

การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
(UNDERGROUND CABLE FAILURE ANALYSIS)



T104196



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104196
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
(UNDERGROUND CABLE FAILURE ANALYSIS)



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

- 
1. นางสาวชลิดา วรกิจเจริญผล
 2. นายณัฐพงศ์ พันธุ์สวัสดิ์
 3. นายณัฐวุฒิ รักพรหม
 4. นายบัญญัติ ลีลาจริยกุล

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน

นางสาวชลิดา วรกิจเจริญผล

นายณัฐพงศ์ พันธุ์สวัสดิ์

นายณัฐวุฒิ รักพรหม

นายบัญญัติ สีสัจจกุล

ผศ.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 24 กิโลโวลต์ โดยทำการศึกษาโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC-60502 และศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนของสายเคเบิลใต้ดินในกรณีต่างๆ ทำการจำลองปัญหาด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อดูความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดบนสายเคเบิลใต้ดินในกรณีเกิดความผิดพร่องขึ้น ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ พบว่ากรณีชั้นกราวด์แตก และกรณีแฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ กรณีที่ชั้นกราวด์เกิดการแตกขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างช่องว่างอากาศของรอยแตกได้ และในกรณีที่ตัวกันโลหะมีลักษณะต่อครบรอบจะทำให้กระแสไหลวนในชั้นตัวกันโลหะได้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

UNDERGROUND CABLE FAILURE ANALYSIS

Chalida	Worrakitcharoenphol
Nattapong	Punsawat
Nuttawut	Rukprom
Banyat	Leelachariyakul
Asst.Prof.Norasage	Pattadech Supervisor
Assoc.Prof.Sirivat	Potivetkul Supervisor
2008	

ABSTRACT

This project represents the study of failure underground cable rate of 24 kV. The underground cable construction according to IEC 60520-2 and its failure cause were studied. The Finite element program was employed to simulate electric field strength in the case studies. From the simulation results it was found that the maximum electric field strength occurred in the case of the damage of metallic screen and the jacket damaging. The experiment was performed. It was found that in the case of completed separated parts of metallic screen, grounded part and floating part, the flash over took place between the gap. Moreover in the case of ground loop via metallic screen, the induce current caused higher temperature of insulation semiconductor screen.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และรศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการดำเนินโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเชษฐา รัตนพันธ์ ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้โปรแกรม comsol 3.3 เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และช่วยสนับสนุนข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็น

ขอขอบคุณ คุณสาริต ไกรระภี และบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) ซึ่งได้ให้ความกรุณาช่วยอธิบาย แนะนำให้ความรู้เรื่องโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน กระบวนการผลิตและกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

ขอขอบคุณ รุ่งพี นักศึกษาปริญญาโท ที่ช่วยสนับสนุนข้อมูลและแนะนำประสบการณ์ ทำให้การดำเนินโครงการเป็นไปได้อย่างดีเสมอมา รวมทั้งความช่วยเหลือทั้งร่างกาย ความคิดจากมิตรสหาย และท่านอื่นๆ ที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดามารดา ผู้มีพระคุณ และเจ้าหน้าที่ทุกคนที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษา และนักศึกษารุ่นต่อไป หากมีข้อบกพร่องประการใดข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินการโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน	5
2.1.1 ตัวนำ (Conductor)	5
2.1.2 ฉนวนไฟฟ้า (Insulation)	9
2.1.3 ชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductive Layer)	11
2.1.4 ตัวกันโลหะ (Metallic Screen)	12
2.1.5 Separative tape	12
2.1.6 เปลือกนอก (Jacket หรือ Oversheath)	12
2.2 สนามไฟฟ้า	13
2.2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electrical field stress)	17
2.2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างกัน	18
2.2.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนเนื้อเดียวกัน	27
2.3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	29
2.3.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	29
2.4 สมการสำหรับสนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริก	31
2.5 สมการไฟน์ด์เอเลเมนต์	32
2.6 กฎของฟาราเดย์	33
2.7 AMPERE'S CIRCUITAL LAW	34
2.8 สมมติฐานของแมกซ์เวลล์	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 สารกึ่งตัวนำ.....	47
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	48
3.1 บทนำ.....	48
3.2 ความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดิน.....	48
3.3 การวิเคราะห์สาเหตุความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดิน.....	49
3.3.1 ปัญหาที่พบ.....	49
3.3.2 วิเคราะห์หาสาเหตุ.....	49
3.3.3 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดิน.....	49
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
3.5 การออกแบบการทดลองทางไฟฟ้า.....	57
3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.5.2 เตรียมสายเคเบิล.....	57
3.5.3 การออกแบบการวัดแรงดันเหนี่ยวน.....	60
3.5.4 การออกแบบการวัดกระแสเหนี่ยวน.....	64
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	66
4.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	66
4.1.1 สายเคเบิลปกติ.....	66
4.1.2 สายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน.....	68
4.1.3 สายเคเบิลที่มีการร้าวแตกเสียหาย.....	70
4.1.4 สายเคเบิลที่มีแฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์.....	72
4.1.5 สายเคเบิลที่มีแฉกเกิดถลอก.....	74
4.2 ผลการวัดแรงดันและกระแสเหนี่ยวน.....	77
4.2.1 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Wire ที่มีจำนวนเส้นแตกต่างกัน.....	77
4.2.2 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Wire ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	81
4.2.3 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.4 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ บนชั้น Insulation Screen (Semi) ของสายเคเบิลใต้ดินเมื่อไม่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	85
4.2.5 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่ไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	87
4.2.6 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะเสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	89
4.2.7 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	91
4.2.8 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะเสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	96
4.2.9 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	98
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	100
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	100
5.2 สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ	100
5.3 สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดกระแสเหนี่ยวนำ	101
5.4 สรุปผลการทำโครงการการศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก ก	105
ภาคผนวก ข	128
ภาคผนวก ค	135
ภาคผนวก ง	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ.....	147
ภาคผนวก ฉ.....	162
ประวัติผู้เขียน.....	164



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน	6
2.2	ตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน	8
2.3	โครงสร้างและหน้าที่ของสายเคเบิล	13
2.4	เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม	14
2.5	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	16
2.6	การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน	18
2.7	ชั้นฉนวนซ้อนกันฉนวนไฟฟ้าสม่ำเสมอ	19
2.8	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย	22
2.9	สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกันร่วม	22
2.10	เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันร่วมมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น	25
2.11	ตัวนำในฉนวนหุ้ม	26
2.12	ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม	27
2.13	การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ	30
2.14	เส้นทาง (line integral) ของสนามแม่เหล็กกรอบวัสดุสื่อไฟฟ้า	35
2.15	กราฟในช่วงเวลาหนึ่งรอบของคลื่น เมื่อพล็อตเป็นฟังก์ชันของ x ที่ค่าของเวลาต่างๆ	44
3.1	รอยยู่ตัวที่ชั้น PVC	49
3.2	รอยยู่ตัวที่ชั้น XLPE	49
3.3	ลักษณะการแตกของกราวด์ของสายเคเบิล	50
3.4	ลักษณะเคเบิลที่มีรูทะลุจนทำให้ชั้นกราวด์ได้รับความเสียหาย	50
3.5	ลักษณะเคเบิลที่มีผิวฉนวนเกิด (PVC) ถลอกเป็นแนวยาว	50
3.6	ลักษณะจำเพาะของสายเคเบิล CV12/20(24) kV 300 mm ²	51
3.7	Model Navigator Window	53
3.8	CAD Import Options Window	53
3.9	Subdomain settings Window	54
3.10	Boundary settings Window	54
3.11	Initialize Mesh Window	55
3.12	Solve Problem Window	55
3.13	Plot Parameters Window	56
3.14	สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper wire ที่ใช้ในการทดลอง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่

หน้า

3.15(ก) สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper tape มี Insulation Screen ที่ใช้ในการทดลอง	58
3.15(ข) สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper tape ไม่มี Insulation Screen.....	58
3.16 สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. ที่ใช้ในการทดลอง.....	59
3.17 การจัดการทดลองเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำ	60
3.18 ชิ้นงานทดสอบเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำ.....	61
3.19 แรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์ โดยมี Conductor >> Insulation	62
3.20(ก) ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำผ่านอากาศมาที่ชั้นกราวด์.....	63
3.20(ข) ภาพขยายผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่ชั้นกราวด์	63
3.21 การจัดการทดลองเกี่ยวกับกระแสเหนี่ยวนำ	64
3.22 ชิ้นงานทดลองเกี่ยวกับกระแสเหนี่ยวนำ.....	65
3.23 แคลมป์วัดค่ากระแสเหนี่ยวนำ	65
4.1 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินปกติ.....	66
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ	67
4.3 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน	68
4.4 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน.....	68
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ	69
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน	69
4.7 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย.....	70
4.8 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย	70
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ	71
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีกราวด์แตกเสียหาย.....	71
4.11 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์.....	72
4.12 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ	73
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีแฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์	73
4.15 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แฉกเกิดถลอก	74
4.16 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แฉกเกิดถลอก.....	74
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ	75
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีแฉกเกิดถลอก	75
4.19(ก) วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire 1 เส้น.....	77
4.19(ข) วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire 21 เส้น.....	77
4.20 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน.....	78
4.21 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเพื่อวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน.....	78
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้น Copper Wire กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า 5 kV	80
4.23 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	81
4.24 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเพื่อวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อมีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันแตกต่างกัน	81
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อ มีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	82
4.26 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	83
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นของตัวกั้นโลหะเป็นแบบ Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.28 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	85
4.29 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดิน ไม่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	85
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลไม่มีชั้นของตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า แตกต่างกัน	86
4.31 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	87
4.32 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดิน ไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	87
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดิน ไม่มีชั้นของ Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	88
4.34 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า แตกต่างกัน	89
4.35 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ(Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	89
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายที่ระยะต่างๆ แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	90
4.37 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	91
4.38 ชิ้นงานระยะช่องว่าง $G = 1 \text{ mm}$ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน	91
4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 1	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 2	93
4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 3	94
4.42(ก) ผลการทดลองขณะเกิดเบรกดาวนที่ระยะ $G = 0.6 \text{ mm}$	95
4.42(ข) ผลการทดลองขณะเกิดเบรกดาวนที่ระยะ $G = 1.0 \text{ mm}$	95
4.43 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับกระแสป้อนเข้า แตกต่างกัน	96
4.44 ชิ้นงานที่ใช้ทดลอง ที่ระยะ $G = 3 \text{ mm}$ ในการวัดกระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	96
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสป้อนเข้า กับ กระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย ที่ระยะต่างๆ แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	97
4.46 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	98
4.47 ชิ้นงานที่ใช้ทดลอง ที่ระยะ $G = 3 \text{ mm}$ ในการวัดกระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แลไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	98
4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสป้อนเข้า กับ กระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย ที่ระยะต่างๆ และไม่มีชั้นของ Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551.....	3
1.2 แผนการดำเนินโครงการ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551.....	4
2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	6
2.2 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al).....	6
2.3 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 60502-2	10
2.4 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2	10
2.5 อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ สำหรับเปลือกนอกชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-1	10
2.6 ความหนาของฉนวน cross-linked polyethylene (XLPE) ตามมาตรฐาน IEC 60502-2.....	11
4.1 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm) ของแต่ละกรณีศึกษา.....	76
4.2 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า 5 kV	79
4.3 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อมีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	82
4.4 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นของตัวกั้นโลหะเป็นแบบ Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	83
4.5 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลได้ดิน ไม่มีชั้นตัวกั้นโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	86
4.6 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลได้ดิน ที่ไม่มีชั้น Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	88
4.7 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลได้ดิน ที่มีชั้นตัวกั้นโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	90
4.8 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลได้ดิน ที่มีชั้นตัวกั้นโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 1	92
4.9 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลได้ดิน ที่มีชั้นตัวกั้นโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 2	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 3.....	94
4.11 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	97
4.12 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายและไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน	99
5.1 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm) ของแต่ละกรณีศึกษา.....	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน เริ่มเข้ามามีบทบาทในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศมากขึ้น จึงมีการผลิตสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขึ้นมาใช้ในประเทศไทย แนวโน้มการใช้สายเคเบิลใต้ดินในเขตนครหลวง และแหล่งชุมชนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากบางพื้นที่เป็นแหล่งชุมชนที่มีความแออัดสูงไม่เหมาะที่จะเดินสายส่งจ่ายแบบขึงในอากาศ หรือบางพื้นที่ที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อม ความสวยงามของภูมิทัศน์ แต่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง และที่สำคัญคือสายเคเบิลที่จะนำมาติดตั้งในระบบต้องได้มาตรฐานที่มีความเชื่อถือและในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินผู้ทำการติดตั้งต้องมีความรู้ความเข้าใจทางวิศวกรรม ซึ่งต้องมีความระมัดระวังอย่างยิ่งในการติดตั้ง เพราะในการติดตั้งที่ผิดวิธีหรือขาดความระมัดระวังหรือขาดความรู้ความเข้าใจจะทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายจนทำให้ฉนวนเกิดการชำรุดส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนได้หรืออาจจะส่งผลให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง

แต่เนื่องจากปัจจุบันยังขาดผู้มีความรู้ความชำนาญในการติดตั้งระบบเคเบิลใต้ดินทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติ เมื่อใช้งานจริงจึงเกิดความเสียหายขึ้นทั้งแบบทันทีและแบบระยะยาว เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้เคเบิลเสียหาย ทั้งทางกลและไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎี และโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวนหลังการติดตั้ง
3. เพื่อศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
4. เพื่อศึกษามาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
5. เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายของเคเบิล และสรุปแนวทางการแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ขอบเขตของการศึกษาโครงการนี้ คือ ศึกษาสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวนหลังการติดตั้ง และศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน ตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission (IEC) ที่ใช้เป็นข้อกำหนดในกระบวนการผลิตและการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินในประเทศไทย

1.4 วิธีการดำเนินการโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้าง และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลใต้ดิน
2. สืบค้นกรณีสายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวนหลังการติดตั้ง และข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อนำมาเป็นกรณีศึกษาต่อไป
3. ศึกษาและจำลองพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในกรณีศึกษาต่างๆ ที่ได้รับรวมข้อมูลไว้
4. ตั้งสมมติฐานในพฤติกรรมอันเป็นสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวนหลังการติดตั้ง และออกแบบการทดลองเพื่อพิสูจน์ข้อสมมติฐานที่ได้
5. ทำการทดลองและปรับปรุงแก้ไขวิธีการทดลองรวมทั้งศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อสมมติฐานได้
6. สรุปผลการทดลองและเสนอแนวทางในการดำเนินการศึกษาต่อไป

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551					
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นที่มีความเกี่ยวข้อง : PSPICE, AUTOCAD, SOLID WORK						
2. ค้นคว้ามาตรฐานและงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง						
3. ศึกษาข้อมูลและการโปรแกรม Finite Element เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ผล						
4. ศึกษารูปแบบสนามไฟฟ้าในกรณีเคเบิลสภาพปกติ และสภาพที่มีความบกพร่อง						
5. จัดทำข้อมูลนำเสนอผลการศึกษาในภาคเรียนที่ 1						

: วางแผนงานที่วางไว้

: ดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินโครงการ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551				
	2551		2552		
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
6. ทดสอบการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำของสายเคเบิล					
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ					
8. สรุปผลการทำโครงการและข้อเสนอแนะ					
9. จัดทำปฏิญาณพันธันับสมบูรณ์					
10. เตรียมตัวสอบโครงการ					

■ : วางแผนงานที่วางไว้

■ : ดำเนินงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจโครงสร้างรายละเอียดส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดิน และวิธีการทดสอบเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC 60502 เพิ่มขึ้น
2. สามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินเพื่อดูผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อสายเคเบิลใต้ดินได้
3. เพิ่มพูนทักษะในการออกแบบการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมติฐานได้
4. ได้รับความรู้เกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวนหลังการติดตั้ง และสามารถนำไปปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

บทที่ 2

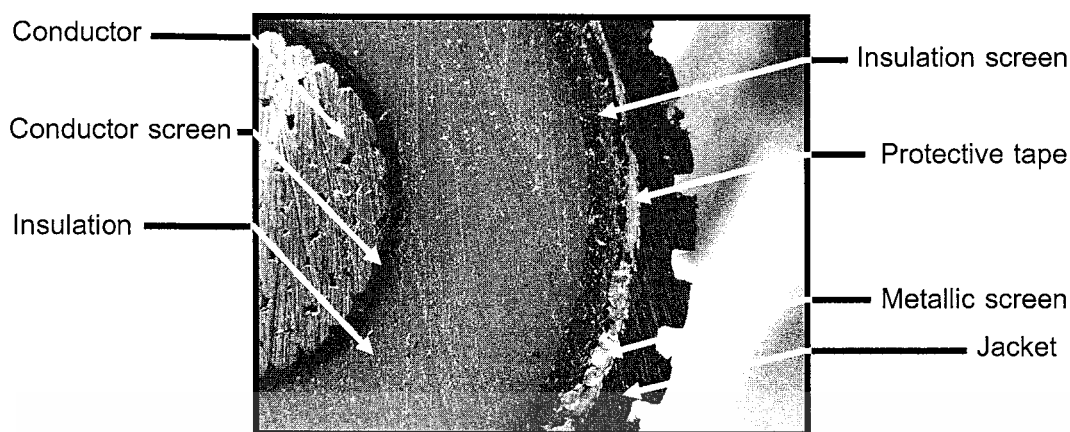
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้งานกับแรงดันต่ำ แรงดันปานกลาง และแรงดันสูง จำเป็นต้องมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยจำนวนชั้น (Layers) ที่แตกต่างกัน แต่ละชั้นจะมีหน้าที่พิเศษเป็นของตัวเอง ซึ่งสามารถพิจารณาส่วนประกอบในแต่ละชั้น โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลใต้ดิน ดังนี้

2.1.1 ตัวนำ (Conductor) มีหน้าที่ในการนำกระแสไฟฟ้า ตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินส่วนใหญ่ จะทำมาจากอลูมิเนียม หรือทองแดง ตัวนำจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสม่ำเสมอ แต่รูปแบบในการจัดลวดเพื่อประกอบเป็นตัวนำอาจจะแตกต่างกันไป มีทั้งที่เป็นสายยตัวนำเส้นเดียว สายตัวนำตีเกลียว สายตัวนำแบบเชกเมนต์ สำหรับสายเคเบิลใต้ดินหนึ่งเส้นอาจจะแบ่งเป็นสายตัวนำแกนเดียว (Single core cable) หรือใช้ตัวนำสามแกน (Three core cable) ก็ได้ ในทางปฏิบัติของการไฟฟ้านครหลวง จะใช้สายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวนำผลิตจากทองแดง และเป็นชนิดแกนเดียว เพราะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าอลูมิเนียม [2] ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของตัวนำแต่ละเส้น และจำนวนของเส้นลวดที่ใช้ในการตีเกลียวจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60228 โดยจะกำหนดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (Nominal cross sectional area : mm^2) และจำนวนเส้นลวด (Number of stranded) จากนั้นนำค่าที่กำหนดทั้งสองนี้ไปหาพื้นที่หน้าตัดของลวดที่จะนำมาตีเกลียว

ในการตีเกลียว มีทั้งชนิดตีเกลียวกลมไม่อัดแน่น (Non-compact Stranded Conductor) และชนิดตีเกลียวกลมอัดแน่น (Compact Round Stranded) ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดผลของโคโรน่า (Corona effect) สำหรับสายเคเบิลใต้ดินจะไม่มีปัญหาในเรื่องของโคโรน่า การตีเกลียวสลับทิศทางกันในแต่ละชั้น จะทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าในตัวนำหักล้างกัน ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงด้วย



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน

จากคุณสมบัติของตัวนำทองแดง และตัวนำอลูมิเนียมที่มีความแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.6
พื้นที่หน้าตัด (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.66
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.29
น้ำหนัก (ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.3
น้ำหนัก (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	0.5

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (%IACS)	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C ($\Omega \cdot m$)	1.724×10^{-8}	2.803×10^{-8}
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (1/°C)	1.70×10^{-5}	2.30×10^{-5}
จุดหลอมเหลว (°C)	1083	659
ความนำความร้อน (W/cm°C)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 °C (g/cm ³)	8.89	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

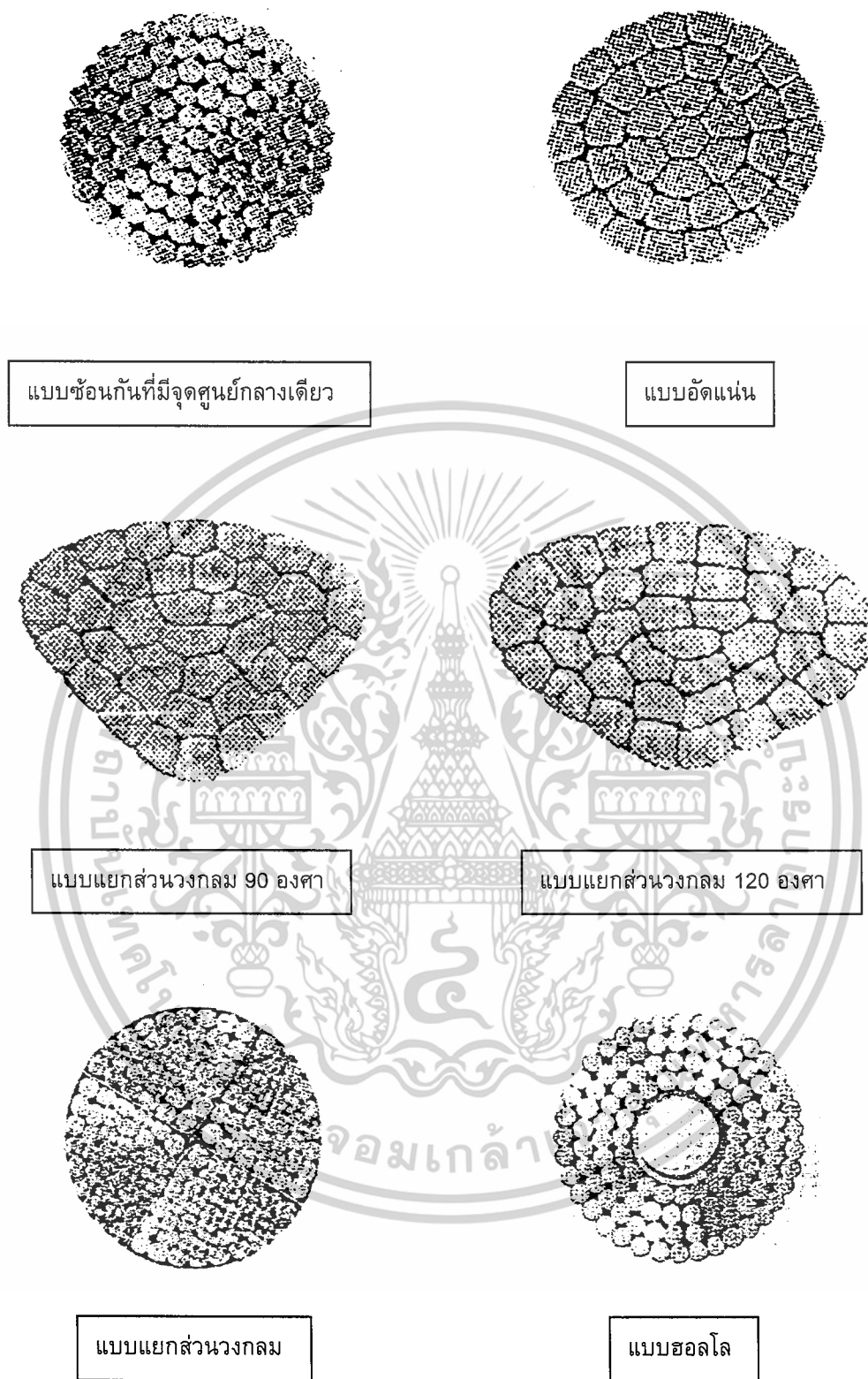
เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Conductivity) รวมถึงมีความแข็งแรง และความเหนียวกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง ทำให้ไม่นิยมนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือดิน (Overhead Conductor) แต่จะนิยมใช้ตัวนำอลูมิเนียมแทน เพราะมีน้ำหนักเบากว่าทองแดง เมื่อเทียบต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด และความสามารถในการนำไฟฟ้าของตัวนำอลูมิเนียมยังคงดีกว่าทองแดงกล่าวคือ ต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดโตกว่าตัวนำทองแดงอีกประมาณ 29 % จึงจะสามารถนำไฟฟ้าได้เทียบเท่ากับตัวนำทองแดง [1]

ตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินมีลักษณะต่างๆ กัน ดังนี้

1 ตัวนำกลม (Round conductor) มี 2 แบบคือ แบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียว (concentric) เป็นตัวนำของสายไฟทั่วๆ ไป และสายเปลือย โดยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางปรากฏการณ์ทางผิวและอัตราความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับกับไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่าแบบตัวนำอัดแน่นดีเกลียว แบบตัวนำอัดแน่นดีเกลียว (compressed) เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่วๆ ไป โดยการนำตัวนำดีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มจะช่วยลดตัวลวดที่นำมาหุ้มได้

2 ตัวนำแบบแยกส่วนวงกลม (Segmental conductor) มีการแบ่งเป็นส่วนๆ เท่าๆ กันเช่น แบบแยกส่วน 90 องศา จะแบ่งเป็น 4 ส่วน, แบบแยกส่วน 120 องศา จะแบ่งเป็น 3 ส่วน เป็นต้น ตัวนำชนิดนี้จะใช้ในสายเคเบิลใต้ดินขนาดใหญ่ ที่ต้องการให้มี Current Carrying Capacity สูง มีข้อดีคือ มีความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance) ต่ำ เนื่องจากตัวนำในแต่ละส่วนมีการสลับเข้าออกระหว่างส่วนนอกและส่วนในของตัวนำ ทำให้ Skin Effect Factor ต่ำ ซึ่งช่วยลดปัญหาของปรากฏการณ์ทางผิว และปรากฏการณ์ความใกล้เคียงได้ และสำหรับสายเคเบิลแบบ 120 องศา สามารถใช้แทนตัวนำแบบ 3 เฟส เพื่อลดขนาดสายเคเบิลได้

3 ตัวนำแบบแบบฮอลโลว (Hollow core conductor) มีลักษณะเป็นท่อกว้างกลางตัวนำสำหรับเติมของเหลวเพื่อช่วยระบายความร้อน ข้อดีของสายเคเบิลประเภทนี้คือ จะมีอัตราความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ำ เมื่อเทียบกับสายแบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียว และลดขนาดพื้นที่เท่ากัน สายประเภทนี้มักใช้เป็นตัวนำ Oil Fill Cable โดยใช้น้ำมันในการระบายความร้อน ปัจจุบันนำมาใช้กับสายเคเบิลใต้ดินที่มีฉนวนแข็ง และต้องการนำกระแสสูงๆ โดยใช้น้ำมัน หรืออากาศในการระบายความร้อน [2], [3]



ภาพที่ 2.2 ตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ฉนวนไฟฟ้า (Insulation) เป็นส่วนสำคัญที่สุดของสายเคเบิล มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้ารั่วไหล หรือลัดวงจร จนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่ไปสัมผัสได้ คุณสมบัติของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวน มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) หรือ Polyethylene (PE) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงดันต่ำ ส่วน Oil Impregnated Paper, Cross-link Polyethylene (XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) จะนิยมใช้ในระบบแรงดันสูง [2] โดยฉนวนของสายเคเบิลต้องมีคุณสมบัติที่ทำให้แรงดันตกคร่อมที่ผิวนอกของฉนวนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่สุดคือ วัสดุที่ใช้ทำฉนวนต้องเป็นสารเนื้อเดียวกัน และต้องปราศจากสารเจือปนเพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วน และการเจาะทะลุ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายเคเบิลได้รับความเสียหาย

ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน โดยความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายเคเบิลใต้ดิน การเลือกใช้ฉนวนไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง [4]

โดยในกระบวนการผลิต XLPE จะหลอมละลายสาร PE ในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปนต่างๆ (Clean Room) จากนั้นนำเข้ากระบวนการฉีด (Extrude) หุ้มตัวนำโดยกระทำไปพร้อมกันกับชั้น Conductor Screen และ Insulation Screen เพื่อให้ทั้งสามส่วนนี้ติดกันเป็นอย่างดี และในขณะเดียวกันนี้จะทำการ Cross linking สาร PE ให้เป็น XLPE ไปพร้อมกันด้วย [1]

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของสารบริสุทธิ์ชั้นพื้นฐานสำหรับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการนำไปใช้ในปัจจัยอื่นๆ เมื่อใช้ค่าเหล่านี้คำนวณอัตรากระแส (current ratings) ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการปกติ ถ้าสายเคเบิลถูกฝังใต้ดินโดยตรงซึ่งทำงานภายใต้โหลดต่อเนื่อง (100% load factor) ที่อุณหภูมิตัวนำสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทำให้ความต้านทานความร้อนของดินรอบๆ สายเคเบิล ในขณะเวลานี้เพิ่มขึ้นจากค่าปกติ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดินรอบๆ สายเคเบิล สิ่งที่มาคือ อาจทำให้อุณหภูมิของตัวนำมีค่าเกินกว่าค่าสูงสุดมาก [4] สำหรับอุณหภูมิการเกิดลัดวงจร อ้างอิงตาม IEC 60986 นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเปลือกนอก

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [12]

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (°C)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.4	0.92
ความนำความร้อน (cal/cm.sec °C)	3.5	8
ความต้านทานต่อแรงดึง (kg/mm ²)	2.5	3

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2[12]

ฉนวนผสม	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ °C	
	normal operation	short-circuit (≤5 วินาที)
polyvinyl chloride (PVC/B)		
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ≤ 300 mm ²	70	160
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ≥ 300 mm ²	70	140
cross-linked polyethylene (XLPE)	90	250
ethylene propylene rubber (EPR และ HEPR)	90	250

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ สำหรับเปลือกนอกชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-1 [11]

Sheathing compound	สัญลักษณ์	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำที่สภาวะปกติ °C
a) thermoplastic:		
polyvinyl chloride (PVC)	ST ₁	80
	ST ₂	90
polyethylene	ST ₃	80
	ST ₇	90
b) elastomeric:		
polychloroprene, chlorosulfonated polyethylene or similar polymers	SE ₁	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ความหนาของฉนวน cross-linked polyethylene (XLPE)

ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [12]

Nominal cross sectional area of conductor (mm ²)	Nominal thickness of insulation at rated voltage U_0/U (mm)				
	3.6/6(7.2) kV (mm)	6/10(12) kV (mm)	8.7/15(17.5) kV (mm)	12/20(24) kV (mm)	18/30(36) kV (mm)
10	2.5	-	-	-	-
16	2.5	3.4	-	-	-
25	2.5	3.4	4.5	-	-
35	2.5	3.4	4.5	5.5	-
50-185	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0
240	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0
300	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0
400	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0
500-1600	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0

2.1.3 ชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductive Layer) โครงสร้างนี้มีอยู่ 2

ประเภทคือ Conductor Screen และ Insulation Screen โดย Semi-conductive Layer ทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ อาจทำมาจากผ้าอาบ Carbon หรือเป็น Extrude Layer ของสารสังเคราะห์พวกพลาสติกผสมตัวนำ สำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับระดับแรงดันมากกว่า 2 kV จะต้อง มีชั้น conductor screen และสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับระดับแรงดันต่ำกว่า 5 kV ไม่จำเป็นต้องมีชั้น Insulation Screen หน้าที่ของ Semi-conductive Layer [1] ดังนี้

- 1 ทำให้ผิวสัมผัสราบเรียบ ซึ่งจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง
- 2 ลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่มีการเชื่อมต่อฉนวนไฟฟ้าที่ต่างกัน
- 3 Conductor Screen จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำกับฉนวนไม่แตกต่างกันมาก หรือทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของฉนวนและป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างอากาศที่บริเวณรอยต่อ
- 4 Insulation Screen จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับเปลือกโลหะดีขึ้น และยังช่วยป้องกันแสงสว่างจากภายนอก หรือสิ่งอื่นๆ ที่จะทำให้ฉนวนเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

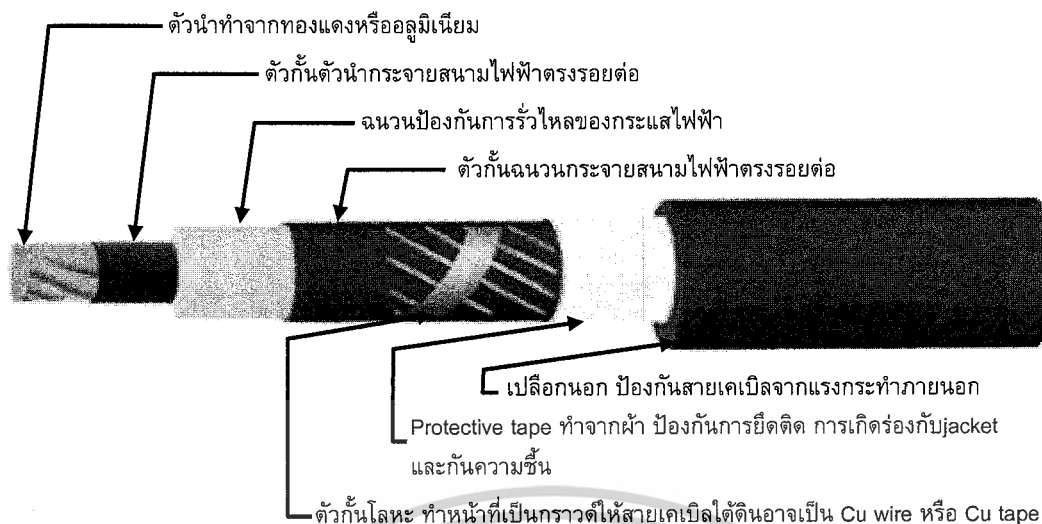
2.1.4 ตัวกันโลหะ (Metallic Screen) อาจเป็นแบบเทป (Tape) หรือ แบบเส้น (Wire) ทำด้วยทองแดง อลูมิเนียม หรืออาจเป็นปลอกตะกั่ว (Lead Sheath) หรือ ปลอกอลูมิเนียมลูกฟูก (Corrugate Aluminium Sheath) ซึ่งในการเลือกวัสดุสำหรับตัวกันโลหะ จะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกัดกร่อน ความปลอดภัยทางกล และทางไฟฟ้า โดยข้อกำหนดของตัวกันโลหะทั้งทางไฟฟ้า รูปร่าง และช่องว่างต้องเป็นไปตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ สำหรับหน้าที่ของ Metallic Screen มีดังนี้

- 1 ทำหน้าที่เป็นกราวด์ สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูง
- 2 เป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร
- 3 ทำหน้าที่เป็น Mechanical Protection ป้องกันไม่ให้ฉนวนเสียหาย
- 4 ทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลที่ใช้ใต้น้ำ (Submarine Cable)
- 5 ทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับ Oil Fill Cable
- 6 ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลออกไปรบกวนภายนอก
- 7 ป้องกันอันตรายเนื่องจากการสัมผัสสายเคเบิล

2.1.5 Separative tape [1] อาจทำจากผ้าหรือ Polyester tape (เช่น Mylar) มีหน้าที่ป้องกันสิ่งต่างๆ ที่จะมีผลต่อสภาพฉนวน และตัวกันโลหะ นอกจากนั้นยังช่วยรัดตัวกันโลหะให้แน่น และช่วยให้ตัวกันโลหะไม่ติดกับเปลือกนอก (jacket) ทำให้ไม่เกิดร่องที่ด้านในของเปลือกนอก

2.1.6 เปลือกนอก (Jacket หรือ Oversheath) [4] ทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลจากการเสียดสี แรงกระทำภายนอก หรือจากการลากสาย การติดตั้ง หรือการขนส่ง ซึ่งมีทั้งผิวเรียบและผิวขรุขระชนิดเป็นสันมีร่องสำหรับสายเคเบิลขนาดใหญ่เพื่อลดแรงเสียดทานต่อสายเคเบิล โดยวัสดุที่ใช้ทำเปลือกนอกอาจเป็นพวก thermoplastic compound (PVC หรือ PE) หรือสารพวก elastomeric compound (Polychloroprene, chlorosulfonated, polyethylene or similar polymers) และควรมีความทนต่ออุณหภูมิที่เหมาะสมกับตารางที่ 2.2

ในบางครั้งอาจต้องเพิ่มสารเคมีบางตัวเข้าไปในเปลือกนอก สำหรับกรณีพิเศษ เช่น เพื่อป้องกันปลวก แต่สารที่เพิ่มไปนี้ ไม่ควรเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างและหน้าที่ของสายเคเบิล

2.2 สนามไฟฟ้า [4]

ในการออกแบบและทดสอบสายเคเบิลนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงประการแรก คือ การฉนวน ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการฉนวน และความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นของฉนวน จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลได้

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

- 1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- 2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)
- 3 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่าจะได้

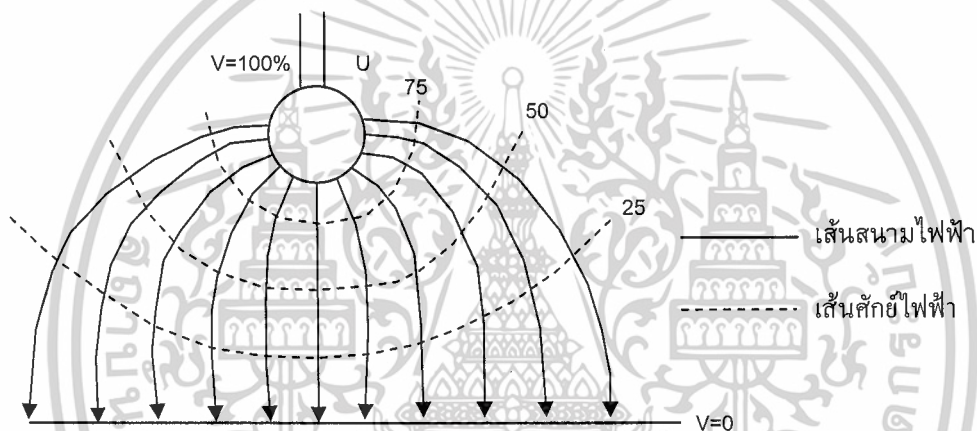
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังภาพที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.1)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.2)$$



ภาพที่ 2.4 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโทรดทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.4 อิเล็กโตรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอิเล็กโตรดคือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า “กระแสโคโรนา (corona current) หรือ กระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุว่าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.1) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการ(2.1) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ(2.1) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_{\max} = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ $E_{\max}$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

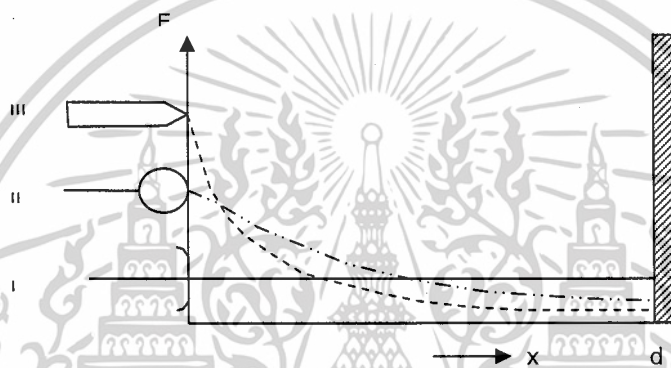
โดยที่ $E_{\max}$ และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ(2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุว่างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ(2.3) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage *, threshold voltage, inception voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d\eta^* \quad (2.4)$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้ำจุนเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

2.2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical field stress)

จากของกฎคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.5)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.6)$$

จากสมการ(2.6) จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ Q_2 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D/ϵ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.7)$$

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่า แรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีเรียกว่าความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทโรปิกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า จึงเขียนได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ $\vec{J}$ คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m^2

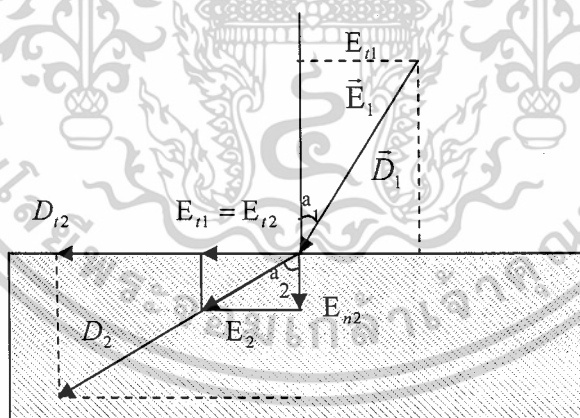
σ คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น $S/m = \text{Siemens/meter} = 1/\rho$

ρ คือ สภาพต้านทาน เป็น $\Omega \cdot m$

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

2.2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างกัน ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้กับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอรมิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นของฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ $E_{t1} = E_{t2}$ และ $D_{n1} = D_{n2}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{n1}}{D_{n2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.10)$$

จึงกล่าวสรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า $\vec{D}$ และสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ในเนื้อสารที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างออกจากแนวตั้งฉาก หรือหักเหเข้าหา รอยต่อ นั้นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ , สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

2 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้เกิดการหักเหของสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั้น กล่าวคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 2.7

ภาพที่ 2.7 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้า และแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจจะคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสถิต ฉะนั้นจะมีค่าคงตัว D และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามีตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 \approx \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \text{และ} \quad C_2 \approx \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (2.12)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (2.13)$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1 \quad (2.14)$$

แต่ $U = U_1 + U_2 \quad (2.15)$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1 \quad (2.16)$$

$$= U_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (2.17)$$

ฉะนั้น $U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad (2.18)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า U_1 จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U}{\left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.19)$$

จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.20)$$

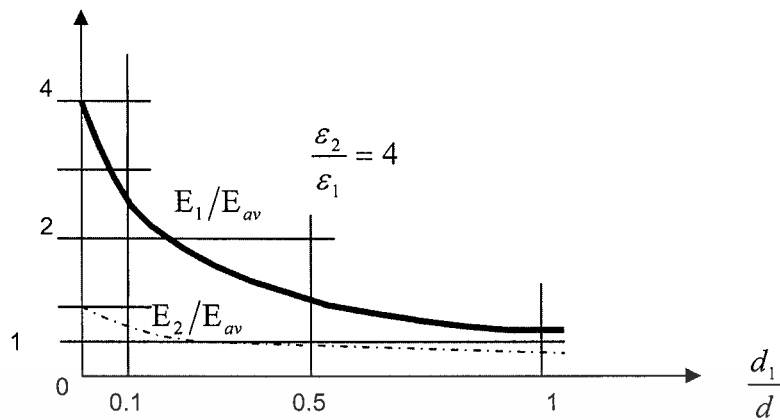
$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.21)$$

$$E_2 = \frac{U \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{d_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.22)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.23)$$

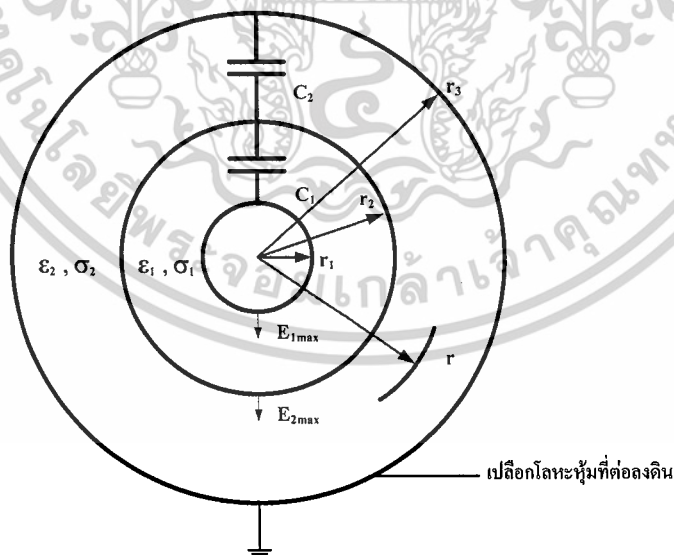
จะเห็นว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$

เมื่อ $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี TM (Transverse Magnetic Waves) ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

3 สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง ฉนวนแข็งมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีต่างกัน ϵ ซึ่งฉนวนที่มีค่า ϵ ต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนซ้อนกันกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพราะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน แต่การใช้ฉนวนที่มีค่า ϵ ต่างกันเหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี ϵ ต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลแรงสูง ทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และปลอกตัวนำ (bushing) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพทางไฟฟ้าของฉนวน (σ) เป็นศูนย์หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ นั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลหรือเปลือกโลหะจะเปรียบเสมือนว่ามีค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวต่ออันดับกัน คือ C_1 และ C_2 ในฉนวนชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.24)$$

ฉะนั้นความจุไฟฟ้าผลลัพธ์คือ

$$C'_{res} = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2} \quad (2.25)$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.26)$$

เมื่อป้อนแรงดัน U เข้าที่ตัวนำกับเปลือกโลหะ ประจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิลคือ Q' จึงหาได้จาก

$$Q' = C'_{res} \cdot U \quad (2.27)$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 \cdot U}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.28)$$

โดยที่ตัวเก็บประจุของฉนวนแต่ละชั้นต่อกันแบบอันดับ ประจุของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นย่อมเท่ากันคือ

$$Q'_1 = Q'_2 = Q' = C'_1 U_1 = C'_2 U_2 = C'_{res} \cdot U \quad (2.29)$$

แรงดันกระจายในชั้นฉนวนจึงคิดแบบตัวเก็บประจุต่อกันแบบอันดับ นั้นที่รัศมี r_x แรงดันจะเป็น

$$U_{r_x} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{r_x}} \quad (2.30)$$

C'_{r_x} ความจุไฟฟ้าที่รัศมีฉนวนเท่ากับ r_x

$$U_{r_x} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{C_{r_x} \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.31)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่มีรัศมี r_x คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_{res} \cdot U}{2\pi\epsilon_x r_x} \quad (2.32)$$

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.33)$$

อัตราส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี r_x และ r_{x+1} จะได้

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x} \quad (2.34)$$

ฉะนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้น จะเกิดขึ้นในรัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9 คือในฉนวนชั้นที่ 1 $E_{\max}$ เกิดขึ้นที่ $r = r_1$, $\epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1\max} \Big|_{\substack{r=r_1 \\ \epsilon=\epsilon_1}} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในชั้นฉนวนชั้นที่ 2 $E_{\max}$ เกิดขึ้นที่ $r = r_1$, $\varepsilon = \varepsilon_1$

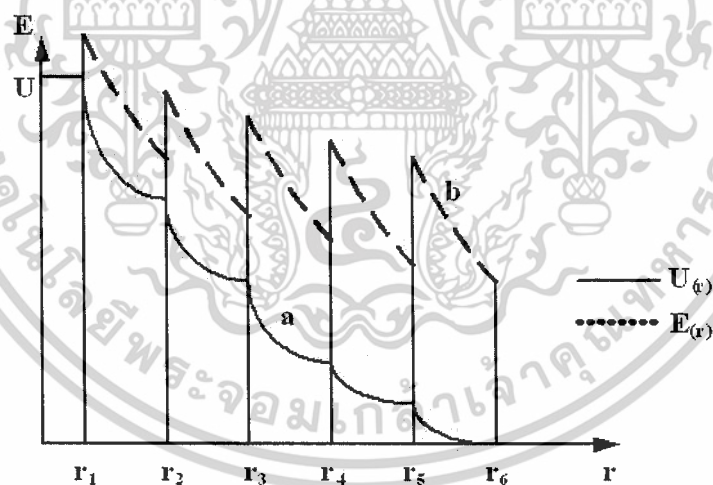
$$E_{2\max}|_{r=r_2}^{\varepsilon=\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_1 U}{r_2 \left(\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.36)$$

อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (2.37)$$

นั่นคือ ควรเลือก ε ของค่า r น้อยๆ ให้มีค่ามากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน n ชั้น ซึ่งมีรัศมี $r_1, r_2, \dots, r_n$ และมีไดอิเล็กตริกคงตัว $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ และเพื่อให้ $E_{\max}$ ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี $E_{\max}$ เท่ากันจะทำได้โดยให้

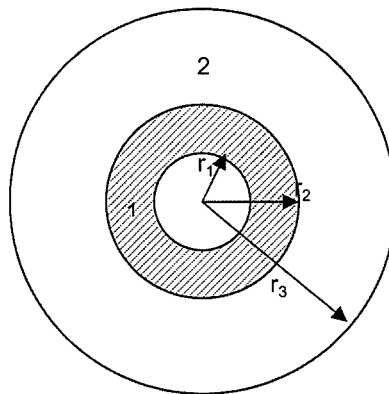
$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2 = \varepsilon_3 r_3 = \varepsilon_n r_n \quad (2.38)$$



ภาพที่ 2.10 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันมีชั้นฉนวนหลายชั้น

- a) แรงดันกระจายในชั้นฉนวน
- b) สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ตัวนำในฉนวนหุ้ม

ลักษณะในทางปฏิบัติใช้งาน มักจะพบเสมออย่างหนึ่งก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น คือ ที่อิเล็กโตรดในจะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มิตติวิตี ϵ_1 ชั้นถัดมากระบอกนอกเป็นอากาศ (ϵ_0) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 $\epsilon_1 = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ฉนวนหุ้มสายไฟจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ ไม่ต้องกังวลว่าจะต้องให้ E ที่ผิวตัวนำมีค่าต่ำๆ จึงสามารถใช้กับแรงดันที่สูงกว่าเมื่อเป็นอากาศล้วนได้ เพียงแต่ต้องดูว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 ที่เป็นอากาศ คือ E_2 มีค่าสูงเกินขีดความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจคำนวณได้

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.39)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่ 2 คืออากาศเป็น E_2 ขึ้นอยู่กับค่า r_2 จึงควรเลือก r_2 ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ความเครียดสนามไฟฟ้า E_2 ต่ำสุดเมื่อกำหนด r_3 ให้ นั่นคือ ค่าของส่วนในสมการข้างบน จะต้องมียุคค่าสูงสุด ให้ $r_2 = x$ จึงหาค่า r_2 ที่พอเหมาะได้จาก

$$\frac{d}{dx} \left[x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0 \quad (2.40)$$

