สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินสำหรับทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน

Design and construction underground cable terminator for PD measuring

โดย

นาย ณัฐเสธ เสือสิงห์
นาย รณกาจ พุทธวงศ์
นาย อนุสรณ์ ทุริสุทธิ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62663
วัน,เดือน,ปี 21 ส.ค. 2549

b 11628042
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินสำหรับทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน
(Design and construction underground cable terminator for PD measuring)

ผู้จัดทำ

นาย ณัฐเสธ เสือสิงห์ รหัส 45010253
นาย รณกาจ พุทธวงศ์ รหัส 45010625
นาย อนุสรณ์ ทุริสุทธิ์ รหัส 45010911

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินสำหรับทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน

นาย ณัฐเสธ เสือสิงห์
นาย รณกาจ พุทธวงศ์
นาย อนุสรณ์ ทุริสุทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงพิกัด 12/20 (24กิโลโวลต์) ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 120 ตารางมิลลิเมตร ใช้สำหรับการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ของสายเคเบิลซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพของฉนวนของสายเคเบิลก่อนที่จะนำไปใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง ใช้วิธีการควบคุมสนามไฟฟ้าแบบ Refractive Stress Control ที่ปลายสายเคเบิลโดยใช้น้ำที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงเป็นฉนวน หัวต่อสายเคเบิลที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นมาได้ผ่านการทดสอบเปรียบเทียบกับหัวต่อสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบจริงในอุตสาหกรรม ตามมาตรฐานทดสอบสายเคเบิลของ IEC NO. 60502-2 ผลการทดสอบพบว่า หัวต่อสายเคเบิลที่ทำการออกแบบสร้างมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหัวต่อสายเคเบิลที่ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and construction underground cable terminators for PD measuring

Mr. Natthaset Suesing
Mr. Ronnakaj Puttawong
Mr. Anusorn Turisut

Adviser
Assoc. Prof. Siriwat Potivetkul
Lecturer Norasage Pattanadech

Abstract

This project presents a design and construction of high voltage cable terminator for 12/20(24 kV) with 120 SQ.mm. cross section area to test partial discharge in these cables. This partial discharge test is important to control cable quality used in power system. The design and construction of this high voltage cable terminator is based on the refractive stress control at the cable terminator. The body of the connector is constructed using pure water as an insulating medium. The designed cable terminator passed the test following IEC 60502-2 testing standard in which the testing results were similar to the results using industry standard cable terminator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีทั้งนี้ได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือ ทางด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงงาน คณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุคคลที่มีรายนามต่อไปนี้ไว้เป็นอย่างสูง

รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ รวมไปถึงช่วยดูแลความคืบหน้าของโครงงาน

อ. พร้อมศักดิ์ อภิรดิกุล ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ข้อมูลต่างๆ

อ. ธนากร กลิ่นหอมจันทร์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและจัดหาอุปกรณ์มาให้

พี่ ณัฐพันธุ์ บุญเสนอ ที่ช่วยดูแลการทำงาน พาไปซื้อของ คอยให้คำแนะนำต่างๆ อย่างใกล้ชิด

บริษัทจรุงไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ทำการทดสอบที่ห้องทดสอบของบริษัทและสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้องที่ช่วยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

สารบัญ i
สารบัญรูป iv
สารบัญตาราง vi
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ปัญหาที่กำลังศึกษา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 การสืบค้นงานวิจัยเดิม 1
1.4 ขอบเขตงานวิจัย 2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา 2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน 3
2.1 บทนำ 3
2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE 3
2.2.1 ตัวนำ (Conductor) 3
2.2.2 Extruded Conductor Shield (Conductive Strand-Shielding) 4
2.2.3 Insulation 4
2.2.4 Extruded Insulation Shield (Non-Metallic Extruded Conducting Shield) 5
2.2.5 Copper Shield ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม 5
2.2.6 Separator Tape (Bedding Type) 5
2.2.7 Sheath 5
2.3 ฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน 6
2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 7
2.4.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน 8
2.4.2 วงจรสมมูลดีสชาร์จภายใน 8
2.4.3 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน 10
2.4.3.1 การเกิดดิสชาร์จซ้ำ 10
2.4.3.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.3.3 พลังงานดิสชาร์จบางส่วน..... 12
2.5 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน..... 13
2.5.1 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน..... 13
2.5.2 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์บางส่วน..... 14
2.6 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน..... 16
2.6.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป..... 16
2.7 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์บางส่วน..... 17
2.7.1 ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC270..... 17
2.8 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล..... 18
2.9 การเกิดเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว..... 21
2.9.1 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์จากช่องว่างและฟองก๊าซ..... 23
2.9.2 กลไกทางอุณหภูมิของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว..... 23
2.10 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง..... 25
2.11 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล..... 28
2.12 ฉนวนน้ำบริสุทธิ์..... 33
2.13 นิยามของน้ำบริสุทธิ์..... 34
2.14 การกำจัดอิออน..... 34
2.15 การจำแนกประเภทของเรซิน..... 35
บทที่ 3 หลักการออกแบบหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูง..... 39
3.1 บทนำ..... 39
3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวต่อน้ำบริสุทธิ์ (Cable Test Terminator)..... 39
3.3 การออกแบบชุดฝาปิดล่าง..... 40
3.4 การออกแบบชุดฝาปิดบน..... 40
3.5 การออกแบบท่อพีวีซี..... 43
3.5.1 การคำนวณหาความยาวท่อพีวีซี..... 43
3.5.2 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี..... 44
3.6 การออกแบบอิเล็คโตรดชิลด์ (Electrode shield)..... 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6.1 การกำหนดลักษณะโคโรนาซิลด์..... 48
3.6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์..... 49
3.6.2.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ก)..... 49
3.6.2.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ข)..... 50
3.6.2.3 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ค)..... 51
3.6.2.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ง)..... 52
3.7 การออกแบบฐาน..... 54
3.8 การศึกษาและซ่อมบำรุงเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ..... 56
3.8.1 การฟื้นฟูสภาพเรซิน..... 57
3.9 การเลือกใช้มอเตอร์..... 59
3.10 การทดสอบน้ำโดยใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)... 61
3.11 ปัญหาที่ทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์..... 63
3.12 แนวทางแก้ไขปัญหา..... 65
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ..... 66
4.1 บทนำ..... 66
4.2 วงจรทดสอบ..... 66
4.3 ขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลก่อนการทดสอบ..... 67
4.4 วิธีการทดสอบ..... 70
4.5 ผลการทดสอบ..... 70
บทที่ 5 บทสรุปของโครงงานและข้อเสนอแนะ..... 74
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 74
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ..... 74
5.3 แนวทางการพัฒนาโครงงาน..... 74
เอกสารอ้างอิง..... 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	3
2.2	รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน	7
2.3	วงจรสมมูลของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (PD) ทั่วไป	8
2.4	(ก) การกระจายของประจุก่อนเกิดเบรกดาวน์	
	(ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศ R และ C	9
2.5	วงจรสมมูลของโคโรน่าดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิว	9
2.6	รูปคลื่นของแรงดันดกคร่อมแกปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดขณะเกิด PD	10
2.7	การเกิด PD ซ้ำ ในรูปของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในหนึ่งคาบเวลา	11
2.8	ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB	12
2.9	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD	13
2.10	การแทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ	14
2.11	วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 270	16
2.12	การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ	19
2.13	การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก	19
2.14	การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน	20
2.15	การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทร็ก	21
2.16	หยดน้ำเมื่ออยู่ในฉนวนเหลว (ซิลิโคน) ภายใต้สนามไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ	23
2.17	ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นสุญญากาศ ε_0 และ ε	26
2.18	ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง	29
2.19	สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข	30
2.20	การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control	30
2.21	การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control	31
2.22	Potential Field at a Screen Termination	32
2.23	เปรียบเทียบการมี Stress cone กับไม่มี Stress cone	32
2.24	การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone	32
2.25	การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material	33
3.1	ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวต่อ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่		
3.2	ชุดฝาปิดล่าง	40
3.3	ชุดฝาปิดบน	40
3.4	แผ่นซูปเปอร์ลีน	41
3.5	แหวนยึดอะคลิลิก	41
3.6	ท่อสวมพีวีซี	42
3.7	ฝาปิดบน	42
3.8	ฝาปิดล่าง	43
3.9	องค์ประกอบสายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม	44
3.10	ท่อพีวีซี	45
3.11	โคโรนาซิลด์ภายนอก	46
3.12	ลักษณะโคโรนาซิลด์	48
3.13	ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ก)	50
3.14	ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ข)	51
3.15	ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ค)	52
3.16	ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาซิลด์ แบบ ง)	53
3.17	โคโรนาซิลด์	54
3.18	แบบฐาน	54
3.19	ฐานหัวต่อสายเคเบิล	55
3.20	ลักษณะโครงสร้างเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำแต่ละชุด	56
3.21	ลักษณะการทำงานของเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ	57
3.22	การอุดรอยรั่วของท่อ	57
3.23	โซดาไฟ	58
3.24	กรดไฮโดรคลอลิก	58
3.25	ปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า	60
3.26	ถังพักน้ำ 70 ลิตร	60
3.27	เครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ	61
3.28	เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของน้ำบริสุทธิ์	61
3.29	การทดสอบน้ำโดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของน้ำบริสุทธิ์	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.30 สนิมจากเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ..... 63
3.31 สนิมจากปั้มน้ำ..... 64
3.32 เรซินที่เสื่อมสภาพ..... 64
3.33 เครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำของบริษัทจรุงไทย..... 65
4.1 วงจรทดสอบ Partial Discharge ของสายเคเบิล..... 66
4.2 วงจรทดสอบจริงของสายเคเบิล..... 67
4.3 ทำการปลอก sheath ชั้นนอกสุดออก..... 67
4.4 ทำการลอก Seperator Tape ออก..... 68
4.5 ทำการรวบสาย Copper Shield Tape ออก..... 68
4.6 ทำการปลอกชั้นฉนวน XLPE และ ตัวนำ..... 69
4.7 สายเคเบิลที่ทำการปลอกแล้ว..... 69
4.8 ค่าแรงดันและ PD ที่การทดสอบ AC High Voltage Test แรงดัน 42 kV/cm..... 71
4.9 สัญญาณ PD ที่การทดสอบ AC High Voltage Test แรงดัน 42 kV/cm..... 71
4.10 ค่าแรงดันและ PD ที่ แรงดัน 24 kV/cm..... 72
4.11 สัญญาณ PD ที่ แรงดัน 24 kV/cm..... 72
4.12 ค่าแรงดันและ PD ที่การทดสอบ Partial Discharge ที่ แรงดัน 21 kV/cm..... 73
4.13 สัญญาณ PD ที่ แรงดัน 21 kV/cm..... 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า..... 22

3.1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวท่อ PVC..... 43

3.2 เปรียบเทียบแสดงราคากับค่าสนามไฟฟ้า..... 53

3.3 ค่าประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์สูบน้ำ..... 59

3.4 ผลการทดสอบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ..... 62

4.1 ผลการทดสอบค่า Partial Discharge ของสายขนาดต่าง ๆ..... 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาพเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน การที่จะนำเข้าเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงซึ่งในอดีตสามารถจัดซื้อหรือนำเข้ามาใช้ในประเทศก็มีราคาสูงอยู่แล้วแต่ปัจจุบันค่าของเงินยิ่งสูงเป็นเท่าตัวทำให้เป็นปัญหาอย่างมาก ฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ของประเทศควรคำนึงถึงประโยชน์และการนำไปใช้งานให้เหมาะสมลดต้นทุนการผลิตที่สูงหรือการเสียดุลการค้า โครงงานนี้จึงมุ่งถึงการผลิตหรือออกแบบสร้างอุปกรณ์ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยจะทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 24 กิโลโวลต์ พื้นที่หน้าตัดตัวนำ120ตารางมิลลิเมตรขึ้นมาเพื่อช่วยรองรับอุตสาหกรรมการผลิตสายเคเบิลใต้ดินของประเทศ

การทดสอบในโครงงานนี้จะมุ่งเน้นไปที่การทดสอบวัดค่าการคายประจุบางส่วนของฉนวนไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า "การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน" (Partial Discharge, PD) เป็นการทดสอบเพื่อหาความผิดพร่องของไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็ง (Solid Dielectric Insulation) คือ ฉนวน Cross-linked Polyethylene, XLPE ของสายเคเบิลแรงดันสูง

1.1 ปัญหาที่ศึกษา

1) การออกแบบโครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

2) การทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลแรงดันสูง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องการออกแบบขั้วต่อ สายเคเบิลแรงดันสูงและการทดสอบสายเคเบิลโดยจะทำการศึกษา ตั้งแต่โครงสร้างของ ตัวนำ ชั้นฉนวนหุ้มสายตัวนำ ชั้นฉนวนสารกึ่งตัวนำ ชั้นฉนวน XLPE และ ชั้นของสายชิลด์(Shield) ใช้ในการป้องกันสนามไฟฟ้าไปรบกวนคลื่นความถี่สนามแม่เหล็กภายนอก และปัญหาต่างๆ ในหัวข้อ 1.1

2) เพื่อใช้เป็นชุดทดลองการเกิดค่าดีสชาร์จของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง (XLPE) พิกัดแรงดัน12/20 (24) kV

1.3 เปรียบเทียบกับหลักการของงานวิจัยที่มีอยู่เดิม

จากหลักการของงานวิจัยในเรื่องของเทคโนโลยีการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง ที่มีอยู่ในงานอุตสาหกรรมการทดสอบการใช้งานของสายเคเบิลตามมาตรฐานที่กำหนดของ IEC และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE โดยนำหลักการพื้นฐานของฉนวนเหลวคือ น้ำบริสุทธิ์และน้ำมันหม้อแปลง จะพบว่าฉนวนน้ำมันหม้อแปลงนั้นจะมีต้นทุนสูงกว่าฉนวนน้ำบริสุทธิ์ และฉนวนน้ำมันหม้อแปลงนั้นจะสกปรกง่าย ทำความสะอาดยาก ในโครงงานนี้จึงเลือกใช้ฉนวนน้ำบริสุทธิ์

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ในการศึกษาได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยเป็นหัวข้อดังนี้

1) ศึกษาการเกิดพาเชียลดิสชาร์จ และหลักการทดสอบค่าพาเชียลดิสชาร์จของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง

2) การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน

3) ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน

4) การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1) การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการออกแบบ สำหรับหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง รวมทั้งศึกษาทฤษฎีของฉนวนน้ำบริสุทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ในการเลือกใช้

2) ออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดัน

3) วิเคราะห์และทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูงโดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

4) สรุปผลและเสนอแนะ

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถใช้เป็นหัวทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2) สามารถทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงขนาดแรงดัน 12/20(24kV) พื้นที่หน้าตัดตัวนำไม่เกิน 400 ตารางมิลลิเมตร (ในโครงงานนี้ใช้สาย 120 ตารางมิลลิเมตร ในการทดสอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 บทนำ

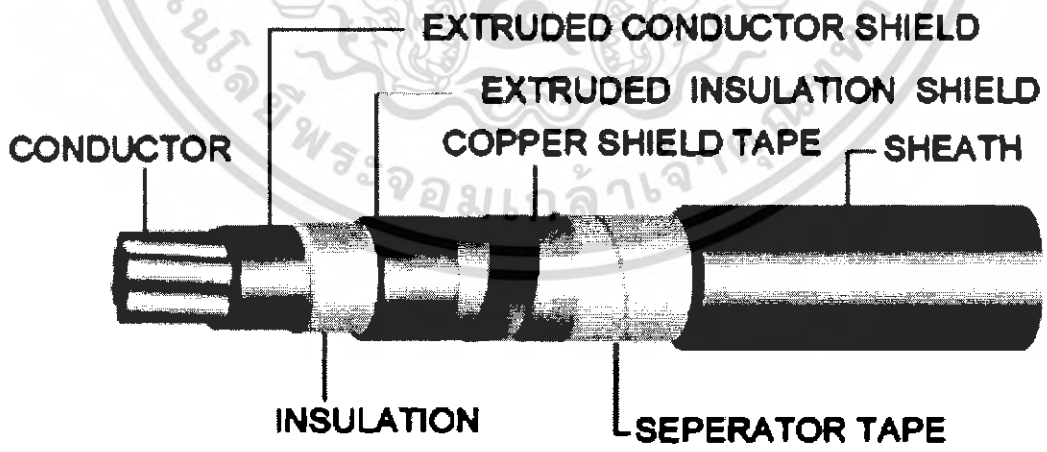
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานทั้งหมด ที่เกี่ยวข้องในการทำงานโครงงานในส่วนของปัญหาเฉพาะที่จะศึกษาในเรื่องของความเข้าใจในหลักการ พื้นฐานของโครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงการเกิดดีสชาร์จบางส่วน การเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว

2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE [1]

สายตัวนำที่จะกล่าวนี้เป็นสายตัวนำที่ใช้ในระบบแรงดัน 22 kV และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE การเลือกใช้ทองแดงเนื่องจากเป็นตัวนำเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ไฟฟ้าที่ดี ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังรูปที่ 2.1

2.2.1 ตัวนำ (Conductor)

อาจเป็นได้ทั้งทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่โดยส่วนมากใช้ตัวนำทองแดง ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดความร้อน (I^2R) ถ้ามีกระแสไหลมากๆ หรือสายมีความต้านทานสูง ก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนนี้จะกระจายผ่านส่วนต่างๆ ของสายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ



รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 Extruded Conductor Shield (Conductive Strand-Shielding)

เป็นวัสดุกึ่งตัวนำทำหน้าที่คล้าย Stress control คือกระจายสนามไฟฟ้าไม่ให้หนาแน่น ณ จุดใดจุดหนึ่ง และยังทำหน้าที่ลดช่องว่างระหว่างสายตัวนำกับฉนวนอีกด้วย ในเคเบิลที่มีขนาด 10 kV ขึ้นไป ผิวสายตัวนำต้องเรียบและจับยึดกับฉนวนเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบผิวของสายตัวนำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ระหว่างผิวสายตัวนำกับฉนวน เพื่อควบคุมเส้นแรงไฟฟ้าบนผิวสายตัวนำและไม่ให้เกิดมีโพรงอากาศใดๆ บนผิวตัวนำกับฉนวนขณะที่สายตัวนำมีการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน นอกจากนั้นเหนือผิวนอกของฉนวน XLPEระหว่าง Screen ต้องเคลือบผิวด้วย Semiconductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge การเคลือบผิวสายตัวนำนอกและผิวนอกของฉนวน XLPE ด้วย Semiconductor จะกระทำในระหว่างกระบวนการหลอมละลาย (Extruding Process)

2.2.3 Insulation

คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น PVC, Silicone Rubber, Polyethylene and Cross-link polyethylene (XLPE) เป็นต้น ความหนาแน่นของฉนวนจะเหมาะสมกับระดับแรงดันที่ใช้ คุณสมบัติของฉนวนที่ดีควรเป็นดังนี้คือ

1) High Dielectric Strength คือ มีค่าความด้านทานสูงแรงดันไฟฟ้า

2) Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำจะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย

3) Low Power Factor เนื่องจากกระแสสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวนเป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนซึ่งเรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้ต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วย เราจึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor

4) Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความด้านทานต่อความชื้นสูงเพราะถ้าความด้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซึมความชื้นได้มาก จะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด

5) High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อนได้ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูง สายไฟฟ้านั้นก็จะนำกระแสได้มากด้วย

6) High Resistance to Corona Damage ระหว่างสายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับด้านที่อยู่ใกล้ตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกที่ทำการติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ในการผลิตและการใช้งานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า

2.2.4 Extruded Insulation Shield หรือ Non-Metallic Extruded Conducting Shield

เป็นชั้นบางๆหุ้มฉนวนอีกทีหนึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Conductive Material) อาจเป็นสารจำพวก Carbon Impregnated Cloth Tape or Conducting Extruded Plastic ทำหน้าที่คล้ายกับ Conductor Shield โดยมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ ลดการเกิด Discharge ระหว่างผิวของฉนวนกับ Ground ลดค่า Radio Frequency Interference และเพื่อความปลอดภัยต่อบุคคลอื่นอาจสัมผัสถูกสายไฟฟ้า

2.2.5 Copper Shield

ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม ส่วนมากทำด้วยทองแดง อาจทำด้วย Metal Tape, Corrugated Metal, Metal Drain Wire หรือ Lead Sheath

1) ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) กระแส Discharge ต่างๆลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับระดับความต่างศักย์ของ Insulating Shield ให้เท่ากับดินอีกด้วย

2) ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องจาก Surge Voltage

3) สามารถออกแบบให้นำกระแสอันเนื่องจาก Fault ได้ถ้าต้องการ

2.2.6 Separator Tape (Bedding Type)

ปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความลื่นระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายดัดโค้งหรืองอ

2.2.7 Sheath

เปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน ส่วนมากเป็น PVC หรือ PE เพื่อลดความเสียหายอันเนื่องจากการกระแทกหรือเสียดสี ถ้าเป็นกรณีของ Lead Sheath อาจไม่ต้องมี Sheath เลยก็ได้หรือถ้ามีก็จะมีไว้ป้องกันการผุกร่อนของดะกั่วในกรณีที่นำสายไฟฟ้านี้ไปในสภาวะแวดล้อมซึ่งอาจมีสารที่ทำปฏิกิริยากับดะกั่ว

ในระบบสายใต้ดิน ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ หัวปลายสาย (Terminator) หรือ Pothead ส่วนมากติดตั้งอยู่บนเสาต้น Riser pole หรืออยู่ในแผงควบคุมในสถานีย่อย หรืออยู่บนนั่งร้าน (Plat form) หม้อแปลงตรงบริเวณสวิทซ์แรงสูง (H.V.Switch) หรือติดตั้งตามที่ต่างๆที่เราต้องการให้สายเคเบิลไปสิ้นสุดลง เพื่อทำหน้าที่ต่อกับระบบสายอากาศ หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Cable มาสิ้นสุด ณ ที่นั้น เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Radial Stress และ Longitude Stress ถ้า Shielding ของ Cable ไม่ขาด Stress ทั้งสองอย่างนี้จะถูกควบคุมให้คงที่เสมอ และมีค่าตามที่กำหนดไว้ เมื่อ Shield ของ Cable มาสิ้นสุดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ Stress ทั้งสองทำให้ฉนวนเสียหายตรงจุดที่ Shield สิ้นสุดนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายนี้ จึงจำเป็นต้องมีการทำการป้องกัน โดยแก้ไขไม่ให้ Stress ทั้งสอง ทำให้ฉนวนเสียหาย เรียกกว่าการทำ Terminator ปลายสายเคเบิล

2.3 ฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน

ฉนวนที่ใช้สำหรับหุ้มสายไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภททั้งฉนวนที่เป็นของเหลวและฉนวนที่เป็นของแข็ง แต่เนื่องจากฉนวนที่หุ้มสายไฟฟ้านั้นนอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้ามีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว ฉนวนที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้าจึงเป็นฉนวนที่เป็นของแข็งไม่รวมสายเปลือยเพราะสายเปลือยนี้ในขณะที่ใช้งานจะมีอากาศเป็นฉนวนซึ่งฉนวนที่เป็นของแข็งนั้นมีหลายชนิดทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ ผ้า ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไมกา แก้ว เซรามิก หรือสารสังเคราะห์เช่นพลาสติก แต่ฉนวนที่นำมาใช้ในการหุ้มสายไฟฟ้า ในปัจจุบันฉนวนจะแข็ง เป็นประเภทสารสังเคราะห์ เช่น Polyvinylchloride (PVC), Polyethylene (PE), Ethylene propylene Rubber (EPR) และ Crosslink polyethylene (XLPE) ซึ่งเป็นสารที่ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตสายไฟฟ้า ซึ่งการเลือกใช้ฉนวนชนิดใดนั้นต้องทราบถึงคุณสมบัติทั่วไปของฉนวนแต่ละชนิด ซึ่งคุณสมบัติที่ควรพิจารณา เช่น

1) ข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้งาน เช่น ระดับแรงดัน อุณหภูมิใช้งาน อุณหภูมิขณะทำงานเกินพิกัด หรืออุณหภูมิการเกิดลัดวงจรเป็นต้น

2) คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางอุณหภูมิ

3) ลักษณะของสภาพแวดล้อม เช่น ทางเคมี การกระแทก การสั่นสะเทือน

4) ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น การหน่วงเปลวไฟ การทนต่อสภาพอากาศของฉนวน

ประเภทของฉนวนที่ใช้ในการหุ้มฉนวนฉนวนในโครงงานนี้ใช้ฉนวนประเภท Thermosetting ลักษณะของสารประเภทนี้ คือ ไม่สามารถใช้ความร้อนเพื่อนำสารประเภทนี้กลับมาใช้ใหม่ได้ ฉนวนประเภทนี้ที่นำมาหุ้มฉนวนมี

1) เอ็ททีลีน โพพีนลีนรับเบอร์ (Ethylene Propylene Rubber; EPR) เป็นสารที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลดีขึ้น เช่น มีความทนต่ออุณหภูมิที่เกิดได้สูงขึ้น ทำให้การสูญเสียทางไฟฟ้าลดลง

2) ครอสลิ้งโพลีทีลีน (Cross Link Polyethylene ;XLPE) สารประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสารนี้เกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของสาร

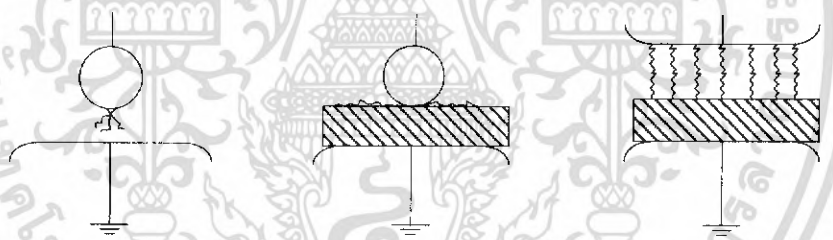
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกโพลิทีลีน (Thermoplastic Polyethylene) มาผ่านกรรมวิธีเพื่อให้คุณสมบัติดีขึ้น กรรมวิธีที่ใช้เรียกว่าการ Curing การใช้สาร PE สำหรับเป็นฉนวนไฟฟ้าอุณหภูมิใช้งานจะถูกจำกัดเพียงไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถรับกระแสและแรงดันได้มากกว่า เนื่องจากถ้าใช้ XLPE เป็นฉนวนต้นทุนมีราคาสูง มีการลดต้นทุนโดยการผสม แคลเซียมคาร์บอเนต 30 % ลงในสาร XLPE หรือลดการเสียรูปเมื่อโดนความร้อน โดยการผสม Carbon Black

2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน [2]

ดีสชาร์จบางส่วน คือ ดิสชาร์จเบรคดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างโคโรนา จึงเรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของโคโรนาด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่

ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น



ก) โคโรนาดิสชาร์จ ข) ดีสชาร์จตามผิว ค) ดีสชาร์จภายในรอยต่อ

ง) ดีสชาร์จภายในโพรงก๊าซ จ) ดีสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

รูปที่ 2.2 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

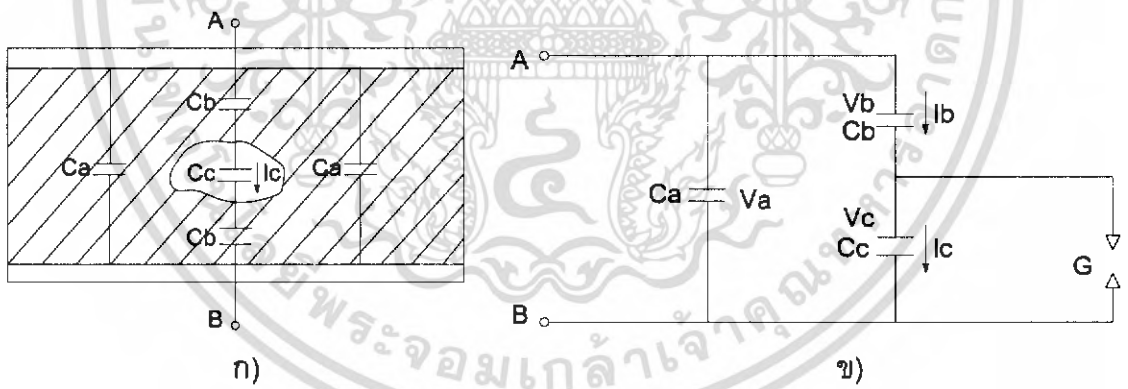
ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดผิดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวน เสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบขึงอากาศ เรียกว่า **โคโรน่า** ย่อมหมายถึงการเกิดการสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรน่าพัลส์ดีสชาร์จดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่าคลื่นรบกวนวิทยุ

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ

2.4.2 วงจรสมมูลดีสชาร์จภายใน

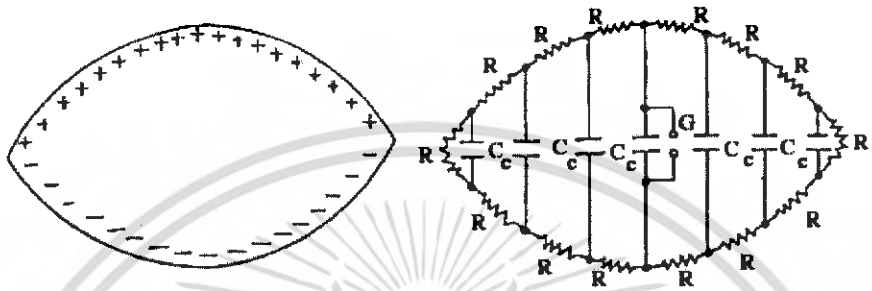
โดยปกติแล้ววงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับถ้ากล่าวถึงดีสชาร์จบางส่วนอย่างลอยๆ ก็ให้หมายถึงดิสชาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิด PD อาจแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_a, C_b, C_c และแกป G ตามลำดับ โดยที่แกป G จะแทนการลัดวงจรขณะเกิด PD, $C_a = C_a' + C_a''$ และ $C_b = C_b' C_b'' / (C_b' + C_b'')$ ดังรูปที่ 2.3 ในทางปฏิบัติจะพบว่า $C_a >> C_c >> C_b$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (PD) ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

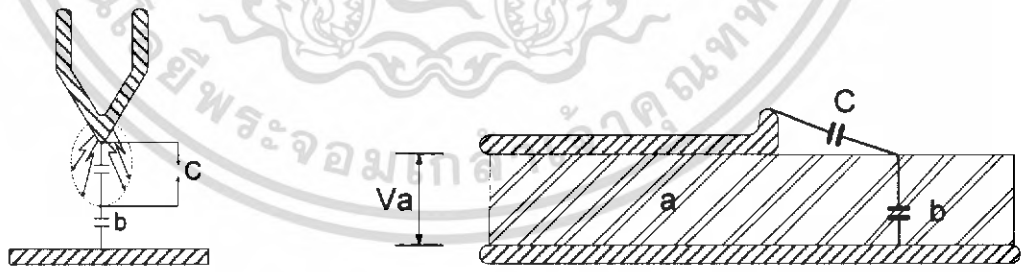
วงจรสมมูลในทางปฏิบัติของ PD เนื่องจากเกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงเฉพาะส่วนของโพรงอากาศและผิวฉนวนที่อยู่ติดกับโพรงอากาศเท่านั้น โดยในรูปที่ 2.4 ก) แสดงการกระจายของประจุก่อนการเกิดเบรคดาวน์ ในรูปที่ 2.4 ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยความต้านทานซึ่งมีค่าสูงมาก แทนโพรงอากาศด้วยตัวเก็บประจุต่าง ๆและสปาร์กแกปตรงตำแหน่งที่จะเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานที่ผิว ผลที่ได้จึงใกล้เคียงกับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3 นั่นเอง



ก) ข)

รูปที่ 2.4 (ก) การกระจายของประจุก่อนเกิดเบรคดาวน์
(ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศ R และ C

แต่อย่างไรก็ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิวได้ โดยการแทนส่วนต่าง ๆ ของฉนวนหรืออากาศรอบ ๆด้วย C_a, C_b, C_c และแกป G ตามลำดับดังรูปที่ 2.5



ก) ข)

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิว
ก) การเกิดโคโรนาดีสชาร์จที่วัสดุปลายแหลม ข) การเกิดโคโรนาดีสชาร์จตามผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 เมื่อ

a คือ ฉนวนส่วนที่สมบูรณ์อาจแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_a

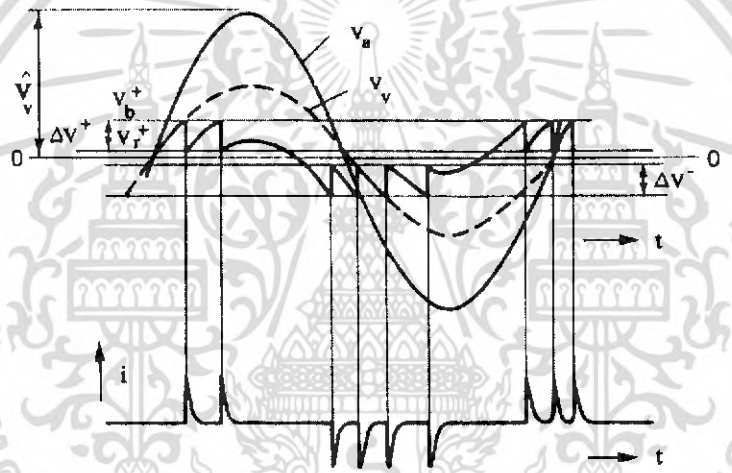
b คือ ฉนวนส่วนที่ถูกทำให้เสียหายแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_b

c คือ อากาศแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_c

2.4.3 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน

2.4.3.1 การเกิดดิสชาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำได้หลายๆครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่2.6 โดยที่ Va คือแรงดันดกคร่อมขั้วของอุปกรณ์ V_b คือแรงดันดกคร่อมโพรงอากาศหรือแกป V_r คือแรงดันหลังเกิดการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป V_v แรงดันดกคร่อมโพรงอากาศหรือแกปถ้าไม่มีการเกิด PD เลยและ i คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของแรงดันดกคร่อมแกปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดขณะเกิด PD

จำนวนครั้งการเกิด PD สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.7 โดยสมมติว่า PD เกิดแบบสมมาตรกับแกนเวลา ดังนั้นจำนวน PD ต่อครึ่งคาบเวลา N คำนวณดังนี้

$$N = \frac{[(\hat{V}_v - V_r) - Y]}{V_b - V_r} \qquad (2.1)$$

โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการเกิด PD ต่อครึ่งคาบเวลา

V_b คือ แรงดันเบรคดาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

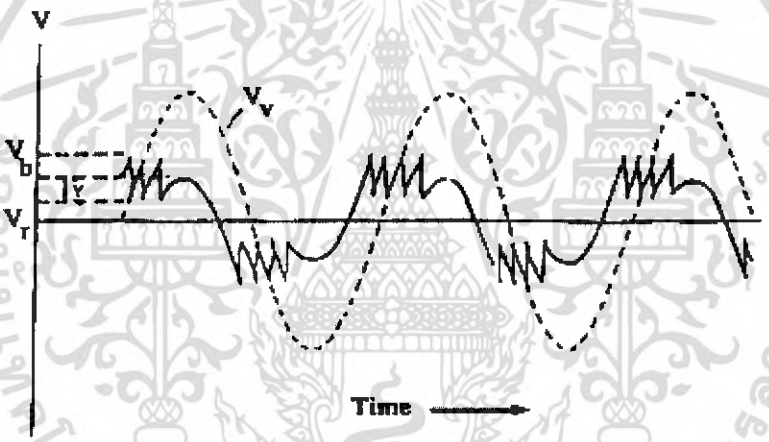
V_r คือ แรงดันหลังการเบรคดาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป

$\hat{V}_v$ คือ ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแกปถ้าไม่มีการเกิดของ PD เลย ซึ่งเท่ากับ $[C_b/(C_b+C_c)]$ เท่าของค่ายอดของแรงดันคร่อมวัสดุทดสอบ

Y คือ แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า $0 \le Y \le (V_b - V_r)$

2.4.3.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแกปเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



รูปที่ 2.7 การเกิด PD ซ้ำ ในรูปของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในหนึ่งคาบเวลา

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางปฏิบัติ ซึ่งวัดโดยเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างพิเศษ (Ultra-wide band detector = UWB) ใน Epoxy และปลายแหลมในก๊าซ SF_6 จะให้ลักษณะรูปร่างเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.8 จะพบว่ามีช่วงเวลาขึ้นประมาณ 0.3 ถึง 0.8 นาโนวินาที ความกว้างของพัลส์ที่ขนาดลงครึ่งหนึ่ง ประมาณ 1.5 นาโนวินาที จากรูปที่ 2.8 สามารถประมาณลักษณะรูปร่างของกระแส PD เป็นรูป "Gaussian" คือ $i(t)$ ได้ดังนี้

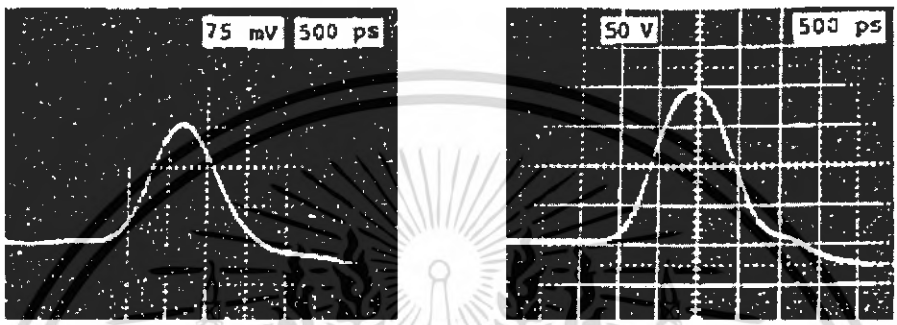
$$i(t) = I_0 EXP[-t^2/2\sigma^2] \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสเปกตรัมความถี่ของกระแส PD คำนวณได้ดังนี้

$$I(w) = I_0\sigma(2\pi)^{1/2}\,EXP(-w^2\sigma^2/2) \qquad (2.3)$$

โดยการกำหนดความกว้างของพัลส์เท่ากับ 2.36σ และ I_0 คือค่ายอดของกระแส PD ดังนั้น $\sigma \approx 6.36\times10^{-10}$ วินาที ซึ่งการคำนวณพบว่าสเปกตรัมของความถี่มากกว่า 200 เมกกะเฮิร์ดซ์



(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB

(ก) กระแส PD ที่เกิดใน Epoxy

(ข) กระแส PD ที่เกิดจากปลายแหลมในก๊าซ SF_6

จากการค้นคว้าเอกสารต่างๆ เกี่ยวกับช่วงเวลาการเกิด PD ในฉนวนแข็งและเหลวที่มีโพรงอากาศภายใน จะพบว่ากระแสพัลส์ของ PD จะมีช่วงเวลา < 5 นาโนวินาที เพราะว่า PD เกิดในที่แคบๆ ฉนวนเนื้อเดียว เช่น ก๊าซจะมีช่วงเวลาขึ้น < 5 นาโนวินาทีและเวลาส่วนหางคลื่นจะยาวกว่าช่วงเวลาขึ้น สำหรับในอากาศกระแสพัลส์ของ PD มีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที

2.4.3.3 พลังงานดิสชาร์จบางส่วน

พลังงานดิสชาร์จภายในของวัสดุทดสอบ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W = 0.7qV_i \qquad (2.4)$$

เมื่อ W คือ พลังงานดิสชาร์จ

q คือ ประจุที่ปรากฏของ PD

V_i คือ แรงดันเริ่มต้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน (ค่า rms)

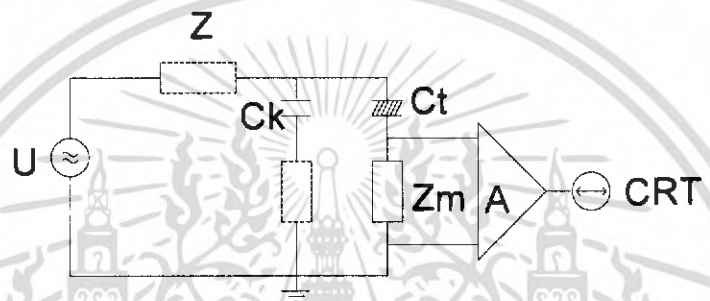
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานดิสชาร์จบางส่วนนี้ อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนได้ เช่น V_i = 10 กิโลโวลท์ และ q = 10 พิโคคูลอมบ์ ดังนั้น $W = 7 \times 10^{-8}$ จูล ซึ่งมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานจำนวนนี้ปล่อยออกมาขณะเกิด PD ในช่วงเวลา < 10^{-8} วินาที และเกิดในที่แคบๆ ทำให้ความหนาแน่นพลังงานบริเวณนั้นสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.5 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

2.5.1 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการดรวจจับ PD ด้วยวิธีดรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.9



U คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูง
C_t คือ วัสดุทดสอบ
C_k คือ ตัวเก็บประจุคับปลิง
Z_m คือ อิมพีแดนซ์วัด
A คือ วงจรขยายสัญญาณ
CRT คือ ภาคแสดงผล
Z คือ ตัวกรอง

รูปที่ 2.9 วงจรพื้นฐานสำหรับการดรวจจับ PD

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงมากขณะเกิด PD ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บประจุคับปลิงเป็นทางผ่านของกระแสพัลส์หรือคับปลิงสัญญาณเพราะฉะนั้นวงจรนี้จึงมีความเสี่ยงสูงในการดรวจค่า PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

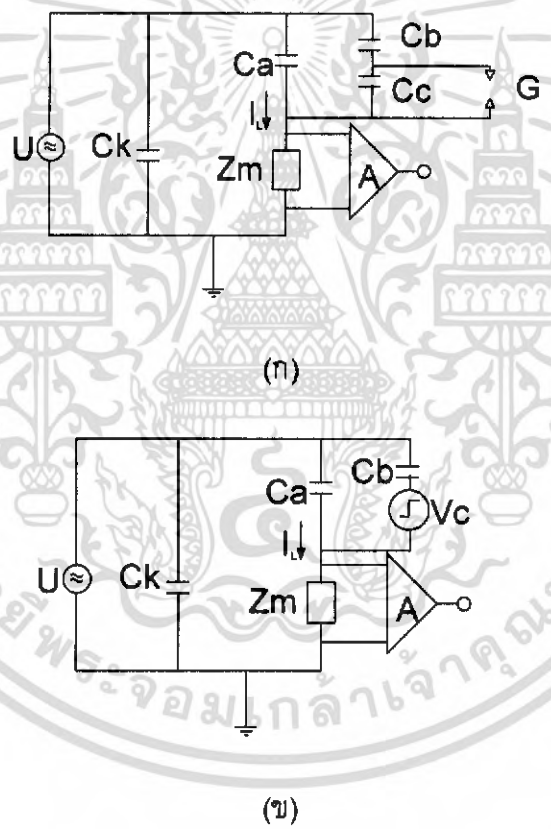
2.5.2 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

จากวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.9 จะแทนวัสดุทดสอบ C_t ด้วยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วย C_a, C_b, C_c และแกป G ดังรูปที่ 2.10 ก) เนื่องจากเบรคดาวน์ของโพรงอากาศหรือแกปจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า 10^{-7} วินาที ซึ่งถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแกป V_c ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น ดังรูปที่ 2.10 ข) คือ

$$V_c \approx \Delta V U(t) \tag{2.5}$$

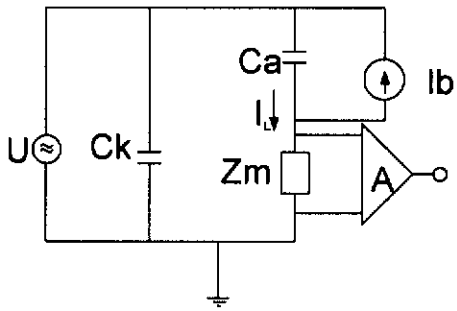
เมื่อ ΔV คือ แรงดันดกคร่อมโพรงอากาศหรือแกป

$U(t)$ คือ ฟังก์ชั่นรูปขั้น (Unit Step Function)



รูปที่ 2.10 การแทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 2.10 (ต่อ) การแทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

ก) แทนวัสดุทดสอบ C_t ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย C_a, C_b, C_c และแกป G

ข) แทน C_c และ G ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ $V_c \approx \Delta v U(t)$

ค) แทน C_b และ V_c ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์ $i_b \approx q\delta(t)$

ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.10 ข) ก็คือ "วงจรพื้นฐานสำหรับการปรับเทียบ" เนื่องจากโดยปกติแล้ว $C_a >> C_b$ ดังนั้นเมื่อมองอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่ายแรงดัน V_c จะมองเห็นอิมพีแดนซ์รวมประมาณของ C_b จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$i_b = C_b \frac{dV_c}{dt} \approx C_b \Delta v \delta(t) \qquad (2.6)$$

เมื่อ $\delta(t)$ คือ "Unit Impulse Function"ถ้านิยามให้ $q = C_b \Delta V = \int_0^\infty i_b dt$ คือประจุที่ปรากฏของ PD จากนั้นเมื่อแทนค่า $q = C_b \Delta V$ ในสมการ (2.6) จะได้

$$i_b \approx q\delta(t) \qquad (2.7)$$

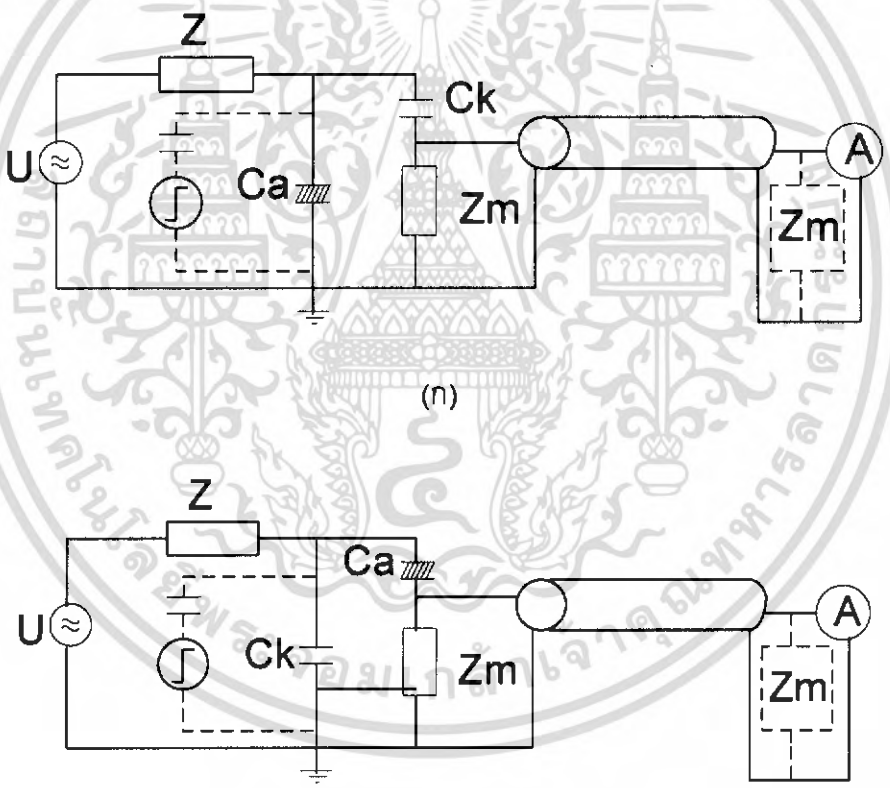
ในรูปที่ 2.10 ค) แทนการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสพัลส์ i_b มีช่วงเวลาเกิด $\leq$ 5 นาโนวินาที สำหรับฉนวนแข็งและเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน

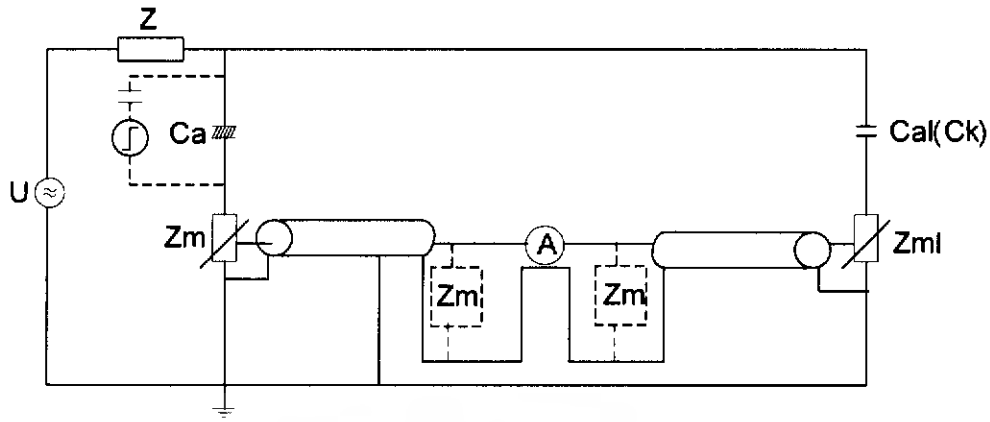
2.6.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมป์หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 270 โดยรูปที่ 2.11 ก) และรูปที่ 2.11 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.11 ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรคดาวน์อิมพีแดนซ์วัดจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจรในรูปที่ 2.11 ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสเตรย์จะทำให้ตัวเก็บประจุคับปลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 2.11 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ “คอมมอนโหมด” นั่นเอง



รูปที่ 2.11 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 2.11 (ต่อ) วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 270

เมื่อ

U	คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูง
C_k ,Cal	คือ วัสดุทดสอบ
C_a	คือ ดิไวเดอร์
Z_m	คือ อิมพีแดนซ์วัด
A	คือ วงจรขยายสัญญาณ

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ (เส้นประ) หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วควรเอาเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ

2.7 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

2.7.1 ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 270

กำหนดให้มีคุณสมบัติโดยสรุปไว้ดังนี้ คือ

1) เวลา แยกชัดของเครื่องตรวจจับ PD กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 270 (1981) ว่าต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาทีในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการซ้อนทับของพัลส์ PD

62663
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน IEC Publ. No. 270(1981) กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลาขึ้นไม่เกิน0.1ไมโครวินาที และลดลงด้วยค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วง 100 ถึง 100 ไมโครวินาที

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

4) เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ที่ใช้ ในการตรวจสอบคุณสมบัติ ซุปเปอร์โพซิชันของเครื่องตรวจจับ PD นั้น กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-3 ว่าต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากันสองพัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลาขาขึ้นไม่เกิน 20 นาโนวินาที และมีความกว้างของพัลส์จากค่า 10% ของหน้าคลื่นถึงหางคลื่นต้องไม่เกิน 150 นาโนวินาที โดยพัลส์ทั้งสองนี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2 ถึง100 ไมโครวินาที สำหรับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 0 ถึง 60 โอห์ม

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

6) เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC ยอมให้เกิดซุปเปอร์โพซิชันทางลบได้ไม่เกิน 10% ในกรณีที่เกิน 10% จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาในการวัดด้วย

2.8 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

สามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก

โพรงอากาศชนิดนี้มักจะพบในฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่นการหล่อ การหุ้ม การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการดิสชาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปไซน์

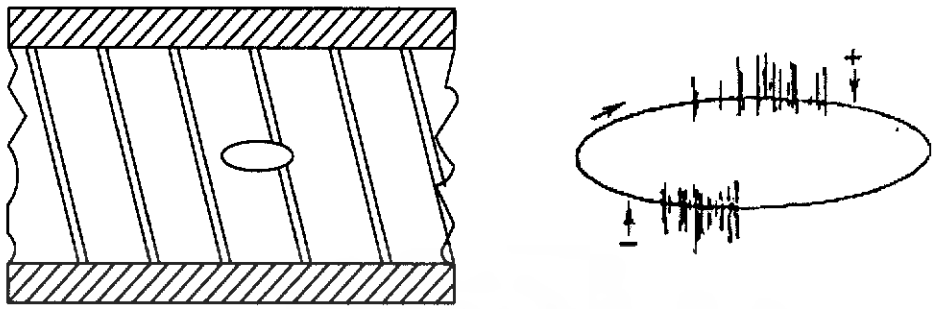
ตำแหน่งของการดิสชาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรีในช่วงที่แสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วน ขนาดของการดิสชาร์จนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การดิสชาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือเมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนไปมาก จากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้น (Withstand) และช่วงเวลาที่กำหนด (≅ 10 นาที)

2) การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก

การดิสชาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่ง

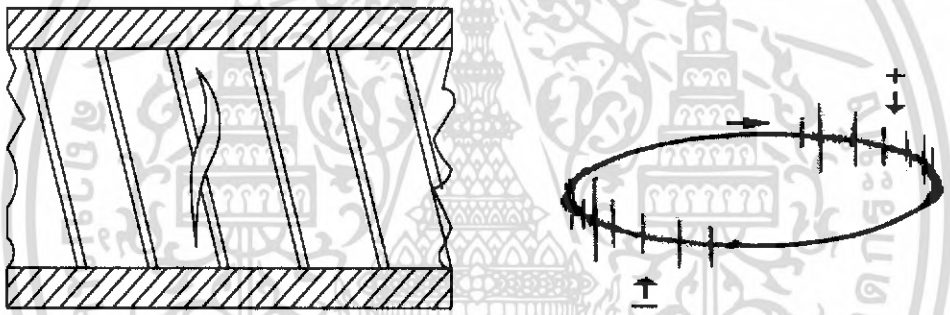
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆกัน และขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว



ก) โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

รูปที่ 2.12 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ



ก) รอยแตกภายในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

รูปที่ 2.13 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก

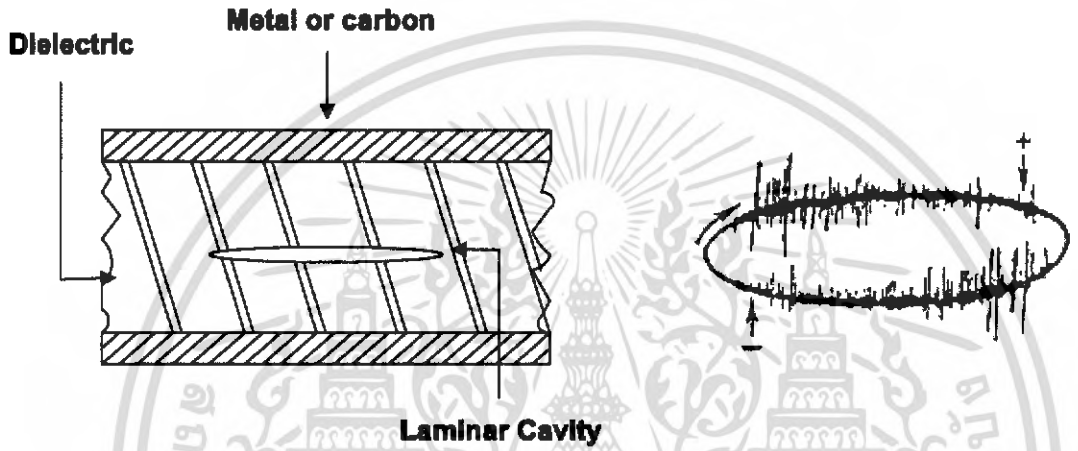
การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์

ค่าของการดิสชาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิสชาร์จก็จะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลา ≈30 นาที ขนาดของการดิสชาร์จจะค่อยๆลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants) ภายในไดอิเล็กตริก

เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) จะหมายถึงเศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย



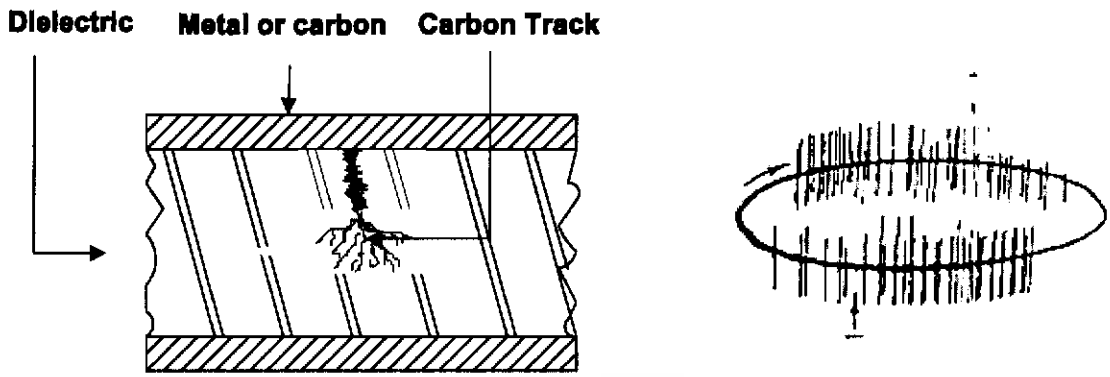
ก) เศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

รูปที่ 2.14 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน

4) การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track)

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น ครอสลิงค์โพลีเอทีลีน เอทีลีน และโพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) คาร์บอนแทรคภายในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

รูปที่ 2.15 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุด ขนาดของการดิสชาร์จจะมีปริมาณมาก ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทรก โดยทั่วไปการดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการดิสชาร์จ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกและขนาดของการดิสชาร์จ ที่แรงดันสูงมากๆจะทำให้ขนาดของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ขนาดของการดิสชาร์จจะไม่คงที่ การทดสอบที่ซ้ำๆ จะทำให้ขนาดของคาร์บอนแทรกขยายตัวใหญ่ขึ้น จากการจำแนกชนิดของการดิสชาร์จบางส่วน จากความบกพร่องของไดอิเล็กตริกในสายเคเบิลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุมาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าการแสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วนจะประกอบไปด้วยสาเหตุหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วรวมกันทั้งสัญญาณรบกวนจะภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน (Filter) เหล่านี้ออก เพื่อที่จะแสดงขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง

2.9 การเกิดเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว [2]

สำหรับฉนวนของเหลวนั้น การใช้งานหลักๆ ในทางไฟฟ้าแรงสูงจะใช้ในการฉนวนสายเคเบิล ตัวเก็บประจุแรงสูง ฉนวนน้ำมันสำหรับหม้อแปลง และเซอร์กิตเบรคเกอร์ เป็นต้น และนอกจากคุณสมบัติการใช้งานในทางฉนวนแล้ว ฉนวนของเหลวยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ เข้ามาพิจารณาอีกในการใช้งานจริง เป็นต้นว่า ฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงด้วย ส่วนฉนวนในเซอร์กิตเบรคเกอร์จะเป็นตัวดับอาร์คด้วย ฉนวนของเหลวหรือสารไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานกันมากที่สุดก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันปิโตรเลียมและสารพวกไฮโดรคาร์บอน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ บางครั้งจะมีการใช้น้ำมันซิลิโคนและฟลูออริเนทไฮโดรคาร์บอน ในระยะหลังๆ นี้เริ่มที่จะมีการใช้น้ำมันพืชและเอสเตอร์เป็นฉนวนโดยปกติฉนวนของเหลวจะเป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน และจะเกิดเป็นขั้ว (Polarize) ได้ง่าย การใช้งานฉนวนของเหลวควรจะปราศจากความชื้น, สารที่เกิดจากการออกซิเดชั่นและสิ่งปนเปื้อนต่างๆและการที่มีสิ่งเจือปนผสมอยู่เพียง 0.01% จะมีค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงจากน้ำมันหม้อแปลงในสภาวะแห้ง (ไม่มีน้ำเจือปน) ถึง 20% และถ้าน้ำมันมีสิ่งเจือปนเป็นสารอื่นจะยิ่งทำให้ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงรวดเร็วกว่านี้มาก การพิจารณาคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเหลว จะพิจารณากันที่สำคัญๆ ด้วยกัน 3 ประการคือ ค่าความนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε) และค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์

ในการนำฉนวนเหลวมาใช้งานจริงๆนั้นจะต้องพิจารณาคุณสมบัติอื่นอีกหลายประการ ทั้งทางฟิสิกส์และเคมี เป็นต้นว่า ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด การทนต่อความร้อน การระบายความร้อน การลุกไหม้ ฯลฯ ในทางปฏิบัติจริง การเลือกใช้ฉนวนของเหลวจะพิจารณาจุดหลักที่เสถียรภาพทางเคมีรวมไปถึงคุณสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่การใช้งาน ราคา ความสะดวก อายุการใช้งาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า [1]

คุณสมบัติ	ชนิดของฉนวนเหลว		
	น้ำมันหม้อแปลง	คลอริเนท	ฟลูออริเนท
ความถ่วงจำเพาะ g/cm^3	0.9	1.4	1.8
จุดติดไฟ ^{o}C	130-180	-	-
สภาพนำความร้อน $mW/cm\ ^{o}C$	1.6	1	1
ความต้านทานจำเพาะ ohm-cm ที่ $85^{o}C$	$100*10^{12}$	$100*10^{12}$	$100*10^{12}$
แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าที่ $80^{o}C$ 50 Hz	$10*10^{-4}$	$6*10^{-4}$	$6*10^{-4}$
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC Standard ที่ $20^{o}C$ kV/mm	10-25		
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์คไฟฟ้า	ไฮโดรเจน อะเซตทีลีน	กรดไฮโดร คลอริค	กรดไฮโดร ฟลูออริค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์จากช่องว่างและฟองก๊าซ

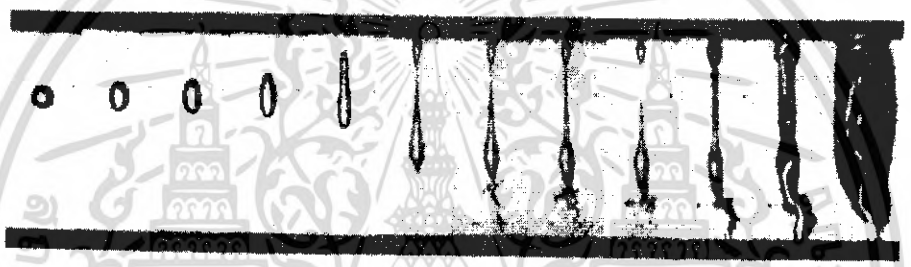
จากการทดลองในฉนวนเหลวหลายชนิดพบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์จะขึ้นกับค่าความดันน้ำที่กระทำกับของเหลว จึงได้มีการสันนิษฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าชนิดของการฟอร์มตัวของฟองก๊าซที่แทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวนั้นมีผลอย่างมากต่อการเบรคดาวน์ และกระบวนการต่างๆ ที่คาดกันว่าจะเป็นผลให้เกิดการฟอร์มตัวของฟองก็คือ

1) ก๊าซที่ถูกกับเก็บไว้ที่ผิวของอิเล็กโทรด (ผิวขั้วไม่เรียบทำให้มีหลุมก๊าซ)

2) แรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างประจุ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดแรงดึงผิวขึ้น

3) การแยกตัวของโมเลกุลของฉนวนเหลวที่เกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ขั้วอิเล็กโทรด

4) การระเหยของฉนวนเหลวจากการเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.16 หยดน้ำเมื่ออยู่ในฉนวนเหลว (ซิลิโคน) ภายใต้สนามไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นหรือแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวจะเปลี่ยนรูปร่างโดยยืดตัวออกตามแนวของสนามไฟฟ้า เพราะฟองเหล่านี้ไม่สามารถอัดตัวได้ ขณะที่ฟองก๊าซยืดตัวออกตามแนวแรงทางไฟฟ้าจะยังคงมีปริมาตรคงที่อยู่ตลอด การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันดกคร่อมตามแนวยาวของฟองเท่ากับค่าต่ำสุดบนเส้นโค้งของ Paschen (Paschen's Curve) ตามคุณสมบัติของก๊าซที่แทรกอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำในฉนวนเหลวซิลิโคนเป็นขั้นตอนเมื่อจ่ายแรงดันคร่อมขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นได้ชัดว่าหยดน้ำที่ผสมอยู่จะเป็นตัวทำให้เกิดเบรคดาวน์ขึ้น

2.9.2 กลไกทางอุณหภูมิของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว

เทอร์มัลเบรคดาวน์เป็นอีกกลไกหนึ่งที่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวได้เป็นอย่างดี กลไกนี้เป็นการพิจารณาการทดลองขณะที่เกิดกระแสปริมาณมากๆ ในช่วงก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเบรคดาวน์ โดยวิเคราะห์ให้กระแสนี้เดินทางจากจุดเล็กๆบนผิวคาโทด (มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2)) กระแสที่มีความหนาแน่นสูงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในฉนวนเหลว และทำให้เกิดฟองไอขึ้น ฟองไอนี้จะฟอร์มตัวกันขึ้น เมื่อพลังงานเกินกว่า 10^7 วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (w/cm^2) และเกิดเบรคดาวน์ตามมาโดยการยืดตัวของฟองก๊าซจนถึงจุดวิกฤต หรือเมื่อช่องว่างที่เกิดขึ้นยืดตัวจนเป็นสะพานระหว่างขั้นอิเล็กโทรด โดยทั้ง 2 กรณีจะสังเกตเห็นการสปาร์คเป็นประกายไฟขึ้น

การพิจารณากลไกเบรคดาวน์ลักษณะนี้จะได้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์แปรผันกับความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น N-alkenes จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ขึ้นกับความยาวลูกโซ่ของโมเลกุล อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้จะอธิบายได้เฉพาะในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Gap) ใกล้ๆกันเท่านั้น (≤ 100 μm) ไม่สามารถอธิบายการเบรคดาวน์ที่ระยะห่างมากๆได้

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวคือระยะระหว่างอิเล็กโทรดหรือระยะห่าง (Gap Length) โดยค่าแรงดันเบรกดาวน์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V_b = Ad^n \tag{2.8}$$

โดย d เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

A เป็นค่าคงที่

n เป็นค่าคงที่

A และ n จะหาได้จากการทดลองเท่านั้นและเราสามารถหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$E = \frac{V_b}{d} \tag{2.9}$$

นอกจากปัจจัยต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้ว แรงดันเบรคดาวน์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของลูกคลื่นแรงดัน และช่วงเวลาที่ป้อนผ่านฉนวนเหลวอีกด้วย นั่นคือ ความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวจะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงอยู่ในลักษณะต่างๆ จากการทดลองพบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ขณะจ่ายแรงดันคงตัว (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ) จะมีค่าต่ำกว่าขณะจ่ายแรงดันลูกคลื่นอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง [2]

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวบอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนมี 3 ประการ คือ

1) ความต้านทานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์ ถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง จะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้น นั่นคือ จะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสอยู่บ้าง แต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านสูงไม่เป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงจำกัดที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็ยิ่งแสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างโคโรนาที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัวจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่า กระแสรั่ว กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้ แบ่งออกเป็น 2 ทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวมีสภาพนำ เนื่องจากมีสิ่งเปรอะเปื้อนและความชื้นที่ผิวด้วยเหตุนี้เอง การวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็น ความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

ค่าความต้านทานของฉนวนอาจคำนวณหรือวัดได้ เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความหนา d พื้นที่ภาคตัด A ของฉนวน เช่น ในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่น ระนาบตัวเก็บประจุ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho\frac{d}{A} \quad \Omega \qquad (2.10)$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$R = \int_{r_1}^{r_2}\frac{\rho dx}{2\pi l x} = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{r_2}{r_1} \quad \Omega \qquad (2.11)$$

เมื่อ x คือ รัศมีใด ๆ วัดจากแกน และ dx คือ ความหนาส่วนย่อยของฉนวน

r_1, r_2 คือ รัศมีของตัวนำในและตัวนำนอกตามลำดับ

l คือ ความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เปอร์มิตติวิตี้ (Permittivity)

เปอร์มิตติวิตี้ คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ε เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของ ไดอิเล็กตริกหรือ สารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างค่าเก็บประจุ หรือกล่าวง่าย ๆ ε ก็คือ ค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของค่าเก็บประจุสุญญากาศ C_0 ดังรูปที่ 2.17 เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเปอร์มิตติวิตี้ ε เข้าไปแทนที่ จะได้ค่าเก็บประจุ C อัตราส่วนค่าเก็บประจุ คือ

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \qquad (2.12)$$

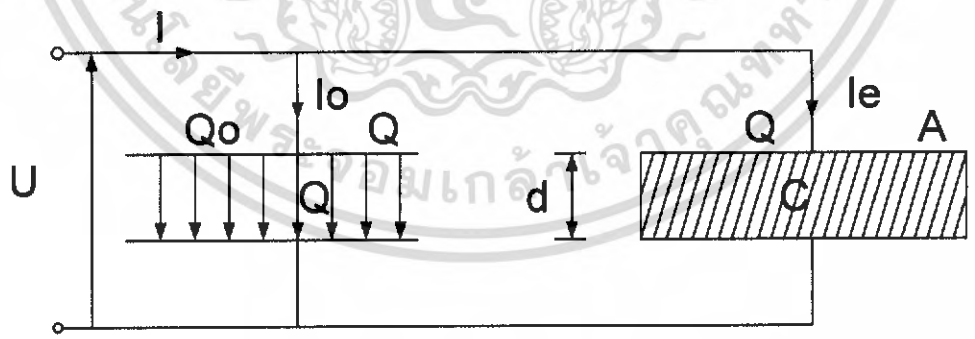
หรือค่าเก็บประจุมีไดอิเล็กตริก

$$C = \varepsilon_r C_0 \quad \text{Farad} \qquad (2.13)$$

ปกติเปอร์มิตติวิตี้ ε จะแสดงเป็นค่าสัมพันธ์ ε_r เทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ หรือความว่างเปล่า ε_0 คือ

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \qquad (2.14)$$

โดยที่ $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854*10^{-12}$ F/m [2]



รูปที่ 2.17 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นสุญญากาศ ε_0 และ ε

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุ[2] $C = \frac{Q}{U}$ จะได้ค่าเก็บประจุของสุญญากาศ

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{Farad} \qquad (2.15)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ระนาบ m^2

D คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ m

ε_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ = $8.854*10^{-12}$ F/m

ถ้าใส่ไดอิเล็กตริกในสารอื่น เข้าไปแทนที่สุญญากาศระหว่างแผ่นโคโรนา จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจร รูปที่ 2.17 จะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าเก็บประจุเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนโคโรนาเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดอิเล็กตริกมากขึ้นในตัวเก็บประจุสุญญากาศที่มีค่าเก็บประจุ C_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$I(t) = C\frac{du(t)}{dt} \text{ หรือ } \bar{I} = j\omega C_0 \bar{U} \quad \text{Amp} \qquad (2.16)$$

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นว่ากระแสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าเก็บประจุ C จะไม่เท่ากับ C_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่า ในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในลักษณะความต้านทานแสดงว่าค่าเก็บประจุเป็นคอมเพลกซ์คือมีค่าจริงและค่าจินตภาพซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี้ คือ

$$\bar{C} = \varepsilon_r C_0 \quad \text{Farad} \qquad (2.17)$$

$$\bar{\varepsilon}_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad (2.18)$$

โดยที่ $\bar{\varepsilon}_r$ คือ เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์

ฉะนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าเก็บประจุ

$$\bar{I} = j\omega\bar{C}U = I_c + I_a$$
$$= j\omega(\varepsilon'-j\varepsilon'')C_0\bar{U} \qquad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{I} = j\omega \varepsilon' C_0 \bar{U} + \omega \varepsilon'' C_0 \bar{U} \quad \text{Amp} \qquad (2.20)$$

โดยที่เทอมแรกขวามือ คือ กระแสเก็บประจุ I_c และเทอมหลัง คือ กระแสกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ในกรณีที่กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ $\varepsilon'' < \varepsilon'$ หรือ $tg\delta << 1$ จะได้ [2]

$$\bar{\varepsilon}_r = \varepsilon_r = \varepsilon' \qquad (2.21)$$

นั่นคือ ε' จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative directric const.)ε_r ที่ใช้กันค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ε_r นี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉนวนที่มีใช้โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ε_r นี้จะเพิ่มสูงขึ้นตาม

