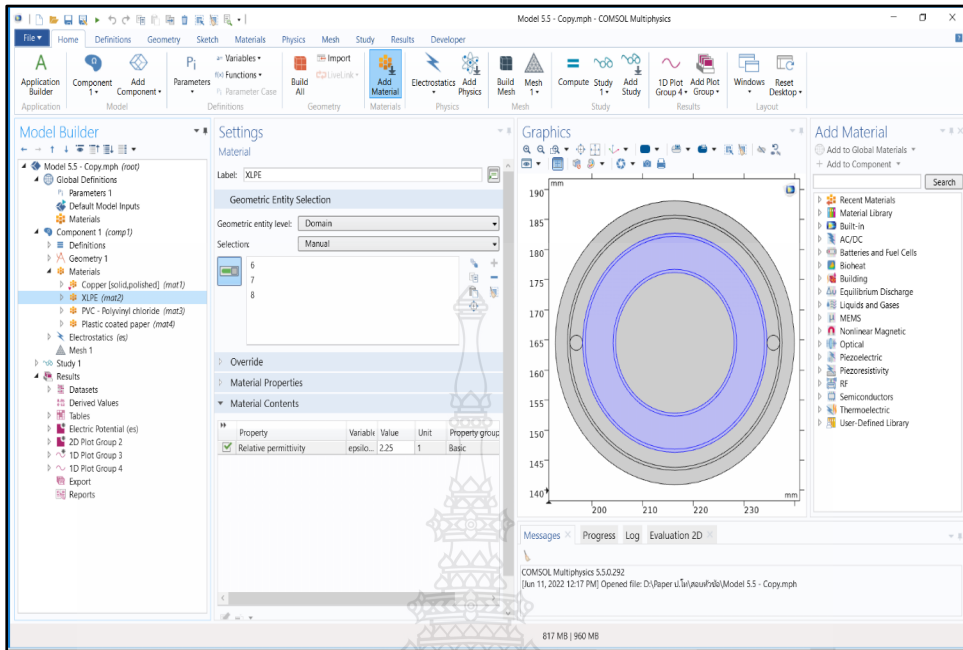
ขั้นตอนที่ 5 ทำการเพิ่มวัสดุ และตั้งค่าวัสดุให้ครบซึ่งหน้าตาจะปรากฏตาม รูปที่ 3.22 ถึง รูปที่ 3.25



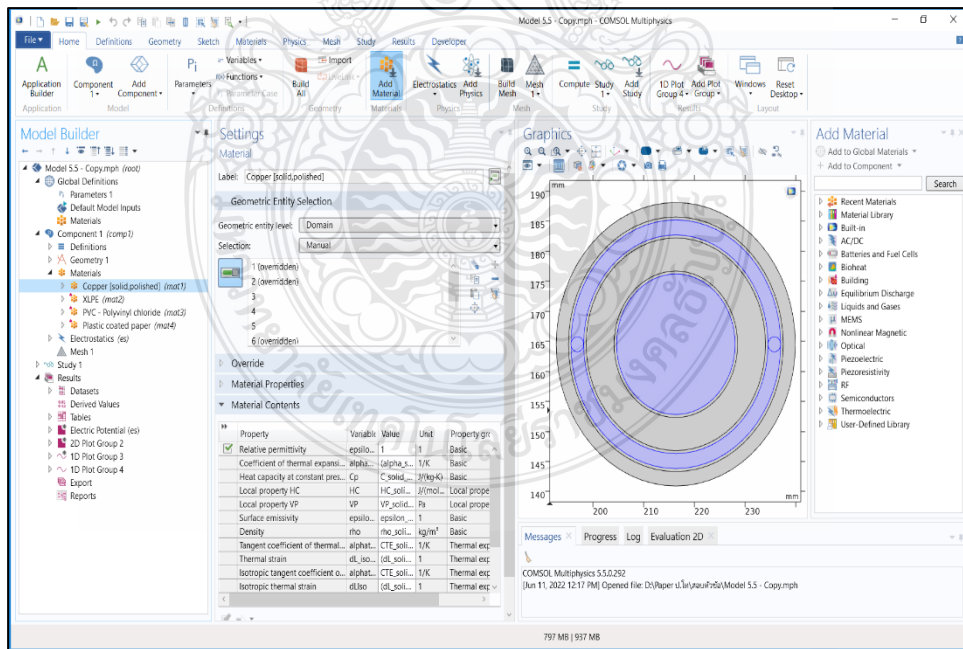
รูปที่ 3.22 เพิ่มวัสดุของแบบจำลอง → คลิก Add Material



รูปที่ 3.23 เพิ่มวัสดุ PVC ของแบบจำลอง

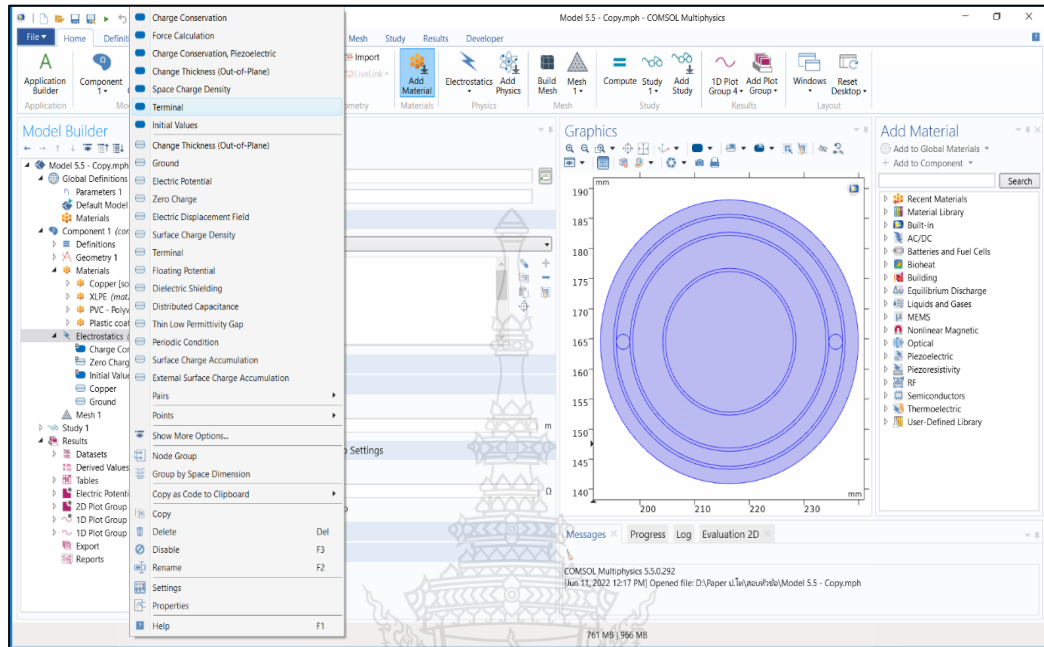


รูปที่ 3.24 เพิ่มวัสดุ XLPE ของแบบจำลอง

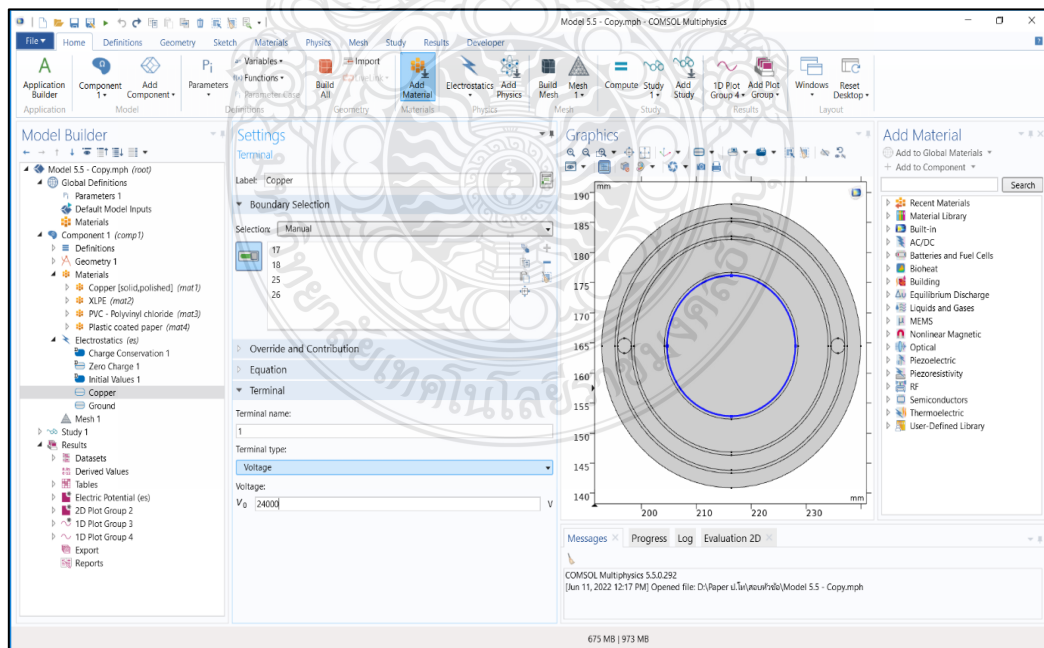


รูปที่ 3.25 เพิ่มวัสดุ Copper ของแบบจำลอง

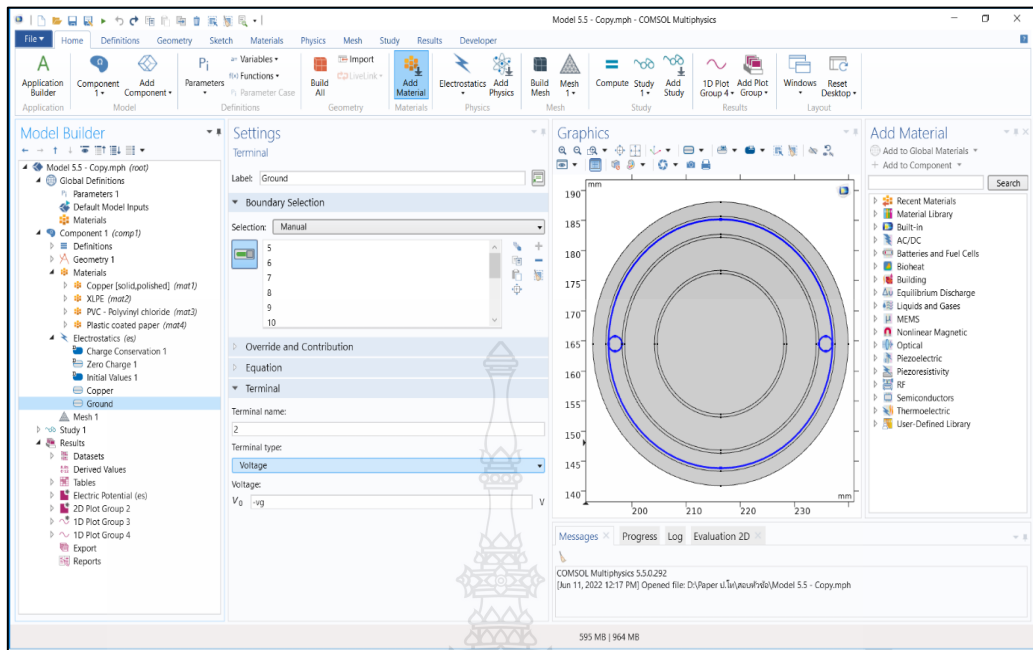
ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่าจำลองหาค่าสนามไฟฟ้า Electrostatics ซึ่งหน้าต่างจะปรากฏตามรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.25



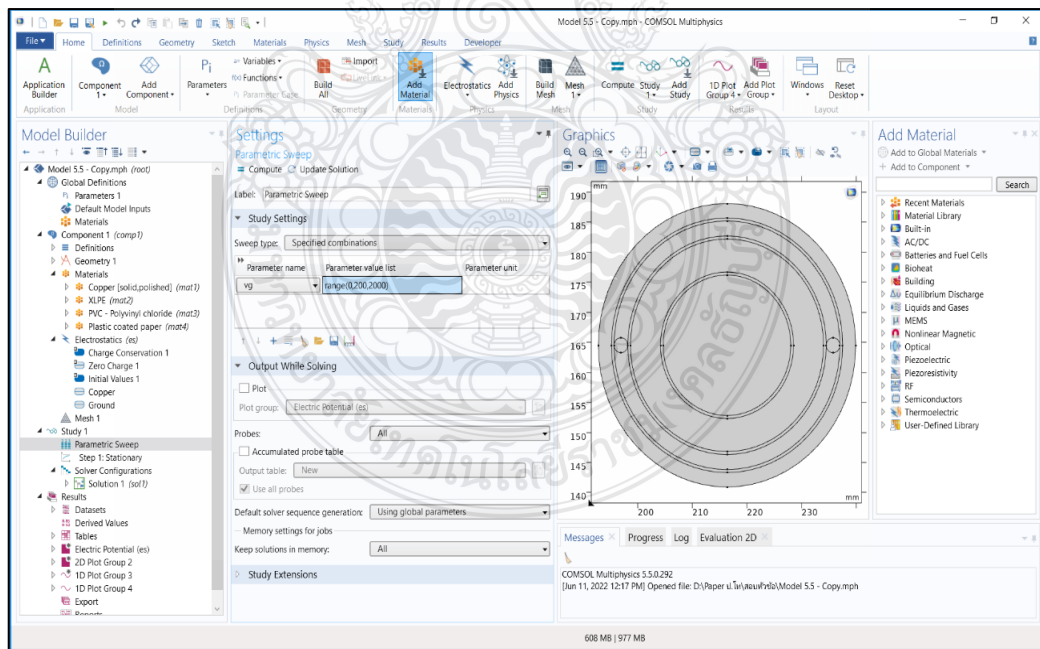
รูปที่ 3.26 ตั้งค่าการจำลองสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.27 เลือกที่ตัวนำและตั้งค่าแรงดัน



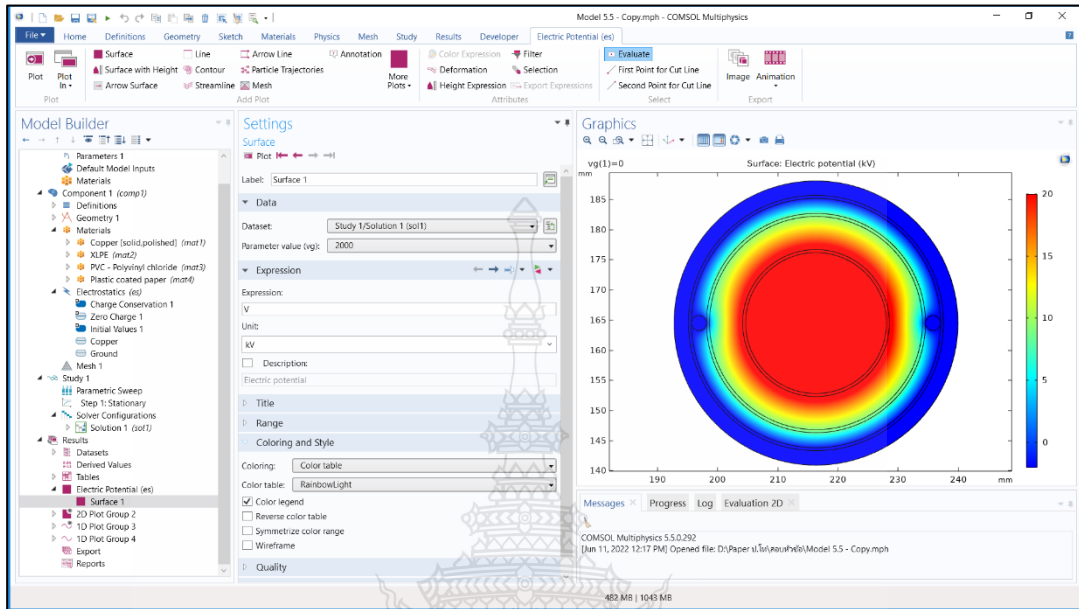
รูปที่ 3.28 การตั้งค่า Ground



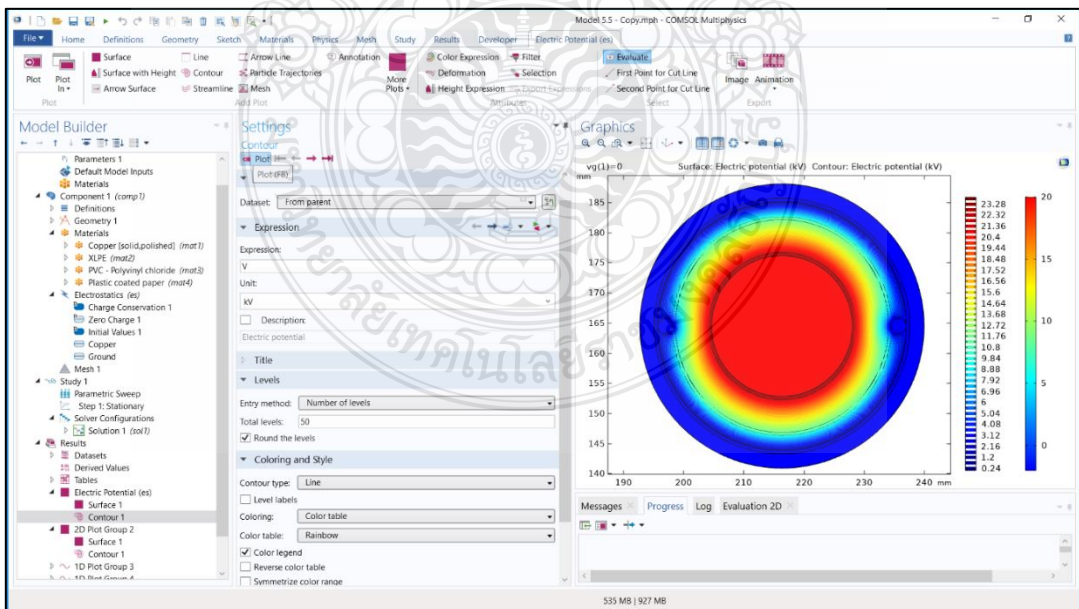
รูปที่ 3.29 การตั้งค่า Rang ของ Ground



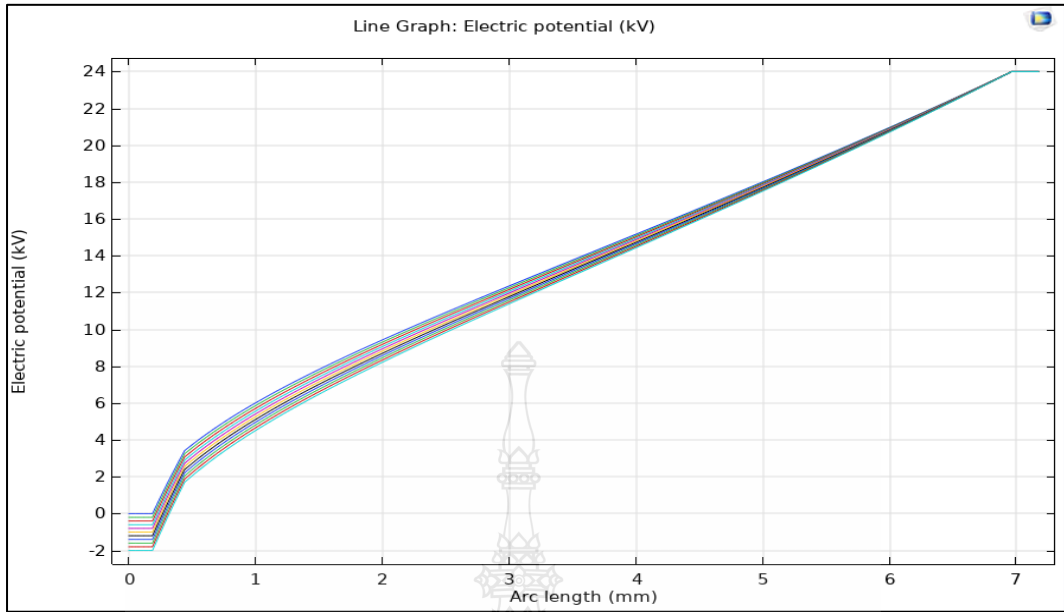
ขั้นตอนที่ 7 ผลของ Electric Potential ซึ่งหน้าต่างจะปรากฏตาม รูปที่ 3.30 ถึง รูปที่ 3.32 ซึ่งเป็นภาพแสดงกราฟของศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 ค่าของศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์

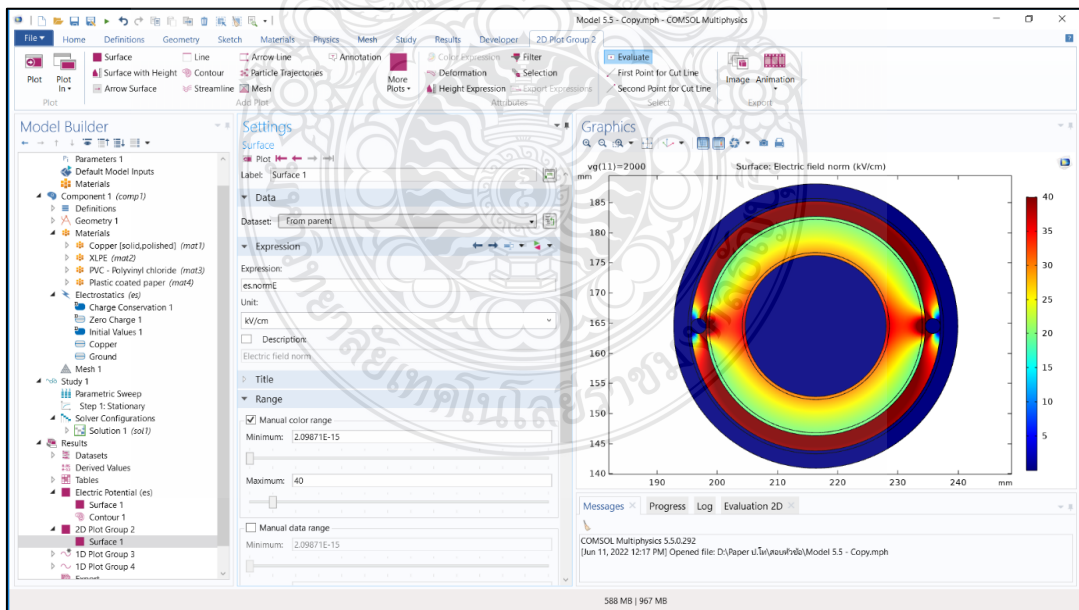


รูปที่ 3.31 ค่าการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์

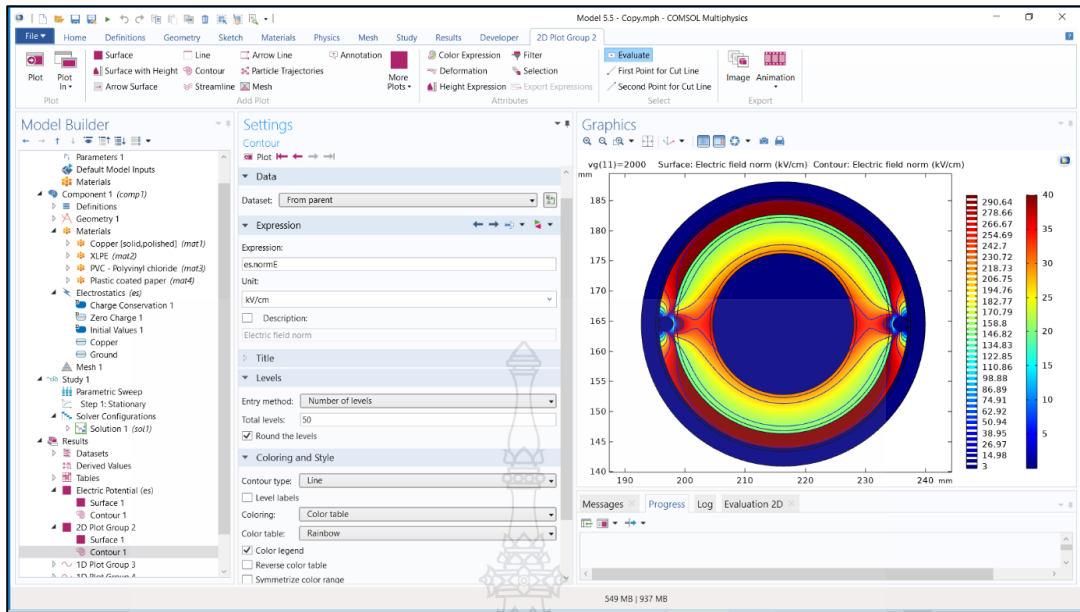


รูปที่ 3.32 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์

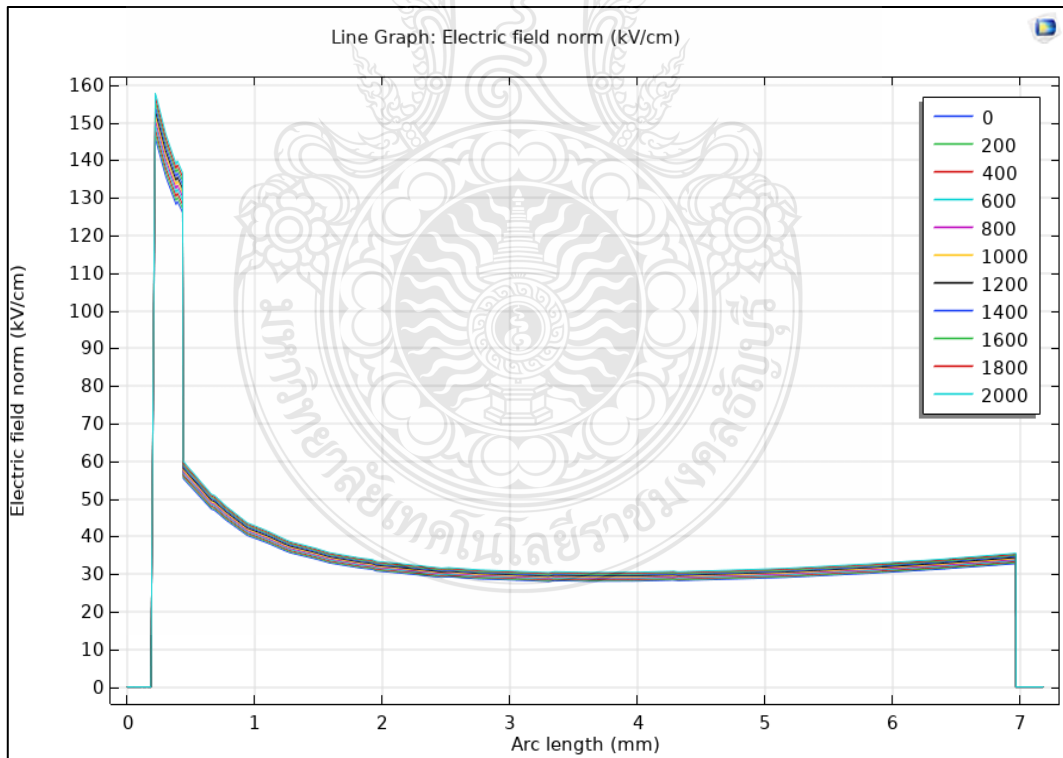
ขั้นตอนที่ 8 ผลของ Electric Field ซึ่งหน้าต่างจะปรากฏตาม รูปที่ 3.30 ถึง รูปที่ 3.32 ซึ่งเป็นภาพแสดงกราฟของสนามไฟฟ้า



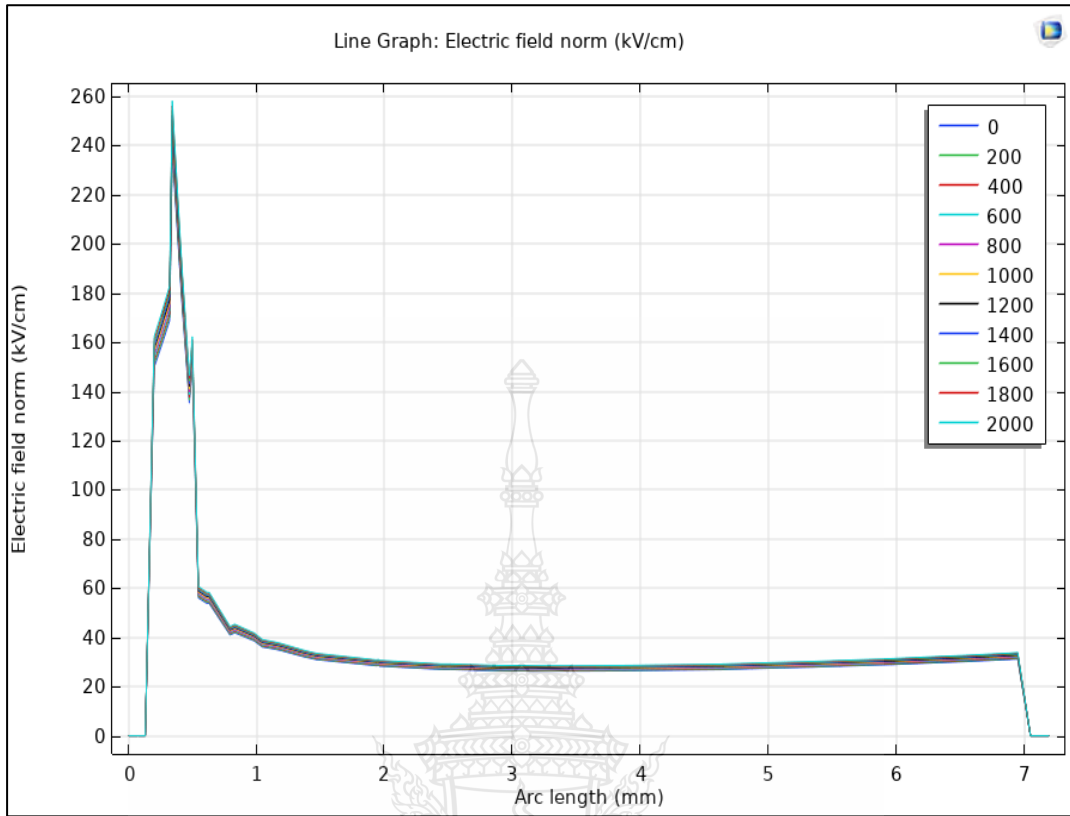
รูปที่ 3.33 ค่าของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์



รูปที่ 3.34 ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์



รูปที่ 3.35 กราฟแสดงค่าการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวนด์แบบ 2 จุด กลม



รูปที่ 3.36 กราฟแสดงค่าการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์แบบ 2 จุด เหลี่ยม

### 3.4 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย

จากการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลใต้ดิน พิกัด 24 kV โดยต่อกราวด์ แบบ 1 จุดต่อ 2 จุดต่อและ 3 จุดต่อ ซึ่งแยกเป็น จุดต่อกราวด์แบบกลม และ แบบเหลี่ยม

ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลใต้ดิน พบว่า รูปแบบการต่อกราวด์กลม มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุดกราวด์น้อยที่สุดและเปรียบเทียบระหว่างจุดต่อกราวด์ 1 จุดต่อ 2 จุดต่อและ 3 จุดต่อ พบว่าการเพิ่มจุดต่อกราวด์มากยิ่งขึ้นนั้นไม่ได้ช่วยให้การกระจายสนามไฟฟ้ารอบจุดต่อกราวด์ดีขึ้น

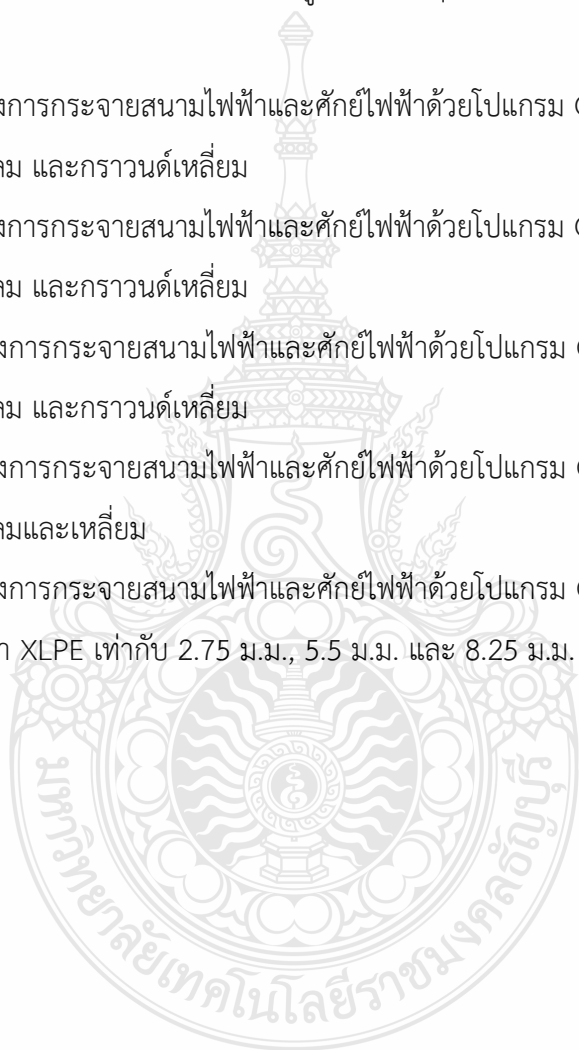
จึงสรุปได้ว่าการต่อสายเคเบิลใต้ดิน รูปแบบการต่อกราวด์กลมแบบ 1 จุดต่อ 2 จุด และ 3 จุดต่อจะไม่ส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้า แต่ถ้าต่อกราวด์แบบมีเหลี่ยมหรือจุดแหลมคม ไม่ว่าจะแบบ 1 จุดต่อ 2 จุดต่อ และ 3 จุดต่อ จะส่งผลให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้นมาก และจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เกิดความร้อน และสุดท้ายจะนำไปสู่การเกิดการทะลุผ่าน (Breakdown) ของฉนวนสายเคเบิลได้

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าบริเวณจุดเชื่อมต่อกาวานต์สำหรับสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินพิกัด 24 kV รูปแบบต่างๆ ด้วยโปรแกรม COMSOL เรียงลำดับดังต่อไปนี้

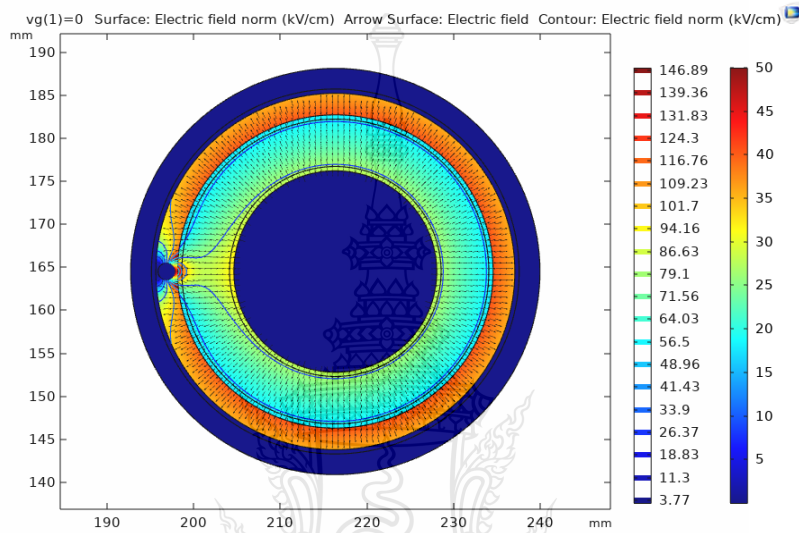
1. ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกาวานต์  
1 จุด ขั้วต่อกาวานต์กลม และกาวานต์เหลี่ยม
2. ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกาวานต์  
2 จุด ขั้วต่อกาวานต์กลม และกาวานต์เหลี่ยม
3. ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกาวานต์  
3 จุด ขั้วต่อกาวานต์กลม และกาวานต์เหลี่ยม
4. ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกาวานต์  
2 จุด ขั้วต่อกาวานต์กลมและเหลี่ยม
5. ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกาวานต์  
2 จุด ที่ขนาดความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม., 5.5 มม. และ 8.25 มม.