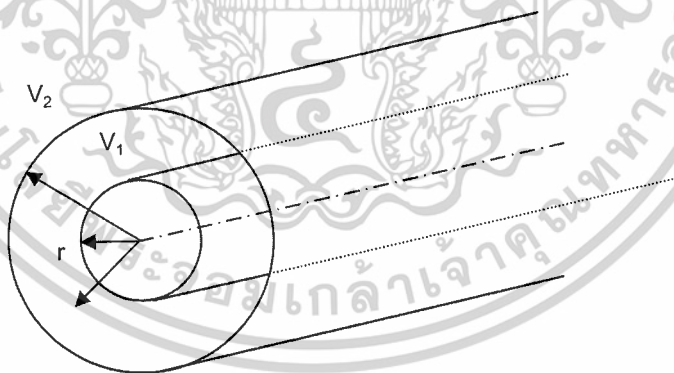
2.2.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนเนื้อเดียวกัน การคำนวณทางไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัด หรือกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นประการสำคัญ ฉะนั้นการออกแบบการคำนวณจึงควรจะทราบรูปลักษณะ และขนาดความเครียดของสนามไฟฟ้า เพื่อเลือกชนิดและรูปร่างแห่งเรขาคณิตของสนามไฟฟ้าได้เหมาะสม สำหรับการออกแบบสายเคเบิลนั้น รูปร่างของการออกแบบจะเป็นลักษณะของทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

ทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เมื่ออิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมี และพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ดังนั้นโดยอาศัยอินทิกรัล สมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์

$$Q = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (2.41)$$

สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมมีความยาว l รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$) ดังภาพที่ 2.12 และ $E = D/\epsilon$ จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2.42)$$



ภาพที่ 2.12 ทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

และเส้นแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสองคือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.43)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.44)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ $r_1 < r < r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.45)$$

นั่นคือ ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ จะเกิดที่ผิวทรงกระบอกอันใน

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.46)$$

จากนิยามแฟคเตอร์สนาม $\eta^* = E_{av}/E_{\max}$ โดยที่

$$E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad (2.47)$$

ฉะนั้น

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.48)$$

ความจุไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันร่วม คำนวณจาก $Q = CU$
จากสมการที่ (2.44)

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งและเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นเราสามารถหาได้จากการคำนวณและการวัด [6]

2.3.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ในชีวิตประจำวันเราได้พบเจอกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น รัศมีแกมมา รัศมีจากแสงอาทิตย์ และรังสีที่เกิดจากการสร้างขึ้นของมนุษย์ เช่น เรดาร์ ไมโครเวฟ โทรศัพท์ วิทยุ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกออกได้ตามช่วงความถี่ (Frequency spectrum) สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจัดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมากๆ มีความถี่ในช่วงการส่งจ่าย 50-60 Hz และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากๆ ในอากาศโดยรอบ ดังนั้นคลื่นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจึงไม่เกี่ยวเนื่องกันทำให้สามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้ [6]

1 สนามไฟฟ้า [6] เป็นแรงในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งขนาด และทิศทางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{E}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/cm) โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดใดๆ ในสนามแม่เหล็กค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และจะแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ในอากาศจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าในสถานะคงที่เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน x , y และ z ได้ดังนี้

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y + e_z(t)\vec{u}_z \quad (2.50)$$

เมื่อ $\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z$ คือ ยูนิตเวกเตอร์ตามแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ และ $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน x , y และ z ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x แล้ว เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_X(t) = E_X \cos(\omega t + \phi_X) \quad (2.51)$$

$$e_X(t) = E_{X,real} \cos \omega t + E_{X,imag} \sin \omega t \quad (2.52)$$

เมื่อ E_X เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ ϕ_X เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา $e_X(t)$ สำหรับค่าของ $E_{X,real}$ และ $E_{X,imag}$ เป็นค่าของสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นจำนวนจริง และในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ตามลำดับ สนามไฟฟ้าในระบบสามเฟสการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทั้งขนาด และมุมจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ ในตัวกลางอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เราสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากลักษณะของวงรีตามภาพที่ 2.13 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดตามแนวแกนหลักของวงรี (major axis of ellipse) และขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยความยาวของเส้นแกนรองของวงรี (minor axis of ellipse) สำหรับขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับวงรีจะมีค่าเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 2.13 การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 สนามแม่เหล็ก เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำของสายไฟฟ้าแรงสูงทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{B}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของเวเบอร์ต่อตารางเมตร (wb/m^2) หรือเทสลา (Tesla) สนามแม่เหล็กเป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทั้งขนาด และทิศทางเหมือนสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กจะถูกพิจารณาในหน่วยของเกาส์ (Gauss) สำหรับของสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงในการเคลื่อนตัวของประจุ หรือเกิดจากค่าของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา ซึ่งจะมีค่าแปรผันกับกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและแปรผกผันกับระยะห่างจากสนามไฟฟ้าแรงสูง ในการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับสนามไฟฟ้า (ตามภาพที่ 2.13) [6]

2.4 สมการสำหรับสนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริก [7]

ในการคำนวณสนามไฟฟ้าสถิต (DC) ในตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริกนั้น ค่าศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถอธิบายได้ด้วยสมการปัวซองดังนี้

$$\epsilon \nabla^2 \phi = \rho \quad (2.53)$$

โดยที่ ϕ คือ electrical voltage (V)

ϵ คือ dielectric permittivity of media (F/m) (isotropic material)

ρ คือ electric charge density (C/m^3)

มีเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา คือ

1) เงื่อนไขขอบเขตสำหรับค่า ϕ

$$\phi = V \quad (2.54)$$

โดยที่ V คือ ค่าคงที่ ในบริเวณขั้วไฟฟ้า

2) เงื่อนไขขอบเขตสำหรับขอบของปัญหาที่มีสมมาตรแบบกระจก

(mirror symmetry) ซึ่งมีความหมายคือ จะไม่มีฟลักซ์ของสนามไฟฟ้าไหล

ตั้งฉากกับขอบดังกล่าว คือ

$$\epsilon \nabla \phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.55)$$

โดยที่ $\vec{n}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เงื่อนไขสำหรับความต่อเนื่องระหว่างรอยต่อสองตัวกลางไดอิเล็กตริก คือ

$$\varepsilon_i \nabla \phi \cdot \vec{n}_i = \varepsilon_j \nabla \phi \cdot \vec{n}_j \quad (2.56)$$

โดยที่ $\vec{n}_i, \vec{n}_j$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับผิวที่ของ i, j ตามลำดับ

$\varepsilon_i, \varepsilon_j$ คือ dielectric permittivity ในตัวกลาง i, j ตามลำดับ

2.5 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นดังนี้

$$[K]\{\phi\} = \{F_1\} + \{F_2\} \quad (2.57)$$

โดยที่

$$[K] = \int_V \left[\varepsilon_x \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial N_j}{\partial x} \right\} + \varepsilon_y \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial y} \right\} \left\{ \frac{\partial N_j}{\partial y} \right\} + \varepsilon_z \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial z} \right\} \left\{ \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} \right] dV \quad (2.58)$$

คือ สติเฟนเมตริกซ์ของสภาพนำความร้อน

$$\{F_1\} = \int_V \{N_i\} q_s ds \quad (2.59)$$

คือ เมตริกซ์ของค่าประจุไฟฟ้าที่ผิว

$$\{F_2\} = \int_V \{N_i\} \rho_v dV \quad (2.60)$$

คือ เมตริกซ์ของค่าประจุไฟฟ้าข้างในวัสดุ

2.6 กฎของฟาราเดย์ [7]

กฎของฟาราเดย์กล่าวว่า “สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าไหลในวงจรปิดที่เหมาะสม” เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$emf = -\frac{d\phi}{dt} \quad (V) \quad (2.61)$$

สมการ (2.61) จะใช้ได้กับวงจรปิดเท่านั้น emf เป็นศักดาไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นโวลต์ ดังนั้น เราอาจกำหนดนิยามของ emf ได้จากอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (2.62)$$

สมการ (2.62) เราจะเห็นข้อแตกต่างจากกรณีของไฟฟ้าสถิตได้อย่างชัดเจน เพราะในกรณีของไฟฟ้าสถิตนั้นความต่างศักย์รอบเส้นวงปิดจะมีค่าเป็นศูนย์

เราแบ่งการพิจารณา emf ออกเป็น 2 กรณีคือ

1 กรณีของ emf ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายในวงปิดที่อยู่กับที่ เรียกว่า ทรานส์ฟอร์มเมอร์ emf ในกรณีนี้ตัวที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาคือ ฟลักซ์เท่านั้น เมื่อแทนค่า ϕ ในสมการ (1) ด้วย $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$ จะได้

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\oint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.63)$$

เมื่อใช้ทฤษฎีสโตกส์จะได้

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = \int (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.64)$$

นั่นคือจะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.65)$$

สมการ (2.65) เป็นสมการหนึ่งในสมการของแมกซ์เวลล์ มีความหมายว่า การ

เปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กกับเวลาจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 กรณีของ emf ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของวงจรปิดในสนามแม่เหล็กคงที่เรียกว่า โมชันแนลหรือเจเนอเรเตอร์ emf ในกรณีนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าโมชันแนลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของคานตัวนำจะเป็น

$$\vec{E}_m = \frac{\vec{F}}{Q} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (2.66)$$

และโมชันแนล emf ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวนำที่เคลื่อนที่นี้จะเท่ากับ

$$emf = \oint \vec{E}_m \cdot d\vec{L} = \oint (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad (2.67)$$

2.7 AMPERE'S CIRCUITAL LAW [7]

กฎของไบโอท-ซาวาร์ทได้กล่าวว่า “ถ้ามีกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่านวัสดุสื่อไฟฟ้า ย่อมเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ วัสดุสื่อไฟฟ้านั้น” ในทางกลับกันถ้ามีสนามแม่เหล็กแอมแปร์บริเวณวัสดุสื่อไฟฟ้า ก็ย่อมจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุสื่อไฟฟ้าขึ้นนั้นได้ นั่นแสดงว่ากระแสไฟฟ้างกล่าวเกิดจากสนามแม่เหล็กที่ไหลเป็นทรงกลม นั่นคือ

$$\oint_{\text{closed path}} \vec{H} \cdot d\vec{L} = I \quad \text{แอมป์} \quad (2.68)$$

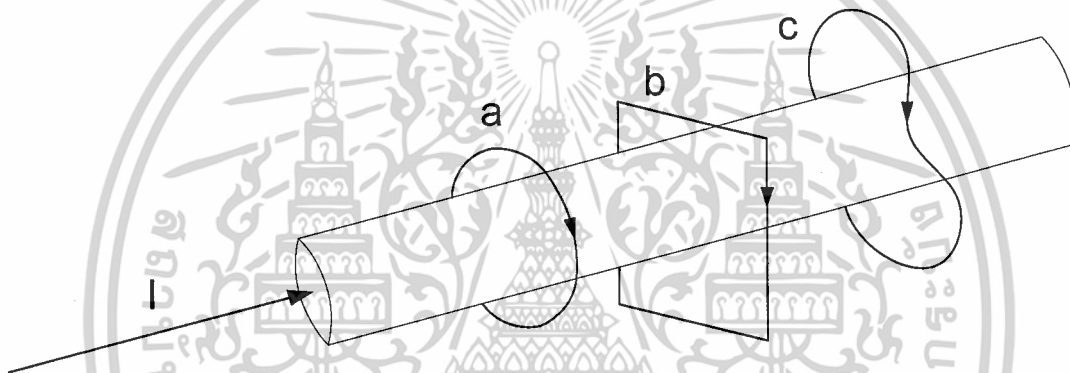
กฎของ Ampere's circuital law กล่าวว่า “สนามแม่เหล็กซึ่งไหลเป็นวงปิด (closed path) รอบวัสดุสื่อไฟฟ้าคู่กับความยาวของสนามแม่เหล็ก (คือเส้นรอบวงของวงกลม) จะมีค่าเท่ากับจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อไฟฟ้าขึ้นนั้น” จะเห็นว่า Ampere's circuital law พัฒนามาจากกฎของไบโอท-ซาวาร์ทนั่นเอง ภาพที่ 2.14 แสดงทางเดินของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ รอบวัสดุสื่อไฟฟ้า จะเห็นว่าเส้นทางของ $\vec{H}$ เป็นแบบวงปิดเสมอไม่ว่าการเดินทางของมันจะมีเส้นทางเป็นวงกลม หรือเส้นเหลี่ยม

จากภาพที่ 2.14 นั้น ถ้าวางจร a เป็นวงกลมแสดงว่าทุกๆ จุดบนวงกลมมีค่า $\vec{H}$ เท่ากันหมด แต่กรณีวงจร b ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะพบว่าทุกจุดบนเส้นทางมีค่าสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ ไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากการอินทิเกรตค่าของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ บนเส้นทาง a และ b จะเท่ากัน นั่นคือ

$$\oint_a \vec{H} \cdot d\vec{L} = \oint_b \vec{H} \cdot d\vec{L} = I \quad (2.69)$$

แต่กรณีเส้นทาง c จะได้ว่า $\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{L} = I_c < I$ เสมอ

จากภาพที่ 2.14 คือ วงจรหรือเส้นทาง a (หรือ b) นั้น เมื่อคูณกับค่าของสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ บนวงจร a (หรือ b) แล้วจะเท่ากับจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อนำไฟฟ้านั้น ส่วนเส้นทาง c คูณกับค่าของ $\vec{H}$ จะได้กระแสไฟฟ้า I_c มีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้า I ทั้งนี้เพราะว่าวงจร c ล้อมวัสดุสื่อนำไฟฟ้าดังกล่าวเพียงบางส่วนเท่านั้น



ภาพที่ 2.14 เส้นทาง (line integral) ของสนามแม่เหล็กรอบวัสดุสื่อนำไฟฟ้า [7]

2.8 สมมติฐานของแมกซ์เวลล์ [10]

นักวิทยาศาสตร์ได้รับความรู้เกี่ยวกับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมาตั้งแต่ประมาณกลางศตวรรษที่ 19 แล้ว ความรู้นี้ดังกล่าวนี้นี้ไม่ได้อยู่ในรูปของสูตรคณิตศาสตร์อย่างปัจจุบันนี้ ตามความจริงแล้วหลักการของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กในสมัยนั้นเป็นแนวความคิดใหม่ของฟาราเดย์ และเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ส่วนมากในตอนนั้นยังคลางแคลงสงสัยอยู่ ข้อขัดแย้งอันสำคัญระหว่างผู้ที่เชื่อในเรื่อง “กริยาการที่ระยะห่าง” (action at a distance) กับผู้ที่เปลี่ยนแนวความคิดไปยอมรับทฤษฎีใหม่คือ “ทฤษฎีสถาน” (field theory) ในขณะนั้น กำลังเป็นไปอย่างเข้มข้น สิ่งที่แน่นอนอย่างหนึ่งก็คือว่า ได้มีผู้คำนวณค่าของสนามไฟฟ้าสถิต และค่าของสนามแม่เหล็กสถิต อีกทั้งยังได้มีผู้แสดงสนามทั้ง สองนี้ในรูปของกราฟมาแล้ว ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 อีกด้วย แต่บุคคลแรกที่เชื่อว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่จริง (ตามคำบอกเล่าของเจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์) นั้น ก็คือฟาราเดย์ก่อนหน้านั้น นักวิทยาศาสตร์ต่างก็มองเห็นว่า สนามต่าง ๆ เป็นวิธีการอันสะดวกสำหรับที่จะนิยามสภาพการ จัดระเบียบแรงต่าง ๆ อันเป็นผลมาจากกริยาการทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก แต่ในทัศนะของฟาราเดย์แล้ว สนามแม่เหล็กเป็นวิธีทางที่ถูกต้องแท้จริงสำหรับการแสดงอำนาจของแรงทางแม่เหล็ก

หลังจากที่ผลงานของแอมแปร์ (ค.ศ.1820-1925) ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายทั่วไปแล้ว ก็เป็นที่เข้าใจกันว่าเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นหนึ่งจะส่งแรงกระทำต่อเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอีกเส้นหนึ่ง โดยไม่ต้องมีตัวกลางที่ช่วยในการออกแรงกระทำมาเกี่ยวข้องแต่อย่างใด นี่คือหลักการของทฤษฎีกริยาการที่ระยะห่าง กฎนี้ให้คำอธิบายในลักษณะเดียวกันกับ กฎอันมีชื่อเสียงของนิวตันเกี่ยวกับแรงโน้มถ่วง ซึ่งตอนนั้นก็เป็นที่รู้จักกันดีมาร่วมศตวรรษแล้ว และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปอยู่แล้วด้วย กฎของนิวตันถือว่ากริยาการอาจเกิดขึ้นที่ระยะห่างได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่ได้พิจารณาถึงตัวกลางใดๆ ว่ามีความจำเป็นสำหรับการส่งแรงโน้มถ่วง เมื่อเป็นเช่นนี้ นักวิทยาศาสตร์ทางสาขาวิชาไฟฟ้าในตอนต้นศตวรรษที่ 19 ก็ย่อมยึดเอาหลักการดังนี้เป็นแบบอย่างบ้างเป็นธรรมดา

อย่างไรก็ตามฟาราเดย์ได้เป็นคนแรกที่เริ่มมีแนวคิดเกี่ยวกับความเป็นจริงทางกายภาพของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และต่อมาแมกซ์เวลล์ก็ได้เป็นผู้ที่แสดงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ในรูปของสูตรทางคณิตศาสตร์ แมกซ์เวลล์นั่นเอง เป็นผู้ชี้ให้เห็นว่า “กระแสดิสเพลซเมนต์” (displacement current คือ กระแสการกระตุ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก B ตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า E ที่มีทางเดินเป็นวงปิด) จะทำให้ระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขาเขียนขึ้นง่ายกว่าเดิมและดีกว่าเดิม ต่อจากนั้นแมกซ์เวลล์ก็ได้ให้ข้อเสนอแนะที่น่าทึ่งมากอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่ากระแสการนำ (conduction current คือ กระแสการนำ เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า) สามารถสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาได้ และเนื่องจากว่ากระแสผลรวม (total current คือ ผลบวกระหว่างกระแสการนำกับ

กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ) นั้น ถ้าจะให้ดูดีตามสูตรคณิตศาสตร์แล้วก็ควรจะอยู่ในรูปของผลบวก ระหว่างกระแสการนำกับกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นมันน่าจะเป็นไปได้มีใช้หรือว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็สามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ในสมัยของแมกซ์เวลล์นั้นวิธีการทดลองไม่อาจที่จะทำการตรวจสอบโดยตรงสามารถพิสูจน์ว่า ข้อเสนอแนะอันนี้ให้ผลได้ตามที่กล่าวไว้จริงหรือไม่จริง ทั้งนี้ก็เพราะว่าปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการนี้มีค่าต่ำมากจนวัดไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมมติฐานอันนี้ก็ให้เป็นผลให้เกิดข้อสรุปที่มี ความสำคัญในระดับพื้นฐานอย่างหนึ่ง นั่นก็คือ แมกซ์เวลล์ ได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าสมมติฐานนี้เป็นความจริงแล้วพลังงานก็จะสามารถถูกส่งผ่านไปอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

ทฤษฎีการที่ระยะห่างถือว่ากริยาทางไฟฟ้าจะปรากฏขึ้นที่ทุก ๆ จุด ในทันที ไม่ว่าจุดเหล่านั้นจะอยู่ห่างออกไปเป็นระยะทางเท่าไรก็ตาม ในทางตรงกันข้าม ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ กล่าวว่าพลังงานจะถูกส่งผ่าน ไปโดยคลื่นที่เดินทางด้วยอัตราเร็วอันตายตัวค่าหนึ่ง เราสามารถคำนวณอัตราเร็วในการเดินทางของคลื่นนี้ได้ และบางทีเราสามารถพิสูจน์ทฤษฎีนี้ได้ โดยใช้การทดลอง หลังจากที่ได้มีการศึกษาความเร็วของคลื่น ความปั่นป่วน (disturbance) ในทางแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว

สมมติฐานของแมกซ์เวลล์กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้วเมื่อมีสนามไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอยู่ก็จะเกิดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากอำนาจผลรวมของกระแสการนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสมการที่ (2.70) คือ

$$\nabla \times H = I \quad (2.70)$$

เมื่อใช้สมมติฐานของแมกซ์เวลล์แล้วเราก็ควรจะให้ทางขวามือของสมการเป็น ความหนาแน่นของกระแสผลรวมจะทำให้ได้

$$\nabla \times H = I + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.71)$$

สมการนี้เป็นสมการหนึ่งในสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) อีกสมการที่อยู่ในกลุ่มนี้ก็คือสมการ

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสนามเบื้องต้นอีก 2 สมการ ได้แก่

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.73)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.74)$$

สมการทั้งหลายเหล่านี้เป็นสมการพื้นฐานของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า จะสังเกตได้ว่าสมการของแมกซ์เวลล์นั้นเมื่อใช้กับตัวกลางเอกพันธ์ (Homogeneous medium) ซึ่งไม่มีทั้งประจุ และสภาพนำไฟฟ้าอยู่ภายในแล้ว ก็จะต้องง่ายและสวยงาม ทั้งยังมีสภาพสมมาตรอีกด้วย สมการที่ได้ในกรณีนี้ก็คือ

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.75)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.76)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2.77)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.78)$$

ถ้าเราจะลองมาพิจารณาความหมายทางกายภาพของสมการเหล่านี้สักครั้งหนึ่งก็คงจะดี สมการ (2.75) บอกเราว่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมา ส่วนสมการ (2.76) บอกเราว่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นได้ ความสัมพันธ์อย่างหลังนี้เป็นหลักเกณฑ์การทำงานของหม้อแปลง (Transformer) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี ส่วนความสัมพันธ์อย่างแรกก็คือ สมมติฐานของแมกซ์เวลล์ ซึ่งกล่าวว่ากระแสดิสเพลซเมนท์ก็สามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับกระแสการนำนั่นเอง สมการ (2.75) ไม่ได้มีพจน์ที่แสดงถึงสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากกระแสการนำอยู่ด้วย ทั้งนี้ก็เพราะว่ามันเป็นสมการที่ถูกลดรูปลงมาเป็นอย่างง่าย เพื่อใช้กับบริเวณที่สภาพนำไฟฟ้า $\sigma = 0$ ซึ่งก็ให้ความหนาแน่นของกระแสการนำ $L = 0$ สมการดั้งเดิมของสมการ (2.75) ก็คือสมการ (2.74)

อย่างไรก็ตามเมื่อก้าวถึงการเดินทางของคลื่นไฟฟ้าแล้วสมการ (2.75) และ (2.76) ก็จัดว่าน่าสนใจและน่าพิจารณาอยู่เป็นพิเศษ เราจะเห็นได้ทันทีว่าถ้าสนามไฟฟ้าที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นได้ และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ ก็ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาได้อีกเป็นทอดๆ ติดต่อกันเรื่อยๆ เช่นนี้แล้วก็ย่อมจะเกิดการถ่ายเทพลังงานในลักษณะที่เป็นอนุกรมอันใดอันหนึ่งขึ้นมาได้ เวลาที่มีความปั่นป่วนของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กอุบัติขึ้น พลังงานจะถูกถ่ายเทจากสนามไฟฟ้าไปสู่สนามแม่เหล็กและกลับคืนมายังสนามไฟฟ้าอีก สลับกันไปมา เช่นนี้ย่อมไม่มีที่สิ้นสุด ถ้าพลังงานในสนามแม่เหล็กไม่ได้ถูกจำกัดให้อยู่ในที่ๆ เป็นอย่างเดียวกันพอดี กับที่อยู่ของพลังงานในสนามไฟฟ้าอันเป็นต้นกำเนิดของสนามแม่เหล็กดังกล่าว แต่ได้ขยับที่เลยไปซึกเล็กน้อย ซึ่งตามที่เป็นจริงเหตุการณ์ก็ดำเนินไปดังที่กล่าวนี้ และถ้าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานแม่เหล็กก็ได้ขยับที่เลยไปข้างหน้าซึกเล็กน้อยด้วยอย่างนี้เรื่อยๆ ไป เพื่อว่าในขณะที่พลังงานได้เปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาอันนั้นมันได้เคลื่อนที่ผ่านไปเอนเวลาด้วยแล้ว เราก็อาจคาดคะเนเอาได้อย่างมีเหตุผลว่าสิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางได้นั่นเอง

ลองพิจารณาสถานะการอันหนึ่งซึ่งพอจะเทียบเคียงกันได้กับสิ่งที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างบนนั้นก็คือ การที่ปริมาตรเล็กๆ อันหนึ่งของน้ำที่อยู่กลางทะเลสาบแห่งหนึ่งถูกทำให้เกิดอาการสั่นไหวตามแนวดิ่งโดยวิธีการบางอย่างเช่น โดยการใช้น้ำถังหนึ่งเต็มๆ เทลงไปกลางทะเลสาบนั้น ไม่ว่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเช่นใดก็ตาม ผิวน้ำตรงจุดที่น้ำจากถูกเทลงไปจะมีอาการขึ้นๆ ลงๆ ตามแบบของอาการสั่นไหว (oscillatory manner) แต่เป็นไปไม่ได้ที่น้ำทั้งถังจะเกิดการสั่นไหวโดยอิสระ ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำที่ล้อมอยู่โดยรอบ ความดันที่เพิ่มขึ้นเกินค่าปกติ และลดลงต่ำกว่าค่าปกติเป็นคาบๆ ของน้ำจากถัง จะถูกส่งผ่านให้แก่ น้ำที่ล้อมอยู่รอบๆ ซึ่งรับพลังงานไปและเกิดอาการสั่นไหวตามไปด้วย ในการเคลื่อนไหวแบบคลื่นที่เกิดขึ้นนี้ น้ำในบริเวณดังกล่าวจะถูกส่งผ่านพลังงานให้แก่บริเวณที่อยู่รอบนอกออกไปติดต่อกันไปเรื่อยๆ โดยกรรมวิธีอันนี้ เราก็จะพบว่าคลื่นเคลื่อนที่กระจายออกไปตามผิวน้ำทั้งทะเลสาบนั้น

เหตุผลเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ของน้ำมีอยู่จริงก็คือ อาการเคลื่อนไหวและความดันของปริมาตรอันหนึ่งของน้ำจะไม่เป็นอิสระจากอาการเคลื่อนไหวและความดันของน้ำ ที่ล้อมอยู่โดยรอบปริมาตรอันนั้น และเมื่อปริมาตรอันนั้นเองน้ำถูกทำให้เกิดความปั่นป่วน มันก็จะส่งผ่านพลังงานให้แก่ส่วนที่อยู่ติดกับมัน

เหตุผลเบื้องต้นของการที่คลื่นไฟฟ้ามีอยู่จริงก็คล้ายกันกับอุปมาที่กล่าวไว้ข้างบนนี้มาก สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นทั้งในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง และในบริเวณที่ล้อมอยู่โดยรอบ ในทำนองเดียวกัน สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาก็ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในบริเวณที่สนามไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนแปลงและในบริเวณที่ล้อมอยู่โดยรอบ (นั่นคือ กระแสที่ไหลอยู่ในเส้นลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในเส้นลวด และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในบริเวณที่โดยรอบเส้นลวด ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีกระแสไหลผ่านเลย ในทำนองเดียวกัน กระแสดิสเพลซเมนต์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในบริเวณที่มีกระแสดิสเพลซเมนต์ไหล หรือในบริเวณที่สนามไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนแปลงอยู่และในบริเวณที่อยู่รอบนอกด้วยเช่นกัน) ดังนั้นเมื่อมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในบริเวณใด ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกจำกัดที่ให้อยู่เฉพาะแต่ในบริเวณนั้นเท่านั้น สนามซึ่งกำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาอยู่ภายในบริเวณนั้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามขึ้นในบริเวณรอบนอกที่อยู่ใกล้ๆ และเหนี่ยวนำให้เกิดสนามขึ้นในบริเวณรอบนอกถัดออกไปติดต่อกันเป็นทอดๆ เป็นผลให้พลังงานถูกแพร่ กระจายออกไปสู่ภายนอกโดยรอบ ในระหว่างที่การดำเนินการนี้ดำเนินไปนั้นคลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งออกไป

เวลาที่มีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนเกินอยู่ในบริเวณที่ไม่มีขอบเขตจำกัด พลังงานจะไม่หยุดนิ่งอยู่กับที่ ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกับกรณีน้ำถึงหนึ่งถูกเทลงไปในทะเลสาบแล้ว มันจะไม่อยู่นิ่งบนผิวน้ำ พลังงานจะไม่สลายหายสูญไปเสียเฉยๆ แต่มันจะต้องเคลื่อนที่ไปในลักษณะของคลื่นจนกว่ามันจะถูกใช้งานไปทั้งหมด

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์นี้ได้ถูกทำนายเอาไว้แล้ว โดยสมการต่างๆ ของแมกซ์เวลล์ เราจะหาสูตรคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สมการของคลื่นที่ (Wave equation) มาจากสมการของแมกซ์เวลส์ดังกล่าวแล้ว จะเริ่มต้นด้วยสมการ 2 สมการ ซึ่งต่างก็มีทั้ง E และ H ติดอยู่ด้วยกัน และในขั้นแรกจะแก้สมการทั้ง 2 นี้พร้อมๆ กัน ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะกำจัดตัวแปรตัวหนึ่ง และคงตัวแปรอีกตัวหนึ่งเอาไว้ ขอให้กำจัด H และหาสมการซึ่งมีเฉพาะแต่ E กับเวลาเป็นตัวแปรเพียง 2 ตัว สมการที่ได้ใหม่นี้จะเป็นสมการที่สามารถตีความหมายได้ง่ายขึ้น

ก่อนที่จะกล่าวไปสู่ขั้นต่อไป ควรจะตั้งข้อสังเกตไว้ว่าสมการต่างๆ ของแมกซ์เวลล์นั้นเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลภาคทั้งสี่ ยกตัวอย่างว่าสมการ (2.76) จะนำเอาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง (คือ เกร็ดของสนามไฟฟ้า) มาเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา ดังนั้นจะได้คำเฉลยง่ายๆ เพียงอันเดียวก็รู้สึกรู้ว่าจะเป็นการตั้งความหวังที่ออกจะสูงเกินไป ทั้งนี้ก็เพราะการที่จะได้คำเฉลยแบบนี้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลภาค ซึ่งมีอยู่พร้อมกันหลายๆ สมการนั้นไม่ใช่สิ่งที่ จะเป็นไปได้บ่อยนัก นอกจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบเขตก็เป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับปัญหาทุกอย่างที่เกี่ยวข้องกับสมการดังกล่าวนี้

ได้กล่าวมาแล้วว่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กขึ้นได้ ตามสมการ (2.75) ถ้าจะกล่าวให้ชัดจริงๆ ก็ต้องกล่าวว่าสมการนี้แสดงถึงว่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็กเทียบกับระยะทาง (หรือทำให้เกิดเคิร์ลของสนามแม่เหล็กขึ้น) อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าเคิร์ลอะไรค่าหนึ่งที่ไม่เท่ากับศูนย์ กล่าวคือ มันเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ในอวกาศแล้ว มันก็ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ในที่บางแห่ง เนื่องจากเคิร์ลของ H จะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าไม่มี H อยู่จริง ดังนั้นอาจกล่าวได้อย่างปลอดภัยว่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นได้

การแก้สมการเพื่อหาค่าเฉลยร่วมของสมการ (2.75) กับ (2.76) ต่อไป ในตอนแรกจะหาค่าเคิร์ลของแต่ละข้างของสมการ (2.76) ซึ่งให้ผลดังนี้

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.79)$$

จะสังเกตเห็นว่าทางด้านขวามือของสมการ (2.79) นั้นมีตัวดำเนินการเคิร์ล ซึ่งเป็นอนุพันธ์ภาคเทียบกับระยะทาง กระทำอยู่ข้างหน้าอนุพันธ์ภาคของ H เทียบกับเวลาตามหลักการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีนั้น ลำดับก่อนหลังของการดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อหาอนุพันธ์ภาคจะไม่เปลี่ยนแปลงผลที่ได้ในขั้นสุดท้ายแต่อย่างไร ดังนั้น

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \frac{\partial (\nabla \times H)}{\partial t} \quad (2.80)$$

(ถ้ายังเห็นหลักการนี้ไม่ชัดก็ขอให้ลองกระจาย เคิร์ลในระบบแกนประสานเชิงสี่เหลี่ยมผืนผ้าออกไปดู)

แต่รู้ค่าเคิร์ลของ H จากสมการ (2.75) ดังนั้นจึงนำค่าเคิร์ลดังกล่าวนี้มาแทนลงในสมการ (2.80) ทำให้ได้

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้อยู่ในเทอมของ E อย่างเดียวตามที่ต้องการ และเป็นสมการที่สามารถทำให้ง่ายลงได้อีก

ทางด้านซ้ายมือของสมการ (2.81) เป็นเคิร์ลของเคิร์ลของเวกเตอร์ตัวหนึ่ง สามารถแสดงความสัมพันธ์ทั่วไปทางคณิตศาสตร์ออกมาได้ว่า เคิร์ลของเคิร์ลของเวกเตอร์ใดๆ จะมีค่าเท่ากับเกรเดียนต์ของไดเวอร์เจนซ์ของเวกเตอร์นั้นลบด้วยลาปลาเซียนของมัน เมื่อเขียนโดยใช้สัญลักษณ์จะได้

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (2.82)$$

จะใช้ทฤษฎีบทอันนี้กับสมการ (2.81) ไดเวอร์เจนซ์ของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากได้สมมติว่าไม่มีประจุอิสระอยู่ในบริเวณที่พิจารณา ดังนั้นพจน์แรกในการกระจายนิพจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการ (2.81) จะหายไป จะได้

$$\nabla^2 E = \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.83)$$

ถ้ากระจายปริมาณเวกเตอร์ทั้ง 2 ในสมการ (2.83) ออกไปในระบบแกนประสานคาร์ทีเซียน ทำให้ได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} &= \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} &= \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} &= \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.84)$$

ถ้าพิจารณากรณีพิเศษที่ให้ E_x และ E_z เป็นศูนย์ และให้ E_y เป็นฟังก์ชันของ x แต่ไม่เป็นฟังก์ชันของ y หรือ z แล้ว จะพบว่าสมการ (2.74) ลดรูปลงเหลือเพียง

$$E_x = 0; E_z = 0 \quad \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (2.85)$$

ข้อจำกัดแต่ละอย่างที่ทำให้สมการ (2.84) ลดรูปลงเป็นสมการ (2.85) นั้น มีความหมายทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.85) เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของสมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับคลื่นจร (Traveling wave) ค่าเฉลี่ยของสมการนี้ก็คือ

$$E_y = f(x - vt) \quad (2.86)$$

เมื่อ $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ ฟังก์ชัน $f(x - vt)$ เป็นฟังก์ชันใดๆ ของปริมาณ $(x - vt)$ [สมการ (2.71) มีค่าเฉลี่ยเป็นอย่างอื่นได้ด้วย ค่าเฉลี่ยอันหนึ่งก็คือ $f_2(x + vt)$ แต่ในตอนนี้จะไม่สนใจค่าเฉลี่ยอันใดนอกเหนือไปจาก $f(x - vt)$] ในการพิสูจน์ว่าสมการ (2.86) เป็นค่าเฉลี่ยของสมการ (2.85) นั้น อาจแทนค่า E_y จากสมการ (2.86) ลงในสมการ (2.85) และลองดิฟเฟอเรนเชียลดู

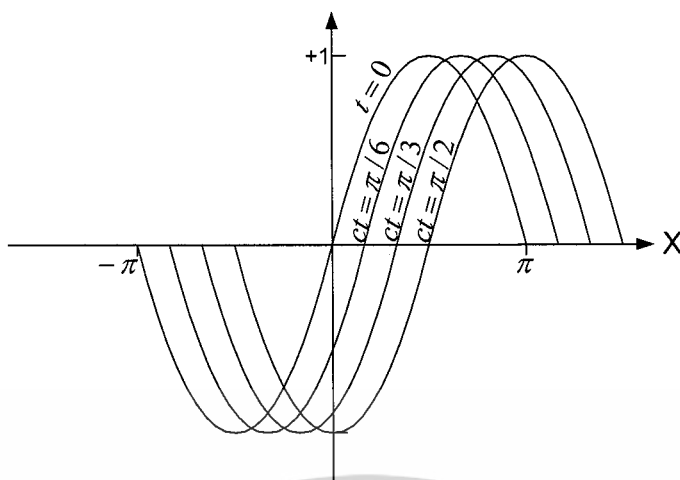
จำไว้ว่าสมการ (2.86) ได้พรรณนาถึงคลื่นตามขวาง (transverse wave) อันมีขนาดและรูปร่างคงตัว และคลื่นนี้กำลังเดินทางไปในทิศทางบวกบนแกน x โดยมีความเร็ว v พิจารณาฟังก์ชันเฉพาะบางอย่างของ $(x - vt)$ และพล็อตกราฟของ $f(x)$ ที่ค่าเวลาต่างๆ แล้วผลที่ได้จะช่วยให้เข้าใจเรื่องคลื่นได้บ้าง

ขอให้พิจารณาตัวอย่างทำนองนี้ดูสักตัวอย่างหนึ่ง ตอนแรกขอให้สมมติว่าคลื่นกำลังเดินทางไปในอวกาศว่าง (Free space) ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่จะเป็น c (คือเป็นค่าเฉพาะอันหนึ่งของ v เมื่อคิดในอวกาศว่าง) และเมื่อใช้คำนิยามจากสมการ (2.86) จะได้

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad (2.87)$$

ขอให้สมมติด้วยว่า คลื่นเป็นคลื่นแบบไซน์ ซึ่งอาจแทนได้ด้วยฟังก์ชันต่อไปนี้

$$E_y = \sin(x - ct) \quad (2.88)$$



ภาพที่ 2.15 กราฟในช่วงเวลาหนึ่งรอบของคลื่น เมื่อพล็อตเป็นฟังก์ชันของ x ที่ค่าของเวลาต่างๆ

ภาพที่ 2.15 แสดงกราฟในช่วงเวลาหนึ่งรอบของคลื่นนี้เมื่อพล็อตเป็นฟังก์ชันของ x ที่ค่าของเวลาต่างๆ กัน กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือว่า ถ้ามองเห็นคลื่นในขณะที่มันกำลังเดินทางผ่านไปใว้ในอากาศได้ ภาพที่ 2.15 ก็จะเป็นเสมือนภาพถ่ายในขณะเวลาที่สืบเนื่องกัน โดยที่ ct มีค่าเท่ากับ $0, \pi/6, \pi/3$ และ $\pi/2$ ตามลำดับ จะเห็นได้จากสมการ (2.88) ว่ากราฟทุกเส้นเป็นเส้นโคไซน์ ซึ่งมีรูปร่าง และมีช่วงกว้างของยอดคลื่นหรือแอมพลิจูด (Amplitude) เป็นอย่างเดียวกัน อย่างไรก็ตามเส้นโค้งที่ $ct = \pi/6$ จะขยับออกไปอยู่ต่างหากจากเส้นโค้ง $ct = 0$ และค่าต่างๆ ของมันที่สมนัยกับค่าบนเส้นโค้งที่ $ct = 0$ เหนือแกน $+x$ จะเกิดขึ้นที่ค่า x ตั้งแต่ $\pi/6$ ขึ้นไป นั่นก็หมายความว่า ถ้าจะทำให้ปริมาณในวงเล็บทางด้านขวามือของสมการ (2.88) มีค่าเท่าเดิม คือทำให้ E_y มีค่าคงเดิมแล้ว ต้องให้ x มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามีค่าสูงขึ้น ผลที่ได้ก็คือคลื่นๆ หนึ่งซึ่งเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา ในขณะที่เวลาผ่านไป เวลาและระยะทางจะสัมพันธ์กันด้วยตัวประกอบ C อย่างเดียวกับที่ทั้ง 2 อย่างนี้สัมพันธ์กันโดยความเร็วค่าหนึ่ง (อย่างไรก็ตามจะสังเกตว่า ไม่มีสิ่งใดในทางกายภาพที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว C เลย สนามไฟฟ้าไม่ได้เคลื่อนที่ มันเพียงแต่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะการที่ว่าถ้าสามารถมองเห็นมันได้ มันก็จะปรากฏเป็นคลื่นที่มีความเร็ว C ดังกล่าวแล้วเท่านั้น)

คลื่นในสมการ (2.86) เป็นคลื่นตามขวาง ทั้งนี้ก็เพราะว่าสนามไฟฟ้า E_y อยู่ในทิศของ y แต่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางของ x

สมการ (2.83) เป็นผลมาจากสมการ (2.75) และ (2.76) โดยการกำจัด H และ E ไปได้ ถ้าทำอีกอย่างหนึ่งในทางตรงกันข้ามคือ กำจัด E และ H ไปได้ จะได้สมการของคลื่นสำหรับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก H ที่คล้ายคลึงกับกรณีของสนามไฟฟ้า E คือ

$$\nabla^2 H = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.89)$$

ค่าเฉลยของสมการนี้จะแสดงถึง H ในรูปของคลื่นสัญจร

จะเห็นได้ชัดว่าการที่จะทำให้เกิดมีความปั่นป่วนทางไฟฟ้าโดยไม่ให้ความปั่นป่วนทางแม่เหล็กเกิดขึ้นด้วยนั้นย่อมเป็นไปไม่ได้ ในทางกลับกันก็เป็นไปไม่ได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ จะพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกคลื่นจะมีส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้า และส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปด้วยกัน ถ้ามีสนามอย่างหนึ่งแต่ไม่มีสนามอีกอย่างหนึ่ง ผลที่เกิดขึ้นก็จะเปรียบได้กับการมีคลื่นน้ำชนิดที่มีการเคลื่อนไหวแต่ไม่มีการเคลื่อนที่ หรือมีการเคลื่อนที่แต่ไม่มีการเคลื่อนไหวนั่นเอง แม้ว่า E และ H จะมีสมการแยกกันอยู่ต่างหากก็ตาม ปริมาณทางกายภาพทั้ง 2 นี้ ก็ไม่ได้เป็นสิ่งที่จะสามารถตัดให้ขาดจากกันได้แต่อย่างใด

การที่เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ รู้ว่าสมการทางแม่เหล็กไฟฟ้าของเขามีค่าเฉลยเป็นคลื่นจรรนั้นเอง ได้เป็นสิ่งที่ทำให้เขาคาดการณ์ล่วงหน้าไว้อย่างน่าสนใจมาก ประการแรกถ้ามีใครสามารถแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่จริงแล้ว ก็เป็นอันตัดสินกันได้ว่าสมมติฐานของแมกซ์เวลล์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการที่กระแสดีสเพลซเมนต์ สามารถสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นได้นั้นเป็นสิ่งที่ถูกต้อง เพราะถ้าไม่มีสมมติฐานดังกล่าวแล้ว ก็ย่อมจะไม่สามารถหาค่าเฉลยออกมาเป็นลักษณะการคลื่นที่แบบคลื่นได้ เหตุการณ์จะเป็นในลักษณะที่คล้ายกับว่ามีทะเลสาบซึ่งเกิดจากน้ำที่มีน้ำหนักแต่ไม่มีมวล ทำให้คลื่นน้ำไม่สามารถเกิดขึ้นได้นั่นเอง

ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่จริง มันก็ควรจะต้องเดินทางไปในอวกาศว่างด้วยความเร็ว C ตามสมการ (2.77) แต่ C เป็นปริมาณที่รู้ค่าคือ สามารถคำนวณค่าของมันออกมาได้จากค่าของ μ_0 และ ϵ_0 ปริมาณทั้ง 2 นี้เป็นค่าคงตัวทางมิติ (dimensional constant) ซึ่งอาจหาค่าได้โดยการวัดทางไฟฟ้าสถิต และแรงทางแม่เหล็ก แมกซ์เวลล์ได้ใช้เครื่องถ่วงน้ำหนักชนิดที่ใช้กระแส (current balance) ซึ่งถูกประดิษฐ์ขึ้นอย่างชาญฉลาดเครื่องหนึ่งสำหรับถ่วงแรงทางแม่เหล็ก และได้ค้นพบในราวปี ค.ศ. 1865 ว่าค่าตัวเลขของ C นั้นต่ำกว่า 3×10^8 เมตรต่อวินาทีเล็กน้อย เมื่อเป็นเช่นนี้ก็อาจสรุปได้ว่าถ้ามีคลื่นไฟฟ้าอยู่จริง มันก็ควรจะเดินทางด้วยอัตราเร็วราวๆ 3×10^8 เมตร หรือ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที

คลื่นไฟฟ้าเกิดมีขึ้นในตัวกลางชนิดใดไหน ในสมัยของแมกซ์เวลล์นั้นได้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าแสงสว่างธรรมดาที่มองเห็นได้ด้วยตาก็คือ ลักษณะการเคลื่อนไหวแบบคลื่นของอีเทอร์ (Ether) ซึ่งยอมให้แสงสว่างผ่านไปได้ อีเทอร์นี้แทรกซึมไปทุกแห่งหนทั้งในอวกาศและในวัสดุทุกอย่าง ตัวมันเองไม่มีน้ำหนักแต่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นอย่างน่าทึ่งซึ่งก็ช่วยในการส่งผ่านคลื่นตามขวางให้เดินทางผ่านมันไปได้ สมการของคลื่นของแมกซ์เวลล์ได้แสดงให้เห็นว่าความปั่นป่วนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปในรูปของคลื่นตามขวางในตัวกลางอย่างอื่น ๆ ที่คล้ายกันนี้ได้เป็นไปได้ใหม่ว่าแสงสว่างก็คือ คลื่นไฟฟ้าอย่างหนึ่งเท่านั้นเอง

ฟาราเดย์ได้คาดการณ์เกี่ยวกับเรื่องนี้เอาไว้เมื่อหลายปีก่อนหน้านั้น และได้ชี้ให้เห็นว่า อีเทอร์ ซึ่งไม่มีขอบเขตจำกัด และซึมซาบไปทั่วทุกแห่งโดยที่ใครๆ ไม่อาจคาดคิดเข้าใจได้นั้นแม้เพียงชนิดเดียวก็ทำให้จินตนาการได้ยากพออยู่แล้ว ถ้ามีอีเทอร์เพิ่มเข้ามาอีกชนิดหนึ่งรวมเป็น 2 ชนิดอยู่ร่วมกัน โดยที่ชนิดหนึ่งเป็นทางผ่านของ แสง และอีกชนิดหนึ่งเป็นทางผ่านของคลื่นไฟฟ้าแล้ว ก็เห็นว่าเกินกว่าที่ใครๆ จะเลื่อมใสศรัทธาได้ ดังนั้นเขาจึงคิดว่าด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เพียงอย่างเดียวก็พอที่จะทำให้เชื่อได้แล้วว่า แสงนั้นก็คือปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งนั่นเอง

แมกซ์เวลล์ได้สรุปผลออกมาเป็นอย่างเดียวกันนี้ แต่ให้เหตุผลที่เป็นแก่นสารดีกว่าของฟาราเดย์ทั้งนี้ก็เพราะว่าเขาได้รวบรวมผลการวัดความเร็วของแสงในสุญญากาศตามที่มีผู้ทดลองอย่างดีที่สุดเอาไว้เป็นอันมาก และเขาได้พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วแสงที่เขารวบรวมไว้นั้นใกล้เคียงกับค่า 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที อย่างน่าประหลาด และค่าดังกล่าวนี้ก็เป็นค่าความเร็วที่เขาเองได้ทำนายเอาไว้สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นไฟฟ้าหลังจากที่เขาได้ทดลองวัดหน่วยทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการแล้ว

เมื่อเป็นเช่นนี้ สมมติฐานของแมกซ์เวลล์ก็นับว่าเป็นสิ่งที่มีสาระ และอย่างน้อยที่สุดมันก็ส่อให้เห็นอยู่เป็นอย่างมากกว่าแสงสว่างนั้นน่าจะเป็นคลื่นไฟฟ้าแบบหนึ่งได้จริง

แม้ว่าแมกซ์เวลล์จะเชื่อในข้อสรุปเหล่านี้ก็ตาม นักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ หลายคนหาได้พลอยเชื่อตามไปด้วยไม่ จนกระทั่งในที่สุดเมื่อ แฮร์ทซ์ (Hertz) ได้แสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่ได้จริงในทางกายภาพ ภายหลังจากนั้นประมาณ 25 ปี แล้วนั่นเอง ข้อสรุปดังกล่าวจึงได้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แฮร์ทซ์ได้แสดงให้เห็นว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่จริง เป็นผลสำเร็จ โดยได้ทดลองให้เห็นถึงการสอดแทรก (interference) การสะท้อน (reflection) และการหักเห (refraction) ของมัน หลังจากนั้นแล้วก็ไม่มีใครคิดสงสัยอีกเลยว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่เคลื่อนที่ไปในลักษณะเดียวกันกับคลื่นธรรมดาทั่วๆ ไป ปัญหาเกี่ยวกับคุณลักษณะของตัวกลางสำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ถ้าหลีกเลี่ยงไม่กล่าวถึงเสียได้ก็จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลอดภัยที่สุด แต่ถ้าจะพยายามกล่าวให้ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ ก็ควรเดินตาม “เงาแห่งการคาดคะเน” ของฟาราเดย์นั่นก็คือ “เลิกคิดเรื่องอีเทอร์เสีย แต่คิดเฉพาะเรื่องการสั่นไหวอย่างเดียวก็พอแล้ว”

2.9 สารกึ่งตัวนำ [7]