3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน เป็นดัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกหรือฉนวนสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ฉนวนเบรคดาวน์ หาได้โดยปล่อยแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรคดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมี และทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทมีโครงสร้างเป็นผลึก จะเกิดเบรคดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่า ร่องรอยของการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นเส้นแนวตรง โดยปกติฉนวนแข็งจะทนต่อแรงดัน เบรคดาวน์ได้สูงกว่าฉนวนเหลว เบรคดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรคดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรคดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็ดี อาจมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่ำ ถ้าหากมีสิ่งเจือปน

2.11 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำ (Conductor) และชั้นกึ่งตัวนำนอก(XLPE) โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาบไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 2.19 (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอน้อยที่สุด ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่า คาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

1) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก กับ ฉนวน (C_1)

2) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่าง ฉนวนกับตัวนำ (C_0)

ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

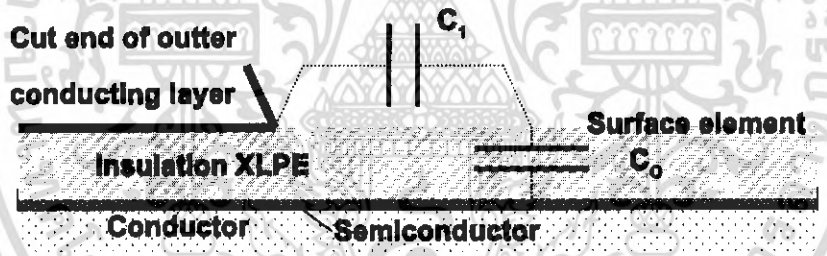
$$Ua \approx Ed\sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \qquad (2.22)$$

เมื่อ Ua คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรคดาวน์ระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก

C_1 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปกับฉนวน

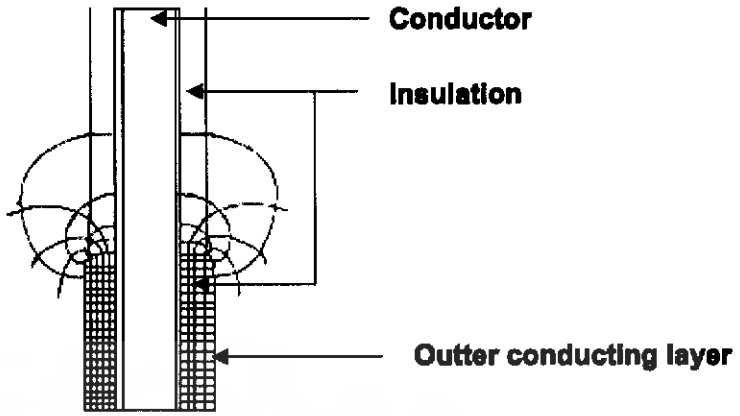
C_0 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ

Ed คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



รูปที่ 2.18 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง

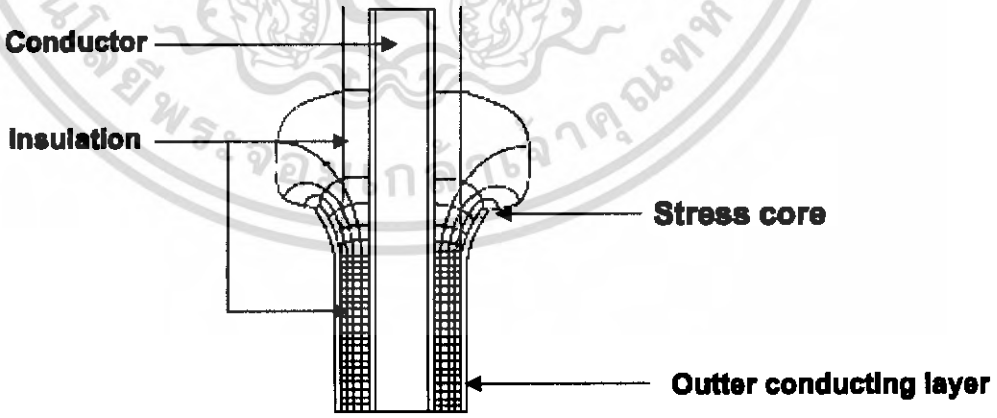
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข

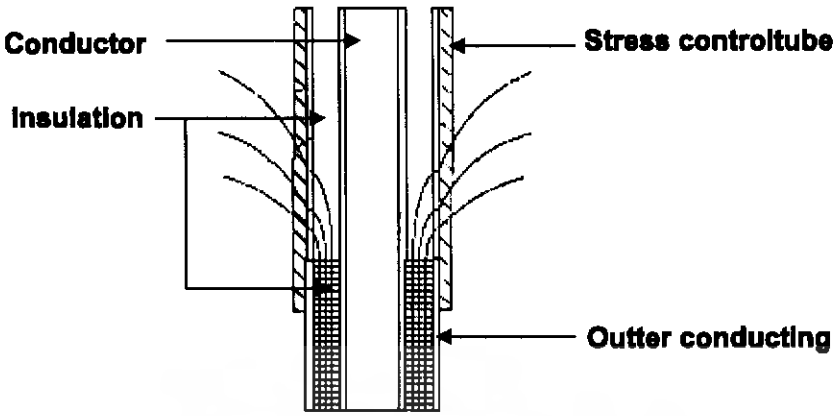
ถ้ารอบๆสายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า C_1 จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ C_0 จะทำให้แรงดันเริ่มดันของการเบรคดาวน์มีค่าต่ำ ทำให้เบรคดาวน์ได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง C_1/C_0 มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้ C_1 เพิ่มขึ้นหรือ C_0 ลดลงนั่นเอง

1. Capacitive stress control จะเป็นการลด C_0 ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 2.20
2. Refractive stress control จะเป็นการเพิ่ม C_1 โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



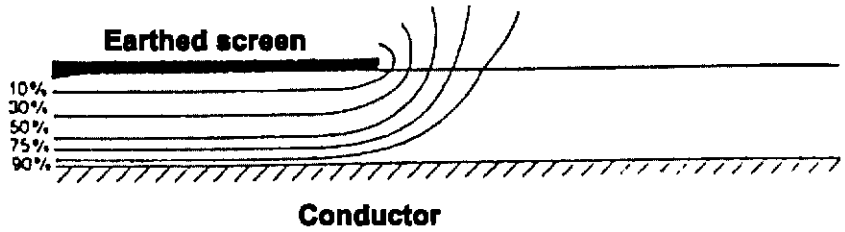
รูปที่ 2.21 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control

วิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Refractive stress control เพราะว่าวิธี Capacitive stress control ยุ่งยากในการคำนวณและการปฏิบัติ stress cone ในขณะที่แบบ Refractive stress control ง่ายต่อการคำนวณและการปฏิบัติ

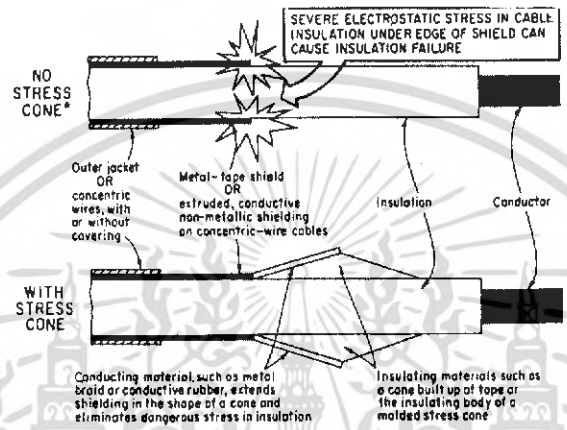
Stress Cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating

สายไฟฟ้าเส้นหนึ่งๆจะประกอบด้วยปลายสายอยู่สองข้างด้วยกัน ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield ซึ่งถูกต่อลงดินจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ถ้าระยะห่างไม่มากพอก็จะเกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำนั้นไปยัง Shield ในกรณีที่ทำการต่อสายหุ้มเข้ากับสายเปลือยหรือระหว่างสายหุ้มด้วยกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ Shield ห่างออกจากสายตัวนำ กรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปอก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดเบี่ยงเบนอย่างกระทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 2.22 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นและตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง จะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

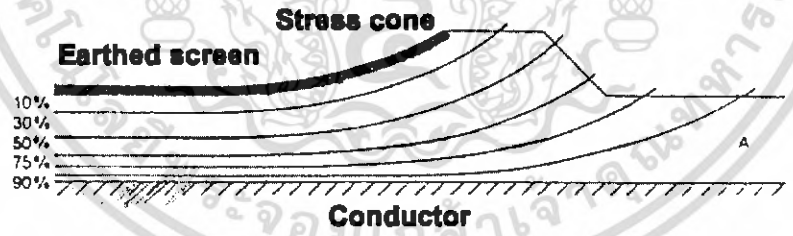


รูปที่ 2.22 Potential Field at a Screen Termination



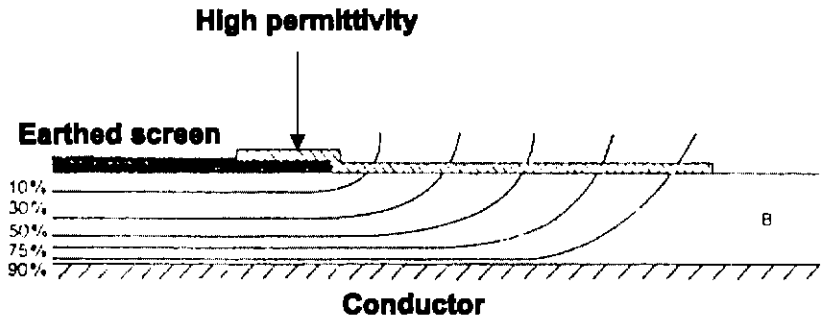
รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับไม่มี Stress cone

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ Stress cone การทำ Stress cone อาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material

2.12 ฉนวนน้ำบริสุทธิ์ [3]

น้ำสูตรทางเคมี H_2O จะมีคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้

1) ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Conductance)

ความนำไฟฟ้าของน้ำเป็นเครื่องชี้บอกถึงปริมาณเกลือแร่ต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ น้ำบริสุทธิ์จะมีความนำไฟฟ้าตั้งแต่ 0.04 – 2.0 micromho/cm ซึ่งหน่วยวัดไฟฟ้าของน้ำ คือ ไมโครโมห์ต่อเซนติเมตรหรือไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2) ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นหาได้จากการชั่งน้ำปริมาณหนึ่ง ณ ที่อุณหภูมิอันหนึ่ง โดยทั่วไปน้ำบริสุทธิ์จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3) สารหรือของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (Total Solids or Total Dissolved Solids ; TDS)

คือ สิ่งที่อยู่ในน้ำทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและไม่ละลายน้ำ การประมาณปริมาณ TDS สามารถหาได้จากการวัดค่าความนำไฟฟ้า ค่านี้จะบอกถึงความสามารถที่น้ำจะนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า อยู่ในน้ำพวกสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำมักจะแตกตัวเป็นอิออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น

ปริมาณ TDS = ค่าคงที่ x ความนำไฟฟ้า (หน่วย mg/l)

ค่าคงที่ = 0.55-0.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 นิยามของน้ำบริสุทธิ์

ระบบนี้จะใช้เรซินจับอิออนประจุบวกและลบในน้ำให้หมด โดยเมื่อใช้เรซินชนิด Mixed-bed จะให้ความนำไฟฟ้า < 0.5 micromho/cm แต่ถ้าเป็นน้ำกลั่นจะให้ความนำไฟฟ้าสูงกว่า คือ 2.5 micromho/cm ที่คุณภาพน้ำดิบ ความนำไฟฟ้า 450 micromho/cm

คุณภาพน้ำบริสุทธิ์มาก (Purified Water) ตาม Eur P.European Pharmacopeoia

ความเป็นกรด	น้อยกว่า	2.5	มิลลิกรัม/ลิตร
ความเป็นด่าง	น้อยกว่า	2.5	มิลลิกรัม/ลิตร
คลอไรด์	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
ไนเตรต	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
ซัลเฟต	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
แอมโมเนีย	น้อยกว่า	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร
แคลเซียม	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
โลหะหนัก	น้อยกว่า	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
Oxidisable Matter (PV)	น้อยกว่า	5	มิลลิกรัม/ลิตร
Non Volatile Matter (TDS)	น้อยกว่า	10	มิลลิกรัม/ลิตร

2.14 การกำจัดอิออน

วิธีการต่าง ๆ หลายวิธีสามารถขจัดสิ่งเจือปนในน้ำบางชนิดได้ แต่ก็ยังมีสิ่งเจือปนอีกหลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อยู่ในรูปของ TDS ซึ่งวิธีทั้งหลายที่กล่าวมาแล้วขจัดไม่ได้ ต้องใช้วิธีแลกเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange) วิธีการนี้จะขจัดมลทินต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ ความเป็นด่างในรูปด่าง ๆ ความกระด้าง กรด (Free Mineral Acidity) หรือ FMA เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดดินประสิว เป็นต้น คลอไรด์ ซัลเฟต ซิลิกา ไนเตรต เหล็ก แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่น ๆ

ทอมป์สันเป็นผู้ค้นพบปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนอิออนของดิน โดยการเทสารละลายแอมโมเนียซัลเฟต (NH_4SO_2) ผ่านดิน ดินจะกลบแอมโมเนียไว้และได้แคลเซียมซัลเฟตแทนที่ ดังสมการ

$$Ca - Soil + NH_4SO_4 \rightarrow NH_4 - Soil + CaCO_4$$

ต่อมาได้มีการใช้สารจำพวกซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ Sodium Aluminno silicate เป็นตัวแลกเปลี่ยนอิออน แม้ในปัจจุบันจะเลิกใช้แล้วก็ยังเรียกชื่อสารที่ทำหน้าที่เดียวกันว่า ซีโอไลต์ ในปี พ.ศ.2487 มีการค้นพบวิธีการควบคุมอณูระหว่างสไตรีน (Styrene) โดย Divinylbenzene (DVB) เป็นตัวจับระหว่างโพลีสไตรีน เรียกว่า Cross linkage เกิดเป็นเรซิน (Resin) ซึ่งเป็นเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างกลมเรซินนี้จะมีประสิทธิภาพและความจุ (Capacity)หรือความสามารถในการจับอิออนต่างๆ สูงกว่าซีโอไลต์มาก เรซินที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถขจัดอิออนประจุลบได้ทุกชนิด แม้แต่ที่เป็นกรดอ่อน เช่น กรดซิลิสิก กรดคาร์บอนิก

ปริมาณร้อยละของ DVB ที่มีอยู่ในเรซิน เรียกว่า Cross linkage เรซินเมื่อแช่อยู่ในน้ำจะมีรูเล็ก ๆ เป็นโพรงอยู่ภายในมากมาย อิออนจะแพร่เข้าไปสู่ภายในเรซินตามรูเล็ก ๆ เหล่านี้ ถ้ามีค่าเปอร์เซ็นต์ DVB สูงก็จะมีขนาดของรูเล็ก

2.15 การจำแนกประเภทของเรซิน

ในปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภท คือ

1) ชนิดประจุบวก-กรดแก่ ตัวย่อ SC (Strong Acid Cat ion)
2) ชนิดประจุบวก-กรดอ่อน ตัวย่อ WC (Weak Acid Cat ion)
3) ชนิดประจุลบ-ด่างแก่ ตัวย่อ SB (Strong Case Anion)
4) ชนิดประจุลบ-ด่างอ่อน ตัวย่อ WB (Weak Base Anion)

เรซินทั้ง 4 แบบนี้จะมีอิออนประจำตัวดังนี้

SC $-SO_3$

WC $-COO^-$

SB $-NR_3^+$

WB $-NH_2$,-NHR,$-NR_2$

โครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกันแตกต่างกันก็ที่มีชนิดของอิออนกรุ๊ปที่ติดอยู่กับเรซินเท่านั้น

1) เรซินประจุบวก

ทำได้โดยให้มีกรุ๊ปอิออน $-SO_3H$ และ –COOH ติดอยู่กับส่วนที่เป็นโพลิเมอร์ของเรซิน (R = เรซิน) ดังนั้น จะเขียนสูตรได้ในรูป R- SO_3H หรือ R–COOH ได้ เมื่อเรซินอยู่ในน้ำจะแตกตัวได้ดังนี้

$$R\text{-}SO_3H \rightarrow R\text{-}SO_3^- + H^+$$

$$R\text{–}COOH \rightarrow R\text{-}COO^- + H^+$$

เรซินแบบ R- SO_3H จะแตกตัวได้ง่าย และเมื่อแตกตัวจะให้ความเป็นกรดเหมือนกับ HCl และ H_2SO_4 ซึ่งเป็นกรดแก่ดังนั้นจึงถือว่าเป็น SC แต่ถ้าเป็นเรซินแบบ R – COOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแตกตัวได้ยากเหมือนกับกรดอ่อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกกรดอินทรีย์ จึงถือว่าเป็น WC SC สามารถแตกตัวได้ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดหรือด่าง แต่ WC จะแตกตัวได้ในสารละลายที่เป็นด่างหรือเป็นกลางเท่านั้น

เรซินแบบ SC เป็นเรซินที่มีการใช้งานมากที่สุดในจำพวกเรซินประจุบวก และปกติจะอยู่ในรูปของเกลือโซเดียม (R- SO_3Na) แต่เวลาจะใช้งานในรูป R- SO_3H ดังนั้นจึงมีการล้างเรซินก่อนใช้งาน

ถ้านำเรซินที่อยู่ในรูป R- SO_3Na ใส่ลงในสารละลายของกรดเกลือกรดกำมะถัน จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$R\text{-}SO_3Na + HCl \rightarrow R\text{-}SO_3H + NaCl$$
$$2R\text{–}SO_3Na + H2SO \rightarrow 2R\text{-}SO_3H + Na_2SO_4$$

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้น เพื่อให้การล้างเรซินมีประสิทธิภาพสูงก็ต้องให้เรซินได้สัมผัสกับกรดใหม่อยู่เสมอ วิธีล้างเรซินที่ดี คือ ให้กรดไหลผ่านชั้นเรซินที่ประจุอยู่ในรูปทรงกระบอก เรซินจะถูกฟื้นฟูสภาพกลายเป็น R - SO_3H และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากอิออนประจุบวก ถ้าน้ำสารละลายที่มีเกลืออนินทรีย์และด่างไหลผ่านไหลผ่านเรซินจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$R - SO_3H + NaCl \rightarrow R\text{-}SO_3Na + HCl$$
$$2R\text{-}SO_3H + CaCl_2 \rightarrow (R\text{-}SO_3)_2Ca + 2HCl$$
$$R\text{–}SO_3H + NaOH \rightarrow R\text{-}SO_3Na + H_2O$$

ถ้าใช้กรดล้างเรซินชนิด SC แล้วเรซินนี้จะจับอิออนประจุบวกเกือบทุกชนิดที่มีอยู่ในน้ำได้

2) เรซินประจุลบ

เรซินประจุลบเป็นเรซินที่ใช้จับอิออนลบได้ โครงสร้างจะมีการกรุ๊ป Quaternary Ammonium, -NH_2, NHR และ –NR_2 ติดอยู่กับโครงสร้างของเรซิน เขียนสูตรในรูป R – NOH ซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาแตกตัวดังนี้

$$R - NOH \Leftrightarrow R - N^+ + OH^-$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรซินแบบ SB จะมีกรุ๊ปพวก Quaternary Ammonium ซึ่งจะมีปฏิกิริยาแตกตัวได้ดีที่ pH ทุกช่วง แต่ถ้าเป็น WB จะมีกรุ๊ป Primary Amine ไปจนถึง Tertiary Amine เช่น $R - NH_2$ ซึ่งจะแตกตัวดังนี้

$$R - NH_2 + H_2 \rightarrow R - NH_3^+ + OH^-$$

แต่ถ้าอยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นด่างจะไม่แตกตัวและไม่สามารถจับหรือแลกเปลี่ยนอิออนได้

เรซินแบบ SB ที่ใช้อยู่จะขายในรูปของคลอไรด์ (R - NCl) ทั้งนี้เพราะมีเสถียรภาพสูงกว่า ในการใช้งาน ซึ่งต้องใช้ในรูป R – NOH ก็ต้องล้างหรือฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินด้วยด่างโซดาไฟก่อน

$$R - NCl + NaOH \Leftrightarrow R - NOH + NaCl$$

ถ้าเรซินชนิด SB ใส่ลงในสารละลายของเกลือแกงและกรดเกลือจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$R - NOH + NaCl \Leftrightarrow R - NCl + NaOH$$
$$R - NOH + HCl \Leftrightarrow R - NCl + H_2O$$

เรซินชนิด SB ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์จะจับอิออนประจุลบ ซึ่งเป็นกรดอนินทรีย์ได้ดี เมื่อใช้แล้วต้องใช้ด่างโซดาไฟล้างจึงจะกลับคืนสู่สภาพเดิม

เรซินชนิด WB จะแตกตัวและจับอิออนได้ในสารละลายที่เป็นกรด สามารถแลกเปลี่ยนอิออนกับกรดเกลือ กรดกำมะถัน และเกลือของด่างอ่อน เช่น NH_4Cl แต่ไม่สามารถจับคลอไรด์ใน NaCl ได้

$$R - NH_2 + H_2O \rightarrow RNH_3OH$$
$$R - NH_3OH + HCl \rightarrow RNH_3Cl + H_2O$$
$$R - NH_3OH + NH_4Cl \rightarrow RNH_3Cl + NH_4OH$$

การล้างเรซินชนิดนี้กระทำได้ง่าย ใช้ด่างโซดาไฟแอชและน้ำแอมโมเนีย (NH_4OH)

$$RNH_3Cl + H_2O \rightarrow RNH_3OH + HCl$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรซินชนิด WB ใช้จับอิออนประจุลบของกรดแก่หรือ FMA (Free Mineral Acid) ได้ เรซินชนิดนี้จะไม่จับอิออนของกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดซิลิสิก ในการใช้งานจะใช้คู่กับ SB เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินและดักจับสารอินทรีย์ทั้งหลายไม่ให้ไปอุดตันเม็ดเรซิน SB และใช้งานที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซิลิกาไม่มีความสำคัญมากนัก

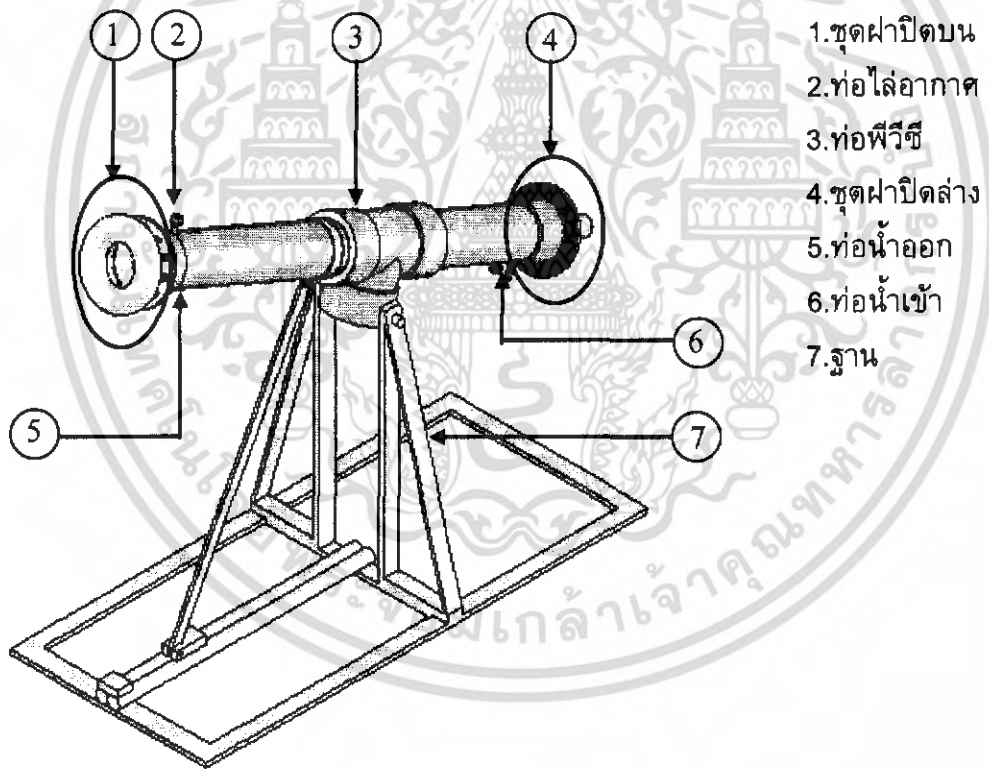
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการออกแบบหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE หัวต่อน้ำบริสุทธิ์ โดยเลือกขนาดของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบที่ระดับแรงดันใช้งาน คือ 24 กิโลโวลต์ ซึ่งใช้สายขนาดพื้นที่หน้าตัด 120 ตารางมิลลิเมตร ในการออกแบบและสร้างขึ้น ตลอดจนการออกแบบลักษณะของโครงสร้างต่างๆ ที่ใช้ประกอบกันทำหน้าที่เป็นขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