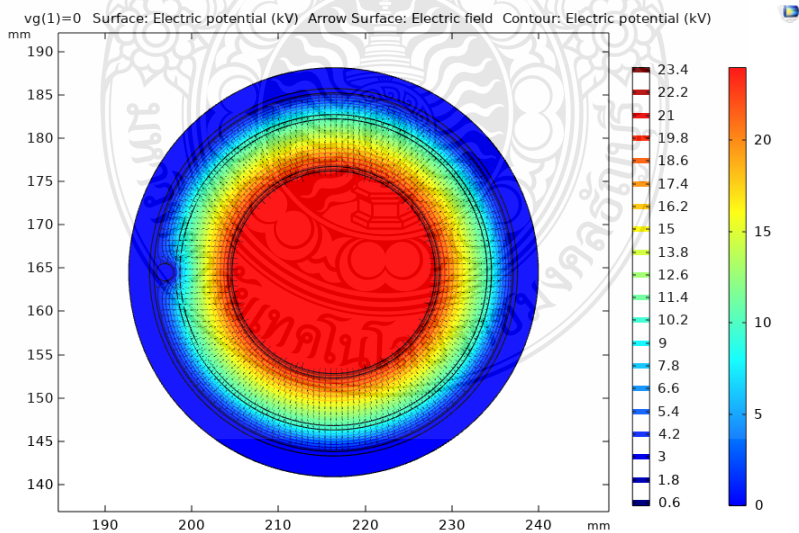
#### 4.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์

##### 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม

4.1.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 146.89 kV/cm ตามรูปที่ 4.1 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.2 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

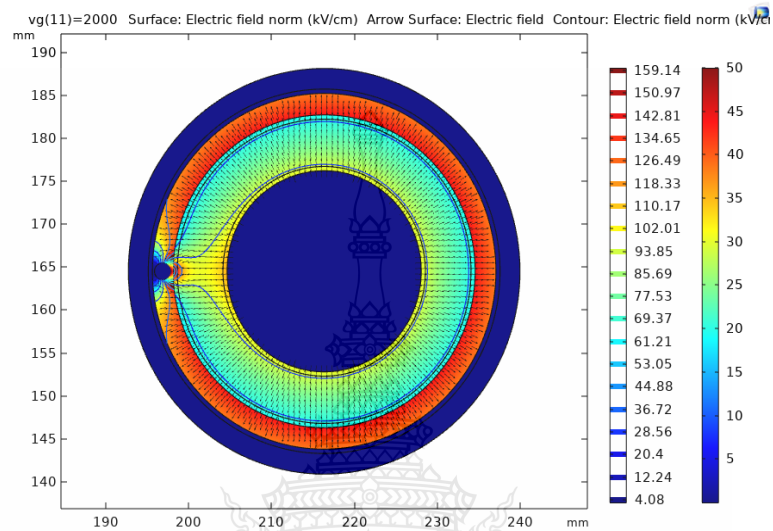


รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

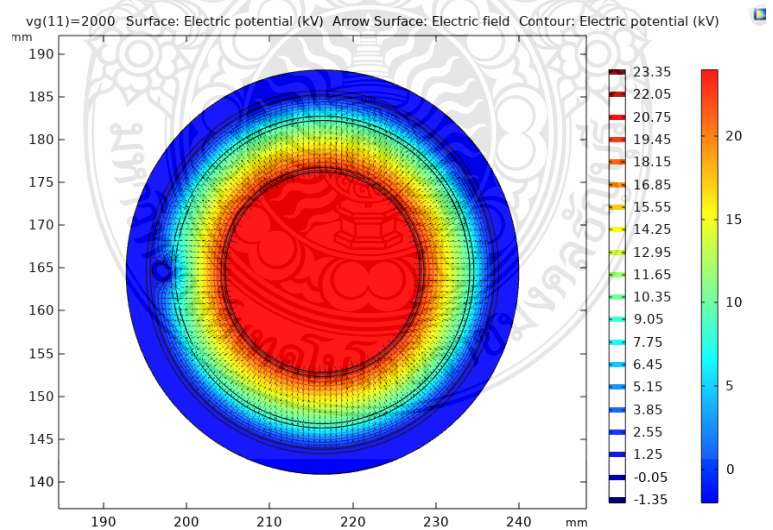


รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.1.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.14 kV/cm ตามรูปที่ 4.3 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.4 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 2000 V

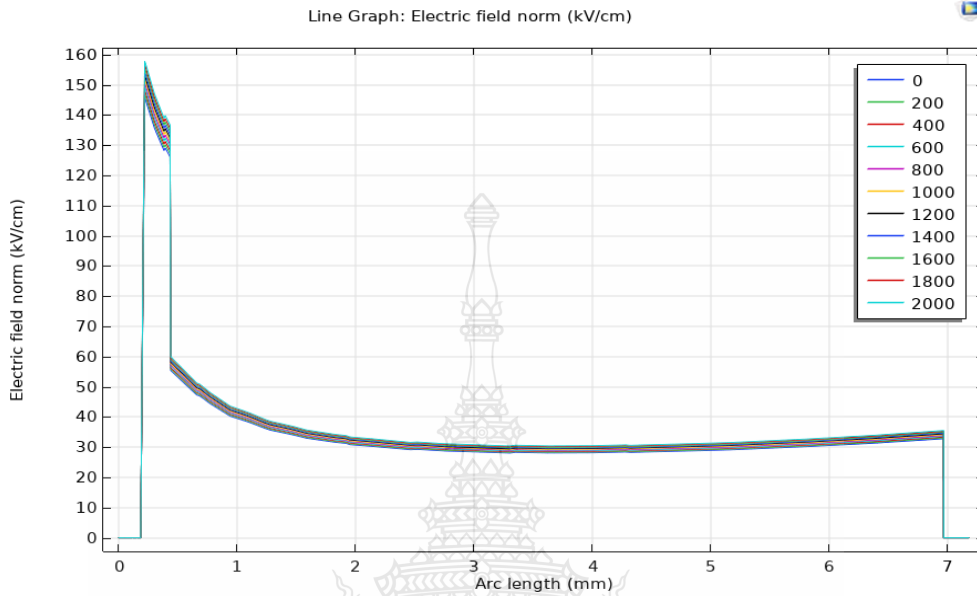


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

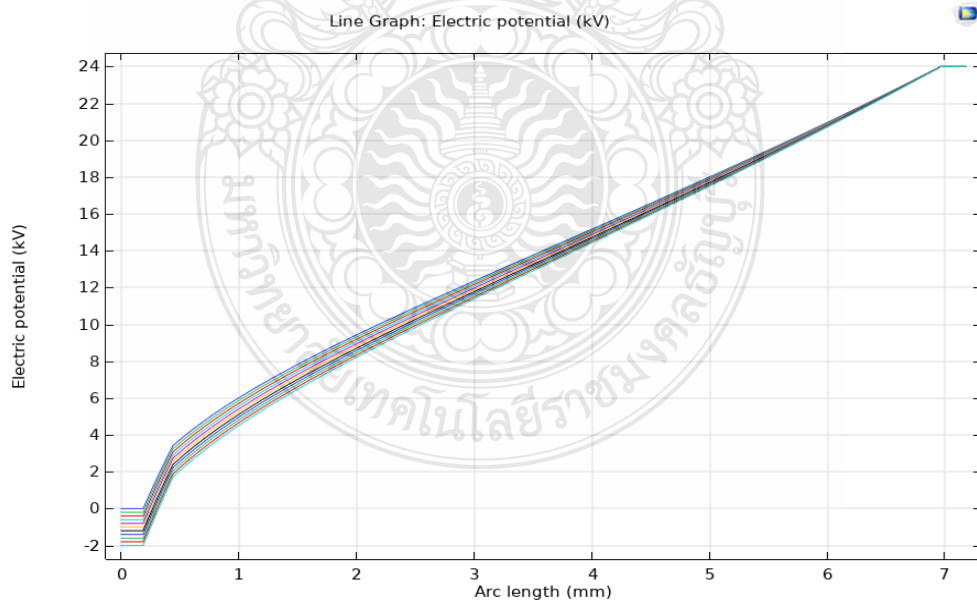


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

4.1.3 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



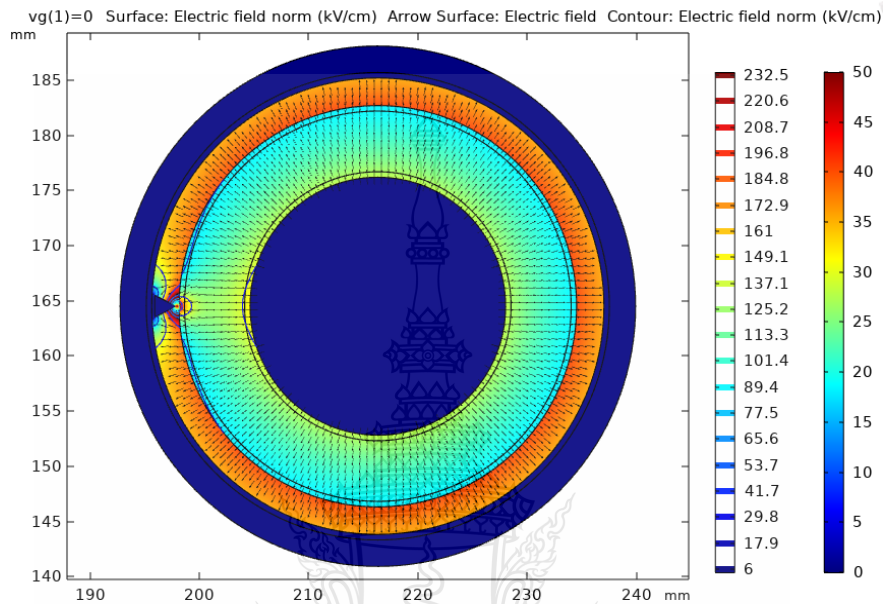
รูปที่ 4.5 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



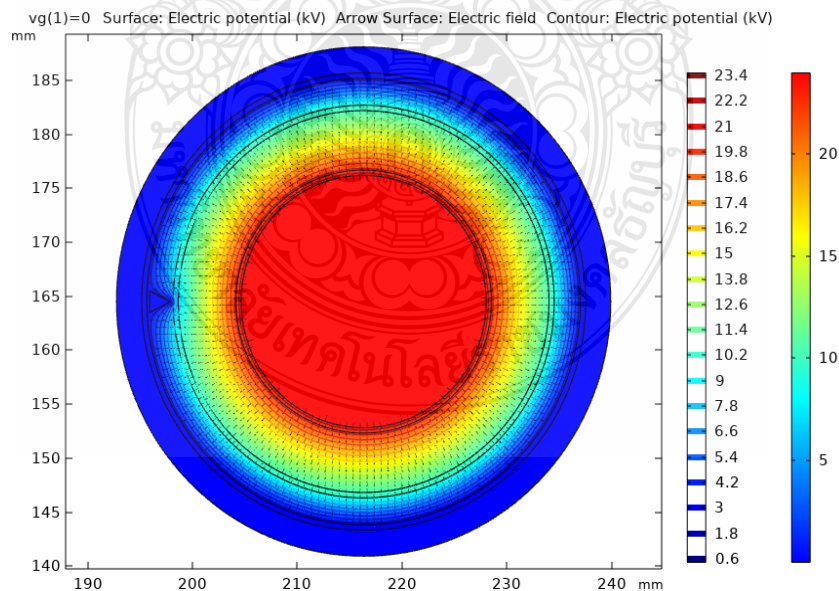
รูปที่ 4.6 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



4.1.4 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 232.2 kV/cm ตามรูปที่ 4.7 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.8 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

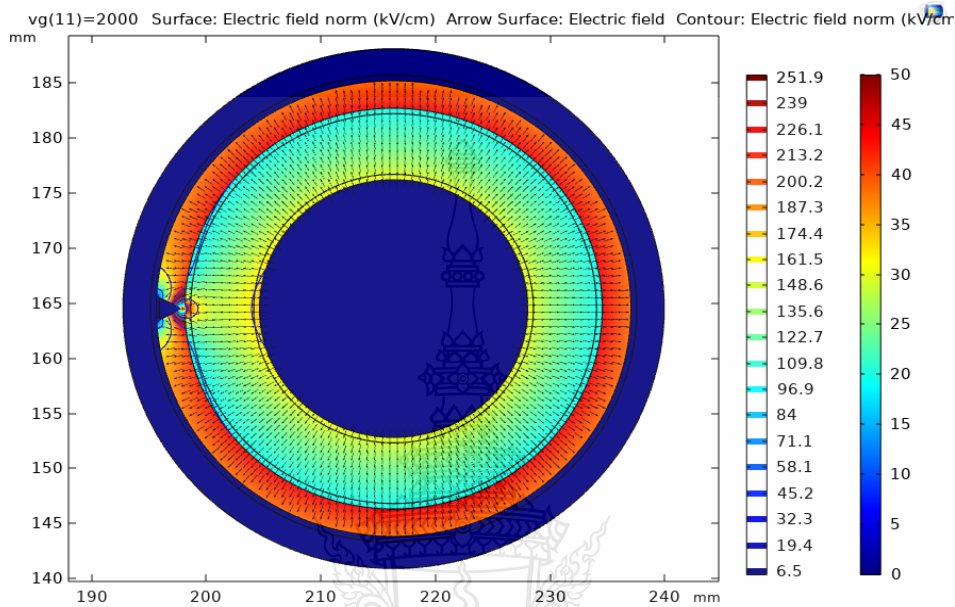


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

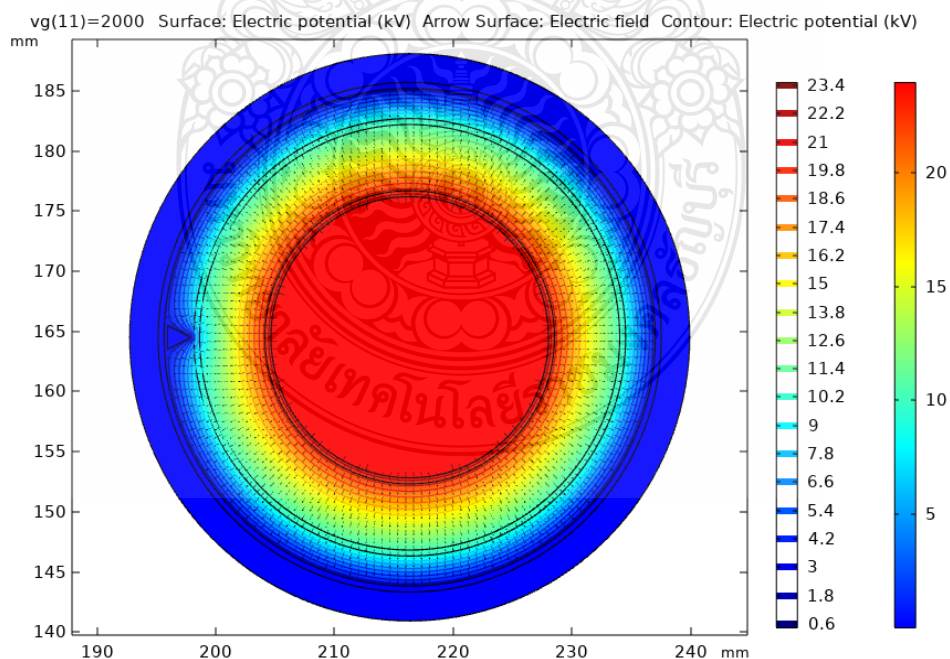


รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.1.5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวด์ 1 จุด ขั้วต่อกราวด์เหลี่ยมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 251.9 kV/cm ตามรูปที่ 4.9 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.10 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวด์ 2000 V

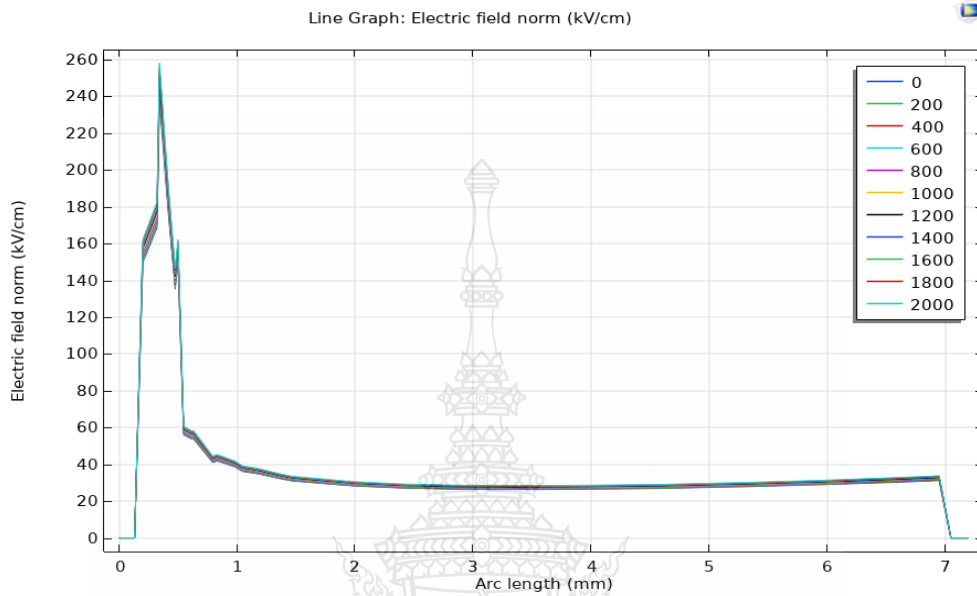


รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

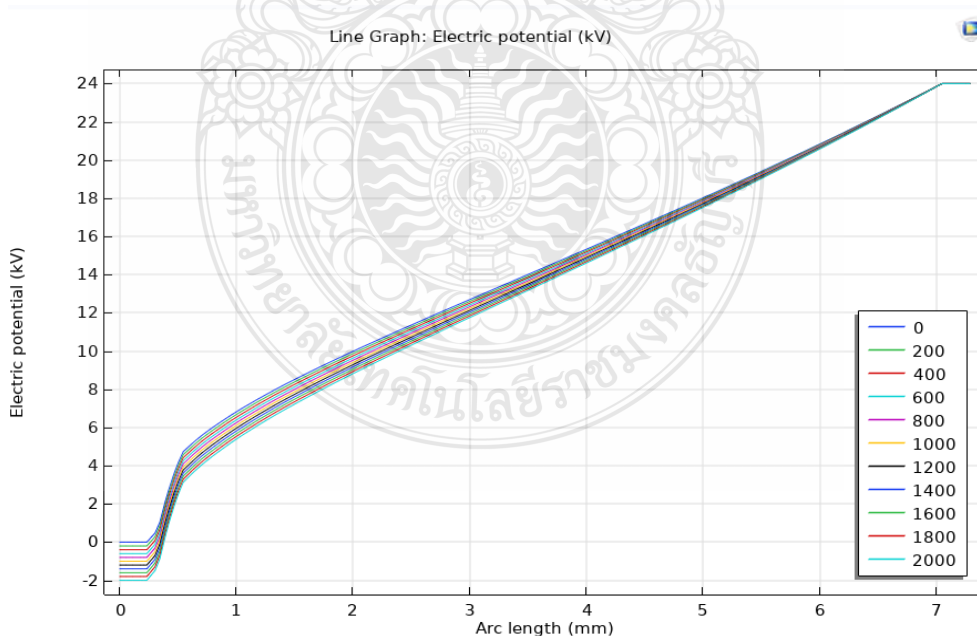


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวด์แบบเหลี่ยม 1 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

4.1.6 กราฟแสดงผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 1 จุด แบบกราวนด์เหลี่ยม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 – 2000 V ตามรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12



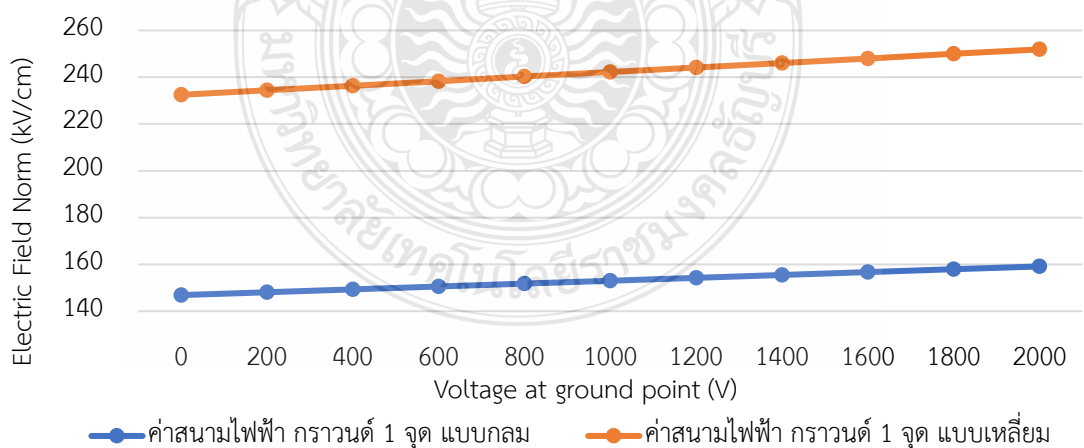
รูปที่ 4.11 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



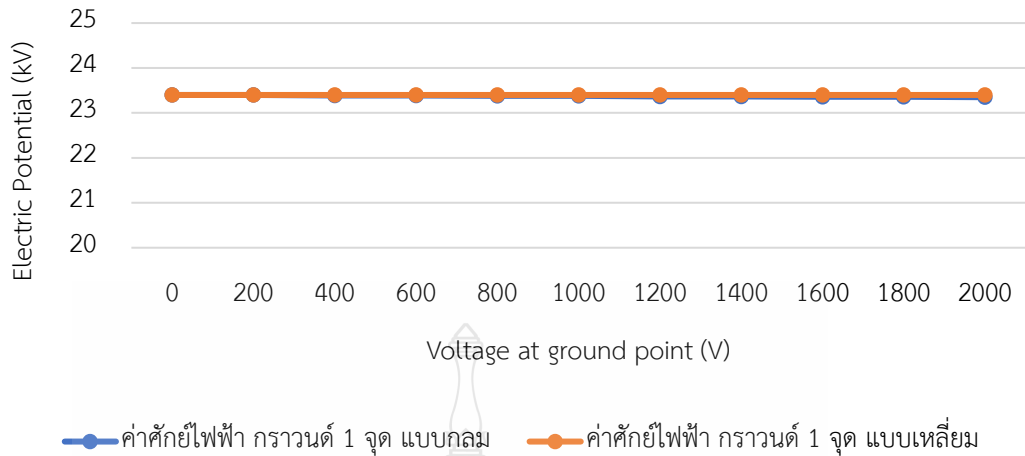
รูปที่ 4.12 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V

ตารางที่ 1 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม

แรงดัน ที่จุดต่อกราวนด์ (V)	ค่าสนามไฟฟ้า		ค่าศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้า	
	แบบต่อกราวนด์ 1 จุด (kV/cm)		แบบต่อกราวนด์ 1 จุด (kV)	
	ต่อกราวนด์ แบบกลม	ต่อกราวนด์ แบบเหลี่ยม	ต่อกราวนด์ แบบกลม	ต่อกราวนด์ แบบเหลี่ยม
0	146.89	232.5	23.4	23.8
200	148.12	234.5	23.4	23.4
400	149.34	236.4	23.39	23.4
600	150.57	238.3	23.39	23.4
800	151.79	240.3	23.38	23.4
1000	153.01	242.2	23.38	23.4
1200	154.24	244.2	23.37	23.4
1400	155.46	246.1	23.37	23.4
1600	156.69	248.0	23.36	23.4
1800	157.91	250.0	23.36	23.4
2000	159.14	251.9	23.35	23.4



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด กราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

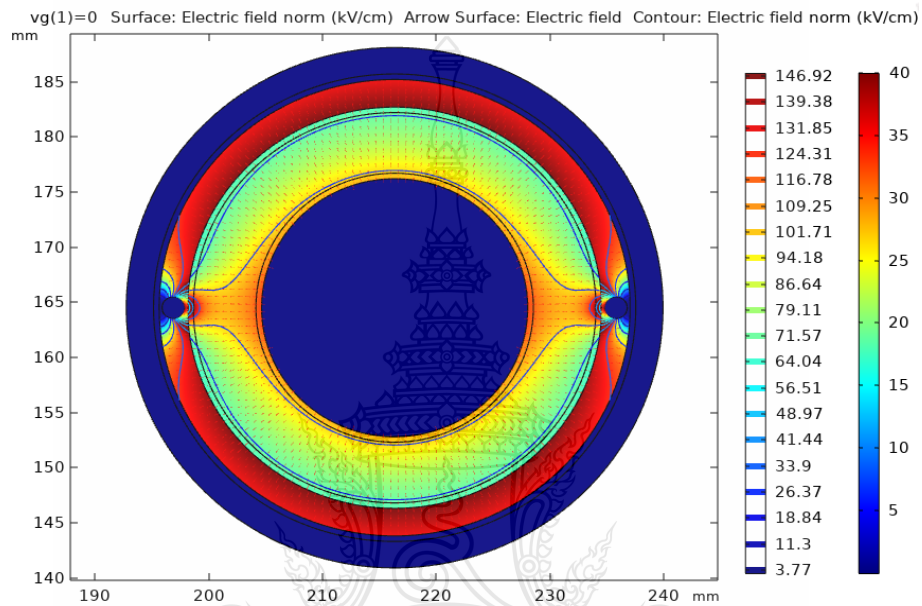
จากรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการต่อกราวด์แบบ 1 จุดในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน ไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 24 kV ผลการจำลองพบว่าจุดต่อกราวด์แบบเหลี่ยมหรือมีผิวแหลมคมที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดถึง 251.9 kV/cm เมื่อเทียบกับจุดต่อกราวด์แบบกลมหรือแบบมีผิวเรียบซึ่งจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.14 kV/cm เมื่อมีค่าแรงดันเกิดขึ้นที่จุดกราวด์ 2000 V ส่วนค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้านั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงดันที่จุดต่อกราวด์ 0 – 2000 V ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 23.4 kV

จากข้อมูลผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการต่อจุดกราวด์ที่ดีที่สุดต้องไม่ให้มีจุดเหลี่ยมหรือจุดแหลมคมที่บริเวณจุดต่อเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เกิดความร้อนสะสม และสุดท้ายจะนำไปสู่การเกิดการทะลุผ่าน (Breakdown) ของฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินได้

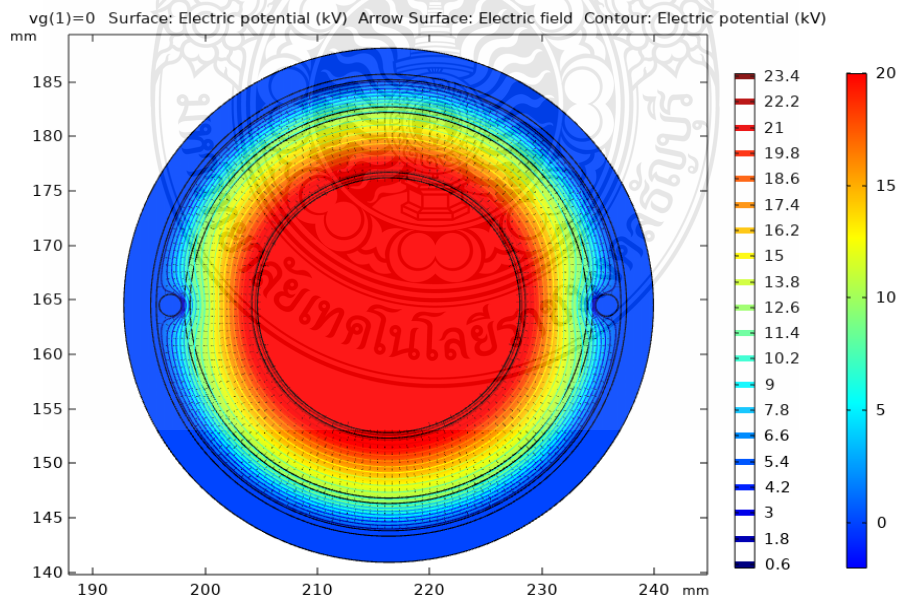
## 4.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์

### 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม

4.2.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 146.92 kV/cm ตามรูปที่ 4.15 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.16 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

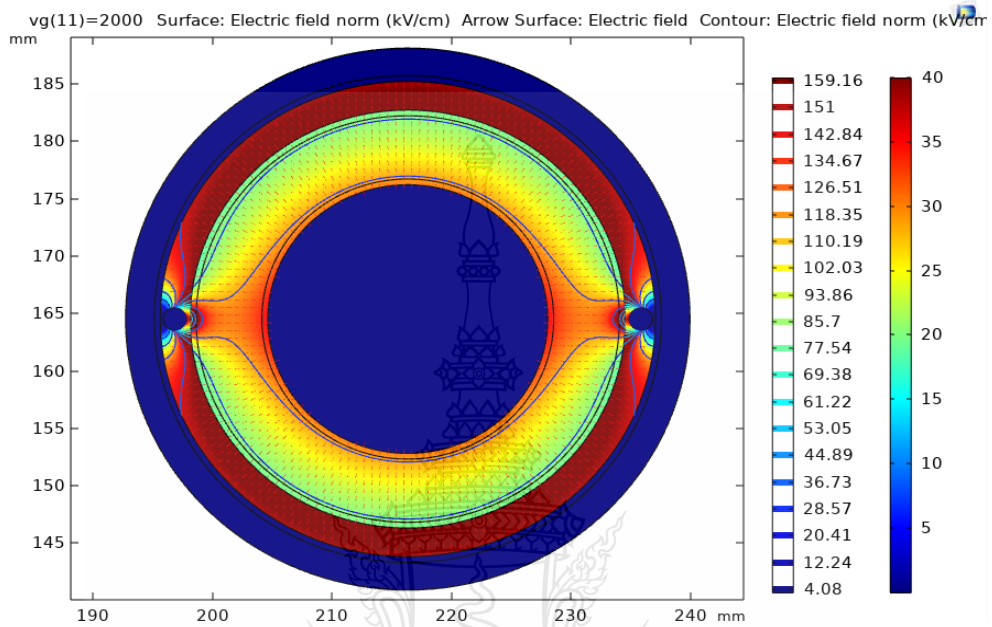


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

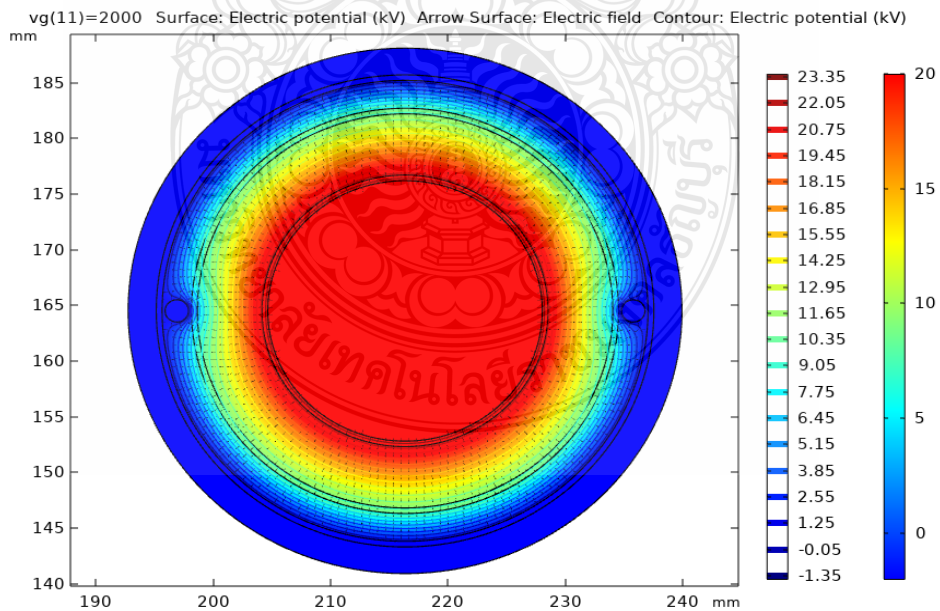


รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.2.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวด์กลมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.16 kV/cm ตามรูปที่ 4.17 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.18 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวด์ 2000 V

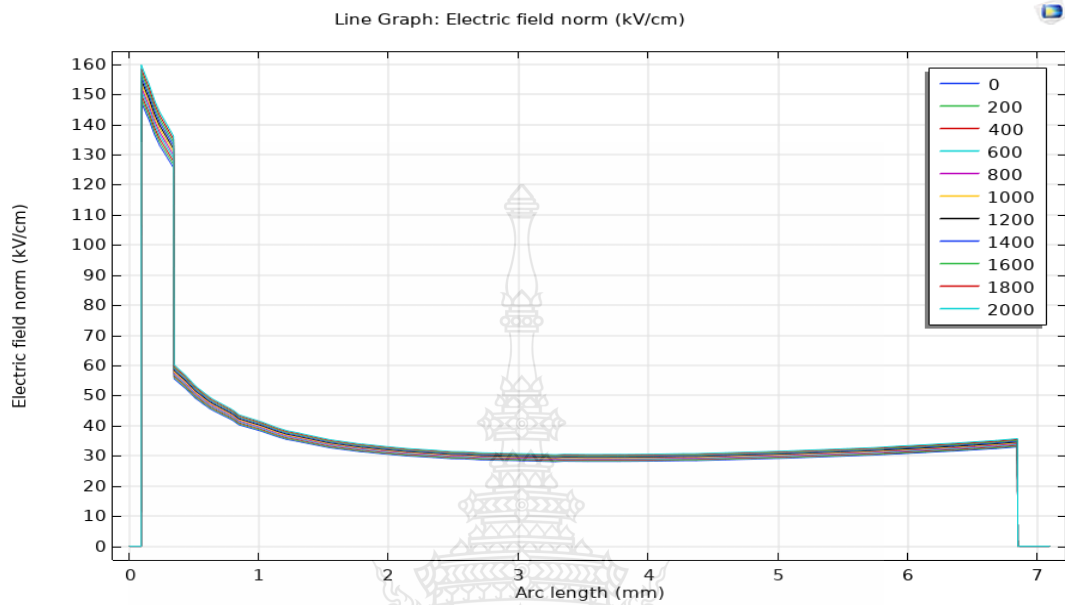


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวด์แบบกลม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

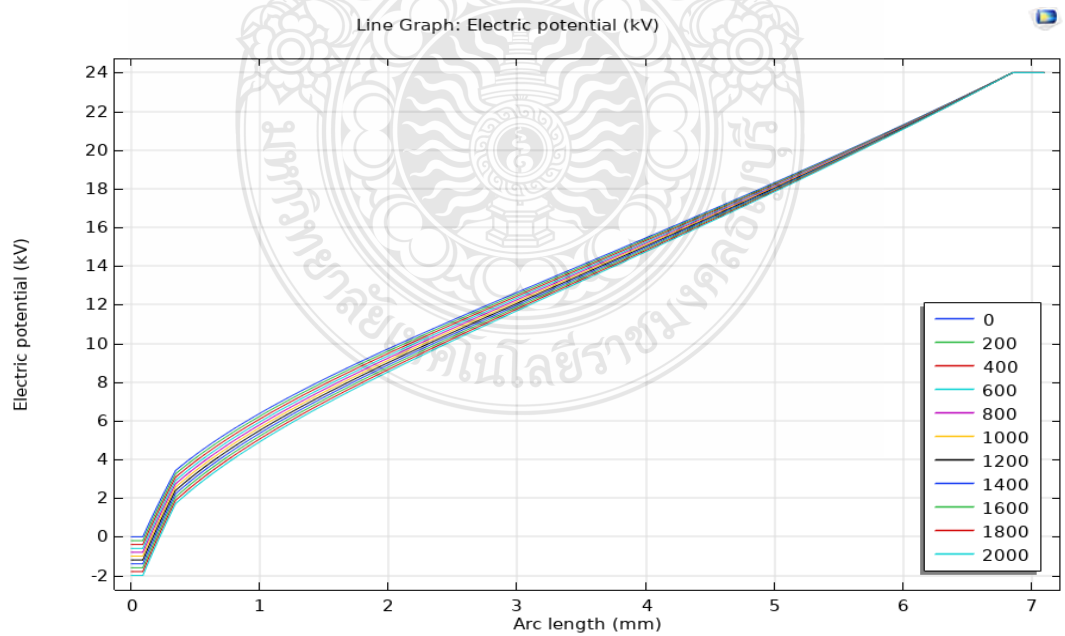


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวด์แบบกลม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

4.2.3 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด  
 ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.22

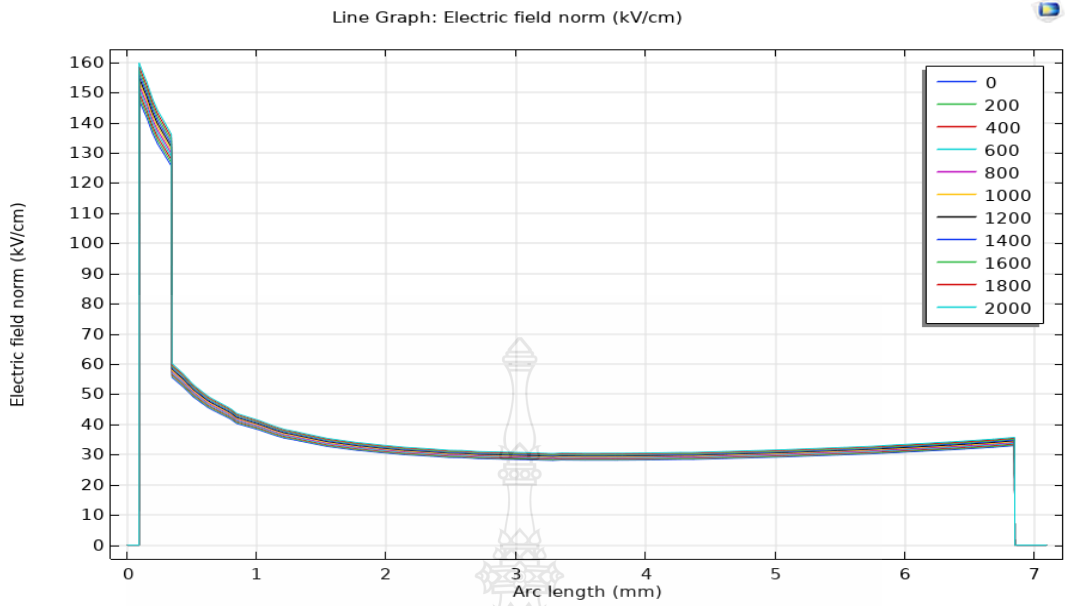


รูปที่ 4.19 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1

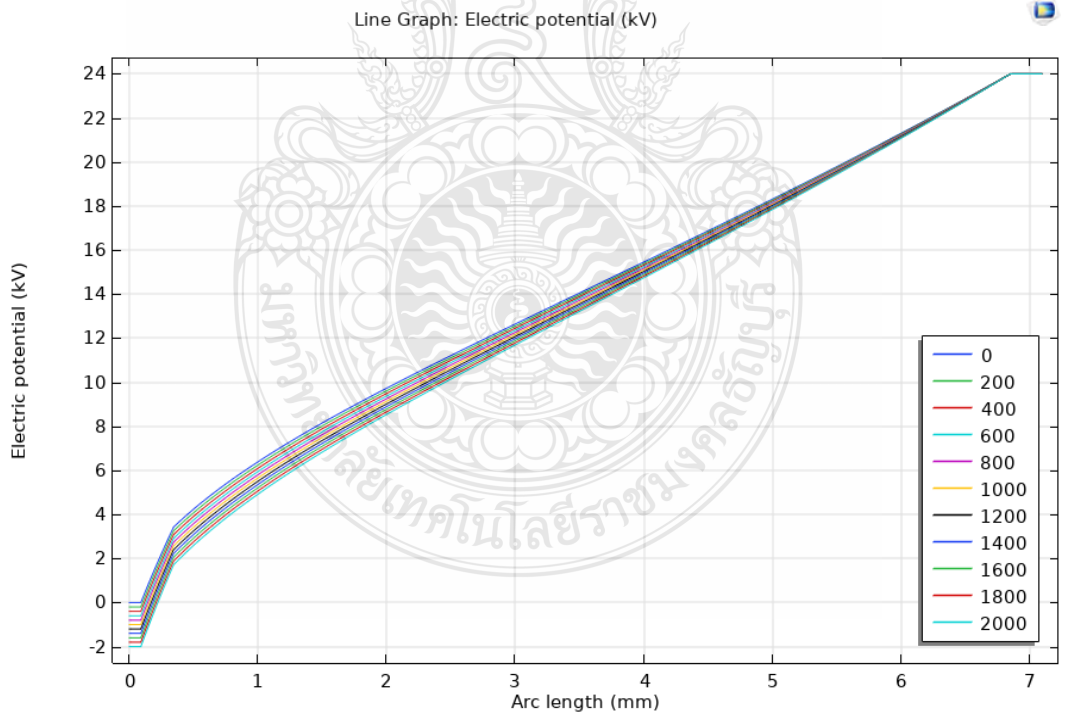


รูปที่ 4.20 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



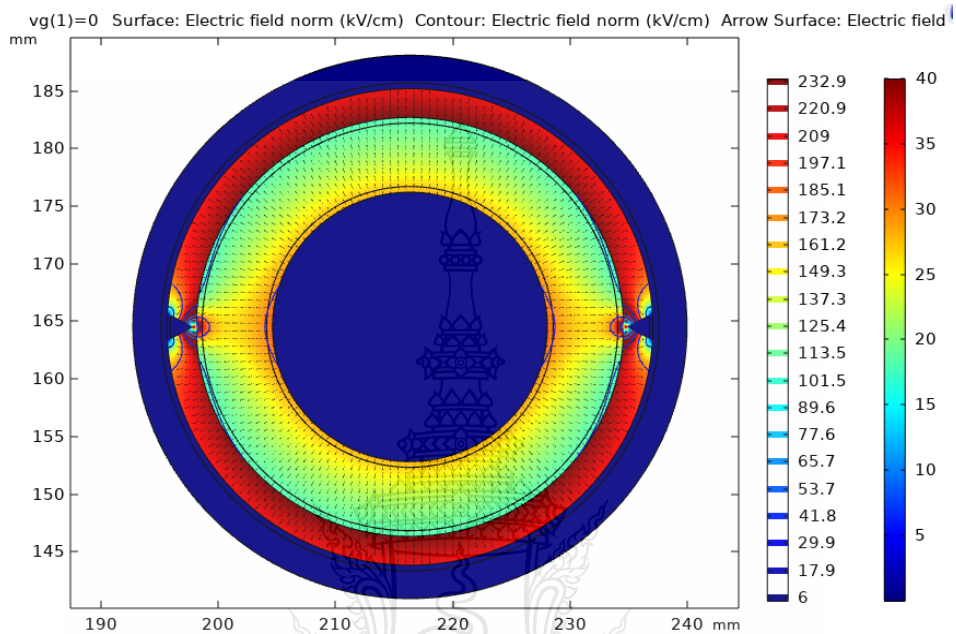


รูปที่ 4.21 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2

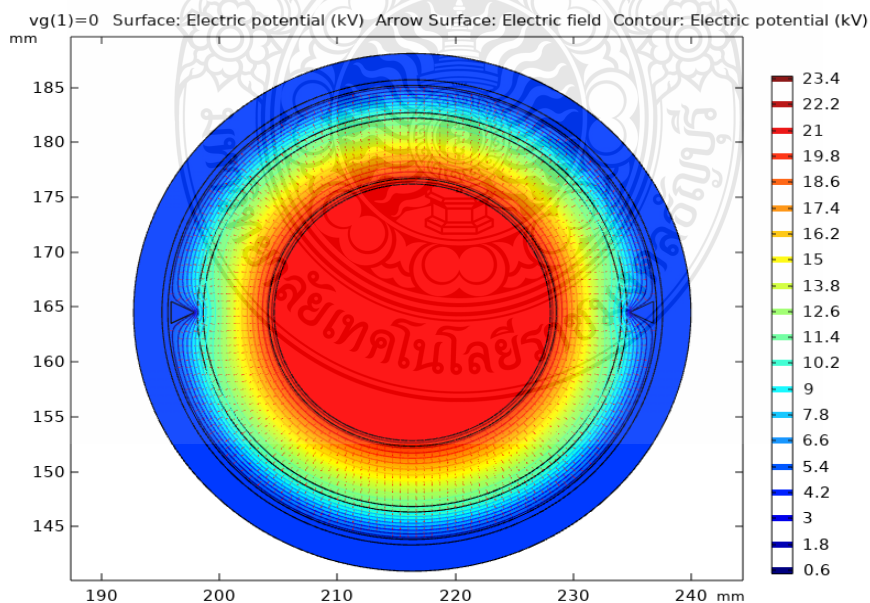


รูปที่ 4.22 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2

4.2.4 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 232.9 kV/cm ตามรูปที่ 4.23 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.24 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