สารกึ่งตัวนำ พบว่ามีตัวพาหะนำกระแสไฟฟ้า (Current carrier) ที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารกึ่งตัวนำได้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งๆ อิเล็กตรอนได้รับพลังงาน (มักอยู่ในรูปของความร้อน) อย่างน้อยเท่ากับ 1 eV จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เป็นสื่อนำไฟฟ้าที่อยู่ในสนามไฟฟ้า ถ้าเป็นพจนานุกรมฉบับไทย-อังกฤษ จะพบว่า Dielectric materials หมายถึง วัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้า อาจมีผู้กล่าวว่าวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าก็คือ พวกฉนวนทั้งหลายนั่นเอง ฉนวนบางชนิดก็เป็นสื่อนำไฟฟ้าที่เลวก็คือ นำกระแสไฟฟ้าได้บ้าง แต่ไม่ดีเท่าวัสดุสื่อนำไฟฟ้าทั้งหลาย ซึ่งถ้าเป็นการกล่าวโดยกว้างๆ ก็น่าจะถูกต้อง แต่ในด้านการนำไปใช้งานทางด้านไฟฟ้าแล้ว มักจะเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าเสียมากกว่า อีกประการหนึ่งมีการกำหนดค่าของวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าว่ามีค่าเท่าไร หนึ่งสมการของวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้างกล่าวคือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.90)$$

เมื่อ ϵ_0 = permittivity of free space

$$\text{ซึ่งมีค่าเท่ากับ } 8.854 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$$

ϵ_r = ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นสื่อนำไฟฟ้า (dielectric constant)

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

ปริญญานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึง รายละเอียดของกรณีศึกษาที่เป็นสาย CV12/20(24) kV และการจำลองพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL 3.3 ตลอดจนการออกแบบการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.2 ความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดิน

ความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดินมีหลายสาเหตุเช่น การลัดวงจรเนื่องจาก ฉนวนไฟฟ้าได้รับความเสียหาย หรือมีค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าในฉนวนมากกว่าค่า ความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ฉนวนจะทนได้จนทำให้เกิดการเบรกดาว์น ทำให้ฉนวนเสีย สภาพจนเกิดการลัดวงจร หรือเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ในบริเวณที่มีค่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงในเนื้อฉนวน ในการดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้ง จะมีพลังงานถ่ายเท ให้กับฉนวน มีการชนกระแทกของประจุกับฉนวนทำให้เกิดความร้อนขึ้นในฉนวน จนก่อให้เกิด ความเสียหายตามมาไม่ว่าจะเป็นการไหม้ในเนื้อฉนวน และอาจนำไปสู่การเสียหายของฉนวน โดยถาวร

ในขั้นตอนการผลิต ถ้ามีสิ่งสกปรกเจือปน มีฟองอากาศ หรือ Water tree ใน ฉนวน ก็เป็นสาเหตุให้เกิดเบรกดาว์น หรือดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้

ในขั้นตอนการวางลากสาย การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินในท่อที่มีความโค้งอาจทำ ให้เกิดแรงเฉือนที่เปลือกเข้าไปที่ชั้น Insulation screen และชั้นฉนวน ซึ่งป็นผลให้ฉนวนของ สายเคเบิลใต้ดินยุบตัวได้ หรือสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกลากในท่อ อาจทำให้ชั้นตัวกันโลหะกดทับ ฉีกขาด แล้วเฉือนเข้าไปถึงชั้น insulation screen และชั้นฉนวนได้ นอกจากนี้ในบริเวณที่มีการ ฉีกขาดนี้ อาจเกิดช่องว่าง (Gap) ขึ้นได้ ทำให้มีแรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อมระหว่างช่องว่างนี้ได้ นำไปสู่การเบรกดาว์นข้ามช่องว่างดังกล่าว

ในขั้นตอนการทดสอบ DC HI-POT แล้วทำการดิสชาร์จประจุไม่หมด หรือมี ประจุค้างในสายเคเบิล เมื่อนำมาทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปอาจทำให้เกิดการ เบรกดาว์นในทันทีได้ เพราะโดยปกติการดิสชาร์จจะต้องใช้เวลานาน และถูกต้อง ซึ่งต้อง คำนึงถึง และระมัดระวังด้วย

3.3 การวิเคราะห์สาเหตุความเสียหายของสายเคเบิลใต้ดิน

3.3.1 ปัญหาที่พบ ได้แก่

- 1 สายเคเบิลใต้ดินเกิดการเบรกดาวน์หลังทดลองใช้กับระบบ 24 kV
- 2 สายเคเบิลใต้ดินเกิดไหม้บริเวณเปลือกเข้าไปยังชั้นฉนวน แต่ไม่ถึงชั้นทองแดงหลังทดลองใช้กับระบบ 24 kV

3.3.2 วิเคราะห์หาสาเหตุ ดังนี้

- 1 เกิดจากเคเบิล
- 2 เกิดจากการติดตั้งลากสายเคเบิล

3.3.3 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดิน

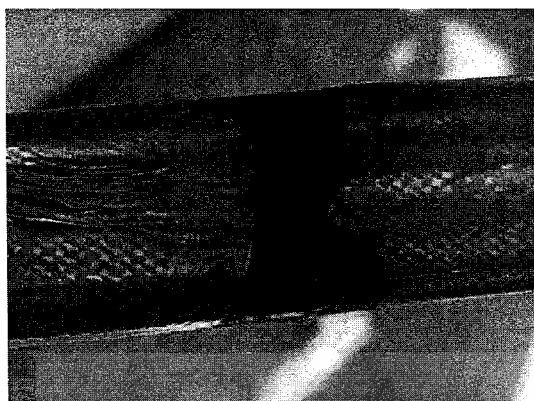


ภาพที่ 3.1 รอยยุบตัวที่ชั้น PVC

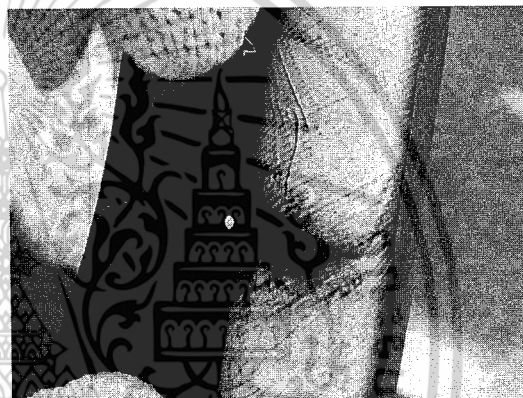


ภาพที่ 3.2 รอยยุบตัวที่ชั้น XLPE

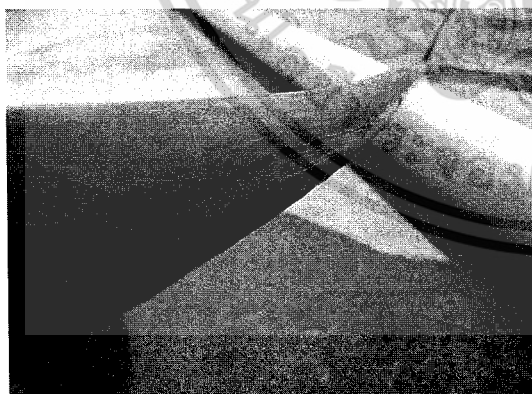
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 ลักษณะการแตกของกราวด์ของสายเคเบิล



ภาพที่ 3.4 ลักษณะเคเบิลที่มีรูทะลุจนทำให้ชั้นกราวด์ได้รับความเสียหาย

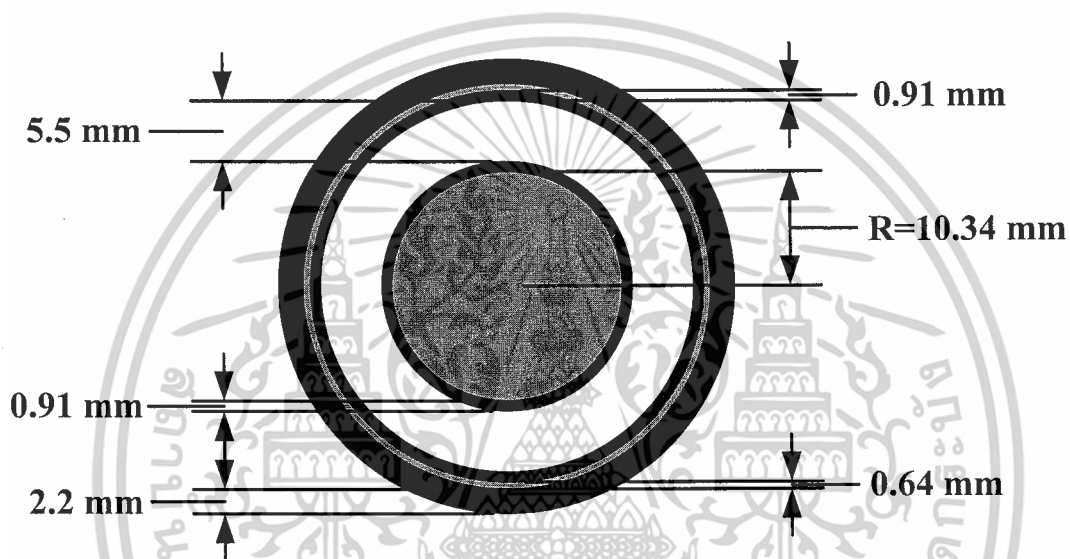


ภาพที่ 3.5 ลักษณะเคเบิลที่มีผิวแจ็คเก็ต (PVC) ถลอกเป็นแนวยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษา สายเคเบิล CV12/20(24) kV 300 mm² เกิดการเบรกดาวน
สายเคเบิลนี้มีลักษณะจำเพาะ ดังนี้

1 Conductor หน้าตัด 300 mm ² รัศมีเท่ากับ	10.34	mm
2 Thickness of Conductor Screen	0.91	mm
3 Thickness of Insulation	5.5	mm
4 Thickness of Insulation Screen	0.91	mm
5 Thickness of Metallic Shield	0.64	mm
6 Thickness of Outer Sheath	2.2	mm



ภาพที่ 3.6 ลักษณะจำเพาะของสายเคเบิล CV12/20(24) kV 300 mm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1 วาดรูปจำลองสายเคเบิล ด้านหน้าตัดของสายเคเบิลด้วยโปรแกรม AutoCAD กำหนดให้สายเคเบิลมีขนาด (Dimensions) ดังภาพที่ 3.1 บันทึกเป็นนามสกุล .dxf

2 เปิดโปรแกรม Comsol 3.3 เลือกการวิเคราะห์แบบ 2D -> AC/DC Module -> Statics -> Electrostatics ดังภาพที่ 3.7

3 เปิดรูปจำลองสายเคเบิล โดยเลือก file -> Import -> CAD Data from file... และกำหนดค่า CAD Import Options ดังภาพที่ 3.8

4 กำหนดค่า Subdomain settings โดยเลือก Physics -> Subdomain settings จะปรากฏหน้าต่าง ดังภาพที่ 3.9 กำหนดค่าต่างๆ ตามความต้องการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

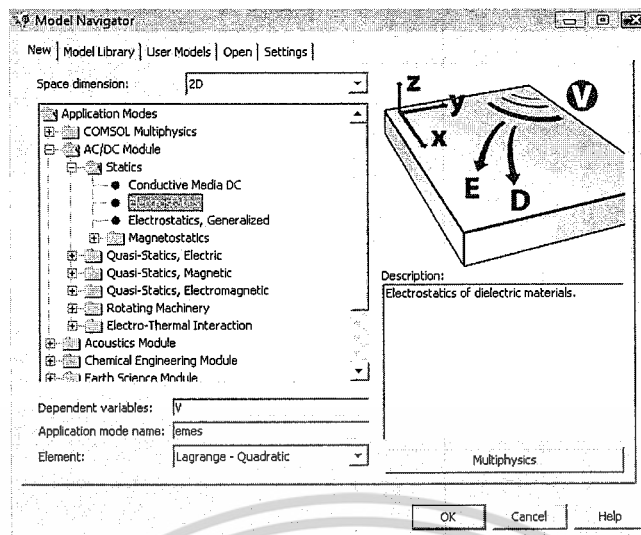
5 กำหนดค่า Boundary settings โดยเลือก Physics -> Boundary settings จะปรากฏหน้าต่าง ดังภาพที่ 3.10 กำหนดค่าต่างๆ ตามความต้องการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

6 แบ่งรูปจำลองสายเคเบิลออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยเลือก Mesh -> Initialize Mesh จะได้ ดังภาพที่ 3.11 ความละเอียดของรูปจำลองขึ้นอยู่กับความต้องการ ซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้า

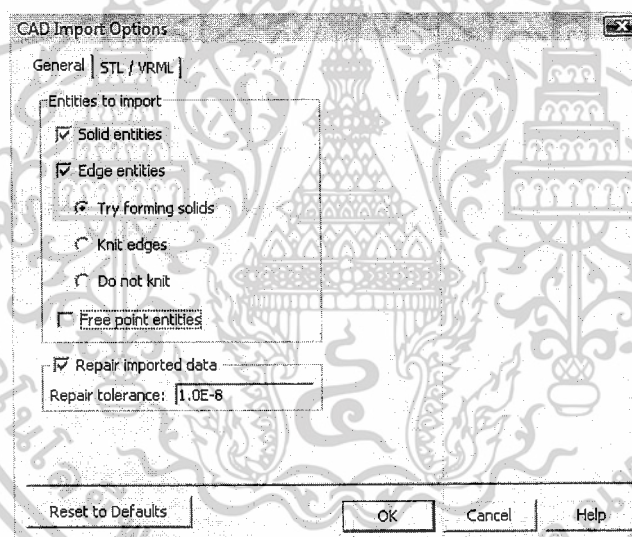
7 วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้า โดยเลือก Solve -> Solve Problem ผลการวิเคราะห์ที่แสดงออกมาสามารถกำหนดได้ตามความต้องการ ดังภาพที่ 3.12 โดยเลือก Postprocessing -> Plot Parameters... ดังภาพที่ 3.13

วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามวิธีการข้างต้น แบ่งเป็นกรณีศึกษา 5 กรณี ดังนี้

- สายเคเบิลปกติ
- สายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน
- สายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย
- สายเคเบิลที่มีแจ็คเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์
- สายเคเบิลที่มีแจ็คเกิดถลอก

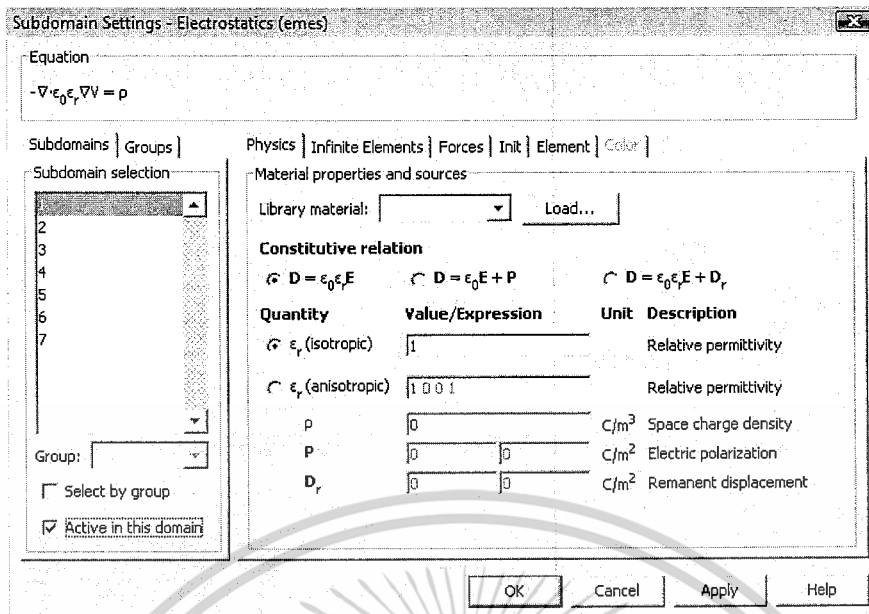


ภาพที่ 3.7 Model Navigator Window

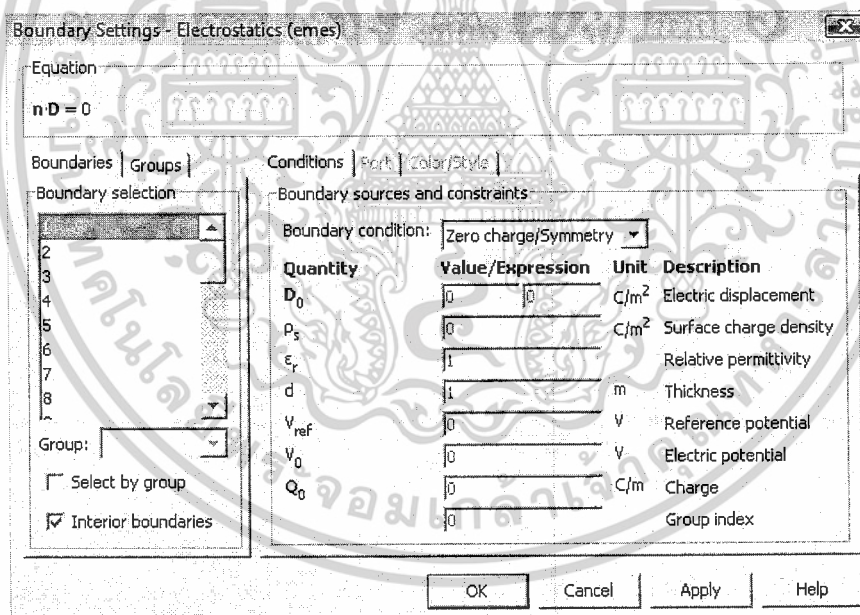


ภาพที่ 3.8 CAD Import Options Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

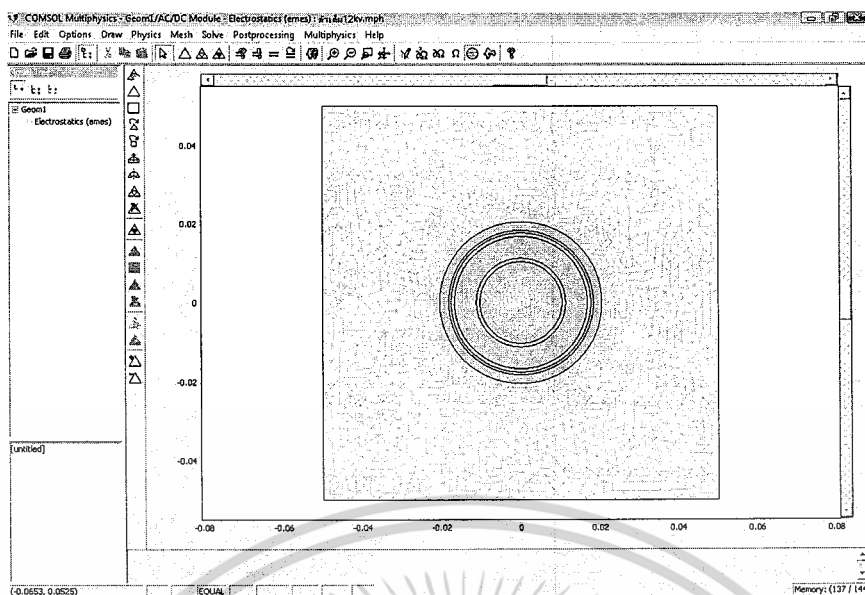


ภาพที่ 3.9 Subdomain settings Window

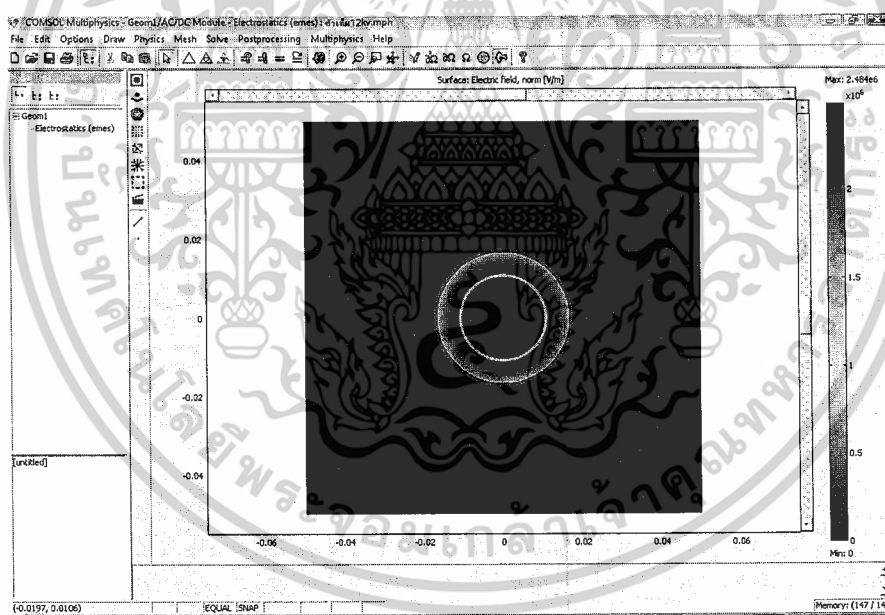


ภาพที่ 3.10 Boundary settings Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

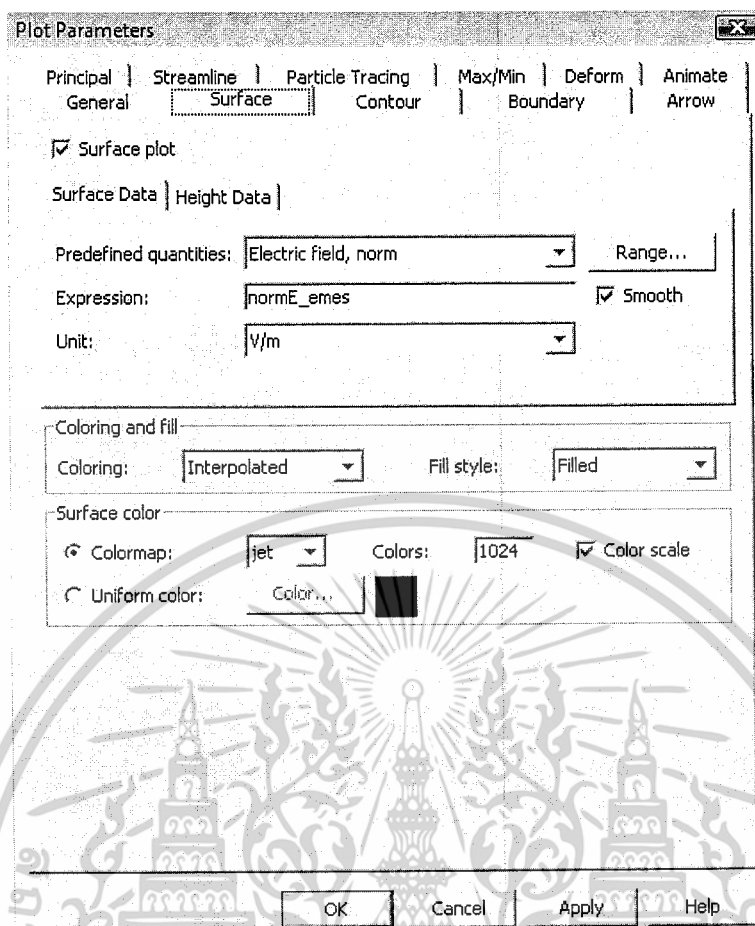


ภาพที่ 3.11 Initialize Mesh Window



ภาพที่ 3.12 Solve Problem Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 Plot Parameters Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบการทดลองทางไฟฟ้า

ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จากการค้นคว้าหาข้อมูลความเสียหายของสายเคเบิลที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายสาเหตุด้วยกันเช่น เกิดจากสายเคเบิลมีการยุบตัว หรือกราวด์ของสายเคเบิลได้รับความเสียหาย หรือชั้น Jacket ได้รับความเสียหาย แต่ในที่นี้จะออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาจากปัญหาที่พบคือ สายเกิดการเบรกดาวน์หลังจากการติดตั้ง และหลังจากการใช้งานโดยสายเคเบิลเกิดการเบรกดาวน์เนื่องจากกราวด์ของสายเคเบิลขาดออกจากกันรอบวงและจากการตรวจสอบหลังเกิดความเสียหายของสายเคเบิลที่เกิดขึ้นพบว่าชั้น Copper Tape Shield มีรอยแตกจึงมีการสมมติฐานว่าอาจจะเกิดจากการแรงดันเหนี่ยวนำ จากตัวนำถึงชั้น Copper Tape Shield ที่มีรอยแตก จึงสนใจกรณีนี้ได้ทำการทดลองดูว่ามีการแรงดันเหนี่ยวนำ จากตัวนำถึงชั้น Copper Tape Shield ที่มีรอยแตกหรือไม่และส่งผลให้สายเคเบิลเกิดการเบรกดาวน์หรือไม่

3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

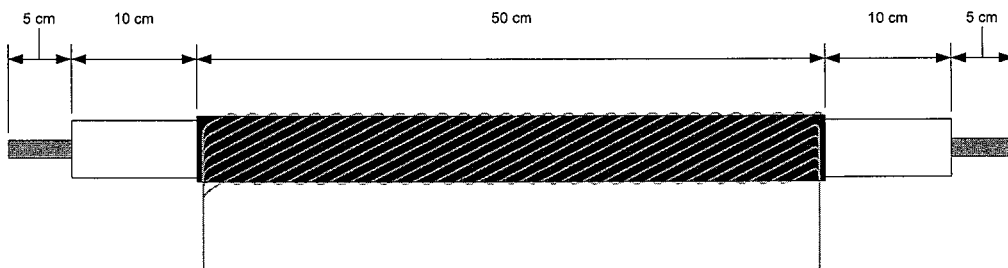
- 1 สายเคเบิล CV12/20(24) kV
- 2 หม้อแปลงแรงดันทดสอบ พิกัด 100 kV 50mA
- 3 หม้อแปลงกระแสทดสอบ พิกัด 10 kVA
- 4 ชุดควบคุมหม้อแปลง (Variac)
- 5 ตัวต้านทานน้ำ 157 กิโลโอห์ม
- 6 โวลต์เตจดีไวเดอร์ 1:1001
- 7 โวลต์มิเตอร์ Fluke
- 8 แอมป์มิเตอร์ Fluke
- 9 สายโคแอกเชียล RG-8
- 10 อุปกรณ์ประกอบการทดลองอื่นๆ

3.5.2 เตรียมสายเคเบิล

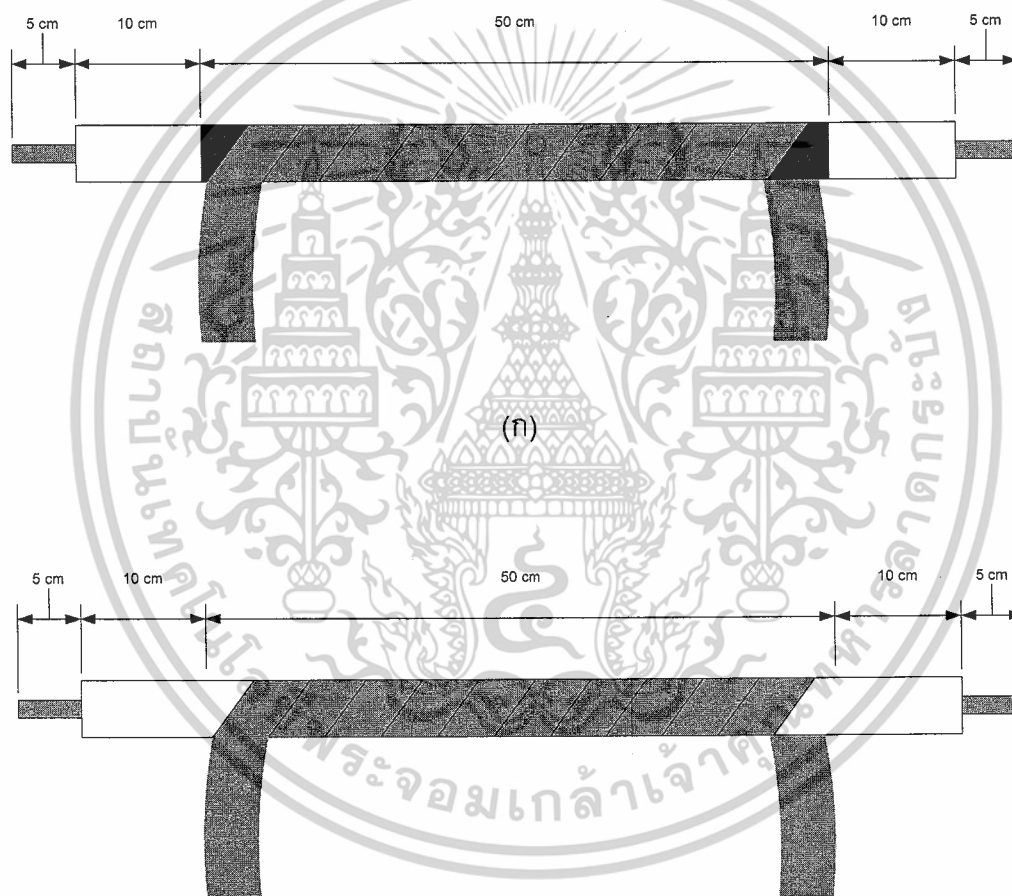
1 สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. ชนิดที่มีชั้นตัวกันโลหะแบบ Copper Wire ความยาว 80 เซนติเมตร โดยปอกชั้นฉนวนออกทั้งหมด รวบ Copper Wire เก็บไว้ใช้ แล้วปอกชั้น Insulation Screen (Semi) ยาว 15 เซนติเมตร สุดท้ายปอกชั้นฉนวน (XLPE) ยาว 5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.14

2 สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. ชนิดที่มีชั้นตัวกันโลหะแบบ Copper Tape ความยาว 80 เซนติเมตร โดยปอกชั้นฉนวนออกทั้งหมด แล้วปอกชั้น Insulation Screen (Semi) ยาว 15 เซนติเมตร สุดท้ายปอกชั้นฉนวน (XLPE) ยาว 5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.15(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.14 สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper wire
ที่ใช้ในการทดลอง

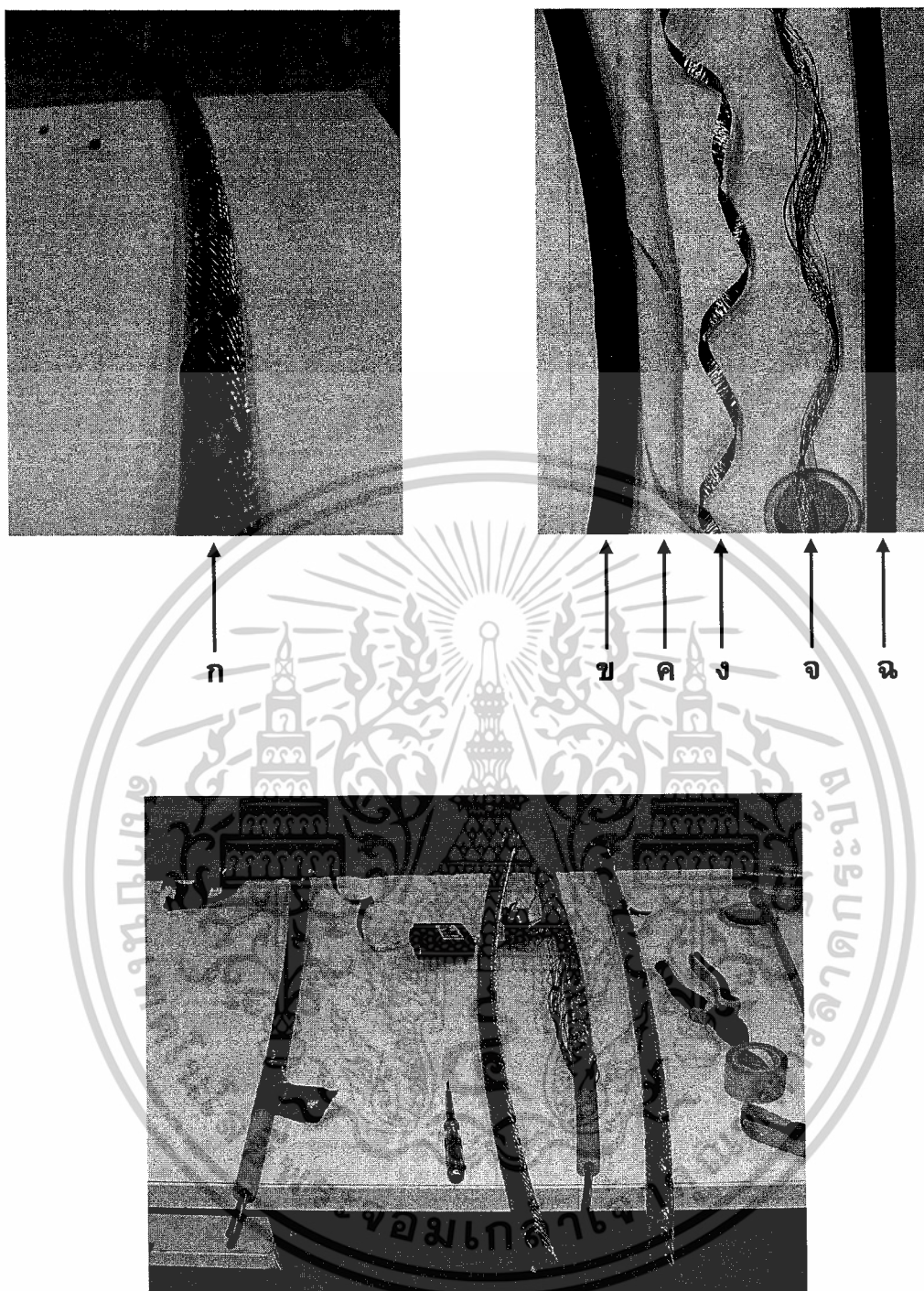


(ข)

ภาพที่ 3.15(ก) สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper tape
มี Insulation Screen ที่ใช้ในการทดลอง

(ข) สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. แบบ Copper tape
ไม่มี Insulation Screen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.16 สายเคเบิล CV12/20(24) kV 35 sq.mm. ที่ใช้ในการทดลอง

ก. สายเคเบิลที่ปกชั้นเปลือกนอกแล้ว

ข. Jacket

ค. Separate Tape

ง. Copper Contact Tape

จ. Copper Wire Shield

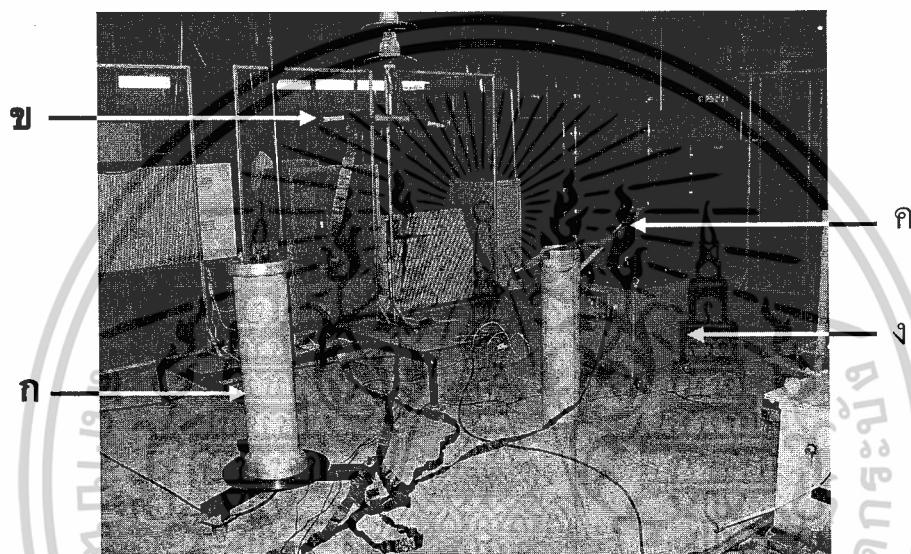
ฉ. สายเคเบิลที่ถูกปกจนถึงชั้นตัวกันโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การออกแบบการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบการวัดแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาสู่ชั้นกราวด์ จะใช้โวลต์เตจติไวเตอร์มาวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ชั้นตัวกันโลหะ

ใช้หม้อแปลงแรงดันทดสอบพิกัด 100 kV ต้องวงจรผ่านตัวต้านทานน้ำ เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะไหลเข้าสู่หม้อแปลงขณะเกิดเบรกดาวน์ การวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่ชั้นตัวกันโลหะ จะวัดใช้โวลต์เตจติไวเตอร์ลดทอนแรงดัน แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันเหนี่ยวนำดังภาพที่ 3.17



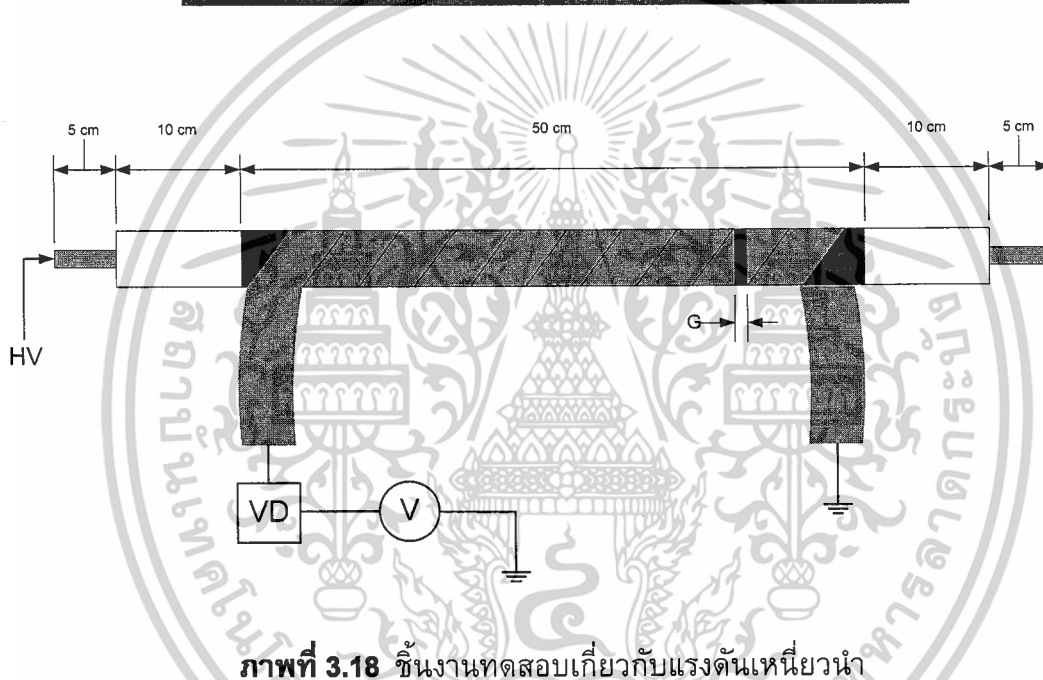
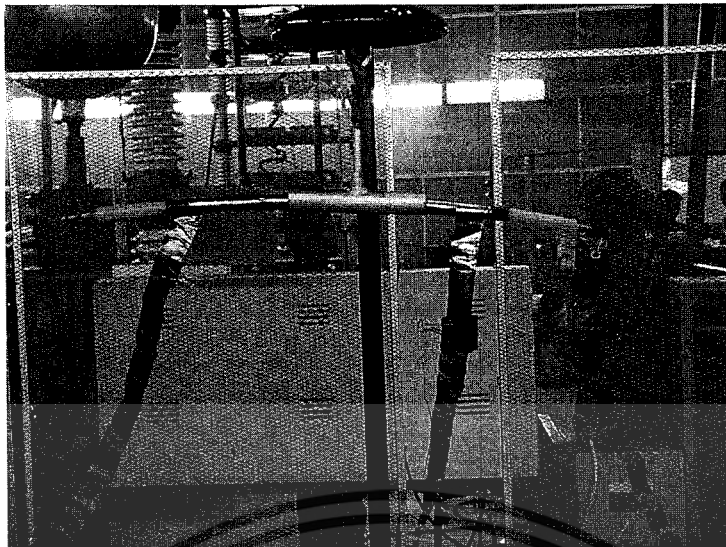
ภาพที่ 3.17 การจัดการทดลองเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำ

ก. โวลต์เตจติไวเตอร์ 1:1001

ข. ชั้นงานทดสอบ

ค. ตัวต้านทานน้ำ 157 กิโลโอห์ม

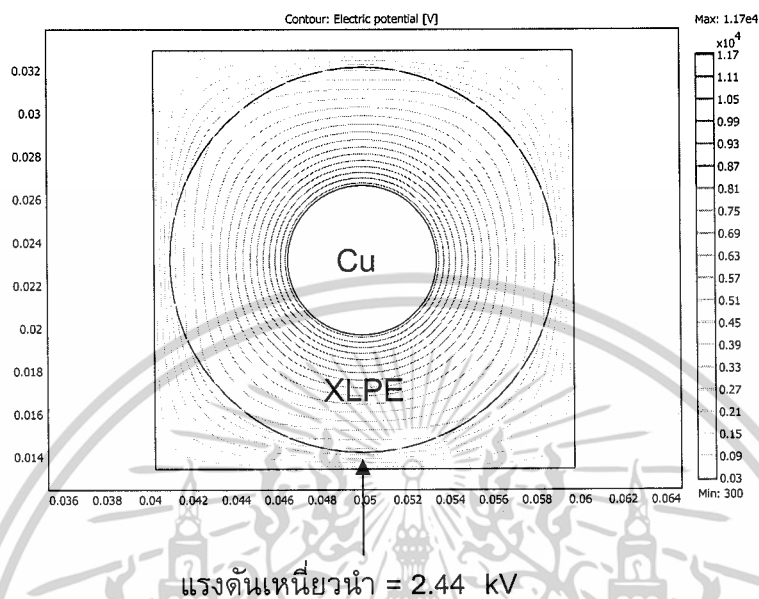
ง. หม้อแปลงแรงดันทดสอบ พิกัด 100 kV 50mA



ภาพที่ 3.18 ชิ้นงานทดสอบเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำ

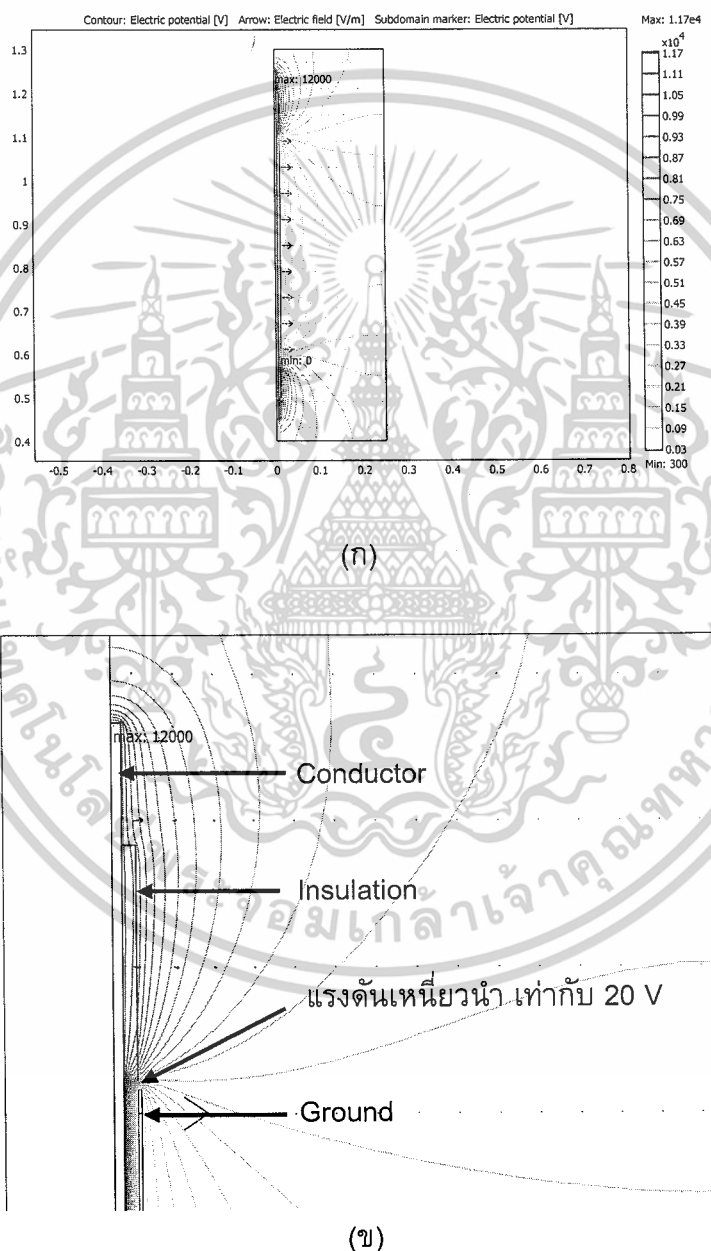
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม COMSOL 3.3 เพื่อดูว่ามีแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์ พบว่ามีแรงดันเหนี่ยวนำที่ชั้นฉนวน 2.44 kV ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 แรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์ โดยมี Conductor >> Insulation

ในการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์ของสายเคเบิลใต้ดิน จะมีแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านอากาศมาที่ชั้นกราวด์ จึงทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้จึงได้มีการจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม COMSOL 3.3 เพื่อดูว่ามีแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านอากาศมาที่ชั้นกราวด์ มีค่าเท่าไร และมีผลต่อการทดลองหรือไม่ และจากการจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม COMSOL 3.3 พบว่ามีแรงดันเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านอากาศมาที่ชั้นกราวด์ ดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20(ก) ผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำผ่านอากาศมาที่ชั้นกราวด์

(ข) ภาพขยายผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่ชั้นกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

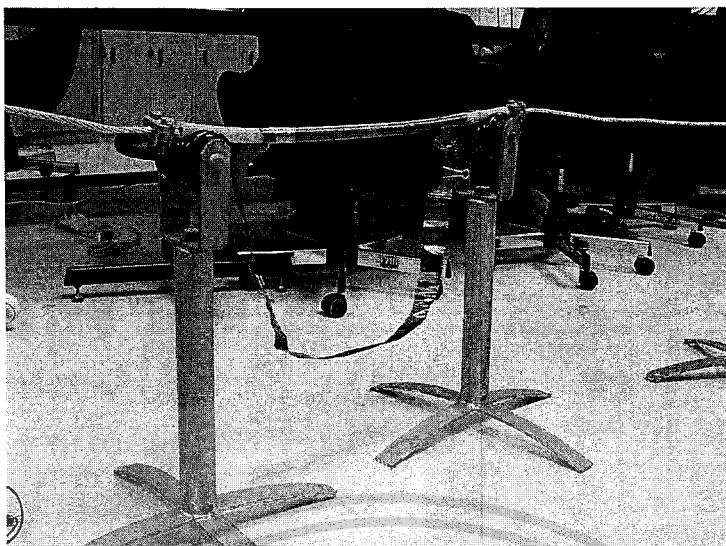
3.5.4 การออกแบบการวัดกระแสเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบการตรวจวัดกระแสเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาสู่ชั้นกราวด์ โดยใช้แคลมป์วัดกระแสที่ชั้นกราวด์ เพื่อดูว่ามีกระแสเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์เท่าไร

ในการออกแบบการวัดกระแสเหนี่ยวนำจากตัวนำผ่านฉนวนมาที่ชั้นกราวด์จะต้องมีเครื่องกำเนิดกระแสเพื่อจ่ายกระแสให้สายเคเบิล โดยในการทดลองใช้เครื่องกำเนิดกระแส ปรับกระแสโดยใช้ Variac และจำลองว่าสายเคเบิลชั้นกราวด์แตกแล้วนำแคลมป์วัดกระแสมาวัดกระแสเหนี่ยวนำที่ชั้นกราวด์ ดังภาพที่ 3.21, 3.22, 3.23



ภาพที่ 3.21 การจัดการทดลองเกี่ยวกับกระแสเหนี่ยวนำ
ก แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (หม้อแปลงกระแส)
ข ชั้นงานทดสอบ



ภาพที่ 3.22 ชิ้นงานทดลองเกี่ยวกับกระแสเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3.23 แคลมป์วัดค่ากระแสเหนี่ยวนำ

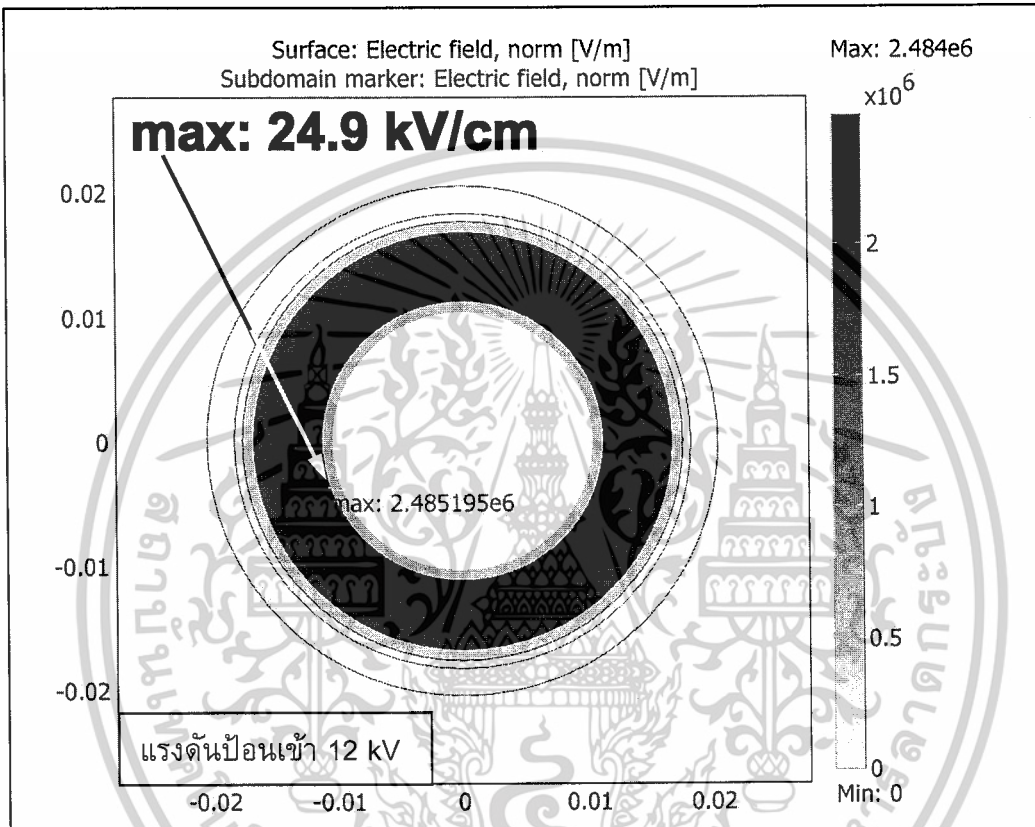
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