3.2 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวต่อน้ำบริสุทธิ์ (Cable Test Terminator)

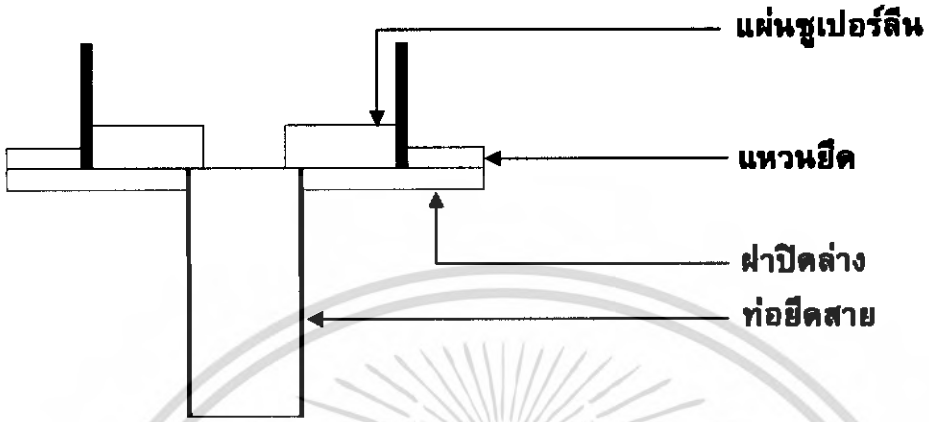


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆของหัวต่อน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบชุดฝาปิดล่าง

ในการออกแบบชุดฝาล่าง จะคำนึงถึงการป้องกันน้ำรั่วออก จึงต้องมีการออกแบบให้มีการป้องกันที่ดี โดยจะแบ่งส่วนประกอบออกเป็นดังนี้



รูปที่ 3.2 ชุดฝาปิดล่าง

1.ท่อยึดสาย ทำหน้าที่ในการยึดสายไม่ให้สายเกิดการโค้งงอในขณะที่ทำการทดสอบ

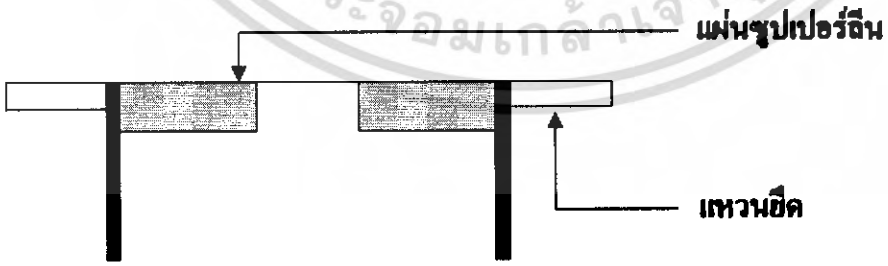
2. ฝาปิดล่าง ทำจากแผ่นอะคลีลิกใส

3. แหวนยึด ทำหน้าที่ในการยึดฝาปิดล่าง ทำจากแผ่นอะคลีลิกใส

4. แผ่นซูเปอร์ลีน ทำหน้าที่ในการป้องกันฉนวนน้ำรั่ว

3.4 การออกแบบชุดฝาปิดบน

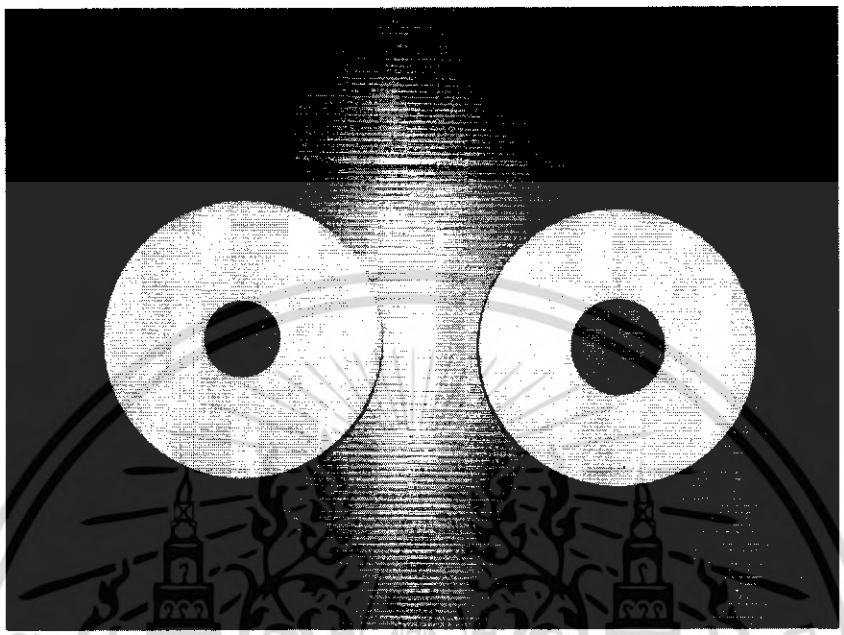
ชุดฝาปิดบนจะทำหน้าที่คล้ายกับชุดฝาปิดล่าง คือ ทำหน้าที่ในการป้องกันน้ำรั่ว และจะทำหน้าที่ในการยึดซิลด์อีกด้วย



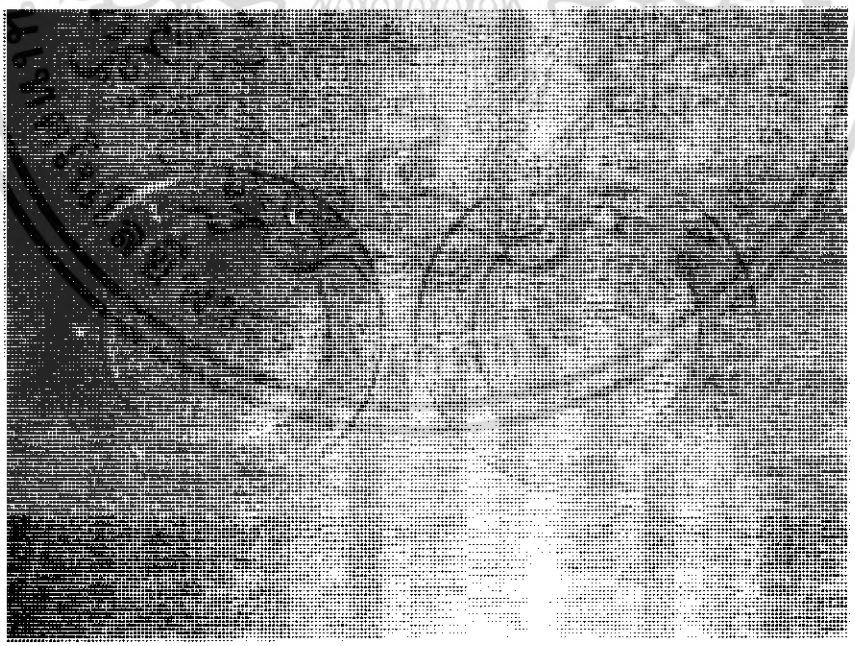
รูปที่ 3.3 ชุดฝาปิดบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหวนยึด ทำหน้าที่ในการยึดชิลด์ ทำจากแผ่นอะคลีลิก
2. แผ่นซูปเปอร์ลีนทำหน้าที่ในการป้องกันน้ำรั่ว

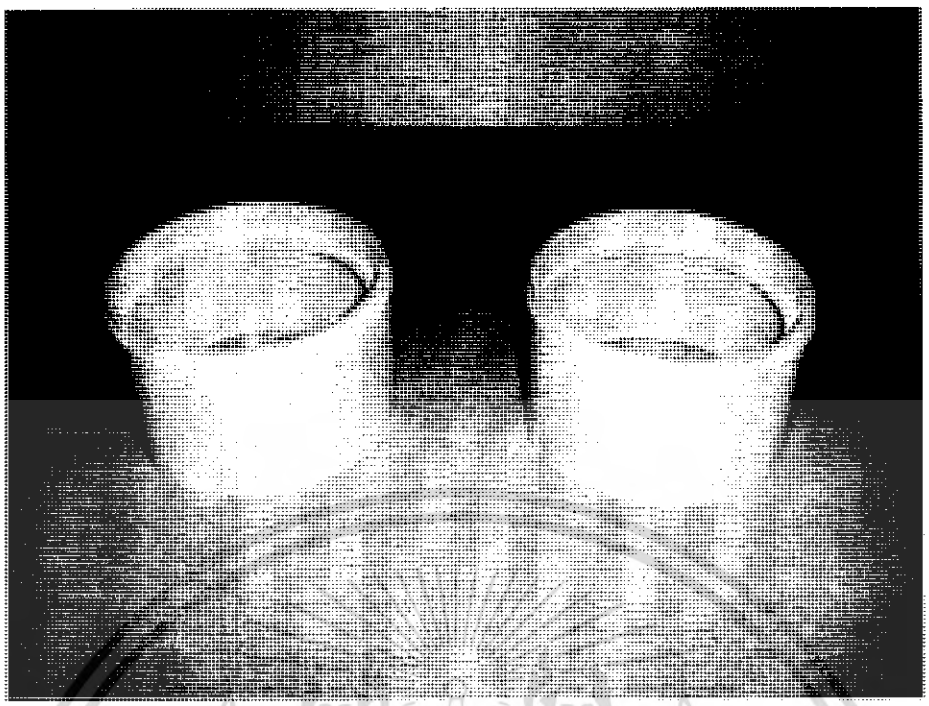


รูปที่ 3.4 แผ่นซูปเปอร์ลีน

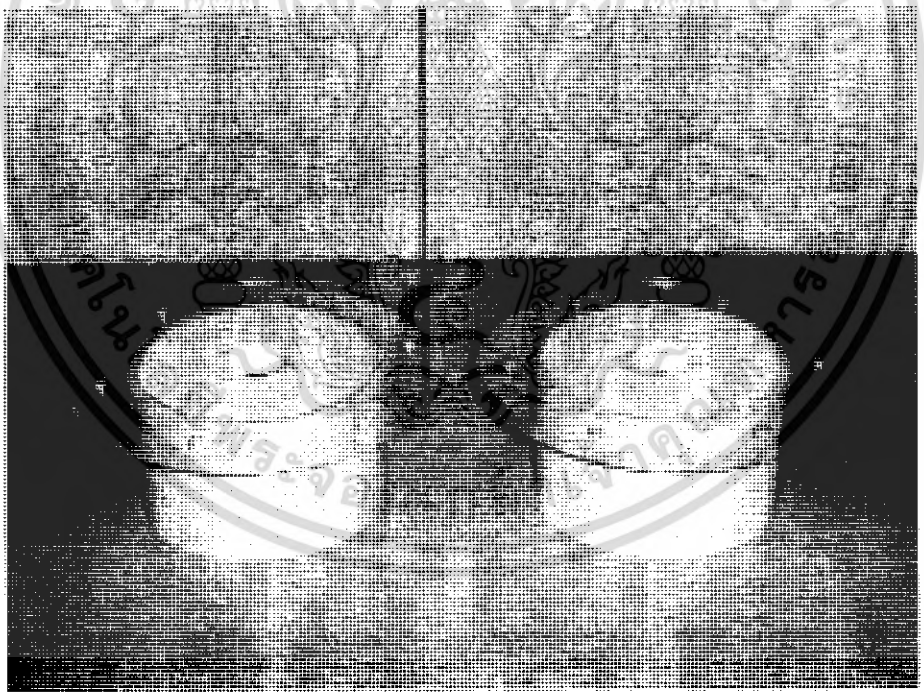


รูปที่ 3.5 แหวนยึดอะคลิลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

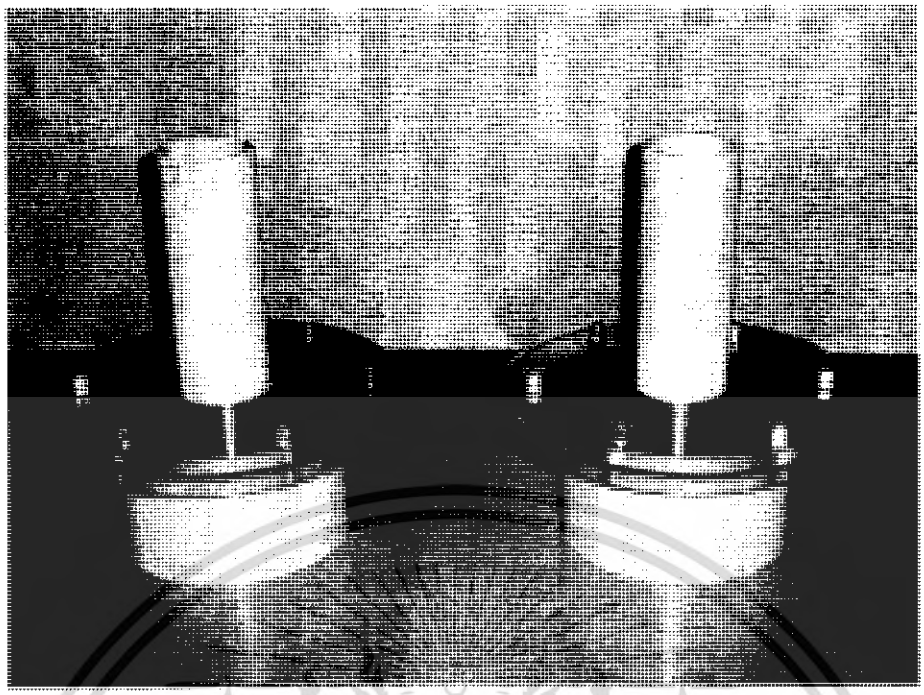


รูปที่ 3.6 ท่อสวมพีวีซี



รูปที่ 3.7 ฝาปิดบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ฝาปิดล่าง

3.5 การออกแบบท่อพีวีซี [3]

3.5.1 การคำนวณหาความยาวท่อพีวีซี

ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวของท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้วแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวท่อ PVC [3]

ครั้งที่	ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวท่อ PVC (kV)	
	ระยะห่างของขั้วที่ป้อนแรงดัน 5 cm (ความยาวท่อ PVC)	ระยะห่างของขั้วที่ป้อนแรงดัน 10 cm (ความยาวท่อ PVC)
1	28.9	53.3
2	30.7	53.7
3	30.0	53.6
4	30.1	51.4
5	29.7	53.2
ค่าเฉลี่ย	29.88	53.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความยาวท่อจะพิจารณาจาก 1. แรงดันวาบไฟที่ผิวท่อ 2. ความทนแรงดันของฉนวนเหลว 3. ระดับแรงดันที่ทดสอบ

พิจารณาตารางที่ 3.1 ระยะห่างขั้วแรงดัน 5 cm ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว ท่อพีวีซี คือ 29.88 kV ดังนั้นค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวต่อ 1 เซนติเมตร คือ 29.88 kV/5cm หรือ 5.976 kV/cm

พิจารณาที่ระยะห่างขั้วแรงดัน 10 cm ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว ท่อพีวีซี คือ 53.04 kV ดังนั้นค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวต่อ 1 เซนติเมตร คือ 53.04 kV/10cm หรือ 5.304 kV/cm

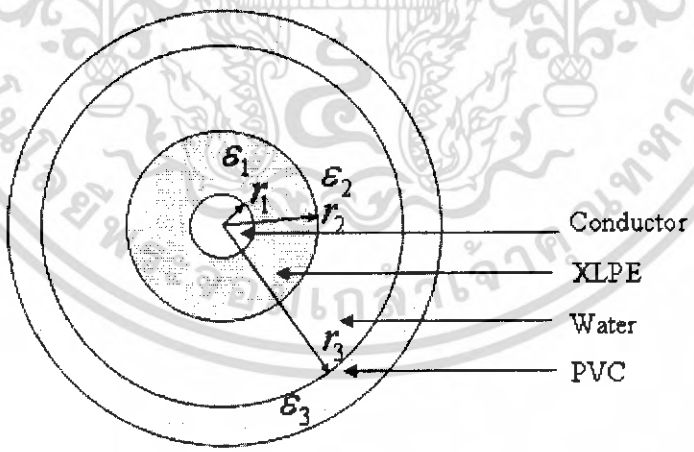
เลือกพิจารณาค่าที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวน้อยที่สุด คือ 5.304 kV/cm แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ คือ 24 kV จะต้องเลือกความยาวท่อทดสอบ คือ 24 kV/5.304 kV/cm

= 4.525 cm

แต่ในทางปฏิบัติความยาวท่อที่คำนวณได้ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำหัวต่อได้ เนื่องจากมีค่าน้อยเกิน จึงพิจารณาการทนแรงดันของน้ำบริสุทธิ์แทน พบว่าน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ทดสอบจะมีความนำไฟฟ้านำไฟฟ้าที่ 2.5 kV/cm หรือ 0.357 kV/cm [3] หากใช้แรงดันทดสอบที่ 24 kV จะต้องเลือกใช้ 24 kV/0.357 kV/cm เท่ากับ 67.22 cmเลือกความยาวท่อ 140 cm เพื่อให้เกิดความปลอดภัย ต้องเผื่อความยาวของท่ออีก 2 เท่า เพื่อให้เป็นแฟคเตอร์ความปลอดภัย

3.5.2 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี

โดยใช้สูตรจากทฤษฎีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม



รูปที่ 3.9 องค์ประกอบสายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ทฤษฎีแล้ว การออกแบบฉนวนของเคเบิลแรงดันสูงทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจะต้องให้ค่า E_{max} ในชนวนแต่ละชั้นมีค่าเท่ากัน

$$\varepsilon_2 r_2 = \varepsilon_3 r_3 \tag{3.1}$$

เมื่อ

ε_2 คือ Permittivity ของ น้ำ

ε_3 คือ Permittivity ของ PVC

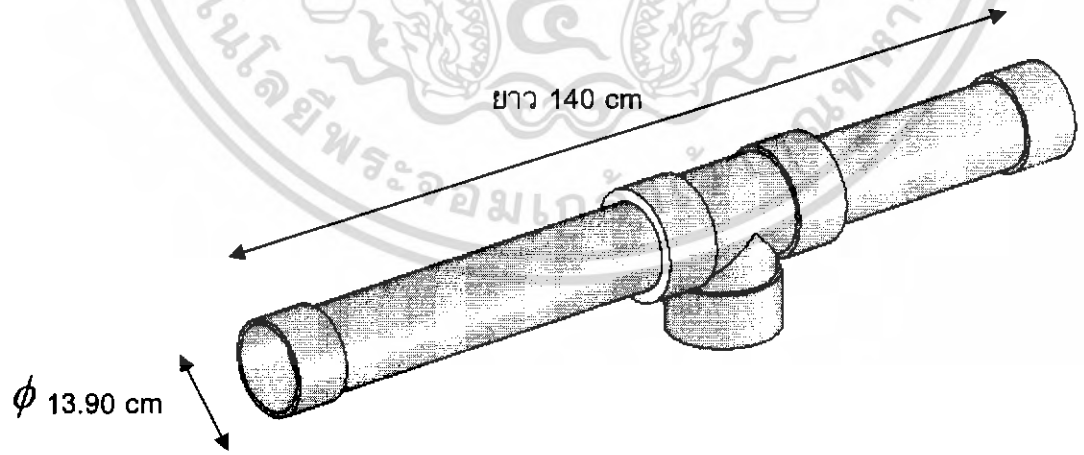
r_2 คือ รัศมีของฉนวน Xlpe

r_3 คือ รัศมีภายในท่อ

โดยที่ค่า $\varepsilon_2 = 80$, $\varepsilon_3 = 2.5$, $r_2 = 18$ mm.

$$r_3 = \frac{80 \times 18}{5} = 288\,\text{mm}$$

เนื่องจากรัศมีของท่อที่คำนวณได้นั้นมีขนาดใหญ่มาก ในโครงงานี้จึงเลือกใช้ท่อที่มีขายตามท้องตลาด โดยจะเลือกใช้ท่อขนาด 5 นิ้วแทน เนื่องจากว่าสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด สามารถเข้าสายได้ง่าย และสามารถใช้ท่อขนาดนี้ได้อย่างปลอดภัย โดยที่ท่อขนาด 5 นิ้วนั้น มีคุณสมบัติ คือ มีผิวเรียบ เป็นฉนวนได้ดี ทนแรงดันเจาะทะลุได้ 11-12 kV/cm ความต้านทานไฟฟ้า 10^{14} โอห์ม.เซนติเมตร [3]



รูปที่ 3.10 ท่อพีวีซี

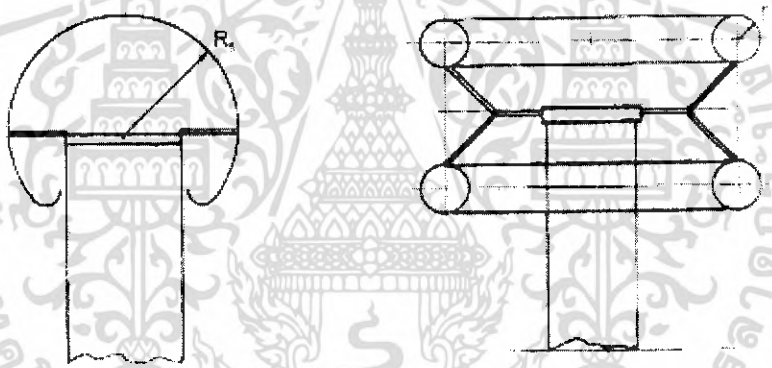
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การออกแบบโคโรนาชิลด์(Electrode shield) [2]

โคโรนาชิลด์ หมายถึง โคโรนาที่โดยทั่วไปทำด้วยโลหะ ใช้ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ขั้วแรงสูง (High voltage terminal) ไม่ให้เกินค่าวิกฤต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จโคโรนา เช่นที่ยอดบนของลูกถ้วยฉนวนรองรับบัสบาร์ หรือตัวนำไฟฟ้า กับดักแรงดันเสิร์จ หม้อแปลงทดสอบ ตัวเก็บประจุแรงสูง โวลต์เดจดิไวเดอร์ เป็นต้น โคโรนาชิลด์ภายนอกปกติอยู่ในอากาศจะมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือเป็นวงแหวนท่อดังในรูปที่ 3.7

การหาขนาดหรือมิติของโคโรนาชิลด์ในรูปที่ 3.7 อาจแบ่งพิจารณาเป็นรูปทรงกลมและแบบวงแหวนท่อดังนี้

1) ทรงกลมอาจหามิติจากโคโรนาทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม โดยทรงกลมในมีรัศมี R_1 และทรงกลมนอกรัศมี R_2 ซึ่งรัศมี R_2 นี้ก็คือระยะห่างหรือช่องว่าง (Clearance) ของโคโรนาชิลด์ห่างจากส่วนต่อลงดิน เช่น ฝาผนัง หรือเพดาน เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกลมใน คือ



ก) แบบทรงกลม ข) แบบวงแหวนท่อ

รูป 3.11 โคโรนาชิลด์ภายนอก

$$E_{max} = \frac{U}{R_1[1-(R_1/R_2)]} \qquad (3.2)$$

ถ้าให้ $E_{max} = E_b$ และแรงดันเท่ากับแรงดันเริ่มดิสชาร์จ U_i ก็จะสามารถหารัศมีของทรงกลมที่จะใช้เป็นโคโรนาชิลด์ได้ ในทางปฏิบัติจะใช้ E_b ในอากาศ = 25 kV_{peak}/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีของทรงกลมชีลด์คือ : $R_1 = \frac{U_i}{E_b[1-(R_1/R_2)]}$ (3.3)