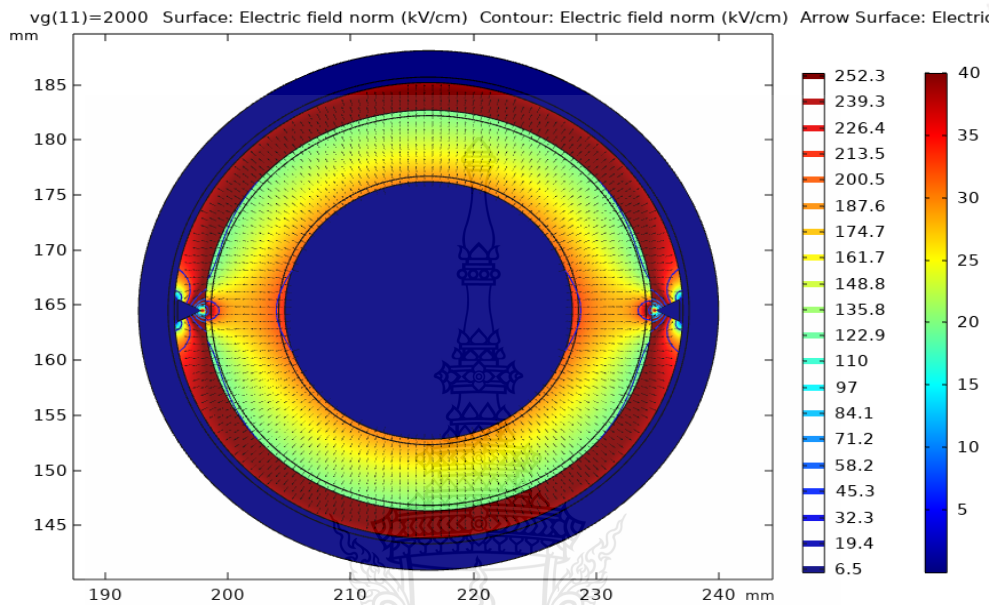


รูปที่ 4.23 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

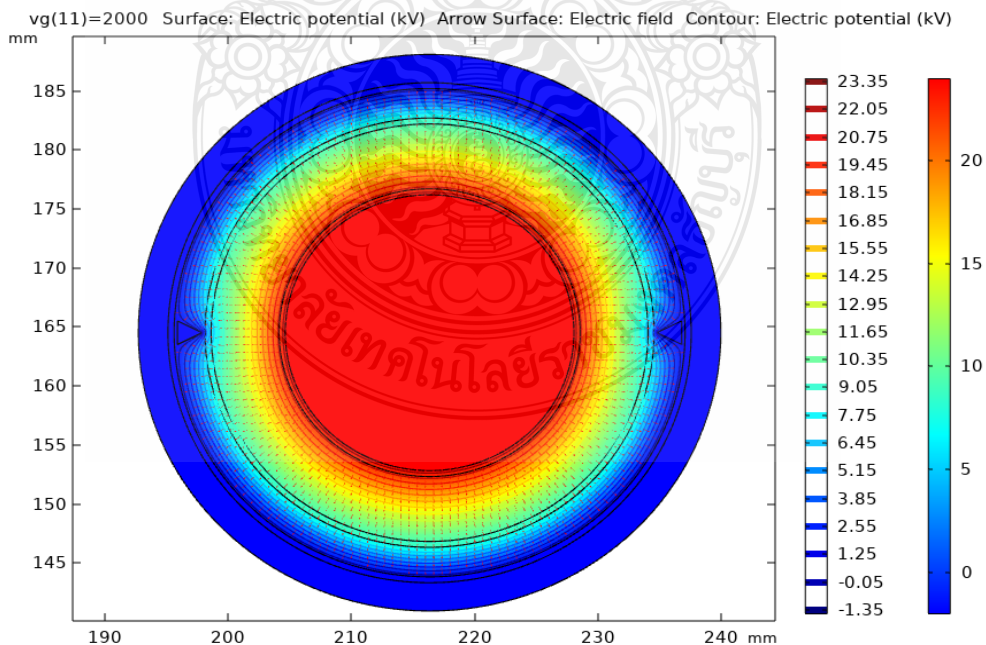


รูปที่ 4.24 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.2.5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยมค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 252.3 kV/cm ตามรูปที่ 4.25 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.26 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 2000 V

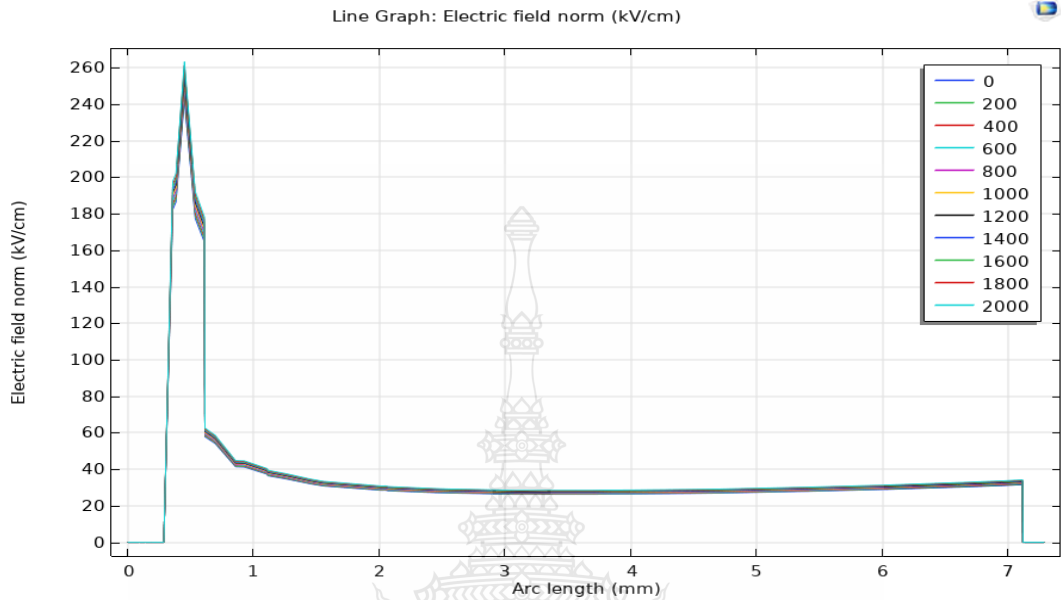


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 2000 V

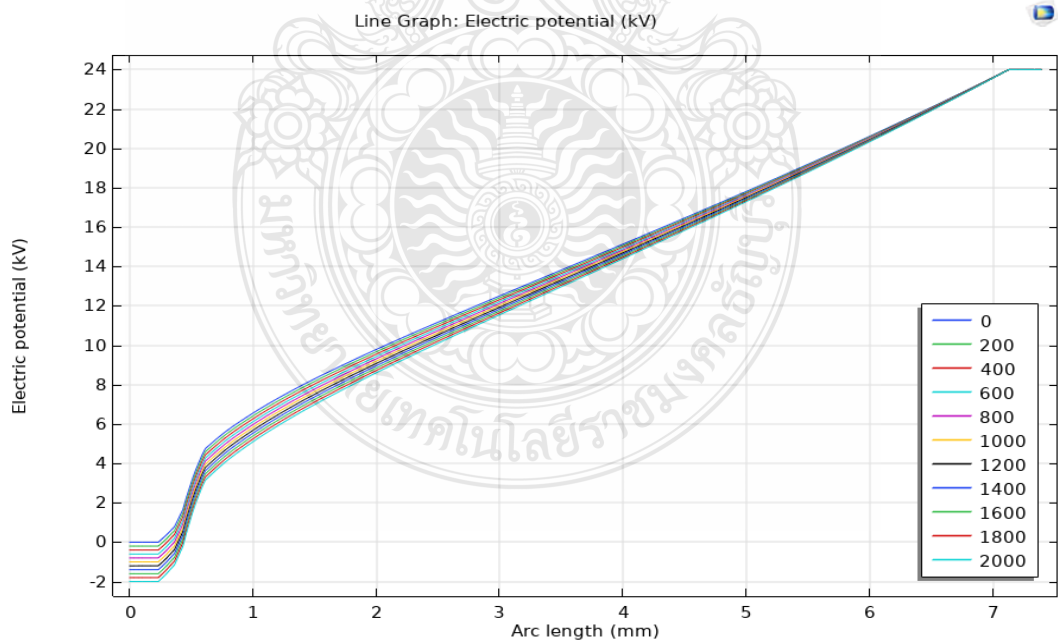


รูปที่ 4.26 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 2000 V

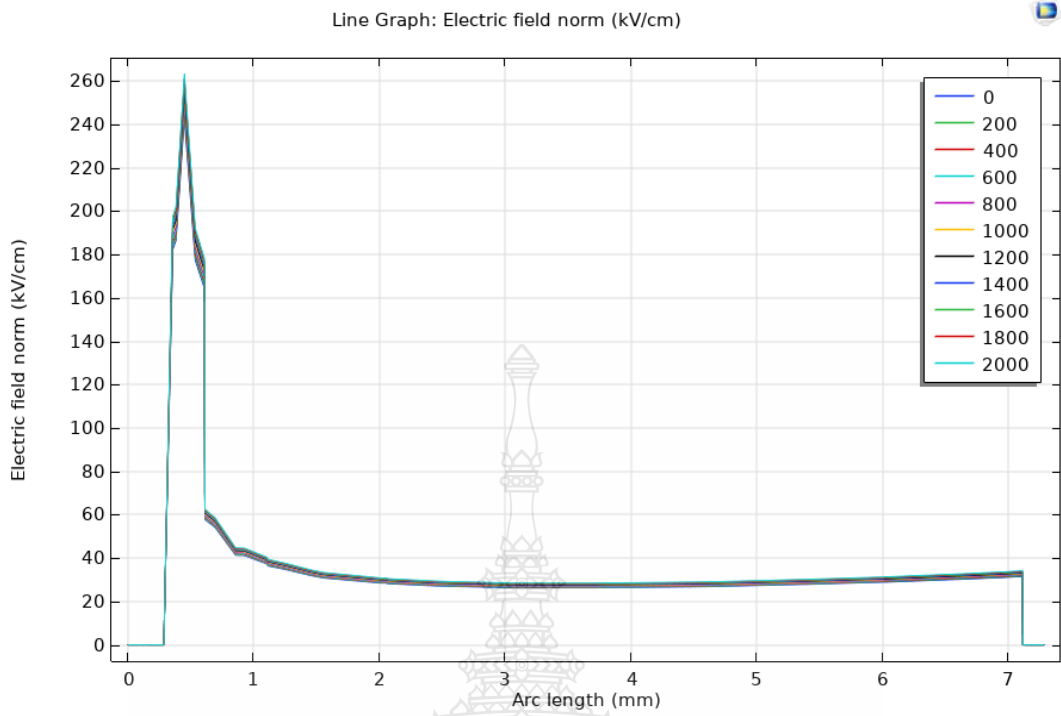
4.2.6 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวด์ 2 จุด  
 ขั้วต่อกราวด์เหลี่ยม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.30



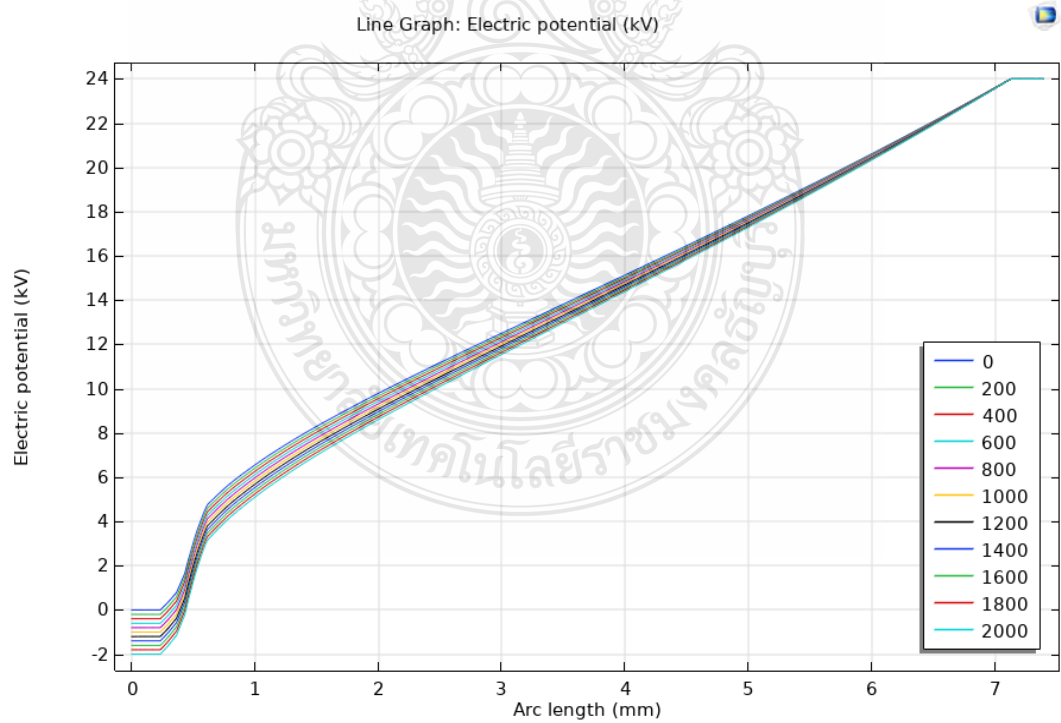
รูปที่ 4.27 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



รูปที่ 4.28 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



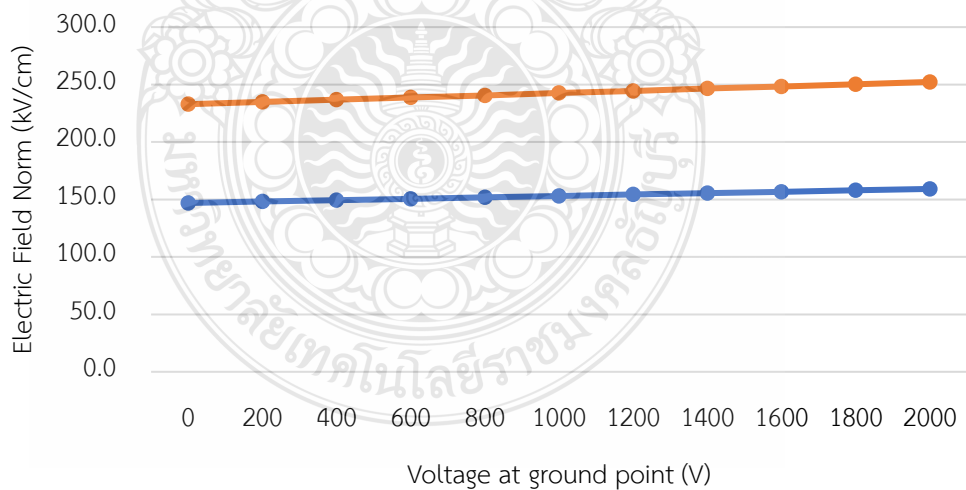
รูปที่ 4.29 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2



รูปที่ 4.30 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2

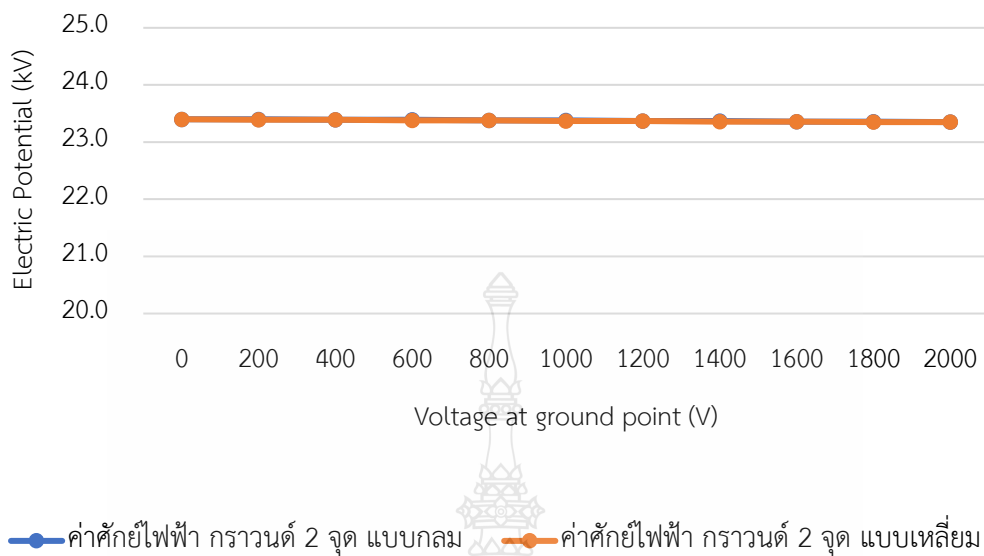
ตารางที่ 2 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม

แรงดัน ที่จุดต่อกราวนด์ (V)	ค่าสนามไฟฟ้า		ค่าศักย์ไฟฟ้า	
	แบบต่อกราวนด์ 2 จุด (kV/cm)		แบบต่อกราวนด์ 2 จุด (kV/cm)	
	ต่อกราวนด์ แบบกลม	ต่อกราวนด์ แบบเหลี่ยม	ต่อกราวนด์แบบ กลม	ต่อกราวนด์แบบ เหลี่ยม
0.0	146.9	232.9	23.4	23.4
200.0	148.1	234.8	23.4	23.4
400.0	149.4	236.8	23.4	23.4
600.0	150.6	238.9	23.4	23.4
800.0	151.8	240.6	23.4	23.4
1000.0	153.0	242.6	23.4	23.4
1200.0	154.3	244.5	23.4	23.4
1400.0	155.5	246.5	23.4	23.4
1600.0	156.7	248.4	23.4	23.4
1800.0	157.9	250.3	23.4	23.4
2000.0	159.2	252.3	23.4	23.4



— ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 2 จุด แบบกลม — ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 2 จุด แบบเหลี่ยม

รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลื่อมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V

**วิเคราะห์ผลการทดลอง**

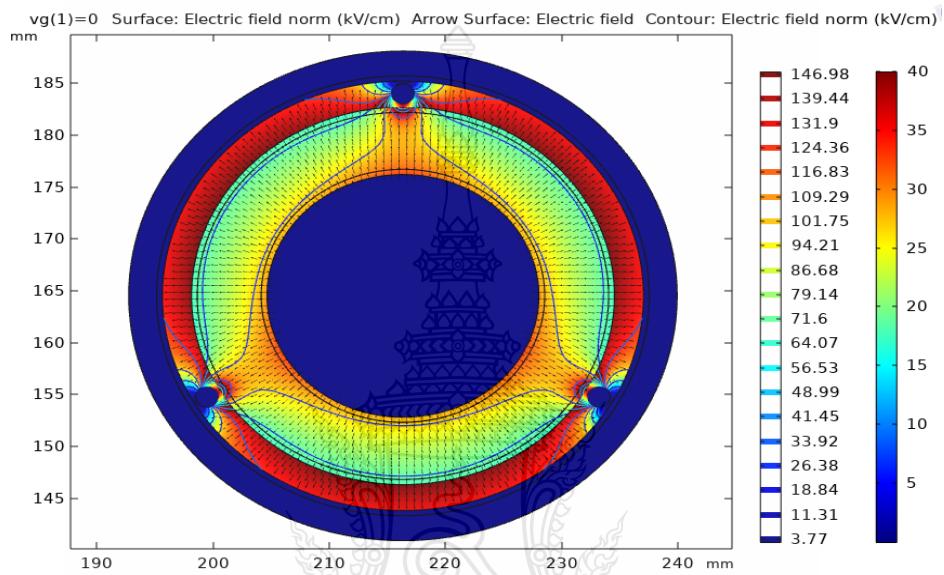
จากรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าการต่อกราวด์แบบ 2 จุดในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 24 kV ผลการจำลองพบว่าจุดต่อกราวนด์แบบเหลื่อมหรือมีผิวแหลมคมที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดถึง 252.3 kV/cm เมื่อเทียบกับจุดต่อกราวนด์แบบกลมหรือแบบมีผิวเรียบซึ่งจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.2 kV/cm เมื่อมีค่าแรงดันเกิดขึ้นที่จุดกราวนด์ 2000 V ส่วนค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้านั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงดันที่จุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 23.4 kV

จากข้อมูลผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการต่อจุดกราวด์ที่ดีที่สุดต้องไม่ให้มีจุดเหลื่อมหรือจุดแหลมคมที่บริเวณจุดต่อเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เกิดความร้อนสะสม และสุดท้ายจะนำไปสู่การเกิดการทะลุผ่าน (Breakdown) ของฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินได้

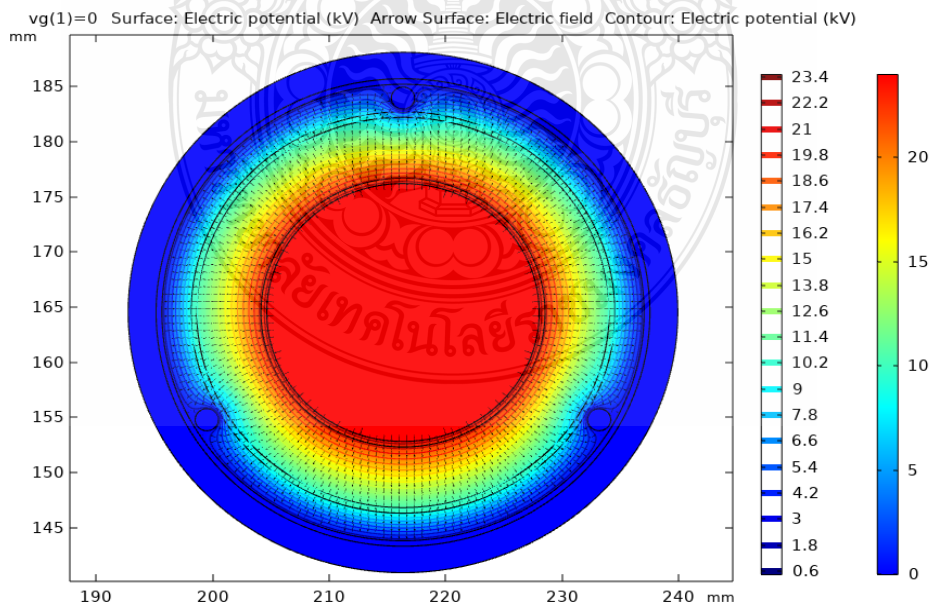
### 4.3 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์

#### 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม

4.3.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 146.98 kV/cm ตามรูปที่ 4.33 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.34 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V



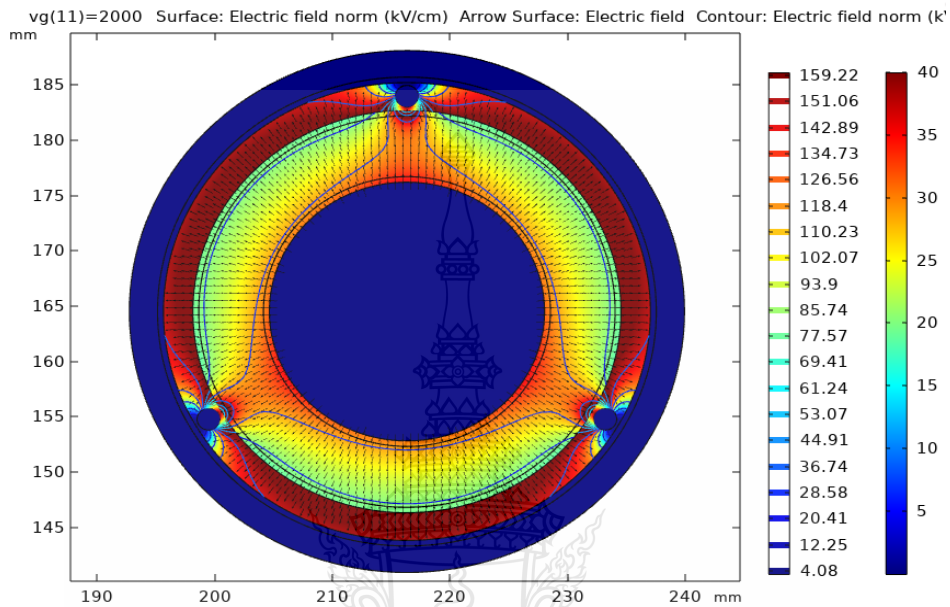
รูปที่ 4.33 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 3 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V



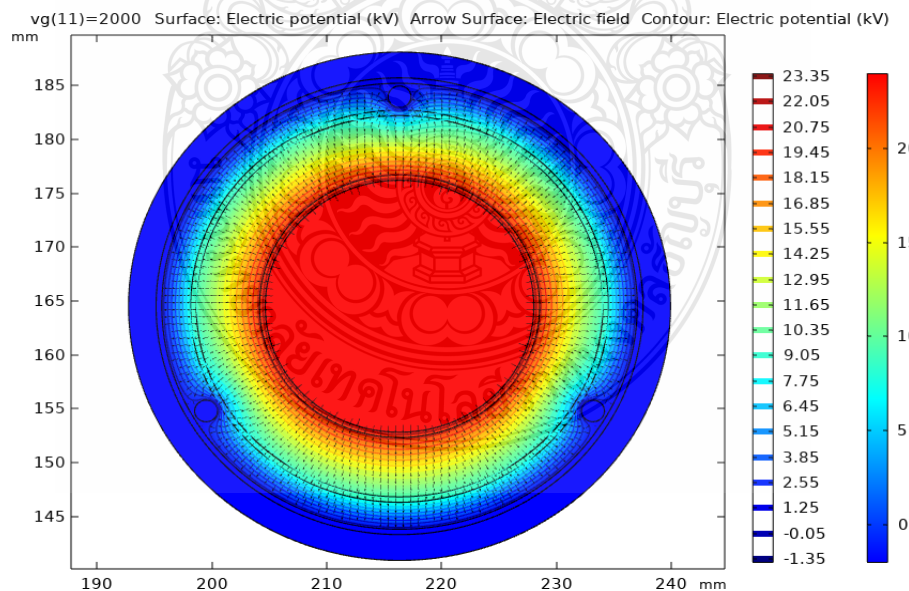
รูปที่ 4.34 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 3 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V



4.3.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 2000 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.22 kV/cm ตามรูปที่ 4.35 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.36 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 2000 V

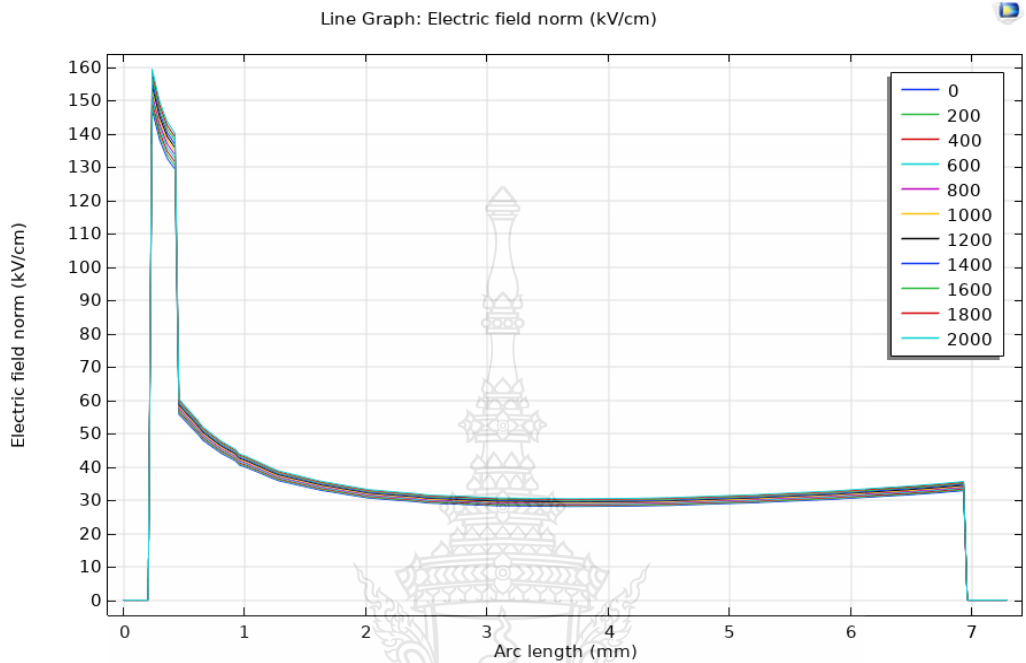


รูปที่ 4.35 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 3 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 2000 V

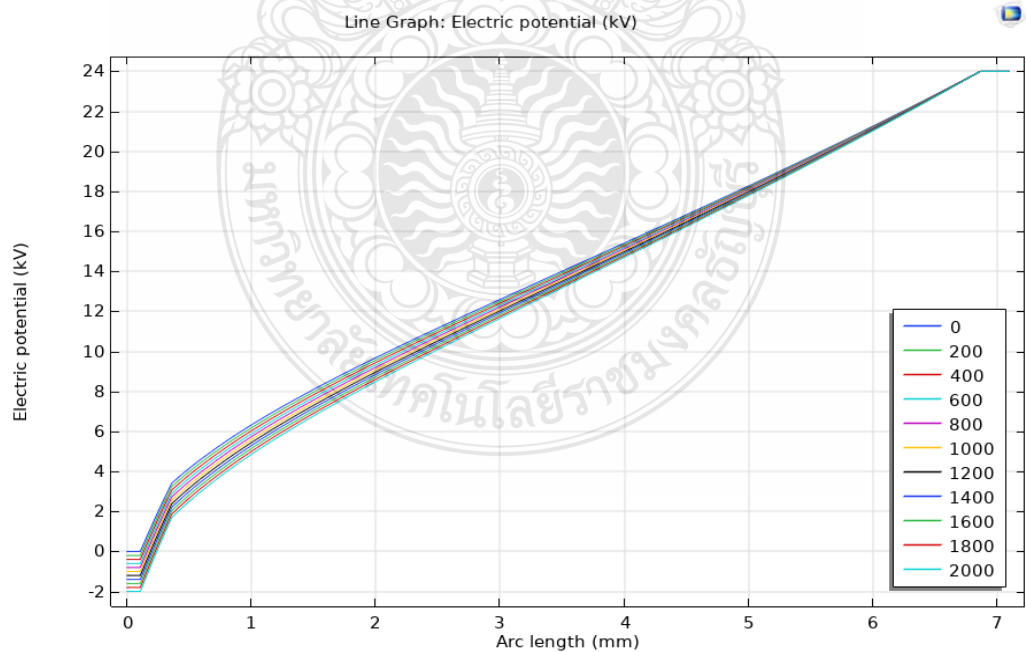


รูปที่ 4.36 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม 3 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 2000 V

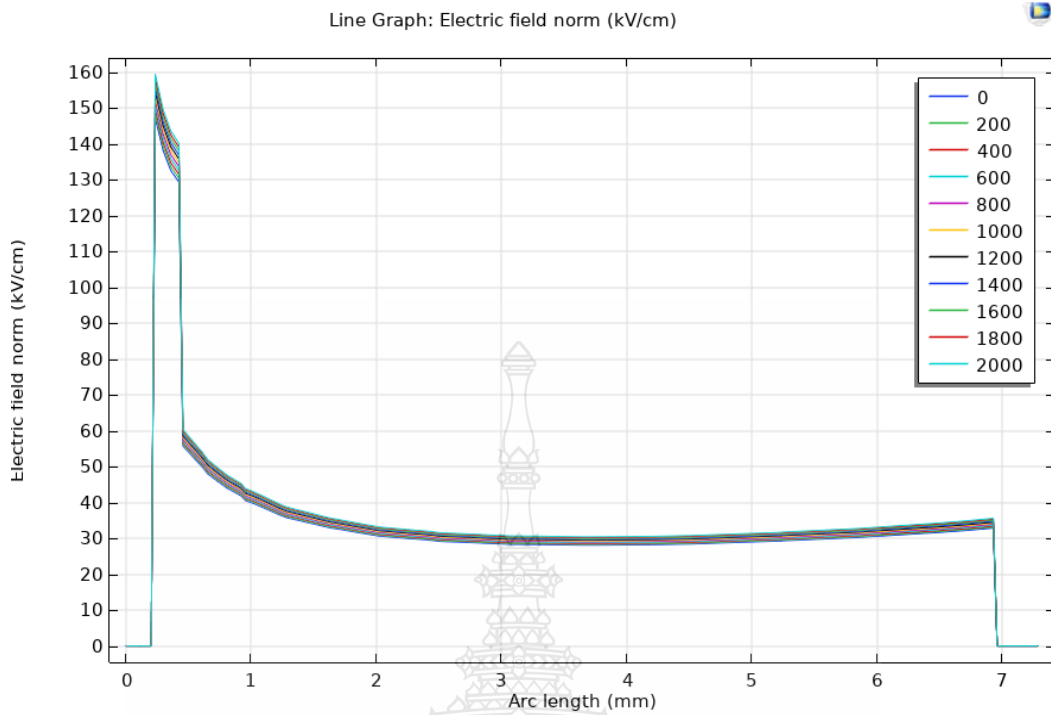
4.3.3 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าแบบต่อกราวด์ 3 จุด  
 ขั้วต่อกราวด์กลม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.37 ถึง รูปที่ 4.42



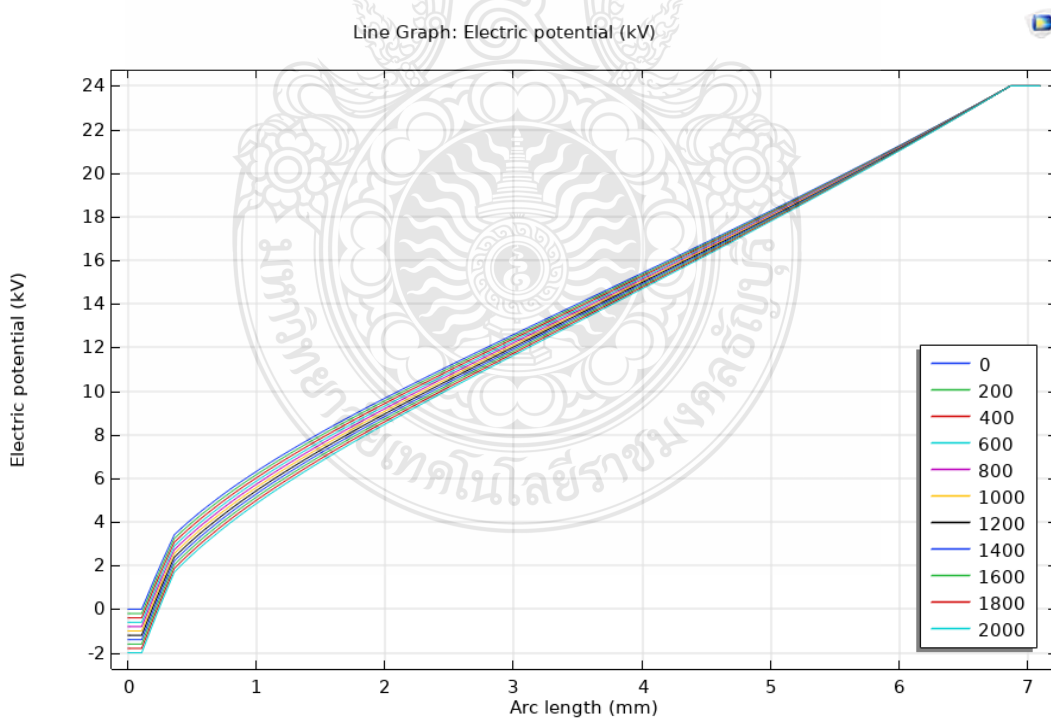
รูปที่ 4.37 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



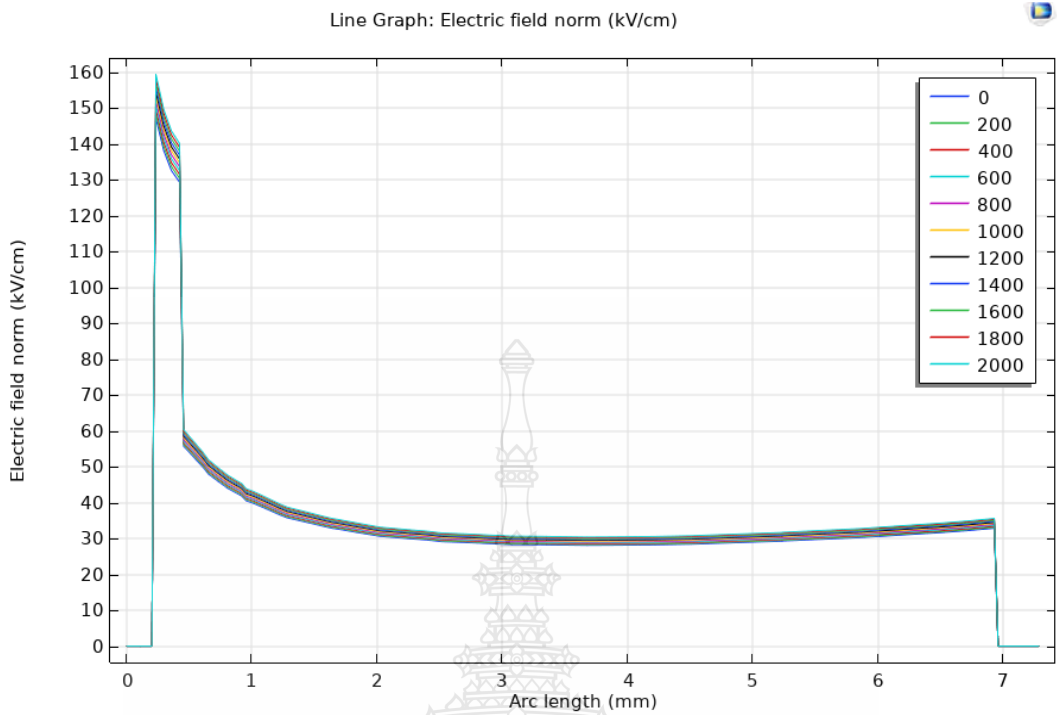
รูปที่ 4.38 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



