

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

THE STUDY OF TESTING UNDERGROUND CABLE

โดย

นายประวิทย์ เพ็ชรผิ้ง

นายมนตรี รวยสันเทียะ

นายจำเนียร พงษ์ประพันธ์

นายสันติ ไชสะอาด

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

62737

21 ส.ค. 2549

b. 41629290

i. ....

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

อ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ



1. นายประวิทย์ เพ็ชรผึ้ง
2. นายมนตรี รวยสันเทียะ
3. นายจำเนียร พงษ์ประพันธ์
4. นายสันติ ไชสะอาด

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ นรเศรษฐ วัฒนเดช )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

นายประวิทย์	เพชรผิ้ง	
นายมนตรี	รวยสันเทียะ	
นายจำเนียร	พงษ์ประพันธ์	
นายสันติ	ไชสะอาด	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.นรเศรษฐ์	พัฒนาเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548		

### บทคัดย่อ

ปฏิญญาพันธกิจฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษา กระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งการทดสอบเป็นกระบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นการรับรองว่าสายเคเบิลที่ผลิตออกมา นั้นเป็นไปตามข้อกำหนดที่ลูกค้าต้องการ โดยยึดหลักมาตรฐานสากลเป็นสำคัญ โครงการฉบับนี้จะเป็นการศึกษากระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502, IEC 60840 และมาตรฐาน อุตสาหกรรม (มอก.) เพื่อที่จะได้เข้าใจในกระบวนการทดสอบมากยิ่งขึ้น การทำโครงการนี้ได้มีการศึกษา ดูงานกระบวนการทดสอบจริงที่บริษัทผลิตสายเคเบิลควบคู่ไปกับการศึกษา มาตรฐาน อีกทั้งเพื่อให้ทราบปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบ และสามารถนำปัญหาที่เกิดขึ้นมาเป็นกรณีศึกษา วิเคราะห์และวิจัยสำหรับแก้ปัญหาต่อไปได้

ส่วนสุดท้ายของโครงการฉบับนี้จะเป็นการนำเสนอ การออกแบบและจัดสร้างหัวต่อสาย เคเบิลแรงสูงแบบน้ำมัน เพื่อใช้ในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยการนำโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาใช้ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์และ ส่วนประกอบต่างๆในหัวแรงดันสูงแบบน้ำมัน แล้วนำหัวต่อสายเคเบิลดังกล่าวมาทำการทดสอบ การคายประจุไฟฟ้าบางส่วน และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

**THE STUDY OF TESTING UNDERGROUND CABLE**

Prawit Petchphung

Monthree Ruaysantia

Jamnian Pongprapan

Santi Kaisa-ard

Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

Norrasage Pattanadech Advisor

2005

**ABSTRACT**

This project presents the study of an underground cable test in which this process is tested by a manufacture to confirm that the cables were produced and complied with the international standard to suit customer requirements. This testing process in this project followed IEC 60502, IEC 60840 standards, and TISI standard. In this project the cable manufacture visits were performed to see the actual production together with the study of standard testing. The problems during visiting can enhance skills in problem solving, corrective and preventive measure.

Practices in this project involved the design of cable high voltage terminator in oil type, partial discharge test, and analysis with finite element program to design and analyze the propagation of electric field of the test devices and the cable terminator to confirm that it complied as standard. Tested results were analyzed and reported.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือสนับสนุนจากหลายๆ ท่านโดยเฉพาะท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และท่าน อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดทั้งภาค ทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งให้โอกาสที่ดีในการดำเนินชีวิต อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไข ปัญหา บางอย่างให้กับคณะผู้จัดทำโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย ราคาค่าใช้จ่ายและได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาบัตรนี้ให้เป็นที่ยอมรับโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย ราคาค่าใช้จ่ายและได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาบัตรนี้ให้เป็นที่ยอมรับโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย ราคาค่าใช้จ่ายและได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาบัตรนี้ให้เป็นที่ยอมรับโดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย ราคาค่าใช้จ่ายและได้กรุณาตรวจแก้ไข

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณผู้มีน้ำใจของทุกท่านทั้งที่กล่าวมาข้างต้นและผู้ที่มีได้กล่าว มาทุกๆ ท่านและที่ขาดมิได้เลยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็น กำลังใจที่ดีตลอดมาและตลอดไป

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 แผนงานการทำโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 สนามไฟฟ้า.....	4
2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า.....	7
2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน.....	8
2.4.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด.....	9
2.4.2 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	9
2.4.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง.....	11
2.5 สนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเดียวกัน.....	15
2.5.1 ทรงกระบอกซ้อนกันแฉก.....	15
2.6 ดิสชาร์จบางส่วน.....	17
2.6.1 ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	18
2.6.2 โครนาดีสชาร์จ.....	18
2.6.3 ดิสชาร์จตามผิว.....	18
2.6.4 การดิสชาร์จภายใน.....	19
2.7 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล.....	22
2.7.1 การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก.....	22
2.7.2 การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก.....	22
2.7.3 การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก.....	23
2.7.4 การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าเหมาะสมจะโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล.....	25
2.9 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	27
2.9.1 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก.....	27
2.9.2 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	28
2.9.3 การคำนวณกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	30
2.9.3.1 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดัน กระแสดตรง.....	30
2.9.3.2 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสสลับ.....	31
2.9.4 การวัดค่าเก็บประจุ C และแพคเตอร์ $\tan \delta$ .....	32
2.9.4.1 Schering bridge.....	32
2.9.4.2 Glynne bridge.....	33
2.10 การสร้างแรงดันอิมพัลส์.....	33
2.10.1 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	34
2.10.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นเต็ม.....	34
2.10.1.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด.....	35
2.10.1.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง.....	35
2.10.1.4 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	36
2.11 การเร่งอายุและการประมาณอายุการใช้งานของสายเคเบิล .....	39
2.12 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง.....	41
2.12.1 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง.....	41
2.12.2 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.....	43
2.12.3 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลีลิกใส.....	43
2.12.4 การออกแบบซิลด์ที่ใช้กับขั้วต่อสายเคเบิล.....	45
บทที่ 3 สายเคเบิลใต้ดิน.....	47
3.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน.....	47
3.1.1 ดัชนี.....	47
3.1.2 ดัชนีดัชนี.....	49
3.1.3 ฉนวน.....	50
3.1.4 ดัชนีฉนวน.....	50
3.1.5 ดัชนีหรือซิลด์โลหะ.....	51
3.1.6 เทปสังเคราะห์ป้องกันการซึมน้ำ.....	52
3.1.7 เปลือกนอก.....	52
3.1.8 เครื่องห่อหุ้ม.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.9 สารบรรจุแน่น.....	52
บทที่ 4 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน.....	54
4.1 นิยามและคำจำกัดความ.....	54
4.1.1 การทดสอบ.....	54
4.1.2 ค่าที่เกี่ยวข้องกับมิติ.....	54
4.1.3 พิกัดแรงดัน.....	54
4.1.4 ส่วนประกอบของฉนวนและชื่อย่อของฉนวน.....	56
4.1.5 ตัวนำ.....	57
4.1.6 ฉนวน.....	58
4.1.7 ตัวกั้น.....	60
4.1.7.1 ตัวกั้นตัวนำ.....	60
4.1.7.2 ตัวกั้นฉนวน.....	60
4.1.8 ตัวกั้นโลหะ.....	61
4.1.9 เปลือกนอก.....	61
4.2 ภาวะและเงื่อนไขการทดสอบ.....	61
4.3 การทดสอบ.....	61
4.3.1 การทดสอบประจำของสายไฟฟ้า.....	61
4.3.2 การทดสอบตัวอย่างของสายไฟฟ้า.....	62
4.3.3 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของสาย.....	63
4.4 การทดสอบประจำ.....	66
4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวนำ.....	66
4.4.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	67
4.4.3 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า.....	67
4.5 การทดสอบตัวอย่างสาย.....	68
4.5.1 การตรวจสอบตัวนำ.....	68
4.5.2 การตรวจสอบขนาดสาย.....	68
4.5.3 การทดสอบแรงดันที่เวลา 4 ชั่วโมง.....	69
4.5.4 การทดสอบการทนต่อความร้อนของฉนวน EPR HEPR, XLPE และเปลือกนอก.....	70
4.6 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า.....	70
4.6.1 การทดสอบความโค้งงอแล้วทำการทดสอบ การคายประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	71
4.6.2 การวัดค่าแฟลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.3 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจาก ที่ได้ทำการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน.....	73
4.6.4 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า หลังจาก ที่ได้ทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์.....	73
4.6.5 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสำหรับ 4 ชั่วโมง.....	74
4.7 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์.....	75
4.7.1 การตรวจสอบตัวนำ.....	75
4.7.2 การตรวจสอบความหนาของฉนวน.....	75
4.7.3 การตรวจสอบความหนาของเปลือก.....	76
4.7.4 การตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า.....	76
4.7.5 การทดสอบความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ.....	77
4.7.6 การทดสอบความยืดตัวของฉนวน.....	77
4.7.7 การทดสอบความจุไฟฟ้า.....	78
4.7.8 การทดสอบสภาพต้านทานของตัวกันที่สารกึ่งตัวนำ.....	78
4.7.9 ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนแรงอายุใช้งานของฉนวน.....	80
4.7.10 ความต้านแรงดึงและความยืดหลังแรงอายุใช้งานของฉนวน.....	81
4.7.11 ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนแรงอายุใช้งานเปลือก.....	82
4.7.12 ความต้านแรงดึงและความยืดหลังแรงอายุใช้งานเปลือก.....	82
4.7.13 การทดสอบความเข้ากันได้ของวัสดุประกอบของสาย.....	83
4.7.14 การทดสอบการเปลี่ยนรูปขณะมีแรงกด ที่อุณหภูมิสูงของเปลือก.....	84
4.7.15 การทดสอบปริมาณคาร์บอนแบล็กในเปลือกพอลิเอทิลีน.....	86
4.7.16 การทดสอบการหดตัวของฉนวนครอสลิงด์พอลิเอทิลีน.....	87
4.7.17 การทดสอบการซึมของน้ำ.....	88
4.7.18 การทดสอบการสูญเสียมวลของเปลือกพอลิไวนิลคลอไรด์.....	88
4.7.19 การทดสอบความทนต่อการช็อกด้วยความร้อน ของเปลือกพอลิไวนิลคลอไรด์.....	89
บทที่ 5 การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลในโรงงานอุตสาหกรรม.....	91
5.1 การทดสอบประจำ.....	91
5.1.1 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	91
5.2 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า.....	94
5.2.1 การทดสอบความโค้งงอแล้วทำการทดสอบการ คายประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	94