ถ้า $R_2 >> R_1$ จะได้ $R_1 = U_i/E_b$ (3.4)

ทรงกลมนี้อาจจะเหมาะสำหรับแรงดันถึง 1000 kV [1] ที่แรงดันสูงกว่านี้ โคโรนาก็ต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น โคโรนาชิลด์ผิวเรียบจะทำได้ยาก และราคาแพง ทางเลือกที่ง่ายและประหยัด อาจจะใช้จานโลหะกลมมาแปะบนโครงทรงกลม ก็จะได้โคโรนาชิลด์ทรงกลมเช่นกัน

2) โคโรนาชิลด์แบบวงแหวนท่อกลม ใช้สำหรับที่มีการต่อท่อ ปิดหัวขั้วแรงสูงเพื่อการทดสอบ การหาขนาดของโคโรนาชิลด์ จะหาจากสมการความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เช่นกัน คือ

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln(r_2/r_1)} \quad (3.5)$$

โดยที่ r_1 เป็นรัศมีของกระบอกใน

r_2 เป็นรัศมีของกระบอกนอก

ที่แรงดันเริ่มดันดิสชาร์จจะได้

$$r_1 = \frac{U_i}{E_b \ln(r_2/r_1)} \quad (3.6)$$

และโดยอ้างอิงดามโคโรนาทรงกลม คือ มีค่า E_b เท่ากัน และ r_2 เท่ากับระยะช่องว่างเช่นเดียวกับโคโรนาทรงกลมชิลด์คือ E_{max} ของทรงกลมเท่ากับ E_{max} ของทรงกระบอกเท่ากับ E_i หรือ E_b จะได้

$$R_1/r_1 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{1-(R_1/R_2)} \quad (3.7)$$

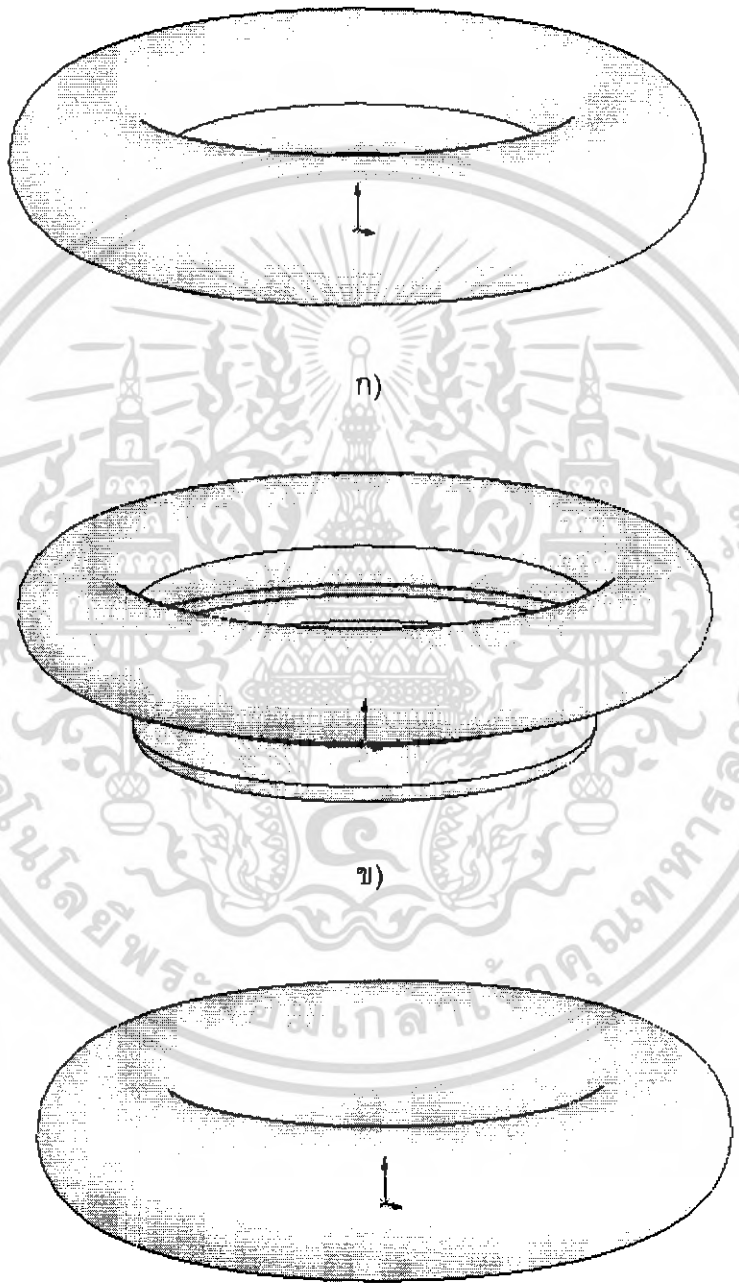
ปกติ $R_2 >> R_1$ จะได้ $R_1/r_1 = \ln(r_2/r_1)$ (3.8)

ถ้า $r_2 > 20r_1$ จะได้ $R_1 >> 3r_1$ โคโรนาชิลด์ทรงกลมจะมีขนาด 3 เท่าของทรงกระบอกที่มีค่า E_b เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 การกำหนดลักษณะโคโรนาชิลด์

ในโครงงานนี้ได้ทำการกำหนดลักษณะโคโรนาชิลด์ทั้งหมด 4 ลักษณะดังในรูปที่ 3.12 แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบสนามไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม FEM LAB ในการวิเคราะห์



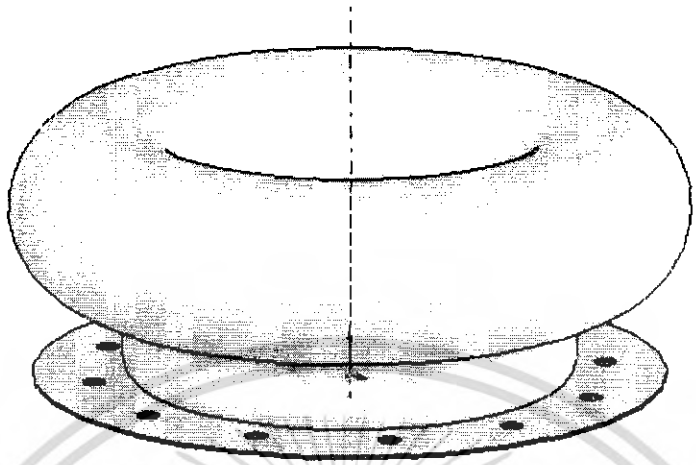
ก)

ข)

ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 ลักษณะโคโรนาชิลด์



ง)

รูปที่ 3.12 (ต่อ) ลักษณะโคโรนาชิลด์

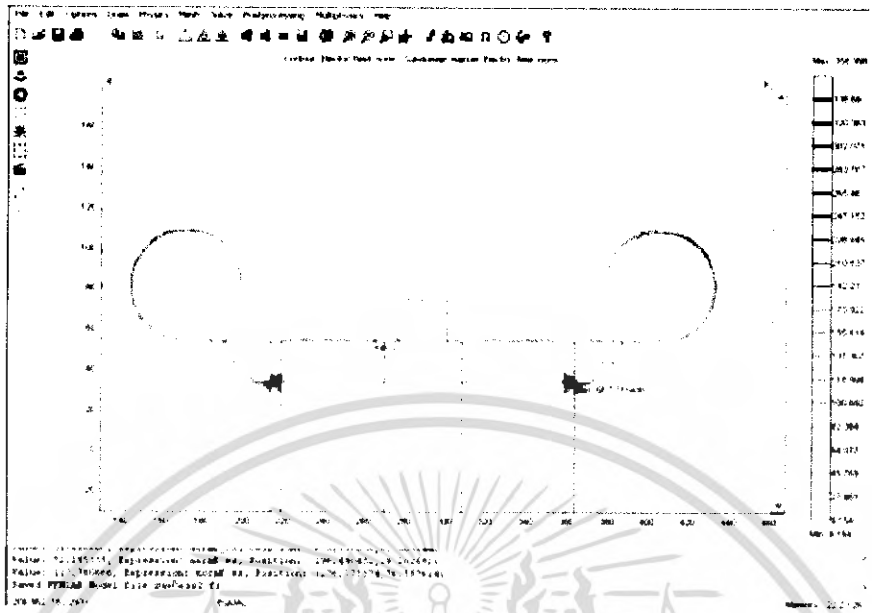
3.6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์

3.6.2.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ก)

การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาชิลด์

1.โคโรนาชิลด์	แบบ ก
2.รัศมีของโคโรนาชิลด์	100 เซนติเมตร
3.วัสดุที่ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม
4.แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จำลอง	24 kV
5.ค่า E_{max}	667.71 V/cm
6.โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์	ไฟล์ไนท์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



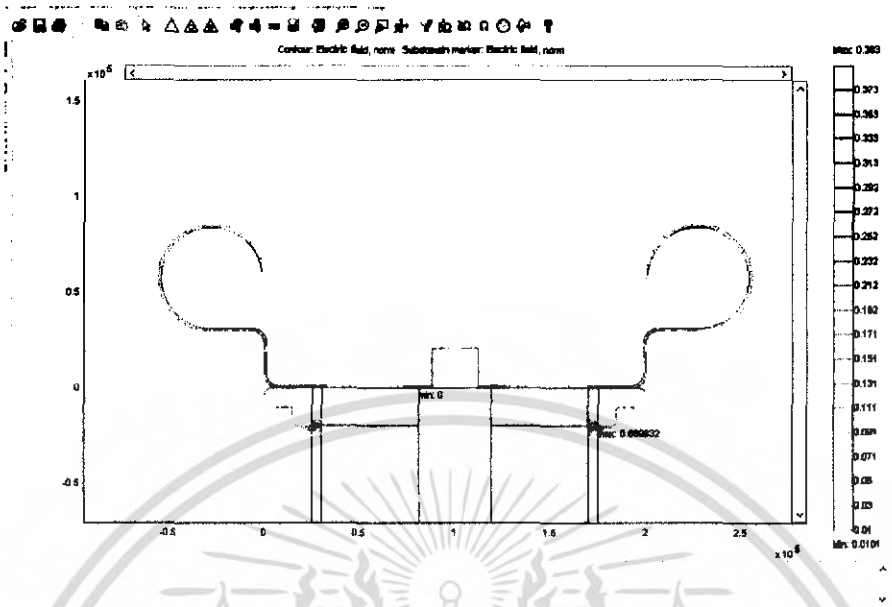
รูปที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ก)

3.6.2.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ข)

การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาชิลด์

1.โคโรนาชิลด์	แบบ ข
2.รัศมีของโคโรนาชิลด์	100 เซนติเมตร
3.วัสดุที่ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม
4.แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จำลอง	24 kV
5.ค่า E_{max}	669.83 V/cm
6.โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์	ไฟล์ไนท์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



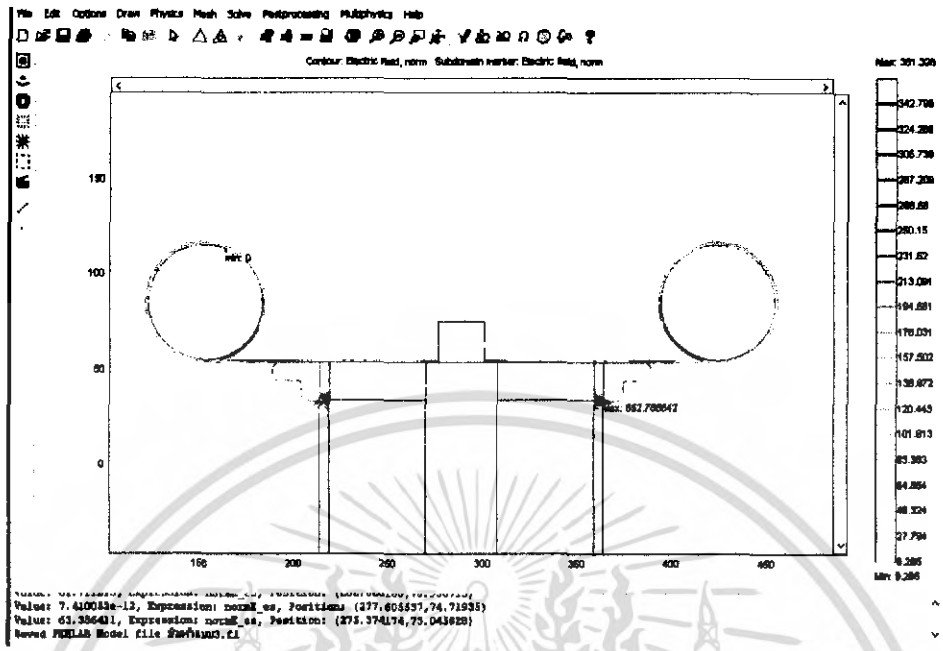
รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ข)

3.6.2.3 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ค)

การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาชิลด์

1.โคโรนาชิลด์	แบบ ค
2.รัศมีของโคโรนาชิลด์	100 เซนติเมตร
3.วัสดุที่ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม
4.แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จำลอง	24 kV
5.ค่า E_{max}	652.89 V/cm
6.โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์	ไฟล์ไนท์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



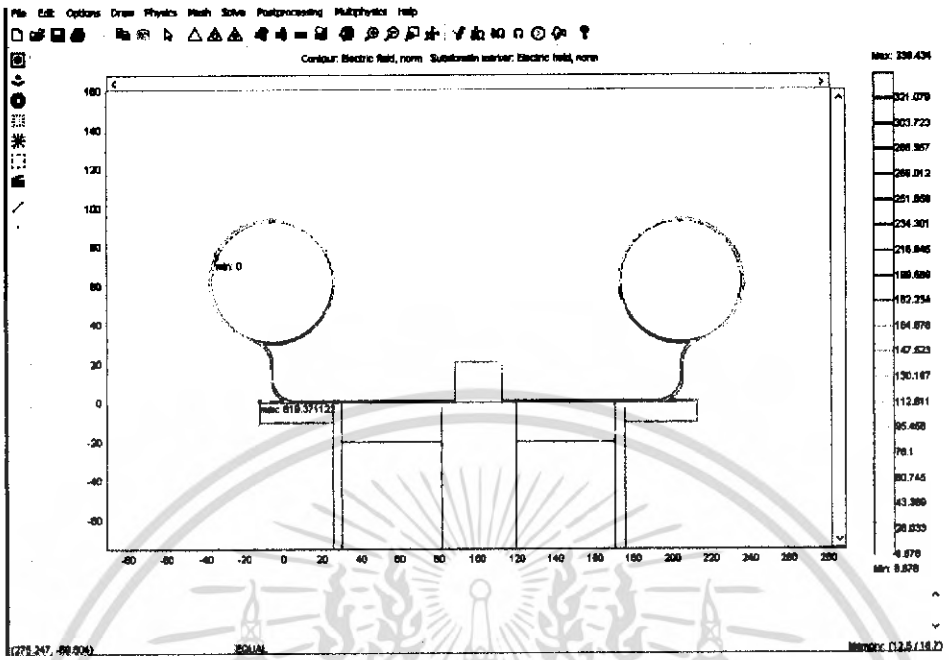
รูปที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ค)

3.6.2.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ง)

การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของโคโรนาชิลด์

1.โคโรนาชิลด์	แบบ ง
2.รัศมีของโคโรนาชิลด์	100 เซนติเมตร
3.วัสดุที่ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม
4.แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จำลอง	24 kV
5.ค่า E_{max}	619.37 V/cm
6.โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์	ไฟล์ไนท์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



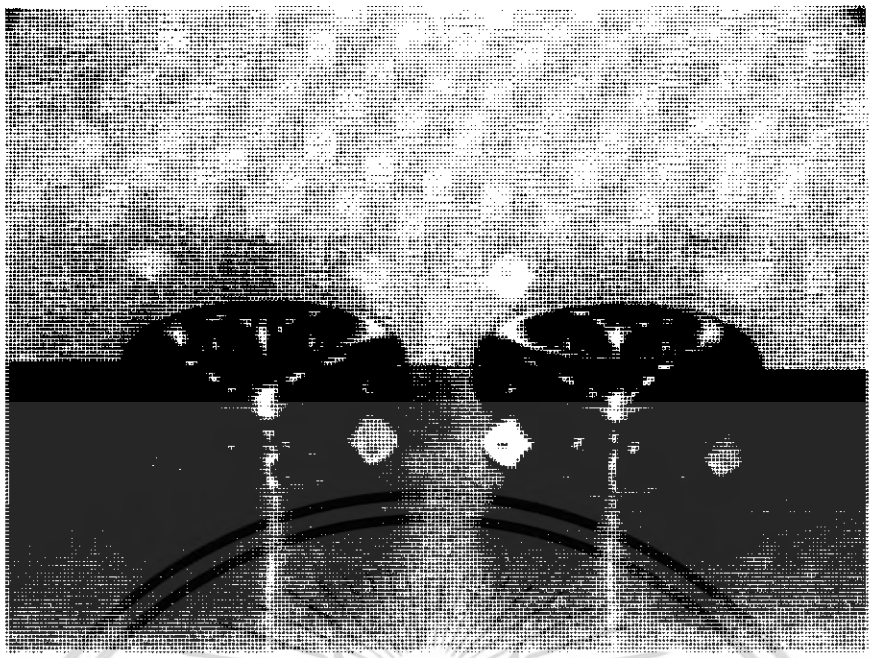
รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโคโรนาชิลด์ แบบ ง)

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบแสดงราคากับค่าสนามไฟฟ้า

แบบ	บริเวณที่เกิด E_{max}	ค่า E_{max} (kV/cm)	ค่า E บริเวณตัวนำ	ราคา (บาท)
ก	ระหว่างแหวนอะคลีลิกกับท่อพีวีซี	0.652	0.153	4,000
ข	ระหว่างแหวนอะคลีลิกกับท่อพีวีซี	0.667	0.146	5,000
ค	ระหว่างแหวนอะคลีลิกกับท่อพีวีซี	0.669	0.122	2,000
ง	แหวนอะคลีลิก	0.619	0.115	2,200

จากตารางที่ 3.2 จะพบว่าโคโรนาชิลด์แบบ ข) และ แบบ ง) จะมีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าที่ดีกว่า แบบ ก) และ แบบ ค) แต่เนื่องจากแบบ ง) จะมีต้นทุนในการสร้างต่ำกว่าแบบ ข) และมีค่า E_{max} แตกต่างกันเพียง 0.048 kV/cmในโครงงานนี้จึงเลือกใช้โคโรนาชิลด์แบบ ง)

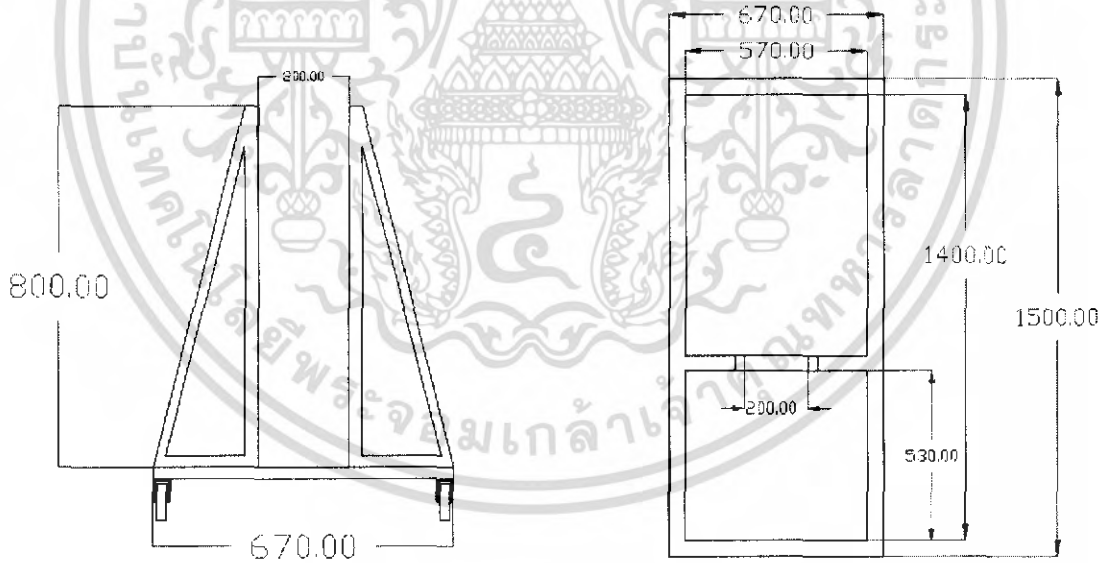
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 โคโรนาซิลด์

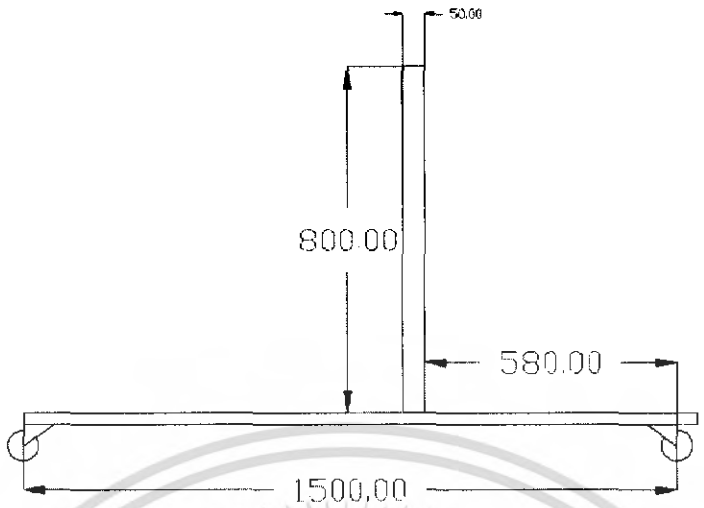
3.7 การออกแบบฐาน

ในการออกแบบฐานจะต้องคำนึงถึงการรับน้ำหนักของหัวต่อเคเบิลเป็นสำคัญ จึงต้องออกแบบให้มีความแข็งแรง โดยจะใช้เหล็กเป็นวัสดุในการสร้าง



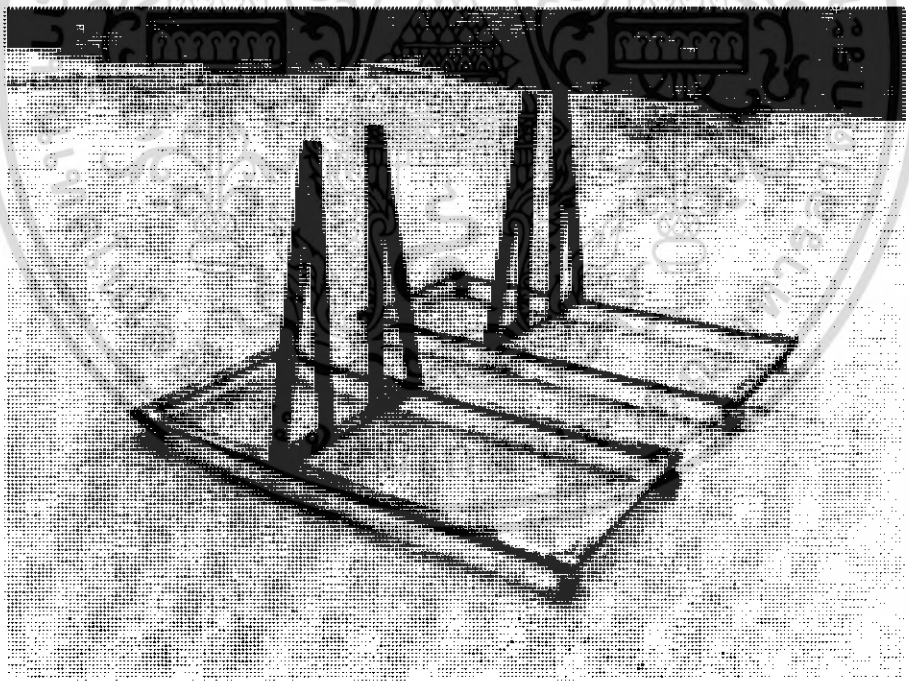
รูปที่ 3.18 แบบฐาน (หน่วยมิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIDE VIEW