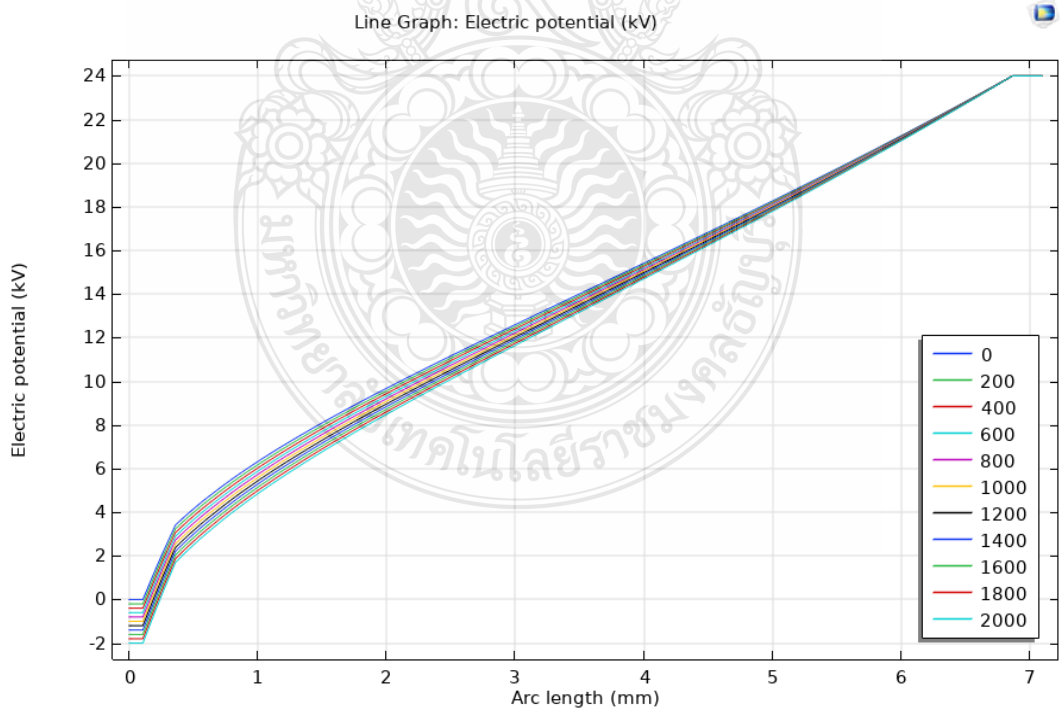
รูปที่ 4.39 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2



รูปที่ 4.40 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2

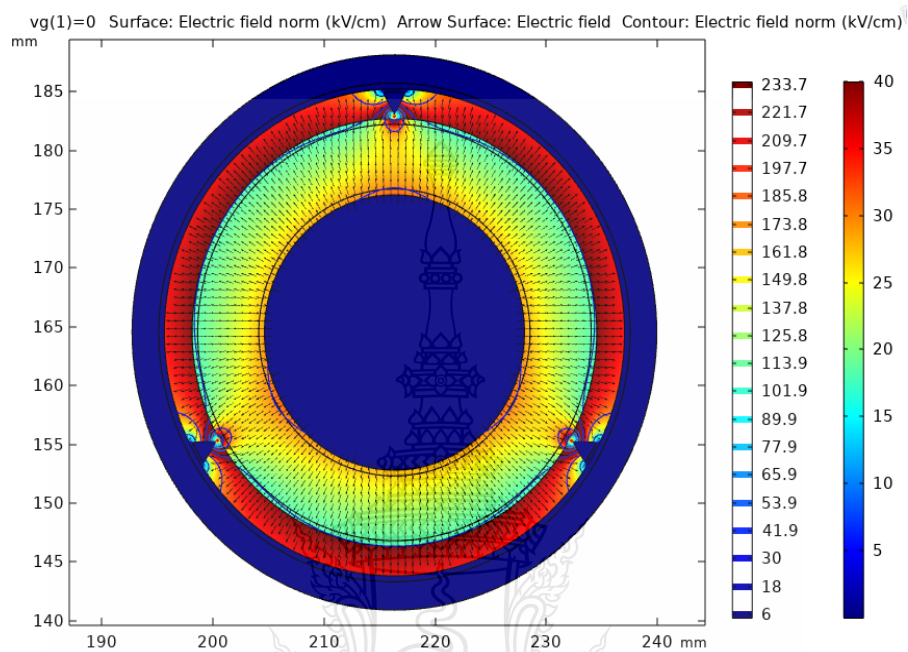


รูปที่ 4.41 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 3

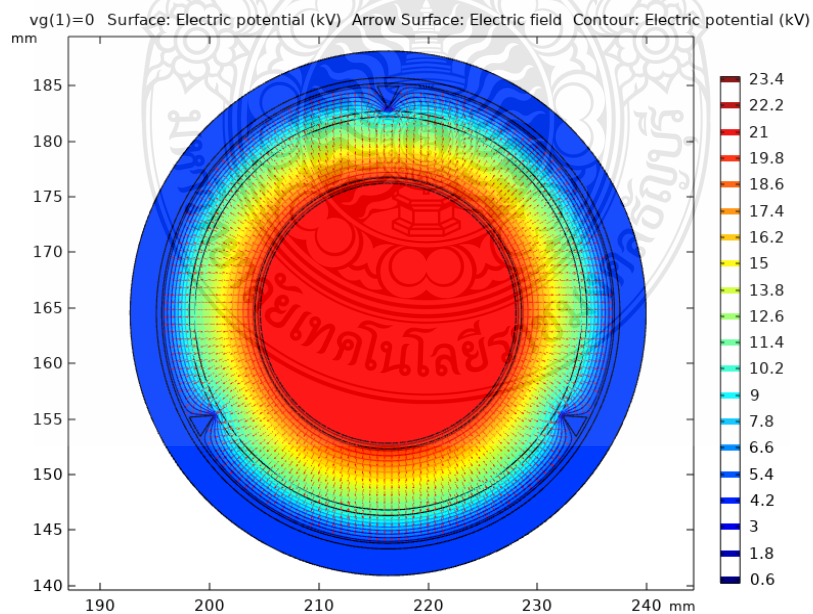


รูปที่ 4.42 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 3

4.3.4 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ขั้วต่อกราวนด์เหลี่ยม ที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 233.7 kV/cm ตามรูปที่ 4.43 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.44 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

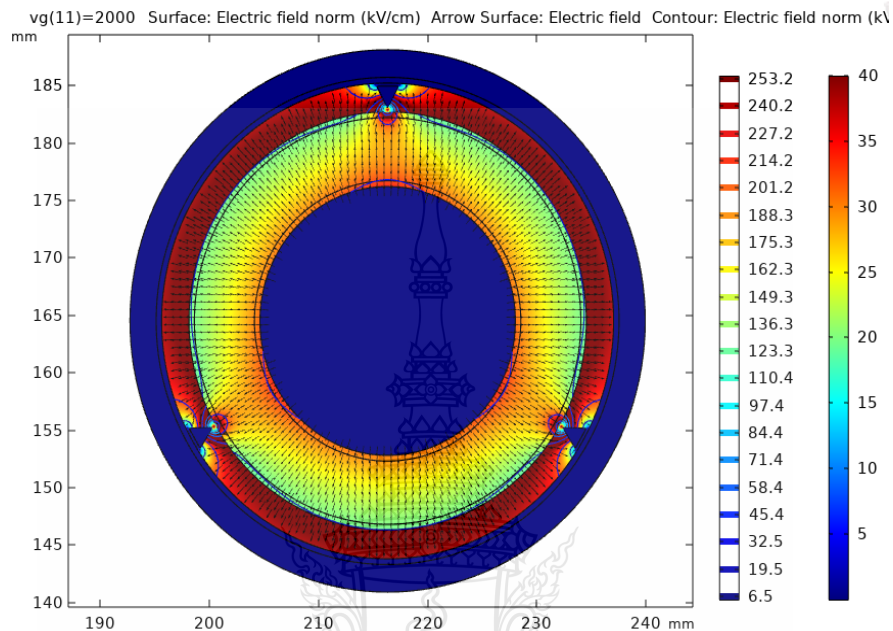


รูปที่ 4.43 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 3 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

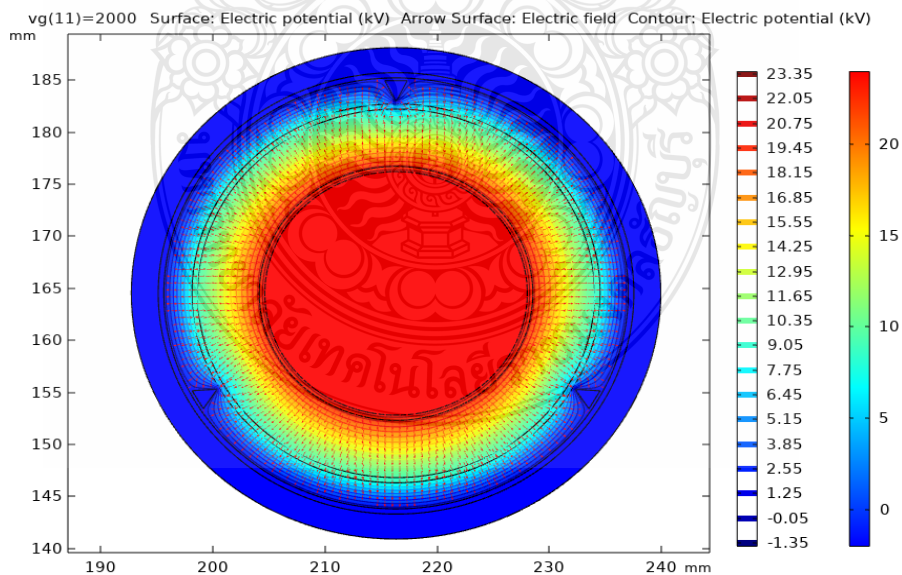


รูปที่ 4.44 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 3 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.3.5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 3 จุด ชั่วต่อกราวนด์เหลี่ยม ที่แรงดันที่ชั่วจุดต่อกราวนด์ 2000 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 253.2 kV/cm ตามรูปที่ 4.45 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.46 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วต่อกราวนด์ 2000 V

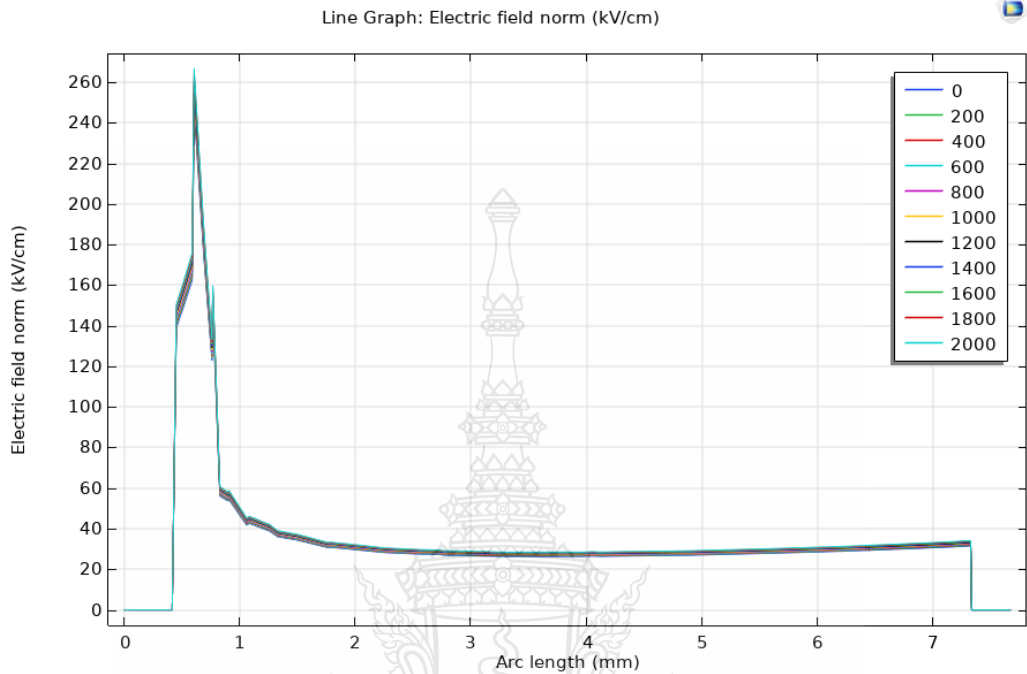


รูปที่ 4.45 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ที่ชั่วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 3 จุดต่อ แรงดันที่ชั่ว 2000 V

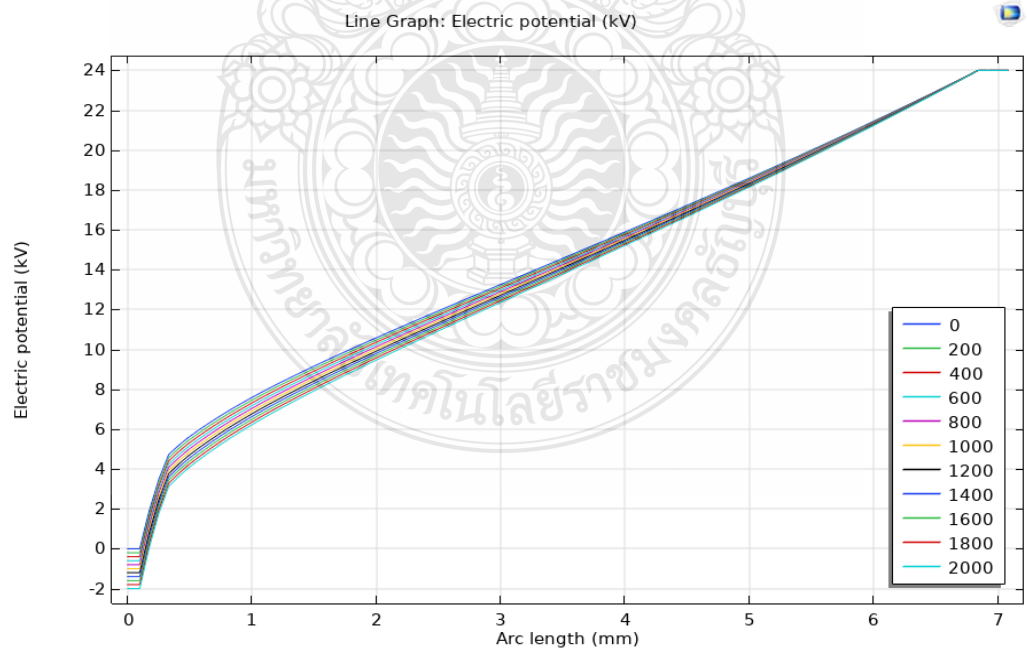


รูปที่ 4.46 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ที่ชั่วต่อกราวนด์แบบเหลี่ยม 3 จุดต่อ แรงดันที่ชั่ว 2000 V

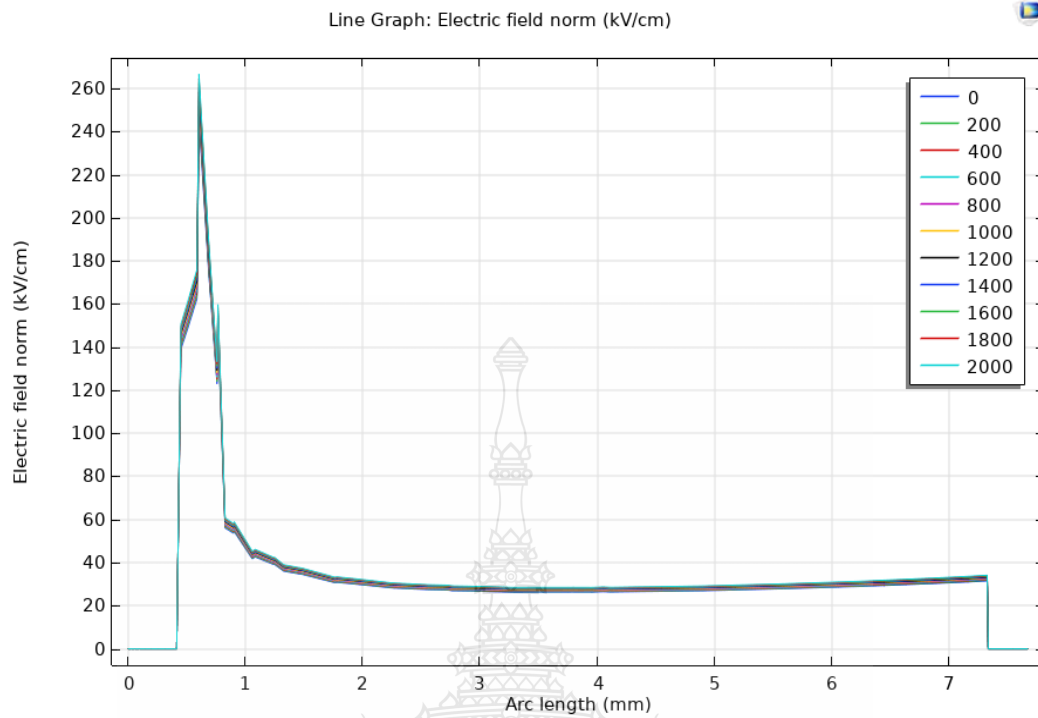
4.3.6 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าแบบต่อกราวด์ 3 จุด  
 ขั้วต่อกราวด์เหลี่ยม แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.52



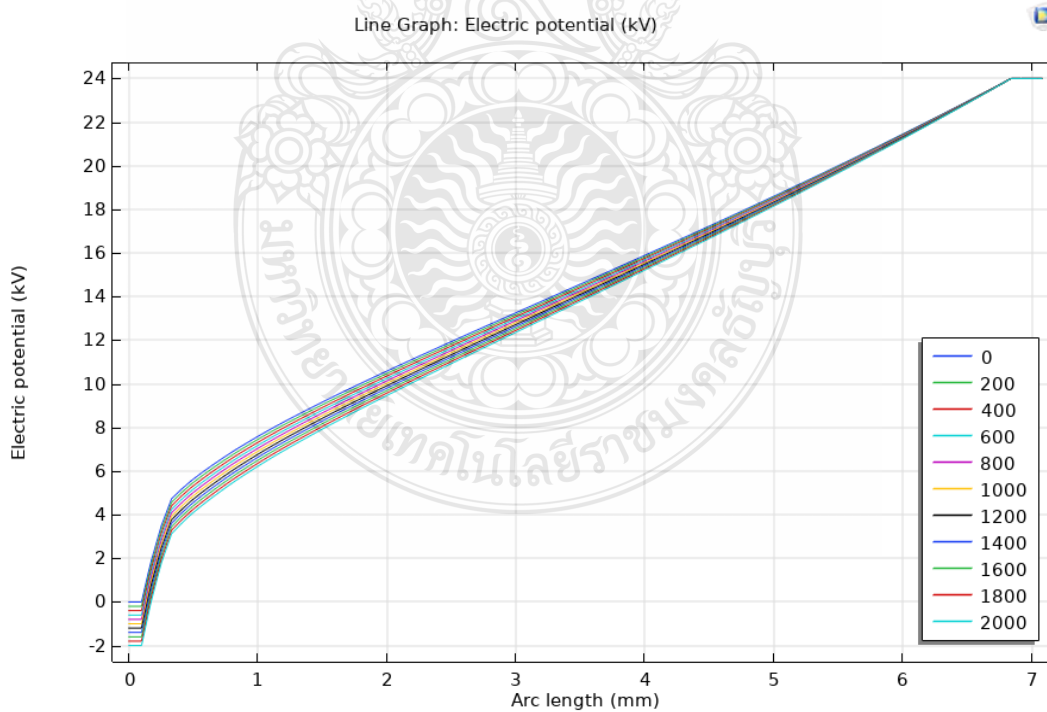
รูปที่ 4.47 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1



รูปที่ 4.48 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1

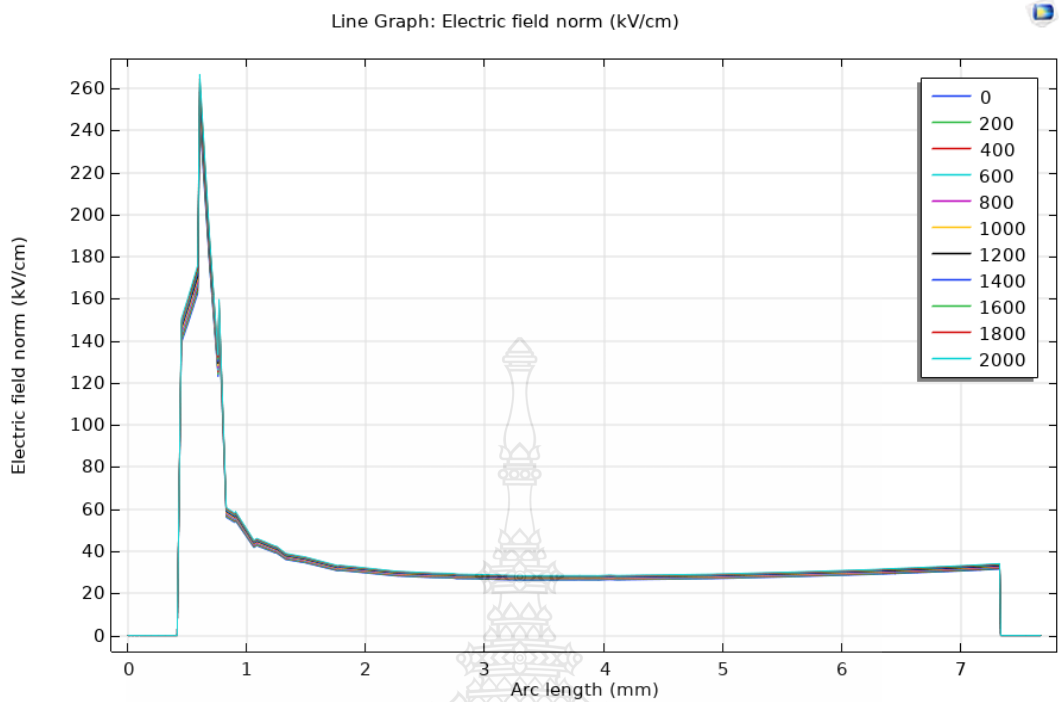


รูปที่ 4.49 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2

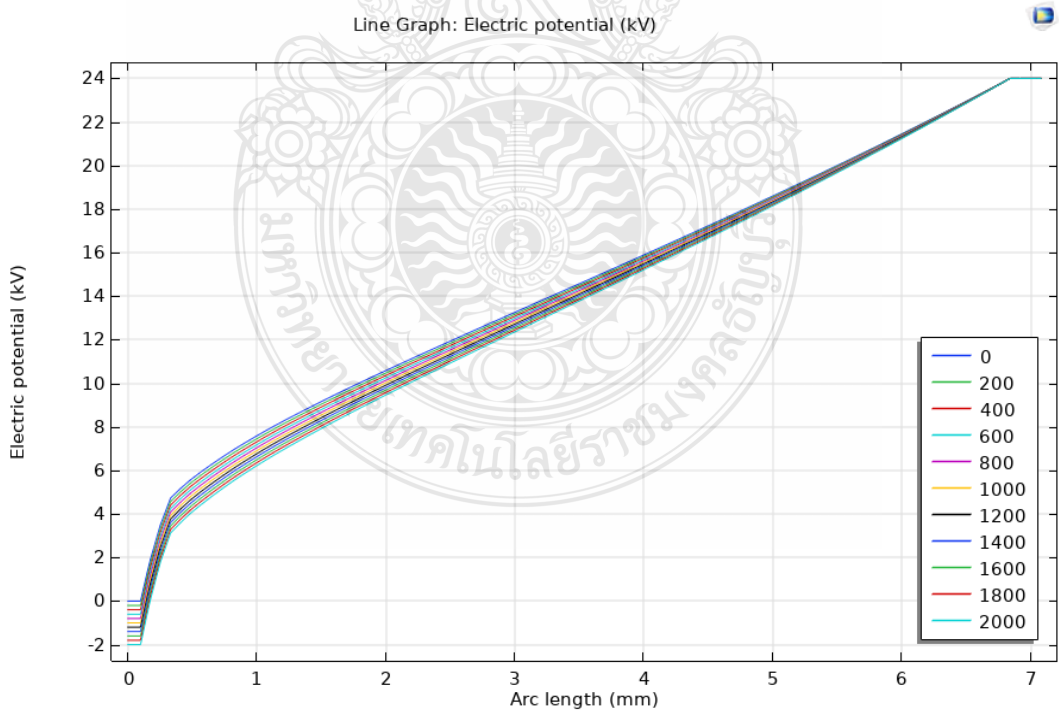


รูปที่ 4.50 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2





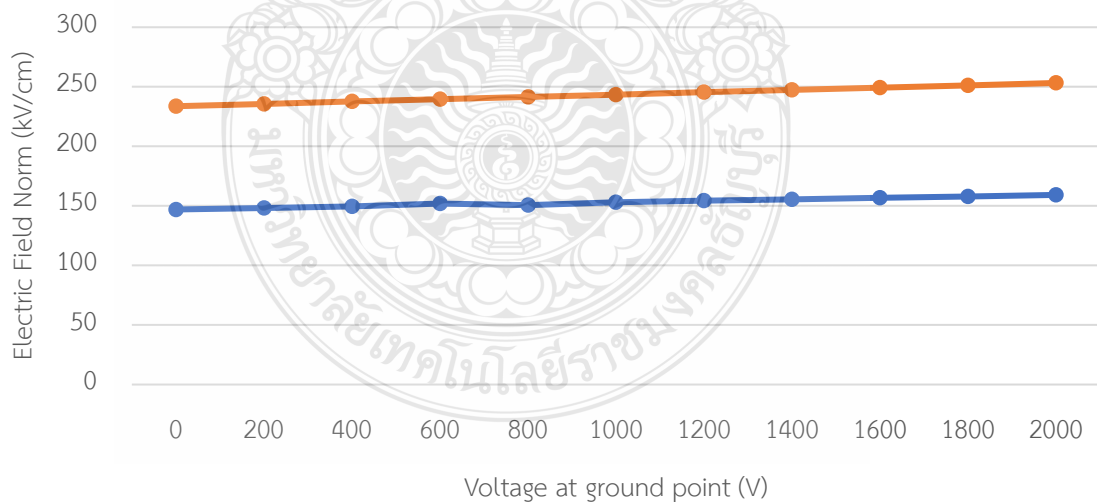
รูปที่ 4.51 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 3



รูปที่ 4.52 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 3

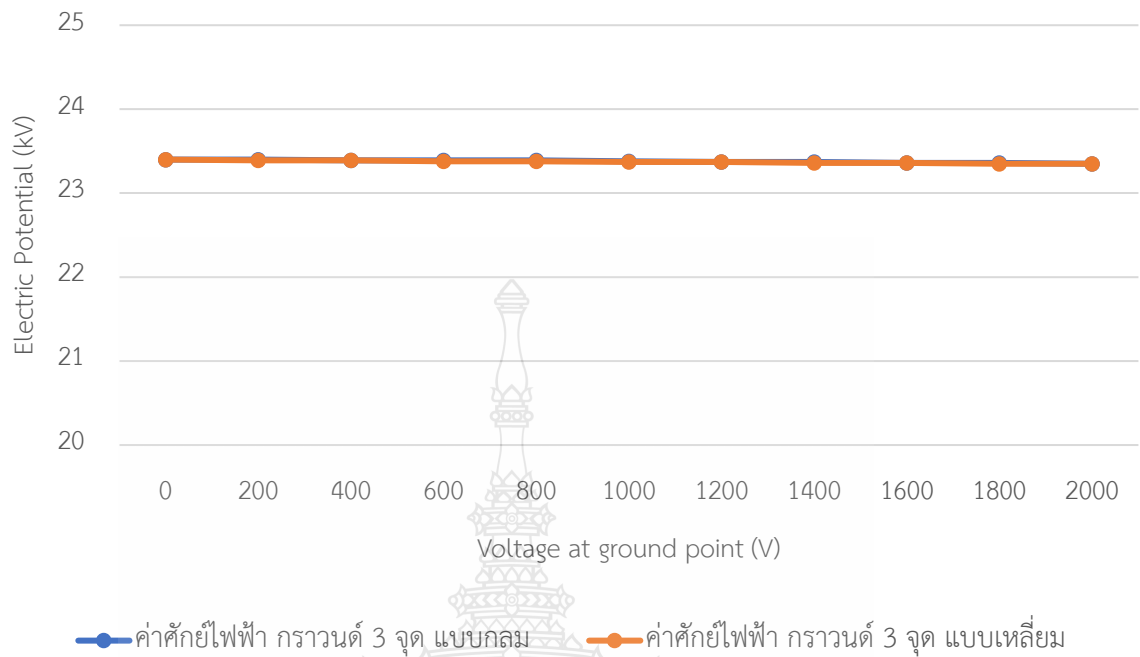
ตารางที่ 3 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด แบบกราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยม

แรงดัน ที่จุดต่อกราวนด์ (V)	ค่าสนามไฟฟ้า		ค่าศักย์ไฟฟ้า	
	แบบต่อกราวนด์ 3 จุด (kV/cm)		แบบต่อกราวนด์ 3 จุด (kV)	
	ต่อกราวนด์แบบ กลม	ต่อกราวนด์แบบ เหลี่ยม	ต่อกราวนด์ แบบกลม	ต่อกราวนด์แบบ เหลี่ยม
0	146.98	233.7	23.4	23.4
200	148.2	235.6	23.4	23.39
400	149.42	237.6	23.39	23.39
600	151.87	239.5	23.39	23.38
800	150.65	241.5	23.39	23.38
1000	153.1	243.4	23.38	23.37
1200	154.32	245.4	23.37	23.37
1400	155.55	247.3	23.37	23.36
1600	156.77	249.3	23.36	23.36
1800	158.0	251.2	23.36	23.35
2000	159.22	253.2	23.35	23.35



— ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 3 จุด แบบกลม — ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 3 จุด แบบเหลี่ยม

รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V



รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V

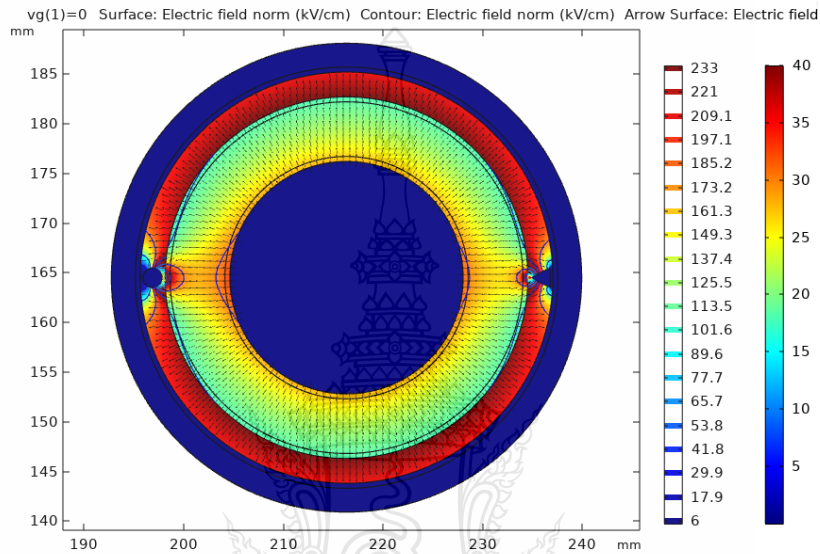
#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.53 และ รูปที่ 4.54 จะเห็นได้ว่าการต่อกราวด์แบบ 3 จุดในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 24 kV ผลการจำลองพบว่าจุดต่อกราวด์แบบเหลี่ยมหรือมีผิวแหลมคมที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดถึง 253.2 kV/cm เมื่อเทียบกับจุดต่อกราวด์แบบกลมหรือแบบมีผิวเรียบซึ่งจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 159.2 kV/cm เมื่อมีค่าแรงดันเกิดขึ้นที่จุดกราวด์ 2000 V ส่วนค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้านั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงดันที่จุดต่อกราวด์ 0 - 2000 V ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 23.4 kV

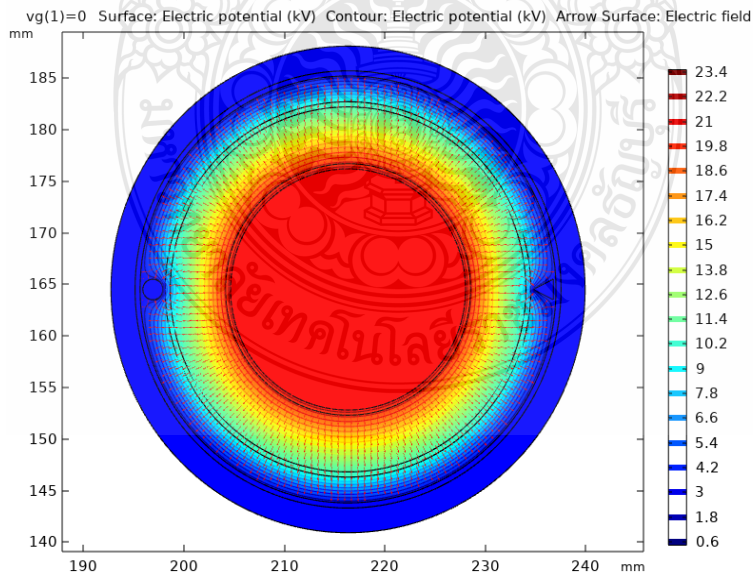
จากข้อมูลผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการต่อจุดกราวด์ที่ดีที่สุดต้องไม่ให้มีจุดเหลี่ยมหรือจุดแหลมคมที่บริเวณจุดต่อเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เกิดความร้อนสะสม และสุดท้ายจะนำไปสู่การเกิดการทะลุผ่าน (Breakdown) ของฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินได้

#### 4.4 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมและเหลี่ยม

4.4.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์กลมและเหลี่ยม ที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 233.0 kV/cm ตามรูปที่ 4.55 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.4 kV ตามรูปที่ 4.56 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อกราวนด์ 0 V

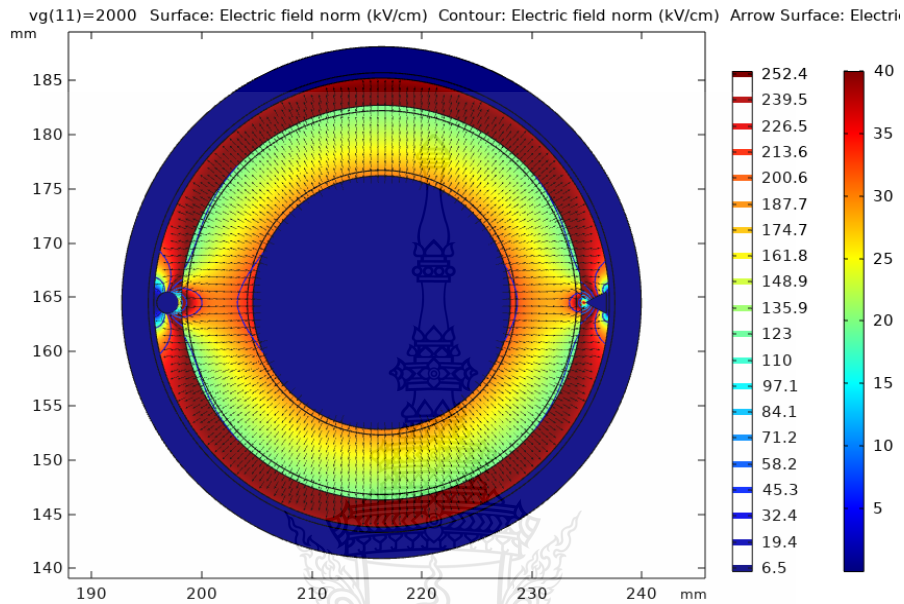


รูปที่ 4.55 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

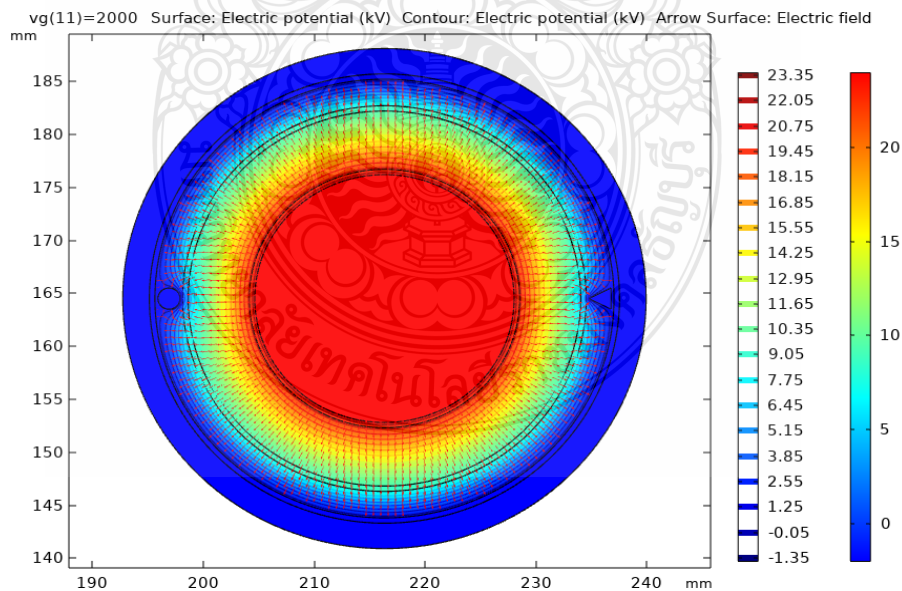


รูปที่ 4.56 ผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้า ขั้วต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อ แรงดันที่ขั้ว 0 V

4.4.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวด์ 2 จุด ชั่วต่อกราวด์กลมและเหลี่ยม ที่แรงดันจุดต่อกราวด์ 2000 V ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 252.4 kV/cm ตามรูปที่ 4.57 และค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 23.35 kV ตามรูปที่ 4.58 เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วต่อกราวด์ 2000 V

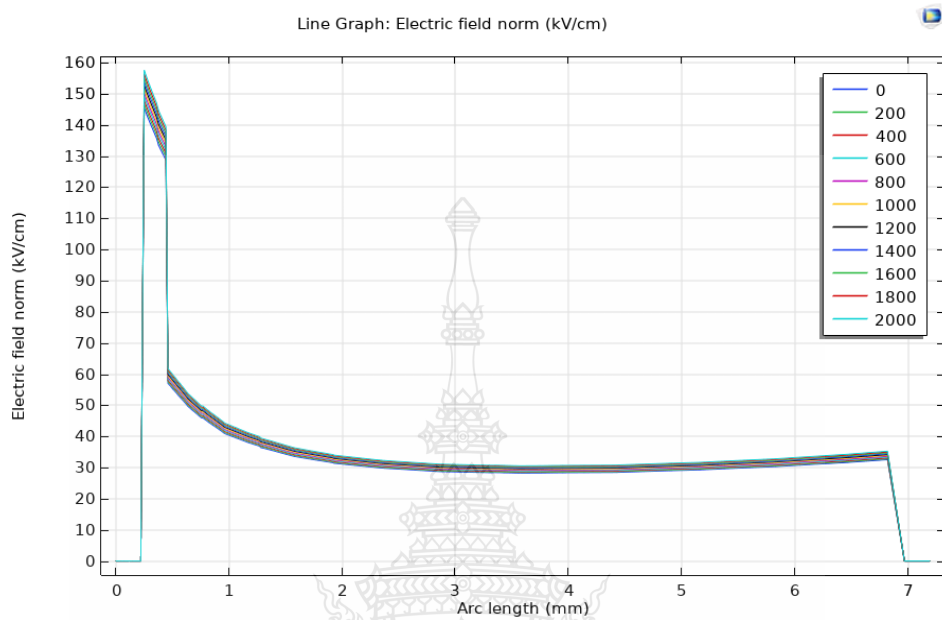


รูปที่ 4.57 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าชั่วต่อกราวด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อแรงดันที่ชั่ว 2000 V