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจากที่ได้ทำการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน.....	95
5.2.3 การวัดค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	98
5.2.4 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า หลังจากที่ได้ทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์.....	99
5.2.5 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า 4 ชั่วโมง.....	100
5.3 การทดสอบทางฟิสิกส์.....	100
5.3.1 การทดสอบการยึดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อน.....	100
5.3.2 การทดสอบการหดตัวของเปลือกนอกของสายเคเบิล.....	102
5.3.3 การทดสอบการต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของฉนวน.....	103
5.3.4 การตรวจสอบความหนาของฉนวนและเปลือก.....	107
5.3.5 การทดสอบสภาพต้านทานของตัวกันที่เป็นสารกึ่งตัวนำ.....	110
5.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างของสายเคเบิล.....	114
5.4 ตัวอย่างของปัญหาที่พบในกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน.....	115
5.5 การทดสอบหัวต่อสายเคเบิลแรงสูงแบบน้ำมัน.....	116
5.5.1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า.....	116
5.5.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	118
5.5.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	122
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	123
6.1 สรุป.....	123
6.1 ข้อเสนอแนะ.....	123
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	5
2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	7
2.3 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน.....	9
2.4 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	9
2.5 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย.....	11
2.6 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกันแฉก.....	12
2.7 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันแฉกมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น.....	14
2.8 ตัวนำในฉนวนหุ้ม.....	14
2.9 ทรงกระบอกซ้อนกันแฉก.....	16
2.10 การดิสชาร์จบางส่วน.....	17
2.11 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน ตรวจสอบด้วยด้วยกล้องโคโรนา.....	18
2.12 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว.....	19
2.13 ฉนวนมีโพรงก๊าซ.....	20
2.14 ดิสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ.....	21
2.15 การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ.....	22
2.16 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก.....	23
2.17 การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน.....	23
2.18 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก.....	24
2.19 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง.....	25
2.20 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข.....	26
2.21 สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม FEM.....	26
2.22 กระแสไหลผ่านไดอิเล็กตริก.....	27
2.23 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก.....	28
2.24 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ.....	29
2.25 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โพลาริเซชันและดิสชาร์จบางส่วน.....	30
2.26 วงจร Schering bridge.....	32
2.27 Glynne bridge.....	33
2.28 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น.....	34
2.29 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น .....	35
2.31 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง .....	36
2.32 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งชั้น วงจร A และ วงจร B .....	37
2.33 กราฟอายุการใช้งานเทียบแรงดันของสาย 3 เฟส .....	40
2.34 ส่วนประกอบของโครงสร้างสายเคเบิล .....	41
2.35 แบบตัวนำสายเคเบิล 12/20 kV ใช้ในการทดสอบ .....	42
2.36 ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงกึ่งจากทองแดง .....	42
2.37 ชุดฐานรองรับท่ออะคลีลิก .....	43
2.38 ท่ออะคลีลิกใส .....	44
2.39 ซุปเปอร์ลีนที่ใช้ยึดติดกับท่ออะคลีลิกใส .....	44
2.40 ซิลด์ที่ใช้กับชุดหัวต่อสายเคเบิล .....	45
2.41 ผลที่ได้จากโปรแกรม FEM .....	45
2.42 ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง .....	46
3.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน .....	47
3.2 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลใต้ดิน .....	49
3.3 สายเคเบิลที่ใช้เครื่องป้องกันโลหะแบบแผ่น .....	51
3.4 สายเคเบิลที่ใช้เครื่องป้องกันโลหะแบบลวดทองแดง .....	52
3.5 เครื่องห่อหุ้มและสารบรรจุแน่น .....	53
4.1 ลักษณะของการตัดสายเคเบิลทดสอบ .....	71
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า .....	91
5.2 กระบวนการเตรียมการทดสอบ .....	92
5.3 วงจรทดสอบการคายประจุไฟฟ้า .....	92
5.4 วงจรการทดสอบที่ต่อสมบูรณ์แล้ว .....	93
5.5 การบันทึกค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน .....	93
5.6 การตัดสายเคเบิลโค้งงอรอบล้อบรรจุสาย .....	95
5.7 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจากการทดสอบความโค้งงอ .....	95
5.8 การทดสอบ Heating Cycle .....	96
5.9 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของตัวนำ .....	96
5.10 อุปกรณ์ควบคุมและบันทึกผลในการทดสอบ Heating Cycle .....	97
5.11 สายเคเบิลทดสอบ .....	98
5.12 วงจรการทดสอบหาค่าแฟลคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก .....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์.....	99
5.14 ชั้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์.....	101
5.15 การวัดขนาดของชั้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์.....	101
5.16 การทดสอบการยึดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อน.....	102
5.17 ระยะเวลาที่ชั้นทดสอบ.....	102
5.18 การวัดระยะมาร์คหลังจากการทดสอบ.....	103
5.19 การใช้ Micrometer วัดความกว้างและความหนาของชั้นทดสอบ.....	104
5.20 ระยะห่างของขีดเครื่องหมายบนชั้นทดสอบ.....	104
5.21 การทดสอบการต้านแรงดึงของฉนวนก่อนเร่งอายุการใช้งาน.....	106
5.22 การอบชั้นทดสอบ.....	107
5.23 ตัวอย่างชั้นทดสอบความหนาของฉนวนและเปลือก.....	108
5.24 การตรวจสอบความหนาของฉนวนและเปลือก.....	109
5.25 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบความหนาของฉนวนและเปลือก.....	110
5.26 การเตรียมชั้นทดสอบสำหรับทดสอบสภาพต้านทานของตัวกัน ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ.....	110
5.27 ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานของตัวกันตัวนำ.....	111
5.28 ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานของตัวกันฉนวน.....	111
5.29 ลักษณะของการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าทดสอบสภาพต้านทานของตัวกันฉนวน.....	113
5.30 การทดสอบสภาพต้านทานของตัวกันที่เป็นสารกึ่งตัวนำ.....	113
5.31 การตรวจสอบตัวนำ.....	114
5.32 การตรวจสอบมิติของสายเคเบิล.....	115
5.33 การเกิดเบรกดาว์นของสายเคเบิลในการทดสอบการคาย ประจุไฟฟ้าบางส่วน.....	116
5.34 ลักษณะของการเบรกดาว์นของฉนวนสายเคเบิล.....	116
5.35 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า ทำการทดลองที่ห้องทดสอบ โรงงานผู้ผลิต.....	117
5.36 วงจรการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อ สายเคเบิลแบบน้ำมันของโรงงานผู้ผลิต.....	119
5.37 วงจรการทดสอบหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อ สายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ของโรงงานผู้ผลิต.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38	
วงจรถอดสอบหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อ สายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ที่จัดทำขึ้นมาร่วมกับซิลด์ ของโรงงานผู้ผลิต.....	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานโครงการ .....	3
1.2 แผนงานโครงการ (ต่อ).....	3
3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม .....	48
3.2 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE.....	50
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $U_0/U$ และ $U_m$ .....	55
4.2 พิกัดแรงดัน $U_0$ .....	56
4.3 ชื่อย่อของฉนวน.....	57
4.4 อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ.....	57
4.5 อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำตามชนิดของเปลือกที่ใช้.....	58
4.6 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE.....	59
4.7 ความหนาของฉนวน PVC/B.....	59
4.8 ความหนาของฉนวน cross-linked polyethylene (XLPE).....	59
4.9 ความหนาของฉนวน ethylene propylene rubber (EPR) และฉนวน hard ethylene propylene rubber (HEPR).....	60
4.10 แรงดันทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนตามมาตรฐาน.....	67
4.11 แรงดันทดสอบกระแสลับที่ความถี่กำลังตามมาตรฐาน.....	67
4.12 แรงดันการทดสอบตัวอย่างสายตามมาตรฐาน.....	70
4.13 ข้อกำหนดของฉนวนในการทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้า.....	73
4.14 ขนาดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบตามมาตรฐาน.....	74
4.15 แรงดันทดสอบกระแสลับที่ความถี่กำลังตามมาตรฐาน.....	74
4.16 เส้นผ่านศูนย์กลางของแมนเดรลและจำนวนรอบที่พัน.....	90
5.1 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบสายเคเบิลมาตรฐาน IEC 60502-2.....	100
5.2 แรงดันอิมพัลส์ทดสอบสายเคเบิลมาตรฐาน IEC 60840.....	100
5.3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า.....	117
5.4 ค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนของการทดสอบหัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมัน...121	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน เริ่มเข้ามามีบทบาทในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาทดแทน การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะ (overhead line) เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในเขตเมืองหลวง แหล่งชุมชน และพื้นที่ที่ต้องการรักษาความสวยงามของทัศนียภาพ หรือสภาพแวดล้อม ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลนั้น สายเคเบิลนับว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในระบบการส่งจ่ายแบบนี้ ดังนั้นสายเคเบิลที่จะนำมาติดตั้งในระบบต้องได้มาตรฐานที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ เพราะหากนำสายเคเบิลที่ไม่ได้มาตรฐานมาติดตั้งเข้าในระบบแล้ว จะเป็นสาเหตุให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเกิดความผิดปกติได้ ด้วยเหตุนี้เองสายเคเบิลที่ผลิตโดยโรงงานผู้ผลิตจึงต้องมีกระบวนการทดสอบทางไฟฟ้า, ทางกล, ทางกายภาพของสาย ก่อนที่จะทำการส่งมอบให้ผู้ซื้อหรือลูกค้า เพื่อเป็นการรับรองว่าสายเคเบิลสำเร็จรูปนั้นผ่านมาตรฐานตามที่กำหนด โดยมาตรฐานที่ทำการทดสอบสายนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดพิกัดแรงดัน และพื้นที่ที่นำสายไปติดตั้ง หรือขึ้นอยู่กับข้อตกลงที่ทำระหว่างผู้ผลิตกับลูกค้า

กระบวนการทดสอบสายเคเบิลเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะหากสายเคเบิลที่ทำการผลิต และทดสอบที่ได้มาตรฐานแล้วจะช่วยลดปัญหา และค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการนำสายมาติดตั้งเข้ากับระบบ เนื่องในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดินนั้น ต้องใช้งบประมาณในลงทุน ที่สูงกว่าระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะมาก

### 1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลใต้ดินในอดีตที่ผ่านมาในประเทศ ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบในการติดตั้งสายเคเบิล การออกแบบติดตั้งสายเคเบิลในระบบการส่งจ่าย [1-3] และการคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน [4] การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทดสอบสายเคเบิลนั้น จะเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ การคายประจุไฟฟ้าบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปลว และทดสอบความคงทนของฉนวนของสายไฟฟ้าแรงสูง[5] ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการทดสอบสายเคเบิลเท่านั้น นับตั้งแต่การไฟฟ้านครหลวง ได้เริ่มนำสายเคเบิลเข้ามาส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยในหลายกรณีที่เกิดปัญหาขึ้น ในระบบการส่งจ่ายโดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน อันเนื่องมาจากการนำสายเคเบิลที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานมาติดตั้งในระบบ ดังนั้น การศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิล จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ เพื่อเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นอันเป็นผลเสียต่อความน่าเชื่อถือของระบบได้

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
- 2) ศึกษามาตรฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
- 3) ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทดสอบสายเคเบิล
- 4) ออกแบบและจัดสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงแบบน้ำมันเพื่อใช้ในการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน
- 5) ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของขั้วต่อสายเคเบิล

### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาโครงการนี้คือ ศึกษาเฉพาะกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEC และมาตรฐาน มอก.ที่ใช้เป็นข้อกำหนดในกระบวนการผลิตและทดสอบสายเคเบิลในประเทศไทย และออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงเพื่อใช้ในการทดสอบสายเคเบิลพิกัดแรงดัน 12/20 (24) kV

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงหลักการ และขั้นตอนกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
- 2) เพื่อที่จะได้มีเอกสารประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทดสอบสายเคเบิล
- 3) มีขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบน้ำมัน เพื่อใช้ในการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 4) สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษากระบวนการทดสอบสายเคเบิล มาทำการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสายเคเบิลที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ได้ ตามศักยภาพของห้องปฏิบัติการเพื่อความก้าวหน้าของห้องปฏิบัติการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 แผนงานการทำโครงการ

### ตารางที่ 1.1 แผนการทำโครงการ

หัวข้อ	เดือน (2548)						หมายเหตุ
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลใต้ดิน	■	■					
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ		■	■				
3. ศึกษาการทดสอบจริงที่โรงงานผลิตสายเคเบิล			■	■	■		
4. ศึกษาและออกแบบขั้วต่อสายแรงสูงชนิดน้ำมัน				■	■		

### ตารางที่ 1.2 แผนการทำโครงการ (ต่อ)

หัวข้อ	เดือน					หมายเหตุ
	2548			2549		
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
5. จัดสร้างขั้วต่อสายแรงสูงชนิดน้ำมัน	■	■	■			
6. ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันไฟฟ้า AC ในสายเคเบิล				■		
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ				■		
8. สรุปผลการทำโครงการและข้อเสนอแนะ				■		
9. เตรียมตัวสอบโครงการ				■	■	
10. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์				■		

■ คือ แผนงานที่วางไว้

■ คือ การดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในการออกแบบและทดสอบสายเคเบิลนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงประการแรก คือ การฉนวนเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการฉนวน และความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้นของฉนวน จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลได้

#### 2.2 สนามไฟฟ้า [6]

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆกันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

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

สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์ หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าวระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $E_{av}$  คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $\frac{U}{d}$

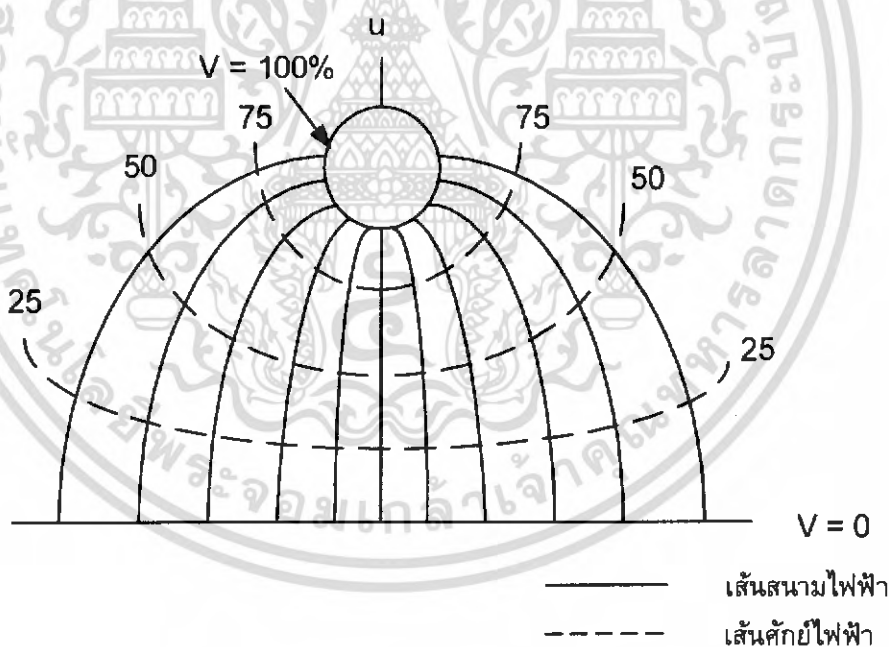
$U$  คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

จึงอาจกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟคเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.2)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือ ปริดีสชาร์จ (predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์(สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_b$



**รูปที่ 2.1** สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.2 อีเล็กโตรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆผิวอีเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอีเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอีเล็กโตรด) เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อีเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.1) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการ(2.2)ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ(2.2)นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

$U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่  $E_i$  และ  $U_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอีเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ สมการที่ (2.3) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage  $^*$ , threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอีเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่มีอีเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่ โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อีเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