รูปที่ 3.18 (ต่อ) แบบฐาน (หน่วยมิลลิเมตร)

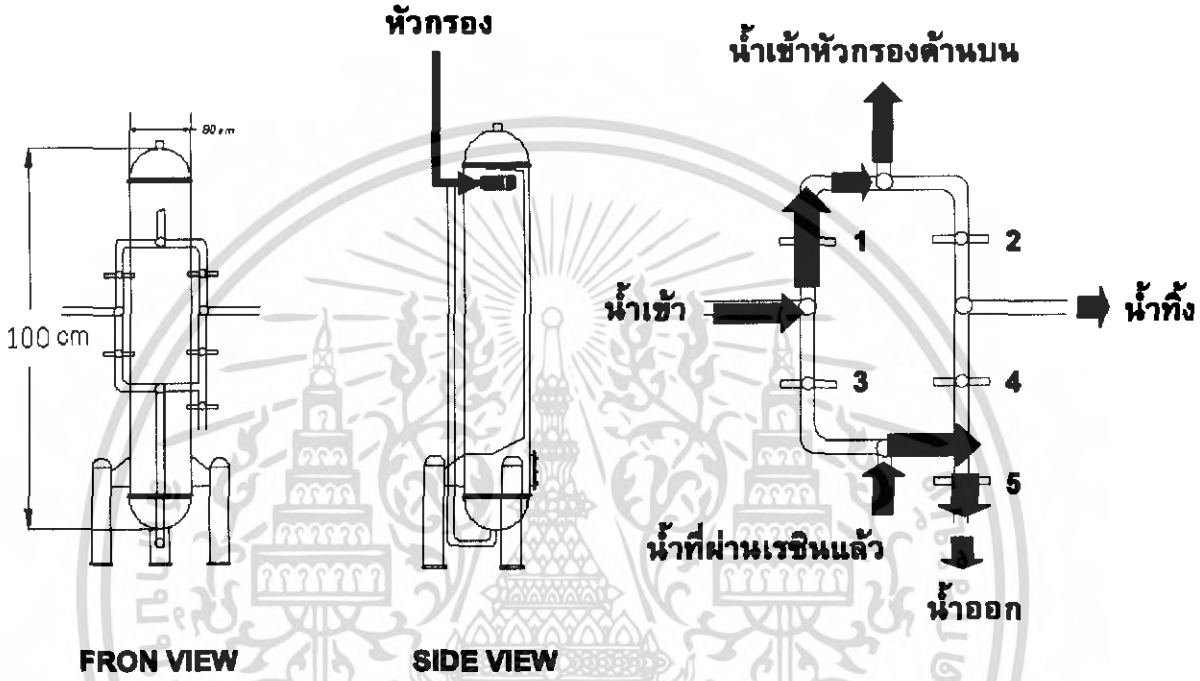


รูปที่ 3.19 ฐานหัวต่อสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

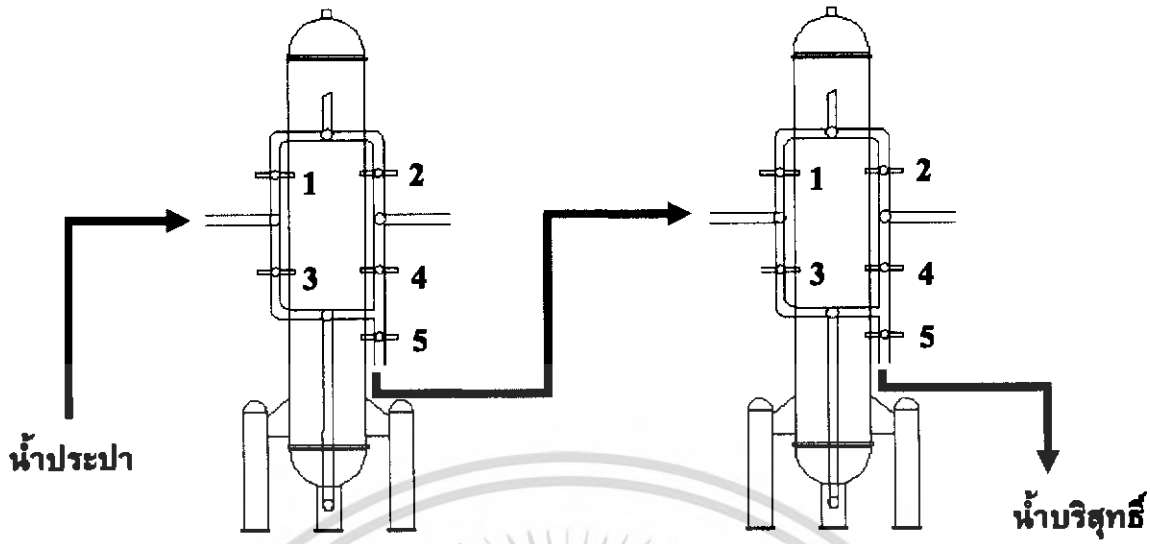
3.8 การศึกษาและซ่อมบำรุงเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำ

เนื่องจากทางห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำอยู่แล้ว แต่เนื่องจากถูกทิ้งไว้เป็นเวลานาน ทำให้เรซินเสื่อมสภาพ และข้อต่อท่อบางข้อได้มีน้ำรั่วออกมา ทำให้ต้องมีการซ่อมบำรุงเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำ โดยจะทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน และอุดรอยต่อบางจุดของท่อ



รูปที่ 3.20 ลักษณะโครงสร้างเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำแต่ละชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ลักษณะการทำงานของเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำ

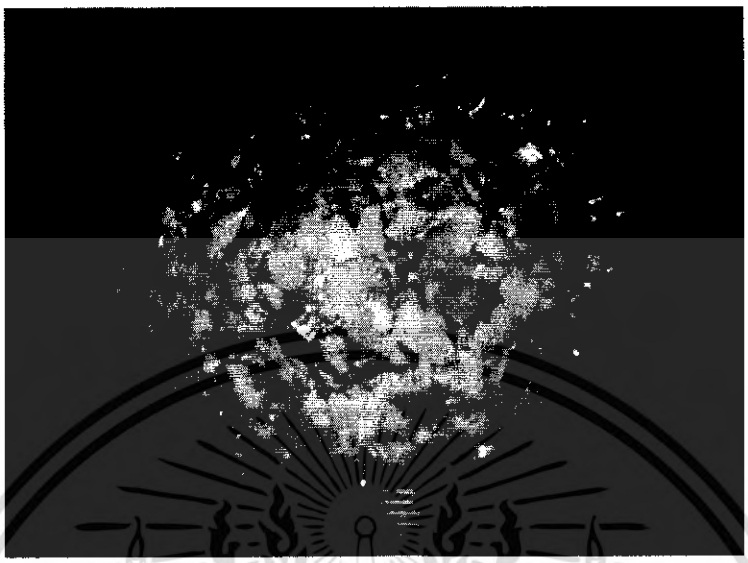
รูปที่ 3.22 การอุดรอยรั่วของท่อ

3.8.1 การฟื้นฟูสภาพเรซิน

ในการฟื้นฟูสภาพเรซินนั้น จะใช้โซดาไฟ และกรดไฮโดรคลอกลิกในการปรับสภาพของเรซิน โดยจะใช้กรดไฮโดรคลอลิกกับเรซินชนิด CATION และใช้โซดาไฟกับเรซินชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANION ซึ่งในขั้นตอนของการล้างปรับสภาพเรซินนั้นจะต้องทำการล้างปรับสภาพเรซินทีละชนิด ห้ามทำพร้อมกันโดยเด็ดขาด เพราะจะทำให้เรซินนั้นเสื่อมสภาพ



รูปที่ 3.23 โซดาไฟ

รูปที่ 3.24 กรดไฮโดรคลอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การเลือกใช้มอเตอร์ [4]

ในการเลือกใช้นั้นมอเตอร์จะต้องสูบน้ำต่อเนื่องกัน ดังนั้นจะพิจารณาจากน้ำหนักของน้ำ 1 ลบ.เมตร หนัก 1000 กิโลกรัม อัตราการไหลของน้ำ Q ลบ.เมตร/วินาที ความสูง H เมตร โดยใช้สมการ 3.8 ในการพิจารณา

$$Pm = \frac{K \times 1000QH}{102} \times \frac{100}{\eta} \quad (kW) \qquad (3.9)$$

K = เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเพี้ยนในการออกแบบและฝีมือการสร้าง (ประมาณ1.1-1.2)

Pm = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ หน่วยเป็น kW

ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูบน้ำจะขึ้นอยู่กับชนิดละขนาดของมอเตอร์ ซึ่งตาราง 3.3 แสดงค่าประสิทธิภาพโดยประมาณของมอเตอร์สูบต่างๆ ไว้

ตารางที่ 3.3 ค่าประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์สูบน้ำ

ปริมาณน้ำ Q(m^3/นาที)	0.1	0.3	1.0	10	30	100
ประสิทธิภาพ(%)	27	50	64	76	79	80

จากข้อมูลที่ได้จึงสามารถออกแบบมอเตอร์ที่ใช้กับเครื่องกรองน้ำได้ดังนี้

1) มอเตอร์สูบน้ำเข้าขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

ดังนั้น $Q = \frac{10}{1000} = 0.01$ ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

$Q = \frac{0.01}{60} = 0.00017$ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ความสูงจากมอเตอร์ถึงเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ(H) เท่ากับ 1 เมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของการเพี้ยนในการออกแบบ (K) เท่ากับ 1.2

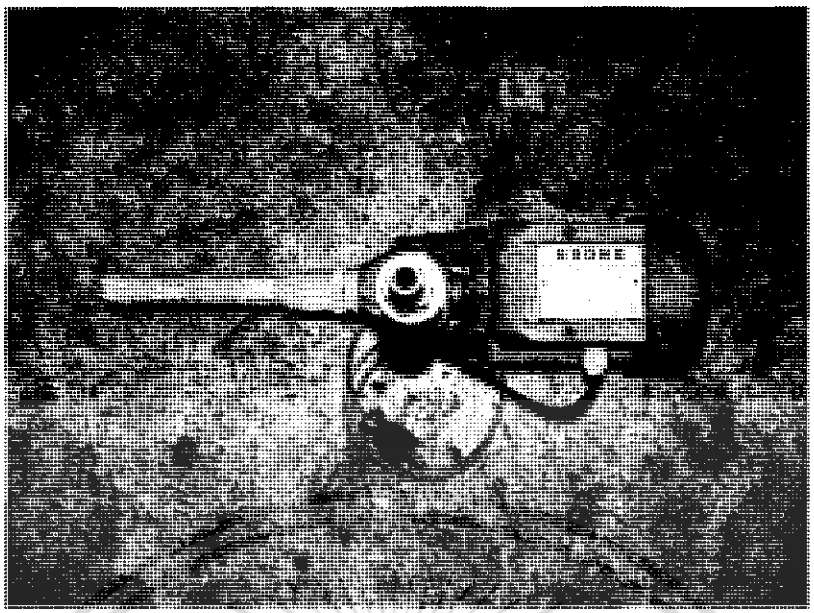
เนื่องจากอัตราการไหลมีค่าน้อยมาก จึงเลือกค่าประสิทธิภาพที่ 27 %

$$Pm = \frac{1.2 \times 1000 \times 0.00017 \times 1}{102} \times \frac{100}{27} = 0.0074 \text{ kW}$$

$$= \frac{0.0074 kW}{746} = 0.01 \text{ Hp}$$

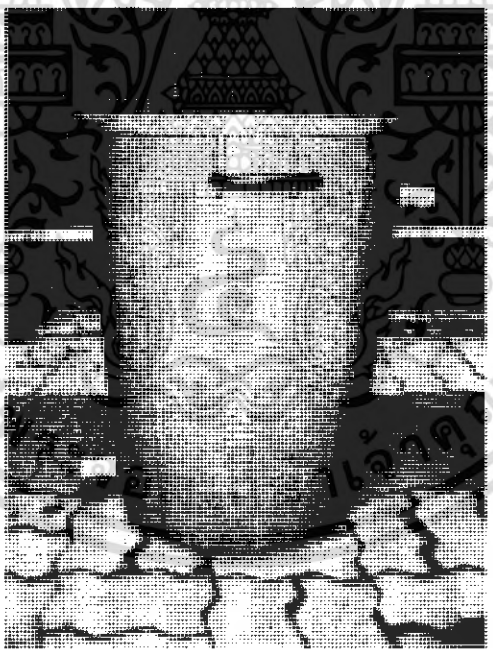
ดังนั้นจึงใช้มอเตอร์ที่ใช้ในการวนรอบเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำขนาด 0.5 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



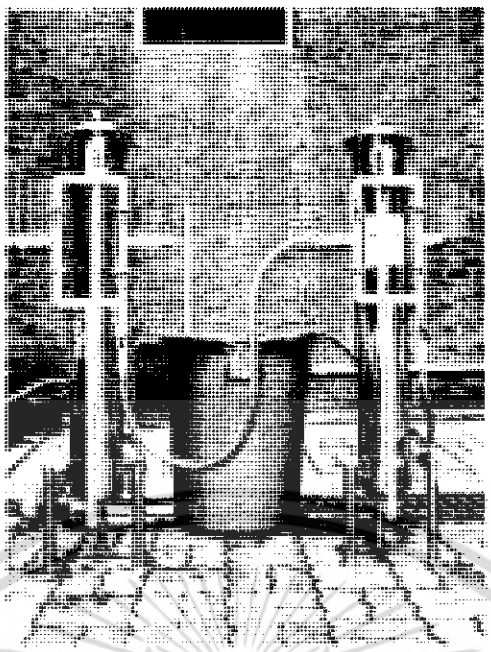
รูปที่ 3.25 ปั๊มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า

2) ถังพักน้ำที่ใช้ในการวนรอบน้ำเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำมีอัตราการไหลของน้ำเป็นแบบทางน้ำเปิดจึงเลือกถังพักน้ำที่ใช้ในการวนรอบน้ำขนาด 70 ลิตร



รูปที่ 3.26 ถังพักน้ำ 70 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 เครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำ

3.10 การทดสอบน้ำโดยใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)

เมื่อทำการฟื้นฟูเครื่องปรับสภาพความด้านทานน้ำแล้วก็จะทำการนำน้ำมาทดสอบ โดยจะทำการวนน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยจะเก็บผลการทดสอบทุกๆ ครึ่งชั่วโมงเพื่อที่จะดูแนวโน้มว่า เมื่อระยะเวลาเท่าใดถึงจะได้น้ำบริสุทธิ์ที่ได้ค่าตามที่ต้องการมาใช้กับหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน

รูปที่ 3.28 เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.29 การทดสอบน้ำโดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของน้ำบริสุทธิ์

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบน้ำค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ

ระยะเวลาในการวนน้ำ	ค่าความนำไฟฟ้า (us/cm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ก่อนล้าง	34	32	35	33.67
หลังล้าง	29	28	28	28.33
1/2ชั่วโมง	25	23	22	23.33
1 ชั่วโมง	20	19	17	18.67
1+1/2ชั่วโมง	16	18	19	17.67
2 ชั่วโมง	15	13	15	14.33
2+1/2 ชั่วโมง	14	13	13	13.33
3 ชั่วโมง	15	16	13	14.67

จากผลที่ได้จะพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำนั้นจะมีค่าลดลงทุกๆครึ่งชั่วโมง ที่ทำการทดสอบ และจะลดลงเรื่อยๆจนถึงชั่วโมงที่ 2 จะเริ่มมีค่าคงที่ อยู่ที่ ประมาณ 14 us/cm ซึ่งค่าที่ได้นั้นยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าที่ต้องการจะอยู่ที่ประมาณ 0.1 – 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

us/cm [8] จะเห็นว่าค่าที่ได้นั้นยังมีค่าต่ำกว่าที่ต้องการอีกหลายเท่า จึงยังไม่สามารถนำน้ำที่ได้จากเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำนี้มาใช้ได้

3.11 ปัญหาที่ทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์

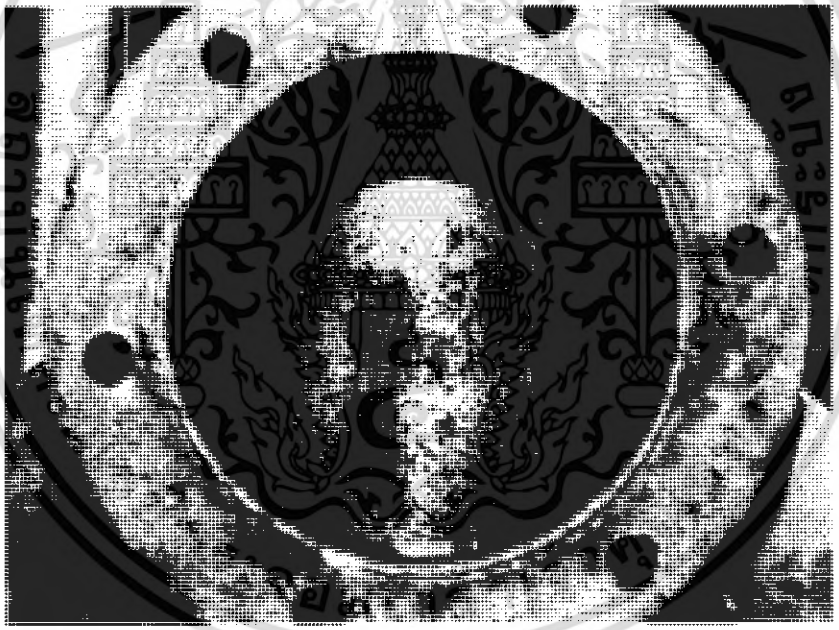
ปัญหาที่ทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์นั้น อาจจะเกิดจากหลายอย่าง เช่น

1) สนิมจากเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ เนื่องจากตัวถังที่บรรจุเรซินนั้น ทำจากแสตนเลสเคลือบ เมื่อโดนน้ำเป็นเวลานานก็อาจจะทำให้เกิดสนิมขึ้นได้

2) สนิมจากปั๊มน้ำที่นำมาใช้ในโครงงานนี้ เป็นปั๊มเหล็กเคลือบจึงไม่สามารถจะป้องกันการเกิดสนิมได้

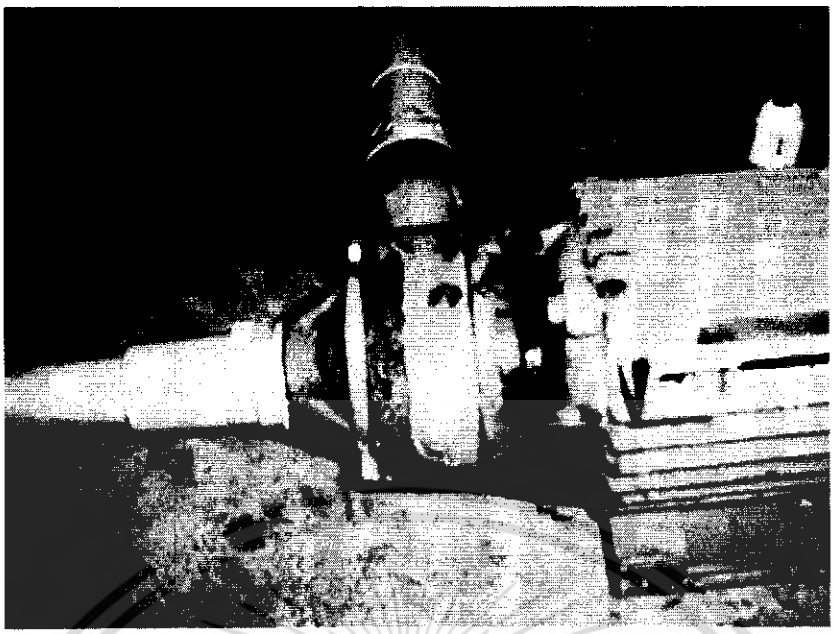
3) สิ่งเจือปนในท่อที่บรรจุเรซิน เนื่องจากไม่มีหัวกรองน้ำก่อน และหลังเข้าเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ จึงอาจจะทำให้มีสิ่งเจือปนหลุดเข้าไปได้

4) เรซินอาจจะเสื่อมสภาพ เนื่องจากทิ้งไว้เป็นเวลานาน

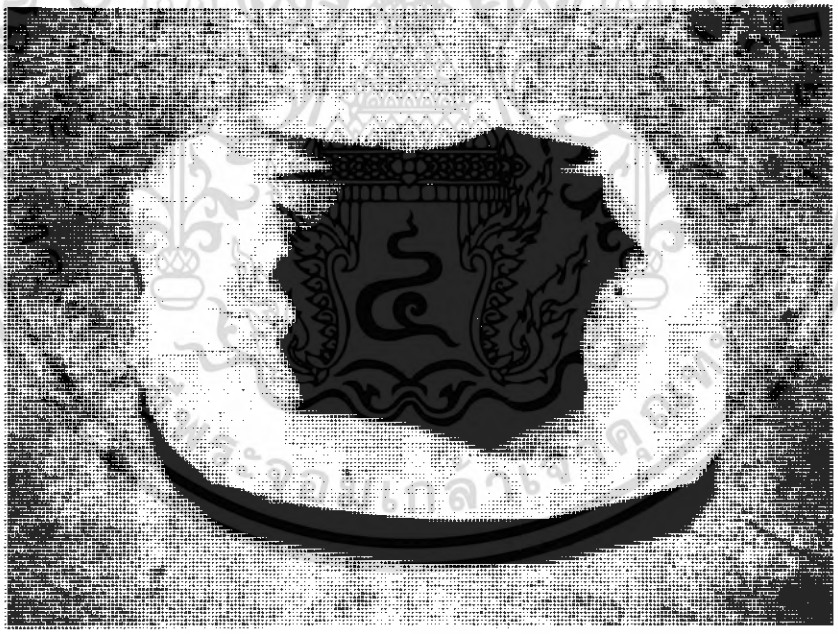


รูปที่ 3.30 สนิมจากเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 สนิมจากปั้มน้ำ



รูปที่ 3.32 เรซินที่เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 แนวทางแก้ไขปัญหา

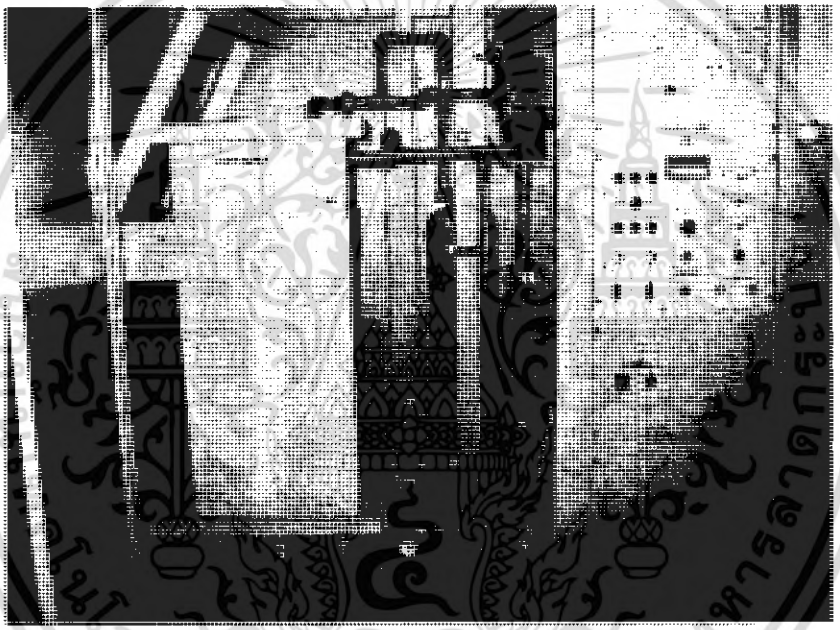
1) การติดตั้งหัวกรองสิ่งเจือปน

2) เปลี่ยนปั๊มกับท่อที่บรรจุเรซินเป็นวัสดุที่ไม่เกิดสนิม

3) เปลี่ยนเรซินใหม่

4) ใช้เครื่องทำน้ำที่ได้ค่าความนำไฟฟ้าที่ต้องการ

จากแนวทางแก้ไขปัญหาที่ได้กล่าวไปนั้นจะพบว่า ข้อ 1) ถึง ข้อ 3) นั้นจำเป็นต้องใช้งบประมาณอีกมาก จึงจะแก้ปัญหาโดยการจะใช้เครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำที่ได้ค่าความนำไฟฟ้าที่ต้องการมาใช้ในโครงงาน จึงได้ทำการติดต่อไปยัง บริษัทจรุงไทย เพื่อที่จะทำเรื่องขอนำหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินไปทดสอบที่บริษัท ซึ่งทางบริษัทก็ได้ให้ความอนุเคราะห์เป็นอย่างมาก ในการอนุญาตให้ใช้เครื่องปรับสภาพความต้านน้ำของบริษัทจรุงไทย