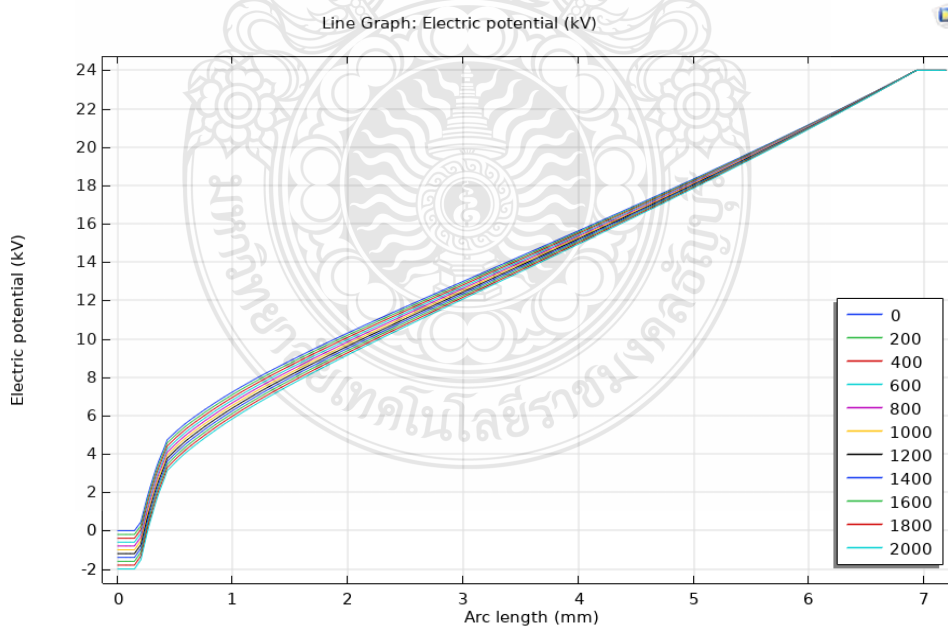


รูปที่ 4.58 การจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าชั่วต่อกราวด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อที่แรงดันที่ชั่ว 2000 V

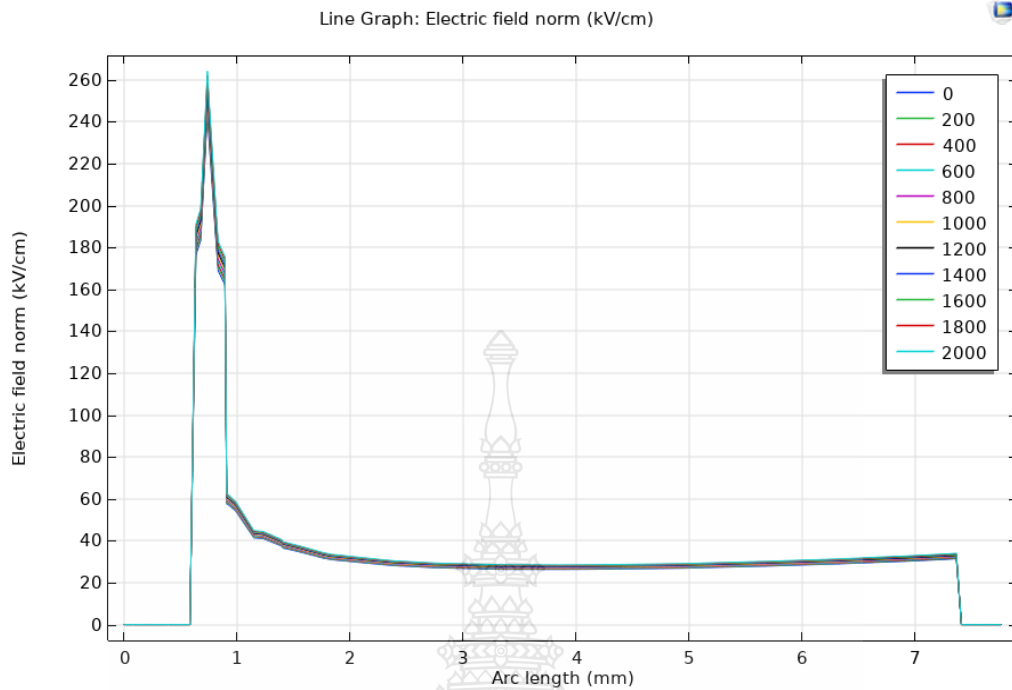
4.4.3 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด  
 ขั้วต่อกราวนด์กลมและเหลี่ยม ที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V ตามรูปที่ 4.59 ถึง รูปที่ 4.62



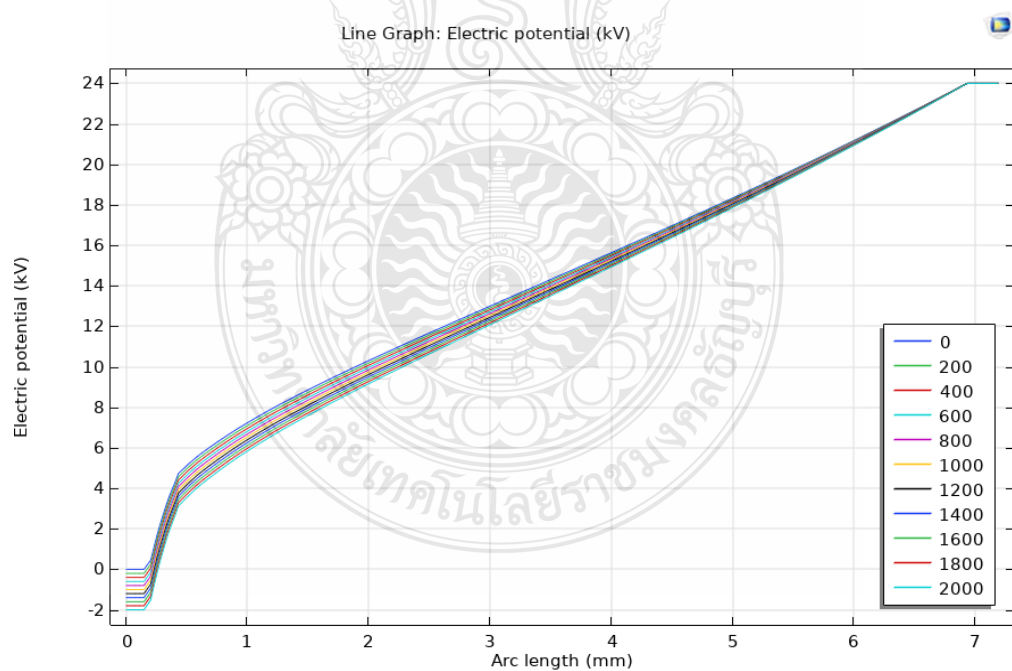
รูปที่ 4.59 กราฟผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1  
 กราวนด์กลม



รูปที่ 4.60 กราฟผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1  
 กราวนด์กลม



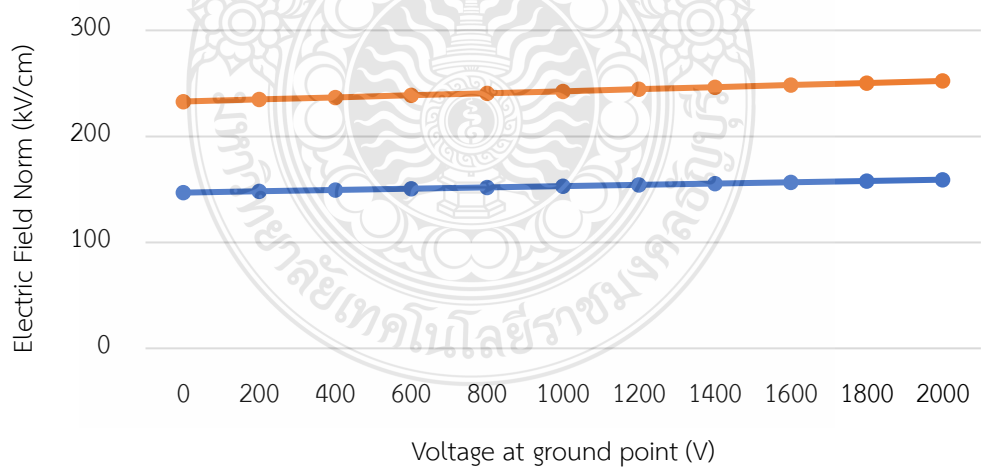
รูปที่ 4.61 กราฟผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์เหลี่ยม



รูปที่ 4.62 กราฟผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์เหลี่ยม

ตารางที่ 4 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด แบบกราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยม

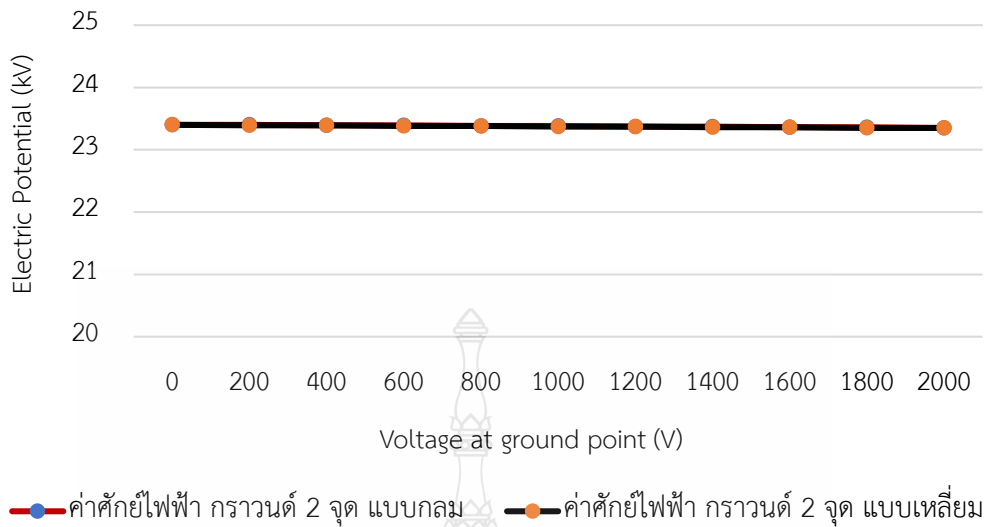
แรงดัน ที่จุดต่อกราวนด์ (V)	ค่าสนามไฟฟ้า		ค่าศักย์ไฟฟ้า	
	แบบต่อกราวนด์ 2 จุด (kV/cm)		แบบต่อกราวนด์ 2 จุด (kV)	
	ต่อกราวนด์ แบบกลม	ต่อกราวนด์ แบบเหลี่ยม	ต่อกราวนด์แบบ กลม	ต่อกราวนด์แบบ เหลี่ยม
0.0	146.9	232.9	23.4	23.4
200.0	148.1	234.8	23.4	23.4
400.0	149.4	236.8	23.4	23.4
600.0	150.6	238.9	23.4	23.4
800.0	151.8	240.6	23.4	23.4
1000.0	153.0	242.6	23.4	23.4
1200.0	154.3	244.5	23.4	23.4
1400.0	155.5	246.5	23.4	23.4
1600.0	156.7	248.4	23.4	23.4
1800.0	157.9	250.3	23.4	23.4
2000.0	159.2	252.3	23.4	23.4



— ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 2 จุด แบบกลม — ค่าสนามไฟฟ้า กราวนด์ 2 จุด แบบเหลี่ยม

รูปที่ 4.63 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าสนามไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 2 จุด กราวนด์กลม และกราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V





รูปที่ 4.64 กราฟเปรียบเทียบการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้า ที่จุดต่อกราวนด์แบบ 3 จุด กราวนด์กลม และ กราวนด์เหลี่ยมเมื่อค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V

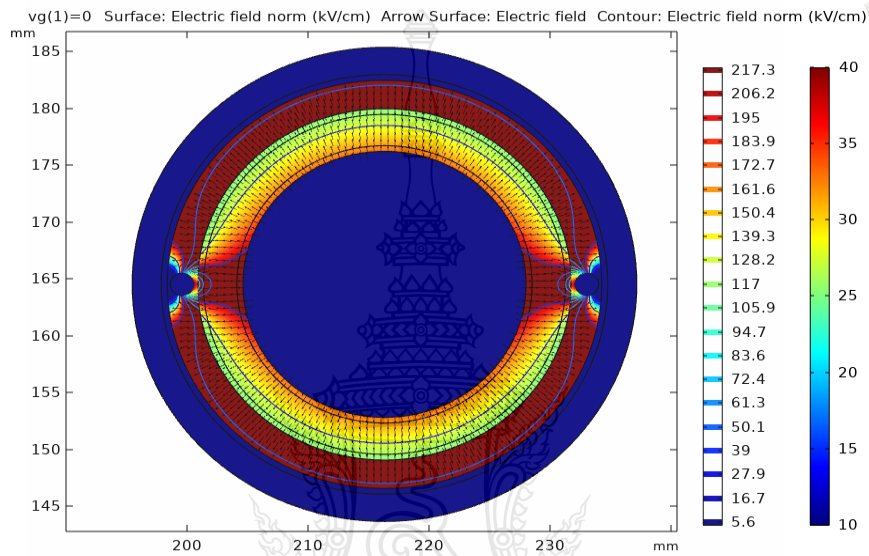
**วิเคราะห์ผลการทดลอง**

จุดต่อกราวนด์แบบกลมและเหลี่ยม 2 จุดต่อในสายเคเบิลใต้ดินไฟฟ้าพิกัด 24 kV จากผลการจำลองพบว่าค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดต่อแบบกลมมีค่า 159.16 kV/cm ส่วนค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดต่อแบบเหลี่ยมมีค่า 252.4 kV/cm เมื่อมีค่าแรงดันเกิดขึ้นที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 2000 V ส่วนค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งจุดต่อกราวนด์แบบกลมและแบบเหลี่ยมถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 23.35 kV

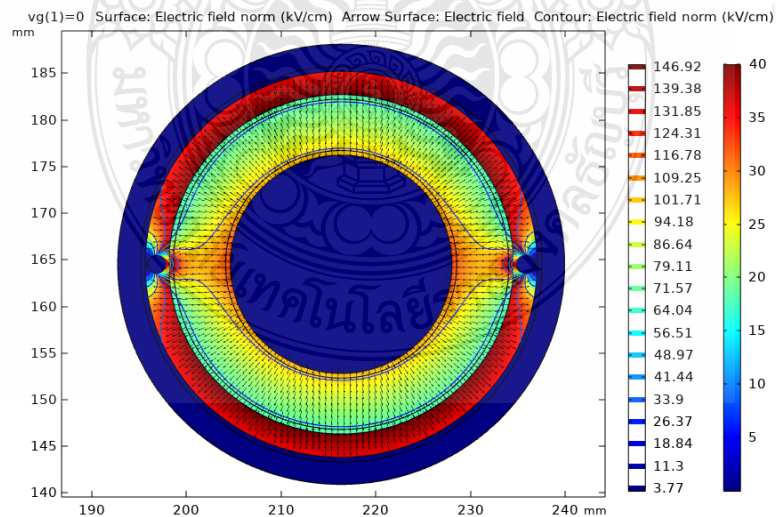
จากข้อมูลผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นที่จุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแรงดันที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นที่จุดต่อกราวนด์จะไม่ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าได้

4.5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ที่ขนาดความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม., 5.5 มม. และ 8.25 มม.

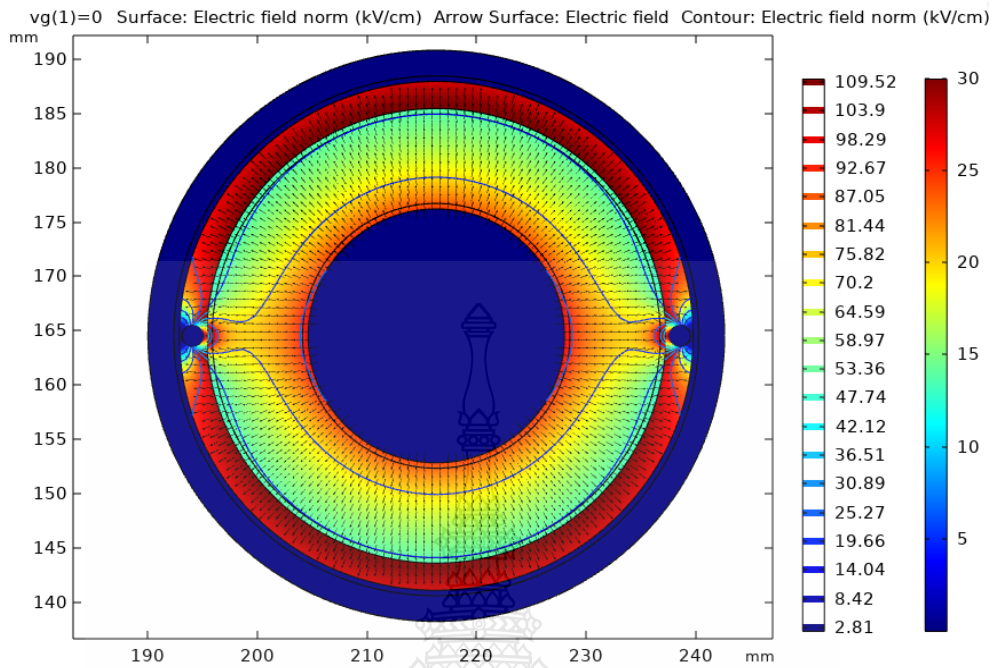
4.5.1 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม., 5.5 มม. และ 8.25 มม. ที่แรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 0 V จะแสดงค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ตามรูปที่ 4.65 ถึงรูปที่ 4.70



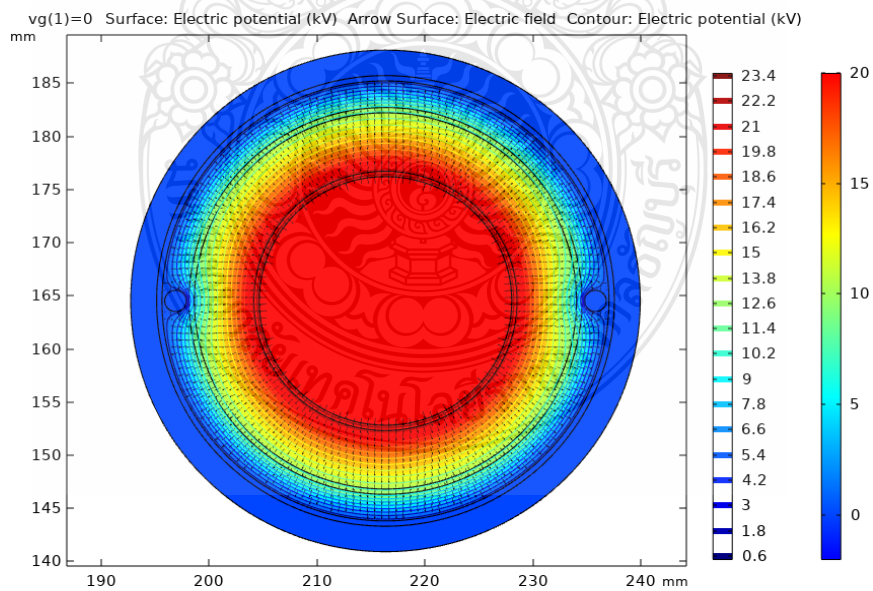
รูปที่ 4.65 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 2.75 มม.



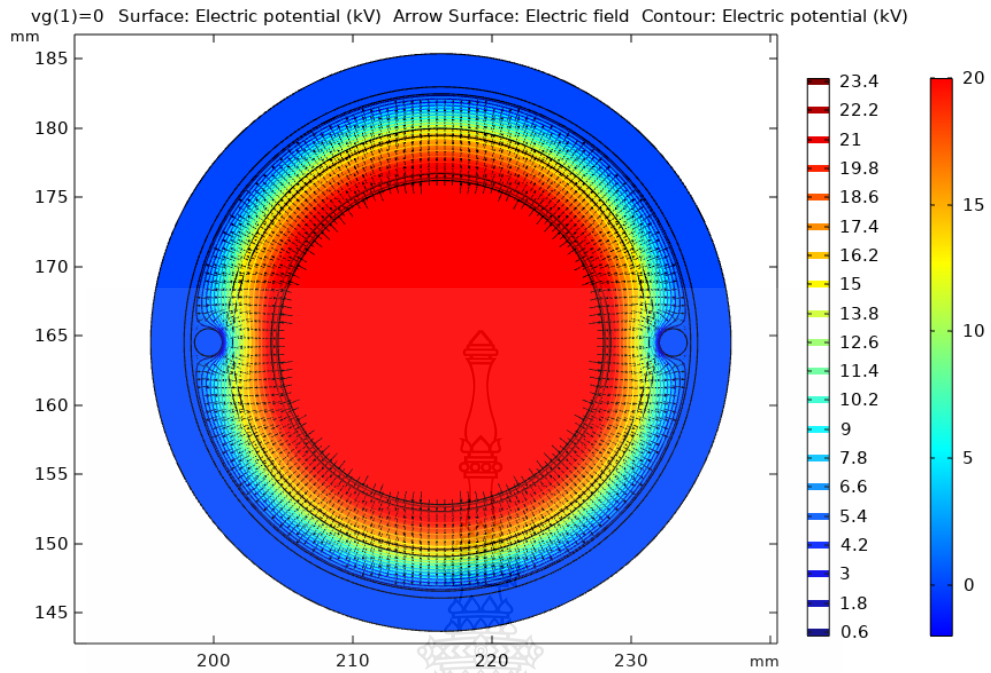
รูปที่ 4.66 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 5.5 มม.



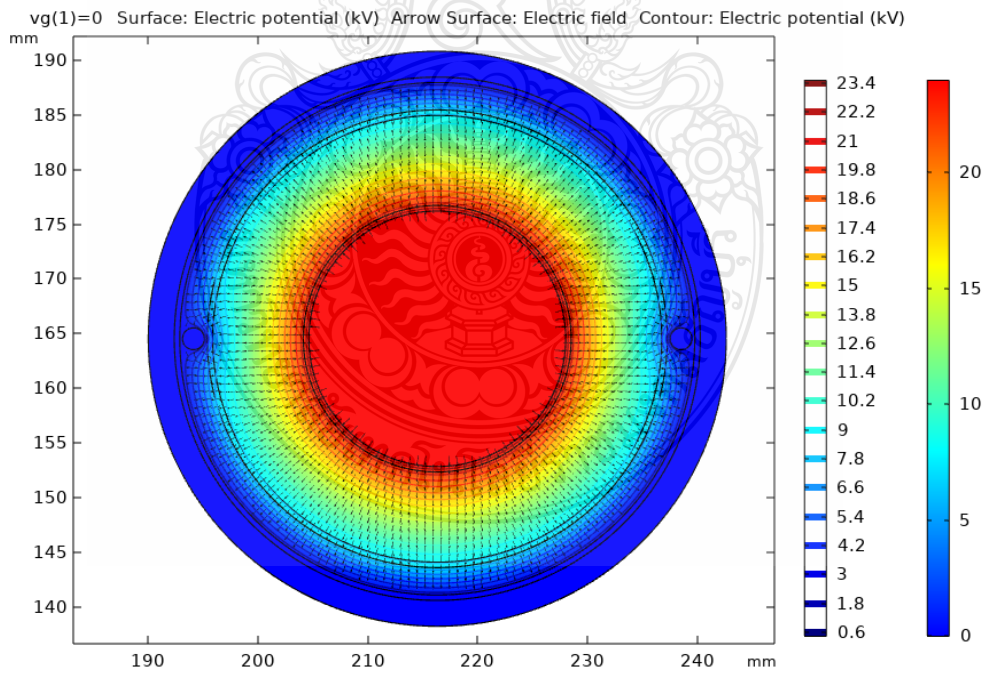
รูปที่ 4.67 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าต่อกราวด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 8.25 มม.



รูปที่ 4.68 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ขั้ว 0 V XLPE หนา 2.75 มม.

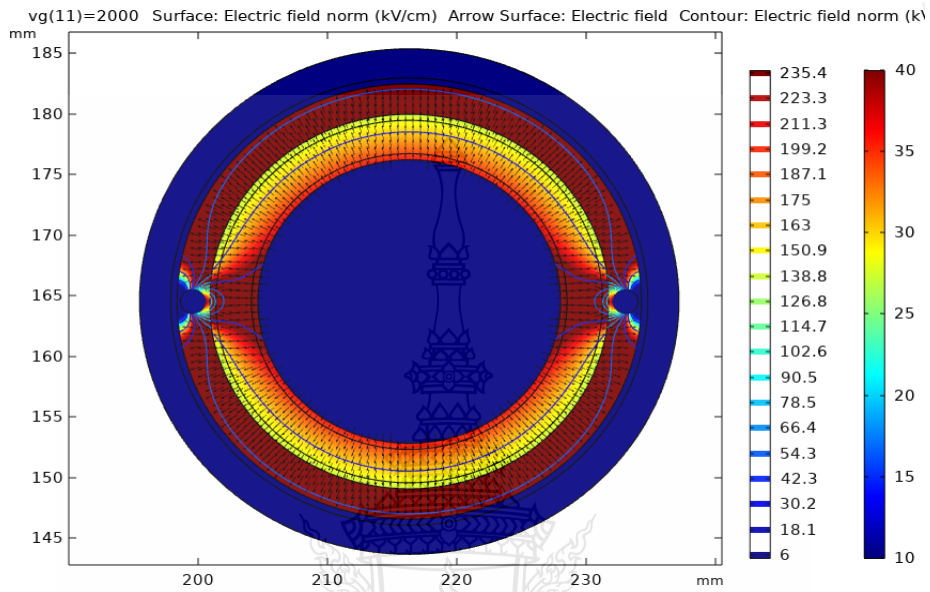


รูปที่ 4.69 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ชั่ว 0 V XLPE หนา 5.5 มม.

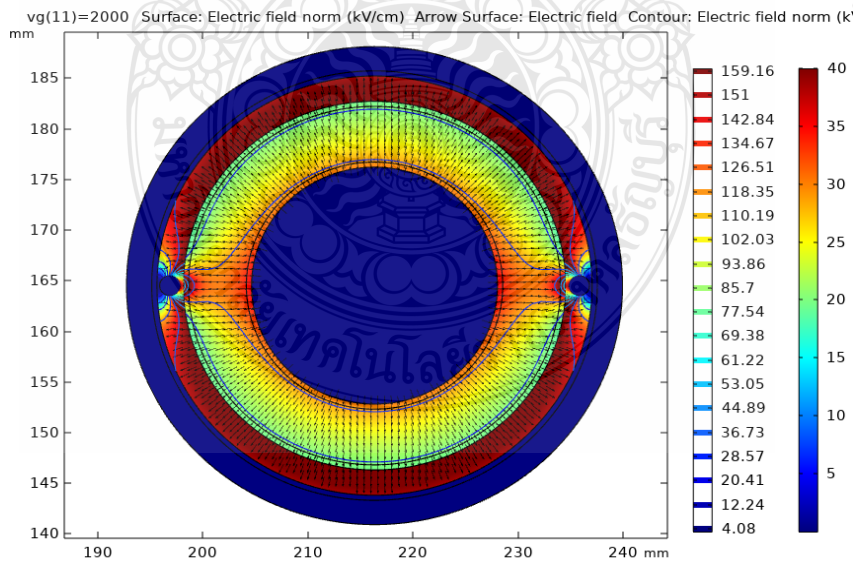


รูปที่ 4.70 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าต่อกราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ชั่ว 0 V XLPE หนา 8.25 มม.

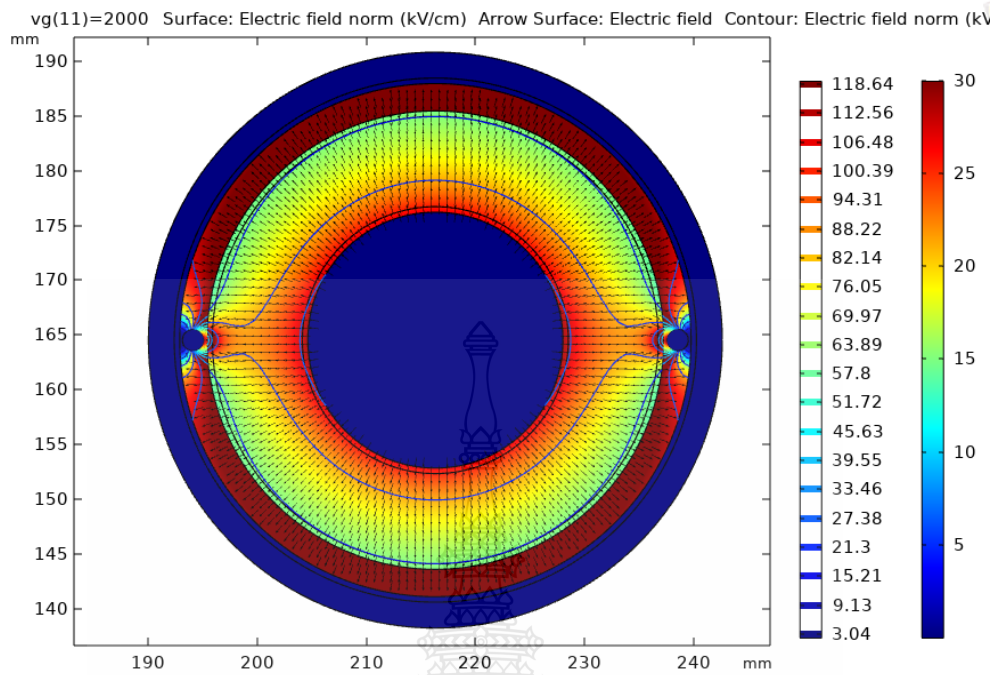
4.5.2 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด ขั้วต่อกราวนด์แบบกลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม., 5.5 มม. และ 8.25 มม. เมื่อแรงดันที่ขั้วจุดต่อกราวนด์ 2000 V จะแสดงค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ตามรูปที่ 4.71 ถึงรูปที่ 4.76



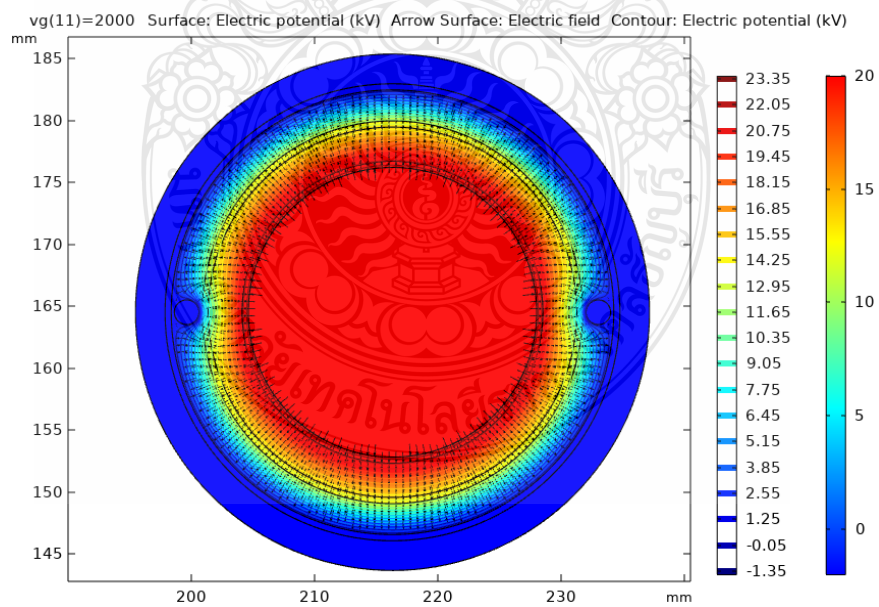
รูปที่ 4.71 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 2.75 มม.



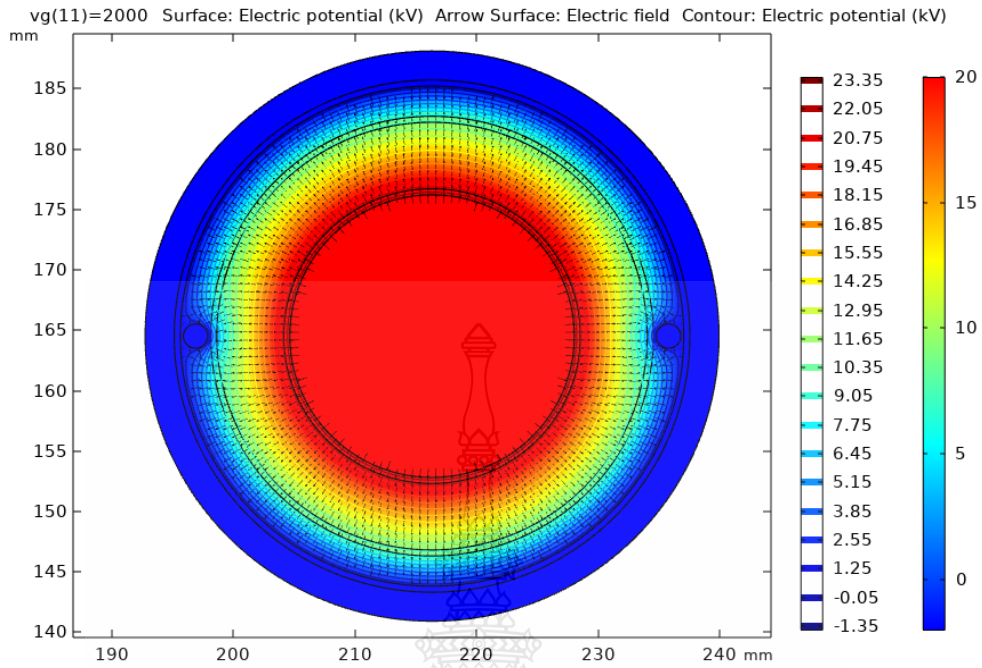
รูปที่ 4.72 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 5.5 มม.



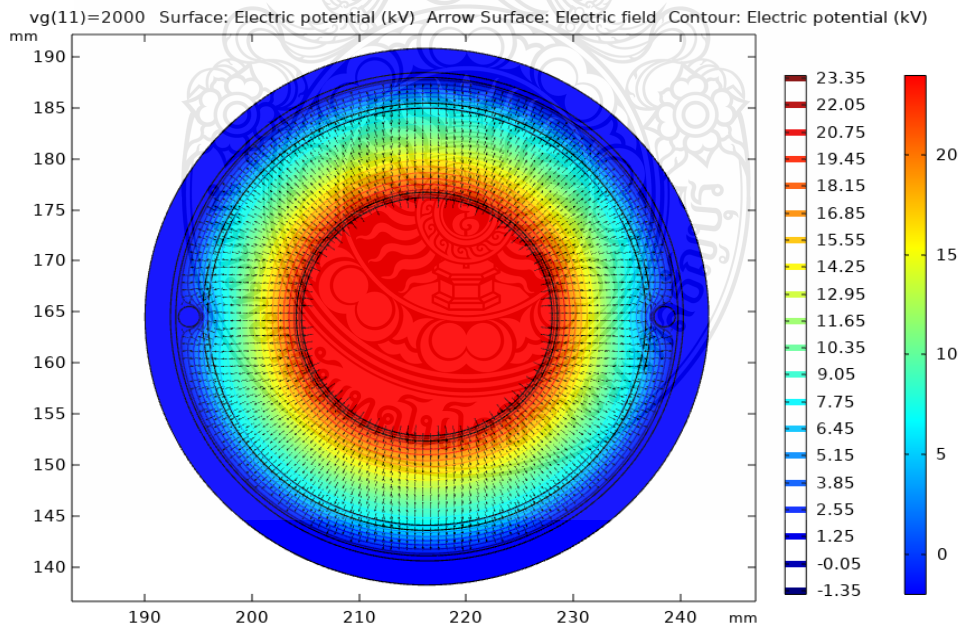
รูปที่ 4.73 ผลจำลองการกระจายสนามไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 8.25 มม.



รูปที่ 4.74 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ขั้ว 2000 V XLPE หนา 2.75 มม.

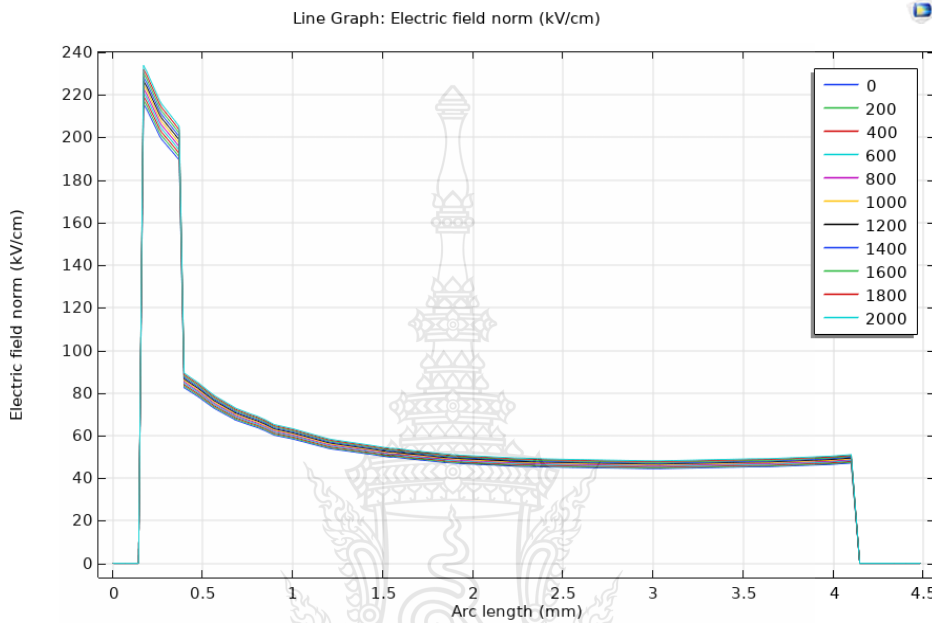


รูปที่ 4.75 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดต่อแรงดันที่ชั่ว 2000 V XLPE หนา 5.5 มม.

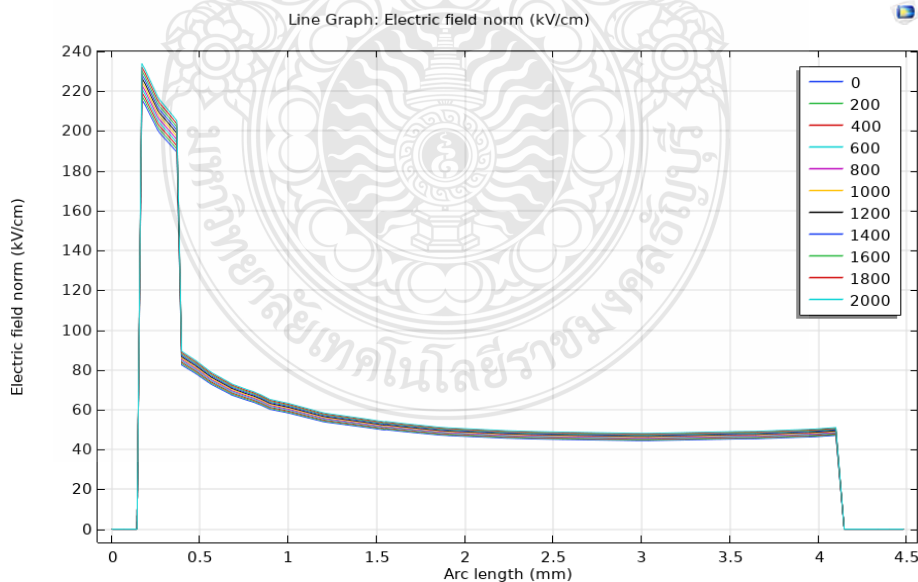


รูปที่ 4.76 ผลจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้ากราวนด์แบบกลม 2 จุดแรงดันที่ชั่ว 2000 V XLPE หนา 8.25 มม.