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

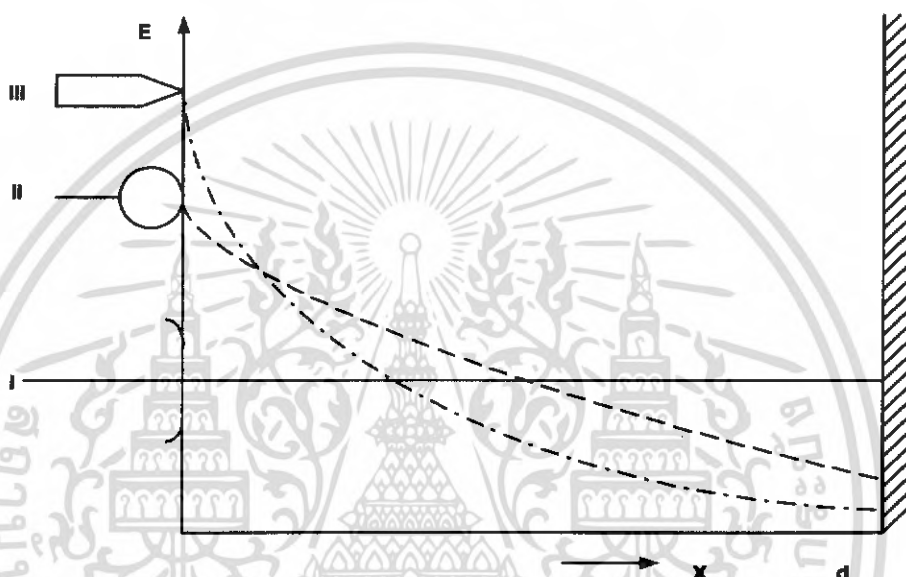
เมื่อ  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่อีเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_0$  และ  $E_i$  คือ  $E_0$  ถ้าเป็นอีเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_0 > U_i$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุ ค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กทรอนิกส์ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้า เริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการ ฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์, รัศมีความโค้งของอิเล็กทรอนิกส์, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กทรอนิกส์แล้วยัง ขึ้นอยู่กับแพคเกจจิ้งอื่นๆ อีกหลายประการ



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ

### 2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า $E$ (electrical field stress) [7]

จากกฎของคูลอมบ์

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

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

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

จากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ  $Q_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $D/\epsilon$  ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (NIC) กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  (electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

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

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

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

จะเห็นได้ว่า แรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า บางทีเรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทริกเชิงเส้น เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า จึงเขียนได้ว่า

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

เมื่อ  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น  $A/m^2$   
 $\sigma$  คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น  $S/m = \text{siemens/meter} = 1/\rho$   
 $\rho$  คือ สภาพต้านทาน เป็น  $\Omega - m$

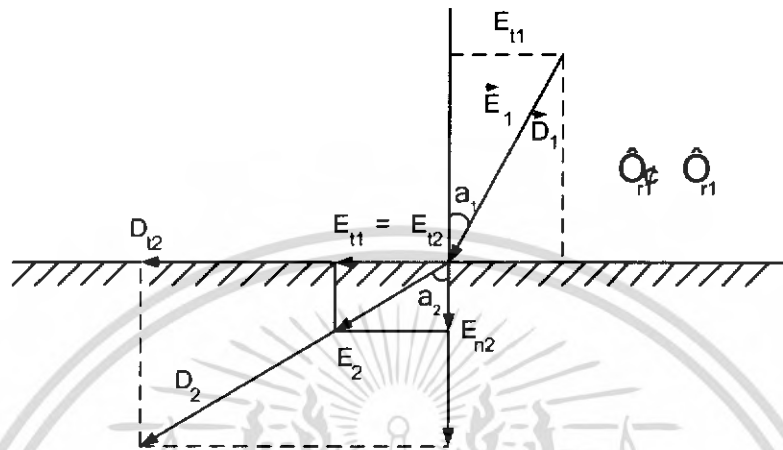
ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

## 2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

ฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมาก นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่าง ๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส  $E$ , ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  $D_n$  ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ  $E_{n1} = E_{n2}$  และ  $D_{n1} = D_{n2}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3



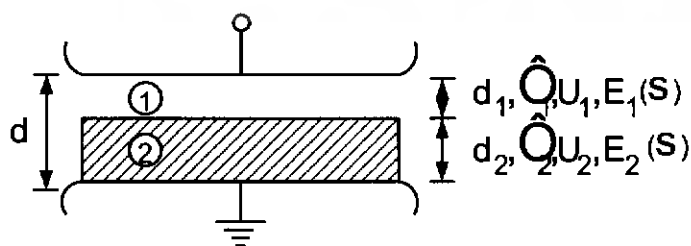
**รูปที่ 2.3** การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2 = E_{n2} / E_{n1} = D_{n1} / D_{n2} = \epsilon_1 / \epsilon_2$$

จึงกล่าวสรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  $\vec{D}$  และสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ในเนื้อสารที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างจากแนวตั้งฉาก หรือหักเหเข้าหารอยต่อนั่นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี  $\epsilon$  สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

2.4.2 ชั้นฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทฤษฎีแล้วการวางชั้นฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดที่ดีที่สุด คือการวางไม่ให้เกิดการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้า หรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั่นคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเส้นสัมผัส ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ  $E = U/d$  เพราะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และใช้ความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้น จะมีค่าคงตัว  $D$  และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามี ตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \text{และ} \quad C_2 \sim \frac{\epsilon_2}{d_2}$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2}$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1$$

แต่

$$U = U_1 + U_2$$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1$$

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

ฉะนั้น

$$U_1 = \frac{U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.11)$$

แทนค่า  $U_1$  จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.12)$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.13)$$

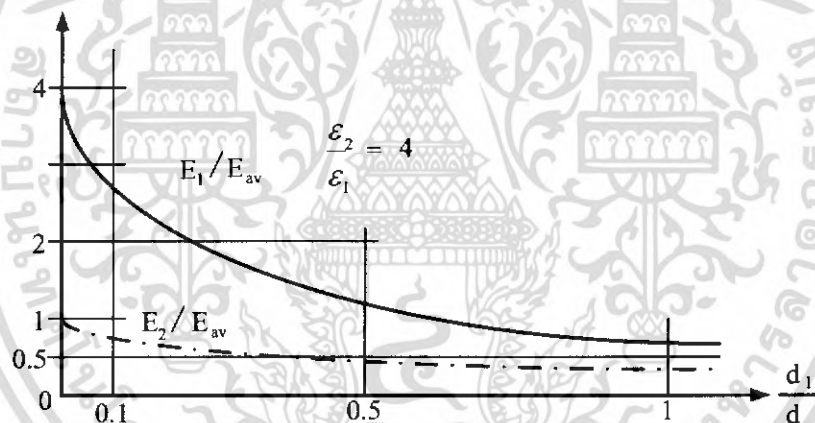
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.14)$$

$$E_2 = \frac{U \epsilon_1 / \epsilon_2}{d_1 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.15)$$

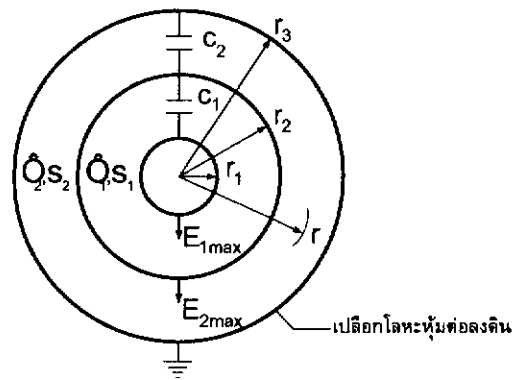
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.16)$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะมากกว่า  $E_2$  ตามอัตราส่วน  $\epsilon_2/\epsilon_1$  เมื่อ  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี TM ค่า สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในรูปที่ 2.5



**รูปที่ 2.5** เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

2.4.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง ฉนวนแข็งมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกัน  $\epsilon$  ซึ่งฉนวนที่มีค่า  $\epsilon$  ต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพราะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน แต่การใช้ฉนวนที่มีค่า  $\epsilon$  ต่างกันเหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี  $\epsilon$  ต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันรวม และปลอกตัวนำ (bushing) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกัน

ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวน ( $\sigma$ ) เป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ นั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลหรือเปลือกโลหะจะเสมือนว่ามีค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวต่ออันดับกัน คือ  $C_1$  และ  $C_2$  ในฉนวนชั้น 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

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

ฉะนั้นความจุไฟฟ้าผลลัพธ์คือ

$$\begin{aligned} C_{res}' &= \frac{C_1' \cdot C_2'}{C_1' + C_2'} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  เข้าที่ตัวนำในกับเปลือกโลหะ ประจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิลคือ  $Q'$  จึงหาได้จาก

$$\begin{aligned} Q' &= C_{res}' \cdot U \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 \cdot U}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยที่ตัวเก็บประจุของฉนวนแต่ละชั้นต่อกันแบบอันดับ ประจุของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นย่อมเท่ากันคือ

$$Q_1' = Q_2' = Q' = C_1'U_1 = C_2'U_2 = C_{res}' \cdot U$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันกระจายในชั้นฉนวนจึงคิดแบบตัวเก็บประจุต่อกันแบบอันดับ นั้นที่รัศมี  $r_x$  แรงดันจะเป็น

$$U_{r_x} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{rx}}$$

$C'_{rx}$  ความจุไฟฟ้าที่รัศมีฉนวนเท่ากับ  $r_x$

$$U_{r_x} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{C_{rx} \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.19)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่มีรัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_{res} U}{2\pi\epsilon_x r_x}$$