รูปที่ 3.33 เครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำของบริษัทจรุงไทย

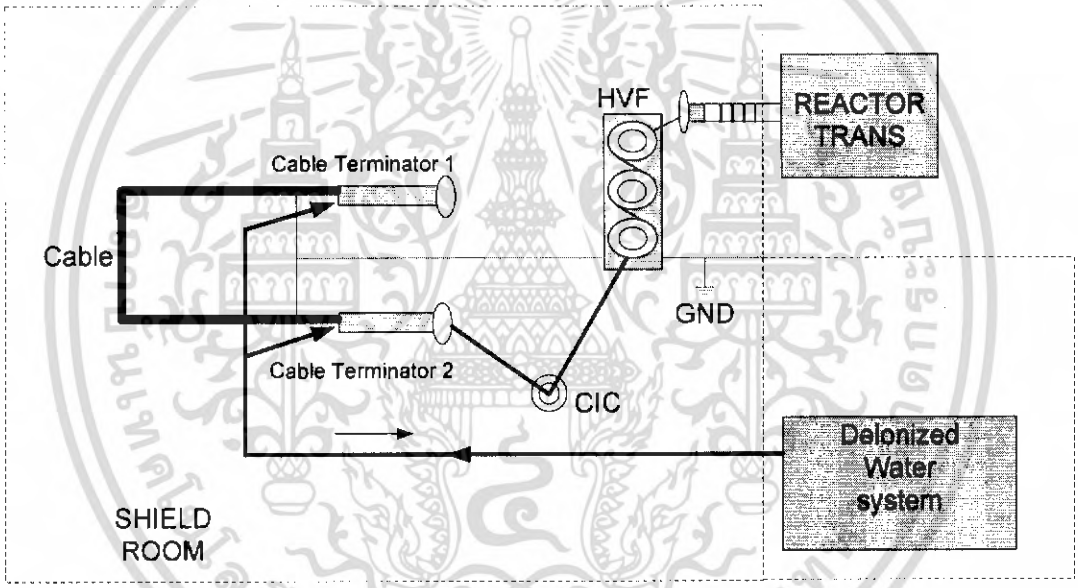
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นในส่วนของการทดสอบ Partial Discharge ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 24 กิโลโวลต์ พื้นที่หน้าตัดตัวนำ 120 ตารางมิลลิเมตร เนื่องจากทางบริษัทมีสายที่ใช้ทดสอบเพียงขนาดเดียว จึงทำการทดสอบสายได้เพียงขนาดเดียว ซึ่งจะประกอบไปด้วยในส่วนของ วงจรทดสอบ วิธีการทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบ และผลการทดสอบที่ได้ โดยมาตรฐานที่จะใช้ทดสอบคือ IEC 60502-2[6]

4.2 วงจรทดสอบ



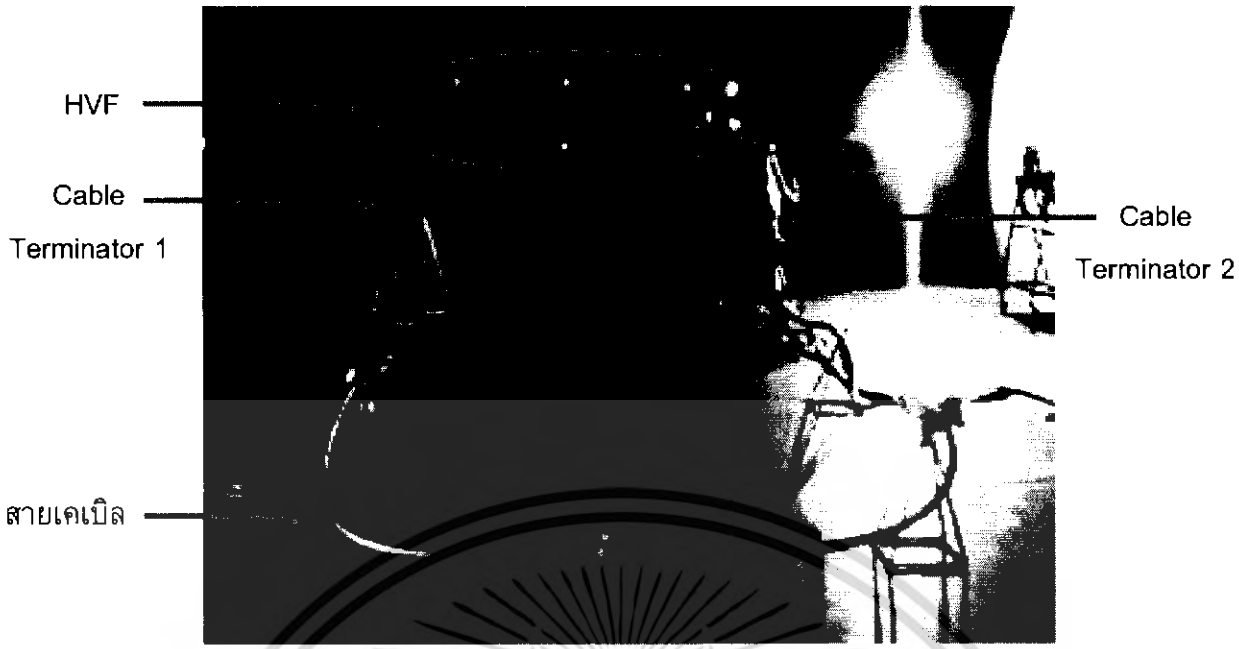
รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบ Partial Discharge ของสายเคเบิล [9]

เมื่อ

HVF คือ High voltage filter

CIC คือ Capacitive Divider

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

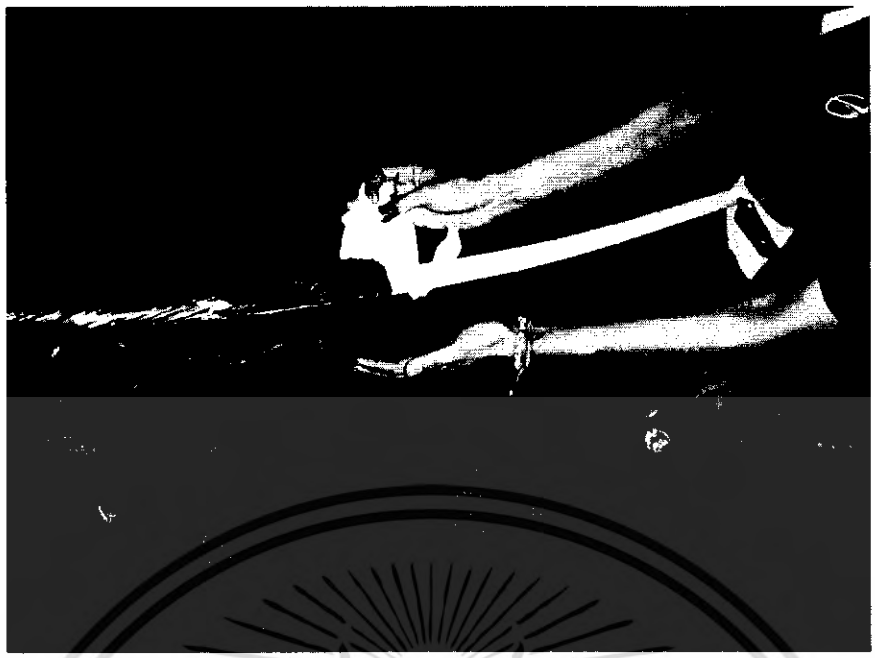


รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบจริงของสายเคเบิล

4.3 ขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.3 ทำการปลอก sheath ชั้นนอกสุดออก

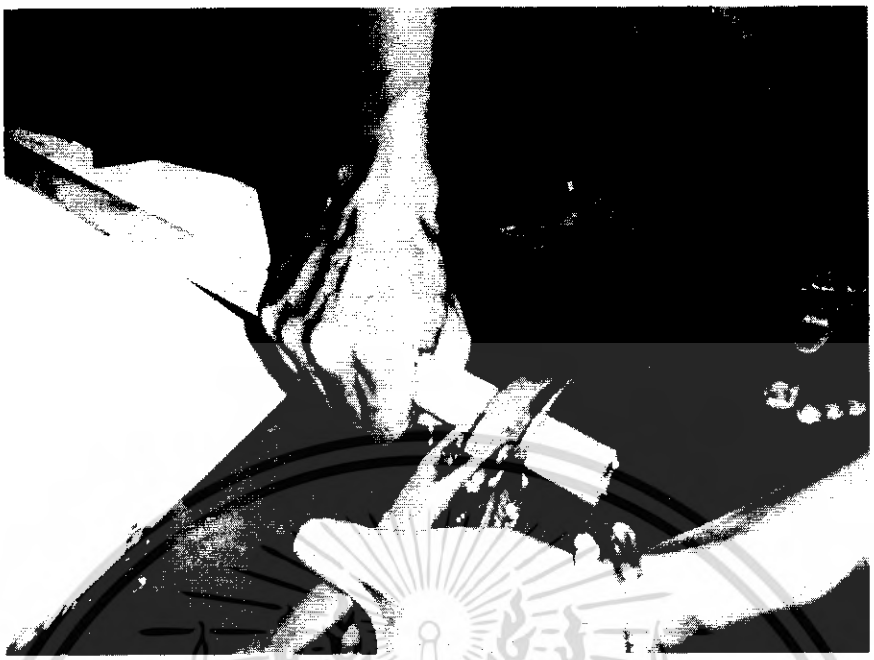
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ทำการลอก Seperator Tape ออก

รูปที่ 4.5 ทำการรวบสาย Copper Shield Tape ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ทำการปลอกชั้นฉนวน XLPE และ ตัวนำ

รูปที่ 4.7 สายเคเบิลที่ทำการปอกแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วิธีการทดสอบ

1) ต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1

2) เปิดเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำวัดค่า Conductivity จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 ไมโครโมห์

3) ทำการทดสอบ AC High Voltage Test โดยจะทำการ ป้อนแรงดันที่ 42 kV เป็นเวลา 5 นาทีแล้วลดแรงตันเหลือ 24 kV เป็นเวลา 1 นาที

4) ทำการทดสอบ Partial Discharge โดยทำการลดแรงดันหลือ 21 kV บันทึกผล PD ที่ได้

4.5 ผลการทดสอบ

วันที่ทดสอบ 13 มีนาคม 2549 : เวลา 16:40

ความดันบรรยากาศ = 760 มม.ปรอท

อุณหภูมิแวดล้อม = 30 เซลเซียส

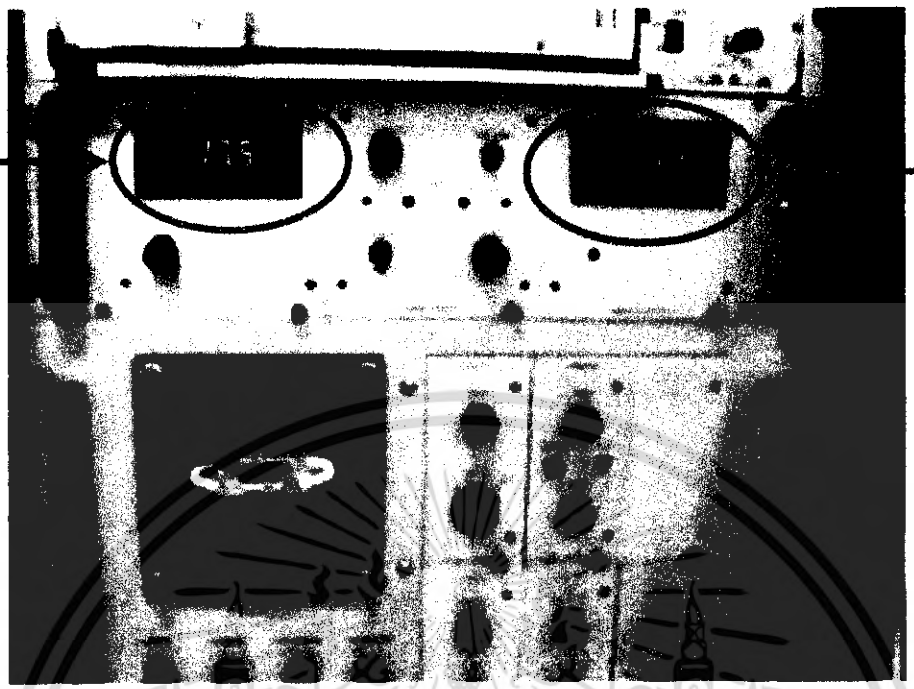
ความชื้นสัมพัทธ์ = 67%

ความชื้นสัมบูรณ์ = 80กรัม/ลูกบาศก์เมตร

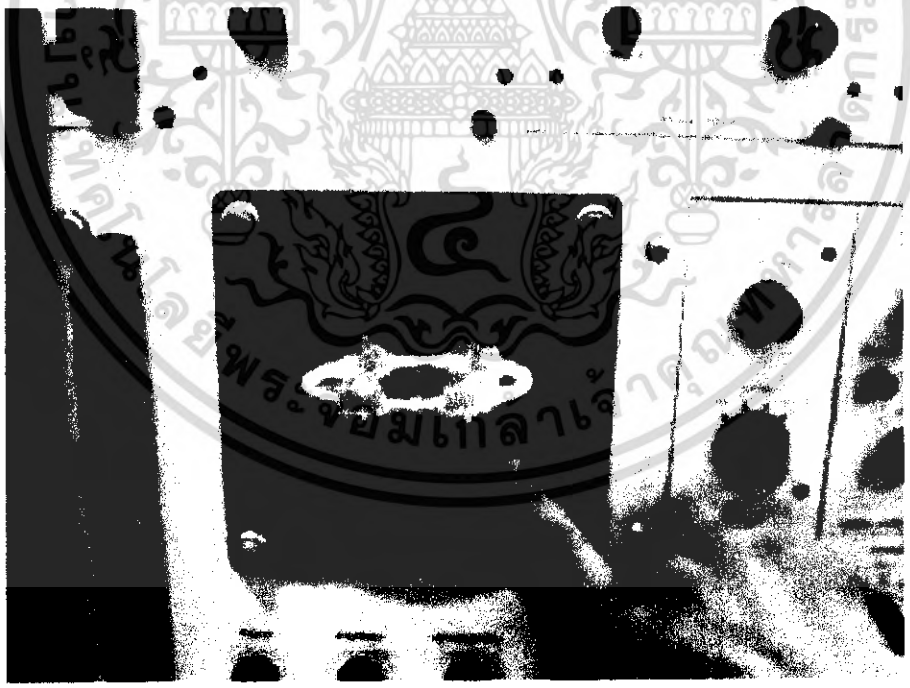
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่า Partial Discharge

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสาย (ตารางมิลลิเมตร)	แรงดันที่ใช้ (kV)	ค่า PD ที่เกิดขึ้น (pC)
120	42	17.5
120	24	6.0
120	21	4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

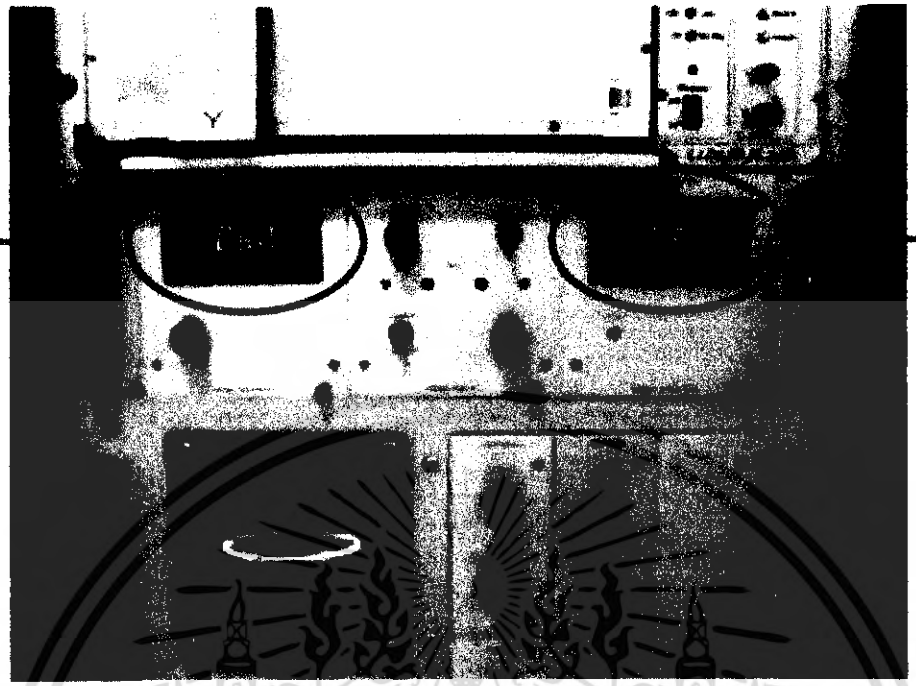


รูปที่ 4.8 ค่าแรงดันและ PD ที่การทดสอบ AC High Voltage Test แรงดัน 42 kV/cm



รูปที่ 4.9 สัญญาณ PD ที่การทดสอบ AC High Voltage Test แรงดัน 42 kV/cm

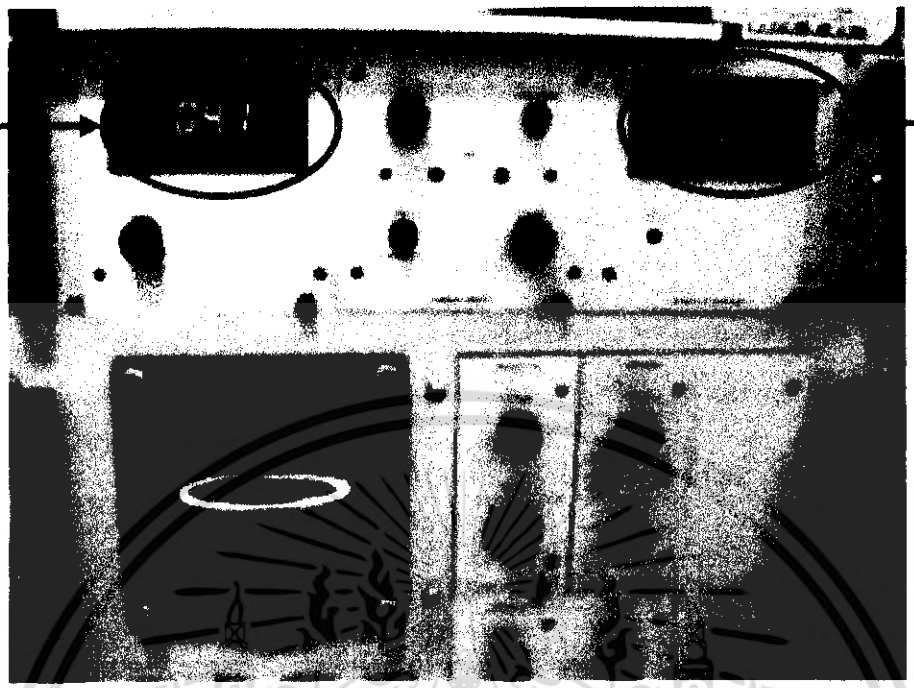
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าแรงดันและ PD ที่ แรงดัน 24 kV/cm

รูปที่ 4.11 สัญญาณ PD ที่ แรงดัน 24 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันและ PD ที่การทดสอบ Partial Discharge ที่ แรงดัน 21 kV/cm

รูปที่ 4.13 สัญญาณ PD ที่ แรงดัน 21 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปของโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบ Partial Discharge ของสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน จะพบว่าน้ำบริสุทธิ์สามารถควบคุมสนามไฟฟ้าซึ่งมีความเครียดสูง บริเวณสายที่ถูกปอกฉนวนออกไปได้ และสามารถวัดค่า Partial Discharge ของสายเคเบิล ได้ดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ซึ่งกำหนดไว้ว่าสายเคเบิล XLPE ที่มีคุณภาพดีพร้อมใช้งาน จะต้องมีค่า Partial Discharge ไม่เกิน 10 pC ที่ระดับแรงดันทดสอบ $1.73U_0$ สำหรับการทดสอบนี้ใช้สาย XLPE ที่มีพิกัด 12/20(24) kV ขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวนำ 120 ตารางมิลลิเมตร ได้ค่า Partial Discharge ออกมา เท่ากับ 4.1 pC แสดงว่า หัวต่อน้ำบริสุทธิ์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นสามารถ ใช้ได้จริง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) งบประมาณ

เนื่องจากโครงงานนี้เป็นการออกแบบสร้างจึงต้องอาศัยงบประมาณในการสร้างและการดำเนินงานมากเป็นพิเศษทำให้การดำเนินงานล่าช้าและต้องแก้ไขแบบในบางส่วนที่ต้องใช้วัสดุที่มีราคาแพงทำให้อุปกรณ์ยังขาดความคงทนเมื่อใช้ไปเป็นเวลานานๆอาจทำให้อุปกรณ์บางตัวเสียหายได้

2) ความพร้อมของห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบในหัวข้อหาค่า PD ของสายเคเบิลแรงดันสูงจะต้องทำภายใต้ห้องทดสอบที่มีการชิลด์ที่ดีมากและมีการกรองสัญญาณรบกวนทุกชนิดออกให้หมดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุดแต่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไม่มีห้องทดสอบสายโดยตรงจึงไม่สามารถทดสอบค่า PD ที่แท้จริงของสายได้โดยเฉพาะหัวต่อทดสอบสายที่ต้องใช้น้ำเป็นฉนวนจะต้องมีเครื่องปรับสภาพน้ำที่มีคุณภาพ แต่ทางห้องปฏิบัติการยังไม่มี

5.3 แนวทางการพัฒนาโครงงาน

1) ในการนำสายเข้าหัวต่อนั้น ค่อนข้างลำบาก จึงน่าจะออกแบบโดยการคำนึงถึงการนำสายเคเบิลเข้าหัวต่อเป็นสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ในส่วนของการป้องกันน้ำรั่วซึมจากท่อ PVC นั้น ค่อนข้างยากเนื่องจากเครื่องทำน้ำของทางบริษัทจรุงไทยนั้น มีแรงดันน้ำค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงควรจะออกแบบให้มีการการป้องกันน้ำรั่วซึมจากท่อ PVCที่ดีกว่านี้

3) สร้างเครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ เพื่อนำมาใช้กับหัวต่อเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล, "การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2545.

[2] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,เมษายน 2547.

[3] จำนาน คำคง, นที โพธิ์อุไร"ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบวัดค่าดิสชาร์จสายเคเบิล XLPE โดยใช้ฉนวนน้ำบริสุทธิ์" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2546.

[4] วรศักดิ์ กำจัดโรค, อนิรุธ อยู่กิจติชัย, และสมเจตน์ หนูจีนจิตร "การออกแบบสร้างเครื่องปรับสภาพความต้านทานน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในสภาวะเปียก" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2546.

[5] IEC Standard Publication No.156, Second edition, insulating liquids Determination of the breakdown voltage at power frequency Test method 1995.

[6] IEC Standard Publication No. 60502-2, Second edition, Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltage from 1 kV(Um =1.2kV) up to 30kV (Um =36kV). Part 2: Cable for rated voltages from 6 kV (Um =7.2 kV) up to 30kV (Um =36kV) 2005-03.

[7] IEC Standard Publication No. 885-3, First edition, Electrical test method for electric cable. Part 3: Test method for partial discharge measurement lengths of extruded power cable 1988.

[8] www.haefely.com , Data sheet, "Cable Test Termination CTTS series",2000-03.pp.4

[9] Charoong Thai wire & Cable Public Company Limited, เอกสารประกอบการบรรยาย, Medium and High Voltage Power Cable, 8 สิงหาคม 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้