4.5.3 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แบบต่อกราวนด์ 2 จุด  
 ขั้วต่อกราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม., 5.5 มม. และ 8.25 มม. ที่แรงดันจุดต่อ  
 กราวนด์ 0 - 2000 V จะแสดงให้เห็นค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดตามระยะความห่าง  
 ระหว่างตัวนำและจุดต่อกราวนด์ดังรูปที่ 4.77 ถึงรูปที่ 4.88

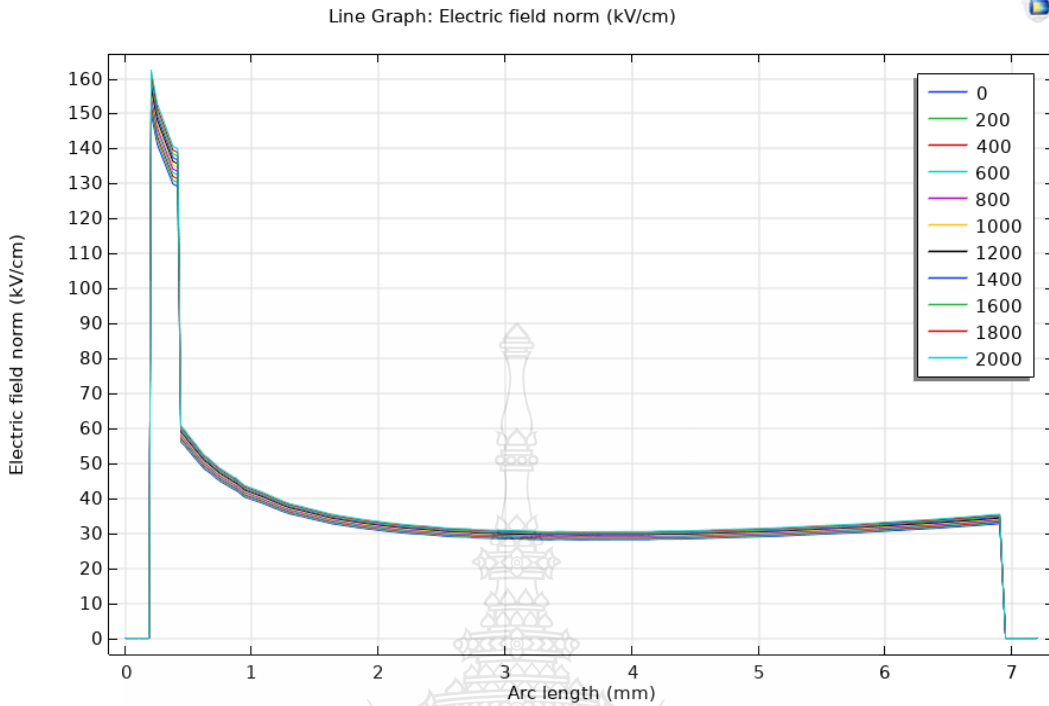


รูปที่ 4.77 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1

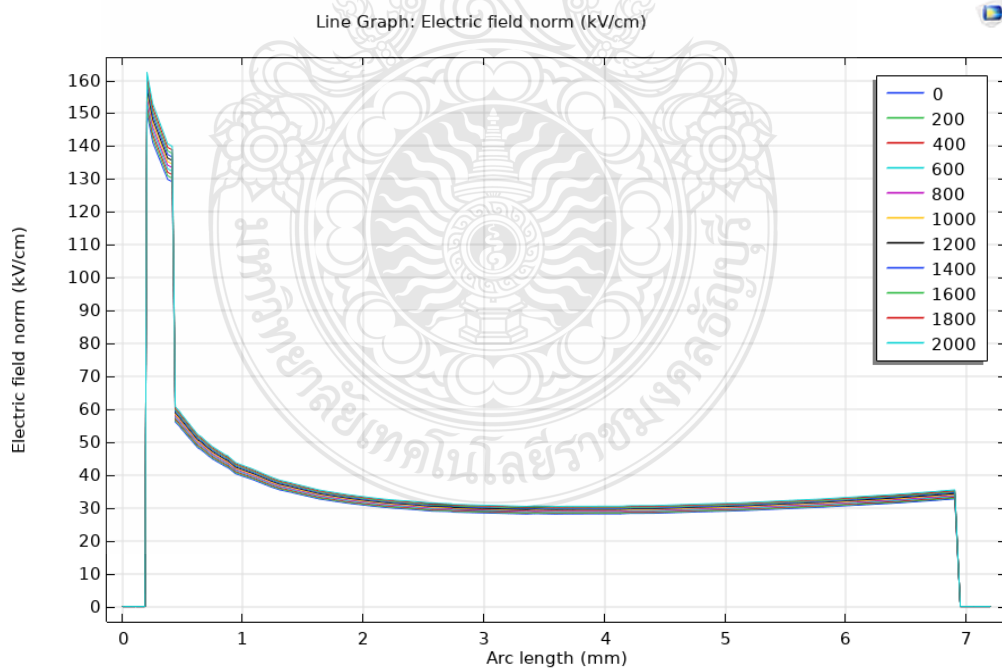


รูปที่ 4.78 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2  
 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.

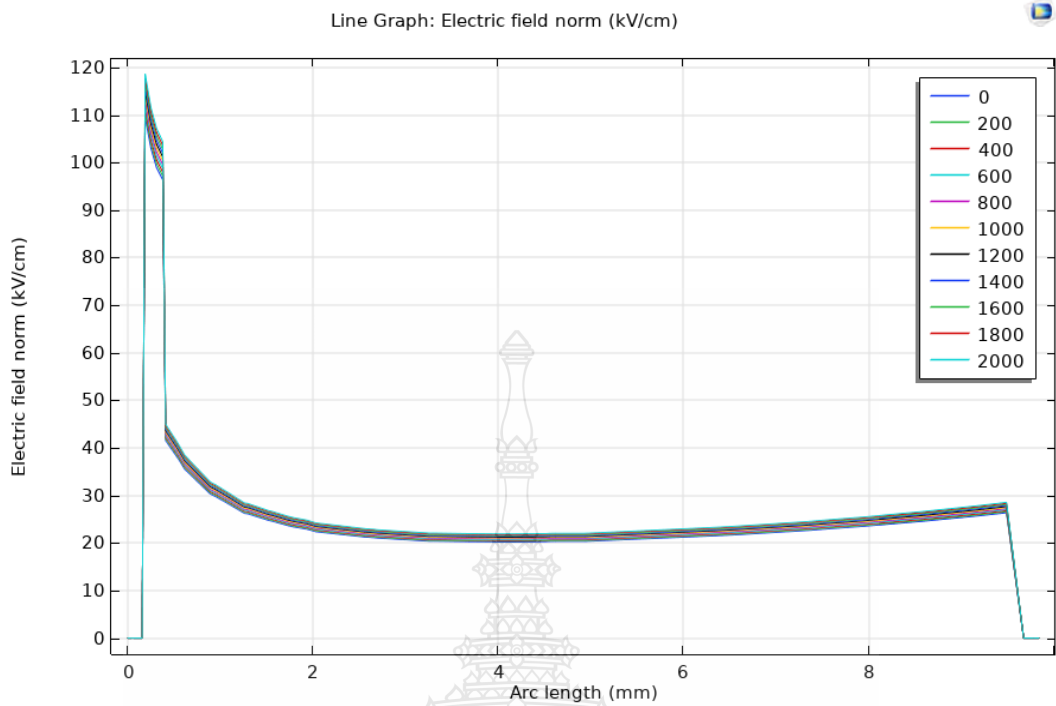




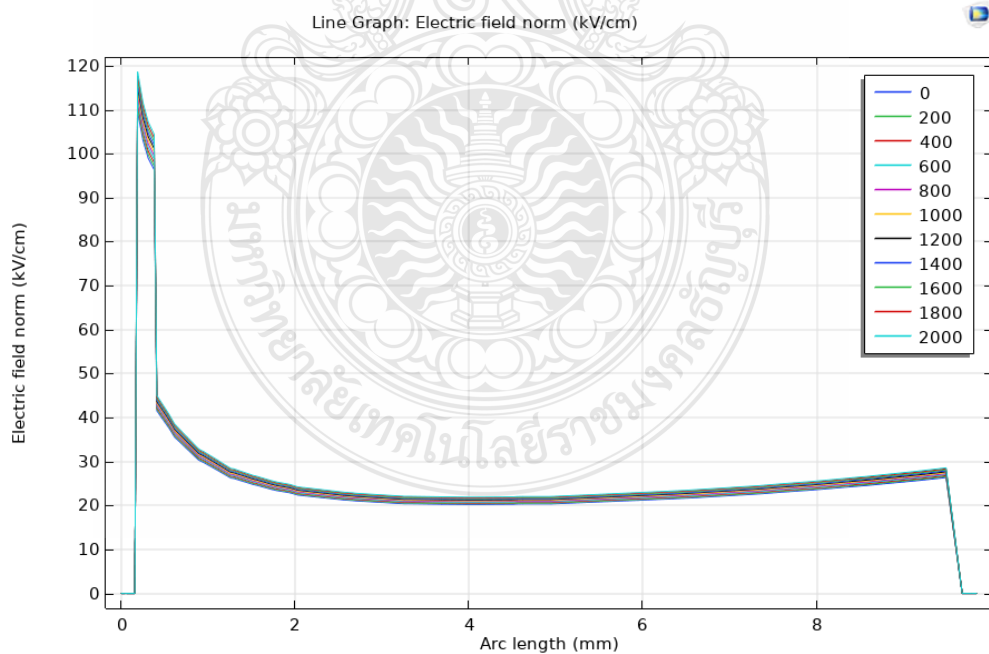
รูปที่ 4.79 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.



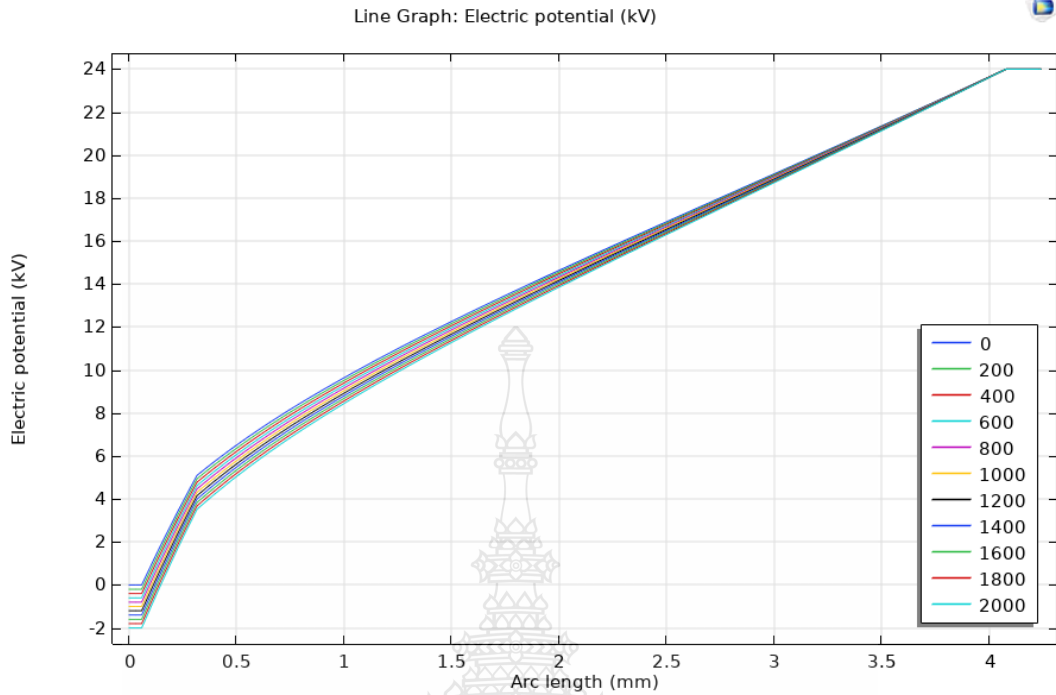
รูปที่ 4.80 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.



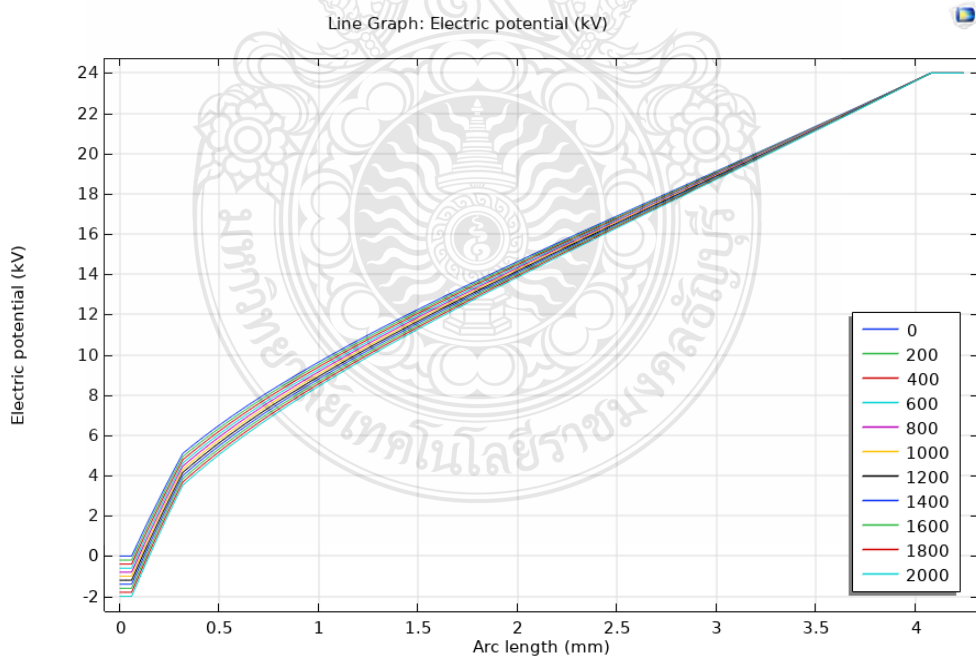
รูปที่ 4.81 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.



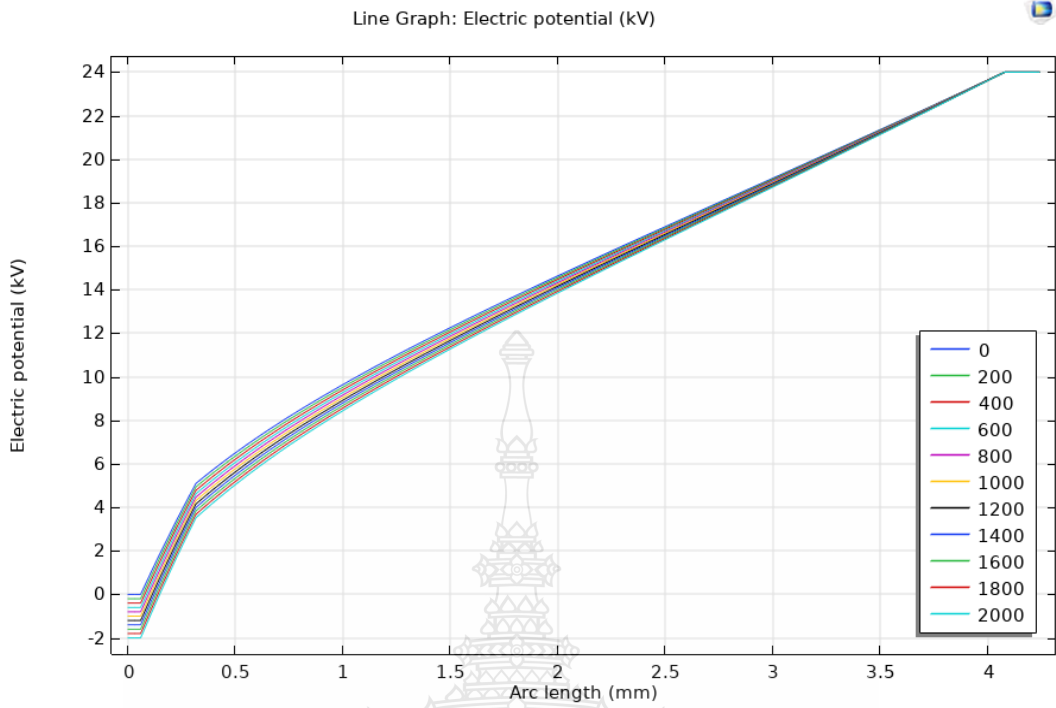
รูปที่ 4.82 กราฟผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.



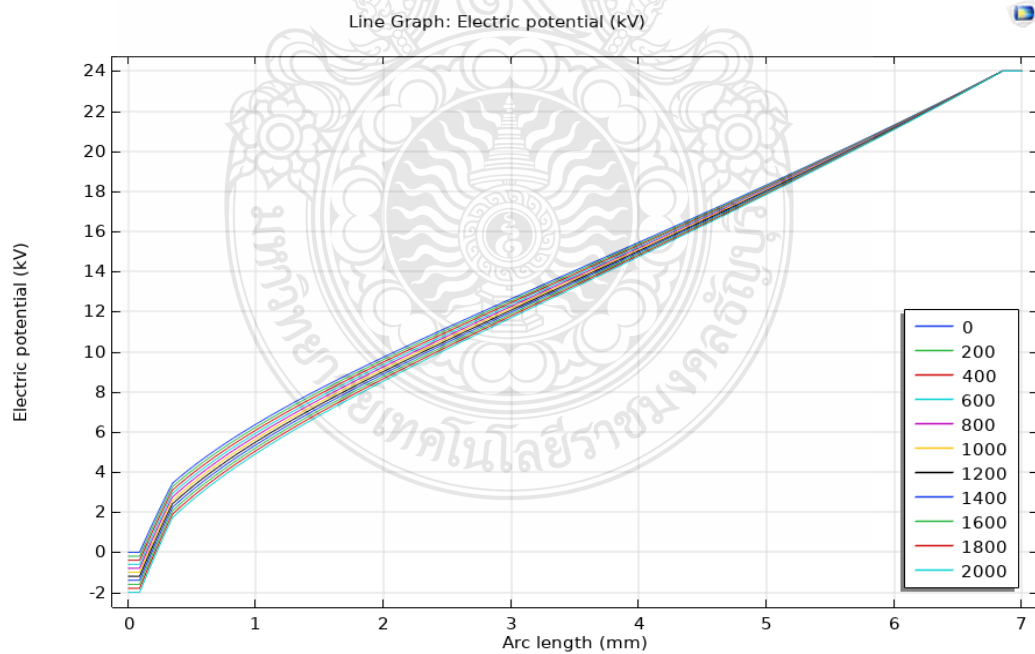
รูปที่ 4.83 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.



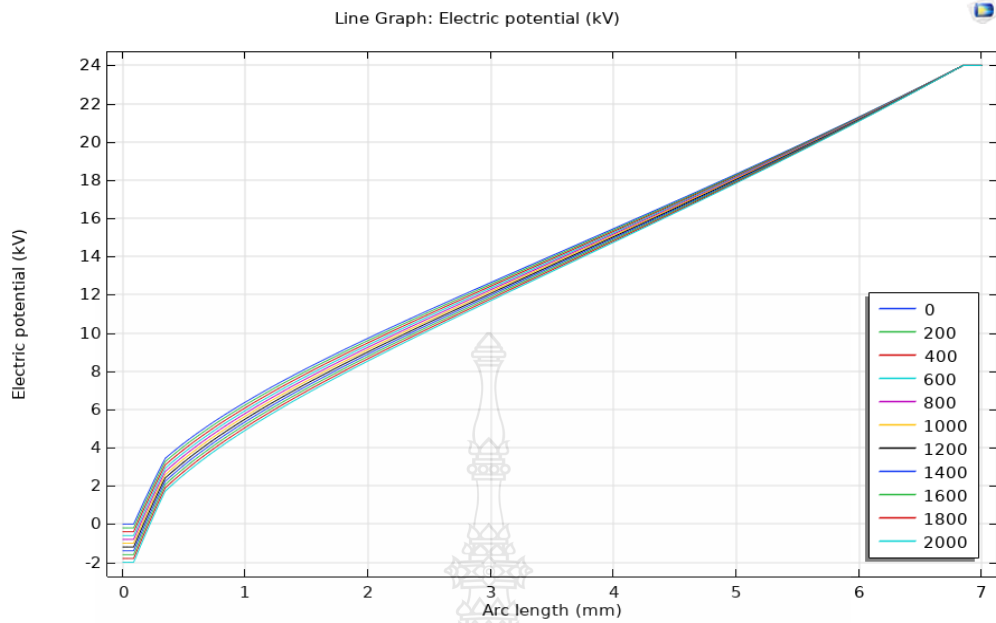
รูปที่ 4.84 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 2.75 มม.



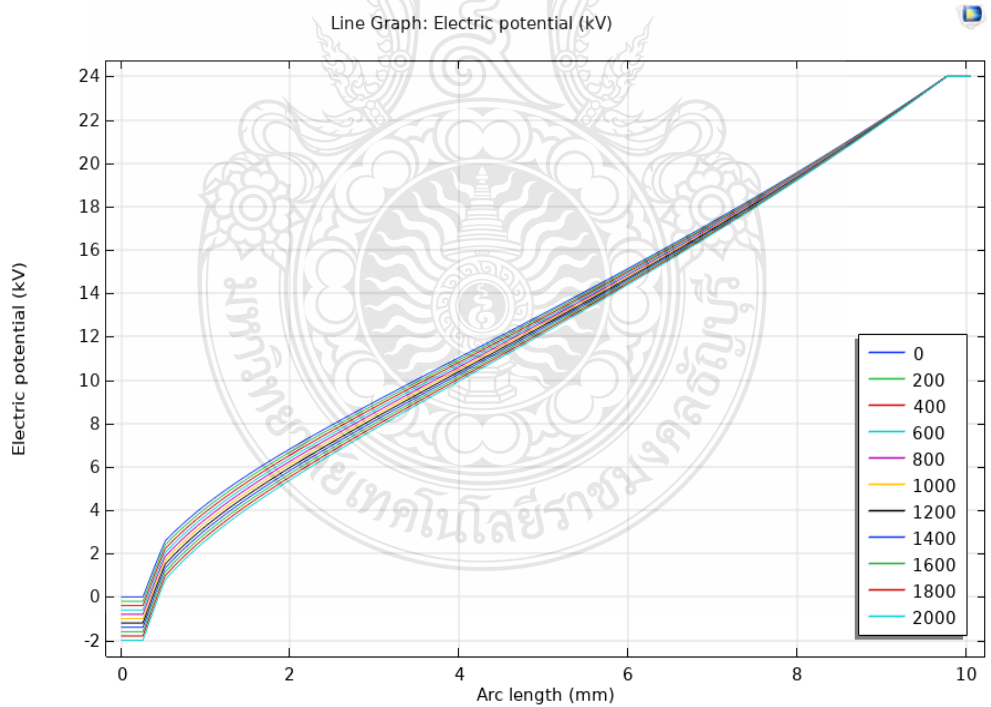
รูปที่ 4.85 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 1 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.



รูปที่ 4.86 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 5.5 มม.



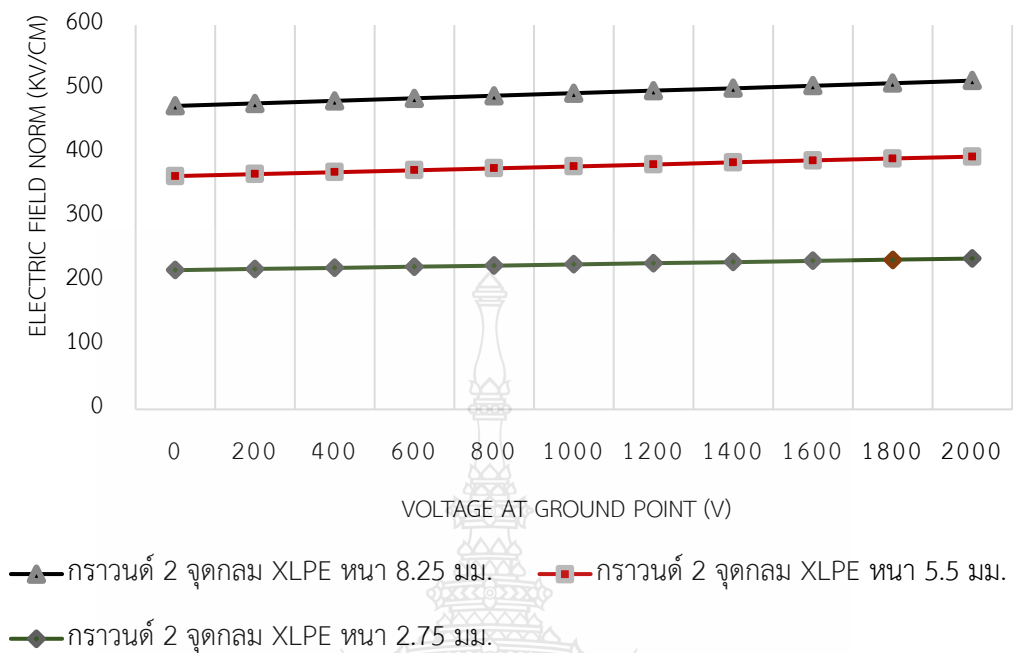
รูปที่ 4.87 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.



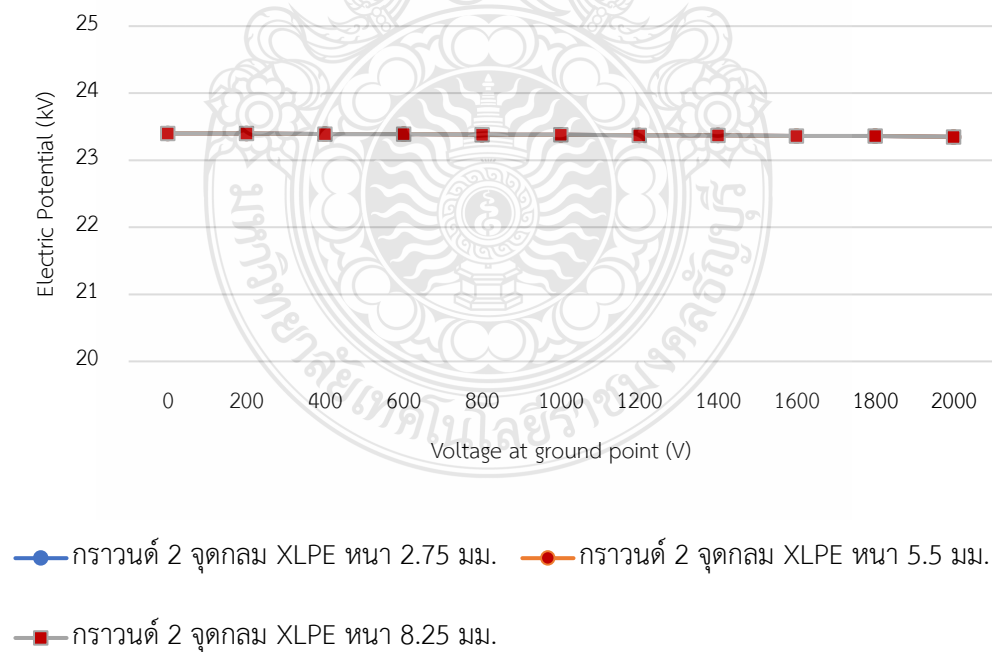
รูปที่ 4.88 กราฟผลการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันจุดต่อกราวนด์ 0 - 2000 V จุดที่ 2 กราวนด์กลม ที่ความหนา XLPE เท่ากับ 8.25 มม.

ตารางที่ 5 ค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่ความหนา XLPE 2.75, และ 8.25 มม. แบบต่อกราวนด์กลม  
2 จุด

แรงดัน ที่จุดต่อ กราวนด์  (V)	ค่าสนามไฟฟ้า			ค่าศักย์ไฟฟ้า		
	แบบต่อกราวนด์ 2 จุดความหนา XLPE ต่างกัน (kV/cm)					
	XLPE หนา 2.75 มม.	XLPE หนา 5.5 มม.	XLPE หนา 8.25 มม.	XLPE หนา 2.75 มม.	XLPE หนา 5.5 มม.	XLPE หนา 8.25 มม.
0.0	146.9	232.9	109.5	23.4	23.4	23.4
200.0	148.1	234.8	110.4	23.4	23.4	23.4
400.0	149.4	236.8	111.3	23.4	23.4	23.4
600.0	150.6	238.9	112.3	23.4	23.4	23.4
800.0	151.8	240.6	113.2	23.4	23.4	23.4
1000.0	153.0	242.6	114.1	23.4	23.4	23.4
1200.0	154.3	244.5	115.0	23.4	23.4	3.4
1400.0	155.5	246.5	115.9	23.4	23.4	23.4
1600.0	156.7	248.4	116.8	23.4	23.4	23.4
1800.0	157.9	250.3	117.7	23.4	23.4	23.4
2000.0	159.2	252.3	118.6	23.4	23.4	23.4



รูปที่ 4.89 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้า ที่ความหนาของ XLPE แตกต่างกัน



รูปที่ 4.90 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้า ที่ความหนาของ XLPE แตกต่างกัน

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จุดต่อกราวด์แบบกลม 2 จุดต่อในสายเคเบิลใต้ดินไฟฟ้าพิกัด 24 kV เมื่อค่าความหนาของฉนวน XLPE มีค่า 2.75 มม. 5.5 มม. และ 8.25 มม. จากผลการจำลองพบว่าค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 235.4 kV/cm 159.16 kV/cm และ 118.64 kV/cm เมื่อมีค่าแรงดันเกิดขึ้นที่จุดกราวด์ 2000 V ส่วนค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงดันที่จุดต่อกราวด์ 0 – 2000 V ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 23.35 kV

จากข้อมูลผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นที่จุดต่อกราวด์ 0 – 2000 V จะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแรงดันที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มขนาดความหนาของฉนวน XLPE หรือการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับจุดต่อกราวด์จะส่งผลให้ค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าลดลงอย่างชัดเจนส่วนค่าศักย์ไฟฟ้านั้นเมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นที่จุดต่อกราวด์จะไม่ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าได้





## บทที่ 5

### สรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่จุดต่อกราวนด์แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด ณ จุดกราวนด์ที่แรงดัน 0-2000V ใน 5 รูปแบบในโปรแกรมจำลอง COMSOL พบว่าการเพิ่มจุดต่อจะมีผลกับค่าสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย เมื่อเกิดแรงดัน 0-2000 V ที่จุดต่อกราวนด์มีผลทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นตามค่าของแรงดันและจุดต่อกราวนด์ที่มีพื้นผิวกลมหรือผิวเรียบจะมีค่าสนามไฟฟ้าน้อยกว่าจุดต่อกราวนด์ที่มีพื้นผิวที่เป็นเหลี่ยมหรือมีจุดแหลมคมแต่เมื่อเพิ่มขนาดความหนาของฉนวน XLPE หรือเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำและจุดต่อกราวนด์จะส่งผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าอย่างชัดเจนซึ่งสามารถเสนอผลของการทำวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้

1.) จุดต่อกราวด์แบบกลม ในการจำลองจุดต่อกราวด์แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มจุดต่อจะมีผลกับค่าสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยส่วนค่าศักย์ไฟฟ้านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเมื่อขั้วต่อกราวนด์มีค่าแรงดันไฟฟ้า 0-2000V พบว่าการเพิ่มของแรงดันที่ขั้วต่อกราวด์นั้นมีผลทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.) จุดต่อกราวด์แบบเหลี่ยม ในการจำลองจุดต่อกราวด์แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มจุดต่อจะมีผลกับค่าสนามไฟฟ้าสูงขึ้นมากตามจุดต่อที่เพิ่มขึ้นส่วนค่าศักย์ไฟฟ้านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเมื่อขั้วต่อกราวด์มีค่าแรงดันไฟฟ้า 0-2000V พบว่าการเพิ่มแรงดันที่ขั้วต่อกราวด์มีผลทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3.) การเพิ่มความหนาของฉนวน XLPE เป็น 2.75 มม. 5.5 มม. และ 8.25 มม. จากผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มความหนาของฉนวน XLPE หรือการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำกับจุดต่อกราวด์จะส่งผลกับค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่ออย่างชัดเจน เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นหรือระยะห่างมากขึ้นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าลดลงในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดไม่มีการเปลี่ยนแปลง

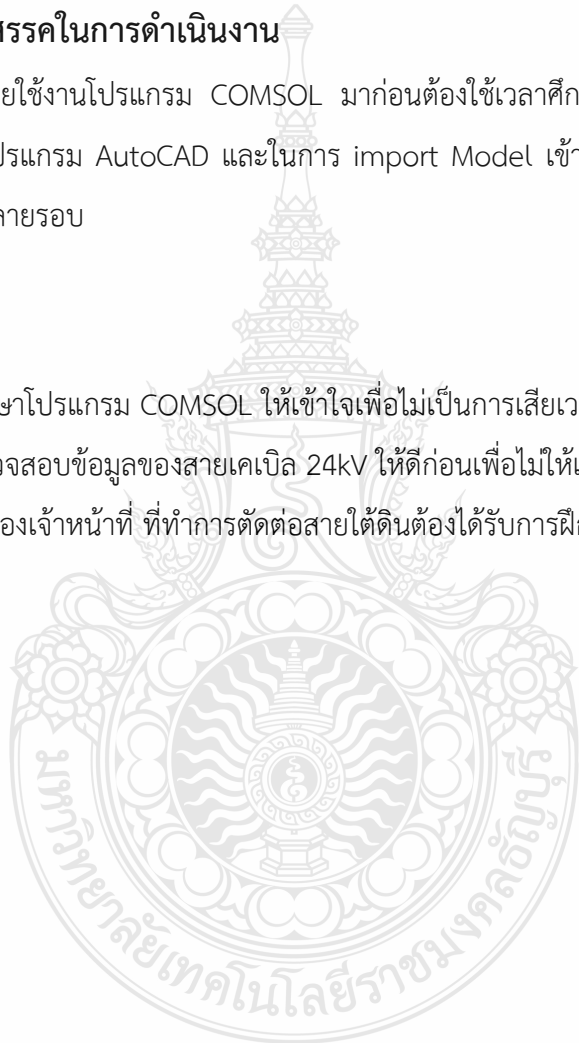
จากผลการวิเคราะห์พบว่าบริเวณจุดเชื่อมต่อกราวนด์ แบบ 1 จุด 2 จุด และ 3 จุด จะไม่ส่งผลกับค่าสนามไฟฟ้า แต่จุดต่อกราวนด์ที่เป็นเหลี่ยมจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดต่อกราวนด์ที่เป็นแบบกลม ส่วนการวิเคราะห์ระยะความหนาระหว่างตัวนำและกราวนด์จะพบว่าไม่มีผลต่อค่าของสนามไฟฟ้าอย่างชัดเจน ดังนั้นจุดต่อที่เหมาะสมคือจุดต่อกราวนด์แบบไม่ให้เกิดจุดแหลมคมที่บริเวณข้อ และการเพิ่มความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและกราวนด์จะส่งผลดีต่อค่าสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

เนื่องจากไม่เคยใช้งานโปรแกรม COMSOL มาก่อนต้องใช้เวลาศึกษาตัวโปรแกรม รวมถึงการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม AutoCAD และในการ import Model เข้าโปรแกรม COMSOL ทำได้ยากต้องเปลี่ยนแบบหลายรอบ

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ต้องศึกษาโปรแกรม COMSOL ให้เข้าใจเพื่อไม่เป็นการเสียเวลาในการทำวิจัย
- 5.3.2 ต้องตรวจสอบข้อมูลของสายเคเบิล 24kV ให้ดีก่อนเพื่อไม่ให้เสียเวลาในการจำลอง
- 5.3.3 ทักษะของเจ้าหน้าที่ ที่ทำการตัดต่อสายใต้ดินต้องได้รับการฝึกอบรมเป็นพิเศษ



## บรรณานุกรม

- [1] Supawud Nedphokaew, S. Pukjaroon and M. Boonthienthong, "Analysis of Electric Field Values in 24 kV High Voltage Power Cable with Program for Finding Partial Discharge Values,"
- [2] Mantosh Kumar, M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, P. Siano, F. Blaabjerg and Z. Leonowicz, "Electric field analysis of extra high voltage (EHV) underground cables using finite element method,"
- [3] I. A. Metwally, A. H. Al-Badi, A. S. Al-Hinai, F. Al Kamali and H. Al-Ghaithi, "Influence of design parameters and defects on electric field distributions inside MV cable joints,"
- [4] Chenet Chen, G. Liu, G. Lu and W. Jin, [4] "Influence of cable terminal stress cone install incorrectly,
- [5] Carstea and D. Carstea, [5] "An Inverse Problem for Electric Stress in Cable Terminations,"
- [6] Liu Gang, Liu Yigang, Wang Chao and Yi Zepei, [6] "The study on evaluation model for prefabricated HV stress cone of cable terminations weakness based on finite element,"
- [7] C. Stancu et al., [7] "Electric field computation in water treed polyethylene with space charge accumulation,"
- [8] Dr. Robert Strobl, W. Haverkamp, G. Malin and F. Fitzgerald, [8] "Evolution of stress Control systems in medium voltage cable accessories,"
- [9] ศุภกร มงคลลักษณ์ 2556 [9] การป้องกันการระเบิดของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินขนาด 115 kV โดย การลดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน
- [10] ธนากร น้าหอมจันทร์ และคณะ (2551) [10] เสนอการศึกษาการใช้กรวยลดความเครียดเพื่อใช้ ทดสอบหาติสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงพิกัด 12/20(24) kV
- [11] ปฏิภาณ เกิดลาภ. 2551 [11] การออกแบบขั้วต่อสายแบบ stress cone เพื่อ ใช้ในการทดสอบหา ติสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

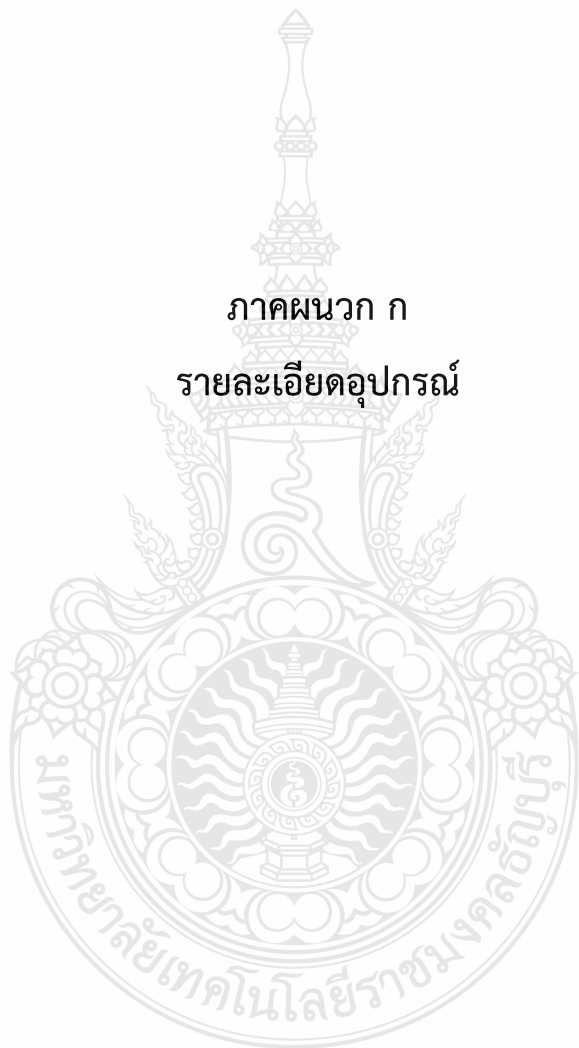
## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, 2548, ระบบเคเบิลใต้ดิน, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก <https://www.peac2eng.com/wp-content/uploads/2016/11/Book-cable-GREEN.pdf> (9 ธันวาคม 2564)
- [13] peccable, ไม่ระบุปี, คุณสมบัติสายไฟใต้ดิน สำหรับการติดตั้ง, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <https://www.pdcable.com/en> (8 ธันวาคม 2564).
- [14] pdcable, ไม่ระบุปี, คุณสมบัติสายไฟใต้ดิน สำหรับการติดตั้ง, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <https://www.pdcable.com/en> (8 ธันวาคม 2564).
- [15] THE STANDARD, 2019, ทำไมถึงต้องนำสายไฟฟ้าลงใต้ดิน, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <https://www.youtube.com/watch?v=JDyGUCnSk4> (8 ธันวาคม 2564).
- [16] MR.Green, ไม่ระบุปี, สนามไฟฟ้า, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/a/mattayom31.go.th/jirawat-npk/bth-thi-1/snam-fifa> (10 ธันวาคม 2564).
- [17] MR.Green, ไม่ระบุปี, สนามไฟฟ้า, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/a/mattayom31.go.th/jirawat-npk/bth-thi-1/snam-fifa> (10 ธันวาคม 2564).
- [18] Demetrius T. Paris and F. Kenneth Hurd, Basic Electromagnetic Theory, McGraw-Hill, New York 1969, แรงแดันไฟฟ้า, [Online] Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%A3%E0%B8%87%E0%B8%94%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2> (10 December 2021).
- [19] Brightway, ไม่ระบุปี, Horizontal Directional Drilling (HDD) Technology, [Online] Available : <http://www.slurrytreatmentplant.com/news/company-news/88.html> (10 December 2021).
- [20] สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ จ. เชียงใหม่, ไม่ระบุปี, COMSOL Multiphysics®, (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <http://thepcenter>.


ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
รายละเอียดอุปกรณ์



# ตารางสายไฟฟ้าใต้ดิน



PHELPS DODGE CABLE TYPE MXLP-CWS



PHELPS DODGE CABLE TYPE MXLP-CWS

### MEDIUM VOLTAGE CROSS-LINKED POLYETHYLENE CABLE 12 / 20 (24) kV COPPER CONDUCTOR WITH COPPER WIRE SHIELD

**APPLICATION :**  
Preferably used for urban networks.  
Exposed in aerial, direct burial, conduit, open tray and underground duct installation.

**Max. Conductor Temperature :**  
90 °C (Normal Operation)

**AC TEST VOLTAGE :**  
42 kV for 5 minutes

**REFERENCE STANDARD :**  
IEC 60502-2



**CONSTRUCTION :**

Conductor : Compact round stranded copper.  
 Conductor shield : Semi-conducting cross-linked polyethylene.  
 Insulation : Cross-linked polyethylene.  
 Insulation shield : Semi-conducting cross-linked polyethylene.  
 Metallic shield : Annealed copper wire with copper contact tape  
 Binding tape : Polyester tape or Spunbond Tape  
 Oversheath : Black PE (ST 7) (PVC is available upon request)

Nominal cross-sectional area mm <sup>2</sup>	Minimum number of wire of conductor	Diameter of conductor (Approx.) mm	Nominal thickness of insulation mm	Diameter over insulation (Approx.) mm	Copper wire shield		Nominal thickness of oversheath mm	Overall diameter (Approx.) mm	Cable weight (Approx.) kg/km	Standard packing m
					Nominal diameter of wire mm	Number of wire				
35	6	7.0	5.5	19.3	0.80	20	1.8	27	815	1,000/R
50	6	8.0	5.5	20.3	0.80	20	1.8	28	955	1,000/R
70	12	9.7	5.5	22.0	0.80	20	1.9	30	1,205	1,000/R
95	15	11.3	5.5	23.6	0.80	20	1.9	31	1,480	1,000/R
120	18	12.8	5.5	25.1	0.80	20	2.0	33	1,760	1,000/R
150	18	14.2	5.5	26.5	0.90	25	2.0	35	2,125	1,000/R
185	30	15.8	5.5	28.1	0.90	25	2.1	37	2,515	500/R
240	34	18.2	5.5	30.5	1.03	30	2.2	40	3,215	500/R
300	34	20.3	5.5	32.6	1.03	30	2.2	42	3,825	500/R
400	53	23.0	5.5	35.3	1.03	30	2.3	45	4,665	500/R
500	53	25.9	5.5	38.5	1.03	30	2.4	48	5,780	250/R
630	53	29.9	5.5	42.5	1.03	30	2.5	52	7,240	250/R
800	53	33.8	5.5	46.4	1.03	30	2.7	57	9,040	250/R
1,000	53	39.8	5.5	52.4	1.03	30	2.8	63	11,205	250/R
1,200	-	42.9	5.5	55.5	1.03	30	2.9	66	12,880	250/R

R = Packing in reel

#### Electrical Characteristics and Current Carrying Capacity

Nominal cross-sectional area mm <sup>2</sup>	Max. Rd. at 20 °C of Cb. mΩ/km	Min. R <sub>0</sub> at 20 °C mΩ/km	Current Carrying Capacity* (A)		Current Carrying Capacity* (A)		Current Carrying Capacity* (A)	
			In Air	In Ground	In Ground	In FE Duct, In Ground		
35	0.524	1.391	181	216	168	175	152	157
50	0.387	1.229	217	259	198	207	179	186
70	0.268	1.085	271	324	242	253	219	227
95	0.193	979	329	395	289	303	261	272
120	0.153	897	380	457	328	344	298	310
150	0.124	834	433	520	367	387	334	348
185	0.0991	770	497	597	414	437	378	395
240	0.0754	692	589	710	479	508	440	460
300	0.0601	635	674	816	540	574	497	521
400	0.0470	575	781	950	612	653	568	597
500	0.0366	529	900	1,101	691	745	649	684
630	0.0283	470	1,040	1,287	778	830	742	785
800	0.0221	424	1,180	1,480	862	916	839	892
1,000	0.0176	368	1,332	1,699	942	1,065	939	1,003
1,200	0.0151	345	1,425	1,837	993	1,135	1,003	1,074

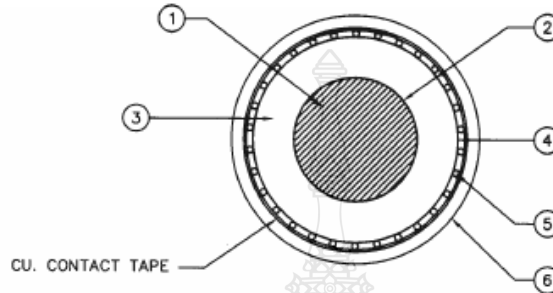
**\*CONDITION :**

- Conductor temperature 90 °C
- Ambient air temperature 40 °C
- Ground temperature 30 °C
- Depth of laying 0.8 m in ground
- Thermal resistivity of soil 1.2 K·m/W
- Axial spacing between phase cables in flat formation  
2xOD<sub>cable</sub> or 2xOD<sub>duct</sub>
- Shields bonded at single point

22
23

physical characteristic

**PHYSICAL CHARACTERISTICS  
OF  
12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**



DESCRIPTION	NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>				
	70	120	240	400	800
MINIMUM NUMBER OF STRAND WIRES	12	18	34	53	53
DIAMETER OF CONDUCTOR, mm (1)	9.73±1%	12.95±1%	18.47±1%	23.39±1%	34.00±1%
MINIMUM THICKNESS OF CONDUCTOR SCREEN, mm (2)	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635
THICKNESS OF INSULATION, mm (3)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
RANGE OF DIAMETER OVER INSULATION, mm	21.7-23.9	25.0-27.4	30.5-33.5	35.4-38.9	46.0-50.6
MINIMUM THICKNESS OF INSULATION SCREEN, mm (4)	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635
MINIMUM NUMBER OF SCREEN WIRES	20	20	30	30	35
MINIMUM TOTAL SECTIONAL AREA OF CU. WIRE SCREEN, mm <sup>2</sup> (5)	10	10	25	25	25
THICKNESS OF NON-METALLIC SHEATH, mm (6)	1.8	2.0	2.1	2.3	2.6
RANGE OF OVERALL DIAMETER (D), mm	28.0-30.0	31.0-35.0	39.0-42.2	44.5-48.0	57.5-61.0
WEIGHT OF CABLE, kg/km (APPROX.)	1,200	1,700	3,200	4,600	9,000
MINIMUM BENDING RADIUS	12D				
MAXIMUM PERMISSIBLE PULLING FORCE, kgf (lbf)	WITH PULLING EYE	490 <sup>B</sup> (1,080)	840 <sup>B</sup> (1,852)	1,680 <sup>B</sup> (3,704)	2,268 (5,000)
	WITH PULLING GRIP	454(1,000)			-
MAXIMUM ALLOWABLE SIDEWALL PRESSURE, kgf/m (lbf/ft)	744(500)				

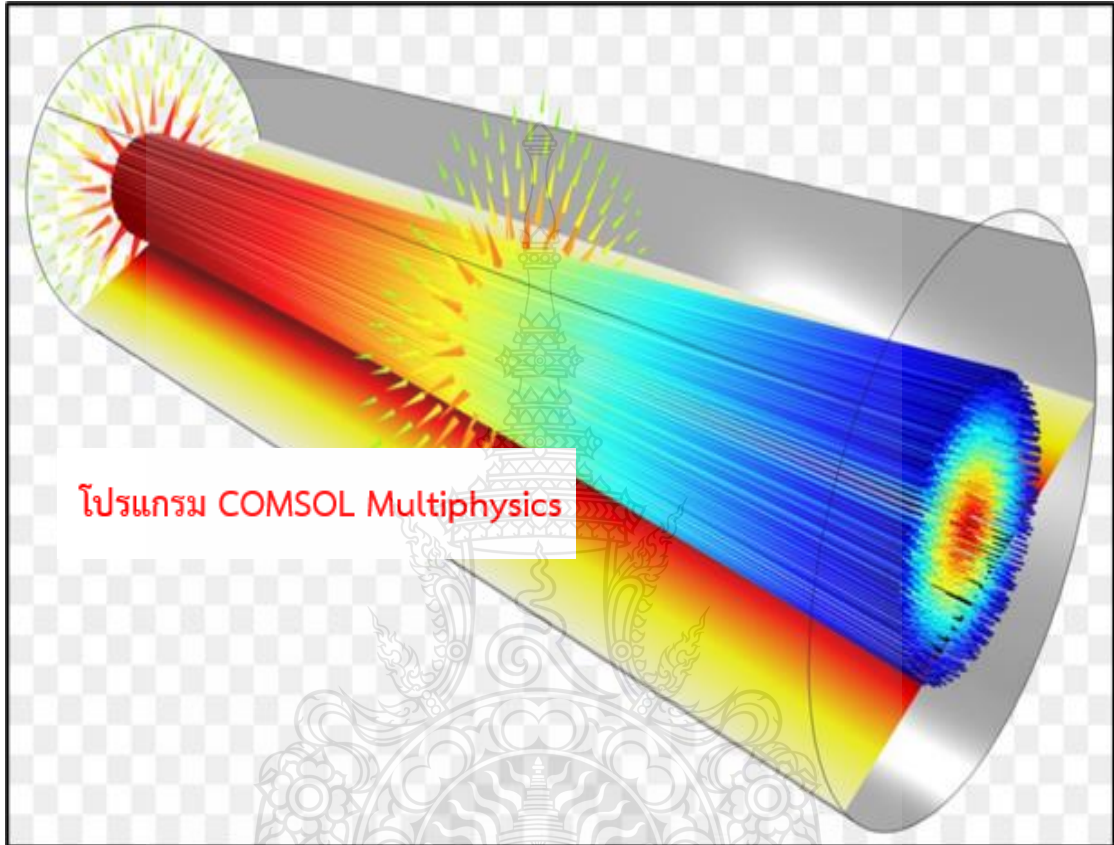
CONDUCTOR SIZE, mm <sup>2</sup>	CODE NO.	
	PE JACKET	FIRE RETARDANT JACKET
70	6145-235-07100	6145-235-07300
120	6145-235-12100	-
240	6145-235-24100	6145-235-24300
400	6145-235-40100	6145-235-40300
800	6145-235-80100	6145-235-80300

- NOTES** 1. SEE MEA'S SPECIFICATION FOR MORE DETAILS.  
2. PULLING FORCE ARE BASED ON MAXIMUM ALLOWABLE STRESS ON CONDUCTOR 7 kgf/mm<sup>2</sup>

REV.NO.	DESCRIPTION	OF REVISIONS	BY	DATE
DR. Paramej	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. R. Thon		PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS	SUPERSEDING	
DIR.DEPT. Jussachai		OF	SH.NO. 1 OF 2	
DEP.GOV. Vee		12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE	DWG. NO. <b>UG-4-015</b>	
DATE 24/1/2549				



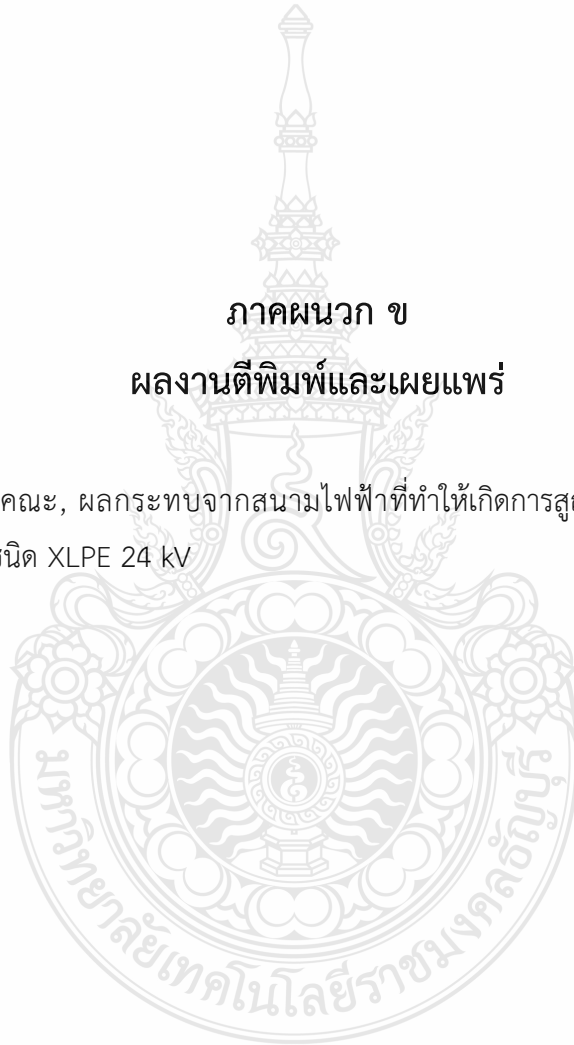
Program COMSOL Multiphysics



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่

1. ณรงค์ ศรีสง่า และคณะ, ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV





## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44

The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-44)

17-19 พฤศจิกายน 2564

ณ โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
  
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
  
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- พลังงานหมุนเวียน (RE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)



**EECON-44**  
Electrical Engineering Conference





## รายนามคณะกรรมการสภาวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.พินิจ เทพสาธ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.เดชา วิไลรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
อ.ธนวิชญ์ ชุติกาวิทย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



## รายนามหน่วยงานที่เป็นคณะกรรมการสามัญและคณะกรรมการสมทบ

### สถาบันกรรมการสามัญ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยสยาม  
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ  
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย  
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์  
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยรังสิต  
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

### สถาบันกรรมการสามัญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
มหาวิทยาลัยพะเยา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

### สถาบันกรรมการสมทบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



## คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON-44)

### ประธาน

รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### เลขานุการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### คณะกรรมการอำนวยการ

- |   |  |                            |
|---|--|----------------------------|
| 1. อธิการบดี                                      |  | ประธานกรรมการ              |
| 2. รองอธิการบดีทุกฝ่าย                            |  | กรรมการ                    |
| 3. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาคณาจารย์    |  | กรรมการ                    |
| 4. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายประกันคุณภาพ               |  | กรรมการ                    |
| 5. คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม                    |  | กรรมการ                    |
| 6. คณบดีคณะศิลปศาสตร์                             |  | กรรมการ                    |
| 7. รองคณบดีคณะศิลปศาสตร์                          |  | กรรมการ                    |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ            |  | กรรมการ                    |
| 9. อาจารย์ ดร.ชลากกร ยุตมรักษาสกุล                |  | กรรมการ                    |
| 10. อาจารย์ ดร.ณัฐชัยธร วิฑิธิกรสิริกุล           |  | กรรมการ                    |
| 11. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์                        |  | กรรมการและเลขานุการ        |
| 12. รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายวิชาการและวิจัย |  | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

### คณะกรรมการดำเนินงาน ประกอบด้วย

- |   |  |               |
|---|--|---------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ   |  | ประธานกรรมการ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กร พวงนาค                |  | กรรมการ       |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ     |  | กรรมการ       |
| 4. เรืออากาศตรี ดร.พลกฤษณ์ จรรย์คันดิเวทย์    |  | กรรมการ       |
| 5. อาจารย์สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์                |  | กรรมการ       |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ |  | กรรมการ       |



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



7.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส	บุญเที่ยรทอง	กรรมการ
8.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์	ประกอบกิจ	กรรมการ
9.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิศักดิ์	วรดิษฐ์	กรรมการ
10.	อาจารย์ ดร.คชพงศ์	สุมานนท์	กรรมการ
11.	อาจารย์ ดร.วรกเอก	อินทขันธ์	กรรมการ
12.	อาจารย์ ดร.วาริน	วีระสินธุ์	กรรมการ
13.	อาจารย์อัมภรณ์	พีรณิชากร	กรรมการ
14.	นางภัครินทร์	เขื่อนเคนทร์	กรรมการ
15.	รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ	เนตรโพธิ์แก้ว	กรรมการและเลขานุการ
16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษา	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
17.	อาจารย์ ดร.ภควัต	เกอะประสิทธิ์	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายดำเนินการคัดเลือกบทความและนำเสนอบทความ**

1.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร	วุฒิพัฒน์พันธุ์	ประธานอนุกรรมการ
2.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา	คุณขาว	อนุกรรมการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุรฉกร	อยู่สุข	อนุกรรมการ
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ	คุณรัตน์ศิริ	อนุกรรมการ
5.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์	ประกอบกิจ	อนุกรรมการ
6.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัจจา	ลักษณะอำนาจพร	อนุกรรมการ
7.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะกิจ	วัฒน์กั๊ธ	อนุกรรมการ
8.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์	วัฒน์กั๊ธ	อนุกรรมการ
9.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เวทรินทร์	ฉลธิประเสริฐ	อนุกรรมการ
10.	อาจารย์ ดร.ธนารัตน์	ต้นมณีประเสริฐ	อนุกรรมการ
11.	อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์	สุวรรณกิงคาร	อนุกรรมการ
12.	อาจารย์ ดร.คชพงศ์	สุมานนท์	อนุกรรมการ
13.	อาจารย์ ดร.อานนท์	สิงห์เสถียร	อนุกรรมการ
14.	อาจารย์นิลमित	นิลาศ	อนุกรรมการ
15.	อาจารย์สุวิสต์	แพ่งธีระสุขมัย	อนุกรรมการ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน



16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต. ดร.พรชัย เตชะธเนศวรชัย		อนุกรรมการ
17.	อาจารย์ ดร.ทวีศักดิ์	ตรงศิริกุล	อนุกรรมการ
18.	อาจารย์ ดร.มนตรี	บุญเรืองเศษ	อนุกรรมการ
19.	อาจารย์ ดร.ชนิษฐา	ดีสุบิน	อนุกรรมการ
20.	อาจารย์ ดร.วารินี	วีระสินธุ์	อนุกรรมการ
21.	อาจารย์สุปัญญา	สิงห์กรณ์	อนุกรรมการ
22.	อาจารย์กมลณิษฐ์	ภู่อสร	อนุกรรมการ
23.	อาจารย์วรรณภา	มโนสืบ	อนุกรรมการ
24.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี	วรรณการ	อนุกรรมการและเลขานุการ
25.	นางสาวลลิตา	นาคจำแลง	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
26.	นายชนพล	สวนลำไย	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
27.	นางสาวเลิศลักษณ์	บัวทอง	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะอนุกรรมการจัดทำเล่มบทความ**

1.	รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ	เนตรโพธิ์แก้ว	ประธานอนุกรรมการ
2.	เรืออากาศตรี ดร.พลกฤษณ์	จริยตันติเวทย์	อนุกรรมการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์	สุดคณิง	อนุกรรมการ
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษ์	อนุกรรมการ
5.	อาจารย์ ดร.ฉัตรแก้ว	จริยตันติเวทย์	อนุกรรมการ
6.	อาจารย์ ดร.ยุทธนา	สรวลสรรงค์	อนุกรรมการ
7.	อาจารย์นพกฤษณ์	ดำน้อย	อนุกรรมการ
8.	อาจารย์ชลิตา	อุดมรักษาสกุล	อนุกรรมการ
9.	อาจารย์วิวิศย์	ปุยสำลี	อนุกรรมการ
10.	อาจารย์นิคม	ดิษฐุศิลป์	อนุกรรมการ
11.	อาจารย์วรรณภา	มโนสืบ	อนุกรรมการ
12.	นายชนพล	สวนลำไย	อนุกรรมการ
13.	อาจารย์ ดร.อัญชลี	มโนสืบ	อนุกรรมการและเลขานุการ
14.	อาจารย์นเรศ	ชลิ่งสุทธิ	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
15.	นางสาวลลิตา	นาคจำแลง	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอน่าน จังหวัดน่าน



**คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ**

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส	บุญเกียรติทอง	ประธานอนุกรรมการ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์	วัฒน์กัธธร	อนุกรรมการ
3. อาจารย์ ดร.คชพงศ์	สุมานนท์	อนุกรรมการ
4. อาจารย์ ดร.อานนท์	สิงห์เสถียร	อนุกรรมการ
5. อาจารย์อรุณพล	ช่วยคำชู	อนุกรรมการ
6. นางสาวจันทร์เพ็ญ	คำภูมิ	อนุกรรมการ
7. นายสมยศ	แสงจันทร์	อนุกรรมการ
8. นางสาวเนตรนภา	แสงเงิน	อนุกรรมการ
9. นางกัญญาชีสา	ธัญสิประเสริฐ	อนุกรรมการ
10. นายไพฑูรย์	อาราเบีย	อนุกรรมการ
11. นายปิยะพันธ์	บำเรอจิตร	อนุกรรมการ
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะกิจ	วัฒน์กัธธร	อนุกรรมการและเลขานุการ
13. นางวรรณรัฐ	คงสมบูรณ์	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายต้อนรับและงานเอกสารสารบรรณ**

1. นางภัครัตน์	เชื่อนเคนทร์	ประธานอนุกรรมการ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษ์	อนุกรรมการ
3. นางสาวทิพรดา	มั่งดี	อนุกรรมการ
4. นางนงนภัส	ทองวิจิตร	อนุกรรมการ
5. นางสาวกชพร	ลีไพบูลย์	อนุกรรมการ
6. นางสาวสุกัลยา	ข้าทัศน์	อนุกรรมการ
7. นางสาวจิตเกษม	ใจแก้ว	อนุกรรมการ
8. นางสาวสุภาภรณ์	ลาหุม	อนุกรรมการและเลขานุการ
9. นางสาวสุภาพร	มีสาตร์	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



**คณะกรรมการฝ่ายการเงิน**

1. รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายบริหาร		ประธานอนุกรรมการ
2. นางสาวนรรัตน์	มุกนนท์	อนุกรรมการ
3. นางสาวกมลวรรณ	อาชาอาชานกุล	อนุกรรมการ
4. นางสาวธีรนาภา	การณย์นวลศิริ	อนุกรรมการ
5. นางธัชมนตร์	พินิจเวชการ	อนุกรรมการ
6. นางสาวปลื้มจิตต์	นราภรณ์ชัยวัฒน์	อนุกรรมการ
7. นางศรัณญา	พิริยประเสริฐ	อนุกรรมการและเลขานุการ
8. นางสาวปิยะดา	ตระกูลอ่ำ	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายลงทะเบียน**

1. อาจารย์ประสิทธิ์	แพ่งเพชร	ประธานอนุกรรมการ
2. นางสาวศิริกุล	ภู่อัจฉริยะ	อนุกรรมการ
3. นางสาวพรศิริ	ยงสวัสดิ์	อนุกรรมการ
4. นายอานนท์	จำเริญพัฒน์	อนุกรรมการ
5. นางสาวชนิดา	บุญรอด	อนุกรรมการ
6. นายฐานะณัฐ	นพแก้ว	อนุกรรมการ
7. นางสาวสาวิตรี	อยู่อ่วม	อนุกรรมการ
8. นางวรรณรัฐ	คงสมบูรณ์	อนุกรรมการ
9. นางสาวจันทร์เพ็ญ	คำภูมิ	อนุกรรมการ
10. นายธนพล	สวนลำไย	อนุกรรมการ
11. นางสุกัญญา	พินิจเวชการ	อนุกรรมการ
12. นางสาวสิริขวัญ	ชาวบัวใหญ่	อนุกรรมการ
13. นางสาวสุภาภรณ์	ลาทุม	อนุกรรมการและเลขานุการ
14. อาจารย์ ดร.ณัฐวัฒน์	จันทะเสน	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
15. นางสาวลลิตา	นาคจำแลง	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



**คณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้**

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ	เนตรโพธิ์แก้ว	ประธานอนุกรรมการ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์	พันธุณะ	อนุกรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กร	พวงนาค	อนุกรรมการ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษ์	อนุกรรมการและเลขานุการ
5. อาจารย์ ดร.อัญชลี	มโนสืบ	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายจัดซื้อจัดจ้าง**

1. หัวหน้างานพัสดุ		ประธานอนุกรรมการ
2. นายอัครพงศ์	อภิรักษ์สันติ	อนุกรรมการ
3. นางสาวสกวรัตน์	นิ่มอนงค์	อนุกรรมการ
4. นางสาวชฎาภรณ์	เฮงเจริญถาวร	อนุกรรมการ
5. นางจุไรภรณ์	กิริติยกุลย์	อนุกรรมการและเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายสารสนเทศประชาสัมพันธ์และของที่ระลึก**

1. ผู้อำนวยการฝ่ายสื่อสารองค์กร		ที่ปรึกษา
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษ์	ประธานอนุกรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิศักดิ์	วรดิษฐ์	อนุกรรมการ
4. อาจารย์สุนารี	รัชตรุจ	อนุกรรมการ
5. อาจารย์สุปัญญา	สิงห์กรณ์	อนุกรรมการ
6. นายอุเทน	พรหมณี	อนุกรรมการ
7. นายปฐมพงศ์	จำนงค์ลาภ	อนุกรรมการ
8. นางสาวสมพิศ	ไปแจอะ	อนุกรรมการ
9. นางสาวอภิญา	ชมนุมนณี	อนุกรรมการ
10. นางสาวชรัตน์	ฉิมคล้าย	อนุกรรมการ
11. นางสาวจุฑามาศ	ฉัตรสุริยวงศ์	อนุกรรมการ
12. อาจารย์ ดร.เกรียงไกร	เหลือองอำพล	อนุกรรมการและเลขานุการ
13. นางสาวทิพรดา	มั่งดี	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



**คณะกรรมการฝ่ายเผยแพร่ศิลปวัฒนธรรมและบริการจัดการท่องเที่ยว**

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยุทธภูมิ	สุวรรณเวช	ที่ปรึกษา
2. อาจารย์สุทธิพงษ์	จำรูญรัตน์	ประธานอนุกรรมการ
3. อาจารย์ ดร.นเรศ	กันธะวงศ์	อนุกรรมการ
4. อาจารย์พัทยศ	เพชรวงษ์	อนุกรรมการ
5. อาจารย์ญาณมาตร	เอียรถาวร	อนุกรรมการ
6. อาจารย์ ว่าที่ ร.ต.สราทตรา	เล่งไพบุลย์	อนุกรรมการ
7. นางสาววันทนา	ครุฑจันทร์	อนุกรรมการ
8. อาจารย์ ดร.ชัยวุฒิ	ชัยฤกษ์	อนุกรรมการ
9. อาจารย์ ดร.ภควัต	เกอะประสิทธิ์	อนุกรรมการ
10. อาจารย์ญาณินท์	สายหยุด	อนุกรรมการ
11. นายวิลาส	วิสิทธิ์	อนุกรรมการ
12. นางสาวรุ่งฤดี	ตรงต่อศักดิ์	อนุกรรมการ
13. นางสาวรัตติณัฏฐ์	อังสนุ	อนุกรรมการ
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฐา	ทองรักษ์	อนุกรรมการและเลขานุการ
15. นางสาวทิพรดา	มุงดี	อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการฝ่ายติดตามและประเมินผล**

1. รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ฝ่ายวางแผน		ประธานอนุกรรมการ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลพรรณ	จรรวาระกุล	อนุกรรมการ
3. อาจารย์วิปิศย์	ปุยสำลี	อนุกรรมการ
4. นางกุสุมา	ระงับภัย	อนุกรรมการ
5. นายเสกสรร	กันธรส	อนุกรรมการ
6. นางนงนภัส	ทองวิจิตร	อนุกรรมการและเลขานุการ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



คณะกรรมการประเมินบทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON-44)

ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
1	Asst. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2	Prof. Dr. Songphol Kanjanachuchai	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3	Asst. Prof. Dr. Channarong Banmongkol	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	Assoc. Prof. Dr. Nisachon Tangsangjumvisai	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5	Asst. Prof. Dr. Arporn Teeramongkonrasmee	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6	Asst. Prof. Dr. Apiwat Lek-uthai	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7	Prof. Dr. boonchai techaumnat	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8	Dr. Napong Panitantum	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9	Mr. Boonchuay Supmonchai	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10	Assoc. Prof. Dr. Siriroj Sirisukprasert	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11	Assoc. Prof. Dr. Peerayot Sanposh	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
12	Dr. Achara Pichetjamroen	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
13	Asst. Prof. Dr. Chalakorn karupongsiri	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
14	Asst. Prof. Anuwat Prasertsit	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
15	Dr. Phonsit Santiprapan	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
16	Dr. Pakpoom Hoyingcharoen	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
17	Dr. Warit Wichakool	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
18	Dr. mongkol saejia	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
19	Assoc. Prof. Dr. Wanchak Lenwari	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
20	Asst. Prof. Dr. Werapon Chiracharit	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
21	Asst. Prof. Dr. Sarawan Wongs	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
22	Asst. Prof. Dr. Suwat Pattaramalai	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
23	Asst. Prof. Dr. Thorin Theeradejvanichkul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
24	Assoc. Prof. Dr. Choopan Rattanapoka	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน



ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
25	Asst. Prof. Dr. Anusak Bilsalam	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
26	Asst. Prof. Dr. Ruslee Sutthaweekul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
27	Asst. Prof. Dr. Pakkawe Hayamin	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
28	Asst. Prof. Dr. Suphot Chunwiphat	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
29	Dr. Yuenyong Nilsiam	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
30	Dr. Pokkrong Vongkoon	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
31	Mr. Chaowan Jamroen	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
32	Asst. Prof. Dr. Nararat Ruangchaijatupon	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
33	Asst. Prof. Dr. Pramin Artrit	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
34	Asst. Prof. Dr. Kittipitch Meesawat	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
35	Dr. Jonggrist Jongudomkam	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
36	รศ.ดร.เกษ เฉยไสย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
37	ผศ.ดร.มนตรี นาวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
38	Assoc. Prof. Dr. Boonyang Plangklang	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39	Assoc. Prof. Wattana Punlumjeak	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
40	Asst. Prof. Dr. Noraset Wichaipanich	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
41	Asst. Prof. Dr. Nathabhat Phankong	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
42	Asst. Prof. Dr. Paitoon Rakluea	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
43	Asst. Prof. Dr. Chatchai Suppitaksakul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
44	Asst. Prof. Dr. Ekkachai Mujjalinvimut	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
45	Asst. Prof. Dr. Sirichai Dangeam	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
46	Asst. Prof. Dr. Nitipong Panklang	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
47	Asst. Prof. Promsak Apiratikul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
48	Asst. Prof. Nachirat Rachburee	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
49	Mr. Nattapol Ha-uapala	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
50	Assoc. Prof. Dr. Athikom Roeksabutr	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
51	Asst. Prof. Dr. Chaiyaporn Lothongkam	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
52	Asst. Prof. Panlop Pantuprecharat	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมะนัง จังหวัดน่าน



ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
53	Dr. Jirapat Sangthong	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
54	Dr. Theppanom Sopaperm	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
55	Dr. Vinai Silaruam	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
56	Mr. Nattapong Jundang	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
57	Mr. Vasin Boonsobhak	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
58	Assoc. Prof. Dr. Sanya Mitaim	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
59	Assoc. Prof. Dr. Wanchai Pijitrojana	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
60	Assoc. Prof. Dr. Pichai Aree	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
61	Asst. Prof. Dr. Nitikam Nimsuk	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
62	Asst. Prof. Dr. Supachai Vorapojpisut	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
63	Asst. Prof. Dr. Supakit Prueksaaron	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
64	Dr. Kanchana Silawarawet	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
65	Asst. Prof. Dr. Pramual Choorat	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
66	Asst. Prof. Dr. Khanit Matra	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
67	Asst. Prof. Dr. Pichaya chaipanya	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
68	Asst. Prof. Dr. Samroeng Hintamai	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
69	Asst. Prof. Dr. Parachai Juanuwattanakul	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
70	Assoc. Prof. Dr. Surachoke Thanapitak	มหาวิทยาลัยมหิดล
71	Asst. Prof. Dr. Chuttchaval Jeraputra	มหาวิทยาลัยมหิดล
72	Asst. Prof. Dr. Tatcha Chulajata	มหาวิทยาลัยมหิดล
73	Asst. Prof. Dr. Pornchai Chanyagorn	มหาวิทยาลัยมหิดล
74	Dr. Supun Tiptipakorn	มหาวิทยาลัยสยาม
75	Asst. Prof. Dr. Yongyuth Naras	มหาวิทยาลัยสยาม
76	Asst. Prof. Wipavan Narksarp	มหาวิทยาลัยสยาม
77	Assoc. Prof. Dr. Poompat Saengudomlert	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
78	Assoc. Prof. Songkran Kantawong	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
79	Dr. Nuntiya Chaibabut	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
80	Assoc. Prof. Dr. Khanittha Kaewdang	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน



ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
81	Assoc. Prof. Dr. Suchin Trirongjitmoah	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
82	Asst. Prof. Dr. Suparek Janjarajitt	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
83	Asst. Prof. Dr. Worakam Wongsachua	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
84	Asst. Prof. Dr. Prasit Nakonrat	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85	Asst. Prof. Dr. Atipong Suriya	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
86	Asst. Prof. Dr. Bongkoj Sookananta	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
87	Dr. Nakrop Jinaporn	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
88	Dr. Pracha Khamphakdi	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
89	Assoc. Prof. Dr. Wanchai Chimchavee	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
90	Asst. Prof. Dr. Suparek Manitpornsut	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
91	Asst. Prof. Dr. Supachate Innet	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
92	Asst. Prof. Supanunt Tunwannarux	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
93	รศ.ดร.อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
94	Assoc. Prof. Dr. Boonlert Suechoey	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
95	Asst. Prof. Dr. somsak siriporananon	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
96	Asst. Prof. Chirasak Sinsukudomchai	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
97	Asst. Prof. Chaiyo Thammarat	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
98	Asst. Prof. Dr. Somboon Sooksatra	มหาวิทยาลัยรังสิต
99	Asst. Prof. Dr. Supattana Nirukkanaporn	มหาวิทยาลัยรังสิต
100	Asst. Prof. Dr. Wanchai Subsingha	มหาวิทยาลัยรังสิต
101	Asst. Prof. Patiphan Kerdlap	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
102	Assoc. Prof. Dr. Nattachote Rugthaicharoencheep	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
103	Assoc. Prof. Dr. Supawud Nedphokaew	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
104	Asst. Prof. Dr. Nattapong Phanthuna	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
105	Asst. Prof. Dr. Aphichata Thongrak	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
106	Asst. Prof. Dr. Sakhon Woothipatanapan	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
107	Asst. Prof. Dr. Sanya khunkhao	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
108	Asst. Prof. Dr. Poonsri Wannakarn	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
109	Asst. Prof. Dr. Weerayuth Khunrattanasiri	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน





ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
110	Asst. Prof. Dr. Burasakorn Yoosooka	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
111	Asst. Prof. Korn Puangnak	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
112	Asst. Prof. Wetarin Thansiphaserth	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
113	Dr. Kriengkri Luangampol	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
114	Dr. Ponlakit Jariyatantiwait	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
115	Dr. Thanarat Tanmaneeprasert	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
116	Dr. Pasist Suwanapingkarl	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
117	Dr. Kotchamong Sumanonta	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
118	Dr. Yutthna Sroulsrun	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
119	Dr. Arnon Singhasathein	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
120	Mrs. Kamonnit Pusom	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
121	Asst. Prof. Dr. Tanairat Mata	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
122	Asst. Prof. Dr. Wuttiwat Kongrattanaprasert	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
123	Asst. Prof. Choosak Kamonkhantithom	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
124	Dr. Narongrit Mekloi	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
125	Dr. Yutana Chongjaream	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
126	Asst. Prof. Dr. Natapong Wongprommoon	มหาวิทยาลัยศิลปากร
127	Asst. Prof. Dr. Jhirat Mearnchu	มหาวิทยาลัยศิลปากร
128	Dr. Phamorn Silapan	มหาวิทยาลัยศิลปากร
129	Assoc. Prof. Dr. Jonglak Pahasa	มหาวิทยาลัยพะเยา
130	Assoc. Prof. Dr. Chawasak Rakpenthai	มหาวิทยาลัยพะเยา
131	Asst. Prof. Dr. Thanomsak Sopon	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
132	Asst. Prof. Dr. Kidsanapong Puntstri	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
133	Dr. Mongkol Danbumrungtrakul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
134	Dr. Tajchai Pumpoung	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
135	Dr. Yuttana Kongjeen	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
136	Assoc. Prof. Dr. Chanchai Thongsopa	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
137	Assoc. Prof. Dr. Rangsan Wongsan	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
138	Assoc. Prof. Dr. Monthippa Uthansakul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
139	Assoc. Prof. Dr. Nittaya Kerdprasop	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
140	Assoc. Prof. Dr. Kittisak Kerdprasop	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
141	Asst. Prof. Dr. Thanaset Thosdeekoraphat	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
142	Asst. Prof. Dr. Tosaporn Narongrit	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
143	Asst. Prof. Dr. Prayoth Kumsawat	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
144	Asst. Prof. Dr. Uthen Leeton	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
145	Asst. Prof. Dr. Settawit Poochaya	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
146	Asst. Prof. Dr. Somsak Vanit-Anunchai	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
147	Asst. Prof. Dr. Sudarat Khwan-on	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
148	Asst. Prof. Dr. Nuntawut Kaoungku	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
149	Dr. Sarunya Kanjanawattana	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
150	Dr. Tosaphol Ratniyomchai	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
151	Dr. Supaporn Bunrit	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
152	Dr. Samran Santalunai	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
153	Dr. Komsan Srivisut	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
154	Assoc. Prof. Dr. Somkait Udomhunsakul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
155	Assoc. Prof. Dr. Danupon Kumpanya	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
156	Asst. Prof. Dr. Phakkawat Jantree	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
157	Asst. Prof. Dr. Yutthana Kanthaphayao	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
158	Asst. Prof. Dr. Warunee Krudpun	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
159	Dr. Praty Mongkolwai	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
160	Asst. Prof. Dr. Chaiyaporn Panyindee	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
161	Asst. Prof. Dr. Praphat Arnmamee	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
162	Asst. Prof. Dr. Ekasit Nugoolcharoenlap	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
163	Asst. Prof. Dr. Jetsdaporn Satansup	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
164	Asst. Prof. Dr. Komkris Boonying	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
165	Asst. Prof. Dr. Kairoek Choeychuen	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
166	Asst. Prof. Ruangyos Keteruksa	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล ผู้พิจารณาบทความ	หน่วยงาน
167	Asst. Prof. Dr. Prasopchok Hothongkham	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
168	Dr. Peerumporn Jiranantagon	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
169	Dr. Pitchanun Wongsirtom	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
170	Dr. Sopa Sae-Heng	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
171	Dr. Terapong Boonraksa	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
172	Dr. Vinai Pompojratanakul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
173	Dr. Jiraporn Kiatwuthiamorn	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
174	Mr. Ditsapon Chumchewkul	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
175	ดร.วีระศักดิ์ สมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
176	Assoc. Prof. Dr. Wanchai Khamsen	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
177	Asst. Prof. Dr. Anon Namin	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
178	Asst. Prof. Dr. Upady Hatthasin	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
179	Asst. Prof. Dr. Kanokwan Ruangsiri	สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
180	Assoc. Prof. Dr. Tanit Malakorn	มหาวิทยาลัยนเรศวร
181	Assoc. Prof. Dr. Niphath Jantharamin	มหาวิทยาลัยนเรศวร
182	Assoc. Prof. Dr. Somporn Ruangsinchaiwanich	มหาวิทยาลัยนเรศวร
183	Asst. Prof. Dr. Surachet Kanprachar	มหาวิทยาลัยนเรศวร
184	Asst. Prof. Dr. Sarawut Wattanawongpitak	มหาวิทยาลัยนเรศวร
185	Asst. Prof. Dr. Piyadanaï Pachanapan	มหาวิทยาลัยนเรศวร
186	Asst. Prof. Dr. Sommart Sang-Ngern	มหาวิทยาลัยนเรศวร
187	Asst. Prof. Dr. Akaraphunt Vongkunghae	มหาวิทยาลัยนเรศวร
188	Asst. Prof. Dr. Siriporn Dachasilaruk	มหาวิทยาลัยนเรศวร
189	Asst. Prof. Dr. Mutita Songjun	มหาวิทยาลัยนเรศวร
190	Dr. Jirarat leamsaard	มหาวิทยาลัยนเรศวร
191	Dr. Phisut Apichayakul	มหาวิทยาลัยนเรศวร
192	Dr. Suradet Jitprapaikulsam	มหาวิทยาลัยนเรศวร
193	Dr. Jiraporn Pooksook	มหาวิทยาลัยนเรศวร
194	Dr. Jirawadee Polprasert	มหาวิทยาลัยนเรศวร
195	Dr. Piyapat Pongsri	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
196	Asst. Prof. Dr. Sopapun Suwansawang	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
197	Asst. Prof. Dr. Jesada Sartthong	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
198	Asst. Prof. Dr. Thawatchai Thongleam	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
199	Mr. Teeranon Chaiyakun	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



### คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

#### มหาวิทยาลัยมหิดล

PW ผศ.ดร.ธรรมาภุชชี สิงห์วิลัย

PE ผศ.ดร.ชัชวาลย์ เยรบุดร

CM รศ.ดร.พงศธร เศรษฐธีร

CT ดร.พัฒนาช พัทฒนะศรี

EL รศ.ดร.สุรโชค ธนพิทักษ์

CP ผศ.ดร.สุรโชค ธนพิทักษ์

CP ผศ.ดร.พรชัย ชัยนยากร

PH รศ.ดร.ภูมินท์ กิระวานิช

BE ผศ.ดร.เซง เลิศมนโรจน์

GN ผศ.ดร.ภุชญา อัศวสกุลเกียรติ

CM รศ.ดร.อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร

CT รศ.ดร.เดชา พวงดาวเรือง

EL รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันธ์

DS ผศ.ดร.สมศักดิ์ สิริโปรภานานท์

PH ผศ.ดร.ณัฐ โอบนาทรัพย์

BE ผศ.ดร.สมเกียรติ เพียงพรานทอง

CP ผศ.น.อ.ไชโย ธรรมรัตน์

GN ผศ.วิชัย แซ่ลี

#### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

PW ดร.วรภัทร กอแก้ว

PE ผศ.ดร.เกษม อุทัยไขฟ้า

CM ผศ.ดร.สันต์ชัย รัตนนนท์

CT ผศ.ดร.ศุภเชษฐ์ อินทร์เนตร

EL ผศ.สุภานันท์ ดันวรรธรักษ์

CP ดร.ภคพงศ์ อมรกุล

DS ดร.อภิวัฒน์ แสงโนรี

PH ผศ.ณัฐพร ฤทธินุ่ม

BE ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ มานิตพรสุทธ์

GN รศ.ดร.วันชัย ฉิมฉวี

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

PW รศ.ดร.กีรติ ชยะกุลศิริ

PE รศ.ดร.กองพล อารีรักษ์

CM รศ.ดร.พีระพงษ์ อุซารสกุล

CT รศ.ดร.กองพัน อารีรักษ์

EL รศ.ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว

DS รศ.ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล

PH ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ พังสุวรรณรักษ์

BE ผศ.ดร.ปรมศวรรค์ ห่อแก้ว

CP รศ.ดร.นิตยา เกิดประสพ

GN รศ.ดร.ธันต์ชัย กุลวรรวานิชพงษ์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

PW รศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ

PE รศ.นภัทร วิจินเทพินทร์

CM ผศ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ จันทร์ตรี

CT รศ.ดร.ปรีชา สาकरังค์

EL ผศ.ดร.ไพบุลย์ เกียรติสุขคนาธร

#### มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

PW รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย

PE ผศ.ชูเกียรติ พงษ์พานิช



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



DS รศ.ดร.สมเกียรติ อุดมทรงราชกุล

CP ผศ.ดร.วรัญญา วงษ์เสรี

DS รศ.ดร.วิไลพร แซ่ลี้

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ**

PH ผศ.ดร.อมรินทร์ รัตนะวิศ

PW รศ.ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย

BE รศ.ดร.สุพันธ์ ยิ้มมัน

PW ผศ.วินัย เมธาวีทิต

GN ผศ.ดร.นภดล วิวัชรโกเศศ

PE ผศ.ชูศักดิ์ กมลขันดิษฐ์

CM ผศ.ดร.เจษฎา ก้อนแพง

RE ดร.ทองเพียร พรหมบุตร

RE ดร.ยุทธนา จงเจริญ

CP ผศ.ปราโมทย์ อนันต์วรพงษ์

GN ผศ.ดร.วุฒิววัฒน์ คงรัตนประเสริฐ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

PW รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

PE ผศ.ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง

CM ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ

CT ผศ.ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล

EL ผศ.ดร.อำนาจ เรืองวารี

DS ผศ.ดร.จักรี ศรีรินทร์ฉัตร

CM ผศ.ดร.นรเสฏฐ์ วิชัยพานิชย์

BE ผศ.ดร.ศิริชัย แดงแอม

CP ผศ.ดร.อิฐอรุณ ปิติมล

RE รศ.ดร.บุญยง ปลั่งกลาง

GN ผศ.ดร.สุรินทร์ แห่งงาม

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร**

PW ผศ.ดร.ไชยพร หล่อทองคำ

CM ผศ.ดร.สาวาสดี บุญยเวศ

CT ผศ.ดร.วีระชัย มลายเวช

EL รศ.ดร.สุชาดา สิทธิจงสถาพร

CP ผศ.ดร.ธันวา ศรีประโม่ง

DS รศ.ดร.พีระพล ยวภูษิตานนท์

PH รศ.ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร

GN รศ.ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร

**มหาวิทยาลัยรังสิต**

PW ผศ.ดร.สุพัฒนา นีระคมนาภรณ์

PE ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์

CM ผศ.ดร.ไพศาล งามจรรยาภรณ์

CT รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนฤทัย

EL รศ.มบุญ พ่วงพูล

CP รศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล

PH ดร.เสด็จจิตต์ เพ็ชรประสาน

BE รศ.ดร.มนัส สัจจศิลป์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

PW รศ.ดร.สมพร สิรีสำราญกุล

PE ผศ.ดร.ไชยรินทร์ อัครไวโรดม

CM ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพัฒน์

CT รศ.ดร.พิสิษฐ์ ลีวธนกุล

EL รศ.ดร.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิชัยธรรม



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน



GN ผศ.ดร. สมบูรณ์ สุขสารท

#### มหาวิทยาลัยพะเยา

PW รศ.ดร.จงลักษณ์ พาทะชา  
CT รศ.ดร.สิทธิเดช วชิราศรีศรีกุล  
PE ผศ.ดร.ดำรงค์ ออมเดชาพล  
DS ผศ.ดร.ธนาทิพย์ จันทร์คง  
GN รศ.ดร.เขวศักดิ์ รักเป็นไทย

#### มหาวิทยาลัยนเรศวร

PW ผศ.ดร.ปิยดนัย ภาชนะพรรณณ์  
PE ผศ.ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์  
PH ดร. สมมาตร แสงเงิน  
CM ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา  
CT ผศ.ดร.มูชิตา สงฆ์จันทร์  
EL ผศ.ดร.อัศวินันท์ วงศ์กั้งแห  
CP ผศ.ดร.พนมขวัญ รียะมงคล  
DS รศ.ดร.สุชาติ แยมเม่น  
BE ผศ.ดร.พรพิศุทธิ์ วรจิรันตน์  
GN ผศ.ดร.สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์  
RE ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ

#### มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

PW ผศ.ดร.นันทิยา ชัยบุตร  
CM ผศ.ดร.ปกรณ์ ยุบลโกศล  
CT ดร.อัศวพงษ์ เอกสิริ  
EL รศ.สงกรานต์ กันทวงศ์  
CP ผศ.ดร.จักรพงษ์ สุทธากกุล

DS ผศ.ดร.วิศาล พัฒน์ชู  
PH รศ.ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ  
BE ผศ.ดร.สุพจน์ สุขโพธารมณ  
GN ดร.ศิริชัย เต็มโชคเกษม

#### มหาวิทยาลัยศิลปากร

CM ผศ.ดร.ระพีพันธ์ แก้วอ่อน  
CT ดร.ภมร ศิลพันธ์  
EL ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล  
CP ดร.โสภณ ผู้มีจรรยา  
GN ดร.กัมธิตา พันธุ์เจริญ

#### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

GN ผศ.ปฎิภาณ เกิดลาภ

#### สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

##### ลาดกระบัง

PW ศ.ดร.อิสระชัย งามหนู  
PE ดร.สมภาพ ผลไม้  
CM ศ.ดร.พรชัย ทวีพันธ์  
CT ศ.ดร.วันชัย รุ่งรุจา  
EL ศ.ดร.อภิรักษ์ ชนชยานนท์  
CP ผศ.ดร.สุรินทร์ กิตติธรรกุล  
DS รศ.ดร.สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์  
PH รศ.ดร.สุริภณ สมควรพาณิชย์  
BE รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์  
GN ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

PW อ.ดร.พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์

PE อ.ดร.มงคล แซ่เจี๊ยง

CM รศ.ดร.วิกรม อีรภาพจรเดช

CT รศ.คณดิด เจษฎ์พัฒนานนท์

EL รศ.ดร.ภาณุมาศ คำสัตย์

CP อ.ดร.กิตติคุณ ทองฟู

DS ผศ.ดร.รังกฤตว์ ดวงสร้อยทอง

BE รศ.ดร.พรชัย พลฤกษ์ภัทรานนต์

GN อ.ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพานกุล

DS ผศ.ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์

PH รศ.ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

BE ผศ.ดร.อาภรณ์ อีรมงคลรัตน์

GN ผศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

PW ผศ.ดร.ดุรงค์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์

PE ผศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ

CM รศ.ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภานพรัตน์

CT รศ.ดร.เชาวลิต มิตรสันดีสุข

EL ผศ.ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ

CP รศ.ดร.มงคล รักษาพัชรวงค์

DS ศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล

PH ดร.พิสุทธิ์ รัตติกต์

BE ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย

GN ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**

PW ผศ.ดร.วิวัฒน์ ทิพจร

PE รศ.ดร.อุเทน คำน่าน

CM ผศ.ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา

CT ดร.อนันต์ วงษ์จันทร์

EL ผศ.ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน

CP ผศ.ดร.ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกุล

DS ดร.นพดล มณีเทียร

GN ผศ.ดร.ยุพดี ทัดถวิล

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน**

PW รศ.ดร.ภานนท์ เกิดชื่น

PE ผศ.ดร.พินิจ ศรีธ

CM ผศ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

EL ผศ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

CT รศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล

CP ผศ.ดร.ธนอมศักดิ์ โสภณ

GN ผศ.ดร.กฤตเดช บัวใหญ่

DS ดร.ประจวบ อินระวงศ์

BE ดร.ประจวบ อินระวงศ์

PH ผศ.ดร.นิธิโรจน์ พlsruวรรณเจริญ

**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

PW ผศ.ดร.สมบูรณ แสงวงศ์วานิชย์

PE ผศ.เจตกุล โสภานิตย์

CM ศ.ดร.วาทีต เบนญจพลกุล

CT ผศ.ดร.สุชิน อรณสวัสดิ์วงศ์

EL รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

CP ผศ.ดร.เชาว์ดิศ อัครวาล



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

PW ดร.วินัย พรพจน์รัตนกุล  
PE ผศ.ดร.ประสพโชค ให่ทองคำ  
CM ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นุกูลเจริญลาภ  
CT ผศ.อดิศักดิ์ แข็งสารกิจ  
EL ผศ.ดร.เจษฎาพร สถานทรัพย์  
CP ผศ.ดร.ไกรฤกษ์เชยชื่น  
DS ดร.ชัยพิชิต คำพิมพ์  
PH อ.ติสพล ฉ่ำเฉียวกุล  
BE ผศ.ดร.ชัยพร ปานอินดี  
GN อ.สุธี รุกขพันธุ์

CM พล.ท.ดร.สมพงษ์ ดุ่มสวัสดิ์  
EL ผศ.วิภาวัลย์ นาคทรัพย์  
CP ผศ.พกิจ สุวัฒน์  
DS ผศ.ดร.ทัศนีย์ พลอยสุวรรณ  
GN ผศ.ไวพจน์ ศุภบรรเสถียร

**มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์**

PW รศ.ดร.นิธย์ เพ็ชรรักษ์  
CM ผศ.ดร.ปราโมทย์ จางอิสระกุล  
CT ผศ.ดร.ณรงค์เดช กิรดิพานนท์  
CP ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์

**มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**

PW ผศ.ดร.บงกช สุขอนันต์  
DS ผศ.ดร.วรการ วงศ์สายเชื้อ  
PE ดร.ประชา คำภักดี  
PH ผศ.ดร.ประสิทธิ์ นครราช  
CM ผศ.ดร.อธิพงศ์ สุริยา  
BE ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ จันทร์จรัสจิตต์  
CT ผศ.ดร.ธรรมรส รักธรรม  
CP ผศ.อารยา ฟลอเรนซ์  
EL รศ.ดร.ชนิษฐา แก้วแดง  
RE ผศ.ดร.คมสันต์ ดาโรจน์  
GN รศ.ดร.สุชิน ไตรรงค์จิตเหมาะ

**มหาวิทยาลัยศรีปทุม**

PW ผศ.ดร.ภรชัย จอนวัฒนกุล  
PE ผศ.ดร.นิมิต บุญภิรมย์  
CM อ.เสมา พัฒน์ฉิม  
CT ผศ.ดร.สำเร็จ อินท่าไม้  
EL ผศ.พศวีร์ ศรีโหมด  
CP ดร.วนายท์ แสนเงิน  
DS ผศ.เอกชัย ตีศิริ  
PH ผศ.เดิมาพงษ์ ศรีเทศ  
BE ผศ.ปรากฏต เหลียงประดิษฐ์  
GN ผศ.ดร.วิชากร เฮงศรีธวัช

**มหาวิทยาลัยสยาม**

PW ผศ.ดร.อาทิตย์ โสทรโยม  
PE ผศ.ดร.ยงยุทธ นาราชภูร์

**มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต**

PW ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรฤ  
PE ผศ.อนุชิต เจริญ  
CM อ.บัญชา บุรพัฒน์ศิริ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน





CT ผศ.ณธรรม เกิดสำอางค์  
EL อ.ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม  
CP ดร.ประกาศ ผ่องสนาม  
DS รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารัตน์กุล  
BE อ.ทรงพล รอดทอง  
GN รศ.วิญญู แสงวงสินกลกิจ  
**มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**  
PE รศ.ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์  
CM ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนิท  
GN รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์

**มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

PE รศ.ดร.ไพบุลย์ นาคมหาชาลสินธุ์  
CM ผศ.ดร.ตามพเมฆ บุนยะเวศ  
CT ผศ.ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์  
CP ผศ.ดร.ศุภกิจ พุกเกษอรุณ  
DS รศ.ดร.สมชาติ โชคชัยธรรม  
PH อ.ดร. ปรีดี โอวาทชัยพงศ์  
BE รศ.ดร.นภดล อุชาลัยชาติ  
GN ผศ.ดร.พิศาล แก้วประภา

**มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**

PW รศ.ดร.สมบูรณ์ นุชประยูร  
PE ศ.ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ  
CM ผศ.ธราดล โกมลมีศรี  
CT ผศ.ดร.บุญศรี แก้วคำอ้าย  
EL รศ.ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์  
CP รศ.ดร.สันสนีย์ เอื้อพันธ์วิริยะกุล

DS รศ.ดร.นิพนธ์ ซีร์อำพน  
PH รศ.ดร.อุกฤษฏ์ มั่นคง  
BE รศ.ดร.นิพนธ์ ซีร์อำพน  
GN ผศ.ดร.เกษมศักดิ์ อุทัยชนะ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

PW ดร.เชิดชัย ประภาณวรัตน์  
PE ดร.ปิยสวัสดิ์ นวรัตน์ณ อยุธยา  
CM ผศ.ดร.พินิจ กำหอม  
CT รศ.ดร.วันจักรี เล่นวารี  
EL ผศ.ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล  
CP ผศ.ดร.วีรพล จิรจรีต  
DS ผศ.ดร.สันติ นุราช  
PH ผศ.ดร.อภิชัย ภัทรนันท์  
BE รศ.ดร.บุญเสริม แก้วกำเหน็ดพงษ์  
GN ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร**

PW รศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
PE ผศ.ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์  
CM เรืออากาศตรี ดร.พลกฤษณ์ จรรย์ตันติเวทย์  
CT ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ  
EL ผศ.ดร.วรินทร์ สุดคิ่ง  
CP ผศ.ดร.บุรฉกร อยู่สุข  
DS ดร.ฉัตรแก้ว จรรย์ตันติเวทย์  
PH ผศ.ดร.สัญญา คุณขาว  
GN ผศ.ดร.มนัส บุญเที่ยรทอง



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส นาน อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน



**ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์**

**และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ**

- PW ดร.เจษฎา ชัดทองงาม
- PE คุณสุทัศน์ ปฐมนุพงศ์
- CM คุณกิตติ วงศ์ถาวรวัฒน์
- CT คุณอุดม ลีวลมไพศาล
- EL ดร.ราชพร เขียนประสิทธิ์
- CP ดร.ชาลี วรกุลพิพัฒน์
- DS ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์
- PH ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร
- BE ดร.พศิน อิศรเสนา ณ อยุธยา
- GN ดร.วุฒิกัทร คอวนิช

**มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

- PW ผศ.ดร.รองฤทธิ์ ฉัตรถาวร
- PE รศ.ดร.กฤษ เอย์ไสย
- CM รศ.ดร.วิระสิทธิ์ อิ่มถวิล
- CT ผศ.ดร.ประมินทร์ อาจฤทธิ์
- EL รศ.ดร.ศราวุธ ชัยมูล
- CP ผศ.ดร.นรารัตน์ เรืองชัยจตุพร
- DS รศ.ดร.อานภาพ มีสมบูรณ์
- PH รศ.ดร.อาคม แก้วระวีง
- BE ผศ.ดร.บุญยั้ง เจริญ



ระหว่างวันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564 โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
<b>บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง</b>		
PW23	เครื่องกำเนิดไอโซนด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงจากฟลายแบคเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ <i>ชาตคุณรงค์ พงศ์วิจิตรธรรม และ เกียรติศักดิ์ ทองอ่อน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย</i>	105
PW24	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายป้อน XLPE ขนาด 400 sq.mm. พิกัดแรงดัน 24 kV ภายในบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน จำนวน 10 วงจร <i>สมชาย ไกรปราบ , ฤทธิชัย ราชแป้น, อุทตนา คงจีน และ บุญยงค์ ปลั่งภักท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</i>	109
PW25	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในอาคารผนวกระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ <i>อนันท์ พงษ์สิงห์ และ วิฑูรย์ ตันติรุ่งเรือง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ</i>	113
PW26	การแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีผสมผสาน ระหว่างขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงหมาป่าสีเทา และขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของฝูงนกกา เทศน์ เนื้อไม้ <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</i>	117
PW27	การคำนวณการไหลของระบบไมโครกริดแบบแยกตัวอิสระร่วมกับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ <i>พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์</i>	121
PW28	รูปแบบการควบคุมแรงดันสำหรับไฮบริดอินเวอร์เตอร์ เพื่อป้องกันปัญหาแรงดันตกและแรงดันเกินในระบบ จำหน่ายแรงต่ำที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟโตโวลตาอิกและแบตเตอรี่ <i>ชนกร แก้วรุ่ง, ปิยะฉวี ภาชนะพรรณ และ ศักดา สมภู มหาวิทยาลัยนครสวรรค์</i>	125
PW29	การประเมินสถานะความรุนแรงของฟอสต์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจากแก๊สที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง <i>นริศ อธิชราวนนท์ ปัทม งามประเสริฐ สภากร วุฒิปิพัฒนีย์ และ นัฐใจดี วิคโทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร</i>	129
PW30	ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV <i>ณรงค์ ศรีสง่า, ณทฤณ จันทร์จำรัสมิตร แก้วพิลาดี , ปัญญา งามชื่น, ฤทธิชัย ราชแป้น, ทินิจ อิศรวิง และบุญยงค์ ปลั่งภักท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</i>	133
PW31	เทคนิคการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยการเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ <i>ปัทม งามประเสริฐ, นริศ อธิชราวนนท์, ศุภวุฒิ เมตรโพธิ์แก้ว, พง ฉานฮารทอง และ นัฐใจดี วิคโทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร</i>	137
PW32	การออกแบบระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะสำหรับรถไฟความเร็วสูง <i>ชนพันธ์ จันทร์อบ นีติกว จันทรวัดโชน พรหมศักดิ์ อภิวัตติกุล และ กฤษณ์จันณ์ ภูมิภักดีพิชญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</i>	141





## ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV

### Impact of Electric Field Caused Dielectric Failure in 24 kV XLPE Underground Cable Joints

ณรงค์ ศรีสง่า<sup>1,\*</sup>, ณศคุณ อันทร์อำรัส<sup>2</sup>, นิรุศ แก้วทาสี<sup>1</sup>, บัญชา งามจีน<sup>1</sup>, อุทวิชัย ราชแป้น<sup>1</sup>, พิณใจ จิตจริง<sup>1,\*\*\*</sup> และบุญยัง ปั้งกลาง<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต. ดอนจันทน์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

E-mail: \*narong\_r@mail.rmutt.ac.th, \*\*pinit.j@en.rmutt.ac.th, \*\*\*booyyang.p@en.rmutt.ac.th

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต. ดอนจันทน์ อ.คลองหลวง

จ.ปทุมธานี E-mail:marin.j@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE 24 kV โดยใช้การเชื่อมต่อกาวรัดแบบ 2 จุดต่อ ซึ่งได้จำลองค่าสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อสาย รวมถึงการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์และความสูญเสียความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ต่อสาย จากผลการจำลองจะเห็นว่ากราวด์แบบที่มีจุดต่อกราวด์ของกระเบื้องป้องกันแบบสองจุดนั้นทำให้เคเบิลสูญเสียการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอไป และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง รวมทั้งอุปกรณ์ต่อสายทำให้เกิดระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์มีค่าลดลง รวมถึงวัสดุที่ใช้ทำฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงจากเคเบิลเดิมที่มี XLPE ครอบคลุมตัวนำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการเบรกดาวน์และความสูญเสียความเป็นฉนวนได้ง่าย

คำสำคัญ สายเคเบิล ไฟฟ้าใต้ดิน, การเชื่อมต่อกาวรัดสายเคเบิลไฟฟ้า, การเชื่อมต่อกาวรัด, อุปกรณ์ต่อสายเคเบิล

#### Abstract

This paper presents a study on impact of electric field caused dielectric failure in 24 kV XLPE underground cable joints using a 2-point ground connection, which simulated the electric field and the resulting electric field strength between conductor and ground at the connection point as well as analysis of the causes of insulation breakdowns of underground cable connectors. The simulation results showed that double shielded grounding point connector caused the cable to lose its uniform distribution of the electric field and causing high electric field stress. The connector caused the reduction of the clearance between conductor and ground impacting the insulation material changing from the original cable which has continuous XLPE

covering the conductor. Therefore, it is easy to break down and to cause the failure of insulation.

**Keywords:** Underground Cable, Cable Splice, Ground Bonding, Cable Connector

#### 1. บทนำ

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบระบบเคเบิลใต้ดินเป็นการจ่ายไฟฟ้าใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนแข็ง หรือ ฉนวนเหลวเพื่อให้ทนต่อแรงดันได้สูง [1-2] เนื่องจากในบางพื้นที่ที่วางไม่มากพอที่จะเดินสายส่งจ่ายแบบข้างในอาคาร สายเคเบิลใต้ดินจะใช้ระยะห่างน้อย สามารถติดตั้งใต้พื้นดินหรือติดตั้งวางสายเคเบิลในอากาศได้ เช่น ในอุโมงค์ โดยมีชั้นรองรับอย่างมั่นคง หรือวางในราง หรือร่อง ที่ทำไว้เพื่อวางสายเคเบิลโดยเฉพาะ หรือฝังในดินโดยตรง หรือ วางใต้ท้องทะเล ข้อดีของการใช้สายเคเบิลใต้ดิน ทำให้ดูเรียบร้อย ปลอดภัยจากฟ้าผ่าโดยตรง ให้ความปลอดภัยสูงแก่คน และสิ่งแวดล้อม แต่สิ่งที่สำคัญคือ ความรู้ในส่วนประกอบของระบบเคเบิลใต้ดิน คือ โครงสร้างของสาย เคเบิลใต้ดิน Terminator รูปแบบและ โครงสร้างของท่อร้อยสายไฟ Manhole Handhole วิธีการร้อยเคเบิล แร่ดึง สายไฟ การทดสอบสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าทั่วไปไม่ว่าจะเป็นสายส่งหรือสายจำหน่ายที่เป็นระบบสายเคเบิล ซึ่งในกรณีที่มีระยะทางยาวๆ จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อกาวรัด สาย ในทุกเคเบิลแต่ละวางจร จึงต้องมีการทำ Termination อย่างน้อย 2 จุด เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลกับบัสบาร์ หรือหม้อแปลงกับสายเคเบิล หรือสายอากาศกับสายเคเบิลใต้ดิน [3] จากการศึกษา ทดสอบสายเคเบิลที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง จะพบว่าบริเวณจุดต่อของสายเคเบิลที่ ฉนวนฉีกขาดหรือบริเวณที่มีการตัดสายเคเบิล มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมาก ซึ่งจะมี ผลทำให้ความเครียดทางไฟฟ้าสูง ณ จุด ๆ นั้น และมีผลทำให้ฉนวนบริเวณนั้นชำรุดเสียหายในไม่ช้า และเกิดการฉีกฉนวนบริเวณนั้นซึ่งส่งผลให้จุดต่อสายเคเบิล ใต้ดินระเบิดได้ [4-5]

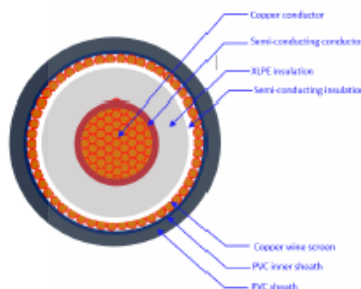
บทความนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดต่อของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 24 kV รวมถึงการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดการเบรกดาวน์และความสูญเสียความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ต่อสาย



## 2. ปัญหาความล้มเหลวของฉนวนในจุดต่อสายเคเบิลใต้ดิน

### 2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

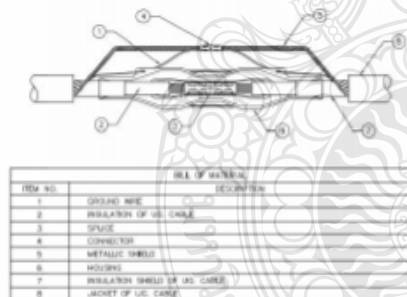
โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน แกนร่วม คือ มีตัวนำทองแดง (copper conductor) ตัวกั้นตัวนำ (semi-conducting conductor screen) ฉนวนชนิดครอสลิงค์ โพลีโอทีน (XLPE insulation) ตัวกั้นฉนวน เกราะป้องกันเส้นลวดทองแดง (Copper wire screen) เทปสัณเคราะห์ป้องกันน้ำและเปลือกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC sheath) รายละเอียดตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

### 2.2 อุปกรณ์ต่อสายเคเบิลใต้ดิน

โครงสร้างและการต่อสายเคเบิลใต้ดินนั้นจะใช้อุปกรณ์ต่อสายเคเบิลใต้ดินดังรูปที่ 2 โดยมีการปลอกสายเคเบิลและย้ายประกบต่อสาย (splice) และมีการต่อสายเกราะป้องกันลวดทองแดงโดยการจับมารวมกันเป็นลักษณะคล้ายกับตัวนำอีกเส้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของอุปกรณ์ต่อสายเคเบิลใต้ดิน [6]

### 2.3 ความล้มเหลวของฉนวนในจุดต่อสาย

ปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่อสายและจุดต่อคือการเกิดการเสียดสีภาพกรเป็นฉนวนของอุปกรณ์ต่อสายเคเบิล ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนบางส่วน (Partial Discharge, PD) ซึ่งจะเกิดขึ้นในระบอบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้า

บางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง [5] โดยสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณจุดต่อสายเคเบิลตามในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ปัญหาความล้มเหลวของฉนวนในอุปกรณ์ต่อสายเคเบิลใต้ดิน

## 3. ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

จากโครงสร้างของเคเบิลใต้ดินเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวนำทองแดงตามขนาดที่คิดแรงดันไฟฟ้าและเกราะป้องกันลวดทองแดงที่มีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นศูนย์จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแล้ว โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากับความชันของศักย์ไฟฟ้าซึ่งแสดงไว้ในสมการ (1)

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

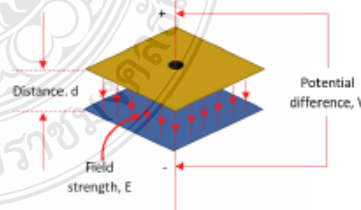
เมื่อ  $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้า  
 $V$  คือศักย์ไฟฟ้า

โดยที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าและการซึมผ่านของวัสดุสามารถหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ดังสมการที่ (2)

$$\nabla E = \rho v \epsilon \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho v$  คือความหนาแน่นประจุของวัสดุที่ใช้สำหรับตัวนำ  
 $\epsilon$  คือค่าคงที่การเป็นฉนวนของวัสดุ

ซึ่งลักษณะโครงสร้างสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินจะมีคุณลักษณะเป็นคาปาซิเตอร์ ซึ่งคุณลักษณะของคาปาซิเตอร์พิจารณาได้จาก แผ่นตัวนำ (parallel conductive plate) 2 แผ่น กั้นกลางด้วยไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นฉนวน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ



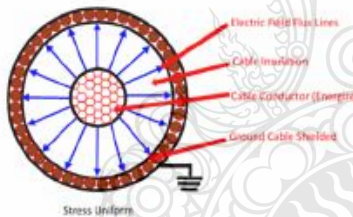
สำหรับฉนวน (Dielectric) สามารถทำมาจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า  
 ที่หลายเช่น พลาสติก ยาง เซรามิก แก้ว ฉนวนแต่ละชนิดซึ่งเราสามารถ  
 วัดค่าความเป็นฉนวนได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นๆ โดยที่ค่าความ  
 สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$C = \epsilon_r \frac{A}{4\pi d} \quad (3)$$

- เมื่อ C คือขนาดของตัวเก็บประจุ หน่วยคือ Farad
- A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ
- d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ
- $\epsilon_r$  คือ dielectric's relative permittivity

ทั้งนี้  $\epsilon_r$  เป็นค่าคงที่ของฉนวน ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนนั้นๆ เช่น  
 เราจะเห็นได้ว่า อีพ็อกซี หรือ A มีค่ามากก็จะทำให้สามารถเพิ่มความจุของ  
 ตัวเก็บประจุทำให้มีค่าความจุมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหาก มีระยะห่าง  
 (d) ระหว่างแผ่นตัวนำมากก็จะทำให้ตัวเก็บประจุมีค่าน้อย

โดยทั่วไปแล้วจากโครงสร้างของเคเบิลใต้ดินในรูปที่ 1 จะมีความ  
 ต่างคือระยะห่างระหว่างตัวนำทองแดงและระยะป้องกันลวดทองแดงที่มีสปีด  
 ทงไฟฟ้าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางจากตัวนำไป  
 กระจายออกจากกัน โดยมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ากระจายออกจากตัวนำ  
 ทองแดงแบบสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 5

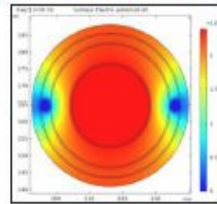


รูปที่ 5 ลักษณะของสนามไฟฟ้ากระจายออกจากตัวนำทองแดงแบบสมมาตร

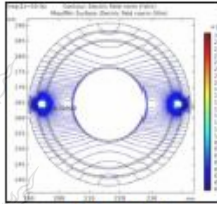
แต่ทั้งนี้เมื่อมีการต่อสายเคเบิ้ลป้องกันลวดทองแดงที่มีคุณสมบัติ  
 เป็นกราวด์แบบรวมไว้แบบ 2 จุดนั้นจะมีผลให้การกระจายของ  
 สนามไฟฟ้าไม่สมมาตรตามรูปที่ 5 โดยมีทิศทางจากตัวนำไปหากราวด์  
 จึงเป็นผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และการต่อสายที่จุดต่อสาย  
 ทำให้ระยะห่างระหว่างส่วนที่มีไฟฟ้าหรือตัวนำกับกราวด์ ที่เป็น  
 ระยะห่างตามตัวฉนวนมีค่าลดลง และคุณสมบัติของฉนวนเดิมที่เป็น  
 ฉนวนชนิดคริสตอลไลน์เปลี่ยนไปหากเป็นกราวด์ใช้ฉนวนต่าง  
 ชนิดกัน

#### 4. ผลการจำลองและการวิเคราะห์

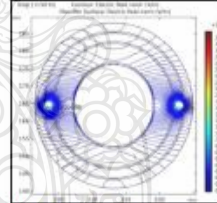
จากผลการจำลองสนามไฟฟ้าจะเห็นว่าเมื่อมีการต่อสายเคเบิ้ล  
 ป้องกันซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกราวด์รวมเป็น 2 จุดนั้น ทำให้สนามไฟฟ้า  
 ระหว่างตัวนำและกราวด์มีความต่างศักย์สูง ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งทำให้  
 เกิดการกระจายของสนามไฟฟ้าเข้าหากันทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้า  
 สูง ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่ทั้งนี้หากระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์มี  
 ระยะห่างที่เหมาะสมและคุณสมบัติของฉนวนมีค่าที่เหมาะสมนั้นยัง  
 สามารถทำให้อุปกรณ์ต่อสายสามารถทนความเค้นทางไฟฟ้าได้



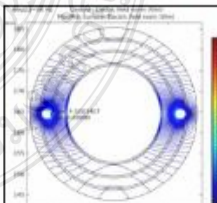
รูปที่ 6 การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์



รูปที่ 7 การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์ XLPE 0.25 mm.



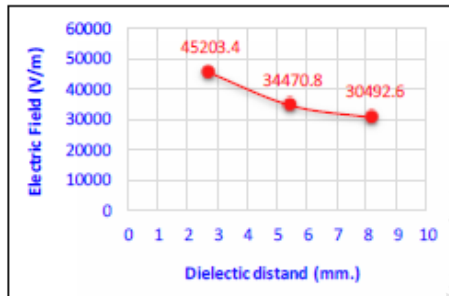
รูปที่ 8 การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์เมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำ  
 และกราวด์คือ 5 mm.



รูปที่ 9 การกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและกราวด์เมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำ  
 และกราวด์คือ 2.75 mm.



แต่ทั้งนี้หากระยะห่างคานฉนวนระหว่างตัวนำและคราวด์ มีระยะห่างที่ลดลง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเบรคดาวน์และสูญเสียความเป็นฉนวนไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและคราวด์เมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำและคราวด์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

จากผลการจำลองสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำและคราวด์ที่กล่าวไป แล้วนั้นจะเห็นว่าการออกแบบให้มีจุดต่อคราวด์ของเกราะป้องกันแบบ 2 จุดนั้นทำให้เกิดเบรคดาวน์ของสายส่งสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอไป และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง รวมทั้งอุปกรณ์ต่อสายทำให้เกิดระยะห่างระหว่างตัวนำและคราวด์มีค่าลดลง ตามรูปที่ 10 ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการเบรคดาวน์และความสูญเสียความเป็นฉนวนได้

**5. สรุป**

จากปัญหาจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนและเสียหายหลังจากที่ใช้งานนั้น จะเห็นว่าอุปกรณ์ต่อสายออกจอกแบบให้มีจุดต่อสายคราวด์ของเกราะป้องกันรวมเป็น 2 จุด จากผลการจำลองจะเห็นว่าการออกแบบให้มีจุดต่อคราวด์ของเกราะป้องกันแบบ 2 จุดนั้นทำให้เกิดเบรคดาวน์ของสายส่งสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอไป และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง รวมทั้งอุปกรณ์ต่อสายทำให้เกิดระยะห่างระหว่างตัวนำและคราวด์มีค่าลดลง รวมถึงวัสดุที่ใช้ที่ฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่มี XLPE ครอบคลุมตัวนำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการเบรคดาวน์และความสูญเสียความเป็นฉนวนได้ง่าย แต่ทั้งนี้อาจจะมีการปรับปรุง เช่น การเพิ่มความร้อน ณ จุดต่อ และความชื้นในการติดตั้งด้วย

**เอกสารอ้างอิง**

[1] C. Hoogyan "Investigation on distribution XLPE cable joint failure modes and detection," in *Proc. C&PSI 2018*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018.

[2] X. Zhou, J. Cao, S. Wang, Y. Jiang, T. Li and Y. Zou, "Simulation of electric field around typical defects in 110kV XLPE power cable joints," *2017 International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCCDS)*, 2017, pp. 21-24

[3] N. Panmala, T. Suwanasri and C. Suwanasri, "Condition Assessment of Medium Voltage Underground Cable Systems," *2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2020, pp. 210-213

[4] S. Bhattacharyya, A. Chakraborty, B. Saha and S. Chatterjee, "Electric stress analysis of a medium voltage cable termination subjected to standard and non-standard lightning impulse voltages," *2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI)*, 2016, pp. 169-173

[5] Y. Späck-Leigunering, G. Ruppert, E. Gjonaj, H. De Gerssem, and M. Koch, "Towards Electrothermal Optimization of a HVDC Cable Joint Based on Field Simulation," *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2040, May 2021

[6] "IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV," in *IEEE Std 575-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)*, vol., no., pp.1-83



ณรงค์ ศรีสง่า สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ ปัจจุบันกำลังศึกษา วศ.ม. สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สนใจการศึกษาวิจัยทางด้านระบบไฟฟ้าแรงสูง ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า และสายส่ง



บุญชิง ปลั่งกลาง สำเร็จการศึกษาวศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จบการศึกษาระดับปริญญาโท M.Sc (Electronic System)

จาก Faderbooni, Germany และ Dr-Ing (Electrotechnik) จาก Kassel University, Germany

สนใจการศึกษาวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน ระบบไฟฟ้าแรงสูง และระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

## ประวัติผู้จัดทำปฏิญญานិพนธ์

ชื่อ	นายณรงค์ ศรีสง่า รหัส 116360421004-2
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
วัน-เดือน-ปี เกิด	วันที่ 22 พฤษภาคม 2516
ที่อยู่	71/52 ม.ชนโชติ 5 ต.หนองแค อ.หนองแค จ.สระบุรี 18140
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2544
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรไฟฟ้า บริษัท ไทย มาลาया กลาส จำกัด มหาชน พ.ศ.2557 ถึง ปัจจุบัน
วิชาชีพ	ภาคีวิศวกรไฟฟ้า
เบอร์โทรศัพท์	09-4009-8795
อีเมล	narong_s@mail.rmutt.ac.th