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.20)$$

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

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x} \quad (2.21)$$

ฉะนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้น จะเกิดขึ้นในรัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือในชั้นฉนวนชั้น 1  $E_{max}$  เกิดขึ้นที่  $r=r_1, \epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1max} \Big|_{\substack{r=r_1 \\ \epsilon=\epsilon_1}} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.22)$$

และในชั้นฉนวนชั้น 2  $E_{max}$  เกิดขึ้นที่  $r=r_2, \epsilon = \epsilon_2$

$$E_{2max} \Big|_{\substack{r=r_2 \\ \epsilon=\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.23)$$

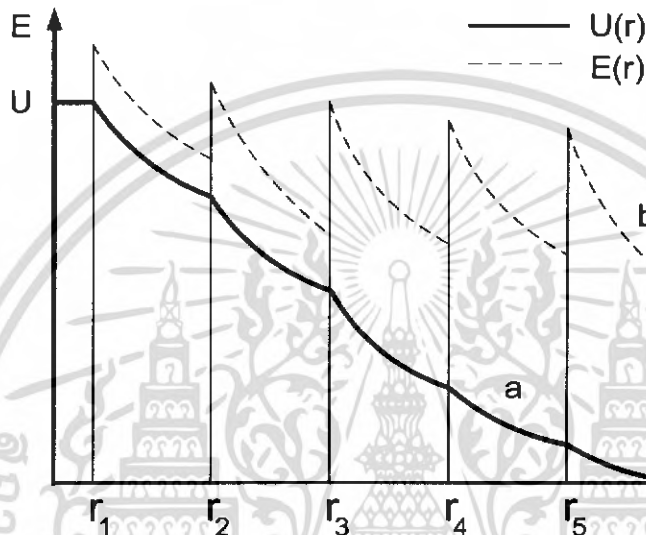
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2 \cdot r_2}{\epsilon_1 \cdot r_1}$$

นั่นคือควรเลือก  $\epsilon$  ของค่า  $r$  น้อยๆ ให้มีค่ามากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน  $n$  ชั้น ซึ่งมีรัศมี  $r_1, r_2, \dots, r_n$  และมีไดอิเล็กตริกคงตัว  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$  และเพื่อให้  $E_{\max}$  ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี  $E_{\max}$  เท่ากันจะทำได้โดยให้

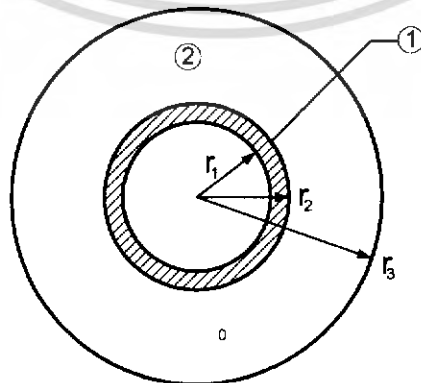
$$\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \epsilon_3 r_3 = \epsilon_n r_n \quad (2.24)$$



**รูปที่ 2.7** เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันรวมมีชั้นฉนวนชั้นหลายชั้น

- a) แรงดันกระจายในชั้นฉนวน
- b) สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวน

รูปลักษณะในทางปฏิบัติใช้งาน มักจะพบเสมออย่างหนึ่งก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น คือ ที่อิเล็กโตรดใน จะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1$  ชั้นถัดมากระบอกนอกเป็นอากาศ ( $\epsilon_0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



**รูปที่ 2.8** ตัวนำในฉนวนหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

ฉนวนหุ้มสายไฟจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ ไม่ต้องกังวลว่า จะต้องให้  $E$  ที่ผิวตัวนำมีค่าต่ำๆ จึงสามารถใช้กับแรงดันที่สูงกว่าเมื่อเป็นอากาศล้วนได้ เพียงแต่ต้องดูว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้น 2 ที่เป็นอากาศ คือ  $E_2$  มีให้มีค่าสูงเกินขีด ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจคำนวณได้

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 U}{r_2 \left( \varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.25)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้น 2 คืออากาศเป็น  $E_2$  ขึ้นอยู่กับค่า  $r_2$  จึง ควรเลือก  $r_2$  ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_2$  ต่ำสุดเมื่อกำหนด  $r_3$  ให้ นั่นคือ ค่าของส่วนในสมการข้างบน จะต้องมามีค่าสูงสุด ให้  $r_2 = x$  จึงหาค่า  $r_2$  ที่พอเหมาะได้จาก

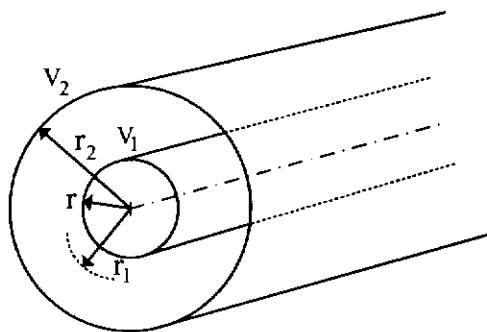
$$\frac{d}{dx} \left[ x \left( \varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0 \quad (2.26)$$

## 2.5 สนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเดียวกัน

การฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัด หรือกำหนดด้วยความเครียด สนามไฟฟ้าเป็นประการสำคัญ ฉะนั้นการออกแบบการฉนวนจึงควรจะทราบรูปลักษณะ และ ขนาดของความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อเลือกชนิดและรูปร่างแห่งเรขาคณิตของสนามไฟฟ้าได้ เหมาะสม สำหรับการออกแบบสายเคเบิลนั้น รูปร่างของการออกแบบจะเป็นลักษณะของ ทรงกระบอกซ้อนกัน

2.5.1 ทรงกระบอกซ้อนกัน เมื่ออิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อน กันร่วม เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมี และพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวดักยไฟฟ้า เท่า ดังนั้นโดยอาศัยอินทิกรัลสมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์  $Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$  สำหรับทรงกระบอกซ้อน กันร่วมมีความยาว  $l$  รัศมี  $r (r_1 \leq r \leq r_2)$  ดังรูปที่ 2.9 และ  $E = D/\varepsilon$  จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่ รัศมี  $r$  ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \varepsilon l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.27)$$



**รูปที่ 2.9** ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสองคือ

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

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.28)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่  $r_1 < r < r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.29)$$

จะเห็นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวทรงกระบอกอันใน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.30)$$

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

โดยที่

$$E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1}$$

ฉะนั้น

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

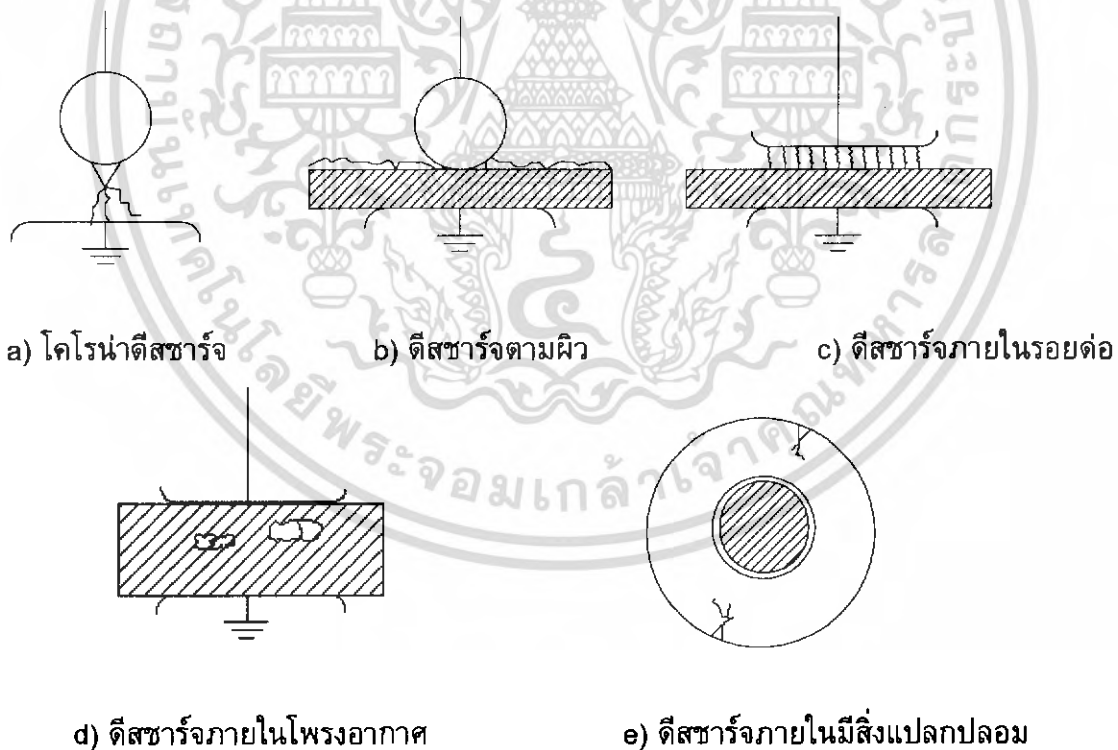
ความจุไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันรวมคำนวณจาก  $Q = CU$  ในสมการที่ 2.28