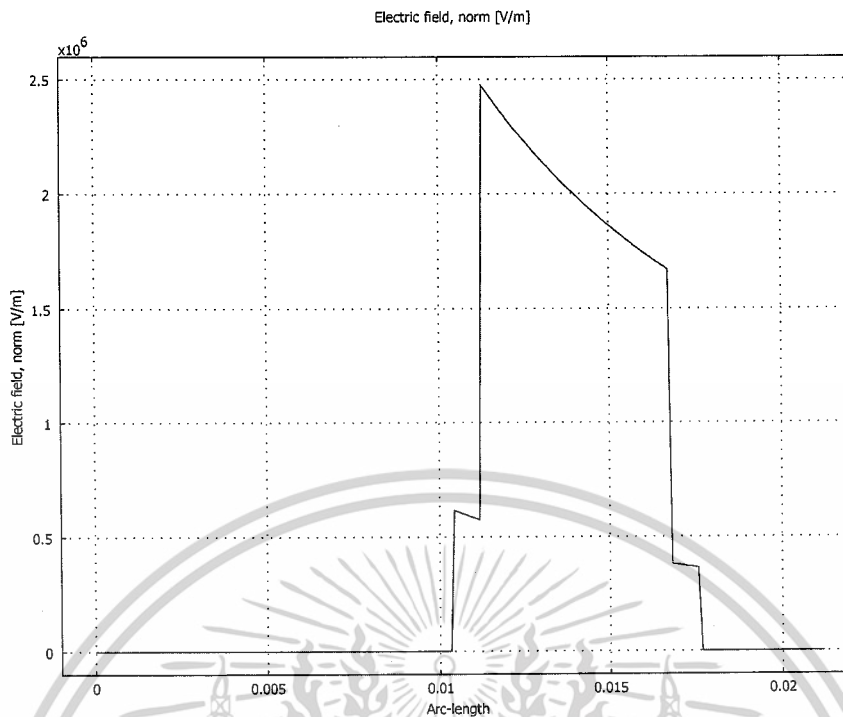
ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1.1 สายเคเบิลปกติ



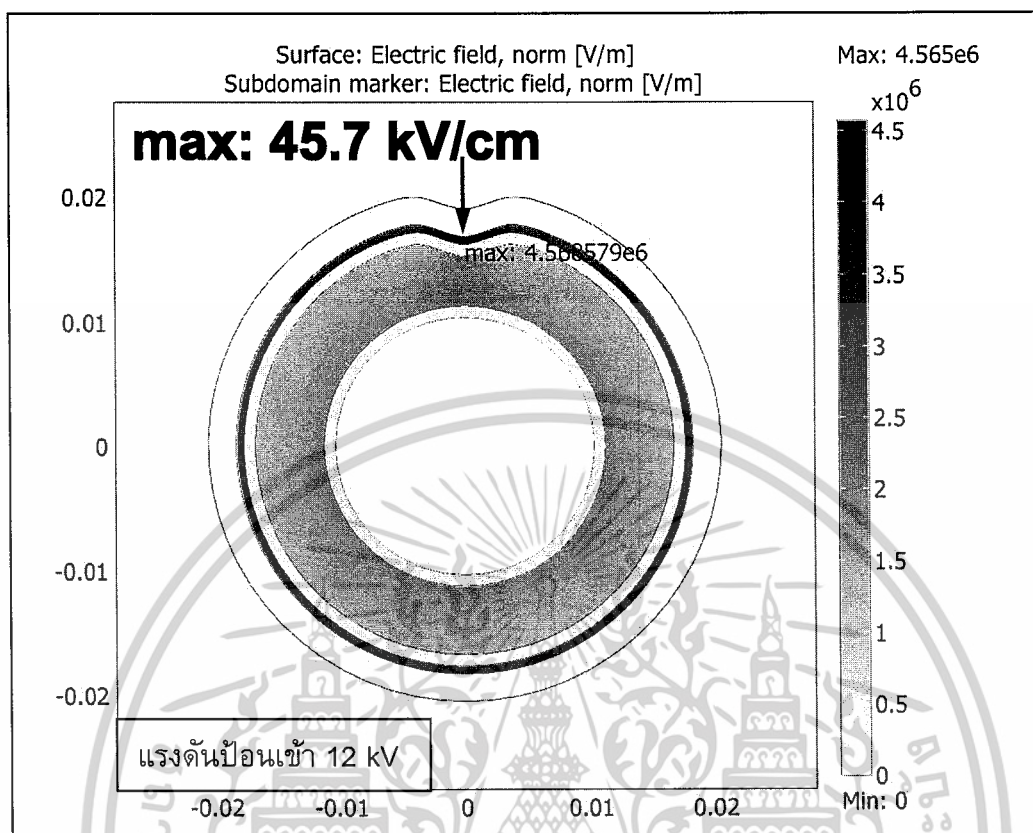
ภาพที่ 4.1 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินปกติ



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน

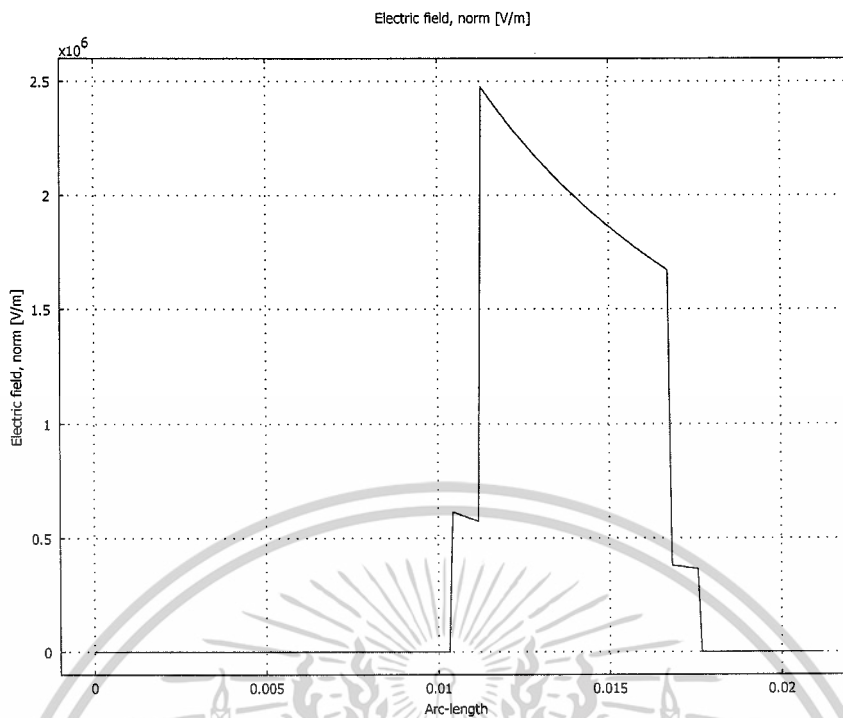


ภาพที่ 4.3 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน

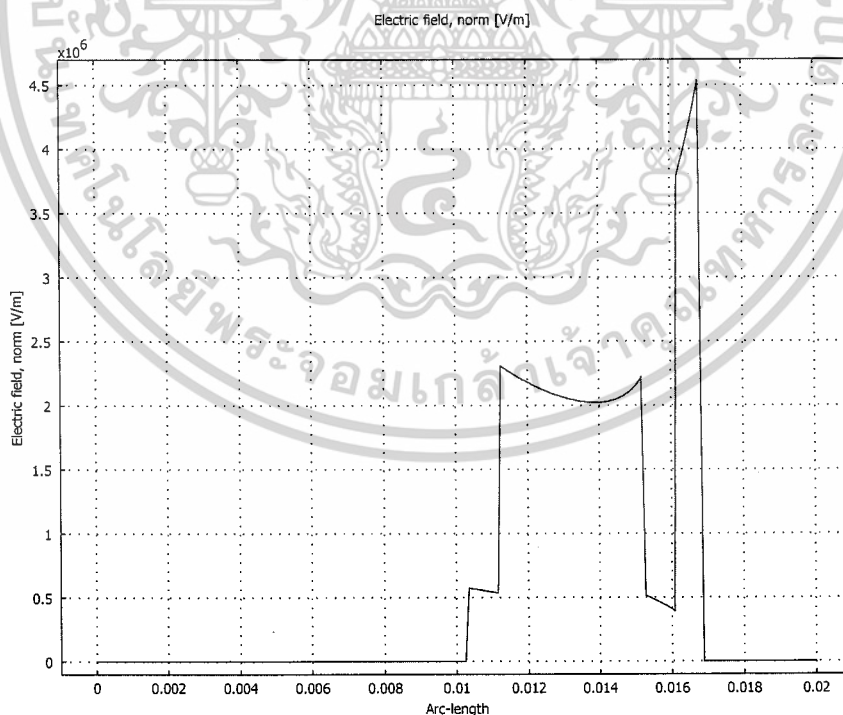


ภาพที่ 4.4 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีการยุบตัวในชั้นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



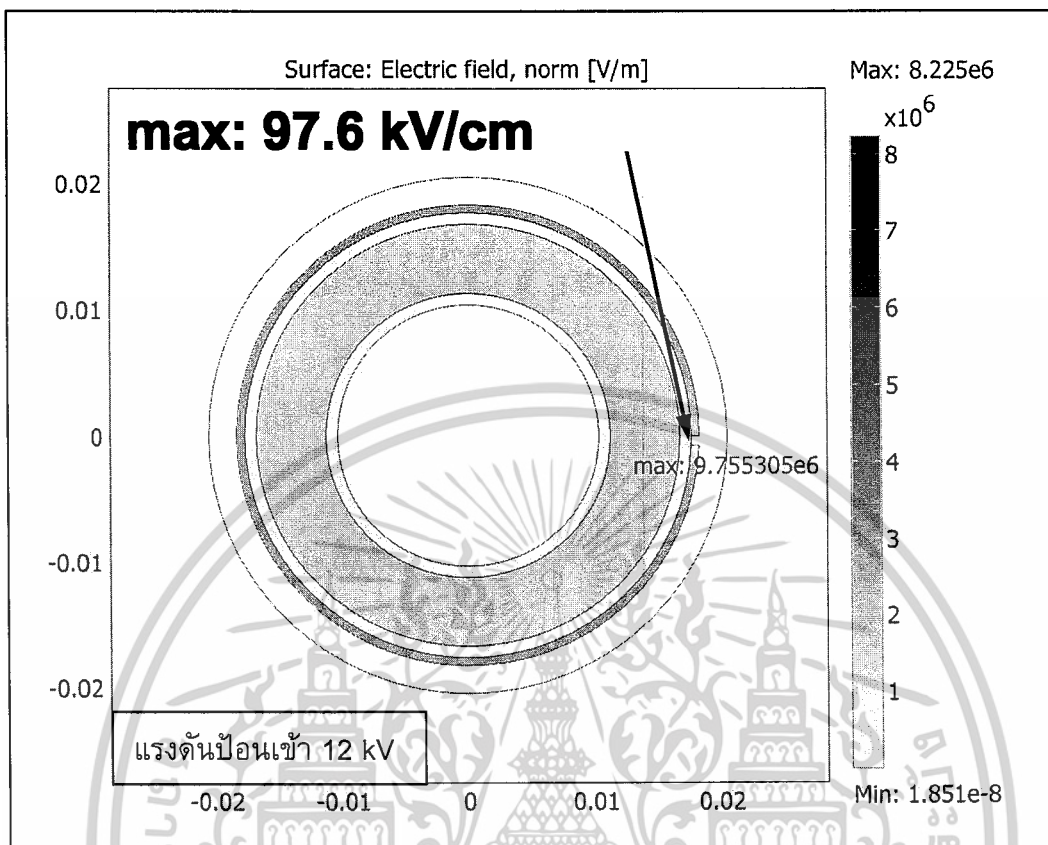
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ



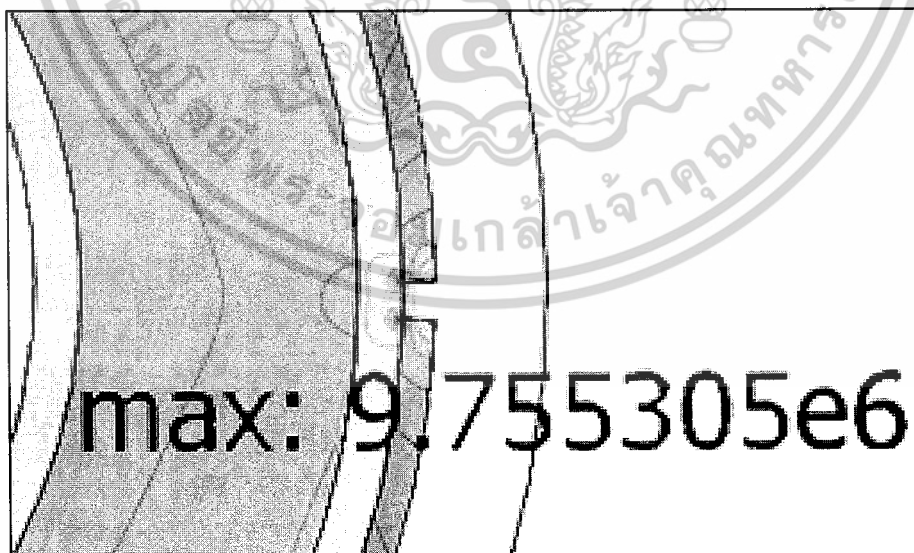
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีการยวบตัวในชั้นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย

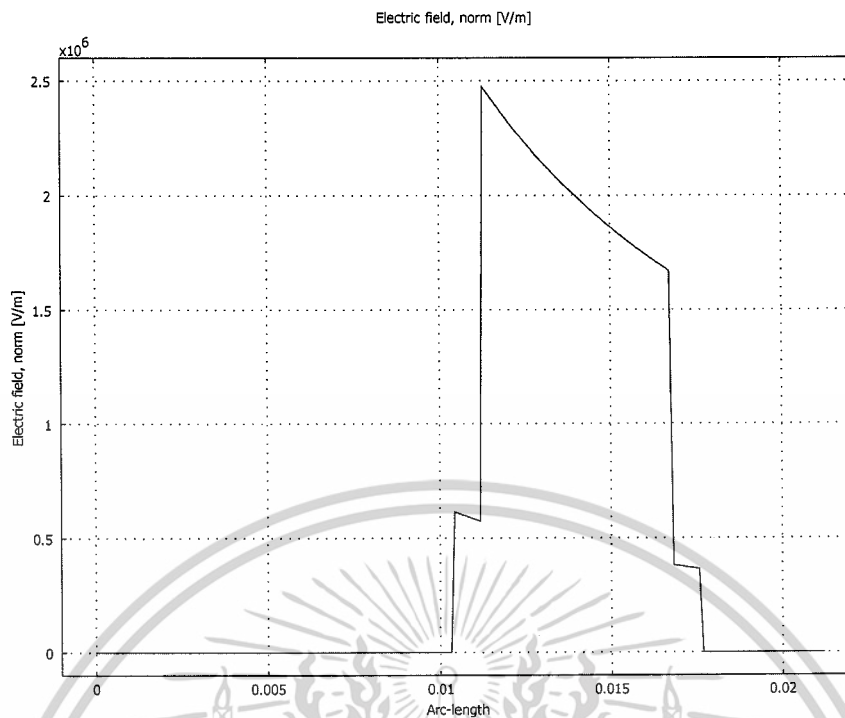


ภาพที่ 4.7 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย

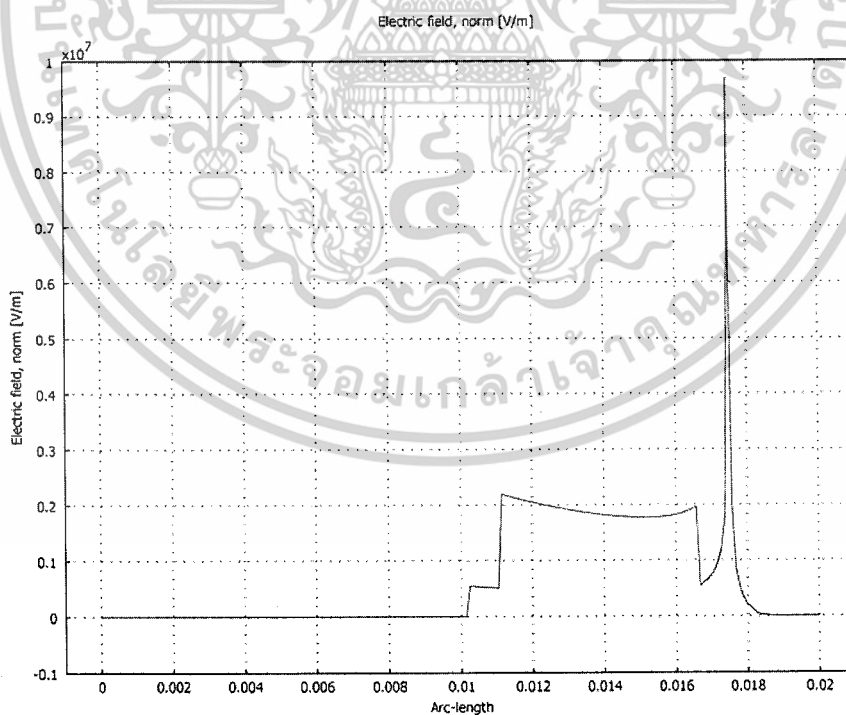


ภาพที่ 4.8 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่มีกราวด์แตกเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



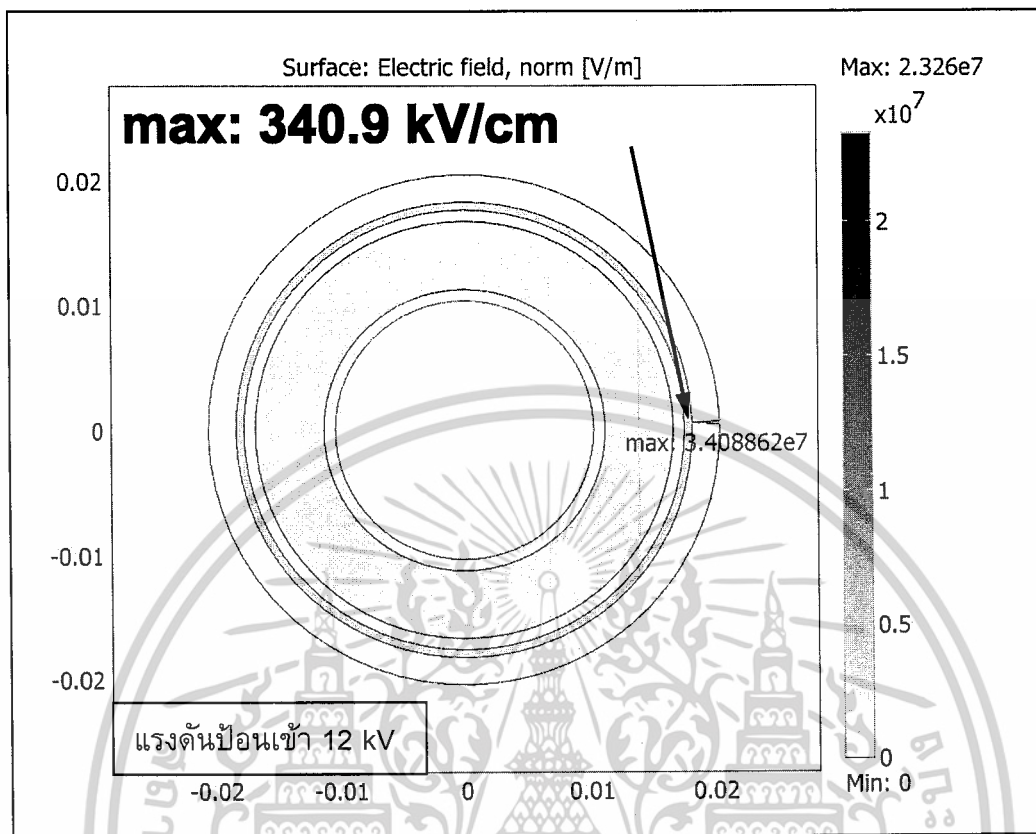
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ



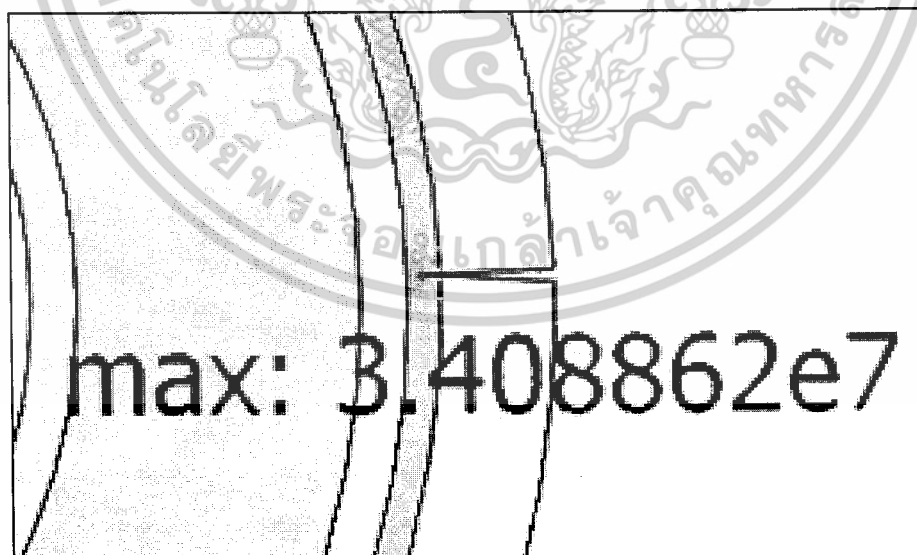
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีกรวดแตกเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 สายเคเบิลที่มีแจ็คเก็ตทะลุถึงชั้นกราวด์

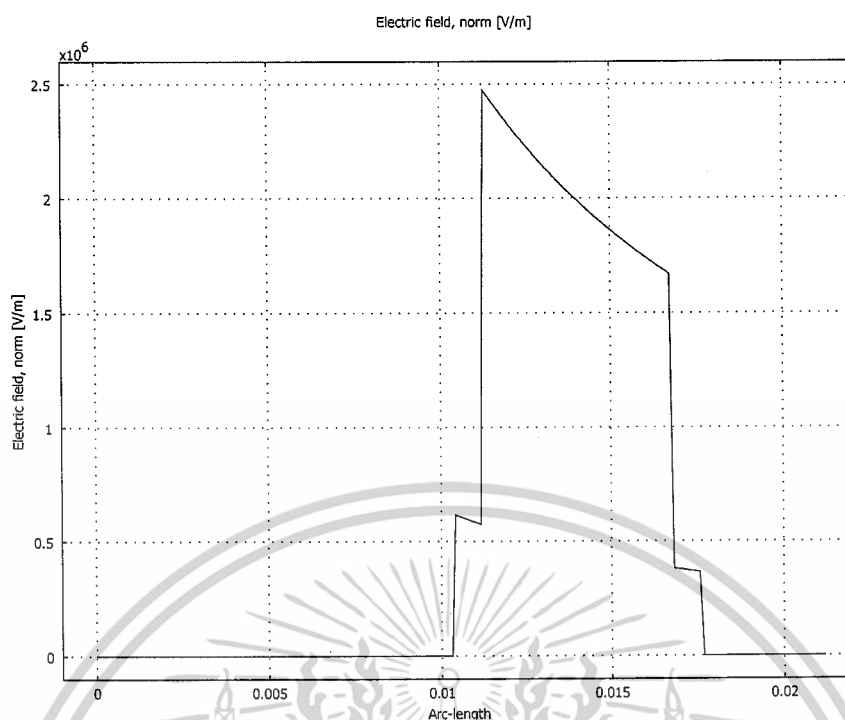


ภาพที่ 4.11 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แจ็คเก็ตทะลุถึงชั้นกราวด์

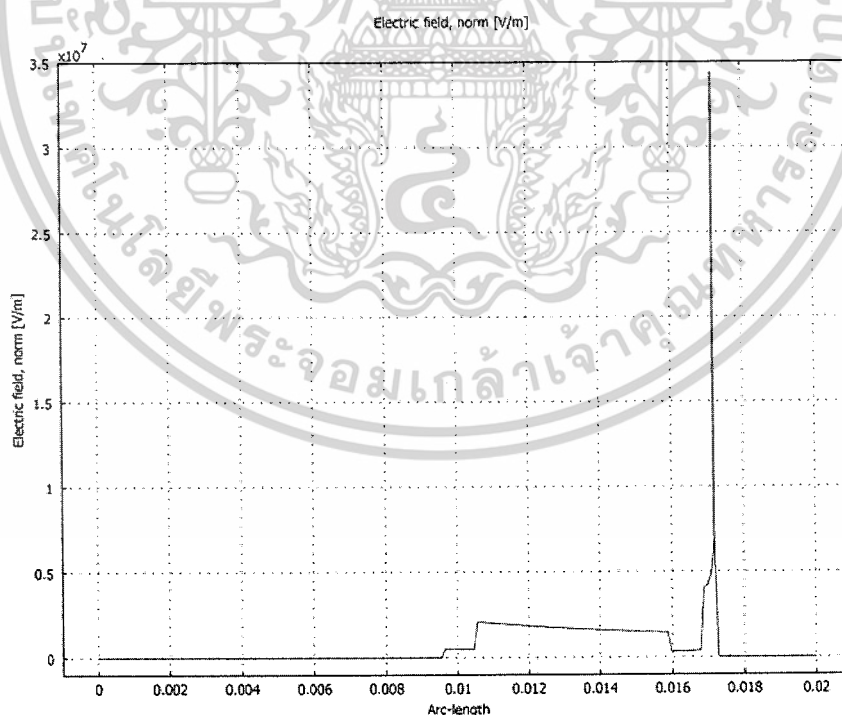


ภาพที่ 4.12 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แจ็คเก็ตทะลุถึงชั้นกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ



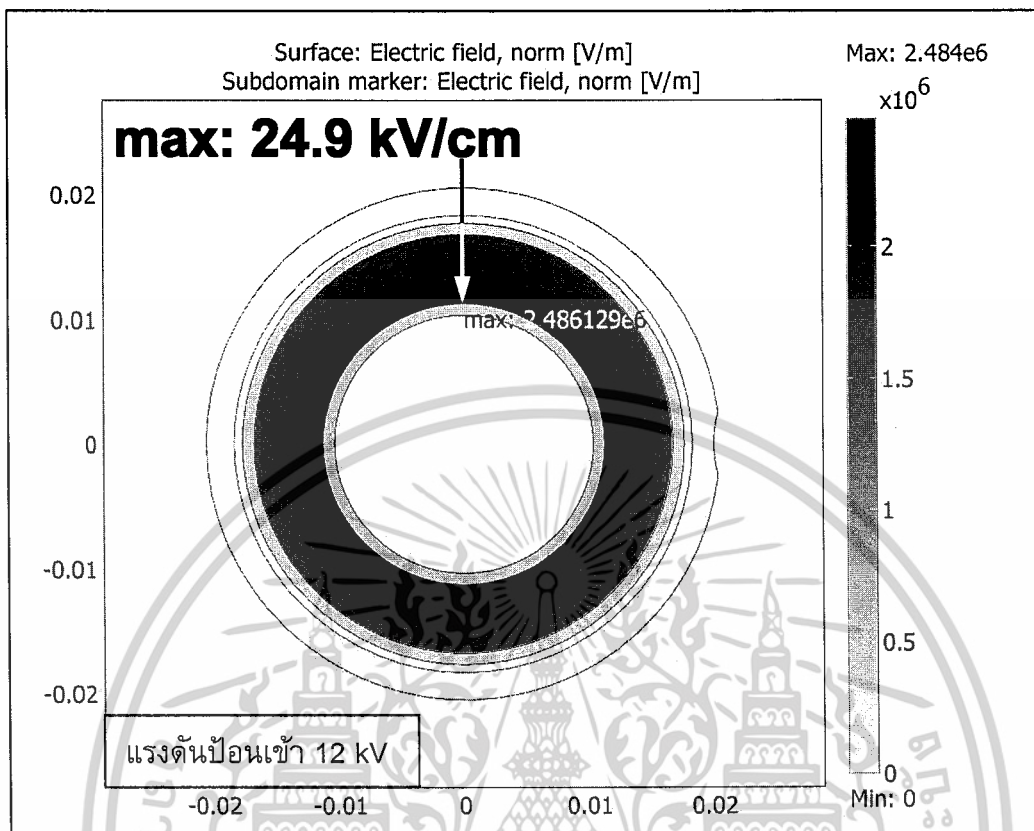
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ

รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีแฉกเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์

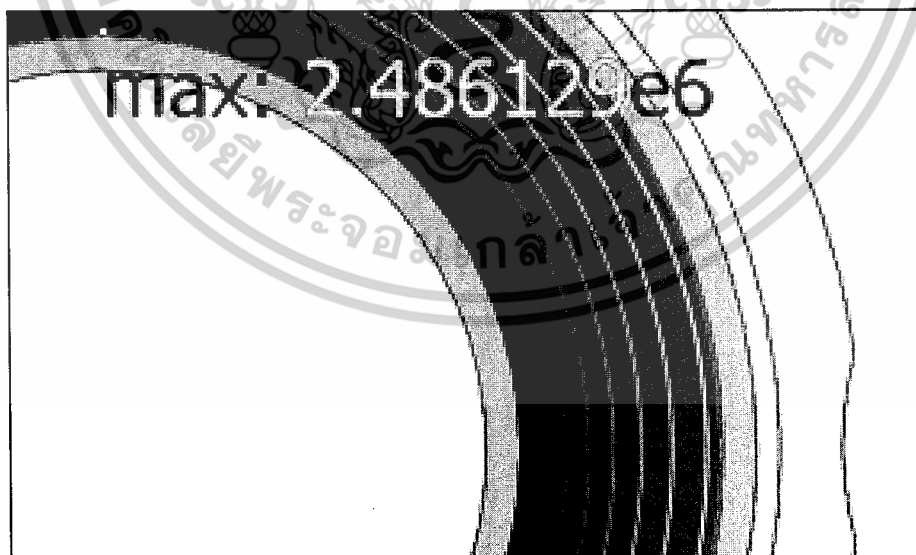
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สายเคเบิลที่มีแจ็คเก็ตถลอก

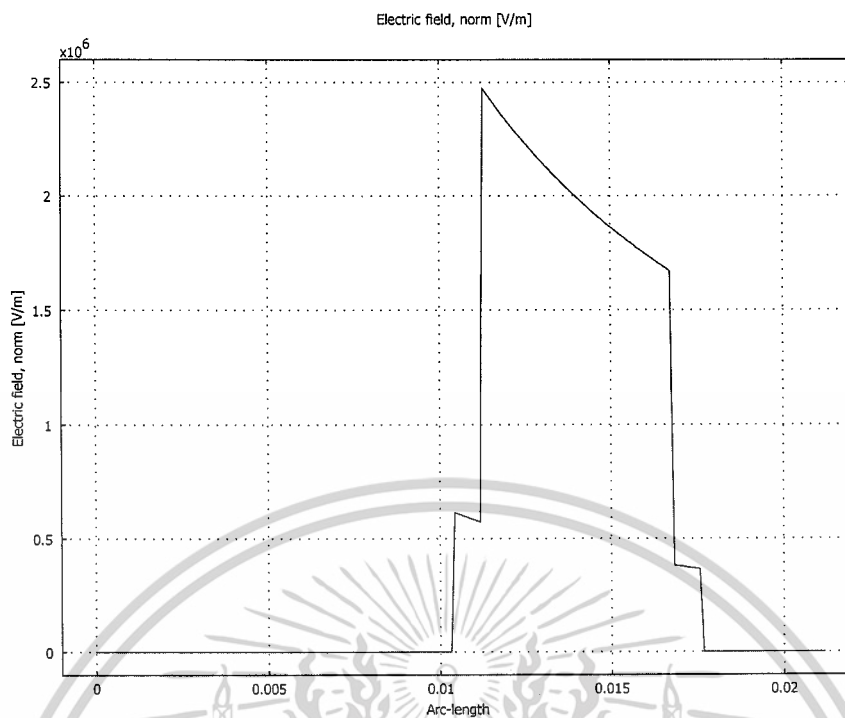


ภาพที่ 4.15 การกระจายสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แจ็คเก็ตถลอก

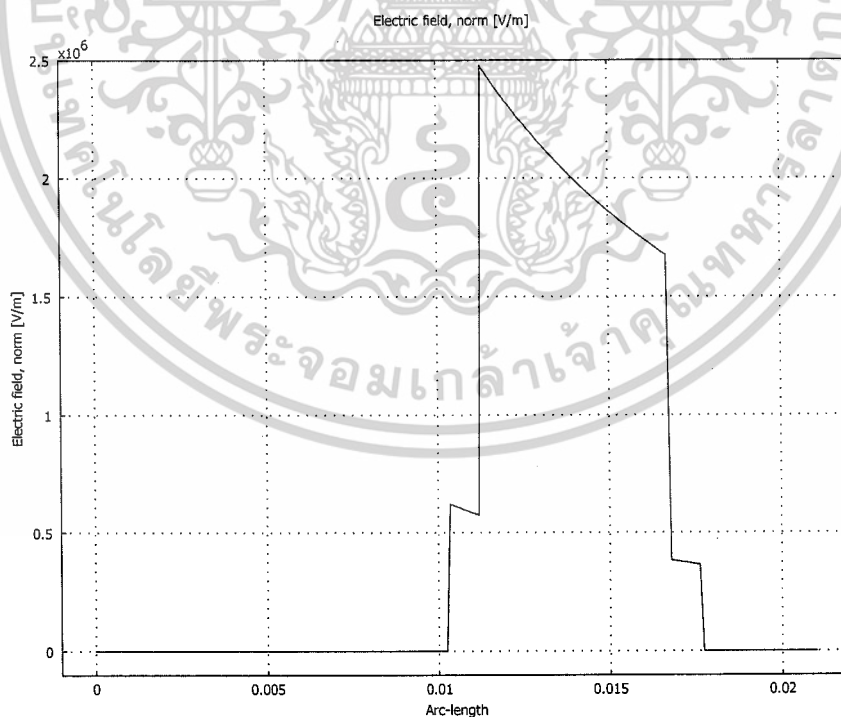


ภาพที่ 4.16 ภาพขยายเส้นสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลที่แจ็คเก็ตถลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ
รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินปกติ



ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้า กับ

รัศมีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีแฉกเกิดตลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm) ของแต่ละกรณีศึกษา

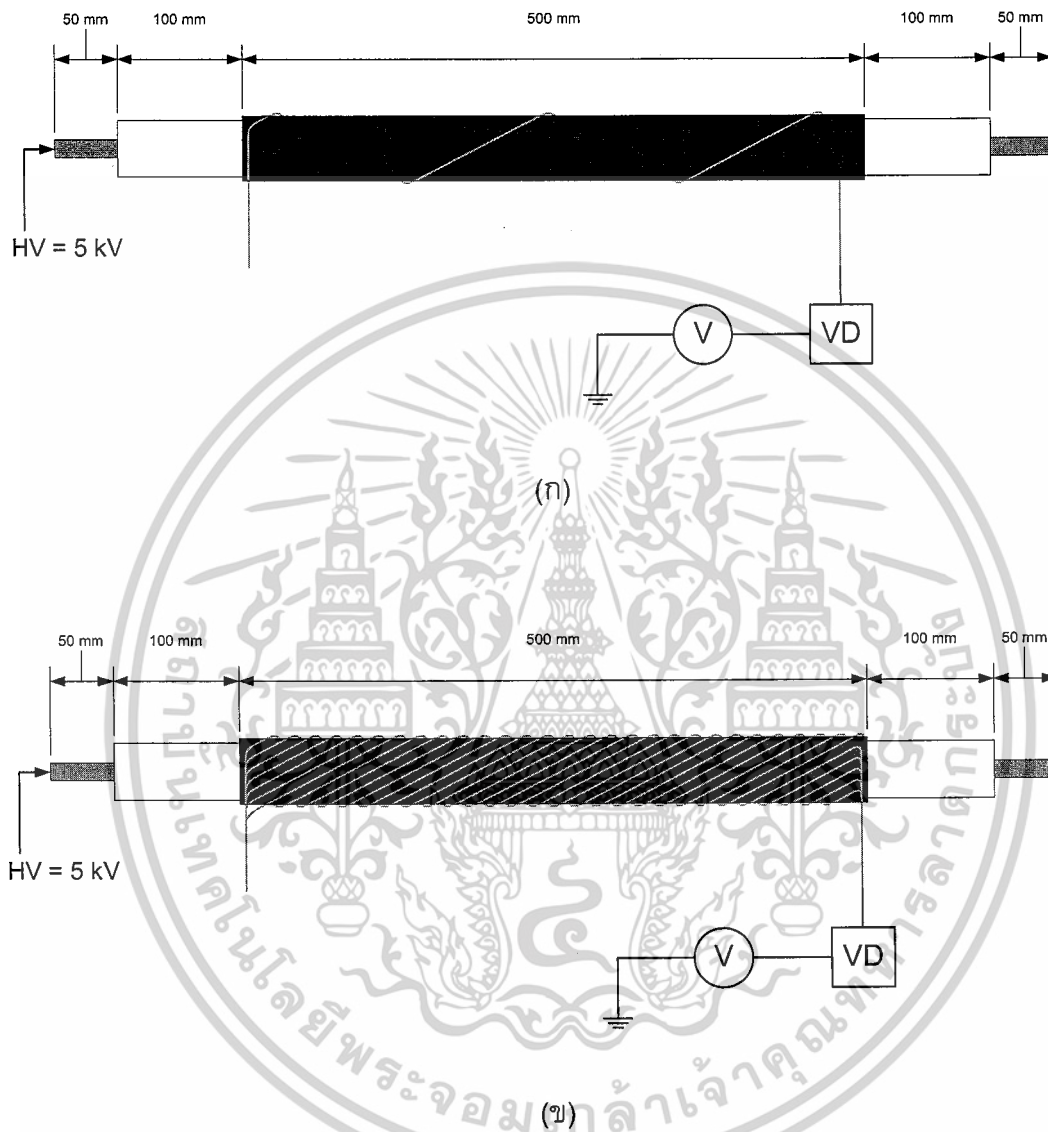
กรณีศึกษา	ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)
1. เคเบิลที่ปกติ	24.9
2. เคเบิลที่ฉนวนยุบตัว	45.7
3. กราวด์แตกเสียหาย	97.6
4. เคเบิลที่แจ็คเก็ตทะลุถึงชั้นกราวด์	340.9
5. เคเบิลที่แจ็คเก็ตถลอก	24.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดแรงดันและกระแสเหนี่ยวนำ

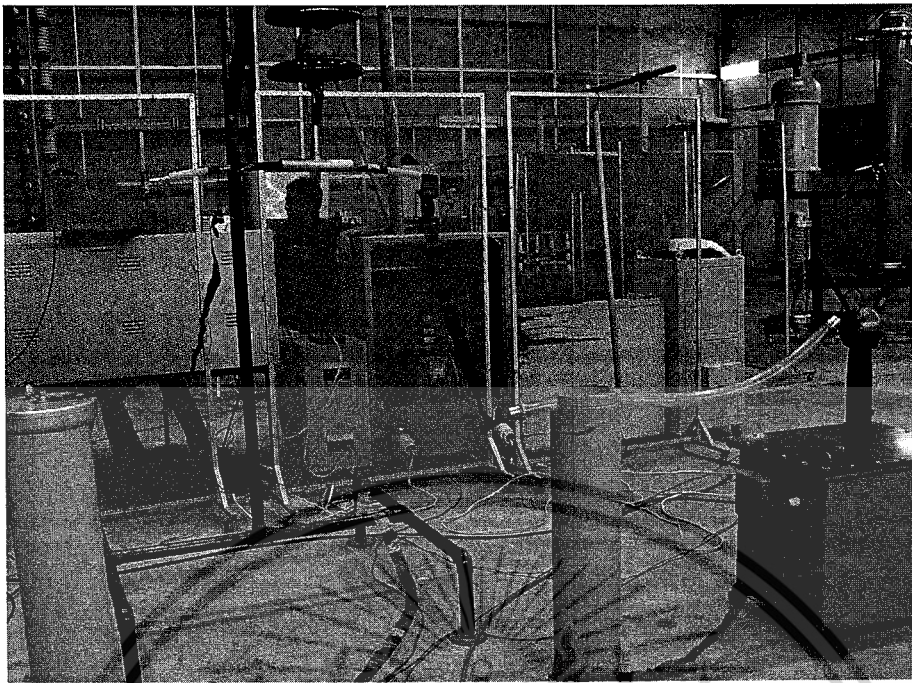
4.2.1 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Wire ที่มีจำนวนเส้นแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.19(ก) วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire 1 เส้น

(ข) วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire 21 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.21 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเพื่อวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน

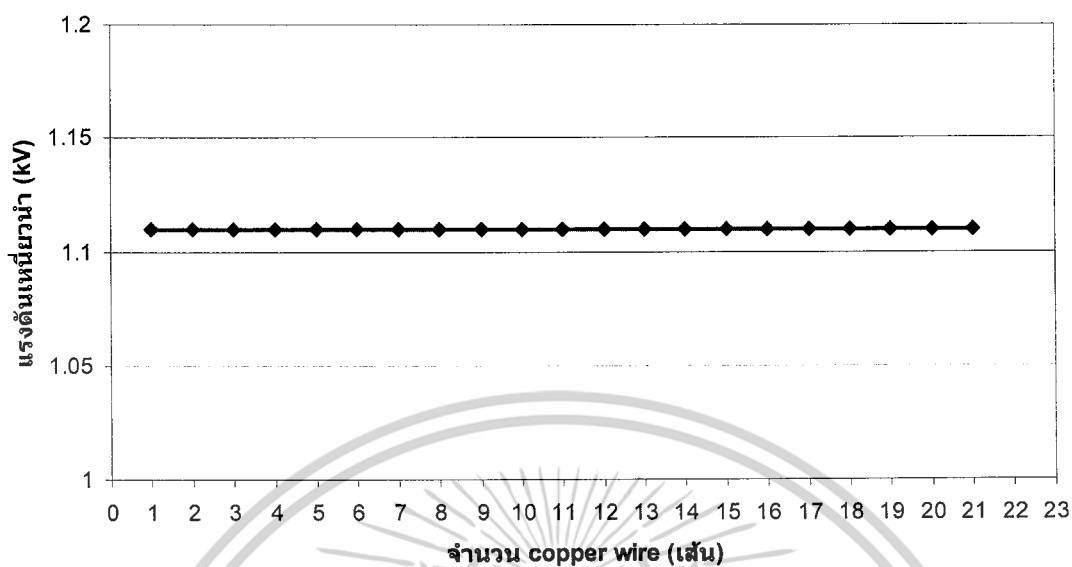
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน
ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า 5 kV

จำนวน copper wire (เส้น)	แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)
1	5	1.11
2	5	1.11
3	5	1.11
4	5	1.11
5	5	1.11
6	5	1.11
7	5	1.11
8	5	1.11
9	5	1.11
10	5	1.11
11	5	1.11
12	5	1.11
13	5	1.11
14	5	1.11
15	5	1.11
16	5	1.11
17	5	1.11
18	5	1.11
19	5	1.11
20	5	1.11
21	5	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

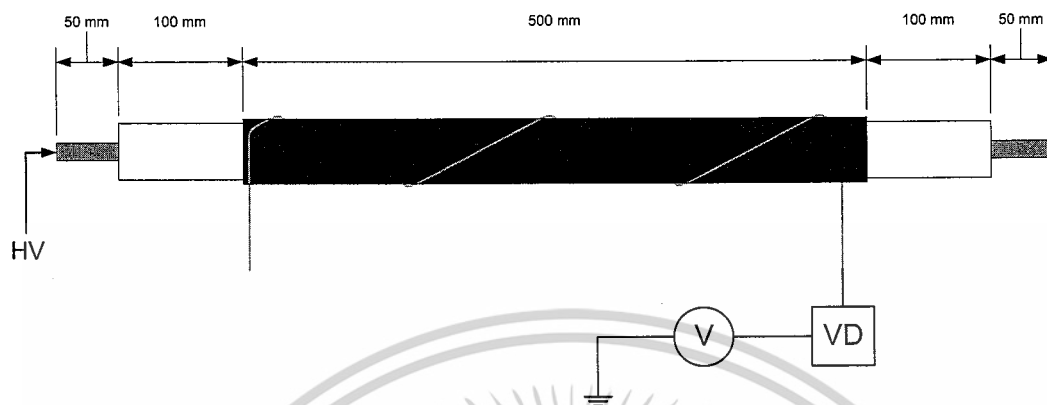
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวน copper wire กับ แรงดันเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้น Copper Wire กับ แรงดันเหนี่ยวนำ
เมื่อจำนวนเส้น Copper Wire แตกต่างกัน ที่ระดับแรงดันป้อนเข้า 5 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดินที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Wire ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.23 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

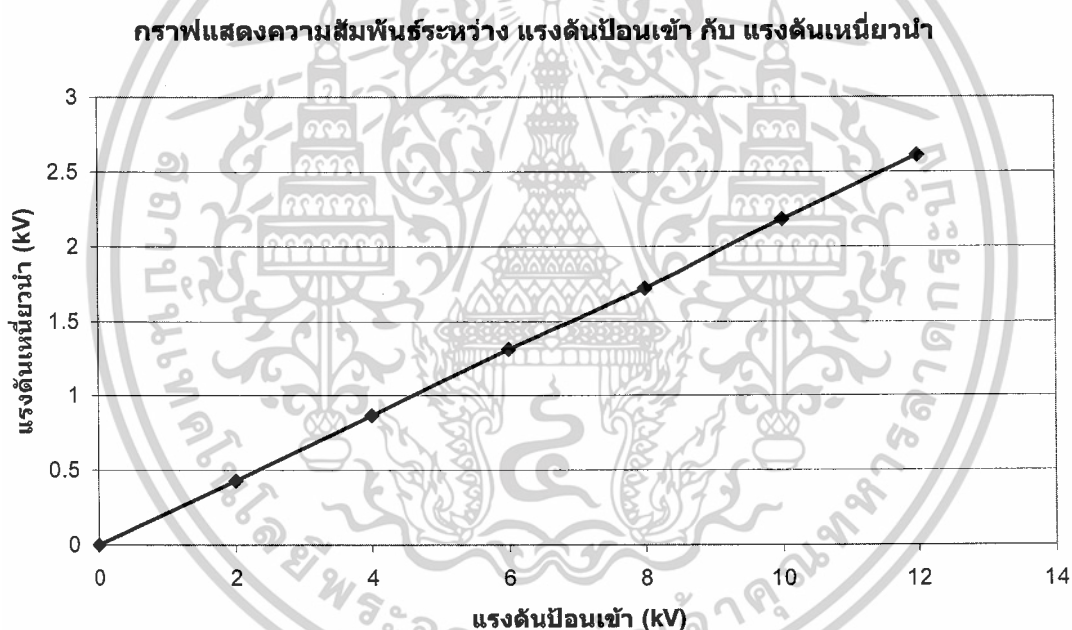


ภาพที่ 4.24 ชั้นงานที่ใช้ทดลองเพื่อวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อมีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อมีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

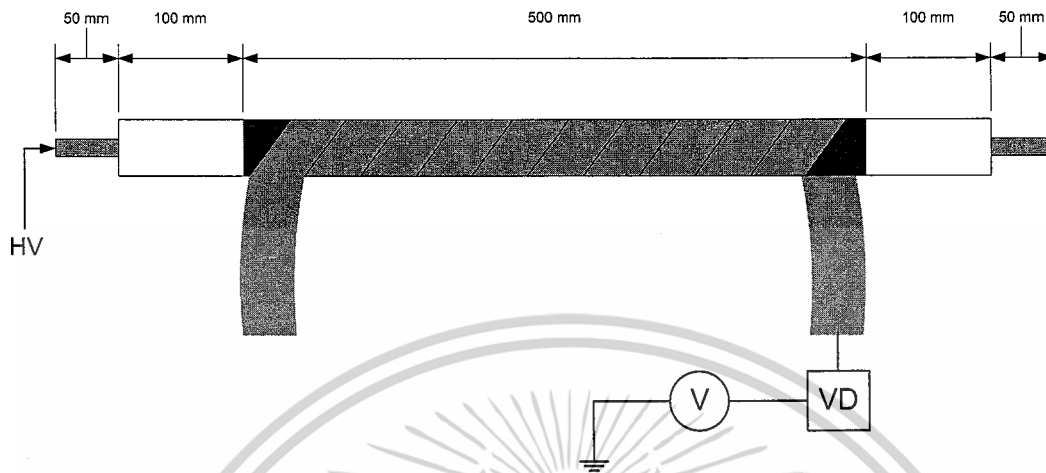
แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)
0	0
2	0.43
4	0.87
6	1.31
8	1.72
10	2.18
12	2.61



ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อมีจำนวนเส้น Copper Wire เส้นเดียว ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีตัวกันโลหะแบบ Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

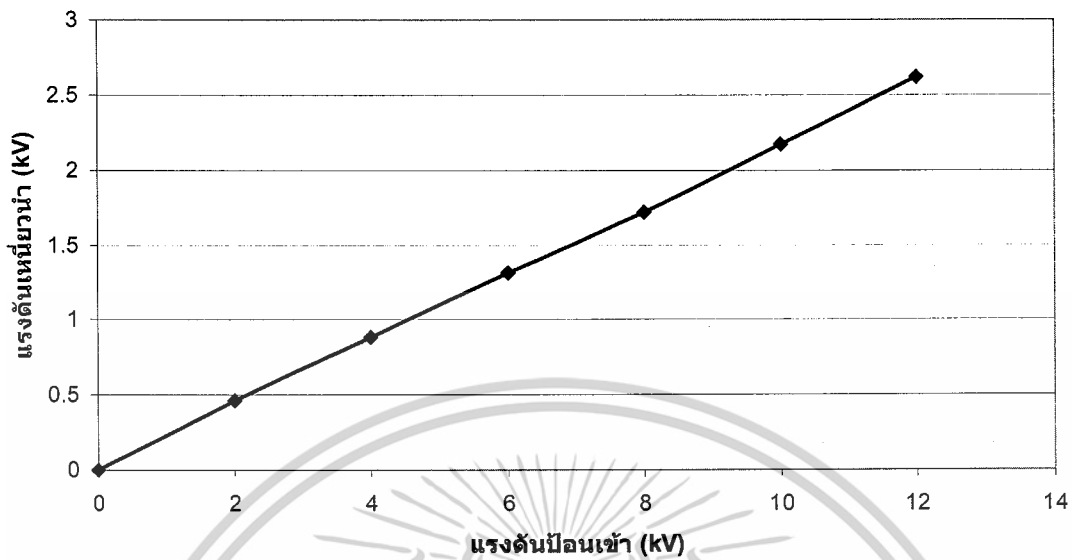


ภาพที่ 4.26 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นของตัวกันโลหะเป็นแบบ Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

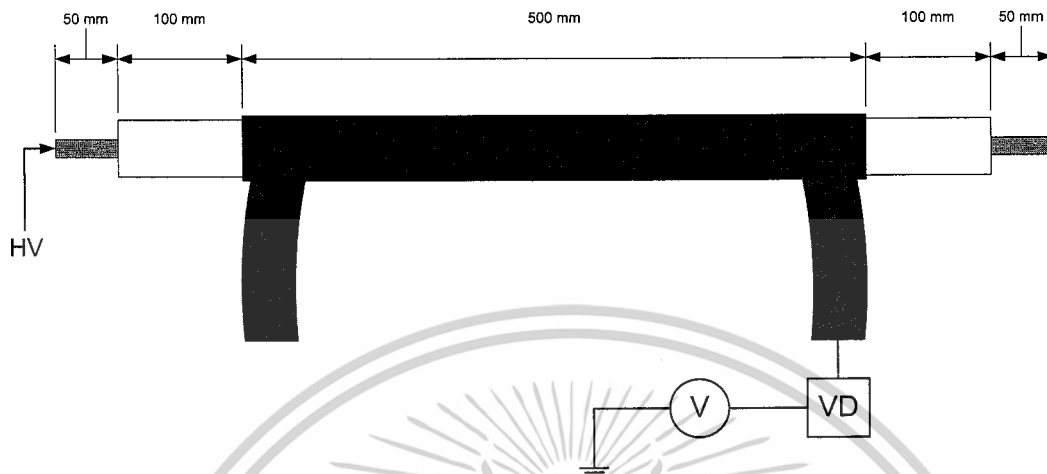
แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)
0	0
2	0.46
4	0.88
6	1.31
8	1.72
10	2.17
12	2.62

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ

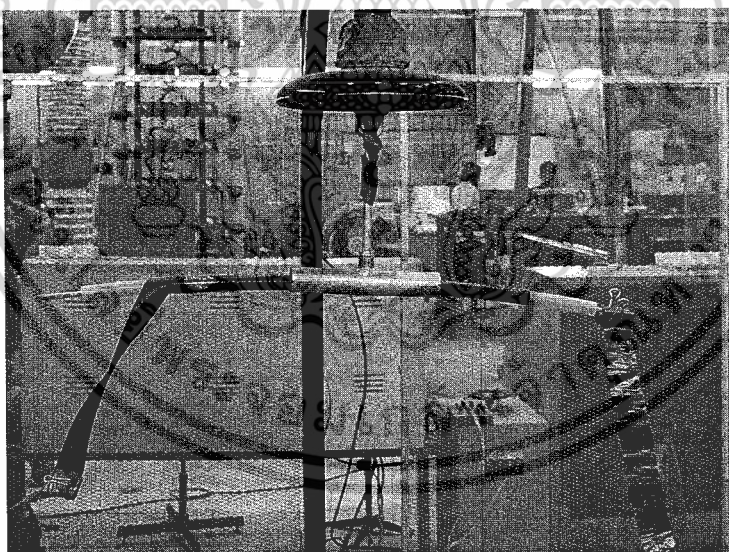


ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ
เมื่อชั้นของตัวกันโลหะเป็นแบบ Copper Tape
ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

4.2.4 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ บนชั้น Insulation Screen (Semi) ของสายเคเบิลใต้ดินเมื่อไม่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.28 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

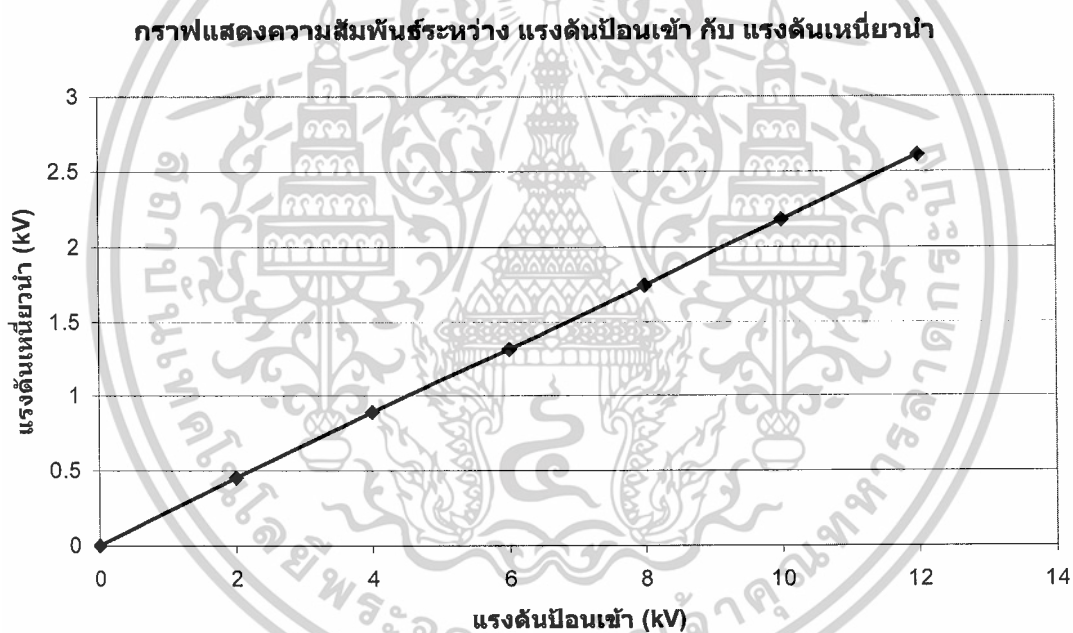


ภาพที่ 4.29 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดินไม่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

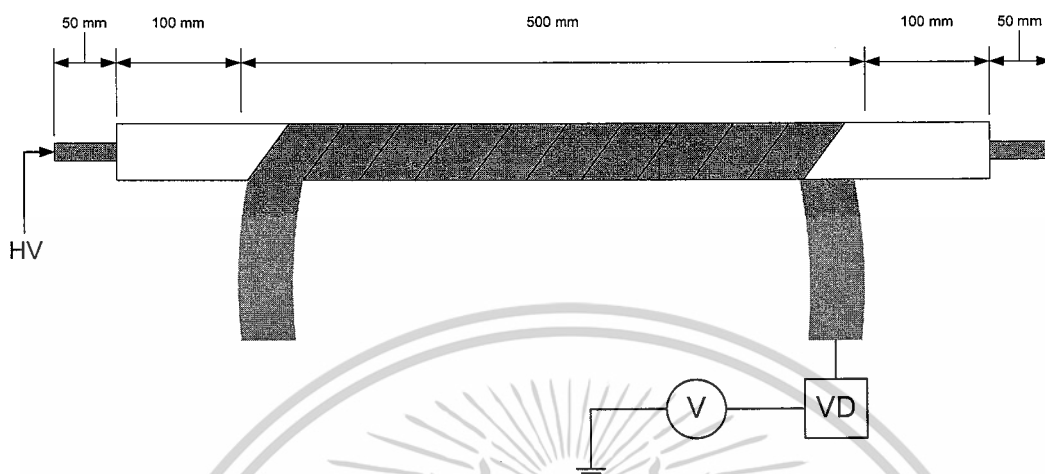
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดินไม่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)
0	0
2	0.45
4	0.89
6	1.31
8	1.74
10	2.18
12	2.61

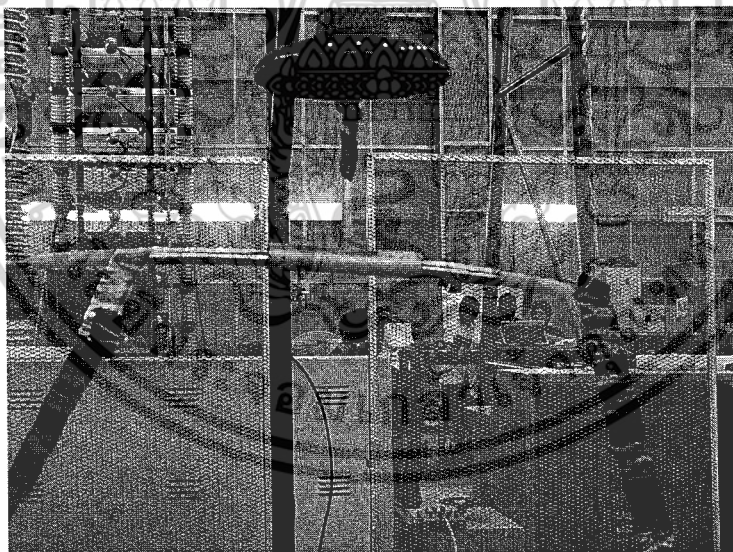


ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลไม่มีชั้นของตัวกันโลหะ (Ground) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

4.2.5 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่ไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.31 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

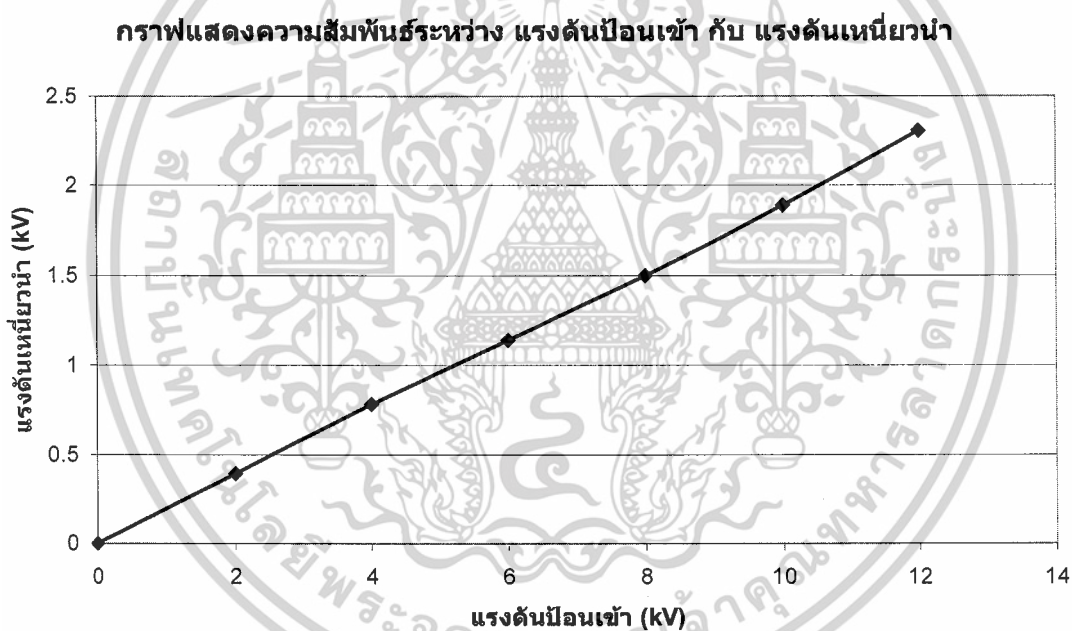


ภาพที่ 4.32 การจัดการทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดิน ไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่ไม่มีชั้น Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

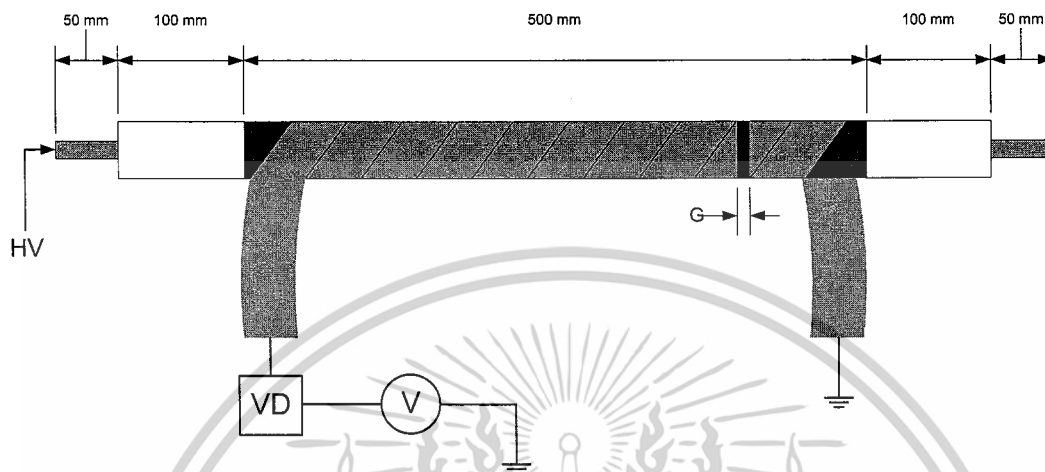
แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)
0	0
2	0.45
4	0.89
6	1.31
8	1.74
10	2.18
12	2.61



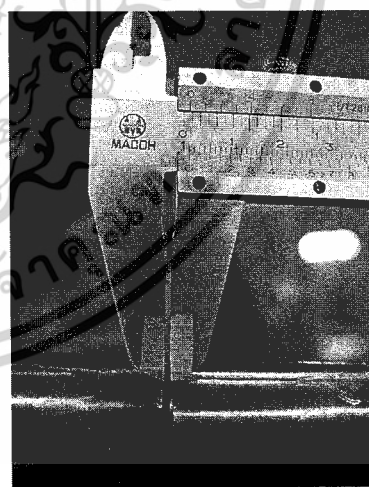
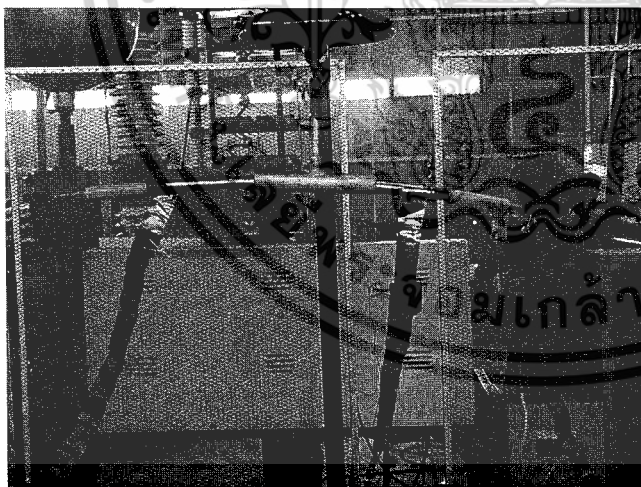
ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อสายเคเบิลใต้ดิน ไม่มีชั้นของ Insulation Screen ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะเสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.34 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



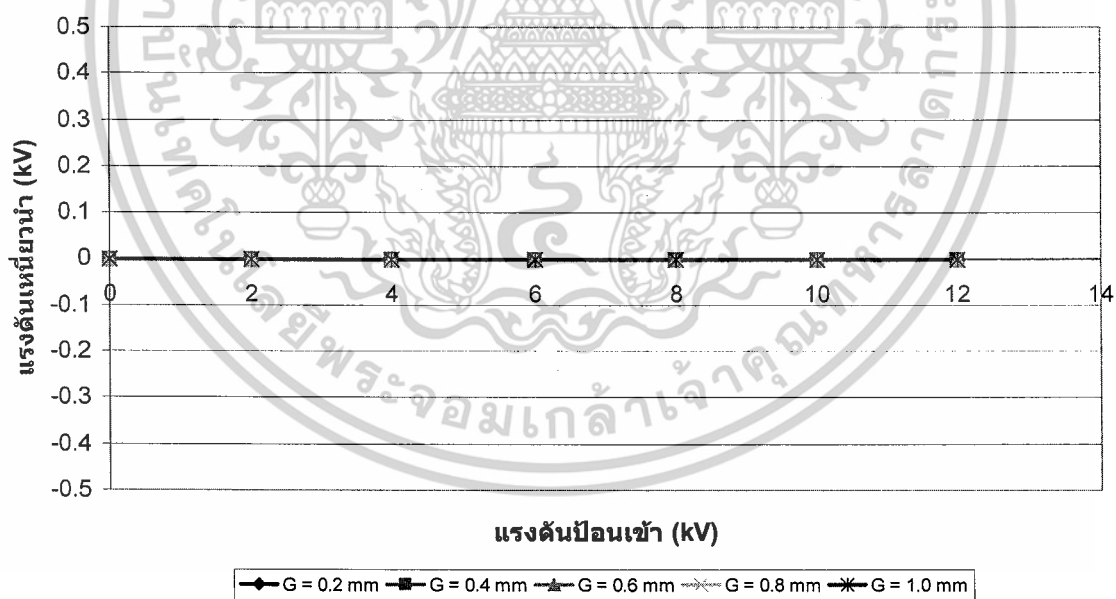
ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ(Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)				
	G = 0.2 mm	G = 0.4 mm	G = 0.6 mm	G = 0.8 mm	G = 1.0 mm
0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0

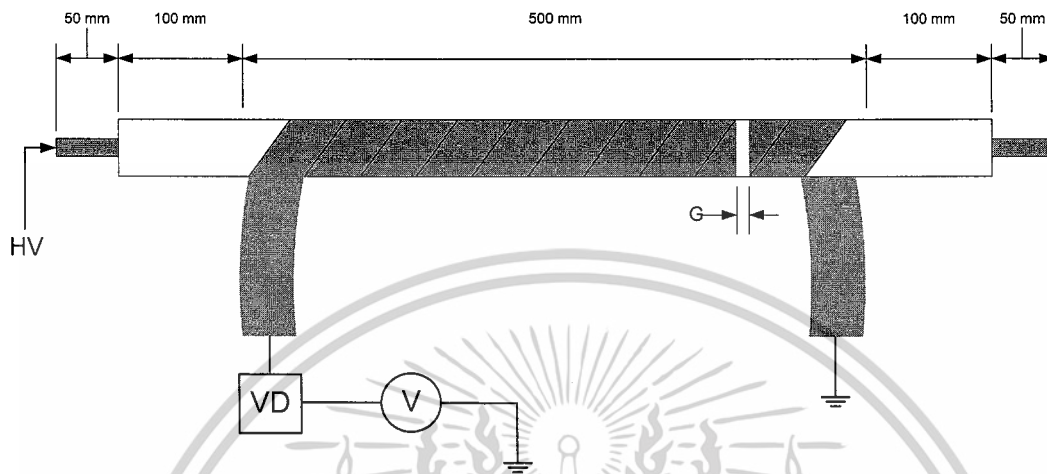
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายที่ระยะต่างๆ แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.37 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.38 ชิ้นงานระยะช่องว่าง $G = 1 \text{ mm}$ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน

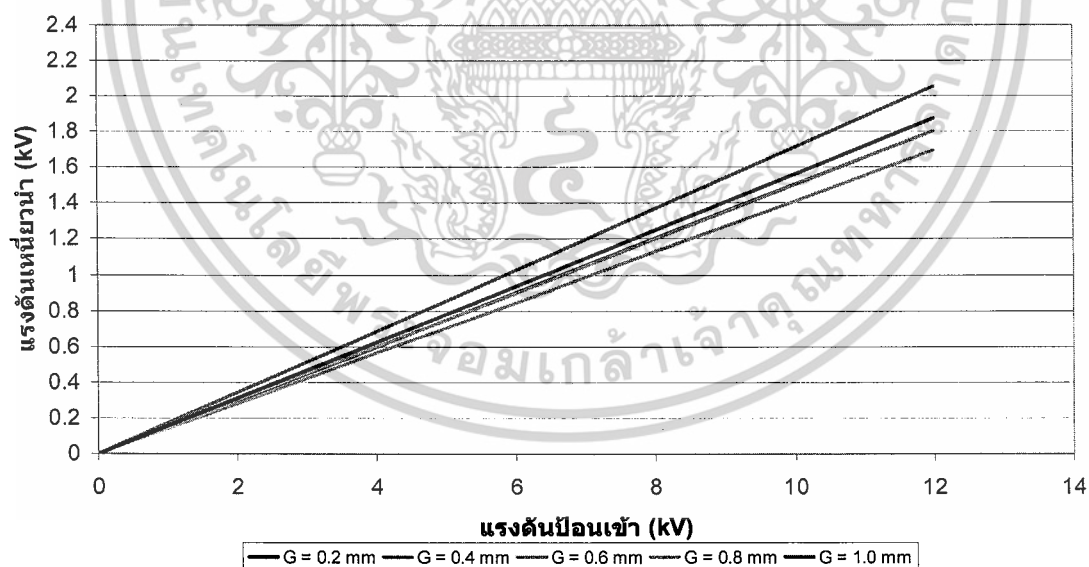
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 1

แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)				
	G = 0.2 mm	G = 0.4 mm	G = 0.6 mm	G = 0.8 mm	G = 1.0 mm
0	0	0	0	0	0
2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
6	0.8(B)	1(B)	0.8	0.9	0.9
8	-	-	1.2(B)	1.1	1.1
10	-	-	-	1.4	1.7
12	-	-	-	1.6(B)	1.8(B)

(B) = Breakdown

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 1

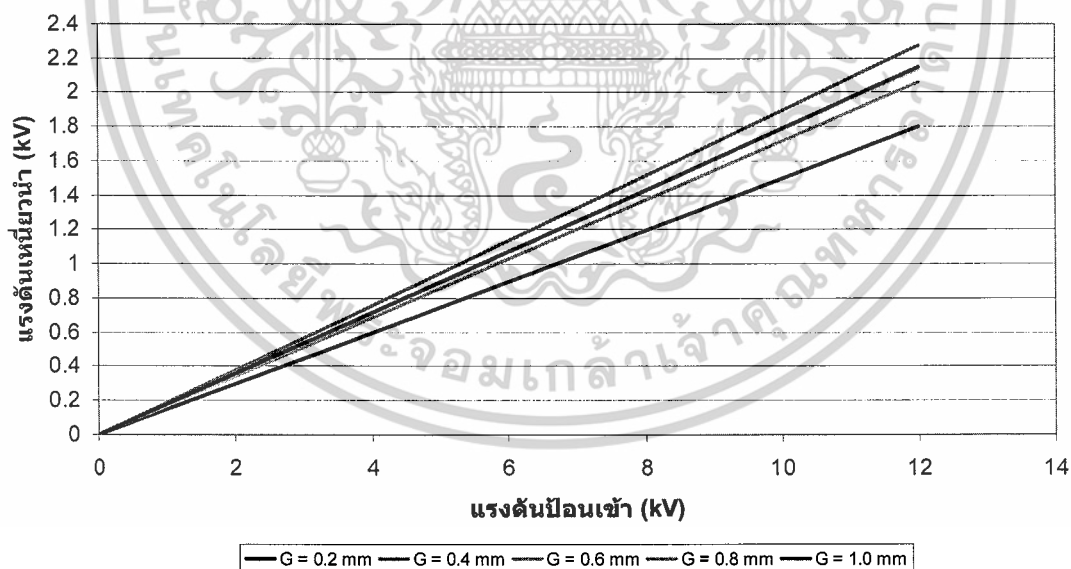
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 2

แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)				
	G = 0.2 mm	G = 0.4 mm	G = 0.6 mm	G = 0.8 mm	G = 1.0 mm
0	0	0	0	0	0
2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
6	0.8(B)	1.1(B)	1.1	1.1	1.1
8	-	-	1.3(B)	1.5	1.4
10	-	-	-	1.7(B)	1.8(B)
12	-	-	-	-	-

(B) = Breakdown

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 2

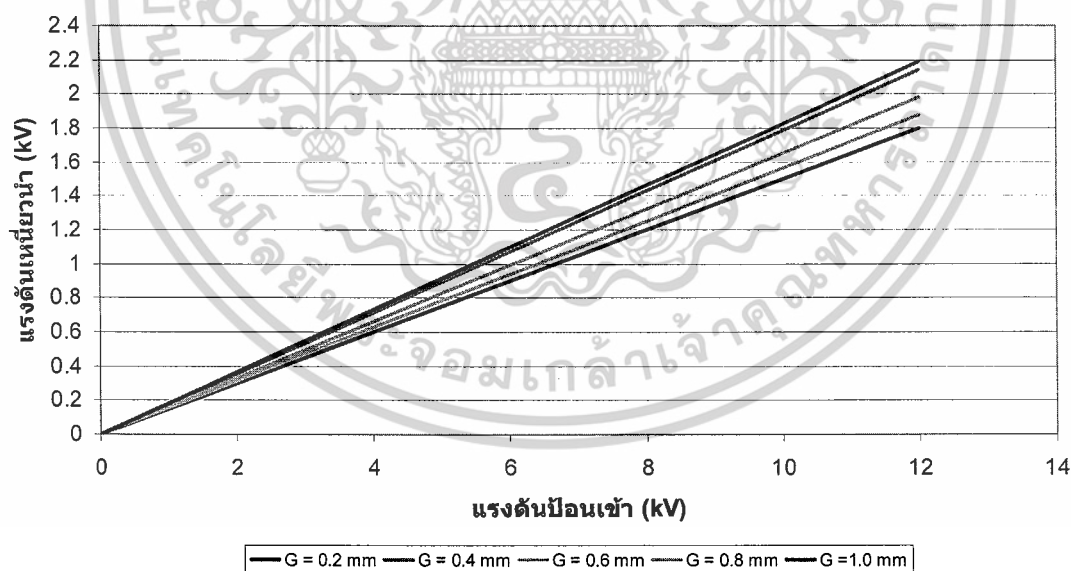
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 3

แรงดันป้อนเข้า (kV)	แรงดันเหนี่ยวนำ (kV)				
	G = 0.2 mm	G = 0.4 mm	G = 0.6 mm	G = 0.8 mm	G = 1.0 mm
0	0	0	0	0	0
2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
6	0.8(B)	1.0(B)	1.1	1	1.1
8	-	-	1.2(B)	1.1	1.5
10	-	-	-	1.6(B)	1.8(B)
12	-	-	-	-	-

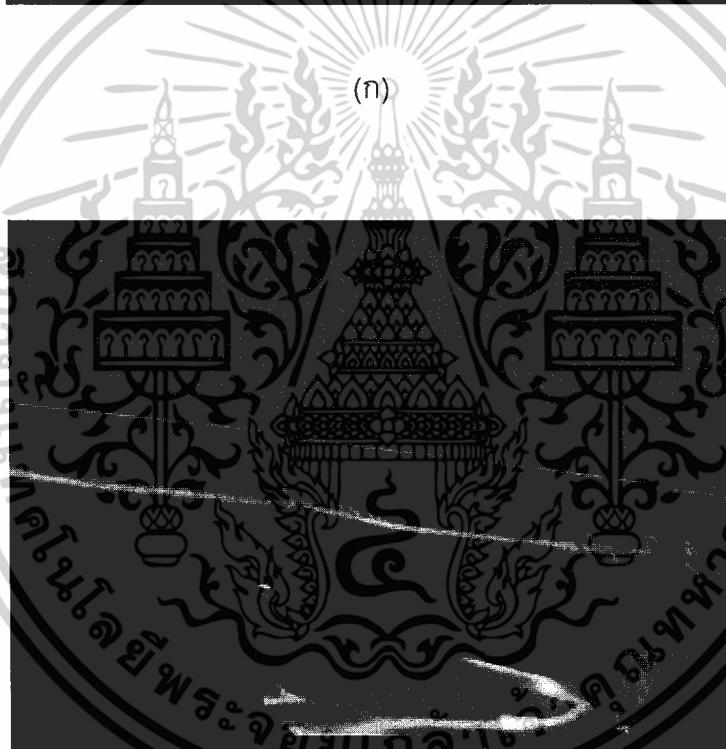
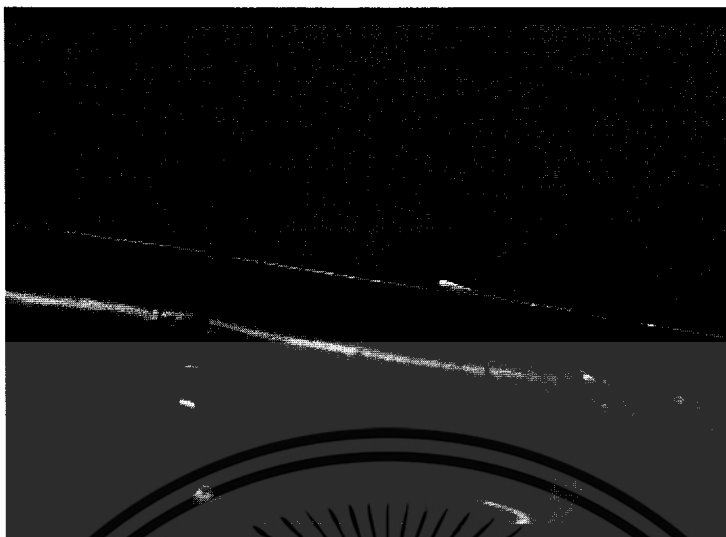
(B) = Breakdown

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า กับ แรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายในระยะต่างๆ และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับแรงดันป้อนเข้าแตกต่างกัน ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



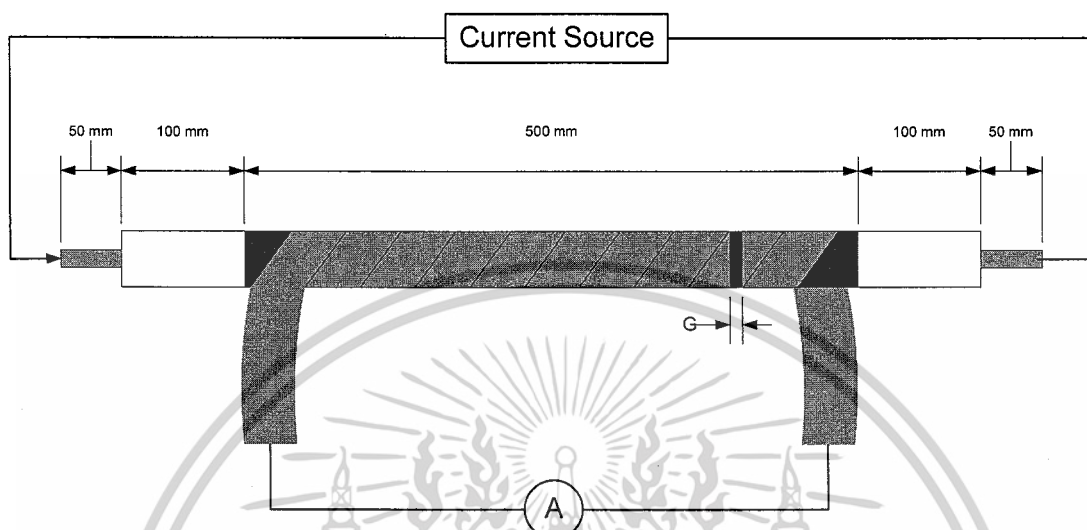
(ข)

ภาพที่ 4.42(ก) ผลการทดลองขณะเกิดเบรกดาวนที่ระยะ $G = 0.6 \text{ mm}$

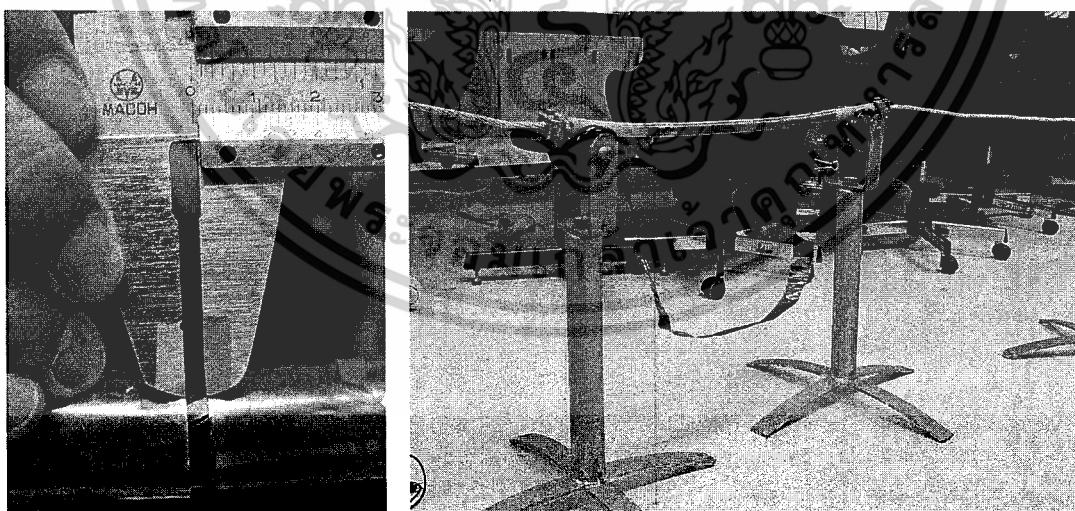
(ข) ผลการทดลองขณะเกิดเบรกดาวนที่ระยะ $G = 1.0 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะเสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.43 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Insulation Screen » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

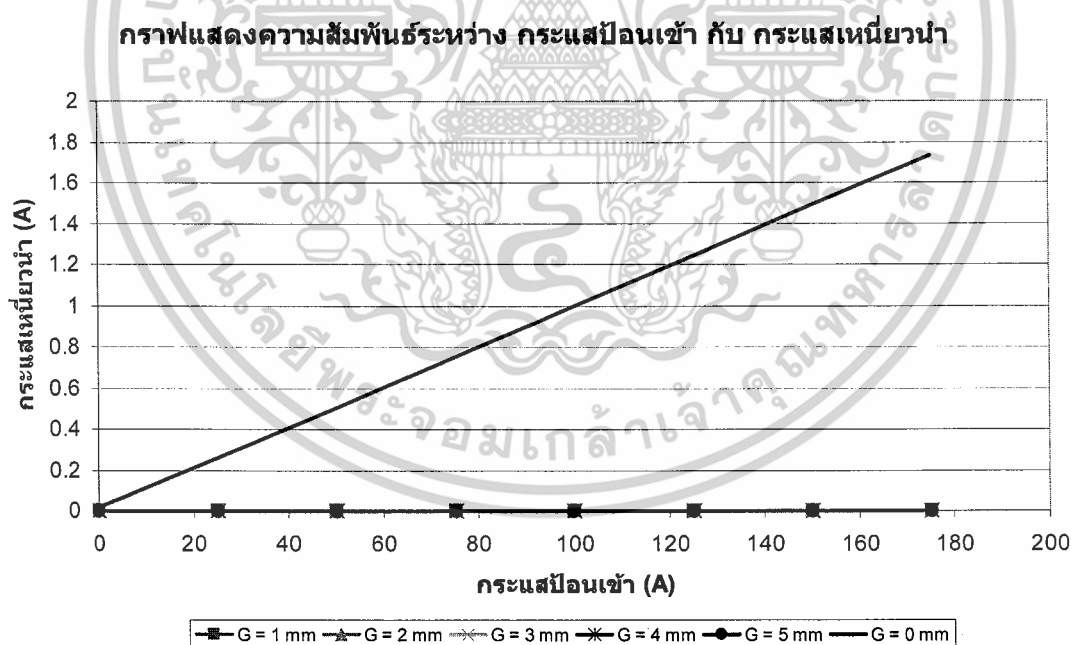


ภาพที่ 4.44 ชิ้นงานที่ใช้ทดลอง ที่ระยะ $G = 3 \text{ mm}$ ในการวัดกระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

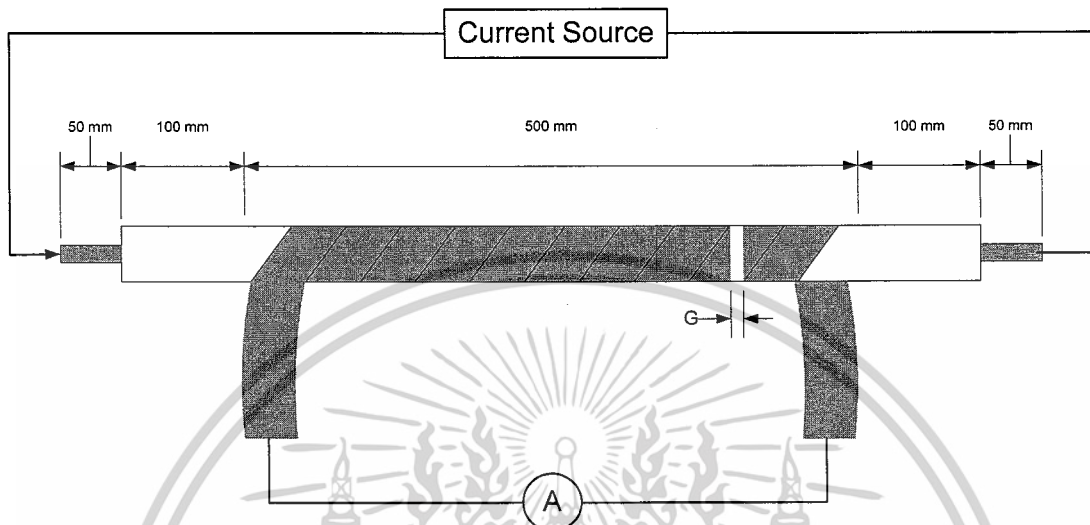
กระแสป้อนเข้า (A)	กระแสเหนี่ยวนำ (A)					
	G = 0 mm	G = 1 mm	G = 2 mm	G = 3 mm	G = 4 mm	G = 5 mm
0	0	0	0	0	0	0
25	0.3	0	0	0	0	0
50	0.5	0	0	0	0	0
75	0.7	0	0	0	0	0
100	1.0	0	0	0	0	0
125	1.3	0	0	0	0	0
150	1.5	0	0	0	0	0
175	1.7	0	0	0	0	0



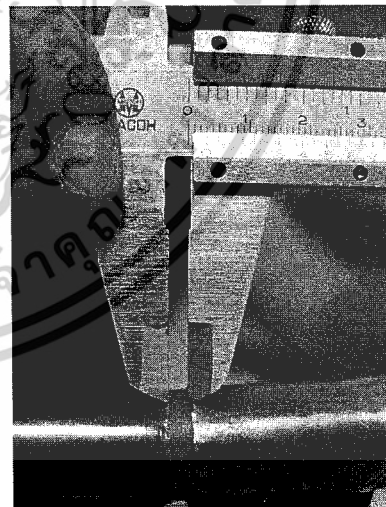
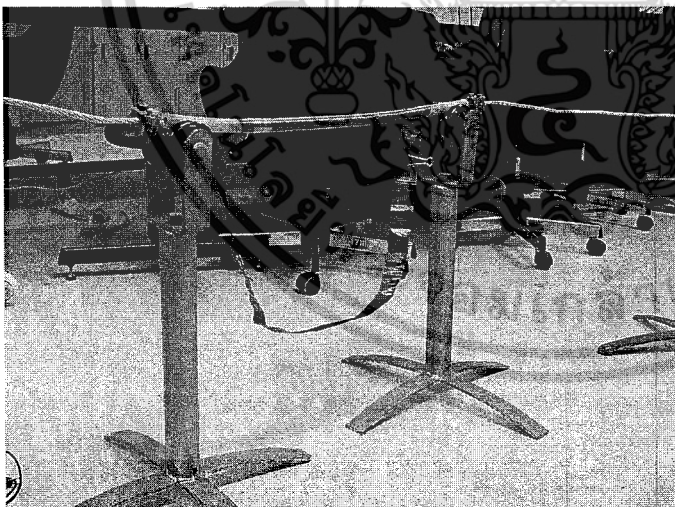
ภาพที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสป้อนเข้า กับ กระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย ที่ระยะต่างๆ แต่ชั้น Insulation Screen (Semi) อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำบนชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย และไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.46 วงจรการทดลอง ที่มี Conductor » Conductor Screen » Insulation » Copper Tape เสียหาย ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

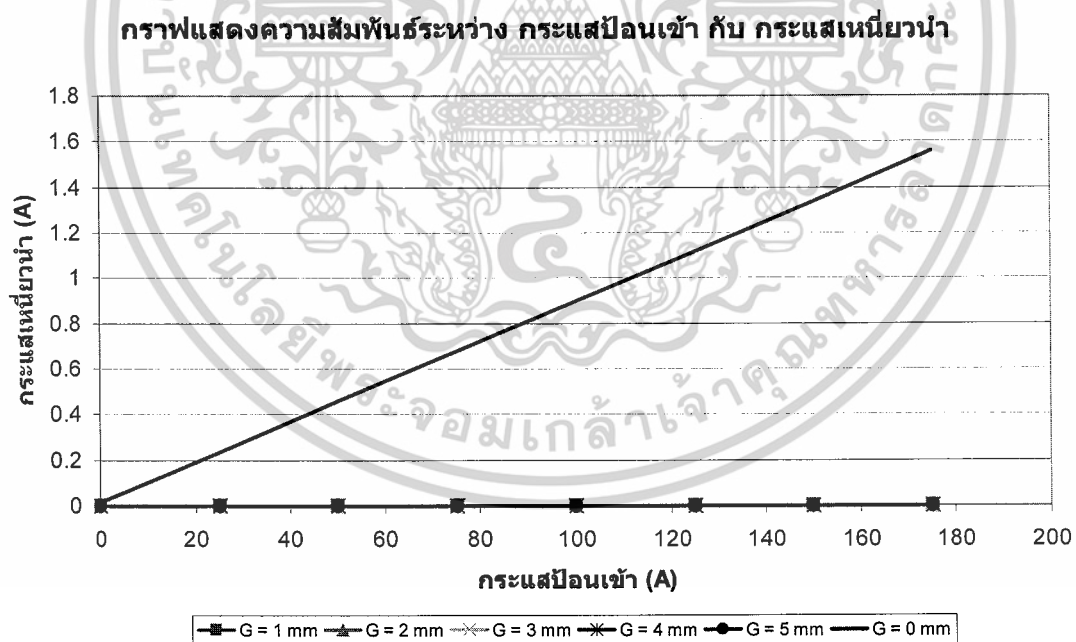


ภาพที่ 4.47 ชิ้นงานที่ใช้ทดลอง ที่ระยะ $G = 3 \text{ mm}$ ในการวัดกระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย แลไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดกระแสเหนี่ยวนำ ของสายเคเบิลใต้ดิน ที่มีชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหายและไม่มีชั้น Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

กระแสป้อนเข้า (A)	กระแสเหนี่ยวนำ (A)					
	G = 0 mm	G = 1 mm	G = 2 mm	G = 3 mm	G = 4 mm	G = 5 mm
0	0	0	0	0	0	0
25	0.3	0	0	0	0	0
50	0.4	0	0	0	0	0
75	0.7	0	0	0	0	0
100	0.9	0	0	0	0	0
125	1.1	0	0	0	0	0
150	1.3	0	0	0	0	0
175	1.6	0	0	0	0	0



ภาพที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสป้อนเข้า กับ กระแสเหนี่ยวนำ เมื่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) เสียหาย ที่ระยะต่างๆ และไม่มีชั้นของ Insulation Screen (Semi) ที่ระดับกระแสป้อนเข้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากตารางเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm) ของแต่ละกรณีศึกษา แสดงให้เห็นว่าในกรณีแจ็คเกิดตลอก ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกับสายเคเบิลที่สมบูรณ์ แต่ในกรณีที่ฉนวนยุบตัว กราวด์แตก และแจ็คเกิดทะลุถึงกราวด์จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าสายเคเบิลปกติ ดังนั้นรูปแบบความผิดปกติของสายเคเบิลจะมีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนของสายเคเบิลเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm) ของแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)
1. เคเบิลที่ปกติ	24.9
2. เคเบิลที่ฉนวนยุบตัว	45.7
3. กราวด์แตกเสียหาย	97.6
4. เคเบิลที่แจ็คเกิดทะลุถึงชั้นกราวด์	340.9
5. เคเบิลที่แจ็คเกิดตลอก	24.9

5.2 สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ

จาก ข้อ 4.2.1 สรุปได้ว่า จำนวนเส้น Copper Wire ไม่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนชั้นตัวกันโลหะ (Metallic Screen: Ground)

จาก ข้อ 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 สรุปได้ว่า ไม่ว่าชั้นตัวกันโลหะ (Metallic Screen) จะเป็นแบบ Copper Wire, Copper Tape หรือไม่มีชั้นตัวกันโลหะ โดยที่ชั้น Insulation screen อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ แรงดันเหนี่ยวนำที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน

จาก ข้อ 4.2.3, 4.2.5 สรุปได้ว่า เมื่อไม่มีชั้น Insulation Screen จะวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำได้ต่ำกว่า เมื่อมีชั้น Insulation Screen เฉลี่ยมีค่าประมาณ 11.82 เปอร์เซ็นต์

จาก ข้อ 4.2.6 สรุปได้ว่า ไม่ว่าจะมีความยาวรอยแตกเท่าไร แรงดันเหนี่ยวนำที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะมีชั้น Insulation Screen ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่พอเหมาะจะเปลี่ยนสภาพเป็นสารตัวนำ

จาก ข้อ 4.2.7 สรุปได้ว่า ในสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีชั้น Insulation Screen เมื่อเกิดรอยแตกที่ชั้นตัวกันโลหะ จะทำให้เกิดการเบรกดาวนที่ข้ามรอยแตกก็ต่อเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำมีค่า มากกว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติขณะนั้น และจะสังเกตได้ว่า เมื่อระยะห่างรอยแตกเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำเบรกดาวนก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะพออนุมานถึงกรณีที่สายเคเบิลใต้ดินชำรุดไปจนถึงชั้น Insulation Screen มีโอกาสที่จะเกิดเบรกดาวนระหว่างรอยแยกของกราวด์ได้

5.3 สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดกระแสเหนี่ยวนำ

จาก ข้อ 4.2.8, 4.2.9 สรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลบนชั้นตัวกันโลหะ จะไหลได้ ก็ต่อเมื่อ ชั้นตัวกันโลหะต่อถึงกันครบรอบ แต่เมื่อมีรอยแตกเกิดขึ้นทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหล ไม่ว่าระยะห่างจะเป็นเท่าไร และไม่ว่าสายเคเบิลใต้ดินจะมีชั้น Insulation Screen หรือไม่ ก็พบว่าไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลบนชั้นตัวกันโลหะ (Metallic Screen)

5.4 สรุปผลการทำโครงการการศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า สายเคเบิลใต้ดินที่มีรอยแตก แยกออกจากกันโดยสิ้นเชิง ที่ชั้นตัวกันโลหะ (Ground) และชั้นสารกึ่งตัวนำ (Insulation Screen) จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อมรอยแตกนี้ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่า มากกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติขณะนั้น จะทำให้เกิดวบไฟ หรือเบรกดาวนได้

ถ้าสายเคเบิลใต้ดินรอยแตกบางส่วนมีการต่อชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ให้เป็นไปในลักษณะครบรอบ จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลบนชั้นตัวกันโลหะ ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมบนชั้นสารกึ่งตัวนำ (Insulation Screen) และชั้นตัวกันโลหะ (Ground) จนกระทั่งทำให้ชั้นสารกึ่งตัวนำ (Insulation Screen) และชั้นตัวกันโลหะ (Ground) ขาด แยกออกจากกันโดยสิ้นเชิง เมื่อนั้นก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกคร่อมช่องว่างนี้ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่า มากกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติขณะนั้น จะทำให้เกิดวบไฟ หรือเบรกดาวนที่รอยแยกได้ ส่งผลให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดความเสียหายขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) 2551. คู่มือการเลือกใช้สายไฟฟ้าสำหรับงานออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า
- [2] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย. ระบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System).
- [3] นพพร บุญเพียร. โปรแกรมช่วยออกแบบและประเมินราคาสำหรับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบฉนวนแข็งเอ็กแอลพีอี. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- [4] ประวิทย์ เพ็ชรผึ้ง,มนตรี ยวสันเทียะ,จำเนียร พงษ์ประพันธ์,สันติไช สะอาด. การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน. ปริญญานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [5] สัรวาย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.
- [6] พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [7] เฉลิมพล น้ำค้าง. ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.
- [8] พัฒนา อินทนิ. การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [9] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล. การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่า
ดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24
kV. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง, 2545
- [10] มงคล เดชนครินทร์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นไฟฟ้า. หนังสือในโครงการส่งเสริมการ
แต่งและแปลตำรา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [11] IEC Standard Publ. No. 60502-1. POWER CABLE EXTRUDED INSULATION
AND THEIR ACCESSORIES FOR RATED VOLTAGES FROM 1 kV ($U_m = 1.2$ kV
) UP TO 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1.2$
kV) and 3 kV ($U_m = 3.6$ kV)
- [12] IEC Standard Publ. No. 60502-2. POWER CABLE EXTRUDED INSULATION
AND THEIR ACCESSORIES FOR RATED VOLTAGES FROM 1 kV ($U_m = 1.2$ kV
) UP TO 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m =$
7.2 kV), up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).2005
- [13] Benjamin T.Lanz. Power Cable Diagnostics Field Application and Case Studies.
Senior Application Engineer, IMCORP, USA
- [14] Harry Orton. Long-life XLPE-Insulated Power Cables. Orton Consulting Engineers
International, Vancouver, Canada



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การศึกษาการใช้งานโปรแกรม SolidWorks

ในที่นี้จะนำเสนอการสร้างสายเคเบิล ด้วยโปรแกรม SolidWorks

1 การสร้างสาย Conductor

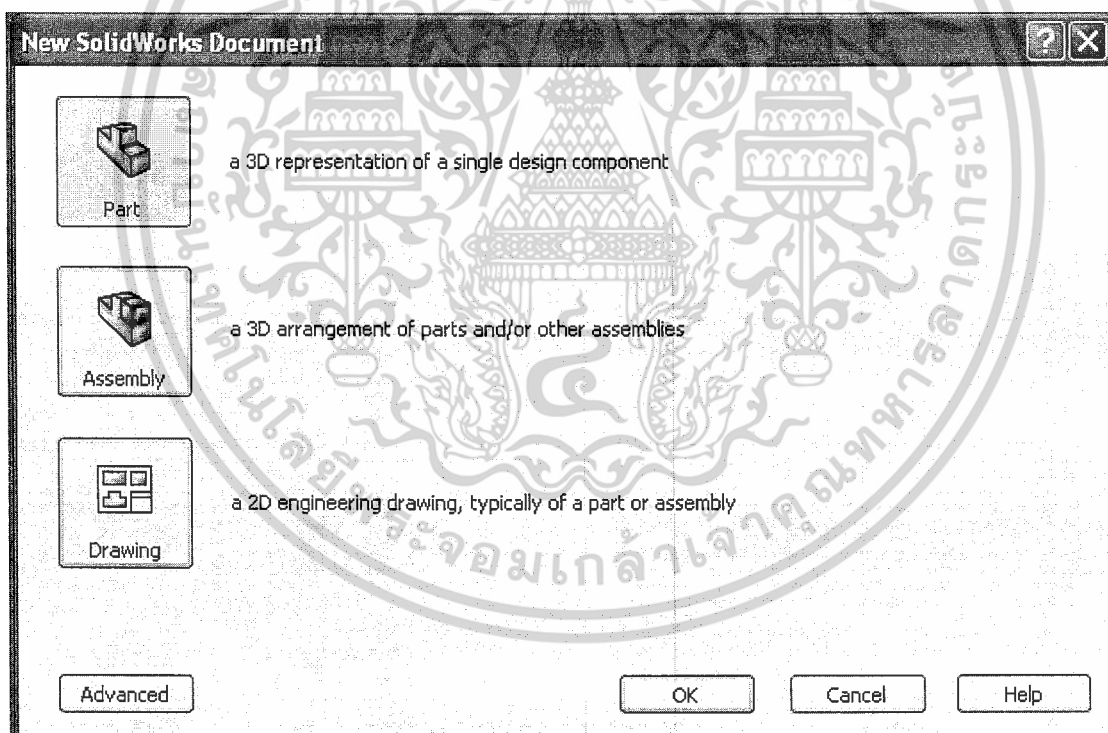
เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา เพื่อสร้างชิ้นงานใหม่ จะปรากฏเมนูคำสั่ง ดังแสดงในภาพที่ ก.1 ซึ่ง คำสั่งแต่ละอย่างมีความหมายดังนี้

Part คือ การสร้างชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติ

Assembly คือ การนำชิ้นงานที่สร้างจาก Part มาประกอบกันเป็นชิ้นงาน

Drawing คือ การแสดงชิ้นงานในรูปแบบของ Drawing

ในที่นี้ ให้ เลือกคำสั่ง Part เพื่อสร้างชิ้นงานใหม่ ในรูปแบบ 3 มิติ

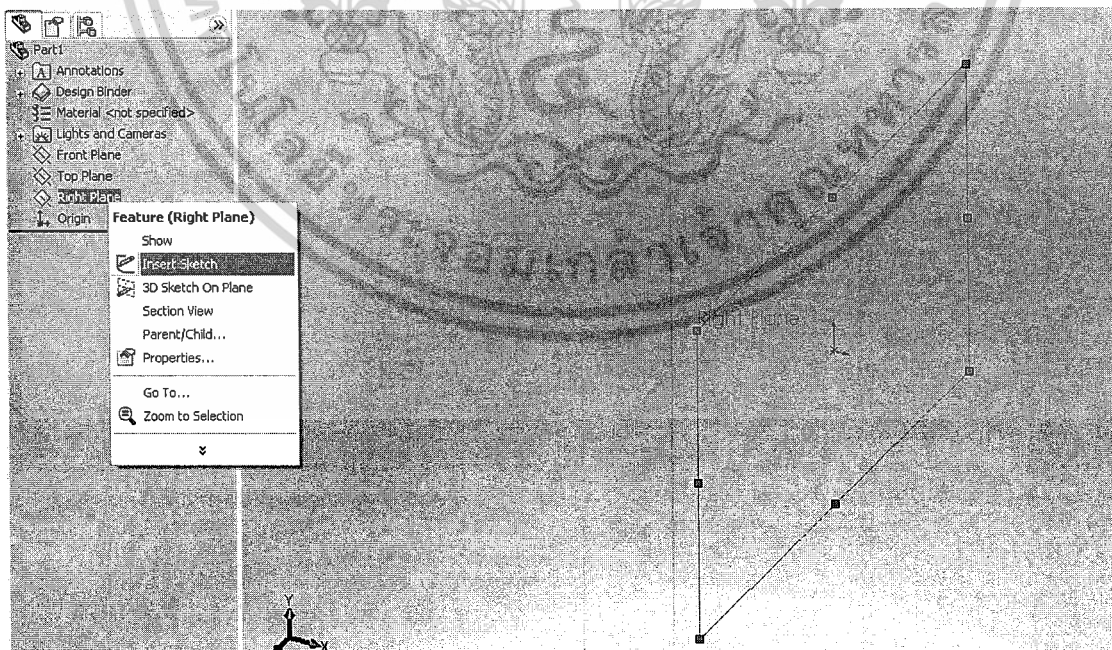


ภาพที่ ก.1 เริ่มต้นโปรแกรม สร้างชิ้นงานใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

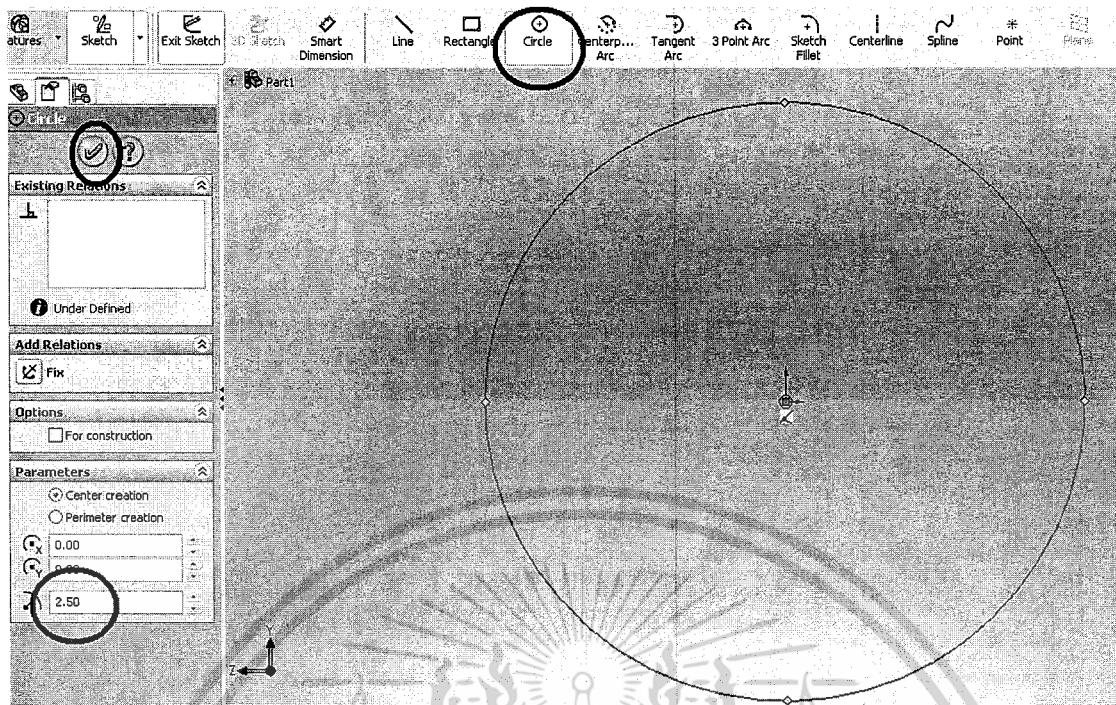
ในการสร้างชิ้นงานแต่ละชิ้นนั้น จะมีขั้นตอนเริ่มต้นที่คล้ายกัน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 อันดับแรกเราจะต้องทำการเลือก Plane ก่อน โดยการคลิกขวาที่ Plane นั้น แล้ว เลือก Insert Sketch ดังแสดงในภาพที่ ก.2
- ขั้นตอนที่ 2 หลังจากที่เรเลือก Plane แล้ว จะปรากฏคำสั่งต่างๆ ในการสร้างรูปชิ้นงานในลักษณะ 2 มิติขึ้น ให้เราทำการวาดชิ้นงานตามที่ต้องการลงไป ในที่นี้ให้วาดวงกลมด้วยคำสั่ง Circle โดยกำหนดรัศมีที่ 2.5 mm. หลังจากนั้น เลือกเครื่องหมายถูก ดังแสดงในภาพที่ ก.3
- ขั้นตอนที่ 3 หลังจากได้ภาพ 2 มิติ ของชิ้นงานมาแล้ว ให้เราทำการขึ้นภาพเป็น 3 มิติโดยเลือกคำสั่ง Features จะปรากฏคำสั่งต่างๆในการขึ้นรูป 3 มิติ ในที่นี้ให้เลือก Extruded Boss/Base เพื่อดึงวงกลมที่ได้จาก ขั้นตอนที่ 2 ให้กลายเป็นทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ ก.4 โดยกำหนดขนาดความยาวของทรงกระบอกเป็น 130 mm. แล้วเลือกเครื่องหมายถูก ดังแสดงในภาพที่ ก.5
- เพียงแค่นี้ เราก็จะได้สาย conductor ที่มีรัศมี 2.5 mm. ยาว 130 mm. 1 เส้น ดังแสดงในภาพที่ ก.6 ซึ่งอาจเพิ่มสี ความยาวของโลหะ หรือพื้นผิวอื่นๆได้

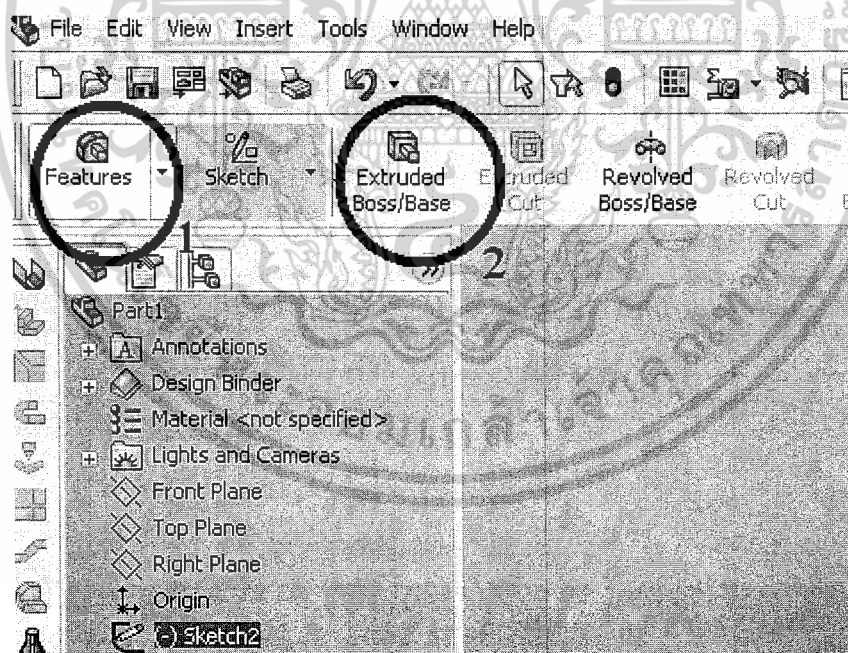


ภาพที่ ก.2 การเลือก Plane ที่ต้องการวาดชิ้นงานในรูป 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

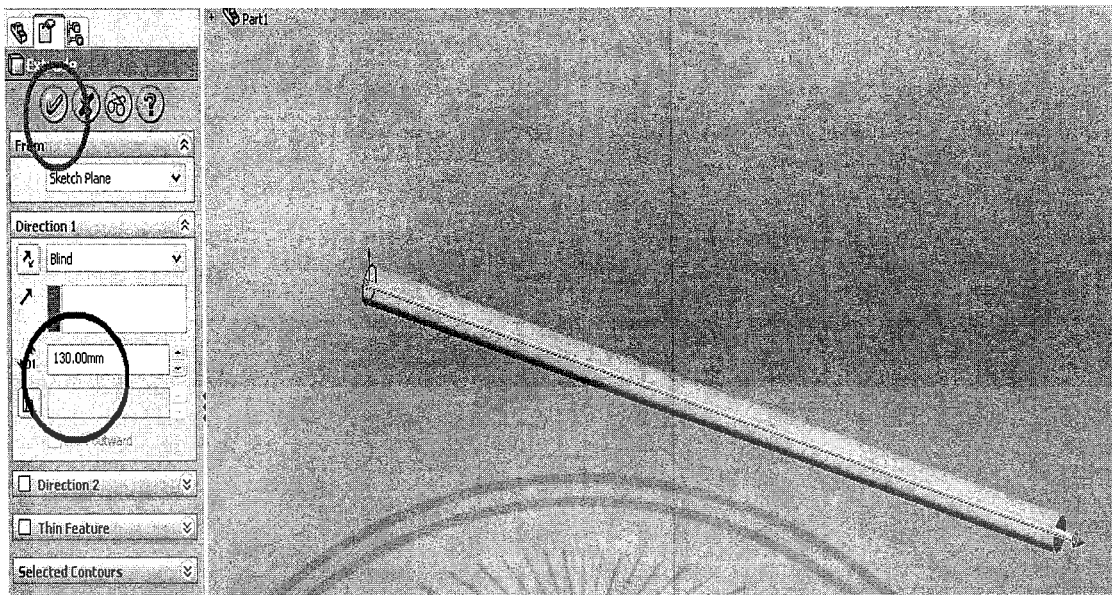


ภาพที่ ก.3 การวาดวงกลมด้วยคำสั่ง Circle รัศมี 2.5 mm.

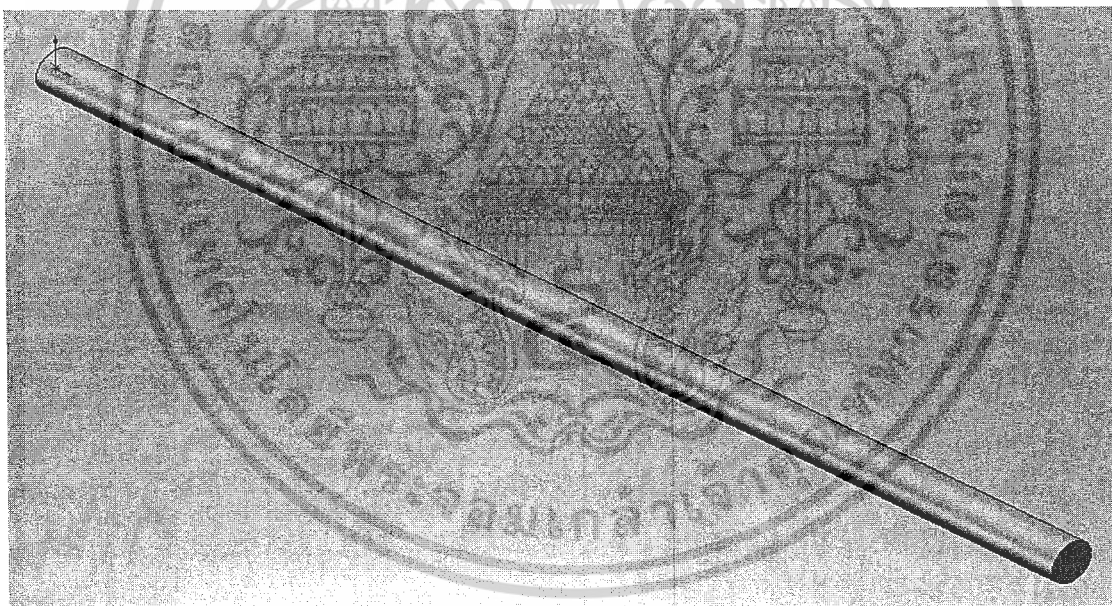


ภาพที่ ก.4 การขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็น 3 มิติ ด้วยคำสั่ง Features และ Extruded Boss/Base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.5 การกำหนดความยาวของทรงกระบอก ขนาด 130 mm.



ภาพที่ ก.6 สาย conductor รัศมี 2.5 mm. ยาว 130 mm. 1 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 การสร้าง Conductor Screen, Insulation และ Insulation Screen

ขั้นตอนที่ผ่านมา เราได้อธิบายคร่าว ๆ เกี่ยวกับการสร้างสาย Conductor เพียงเส้นเดียวต่อไปนี้จะเป็นการสร้าง Conductor Screen, Insulation และ Insulation Screen ซึ่งมีวิธีการสร้างที่คล้ายคลึงกันดังนี้

ในขั้นแรกนั้นให้เปิดงานชิ้นใหม่ขึ้นมาแล้ว ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 เหมือนการสร้างทรงกระบอกของ Conductor โดยกำหนดค่าดังนี้

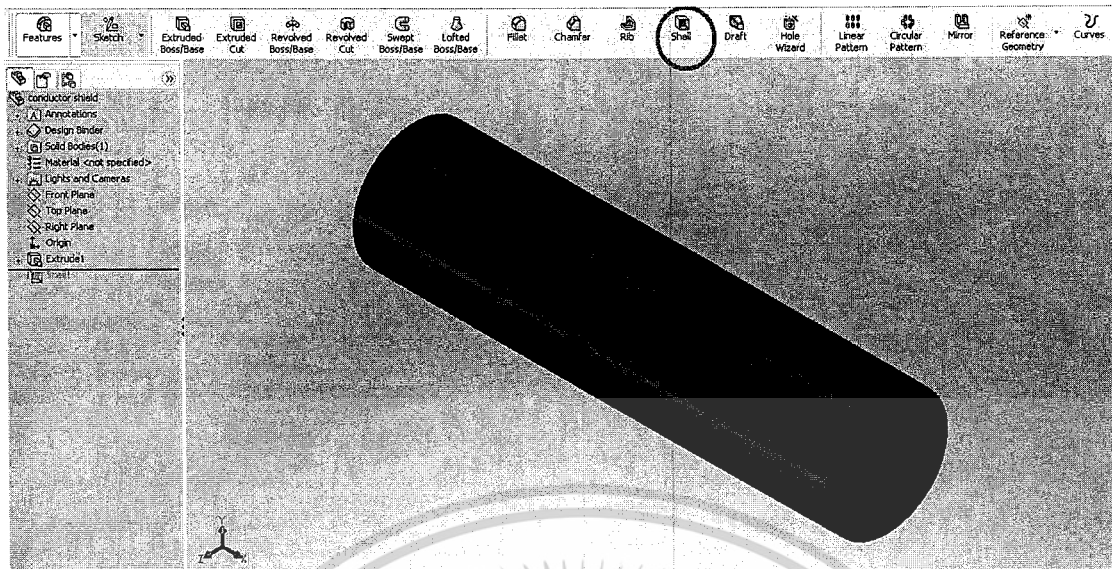
Conductor Screen รัศมีวงกลม 15 mm. ความยาวของทรงกระบอก 115 mm. ดังภาพที่ ก.7

Insulation รัศมีวงกลม 35 mm. ความยาวของทรงกระบอก 100 mm. ดังภาพที่ ก.10

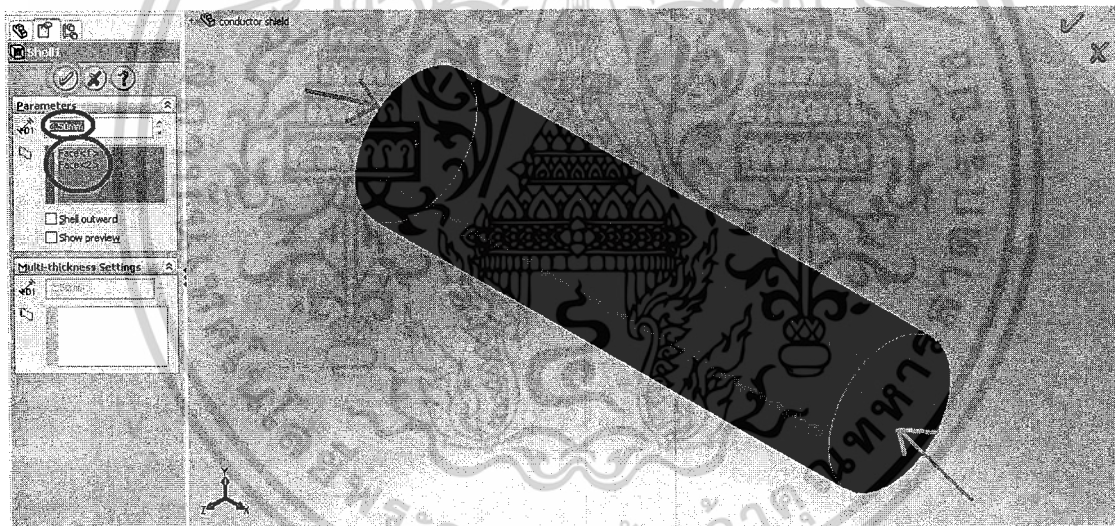
Insulation Screen รัศมีวงกลม 36.5 mm. ความยาวของทรงกระบอก 80 mm. ดังภาพที่ ก.13

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ทรงกระบอกมาแล้วให้เราเลือกคำสั่ง Shell เพื่อทำให้ภายในทรงกระบอกกลวง ซึ่งในการใช้คำสั่ง Shell นั้น เราจะต้องทำการเลือกพื้นที่ผิวที่จะทำการ shell ของ Conductor Screen, Insulation และ Insulation Screen ดังแสดงในภาพที่ ก.8, ก.11 และ ก.14 ตามลำดับ โดยเลือก Face1 และ Face2 ดังที่ลูกศรชี้ หลังจากนั้นจึงกำหนดความหนาของ shell ที่ 2.50 mm. สำหรับ Conductor Screen, 20 mm. สำหรับ Insulation และ 1.50 mm. สำหรับ Insulation Screen แล้วเลือกเครื่องหมายถูก

เพียงเท่านี้เราจะได้ Conductor Screen ที่มีรัศมีภายนอก 15 mm. หนา 2.5 mm. ยาว 115 mm., Insulation ที่มีรัศมีภายนอก 35 mm. หนา 20 mm. ยาว 100 mm. และ Insulation Screen ที่มีรัศมีภายนอก 36.5 mm. หนา 1.5 mm. ยาว 80 mm ดังแสดงในภาพที่ ก.9, ก.12 และ ก.15 ตามลำดับ

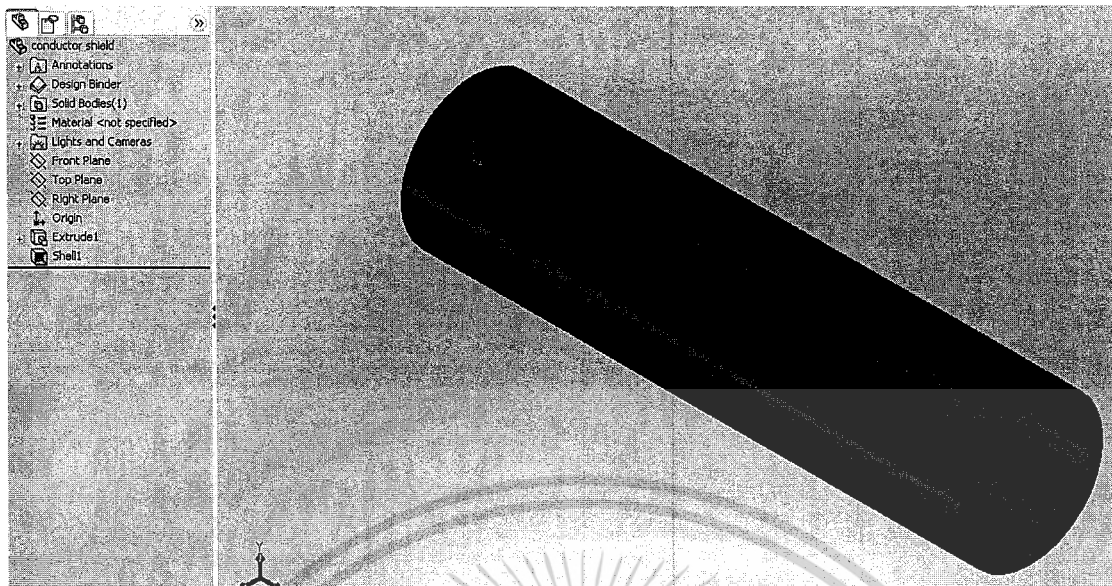


ภาพที่ ก.7 ทรงกระบอก รัศมี 15 mm.ยาว 115 mm. สำหรับสร้าง Conductor Screen



ภาพที่ ก.8 การเลือกพื้นผิวที่จะทำการ shell . สำหรับสร้าง Conductor Screen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

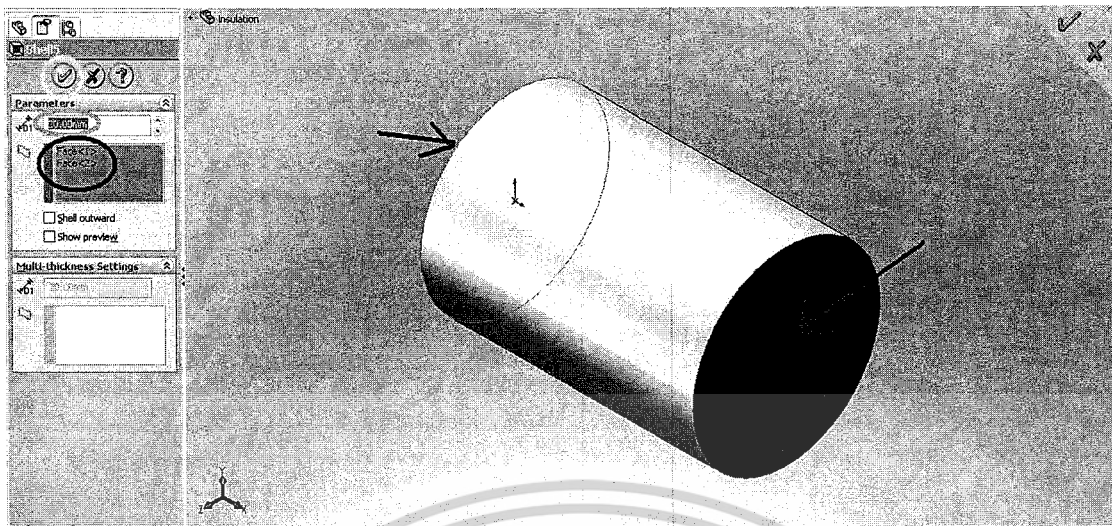


ภาพที่ ก.9 Conductor Screen ที่มีรัศมีภายนอกนอก 15 mm. หน้า 2.5 mm.
ยาว 115 mm.



ภาพที่ ก.10 ทรงกระบอก รัศมี 35 mm. ยาว 100 mm. สำหรับสร้าง Insulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

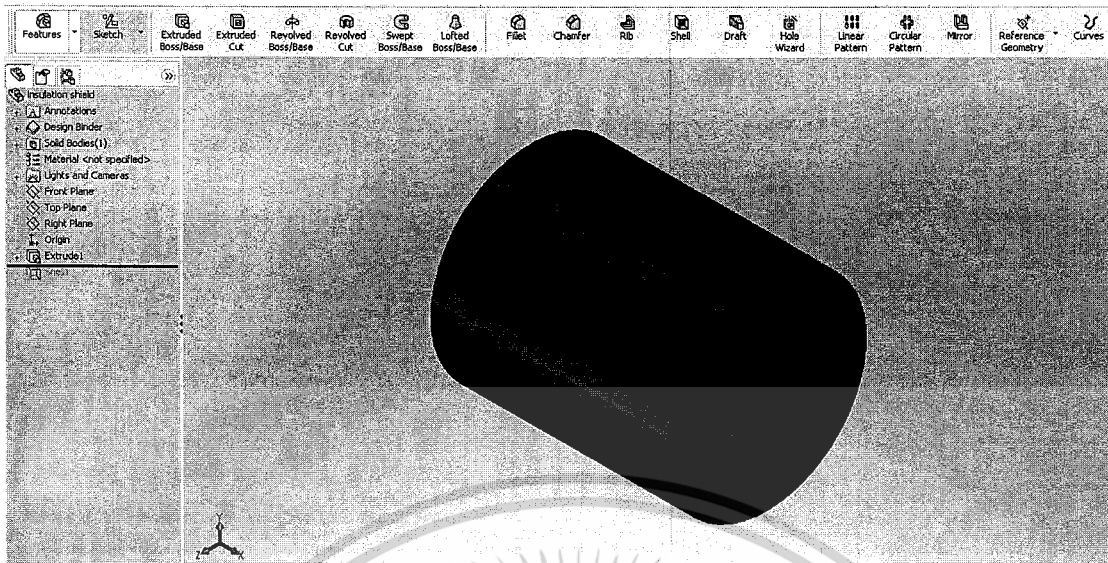


ภาพที่ ก.11 การเลือกพื้นผิวที่จะทำการ shell สำหรับสร้าง Insulation

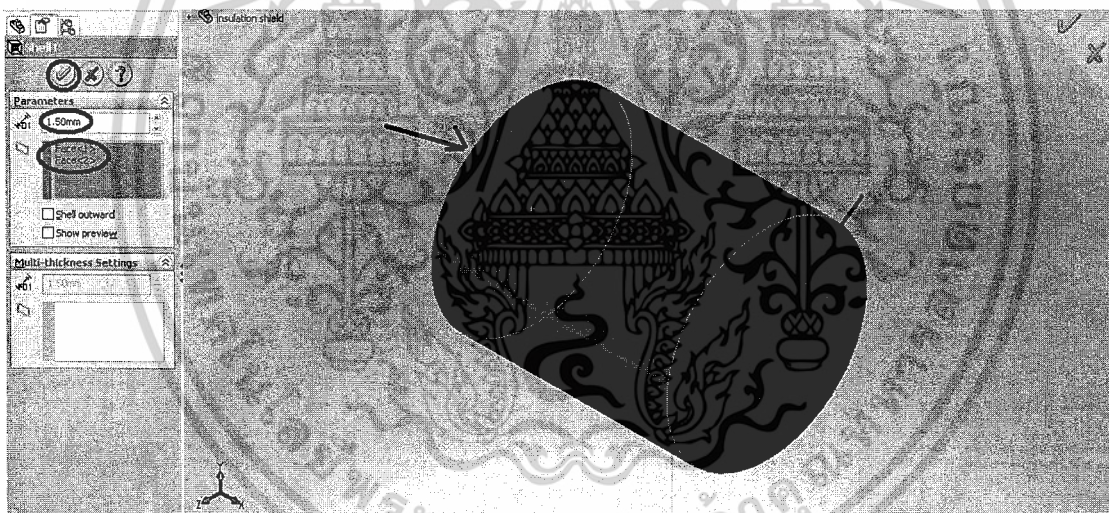


ภาพที่ ก.12 Insulation ที่มีรัศมีภายนอก 35 mm. หนา 20 mm. ยาว 100 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.13 ทรงกระบอก รัศมี 36.5 mm. ยาว 80 mm. สำหรับสร้าง Insulation Screen



ภาพที่ ก.14 การเลือกพื้นผิวที่จะทำการ shell สำหรับสร้าง Insulation Screen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.15 Insulation Screen ที่มีรัศมีภายนอก 36.5 mm. หน้า 1.5 mm. ยาว 80 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 การสร้าง Jacket

ในขั้นตอนที่ผ่านมาเราได้กล่าวถึงการสร้าง Conductor, Conductor Screen, Insulation และ Insulation Screen ไปแล้ว ต่อไปนี้ เราจะกล่าวถึงวิธีการสร้าง Jacket ซึ่งเป็นชั้นนอกสุดของ สายเคเบิลใต้ดิน โดยมีวิธีการดังนี้

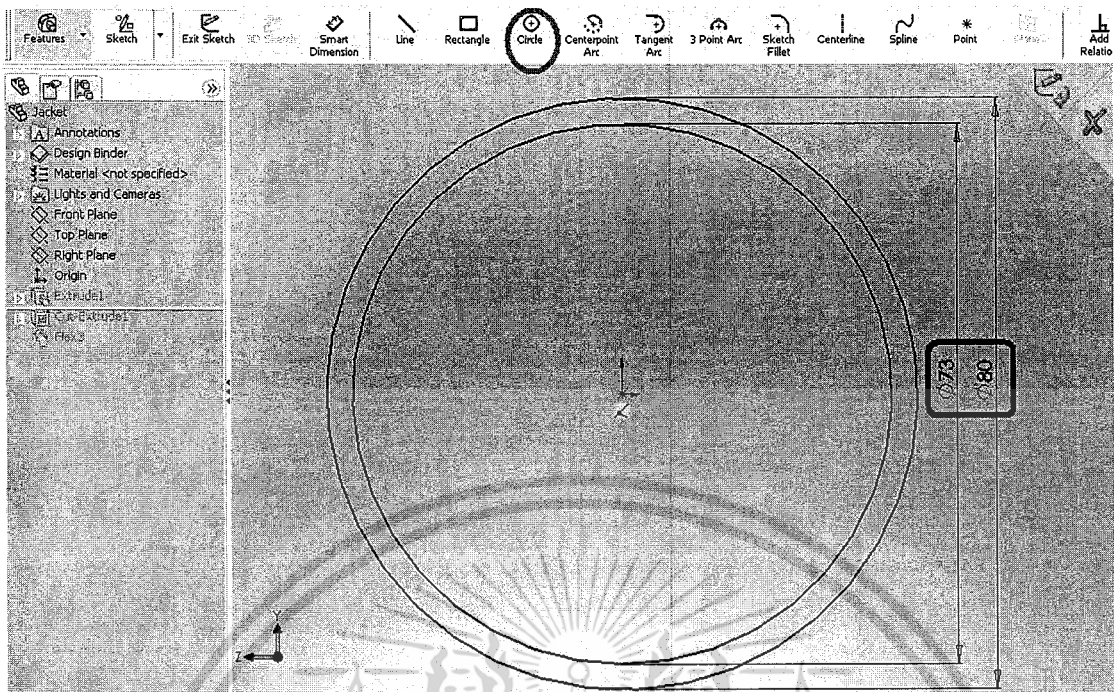
ขั้นตอนที่ 1 อันดับแรกเราจะต้องทำการเลือก Plane ก่อน โดยการคลิกขวาที่ Right Plane แล้ว เลือก Insert Sketch ดังแสดงในภาพที่ ก.2

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากที่เราเลือก Plane แล้ว จะปรากฏคำสั่งต่างๆ ในการสร้างรูปชิ้นงานในลักษณะ 2 มิติขึ้น ให้เราทำการวาดชิ้นงานตามที่ต้องการลงไป ในที่นี้ ให้วาดวงกลมขึ้นมา 2 วง ด้วยคำสั่ง Circle โดยวงกลมแต่ละวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73 และ 80 mm. ดังแสดงในภาพที่ ก.16

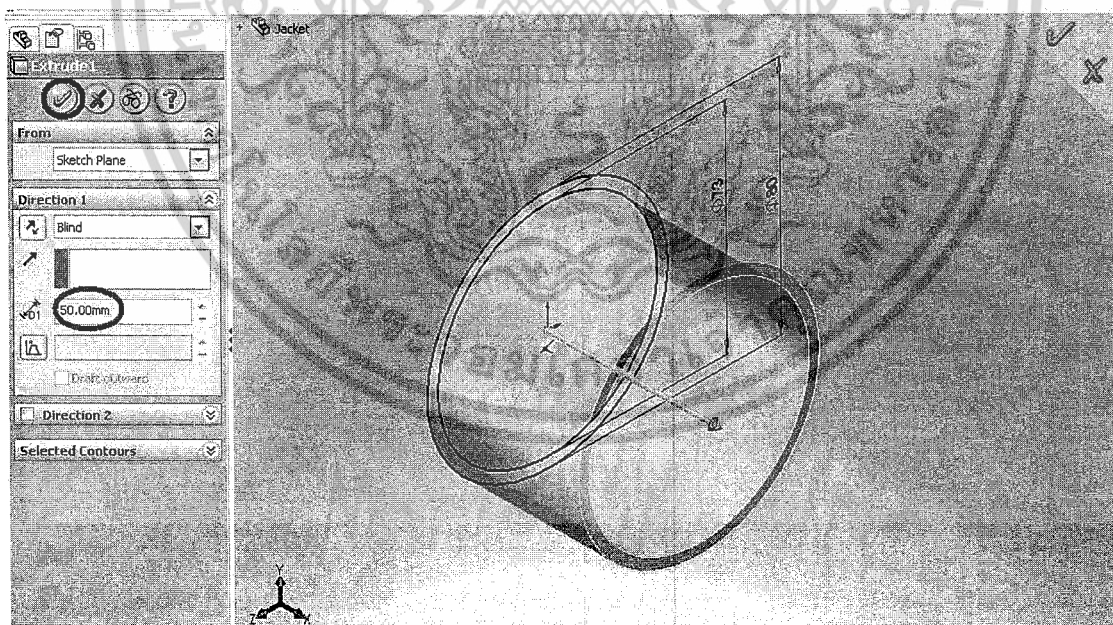
ขั้นตอนที่ 3 หลังจากได้ภาพ 2 มิติ ของชิ้นงานมาแล้ว ให้เราทำการขึ้นภาพเป็น 3 มิติโดยเลือกคำสั่ง Features จะปรากฏคำสั่งต่างๆ ในการขึ้นรูป 3 มิติ ในที่นี้ให้เลือก Extruded Boss/Base เพื่อดึงวงกลมที่ได้จาก ขั้นตอนที่ 2 ให้กลายเป็นทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ ก.17 โดยกำหนดขนาดความยาวของชิ้นงานที่ 50 mm. แล้วเลือกเครื่องหมายถูก ดังแสดงในภาพที่ ก.17 ซึ่งวิธีที่กล่าวมานี้ เป็นวิธีสร้างทรงกระบอกกลวงอีกวิธีหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ทรงกระบอกกลวงมาแล้ว ให้เราเจาะรูชิ้นงานด้วยคำสั่ง Extruded cut ซึ่งการใช้คำสั่งนี้ให้เราเลือกพื้นผิวที่ต้องการเจาะรูก่อน แล้วจึงกดใช้คำสั่ง Extruded cut ดังแสดงในภาพที่ ก.18 เมื่อมีการใช้คำสั่ง Extruded cut โปรแกรมจะให้เราทำการ Sketch รูปภาพในลักษณะ 2 มิติลงบนผิวที่ได้เลือกไว้ ในที่นี้ให้เราวาด วงกลมรัศมี 1.50mm จำนวน 12 วง รอบ Jacket ซึ่งมีระยะห่างจุดศูนย์กลางในแนวแกน x-y ดังรูป แล้วเลือกเครื่องหมายถูก ดังแสดงในรูปที่ ก.19 หลังจากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่าง Cut- Extruded ให้เราเลือกการเจาะทะลุเป็นแบบ Through All ก่อนเลือกถูก ดังภาพที่ ก.20

เพียงเท่านี้เราก็จะได้ Jacket ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 80 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 73 mm. ยาว 65 mm. ซึ่งมีการเจาะรูตามแนวขอบ ด้วยวงกลมรัศมี 1.5 mm. จำนวน 12 จุด ดังแสดงในภาพที่ ก.21

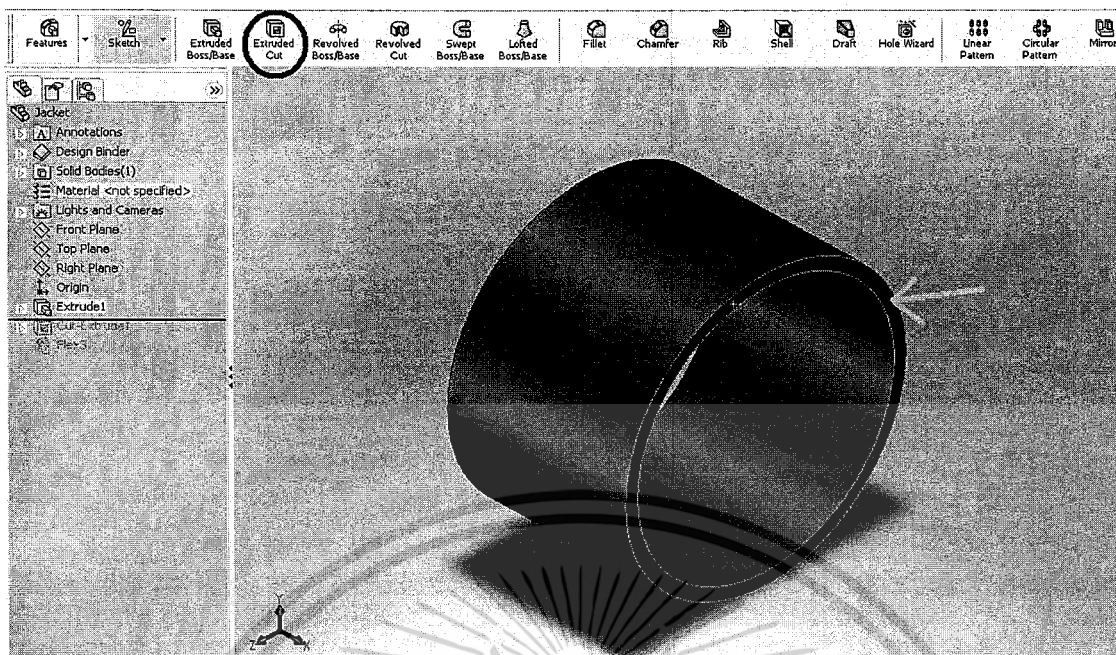


ภาพที่ ก.16 การสร้างวงกลม 2 วง ด้วยคำสั่ง Circle โดย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 73 และ 80 mm.

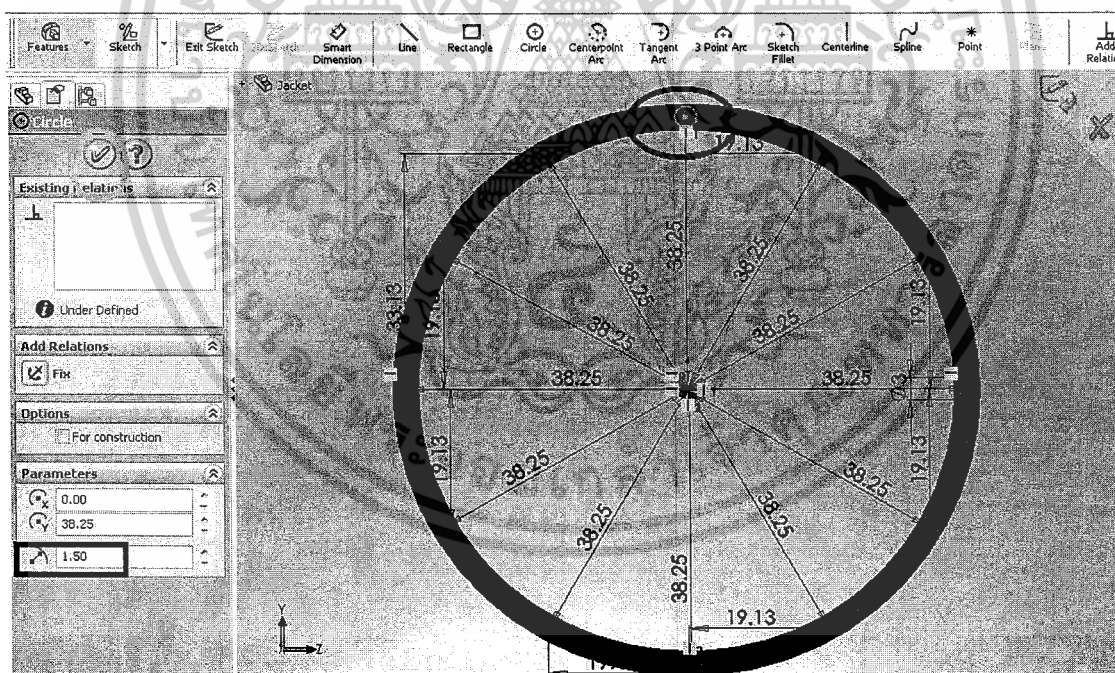


ภาพที่ ก.17 การกำหนดความยาวของทรงกระบอกกลวง ที่ขนาด 50 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

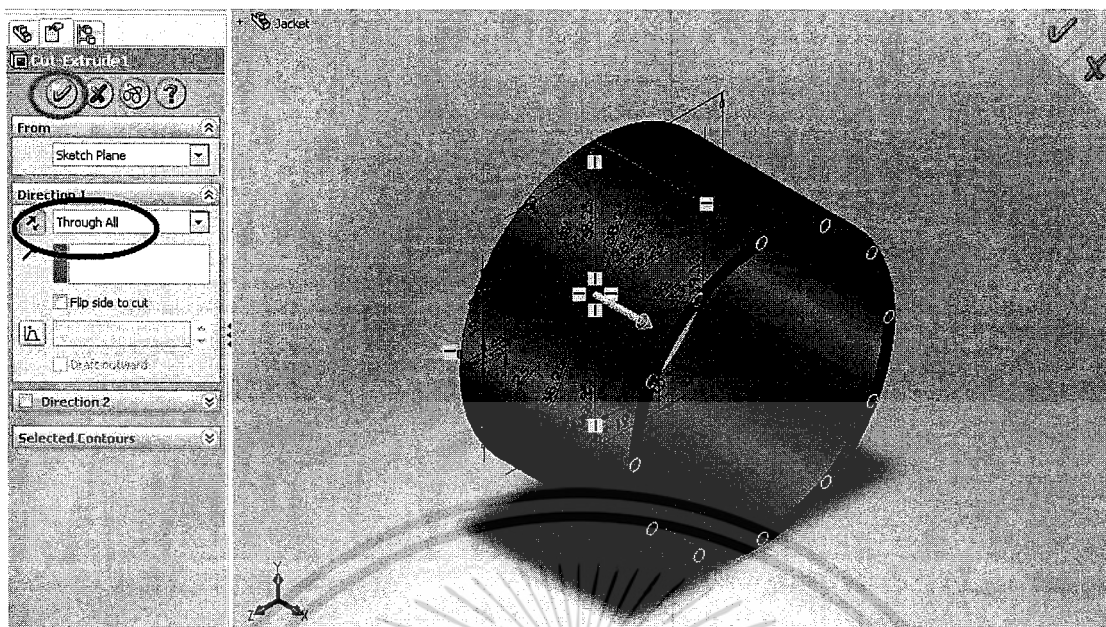


ภาพที่ ก.18 การเลือกพื้นผิวที่ต้องการเจาะด้วยคำสั่ง Extruded cut



ภาพที่ ก.19 การวาดวงกลมขนาด วงกลมรัศมี 1.50 mm. จำนวน 12 วง รอบ Jacket ซึ่งมีระยะห่างจุดศูนย์กลางในแนวแกน x-y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.20 การเลือกการเจาะทะลุเป็นแบบ Through All



ภาพที่ ก.21 Jacket ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 80 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 73 mm. ยาว 65 mm. ซึ่งมีการเจาะรูตามแนวขอบ ด้วยวงกลมรัศมี 1.5 mm. จำนวน 12 จุด

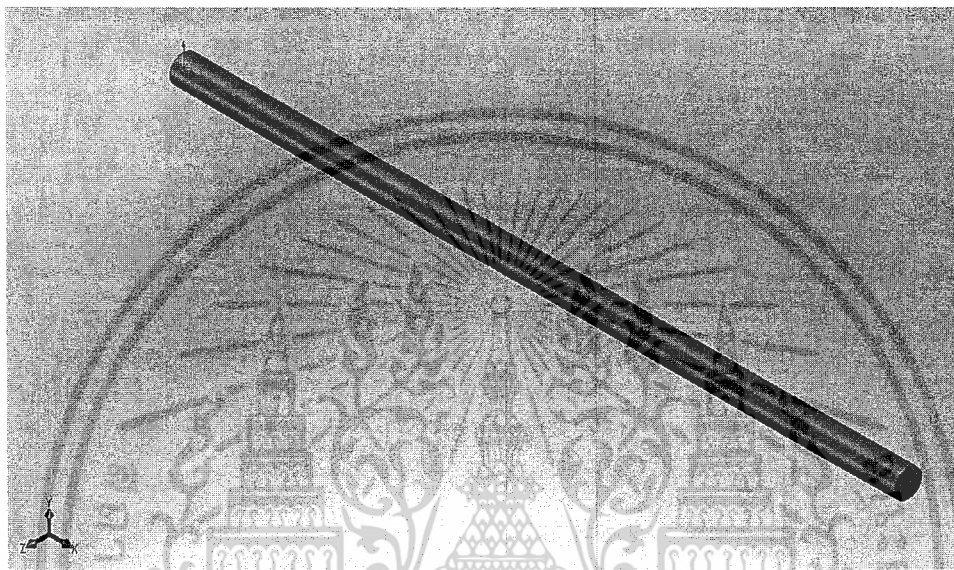
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 การรวม Concentric Neutral เข้ากับ Jacket และการปิดเกลียว

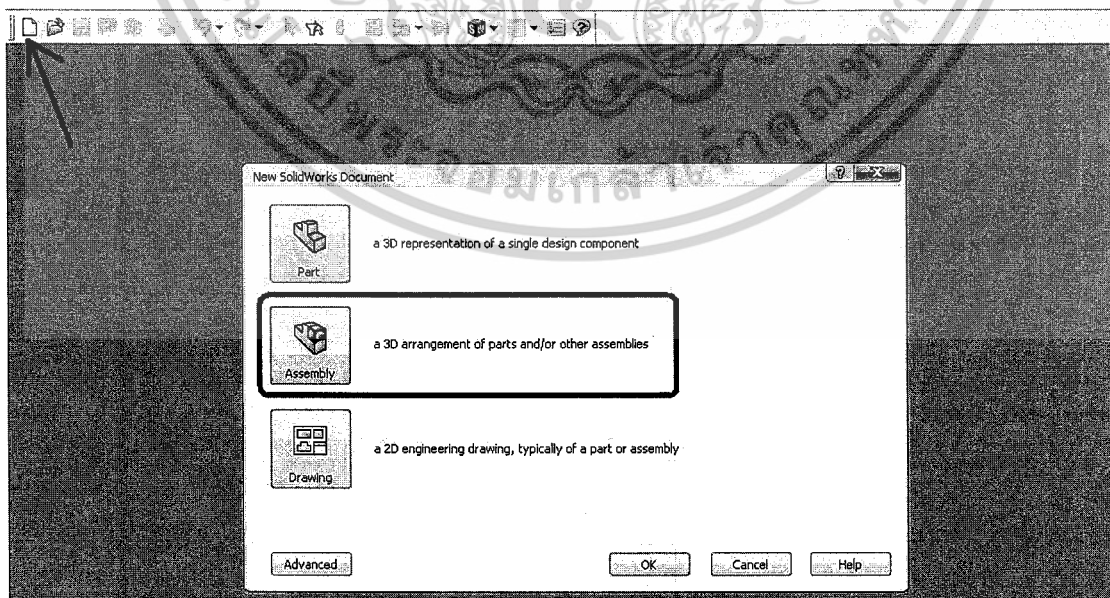
หลังจากที่เราได้อุปกรณ์ครบแล้ว เราจึงมาทำการรวมอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันเริ่มแรกรวม Concentric Neutral ซึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก รัศมี 1.5 mm. ยาว 80 mm. ดังภาพที่ ก.22 จำนวน 12 ชิ้น เข้ากับ Jacket ที่เราได้สร้างขึ้น โดยมีวิธีการประกอบดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 สร้างงานขึ้นใหม่ขึ้นมาก โดยเลือกการสร้างเป็นแบบ Assembly ดังภาพที่ ก.23 ซึ่งเป็นการประกอบอุปกรณ์ที่สร้างด้วยคำสั่ง Part เข้าไว้ด้วยกัน หลังจากเลือก Assembly แล้ว โปรแกรมจะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component โดยอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ ก.24 ให้เราทำการเลือกชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งชิ้นงานแรกที่เราเลือกนี้จะวางลงตำแหน่ง origin อัตโนมัติ และจะเป็นตัวหลักในการนำชิ้นงานอื่นๆเข้ามาประกอบ ในที่นี้ให้เราเลือก Jacket มาเป็นชิ้นงานหลักและใช้คำสั่ง Insert Component เพื่อเลือก Concentric Neutral จำนวน 12 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ ก.25
- ขั้นตอนที่ 2 หลังจากดึงชิ้นงานออกมาครบแล้ว ให้ใช้คำสั่ง Mate ในการรวมชิ้นงานแต่ละชิ้นเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ ก.26 ซึ่งในโหมดคำสั่ง Mate นี้เราจะประกอบชิ้นงานโดยเลือกพื้นผิวที่ส่วนปลายของ Concentric Neutral กับรูที่เจาะไว้ของ Jacket ปลายของ Concentric Neutral ชิ้นนั้นจะเลื่อนไปประกอบกับรูที่เตรียมไว้ อัตโนมัติ แล้วเลือกเครื่องหมายถูกที่ปรากฏขึ้นมา ดังภาพที่ ก.27 ประกอบ Concentric Neutral ทุกเส้นเข้ากับ Jacket เรียบร้อยแล้ว จึงเลือกถูกทางซ้ายมือ ดังแสดงในภาพที่ ก.28
- ขั้นตอนที่ 3 เมื่อประกอบ Concentric Neutral เข้ากับ Jacket เรียบร้อยแล้ว ต่อไปเราจะทำการปิดเกลียวด้วยโหมด Part เนื่องจากคำสั่งปิดเกลียวนั้น ไม่สามารถใช้ โหมด Assembly ปิดได้ จึงต้อง save ชิ้นงานที่ประกอบแล้วไว้ในโหมดของ Part เพื่อปิดเกลียว ดังแสดงในภาพที่ ก.29 แล้วจึง เปิด File ที่ save ในโหมดของ Part ขึ้นมา ดังภาพที่ ก.30 จะได้ Concentric Neutral ที่ประกอบเข้ากับ Jacket เรียบร้อยแล้วในโหมดของ Part ดังภาพที่ ก.31

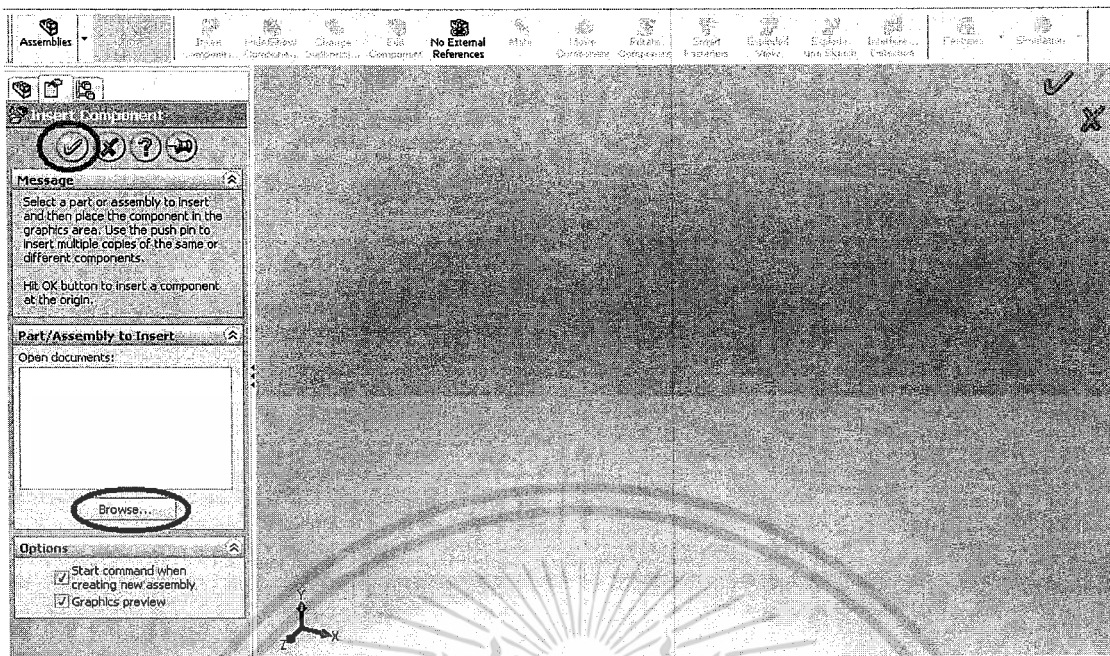
ขั้นตอนที่ 4 ทำการบิดเกลียวโดยเลือกคำสั่ง Flex จาก Features ใน Insert ดังภาพที่ ก.32 หลังจากเข้าสู่คำสั่ง Flex แล้วให้ลากกรอบสี่เหลี่ยมคลุมชิ้นงานทั้งหมด จะปรากฏแกนหมุนของชิ้นงานดังภาพที่ ก.33 และทำการบิดเกลียวโดยกำหนดค่าต่างๆ ดังภาพที่ ก.34 แล้วเลือกเครื่องหมายถูก จะได้ชิ้นงานที่มีการรวมกันของ Concentric Neutral กับ Jacket ในลักษณะบิดเกลียว ดังแสดงภาพที่ ก.35



ภาพที่ ก.22 Concentric Neutral รัศมี 1.5 mm. ยาว 80 mm.



ภาพที่ ก.23 การสร้างงานชิ้นใหม่ ด้วย Assembly เพื่อประกอบชิ้นงานที่ต้องการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

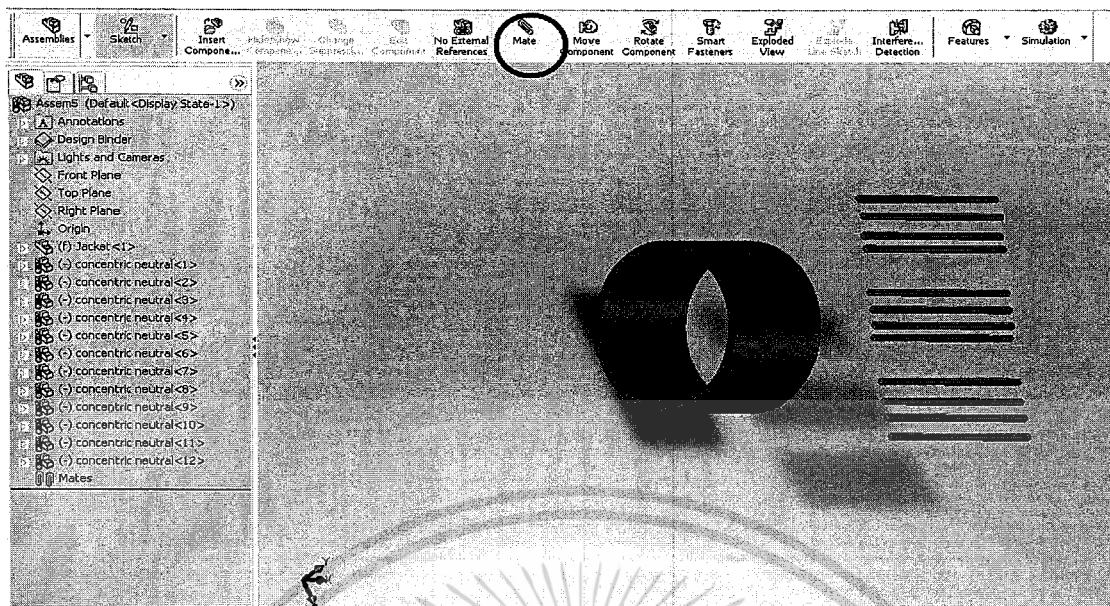


ภาพที่ ก.24 หน้าต่างคำสั่ง Insert Component เพื่อเลือกชิ้นงานที่ต้องการประกอบ



ภาพที่ ก.25 การเลือกชิ้นงาน Jacket เป็นตัวหลักก่อนที่จะเลือกชิ้นงานชิ้นต่อไป
ด้วยคำสั่ง Insert Component

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

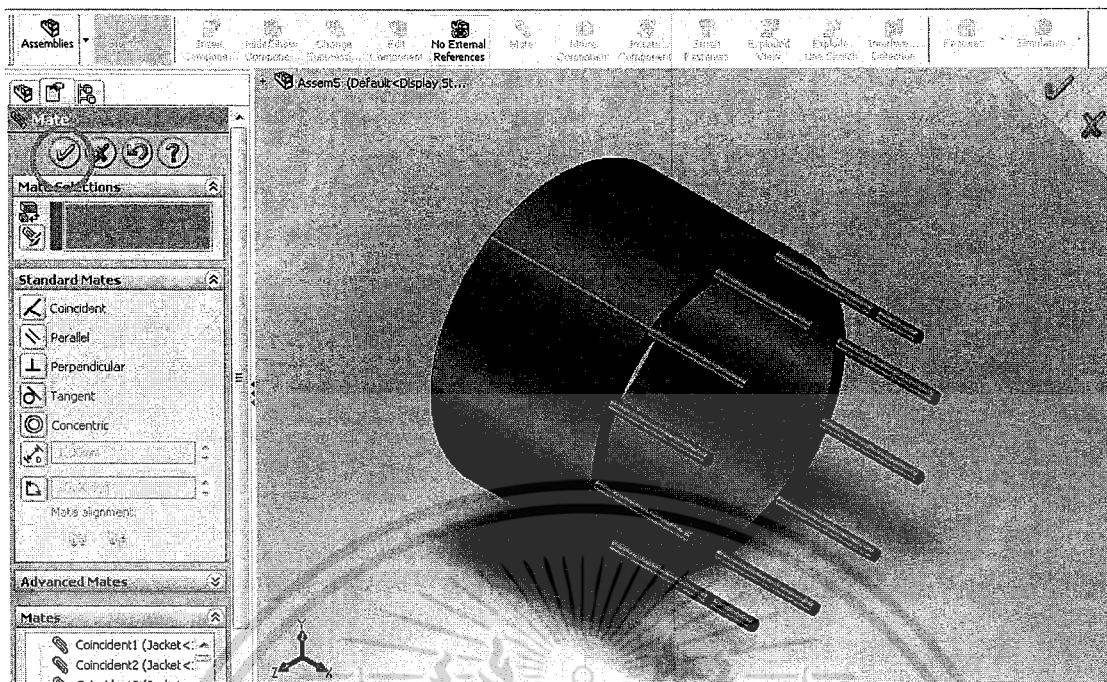


ภาพที่ ก.26 การนำชิ้นงานทั้งหมดมาประกอบกันด้วย คำสั่ง Mate

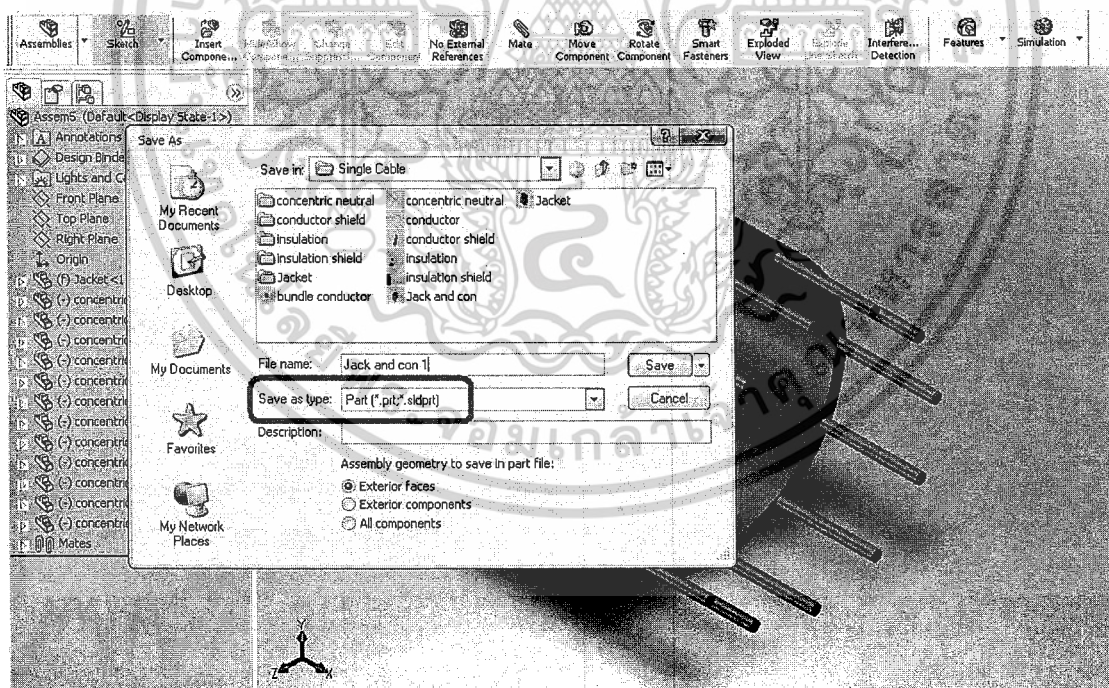


ภาพที่ ก.27 การใช้งาน คำสั่ง Mate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

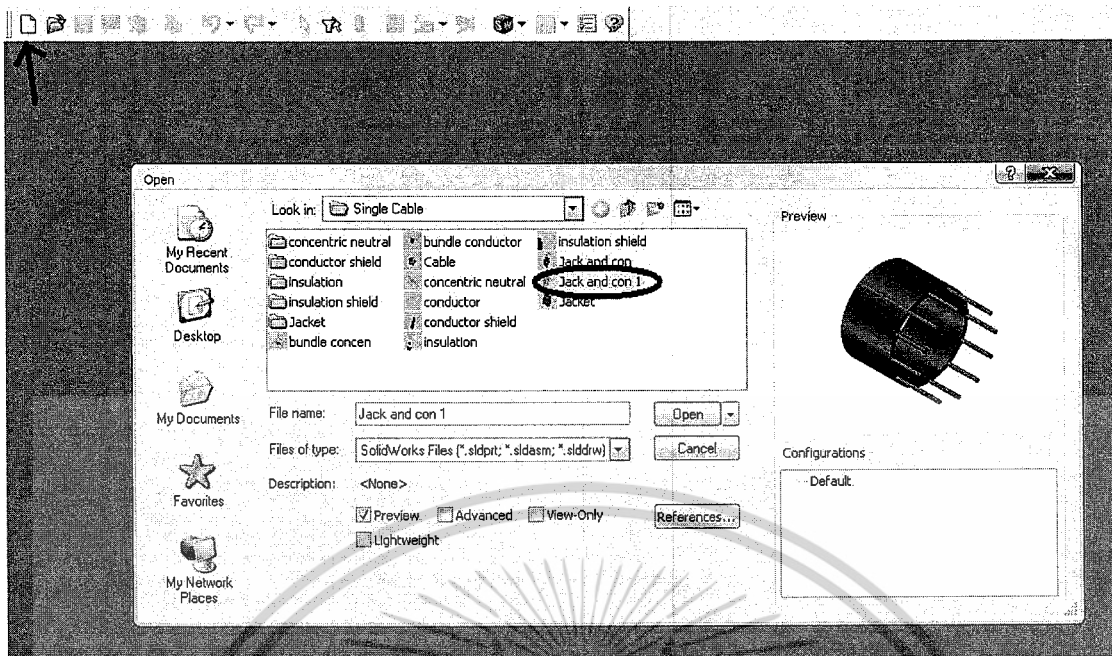


ภาพที่ ก.28 Concentric Neutral ที่ประกอบเข้ากับ Jacket เรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ ก.29 การ Save ให้อยู่ในโหมด Part

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

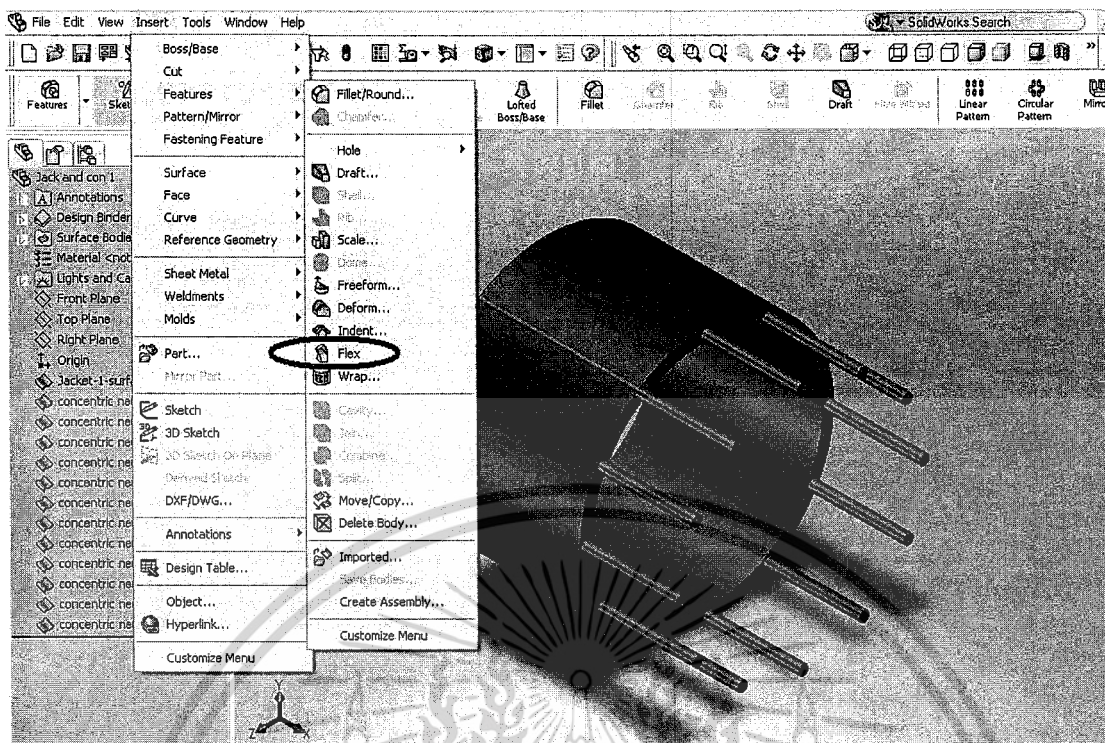


ภาพที่ ก.30 การเปิด File ที่ save ไว้ในโหมดของ Part

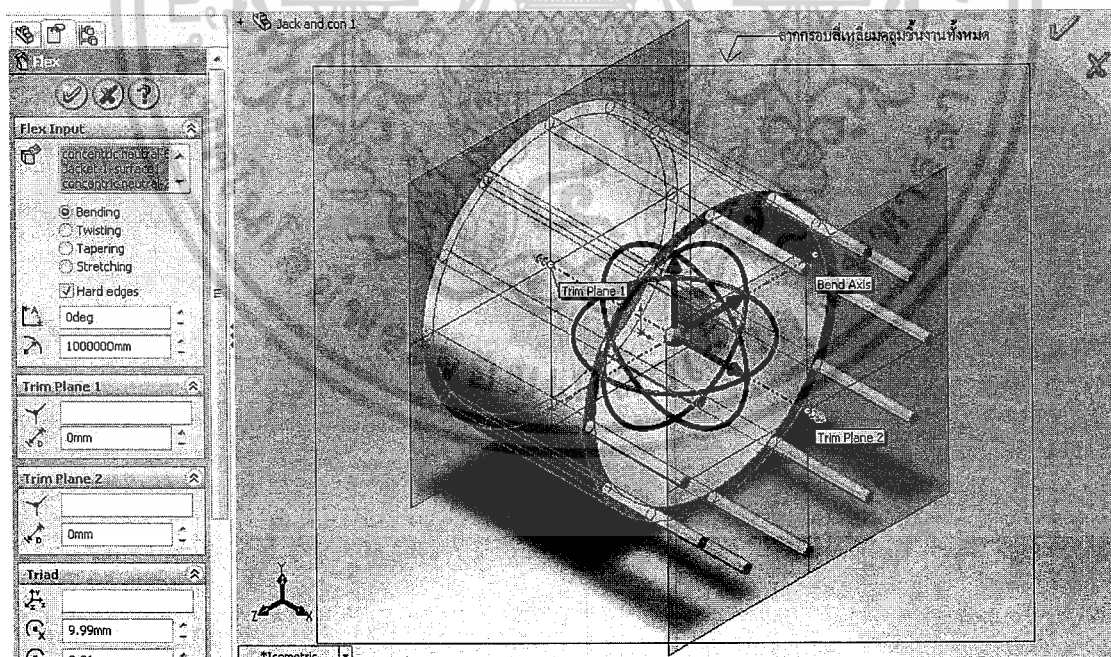


ภาพที่ ก.31 แสดง Concentric neutral ที่ประกอบเข้ากับ Jacket เรียบร้อยแล้ว
ในโหมดของPart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

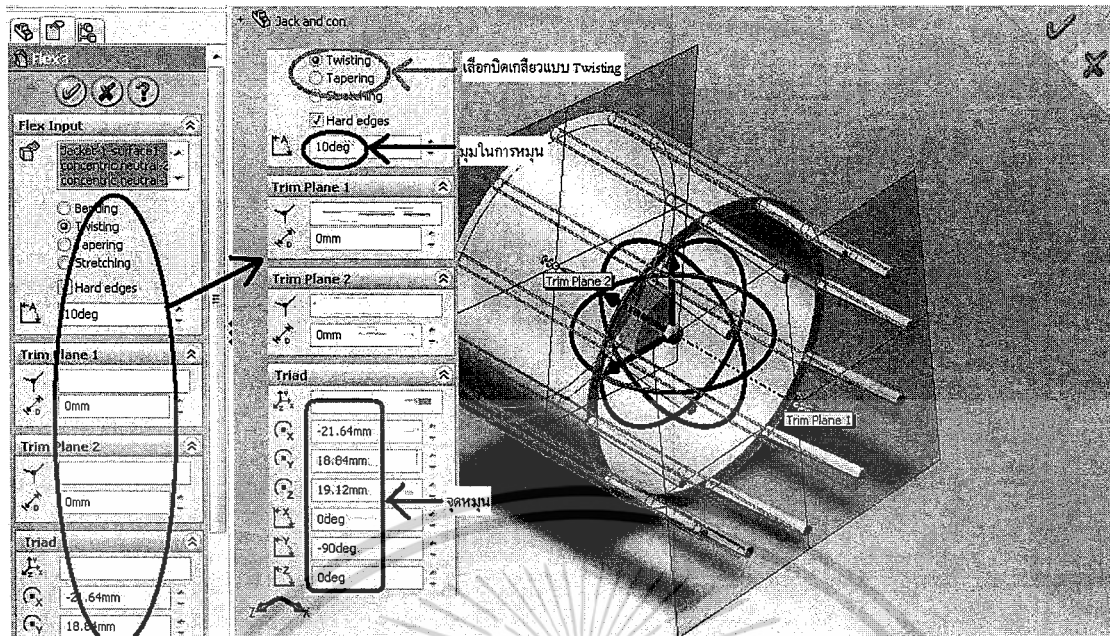


ภาพที่ ก.32 การเข้าสู่ Flex เพื่อทำการบิดเกลียวชิ้นงาน

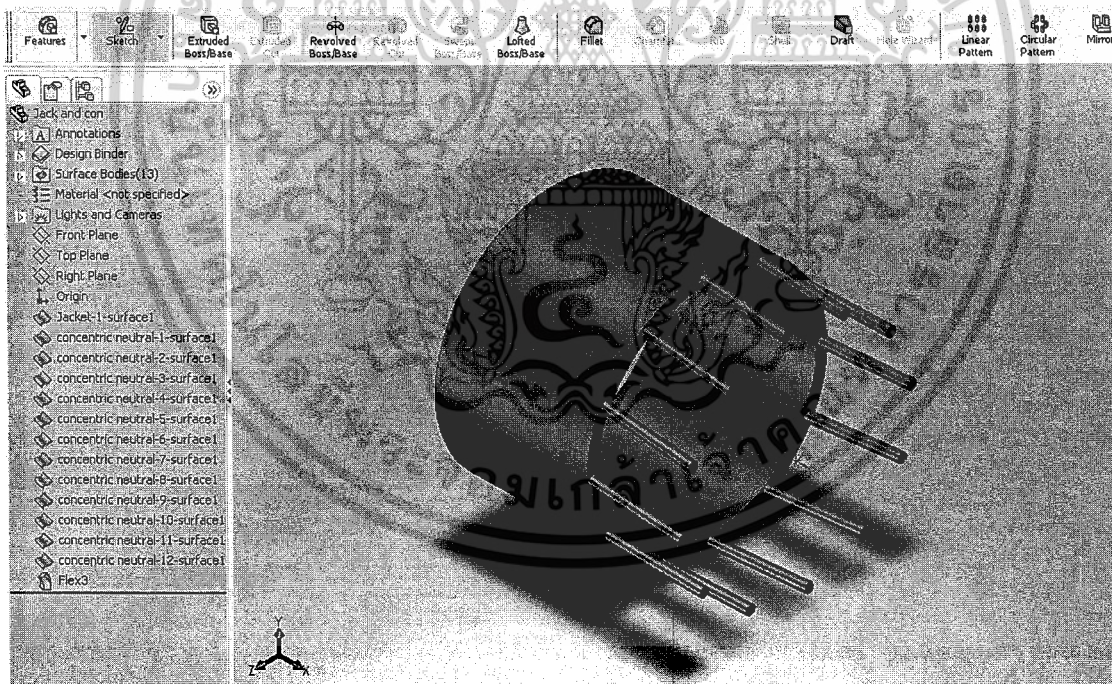


ภาพที่ ก.33 แกนหมุนของชิ้นงานด้วยการใช้คำสั่ง Flex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.34 กำหนดค่าต่างๆในการบิดเกลียวชิ้นงาน



ภาพที่ ก.35 Concentric Neutral ที่ประกอบเข้ากับ Jacket หลังจากทำการ Flex เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน

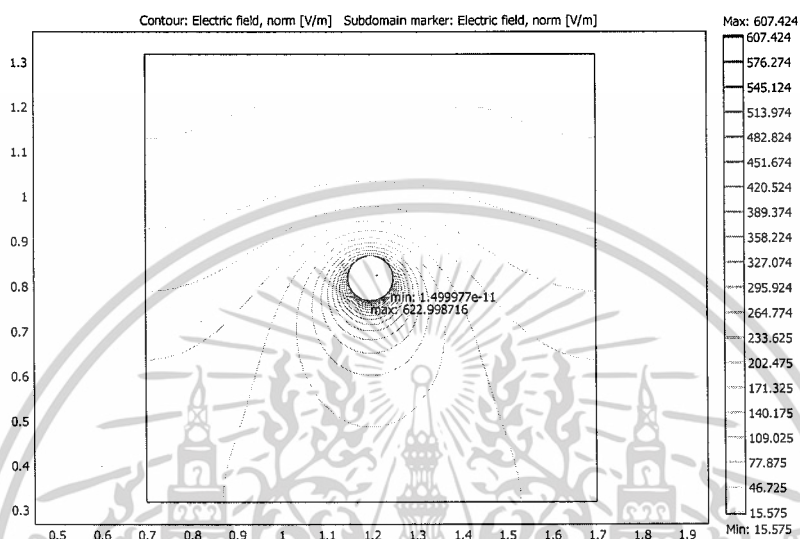
ในขั้นตอนสุดท้ายคือ การรวมอุปกรณ์ทุกชิ้นเข้าด้วยกัน โดย ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ในหัวข้อที่ 4 จะได้ โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อรวมชิ้นส่วนทั้งหมดด้วย Assembly โดยมี สาย conductor bundle รวม 19 เส้น ดังภาพที่ ก.36



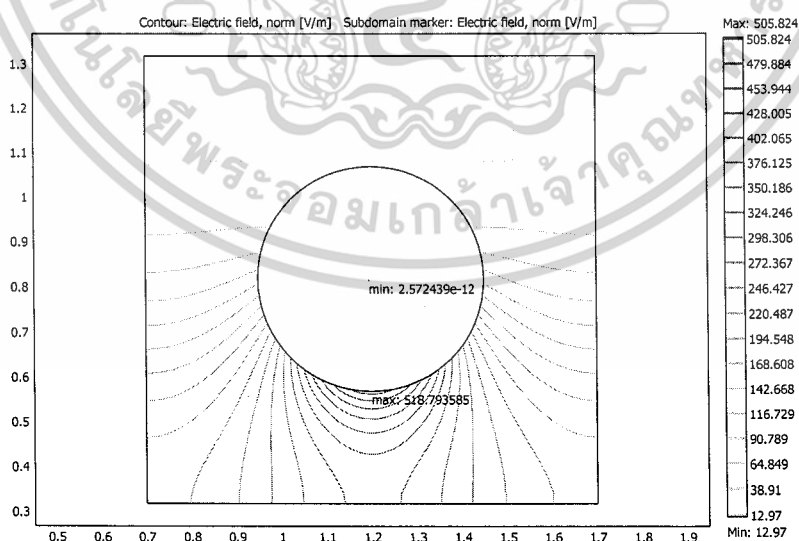
ภาพที่ ก.36 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน

ภาคผนวก ข

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ Finite Element เพื่อหาระยะที่เหมาะสมระหว่าง ตัวนำกับกราวด์ของกรอบสี่เหลี่ยม

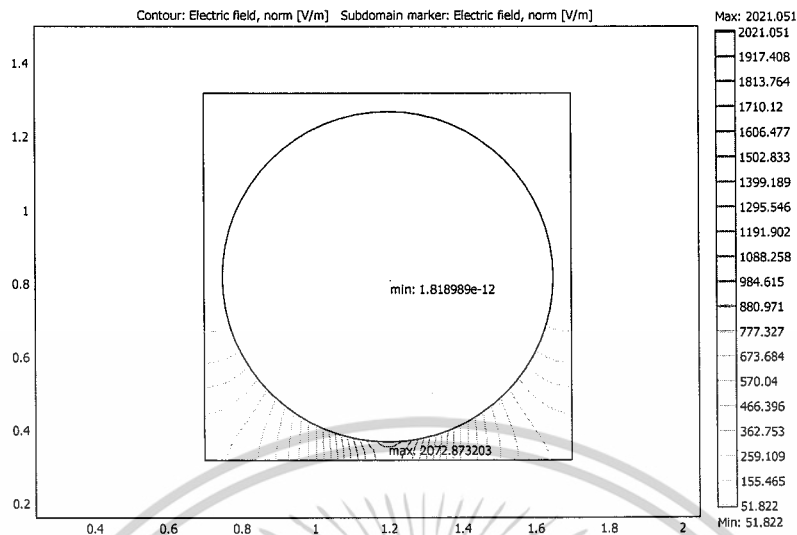


ภาพที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า ที่ระยะ $D = 100$ mm



ภาพที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า ที่ระยะ $D = 500$ mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า ที่ระยะ $D = 900$ mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ตารางค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด-ต่ำสุด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำขนาดต่าง ๆ
เมื่อกราวด์อยู่ ณ จุดเดิม ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำ D (mm)	ระยะห่างระหว่าง ตัวนำกับกราวด์ R (mm)	ระยะห่างจากตัวนำ ถึงกราวด์ R/D	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)
10	495	49.50D	3130.34
20	490	24.50D	1803.19
30	485	16.17D	1329.14
40	480	12.00D	1083.79
50	475	9.50D	932.66
60	470	7.83D	830.18
70	465	6.64D	756.8
80	460	5.75D	701.2
90	455	5.06D	658.03
100	450	4.50D	622.99
110	445	4.05D	595.04
120	440	3.67D	572.47
130	435	3.35D	553.33
140	430	3.07D	536.16
150	425	2.83D	522.94
160	420	2.63D	511.22
170	415	2.44D	501.35
180	410	2.28D	492.54
190	405	2.13D	485.44
200	400	2.00D	479.56
210	395	1.88D	474.26
220	390	1.77D	469.78
230	385	1.67D	465.69
240	380	1.58D	463.28
250	375	1.50D	460.75
260	370	1.42D	458.44
270	365	1.35D	457.56
280	360	1.29D	456.78
290	355	1.22D	455.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำ D (mm)	ระยะห่างระหว่าง ตัวนำกับกราวด์ R (mm)	ระยะห่างจากตัวนำ ถึงกราวด์ R/D	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)
300	350	1.17D	455.19
310	345	1.11D	455.34
320	340	1.06D	456.03
330	335	1.02D	457.11
340	330	0.97D	458.78
350	325	0.93D	460.36
360	320	0.89D	461.89
370	315	0.85D	464.08
380	310	0.82D	466.56
390	305	0.78D	469.96
400	300	0.75D	472.46
410	295	0.72D	475.71
420	290	0.69D	480.96
430	285	0.66D	482.94
440	280	0.64D	486.73
450	275	0.61D	491.68
460	270	0.59D	496.36
470	265	0.56D	501.31
480	260	0.54D	506.67
490	255	0.52D	512.61
500	250	0.50D	518.79
510	245	0.48D	525.37
520	240	0.46D	532.69
530	235	0.44D	539.32
540	230	0.43D	547.58
550	225	0.41D	555.71
560	220	0.39D	564.37
570	215	0.38D	573.46
580	210	0.36D	583.11
590	205	0.35D	593.51
600	200	0.33D	604.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

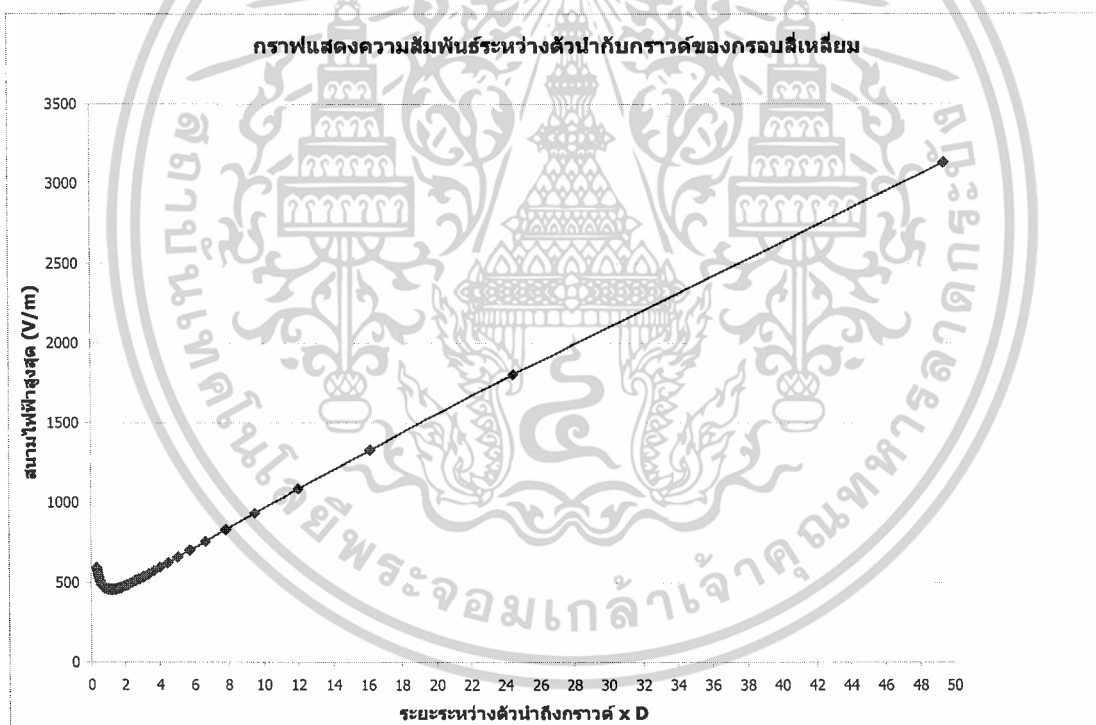
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำ D (mm)	ระยะห่างระหว่าง ตัวนำกับกราวด์ R (mm)	ระยะห่างจากตัวนำ ถึงกราวด์ R/D	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)
610	195	0.32D	616.56
620	190	0.31D	628.07
630	185	0.29D	640.87
640	180	0.28D	654.49
650	175	0.27D	669.25
660	170	0.26D	684.91
670	165	0.25D	703.86
680	160	0.24D	719.44
690	155	0.22D	738.58
700	150	0.21D	759.2
710	145	0.20D	781.24
720	140	0.19D	804.79
730	135	0.18D	830.24
740	130	0.18D	857.77
750	125	0.17D	889.49
760	120	0.16D	919.99
770	115	0.15D	955.44
780	110	0.14D	993.81
790	105	0.13D	1036.87
800	100	0.13D	1084.26
810	95	0.12D	1136.86
820	90	0.11D	1194.99
830	85	0.10D	1258.06
840	80	0.10D	1331.23
850	75	0.09D	1411.96
860	70	0.08D	1507.69
870	65	0.07D	1617.69
880	60	0.07D	1741.36
890	55	0.06D	1892.58
900	50	0.06D	2072.87
910	45	0.05D	2295.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

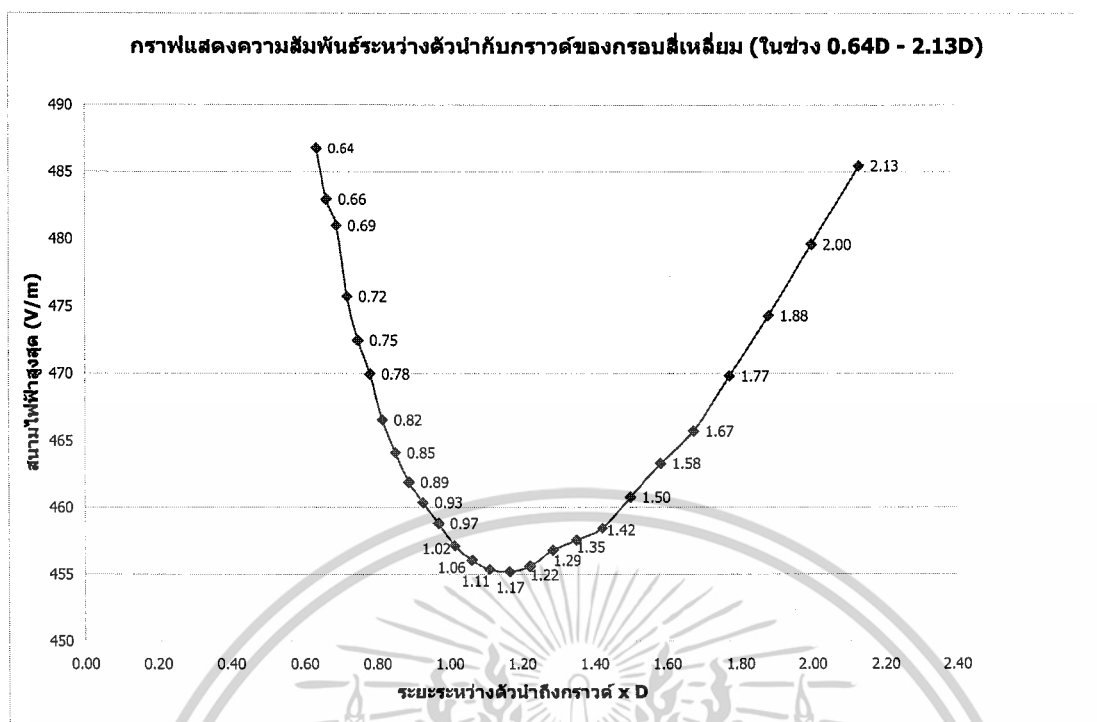
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวนำ D (mm)	ระยะห่างระหว่าง ตัวนำกับกราวด์ R (mm)	ระยะห่างจากตัวนำ ถึงกราวด์ R/D	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)
920	40	0.04D	2574.11
930	35	0.04D	2935.29
940	30	0.03D	3405.09
950	25	0.03D	4072.18
960	20	0.02D	5077.28
970	15	0.02D	6735.01
980	10	0.01D	10068.35
990	5	0.01D	20067.68
1000	0	0.00D	0



ภาพที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำกับกราวด์ของกรอบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำกับกราดซ์ของกรอบสี่เหลี่ยม (ในช่วง 0.64D - 2.13D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กระบวนการทำ XLPE [1]

กระบวนการทำ Crosslinking เปลี่ยน PE ให้เป็น XLPE มี 3 วิธีคือ

1 Crosslinking of polyethylene by radiation หลักการของวิธีนี้คือ การใช้พลังงานสูงแผ่กระจายลงไปในเนื้อฉนวน PE (Polyethylene) ทำให้โมเลกุลเกิดการเกาะเกี่ยวกันเป็นโครงข่ายที่เป็นลักษณะ Crosslinked ซึ่งวิธีนี้จะไม่มีการใช้ความดัน น้ำ หรืออุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการนี้ได้แก่ รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา

2 Crosslinking of polyethylene by Organosilane หลักการของวิธีนี้คือ การทำให้โมเลกุลของ PE (Polyethylene) เกิดการ Crosslinked กันโดยใช้สารประกอบ Organosilane ซึ่งวิธีนี้จะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำ ในการทำให้เกิดเป็น Crosslinked เร็วขึ้น ส่วนสารประกอบ Organosilane ที่นิยมใช้ได้แก่ Vinyl-tri-methoxy-silane (VTMOS)

3 Chemical Crosslinking by Organic Peroxide หลักการของวิธีนี้คือ การทำให้โมเลกุลของ PE (Polyethylene) เกิดการ Crosslinked กัน โดยมีสารประกอบของ Organic Peroxide เป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงโมเลกุลของ PE (Polyethylene) ให้เป็นโครงข่ายที่ไขว่กันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น และผ่านกระบวนการบ่ม (Curing Process) ให้โครงสร้างโมเลกุลคงตัวและสมบูรณ์ สารประกอบของ Organic Peroxide มีทั้งที่เป็นของแข็ง และของเหลว ได้แก่ Dicumylperoxide(Solid) 1,3-bis (tertiary butyl peroxy isopropyl) benzene(Solid) Di tert. butyl peroxide(Liquid) Tert. butyl cumyl peroxide(Liquid) วิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่บริษัทจตุรไทยไวร์แอนด์เคเบิลเลือกใช้ ในกระบวนการเปลี่ยน PE (Polyethylene) ไปเป็น XLPE (Cross-link Polyethylene)

กระบวนการบ่ม (Curing Process) ในกระบวนการบ่มใช้พลังงานความร้อน จาก 2 วิธี คือ

1 วิธี Stream Cure เมื่อได้สายเคเบิลจากขั้นตอน Extrude แล้ว จะนำมาผ่านในท่อที่มีไอน้ำอุณหภูมิสูง (200 °C) และความดันสูง (20 Bar) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโมเลกุลของ PE (Polyethylene) ให้เป็น XLPE (Cross-link Polyethylene) จากนั้นสายเคเบิล จะถูกลดอุณหภูมิให้ต่ำลงโดยน้ำหล่อเย็นในท่ออีกส่วนหนึ่ง เรียกว่า Cooling Zone

สาเหตุที่ใช้ไอน้ำ, น้ำ เป็นตัวกลางในการถ่ายเทอุณหภูมิเพราะว่า น้ำและไอน้ำ มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้ถ่ายเทและระบายความร้อนได้รวดเร็วนั่นเอง

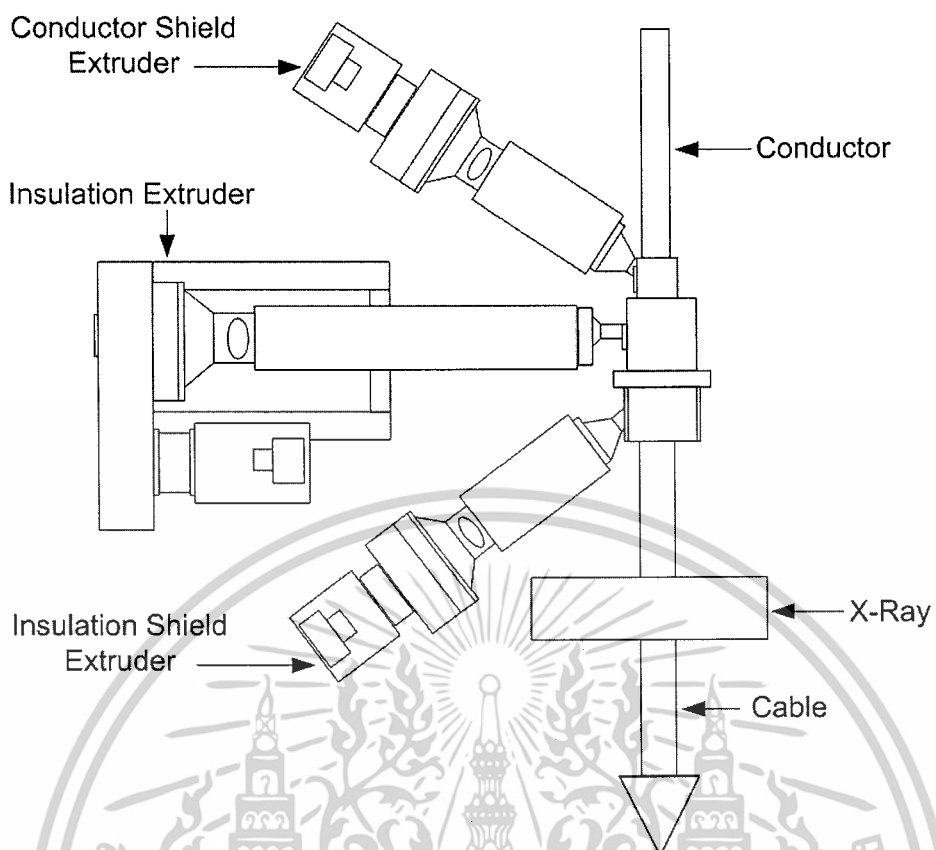
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีใช้ท่อ Curing ในแนวตั้ง กระบวนการผลิตแบบนี้เรียกว่า Vertical Continuous Vulcanization (VCV) ซึ่งส่วนมากจะใช้ในการผลิตสายเคเบิลใต้ดิน แต่ถ้าใช้ท่อเอียงลาดจะเรียกกันว่า Catenary Continuous Vulcanization (CCV) ข้อดีของการผลิตแบบ VCV คือสายไฟฟ้าที่ได้จะมีตัวนำอยู่ตรงกลางไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง (Excentric) ความหนาแน่นของฉนวนเท่ากันตลอดความยาวสาย แต่ต้นทุนในการก่อสร้างสูง เพราะจะต้องทำเป็นหอสูง (Tower) ถ้าใช้วิธี CCV ต้นทุนในการก่อสร้างจะต่ำกว่า แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถผลิตสายไฟฟ้าแรงสูงที่มีความหนาของฉนวนมากๆ ได้

2 วิธี Dry Cure วิธีการนี้ถูกนำมาใช้ เนื่องจากพบว่า สายเคเบิลที่ผลิตจากวิธีการ Stream Curing มีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากสาเหตุ Water Tree กล่าวคือ การ Curing ด้วยไอน้ำอุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้โมเลกุลของไอน้ำส่วนหนึ่งเคลื่อนตัวเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อฉนวน เมื่อเย็นตัวลงก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำตกค้างอยู่ในเนื้อฉนวนเมื่อใช้งานสายเคเบิลไปนานๆ น้ำที่ค้างรออยู่ก็จะระเหยออกมาเหลือเป็นช่องว่างอากาศ เมื่อใช้งานไปก็จะทำให้สายเคเบิลเสียหายได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงผลิตสายเคเบิลด้วยวิธีการ Dry Cure โดยจะใช้ก๊าซไนโตรเจนในการหล่อเย็นแทนไอน้ำ แต่เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่าไอน้ำ จึงต้องมีปั๊มเพื่อเพิ่มความเร็วในการสัมผัสระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับ XLPE (Cross-link Polyethylene) เคเบิลที่ได้จึงมีช่องว่างน้อยกว่า และขนาดเล็กกว่าวิธี Stream Cure มาก จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

Manufacturing System ของกระบวนการผลิตปัจจุบันมีอยู่ 3 ลักษณะ ได้แก่

- 1 VCV : Vertical Continuous Vulcanizer
- 2 CCV : Catenary Continuous Vulcanizer
- 3 HCV : Horizontal Continuous Vulcanizer



ภาพที่ ค.1 การฉีด XLPE, Conductor Screen, Insulation Screen [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

วิธีการปกสายเคเบิลใต้ดิน

การปกสายเคเบิล นับว่าได้ว่าเป็นงานฝีมือที่เชื่อว่าใครก็ทำได้เนื่องจาก ผู้ที่ทำการปกจะต้องมีความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าแรงสูงเช่น การกระจายของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน การเบรกดาวนในสายเคเบิลใต้ดิน เป็นต้น

ในการกระบวนการปกสายเคเบิลสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ความสะอาดของสายเคเบิล และความราบเรียบสม่ำเสมอบริเวณผิวด้านหน้าของฉนวน เพื่อให้ได้สายเคเบิลที่พร้อมจะนำไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนในการปกสายเคเบิลใต้ดิน มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วัดความยาวที่ต้องการปกสายเคเบิล ตามความต้องการที่จะนำไปใช้งาน จากนั้นใช้เทปพันสายไฟที่มีสีสันแตกต่างจากสายเคเบิล ปิดรอบสายเคเบิลเพื่อเป็นแนวในการควั่นตามแนวเส้นรอบวงเพื่อที่จะได้รอยควั่นที่ราบเรียบสม่ำเสมอ ดังภาพที่ จ.1

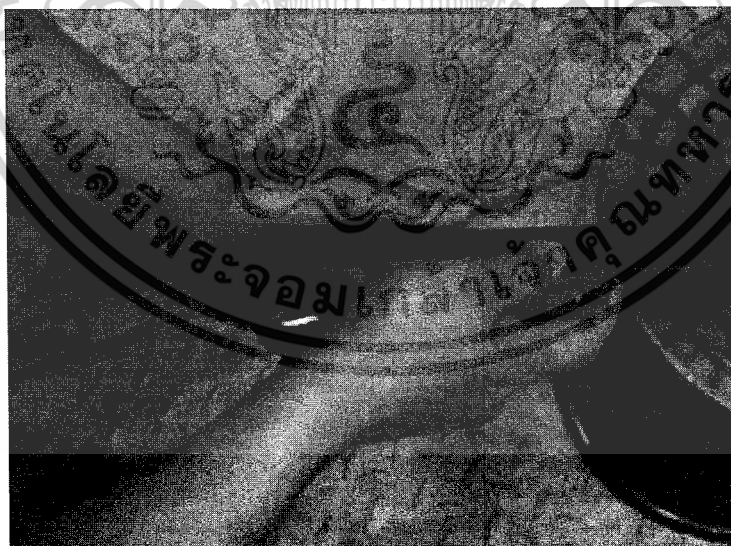


ภาพที่ จ.1 การใช้เทปพันสายไฟปิดรอบสายเคเบิลเพื่อเป็นแนวทางในการควั่น

ขั้นตอนที่ 2 ใช้มีดที่มีความคม คั่นตามแนวเส้นรอบวงเฉพาะชั้นเปลือกนอก ระวังไม่ให้ลึกจนเกินไปดังภาพที่ จ.2 จากนั้นใช้มีดกรีดลงบนชั้นเปลือกนอกตลอดแนวความยาวที่วัดไว้โดยการกรีดต้องหันด้านคมของมีดกรีดออกจากตัวผู้กรีดดังภาพที่ จ.3 แล้วลอกเอาชั้นเปลือกนอกออกดังภาพที่ จ.4



ภาพที่ จ.2 การใช้มีดคั่นตามแนวเทพื้นสายไฟ

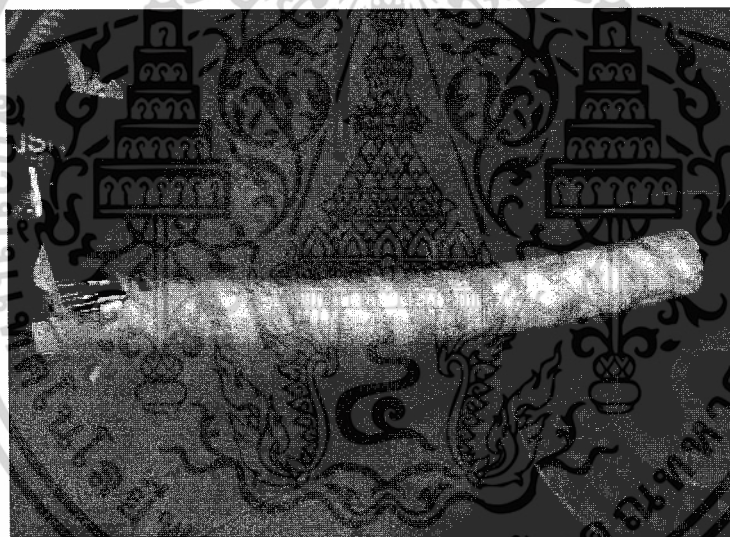


ภาพที่ จ.3 วิธีการใช้มีดกรีดชั้นเปลือกนอกสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



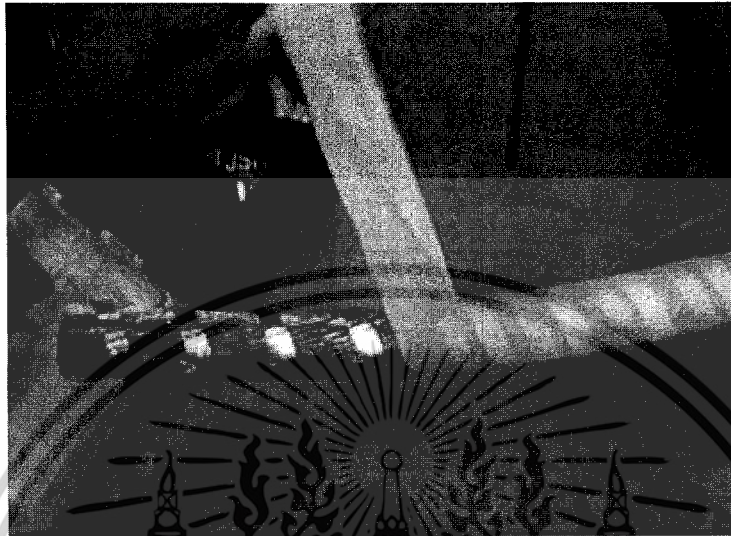
ภาพที่ จ.4 วิธีการลอกชั้นเปลือกนอกสายเคเบิล



ภาพที่ จ.5 สายเคเบิลหลังจากลอกชั้นเปลือกนอกสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 นำเอาส่วนที่เรียกว่า Separative Tape มีลักษณะคล้ายผ้ามีขาวออกไปจากนั้น ให้แกะตัวกันโลหะออกจากสายเคเบิล โดยไม่ได้มีการตัดออก ดังภาพที่ จ.5-จ.8



ภาพที่ จ.6 วิธีการเอาส่วน Separative tape ออกจากสายเคเบิล

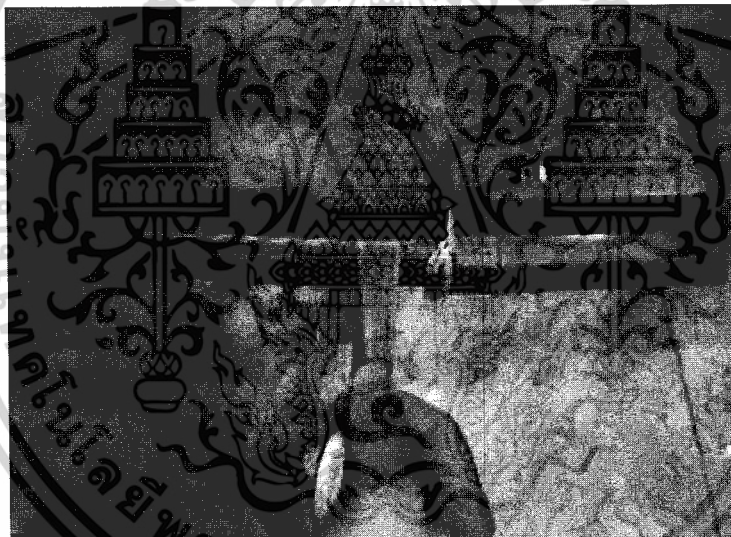


ภาพที่ จ.7 สายเคเบิลหลังจากเอาส่วน Separative tape ออกจากสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



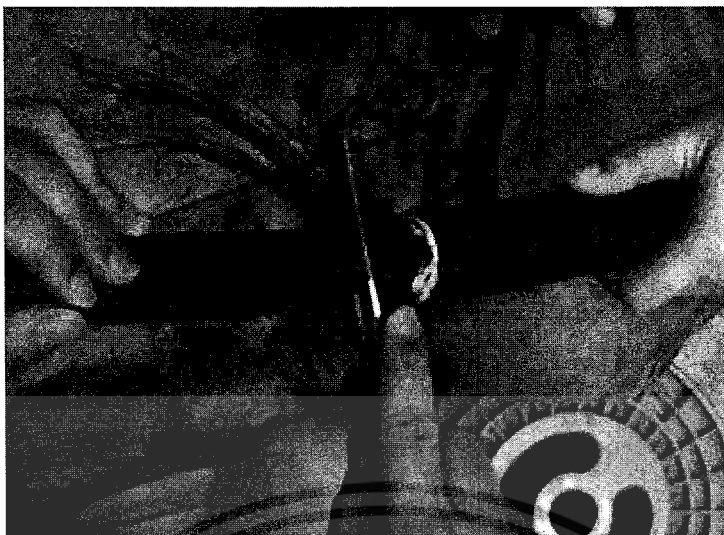
ภาพที่ จ.8 วิธีการเอาตัวกันโลหะออกจากสายเคเบิลโดยไม่ได้มีการตัดออก



ภาพที่ จ.9 การใช้เทปพันสายไฟปิดรอบ Insulation Screen เพื่อใช้มีดควั่น

ขั้นตอนที่ 4 วัดความยาว Insulation Screen ที่ต้องการลอกออก โดยความยาวในส่วนนี้ ขึ้นอยู่กับแรงดันที่นำไปใช้งาน แล้วจึงปิดเทปเพื่อทำเป็นรอยควั่น ดังภาพที่ จ.9 ใช้มีดควั่นรอบสายเคเบิล เฉพาะชั้น Insulation Screen ดังภาพที่ จ.10 แล้วกรีดตามแนวความยาวสายเคเบิล ทั้งด้านบนและด้านล่าง ในขั้นตอนนี้ จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพื่อให้เกิดรอยกรีดบนชั้นฉนวนน้อยที่สุด หรือไม่เกิดรอยกรีดเลย หลังจากนั้น ลอกชั้น Insulation Screen ออกไป ดังภาพที่ จ.11-จ.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

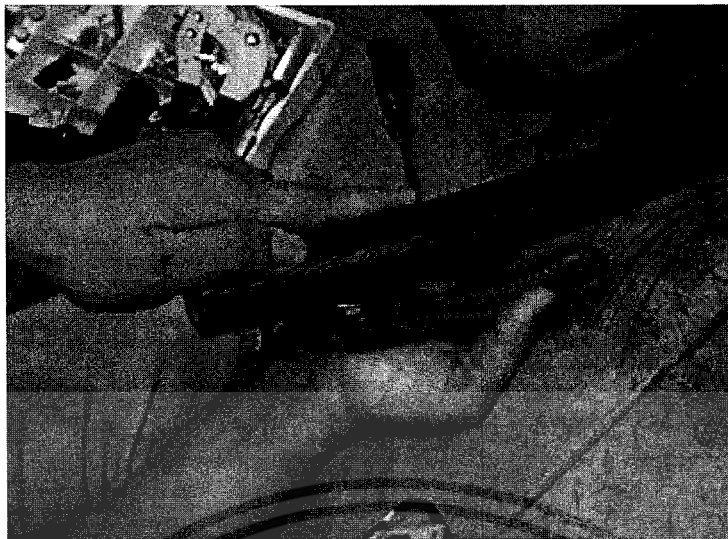


ภาพที่ จ.10 การใช้มีดควั่นตามแนวเทพื้นสายไฟโดยให้เกิดรอยกรีดบนชั้นฉนวนน้อยที่สุด หรือไม่เกิดรอยกรีดเลย



ภาพที่ จ.11 วิธีการใช้มีดกรีดชั้นเปลือกนอกสายเคเบิลโดยให้เกิดรอยกรีดบนชั้นฉนวนน้อยที่สุด หรือไม่เกิดรอยกรีดเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.12 วิธีการลอกชั้น Insulation Screen ออกจากสายบิล



ภาพที่ จ.13 วิธีการใช้กรรไกรลอกสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 วัดความยาวฉนวนที่ต้องการปอก ปิดเทปเพื่อเป็นแนว ใช้กรรไกรปอกสายเคเบิลตัดฉนวนเป็นวงกลมรอบสายเคเบิล ดังภาพที่ จ.13 แล้วใช้มีดกรีดตามแนวความยาวของสายเคเบิล ดังภาพที่ จ.14 จากนั้น แกะเอาฉนวนออกไป จะได้ปลายของสายเคเบิลดังภาพที่ จ.15



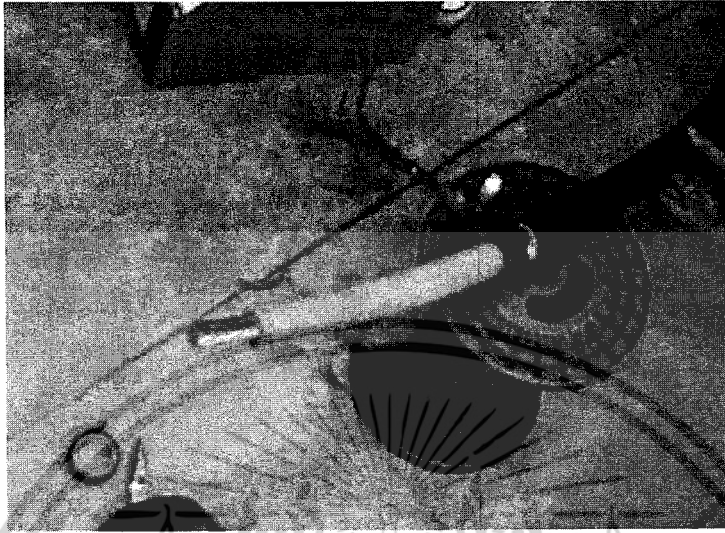
ภาพที่ จ.14 การใช้มีดกรีดฉนวนเพื่อเอาฉนวนออก



ภาพที่ จ.15 สายเคเบิลหลังจากเอาฉนวนออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 ตกแต่ง ตรวจสอบ และทำความสะอาด สายเคเบิลใต้ดิน ก็จะได้สายเคเบิลใต้ดินที่พร้อมจะนำไปใช้งานต่างๆ เช่นประกอบเข้ากับหัวต่อสายเคเบิล



ภาพที่ ฉ.16 สายเคเบิลหลังจากปอกเสร็จแล้วพร้อมที่จะนำไปทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

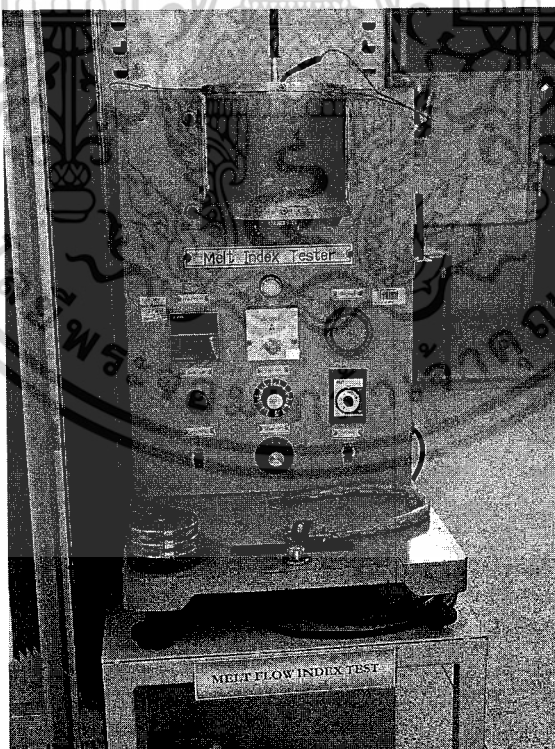
ภาคผนวก จ

การทดสอบสายเคเบิลตามมาตรฐาน

1 การทดสอบทางกายภาพ (Non-Electrical Type Test)

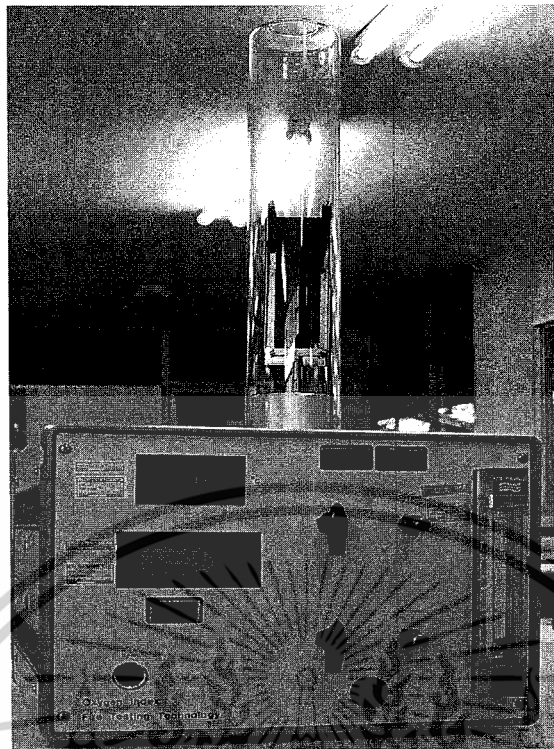
1.1 Melt flow index test ละลายเม็ด PVC (Polyvinyl Chloride) ใส่ในภาชนะ แล้วปล่อยให้ PVC (Polyvinyl Chloride) ไหลออกมาเป็นเวลา 1 นาที บันทึกปริมาณของ PVC (Polyvinyl Chloride) เปรียบเทียบกับมาตรฐาน

1.2 Oxygen index test เป็นการทดสอบหาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ ขึ้นที่วัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4589 วิธีนี้ใช้ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตสายไฟฟ้าประเภททนไฟ โดยเริ่มเผาวัสดุในสภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจน 21 % และไนโตรเจน 79 % หากไม่เกิดการลุกไหม้ จะต้องทำการเพิ่มออกซิเจนเข้าไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงปริมาณออกซิเจนที่ทำให้วัสดุชิ้นนั้นติดไฟได้ ยิ่งใช้ปริมาณออกซิเจนมากเท่าไรก็ยิ่งทนไฟมากเท่านั้น โดยปกติค่า Oxygen Index (OI) ที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 40 % [1]



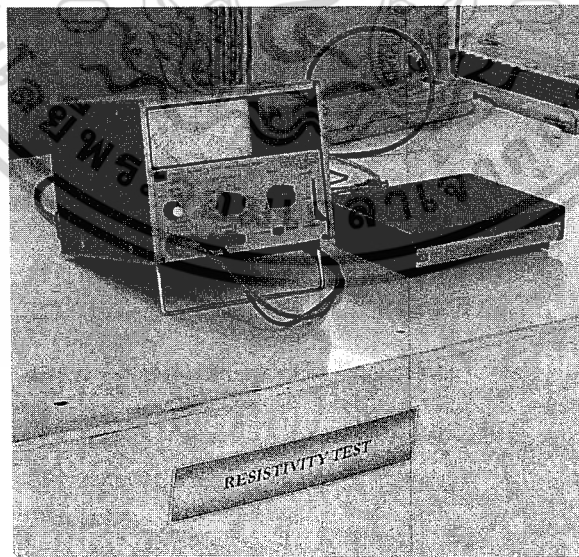
ภาพที่ จ.1 เครื่อง Melt flow index test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.2 เครื่อง Oxygen index test

1.3 Resistivity Test คือ การทดสอบความต้านทานของฉนวน โดยตัดฉนวนเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมบางๆ แล้วนำเข้าเครื่องวัด ซึ่งจะเป็นการวัดความต้านทานในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด



ภาพที่ จ.3 เครื่อง Resistivity Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 Acidity test เป็นการทดสอบหาค่าความเป็นกรดของก๊าซฮาโลเจนที่เกิดจากการเผาวัสดุโลหะที่เป็นองค์ประกอบของเคเบิลภายในเตาแบบปิดที่อุณหภูมิประมาณ 900°C อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60754-1 ซึ่งก๊าซฮาโลเจนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังขวดแก้วที่บรรจุน้ำ ก๊าซฮาโลเจนจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นกรด โดยจะต้องมีค่า pH ไม่เกิน 4.3 และค่า Conductivity น้อยกว่า 10 $\mu\text{S}/\text{mm}$. [1]

1.5 Tensile strength and elongation of insulation test (before and after ageing) การทดสอบการต้านแรงดึง และการยืดตัวของฉนวน XLPE (Cross-link Polyethylene) ก่อนและหลังการ Ageing ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [12] โดยนำตัวอย่างเคเบิลที่ผ่านการหุ้ม Conductor Screen, Insulation และ Insulation Screen เรียบร้อยแล้ว ยาวประมาณ 50 mm. มาสไลด์เป็นแผ่นบางๆ ให้มีความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่น้อยกว่า 0.8 mm. และไม่เกิน 2 mm. ตัดเป็นรูป ดรัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้น และทำขีดเครื่องหมาย 2 จุด ห่างกัน 20 mm. นำชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้นเข้าเตาอบแห้งเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบทั้ง 10 ชิ้น มาดึงจนขาดออกจากกันที่อุณหภูมิห้อง บันทึกค่าแรงดึง และระยะระหว่างขีดเครื่องหมายทั้ง 2 จุด ในขณะที่ยังมีขนาด โดยแรงที่ใช้ในการดึง ทั้งก่อนและหลังการ Ageing จะต้องต่างกันไม่เกิน $\pm 20\%$ [1]

1.6 Hot Set Test [1] เป็นการทดสอบการยืดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อนตามมาตรฐาน IEC 60811-2-1 [22] โดยเตรียมชิ้นงานรูปดรัมเบลล์เหมือนการทดสอบการต้านแรงดึง ในการทดสอบนี้จะนำชิ้นงานทดสอบแขวนในตุ๋น และถ่วงด้วยน้ำหนักที่มีค่า 20 นิวตัน ต่อตารางเซนติเมตรของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานทดสอบทางด้านล่าง อบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 จุด หลังจากนั้นเอาน้ำหนักถ่วงออก ปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบไว้ในตุ๋นต่อไปอีก 5 นาที แล้วนำชิ้นงานทดสอบออกมา ปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมายอีกครั้ง คำนวณหาค่า % Elongation ดังนี้

$$\text{หลังอบ 15 นาที} \quad \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (\text{จ.1})$$

$$\text{หลังปล่อยให้เย็น} \quad \frac{L_2 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (\text{จ.2})$$

เมื่อ L_0 คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 ก่อนการอบ

L_1 คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 หลังอบ 15 นาที

L_2 คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 หลังจากเย็นตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 Shrinkage Test [1] เป็นการทดสอบการหดตัวของฉนวน โดยนำชิ้นงานทดสอบไปอบที่ อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลง ทำการวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 คำนวณหาค่า % Shrinkage ดังนี้

$$\frac{L_1 - L_2}{L_2} \times 100\% \quad (จ.3)$$

เมื่อ L_1 คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 ก่อนการทดสอบ

L_2 คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายทั้ง 2 หลังการทดสอบ

2. การทดสอบทางด้านไฟฟ้า (Electrical Type Test) [1]

2.1 Flame Retardant Test เป็นการทดสอบการลุกลามของเปลวไฟ ตามมาตรฐาน IEC 60332-3 โดยการนำสายเคเบิลตัวอย่างยาวประมาณ 3.5 เมตร วางในแนวตั้งในตู้เผาขนาด 1×2×4 เมตร เผาด้วยเปลวไฟเป็นระยะเวลาตามตารางที่ 3 ซึ่งระยะการลุกลามของเปลวไฟจะต้องไม่เกิน 2.5 เมตร ในขณะทำการทดสอบต้องควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส ดังนี้

- Air Flow Rate 77.7 ±4.8 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 °C และความดัน 1 Bar
- Gas Flow Rate (Propane) 13.5 ±0.5 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 °C และความดัน 1 Bar
- Air Inlet Flow Rate 5000 ±500 LPM. ที่อุณหภูมิ 20 ±10 °C

ตารางที่ จ.1 ปริมาณของวัสดุโลหะและระยะเวลาการอบของการทดสอบแต่ละประเภท

ประเภทของการทดสอบ	ปริมาตรของวัสดุโลหะทั้งหมด	ระยะเวลาอบ
Category A F/R (IEC 603323-21)	7 ลิตร ต่อเมตร	40 นาที
Category A (IEC 603323-22)	7 ลิตร ต่อเมตร	40 นาที
Category A F/R (IEC 603323-23)	3.5 ลิตร ต่อเมตร	40 นาที
Category A F/R (IEC 603323-24)	1.5 ลิตร ต่อเมตร	20 นาที
Category A F/R (IEC 603323-25)	0.5 ลิตร ต่อเมตร	20 นาที

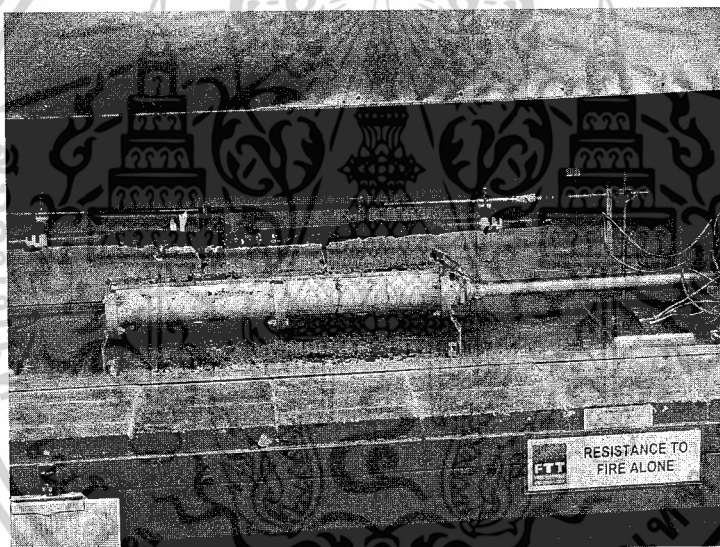


ภาพที่ จ.4 ภายในห้องเผาไหม้ที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Smoke Density Test เป็นการทดสอบวัดปริมาณความหนาแน่นของควันที่เกิดจากการเผาไหม้สายไฟตัวอย่างในห้องทดสอบที่บัสแสงขนาด 3×3×3 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 61034 โดยใช้หลักการส่องผ่านลำแสง (Light Transmission) ผ่านกลุ่มควันที่เกิดจากการเผาไหม้สายไฟตัวอย่างด้วยเชื้อเพลิงที่เป็นแอลกอฮอล์ ปริมาณ 1 ลิตร โดยมีอัตราส่วนผสมของ เอทานอล (Ethanol) 90±1 %, เมทานอล (Methanol) 4±1 %, น้ำ 6±1 % ในการทดสอบต้องใช้พัดลมที่ทำให้อัตราการไหลของอากาศอยู่ระหว่าง 7-15 m³/min เพื่อกระจายควันที่เกิดจากการเผาไหม้ให้ทั่วทั้งห้องทดสอบ โดยค่าต่ำสุดของ % Light Transmittance จะต้องไม่ต่ำกว่า 60 %

2.3 Resistance to Fire Alone เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของสายเคเบิล ขณะที่มีการจ่ายกระแส และแรงดันที่พิกัดอย่างต่อเนื่องในตู้เผาตามมาตรฐาน BS 6387 [D2] โดยจะต้องไม่เกิดการลัดวงจร



ภาพที่ จ.5 การทดสอบ Resistance to Fire Alone

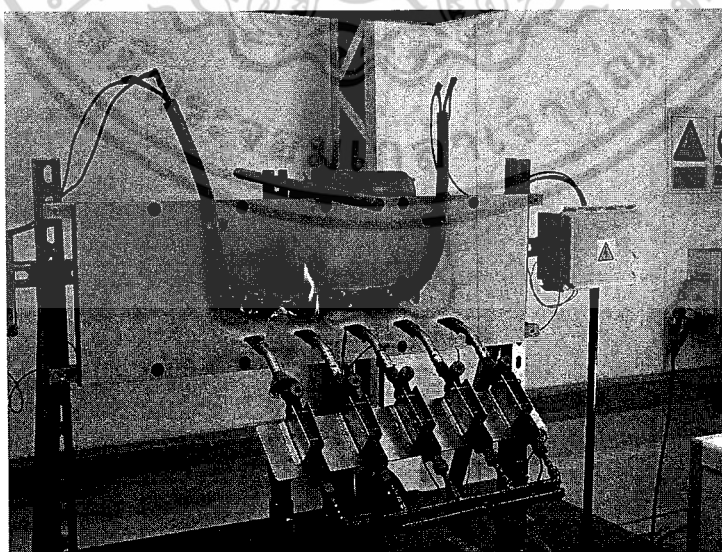
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Resistance to Fire with Water Spray เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของสายเคเบิล ขณะที่มีการจ่ายกระแส และแรงดันที่พิกัดอย่างต่อเนื่อง และมีการฉีดพ่นน้ำ หลังจากที่เกิดการเผาไหม้ตามมาตรฐาน BS 6387 [D3] โดยจะต้องไม่เกิดการลัดวงจร

2.5. Resistance to Fire with Mechanical Shock เป็นการทดสอบความทนทานต่อการลุกไหม้ของสายเคเบิล ขณะที่มีการจ่ายกระแส และแรงดันที่พิกัดอย่างต่อเนื่อง และมีแรงกระทำทุกๆ ครึ่งนาที่ ตามมาตรฐาน BS 6387 [D4] โดยจะต้องไม่เกิดการลัดวงจร



ภาพที่ จ.6 การทดสอบ Resistance to Fire with Water Spray



ภาพที่ จ.7 การทดสอบ Resistance to Fire with Mechanical Shock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

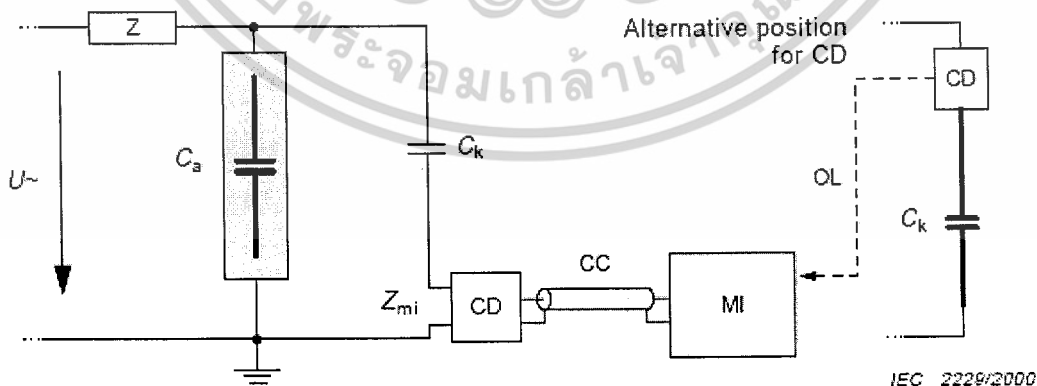
3. การวัดดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วน คือ ดิสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้า ได้ตลอดแนวระหว่างโคโรนา จึงเรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วนเพราะฉนวนโคโรนาด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซยังเป็นฉนวนที่มั่นคงอยู่

ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในเนื้อฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

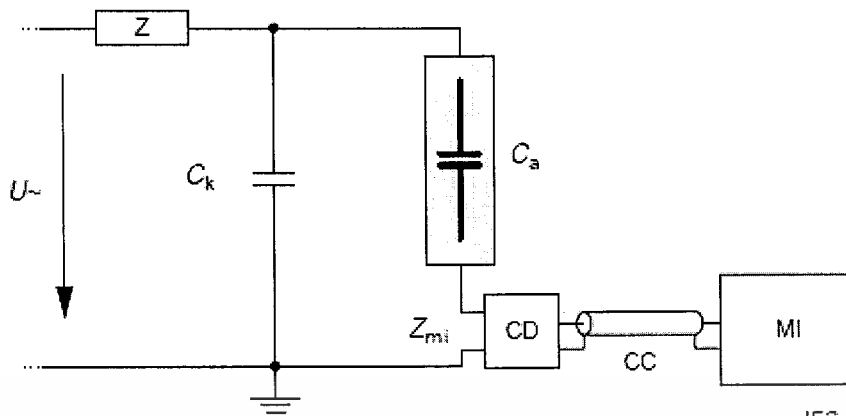
3.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปี หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 270 โดยภาพที่ จ.8 และภาพที่ จ.9 วงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรภาพที่ จ.8 คือชั่วแรงแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรงในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์อิมพีแดนซ์วัดจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจร ในภาพที่ จ.9 จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรก ในกรณีที่ทดสอบมีขนาดเล็กเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสเตรย์จะทำให้ตัวเก็บประจุดับปลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในภาพที่ จ.10 เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่าย หรือสัญญาณแบบ “คอมมอนโหมด” นั้นเอง



ภาพที่ จ.8 Coupling device CD in series with the coupling capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

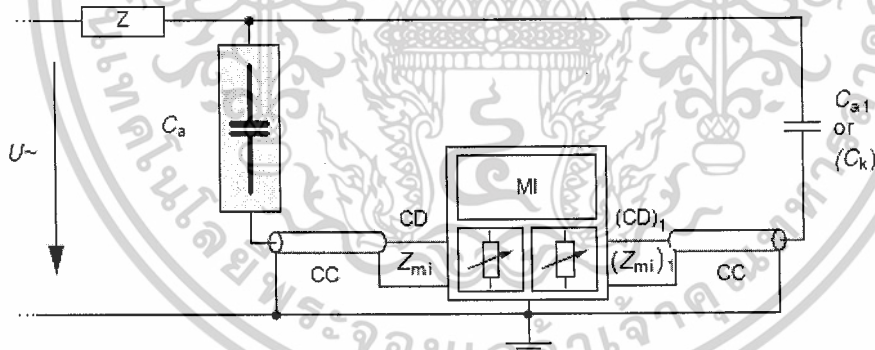


IEC 2230/2000

Components

- U high-voltage supply
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- OL optical link
- C_a test object
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- MI measuring instrument
- Z filter

ภาพที่ จ.9 Coupling device CD in series with the test object



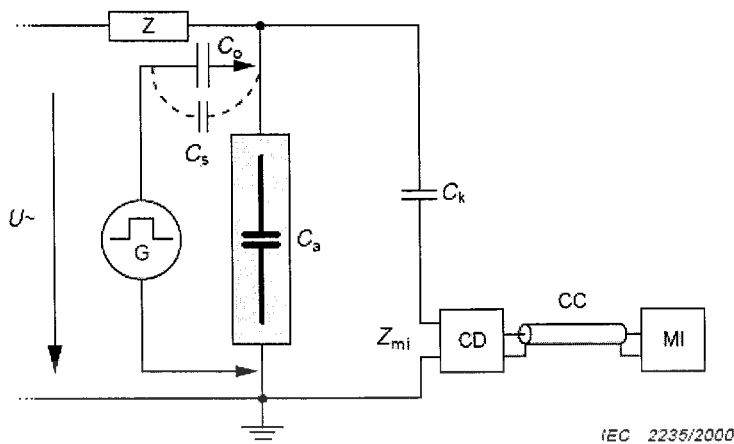
IEC 2231/2000

Components

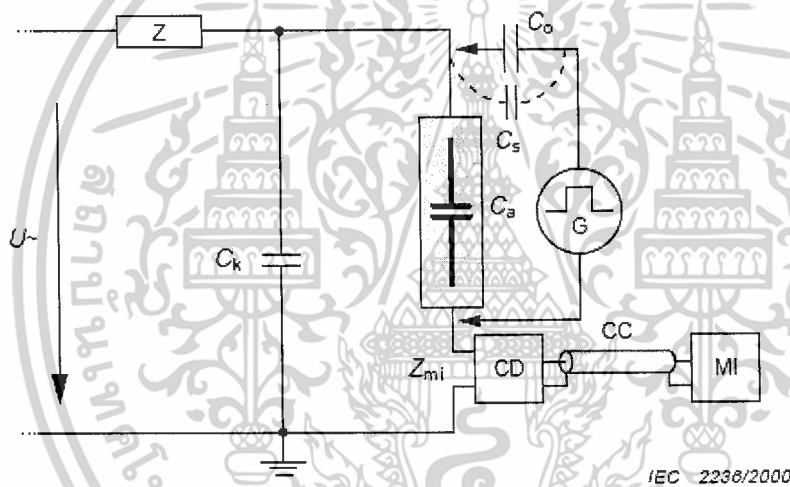
- U high-voltage supply
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- OL optical link
- C_a test object
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- MI measuring instrument
- Z filter

ภาพที่ จ.10 Balance circuit arrangement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.11 Coupling device CD in series with the coupling capacitor



Components

- U - high-voltage supply
- G step voltage generator
- C_0 calibration capacitor
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- C_a test object
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- C_s stray capacitance
- MI measuring instrument
- Z filter

ภาพที่ จ.12 Coupling device CD in series with the test object

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ จ.11 และ ภาพที่ จ.12 คือการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยปกติจะกระทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าแน่นอนที่ชั่วทั้งสองของวัสดุทดสอบ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้ว ควรเอาเครื่องปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ

3.2 การจำแนกชนิดของดิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล [4]

สามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1 การดิซาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก

โพรงอากาศชนิดนี้มักจะพบในฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตเช่น การหล่อ การหุ้ม การดิซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการดิซาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปไซน์

ตำแหน่งของการดิซาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปอิลิป ในช่วงที่แสดงผลของการดิซาร์จบางส่วนขนาดของการดิซาร์จนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การดิซาร์จนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือ เมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการดิซาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้น (Withstand) และช่วงเวลาที่กำหนด (ประมาณ หรือเท่ากับ 10 นาที)

2 การดิซาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก

การดิซาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่นเช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก, ฟอง และโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆ กันและขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว

การดิซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) โดยจะเกิดขึ้นก่อน และหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์

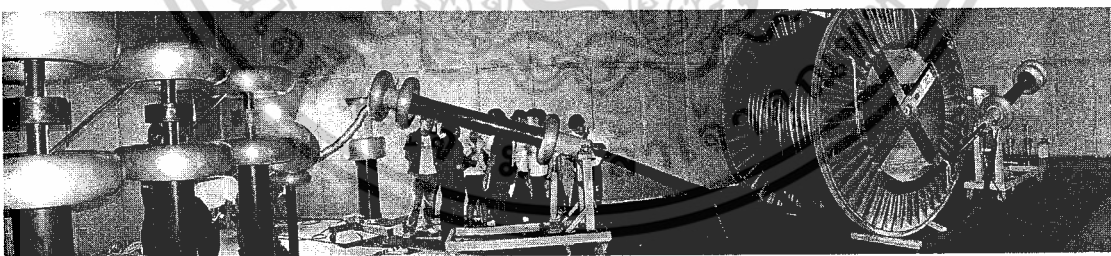
ค่าของการดิซาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหารอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิซาร์จก็จะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้น ในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที ขนาดของการดิซาร์จจะค่อยๆ ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

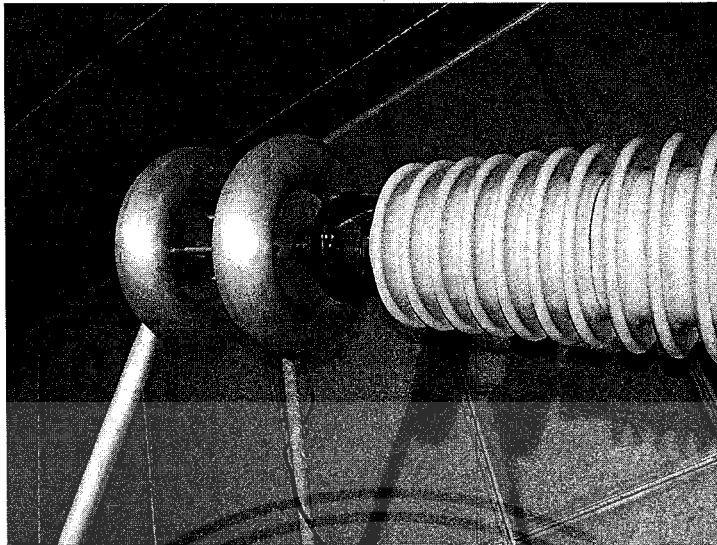
3 การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants) ภายในไดอิเล็กตริก เศษวัสดุ และสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) หมายถึง เศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดจากการไหม้ และตกค้างจากกระบวนการผลิตเช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ เป็นต้น ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) หมายถึง สิ่งเจือปนภายนอกได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุ และสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้จะรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย

4 การดิสชาร์จที่เกิดการขยายตัวของคาร์บอนแทรก (Carbon Track) การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวนเช่น ครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (XLPE), โพลีเอทิลีน (PE) และโพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก

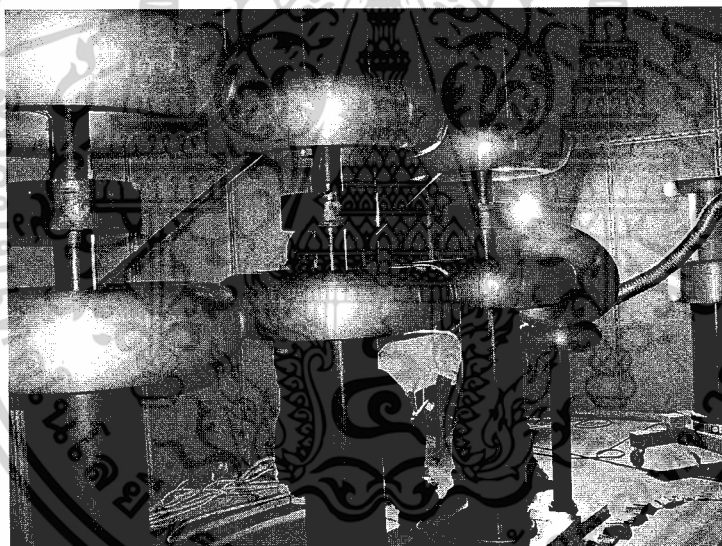
การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุด ขนาดของการดิสชาร์จจะมีปริมาณมากทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทรกโดยทั่วไปการดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ หรือไม่มีการดิสชาร์จ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง แรงดัน และช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตก ขนาดของการดิสชาร์จที่แรงดันสูงมากๆ จะทำให้ขนาดของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ขนาดของการดิสชาร์จไม่คงที่



ภาพที่ จ.13 วงจรทดสอบ PD ที่ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน)

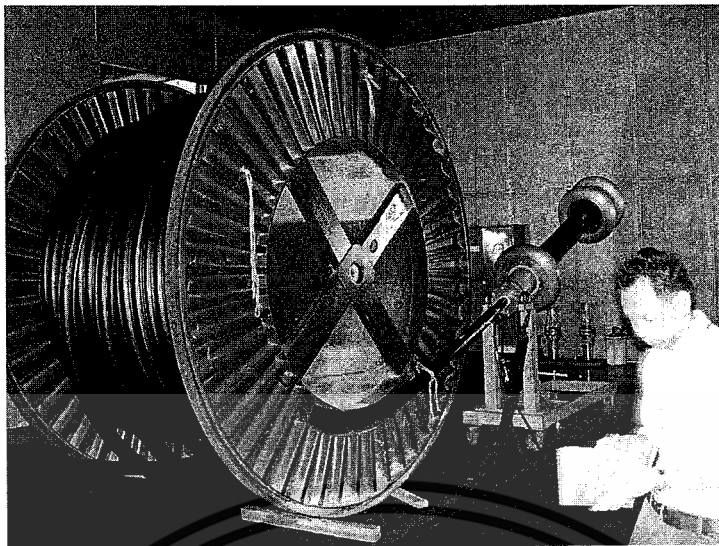


ภาพที่ จ.14 บุซซิ่งแรงสูง

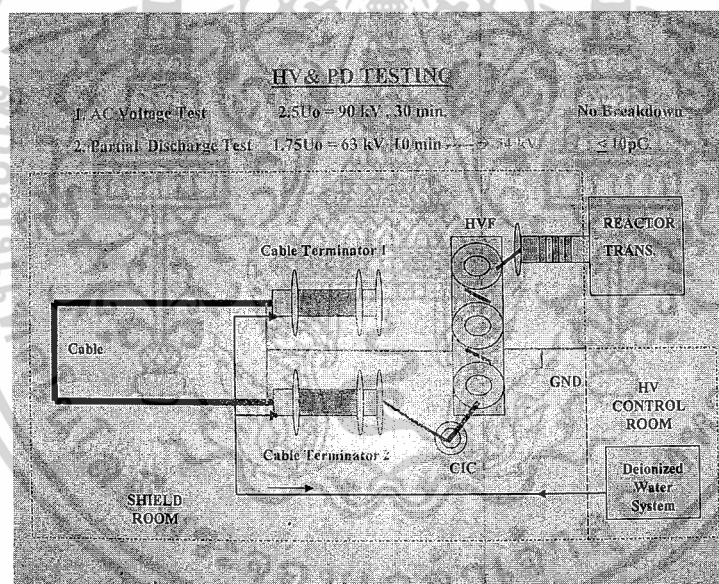


ภาพที่ จ.15 Low Pass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.16 สายเคเบิลที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ จ.17 วงจรวัด Patial Discharge ที่โรงงานใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน [9]

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ตามมาตรฐาน IEC 270 กำหนดให้มีคุณสมบัติดังนี้

1 เวลาแยกชุดของเครื่องตรวจจับ PD กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 270 (1981) ว่าต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการซ้อนทับของพัลส์

2 เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน IEC Publ. No. 270 (1981) กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลานขึ้นไม่เกิน 0.1 ไมโครวินาที และลดลงด้วยค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 ไมโครวินาที

3 ความไวของเครื่องตรวจจับหรือวัด PD จะต้องมีความสามารถตรวจจับพัลส์ต่ำสุดเป็นสองเท่าของสัญญาณรบกวนซึ่งกำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-2 (1981)

4 เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติซูเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD นั้น กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-3 ว่าต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากันสองพัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลานขึ้นไม่เกิน 20 นาโนวินาที โดยพัลส์ทั้งสองนี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2 - 100 ไมโครวินาที สำหรับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 0 ถึง 60 โอห์ม

5 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเทียบต้องมีค่าไม่เกิน 150 พิโคฟารัด (สำหรับการทดสอบ PD ในเคเบิล) เรื่องนี้กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-3 เช่นกัน

6 เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC ยอมให้เกิดซูเปอร์โพสิชันทางลบได้ไม่เกิน 10 % ในกรณีที่เกิน 10 % จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาในการวัดด้วย

ภาคผนวก จ

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตารางที่ จ.1 แสดงสัญลักษณ์ ชื่อภาษาอังกฤษ ชื่อภาษาไทย และหน่วย

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย	หน่วย
ϵ	Dielectric permittivity	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร	F/m
ϵ_r	Dielectric permittivity substance	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของสาร	-
ϵ_0	Dielectric permittivity air	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของอากาศ	F/m
A	Area	พื้นที่	m ²
f	Frequency	ความถี่	Hz
D	Electric displacement	ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า	C/m ²
C_{stray}	Capacitance stray	ตัวเก็บประจุสเตรย์	F/m
X_c	Capacitance resistance	ความต้านทานของตัวเก็บประจุ	Ω
E	Electrical field stress	ความเครียดสนามไฟฟ้า	V/m
E_{max}	Maximum electrical field stress	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	V/m
E_{av}	Average electrical field stress	ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย	V/m
η^*	Field utilization factor	แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า	-
U	Voltage	ศักดาไฟฟ้า	V
U_i	Corona inception voltage	แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด	V
U_b	Breakdown voltage	แรงดันเบรกดาวน์	V
Q	Electric Charge	ประจุไฟฟ้า	C
F	Force between of Q_1 and Q_2	แรงกระทำระหว่างประจุตัวที่ 1 กับประจุตัวที่ 2	N/C
J	Conduction Current Density	ความหนาแน่นของกระแส	A/m ²
σ	Current Density	สภาพนำของตัวนำ	S/m
ρ	Resistivity	สภาพต้านทาน	$\Omega \cdot m$
r	Radius	ความยาวรัศมี	m

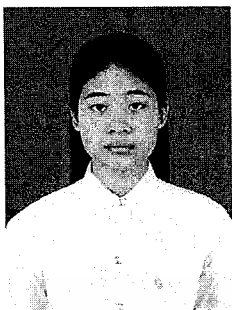
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย	หน่วย
$\bar{B}$	Magnetic flux density	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	wb/m^2 , Tesla
ϕ	Magnetic Flux	ฟลักซ์แม่เหล็ก	wb
ρ	Electric charge density	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า	C/m^3
emf	Electromotive force	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	V
H	Magnetic field	สนามแม่เหล็ก	A/m
I_c	Current	กระแสไฟฟ้าที่ไหลใน เส้นทาง C	A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

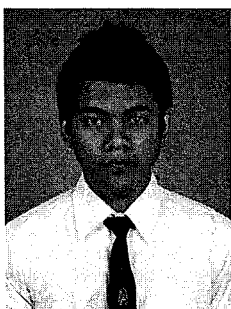
ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นางสาวชลิดา วรกิจเจริญผล
เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ.2529
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนอัมพรไพศาล
จังหวัดนนทบุรี
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอัมพรไพศาล
จังหวัดนนทบุรี
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548
ฝึกงานที่ บริษัท การบินไทย จำกัด(มหาชน)
ระหว่าง เดือนเมษายน ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2551



ชื่อ-สกุล นายณัฐพงศ์ พันธุ์สวัสดิ์
เกิดวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2529
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนสตรีศรีน่าน
จังหวัดน่าน
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสตรีศรีน่าน
จังหวัดน่าน
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548
ฝึกงานที่ บริษัท ดานาสไปรเซอร์(ประเทศไทย) จำกัด
ระหว่าง เดือนเมษายน ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2551



ชื่อ-สกุล นายณัฐวุฒิ รักพรหม

เกิดวันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ.2529

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนอำมาตย์พานิชนุกูล
จังหวัดกระบี่

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนมหาวิทยาลัยราชวรุ
จังหวัดสงขลา

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548

ฝึกงานที่ บริษัท ดานาสไปรเซอร์(ประเทศไทย) จำกัด

ระหว่าง เดือนเมษายน ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2551



ชื่อ-สกุล นายบัญญัติ สิตาจริยกุล

เกิดวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2529

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนพัทลุง
จังหวัดพัทลุง

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนพัทลุง
จังหวัดพัทลุง

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548

ฝึกงานที่ บริษัท ผลิตไฟฟ้าขนอม จำกัด(มหาชน)

ระหว่าง เดือนเมษายน ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้