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.32)$$

**2.6 ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge , PD) [8]**

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน คือการเกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วน ของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรคดาวนหรือดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่าง อิเล็กโทรด ไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะ เกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- 1) โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge)
- 2) ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)
- 3) ดิสชาร์จภายใน (internal discharge)



**รูปที่ 2.10** การดิสชาร์จบางส่วน

2.6.1 ผลกระทบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น เฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้อนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดความผิวดร้งขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้อนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนสายแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่า โคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ (radio interferent voltage ;RIV ) เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

2.6.2 โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบๆอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆบริเวณนั้นเกิดไอในเซชันรูปที่ 2.11 แสดงการเกิดโคโรนาที่พวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก และที่ขอบคมของสายนำไฟฟ้าแรงสูง (ถ่ายด้วยกล้องตรวจจับโคโรนา)

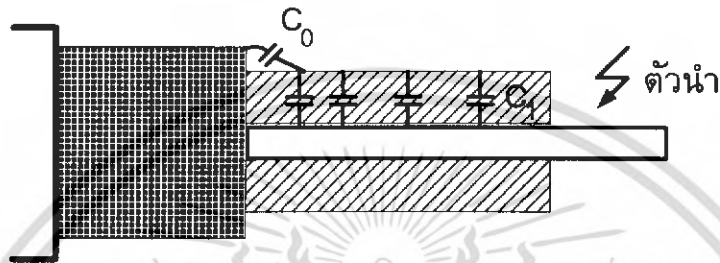
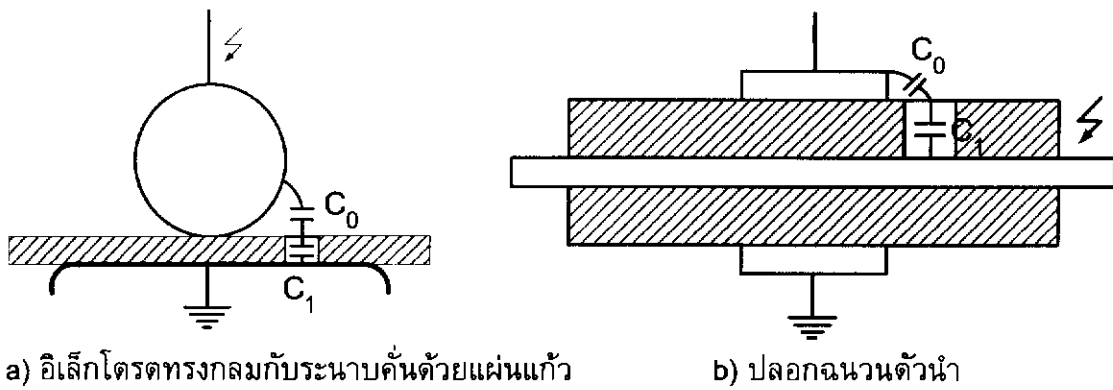


a) การเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันที่ 30 kV

b) การเกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันที่ 70 kV

**รูปที่ 2.11** การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน ตรวจจับด้วยกล้องโคโรนา

2.6.3 ดีสชาร์จตามผิว ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอก็ตาม ฉนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้า ในส่วนที่มีเปอร์มิติวิตีต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นจนเป็นผลเกิดดีสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดีสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน (tangential field  $E_t$ ) มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต ( $E_c$ ) ตัวอย่างเช่น แผ่นฉนวนแข็งคั่นระหว่างอิลีกโตรดกับแผ่นระนาบ ที่ปักยึดปลอกฉนวนตัวนำ และปลายสายเคเบิลแรงสูง ดังในรูปที่ 2.12



**รูปที่ 2.12** ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิว

จากรูป ค่าเก็บประจุระหว่างอิเล็กโตรด  $C_0 \leq$  ค่าเก็บประจุของฉนวนแข็ง  $C_1$  ฉะนั้นแรงดันระหว่างอิเล็กโตรดจะตกคร่อม  $C_0$  เกือบหมด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบนส่วน  $C_0$  มีค่าสูงเกิน  $E_c$  จึงเกิดการเบรกดาวน หรือดีสชาร์จบางส่วนในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็ง ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดัน  $E_b$  สูง จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวนทะลุได้ แต่จะดีสชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง

**2.6.4 การดีสชาร์จภายใน** การดีสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนแข็งหรือเหลว ซึ่งมีฟองอากาศอยู่ภายใน ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดีสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซที่แผงอยู่ภายใน ซึ่งสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะทำให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากเกิดเบรกดาวนครั้งแรก การมีฟองก๊าซอยู่ภายในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุของการเกิดเบรกดาวนในที่สุด อาจกล่าวได้ว่าฉนวนใดที่มีการดีสชาร์จภายใน จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวน การตรวจจับดีสชาร์จภายในจึงเป็นส่วนสำคัญ

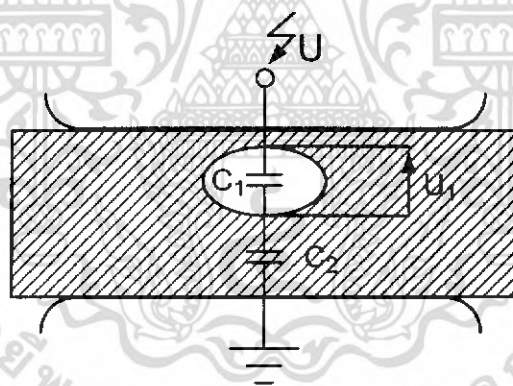
การดีสชาร์จภายในไดอิเล็กตริก เพราะมีไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า ปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน หรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโตรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรกดาวนที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวน ทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือปนในฟอง หรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้น

ความเครียดสนามไฟฟ้า ในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในเนื้อฉนวน จึงเกิดการเบรกดาวนในโพรงก่อน

โพรงฉนวนเป็นก๊าซ ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์หรือกระบวนการชุบด้วยน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด หรือเบรกดาวนของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีอาจจะคำนวณได้ ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดันและมิติของโพรง

โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด สิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรกดาวนในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นในโพรง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะลดต่ำหลังจากที่ได้เกิดเบรกดาวนครั้งแรกแล้ว

โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน โพรงฉนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษชุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลง หรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรง อาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน( $\epsilon_1$ ) จะเป็น  $\epsilon_2/\epsilon_1$  เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวน ( $TM_2$ ) ในกรณีที่โพรงแบนตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรกดาวนในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดีสชาร์จภายในขึ้น ในเนื้อฉนวนที่มีโพรงก๊าซหรือน้ำมันดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ฉนวนมีโพรงก๊าซ

ในรูปที่ 2.13  $C_1$  แทนค่าเก็บประจุของโพรงก๊าซ  $C_2$  แทนค่าเก็บประจุของฉนวนส่วนต่อที่อันดับกับโพรง  $C_1$  เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  ระหว่างอิเล็กโทรดที่คั่นด้วยฉนวนนี้ทั้งหมด และ  $U_1$  เป็นแรงดันคร่อมโพรงซึ่งอาจคำนวณในลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์จะได้

$$U_1 = U \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{rc}} \cdot \frac{d_1}{d_2} = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.33)$$

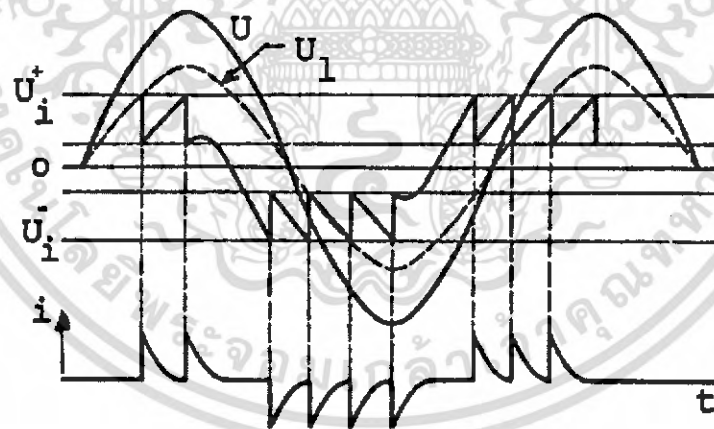
เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ เป็นเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_{rc}$  คือ เป็นเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของโพรง

$d_1, d_2$  คือ เป็นความหนาของโพรงและฉนวนตามลำดับ (ปกติ  $d_1 \leq d_2$ )

ถ้าแรงดันตกคร่อมโพรงถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรงเท่ากับ  $U_i$  ก็จะเกิดเบรกดาวนหรือดีสชาร์จในโพรง ค่าแรงดัน  $U_i$  เรียกว่า แรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ ในกรณีแรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับ เบรกดาวนจะเกิดขึ้นที่ค่ายอดทั้งสองของรูปคลื่น จำนวนครั้งดีสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อน ดังรูปที่ 2.14 เส้นประแสดงถึงแรงดันตกคร่อมโพรงที่ควรจะเป็น ถ้าหากไม่เกิดดีสชาร์จ เมื่อ  $U$  มีค่าถึง  $U_i^+$  หรือ  $U_i^-$  ดีสชาร์จจะเกิดขึ้น แรงดันตกคร่อมโพรงจะเป็นศูนย์ แรงดันในโพรงก็จะเพิ่มขึ้นอีก จนกระทั่งถึง  $U_i$  อีก ก็ดีสชาร์จใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ ทั้งทางครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่น ทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จ ก็จะมีกระแสอิมพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน

เมื่อก๊าซในโพรงเบรกดาวนเกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโพรง เมื่อเคลื่อนที่ไปยังผนังของโพรง ถ้าพลังงานมากพอก็จะทำให้บอนด์ทางเคมีแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้นในโพรง มีเขม่าคาร์บอนที่ผิวใน เกิดกักตร้อนเนื้อสารเป็นร่องรอยตามผิวในโพรง สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น ผลทางปฏิกิริยาทางเคมีทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ความหนาของฉนวนลดน้อยลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด อายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อน และจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จเบรกดาวน โดยกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นภายในสองสามวัน หรือหลายปี อย่างไรก็ตามหากมีดีสชาร์จภายใน จะทำให้การใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง



**รูปที่ 2.14** ดีสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ

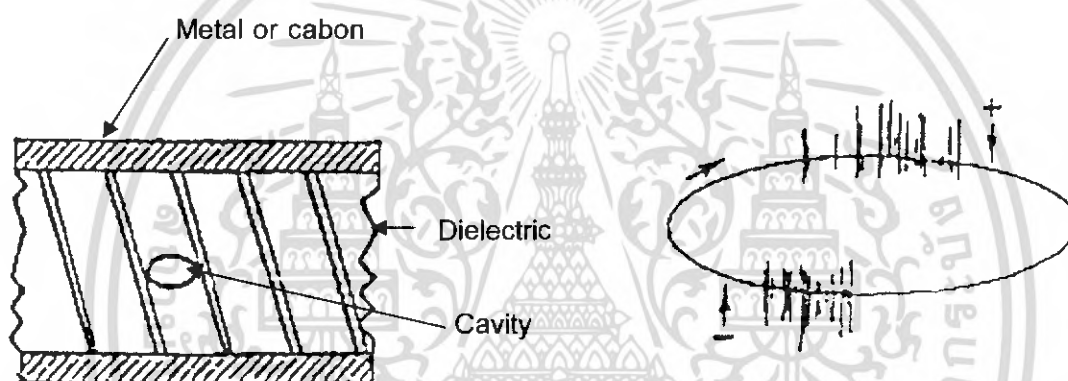
- เมื่อ
- $U$  คือ แรงดันระหว่างอิเล็กโตรด
  - $U_1$  คือ แรงดันคร่อมโพรง
  - $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ
  - $I$  คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จ

## 2.7 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล [9]

สามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.7.1) การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริกโพรงอากาศชนิดนี้มักพบในของแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่นการหล่อการหุ้ม การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการดิสชาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปไซน์

ตำแหน่งของการดิสชาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรีในช่วงที่แสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วน ขนาดของการดิสชาร์จนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การดิสชาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือเมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้น (Withstand) และช่วงเวลาที่กำหนด ( $\cong 10$  นาที)

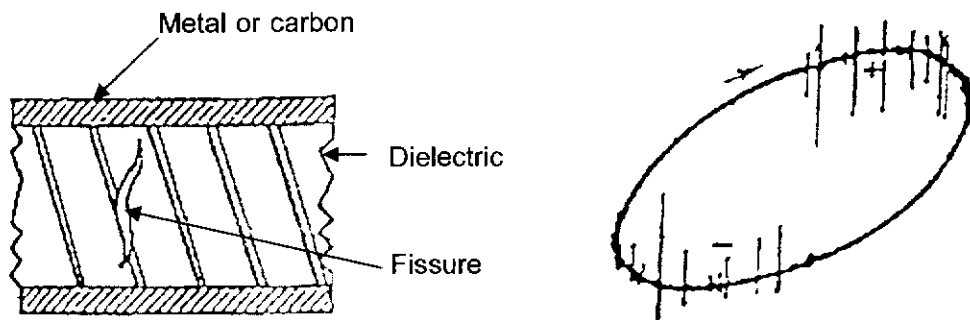


ก) โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก

ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

**รูปที่ 2.15** การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ

2.7.2) การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริกการดิสชาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆกันและขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว



ก) รอยแตกภายในไดอิเล็กตริก

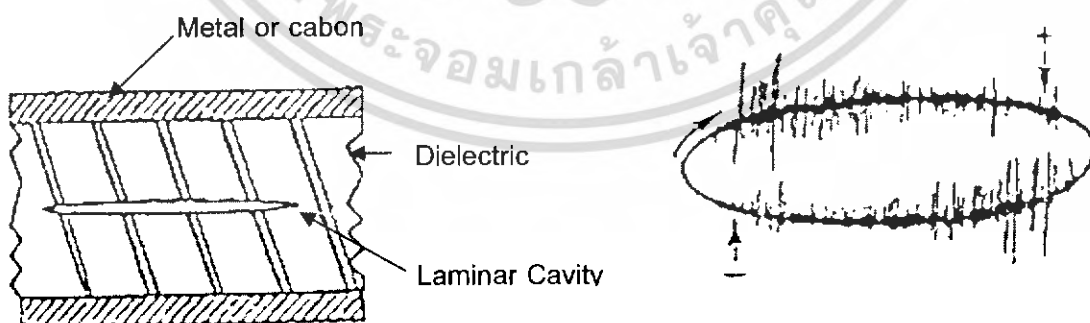
ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

### รูปที่ 2.16 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปไซน์

ค่าของการดิสชาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรอยแตกด้วย ถ้าหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิสชาร์จก็จะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลา  $\approx 30$  นาที ขนาดของการดิสชาร์จจะค่อยๆ ลดลง

2.7.3) การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants) ภายในไดอิเล็กตริก เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) จะหมายถึงเศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และดกค้ำจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminant) จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผลต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย



ก) เศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก

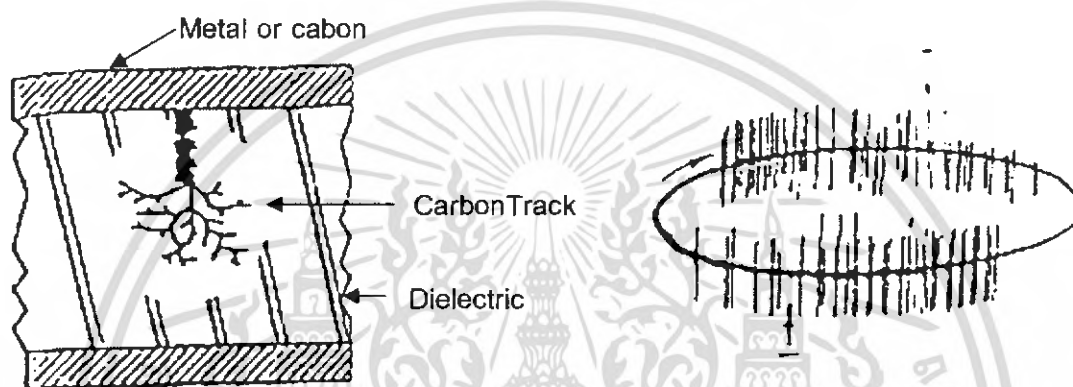
ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

### รูปที่ 2.17 การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดิสชาร์จชนิดนี้เกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุดคล้ายกับชนิดที่ 2 แต่จะเกิดหลังค่าแรงดันสูงสุดไปเล็กน้อยจะมีการดิสชาร์จเพิ่มมากขึ้น จะเกิดทั้งไขเคลือบและลบของแรงดันรูปไซน์ โดยก่อนที่จะมาถึงค่าแรงดันสูงสุดขนาดของการดิสชาร์จจะน้อยกว่าหวัค่าแรงดันสูงสุด

2.7.4) การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track) การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น เอทีสึนครอสลิงค์โพลีเอทีสึน และพอลิเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก



ก) คาร์บอนแทรคภายในไดอิเล็กตริก

ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลาดูรูปวงรี

**รูปที่ 2.18** การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุดขนาดของการดิสชาร์จจะมีปริมาณมาก ทั้งไขเคลือบและลบของแรงดันรูปไซน์ ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทรค โดยทั่วไปการเกิดดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการดิสชาร์จ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลาจะมีผลต่อการขยายตัวของรอยแตก และขนาดของการดิสชาร์จ ที่แรงดันสูงมากๆจะทำให้ขนาดของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ขนาดของการดิสชาร์จจะไม่คงที่ การทดสอบที่ซ้ำๆ จะทำให้ขนาดของคาร์บอนแทรคขยายตัวใหญ่ขึ้น จากการจำแนกชนิดของการดิสชาร์จบางส่วน จากความบกพร่องของไดอิเล็กตริกในสายเคเบิล สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุมาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจำพบว่าการแสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วนจะประกอบไปด้วยสาเหตุหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วรวมกัน ทั้งสัญญาณรบกวนจากภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน (Filter) เหล่านี้ออก เพื่อที่จะแสดงขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาบไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.19 (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอย่างสม่ำเสมอในฉนวนระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเบรกดาวนในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่าคาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

1) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออกกับฉนวน ( $C_1$ )

2) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ ( $C_0$ )

ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับแรงดันระหว่างฉนวนกันชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

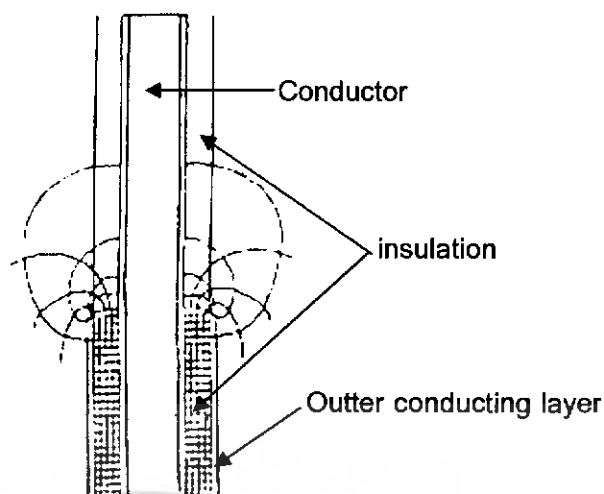
$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $U_a$  คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวนระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก  
 $C_1$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออกกับฉนวน  
 $C_0$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ  
 $E_d$  คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



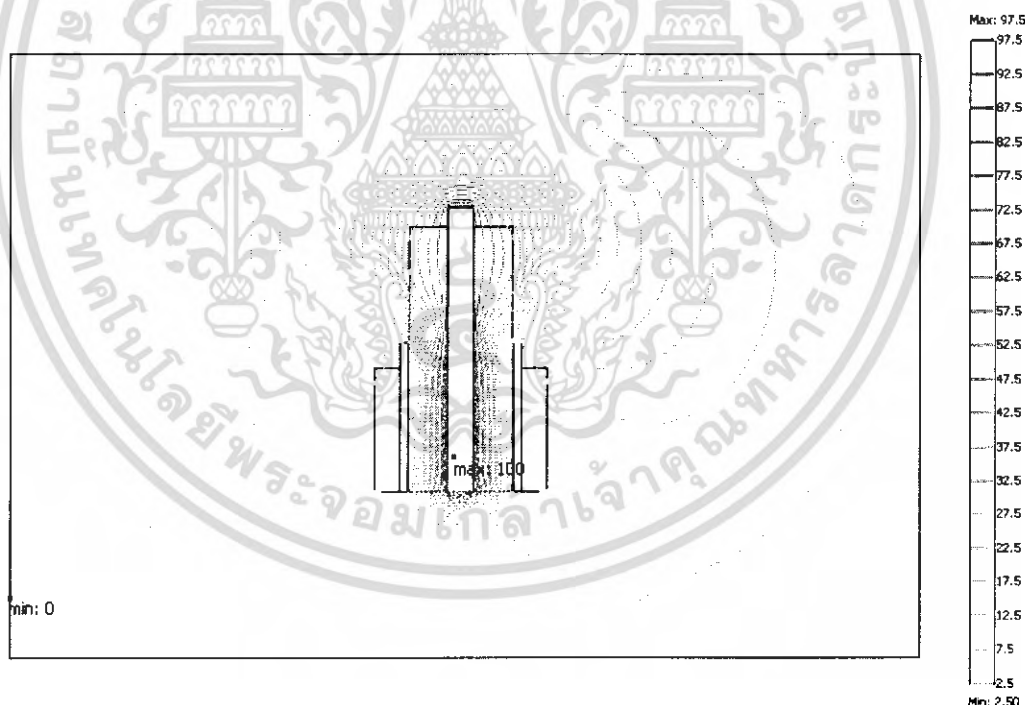
รูปที่ 2.19 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.20** สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข

ถ้ารอบๆ สายเคเบิลเป็นอากาศค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $C_0$  จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวมีค่าต่ำ ทำให้เบรกดาวนี้ได้ง่าย ในการควบจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1/C_0$  มีค่ามาก



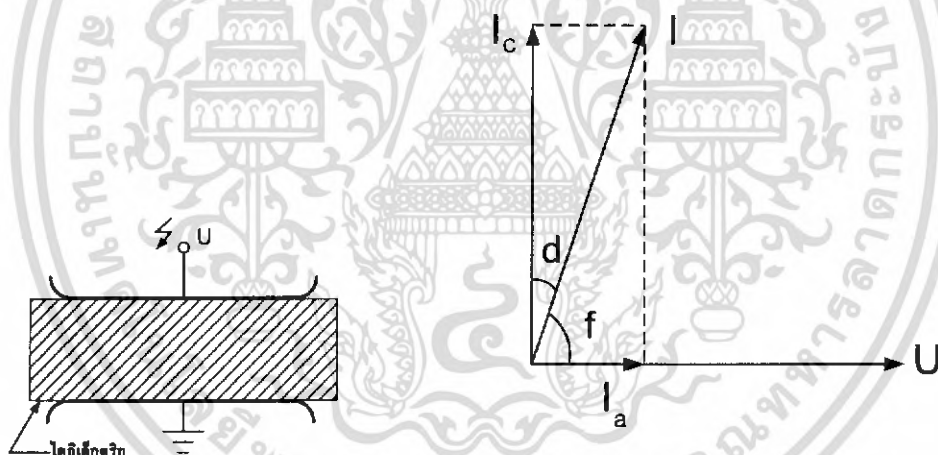
**รูปที่ 2.21** สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 กำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริก[8]

กำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริกเกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อแรงดันไฟฟ้าเข้าไป และจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นในฉนวน ฉนวนส่วนมากจะนำความร้อนได้ไม่ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกไปได้ยาก และเมื่อกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน ก็ยังอยู่ในสภาพสมดุลไม่เกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปไม่ทัน ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดการเบรกดาวนี้ได้ ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบ หรือวัดค่ากำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริก

2.9.1 วงจรสมมูลของไดโอดีเล็กตริก ไดโอดีเล็กตริกหรือฉนวนใดๆ เมื่อวางคั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดที่มีความต่างศักย์ หรืออยู่ในสนามไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 2.22ก) ไดโอดีเล็กตริกหรือฉนวนนั้น จะมีลักษณะสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ  $C$  ซึ่งสามารถเก็บพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปไดโอดีเล็กตริกหรือฉนวน จะมีคุณสมบัติไม่เป็นตัวเก็บประจุบริสุทธิ์แต่จะมีกำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริกเกิดขึ้นในฉนวน กระแสที่ไหลผ่านไดโอดีเล็กตริกนั้นไม่เป็นกระแสประจุบริสุทธิ์ คือ นำหน้าแรงดันน้อยกว่า  $90$  องศาเท่ากับมุม  $\delta$  ดังในรูปที่ 2.22ข) ค่า  $\tan \delta$  นี้เรียกว่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริก ซึ่งถือเป็นลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของฉนวน



ก) ไดโอดีเล็กตริกคั่นระหว่างอิเล็กโตรด

ข) เฟสเซอร์ไดโอดีเล็กตริก

### รูปที่ 2.22 กระแสไหลผ่านไดโอดีเล็กตริก

จากรูปที่ 2.22 ข) จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดีเล็กตริกส่วนหนึ่งจะทับกับแรงดันที่ป้อน  $U$  คือ  $I_a$  ทำให้กระแสที่ป้อนให้กับไดโอดีเล็กตริก  $I$  มีค่ามากกว่าค่ากระแสประจุ  $I_c$  แสดงว่ามีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในไดโอดีเล็กตริกนั้นกำลังไฟฟ้างกล่าวถือเป็นกำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริกดังนั้นไดโอดีเล็กตริกใดๆ สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ที่ประกอบด้วยความต้านทาน  $R$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดโอดีเล็กตริก และองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

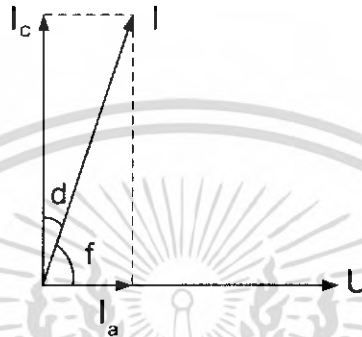


$$u = U_m \sin \omega t \quad (2.37)$$

$$i = \omega C U_m \cos \omega t$$

$$I = \omega C U$$

ความเป็นจริงกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุ จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.24 เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้นแฟคเตอร์กำลัง =  $\cos \phi$  หรืออีกทางหนึ่ง =  $\sin \delta$



รูปที่ 2.24 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบูรณ์ คือ

$$P_d = UI \cos \phi$$

$$= UI \sin \delta$$

เมื่อ  $U$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

แต่  $\delta = 90^\circ - \phi$  เป็นมุมเล็กๆ

ฉะนั้น

$$\sin \delta = \text{tg} \delta$$

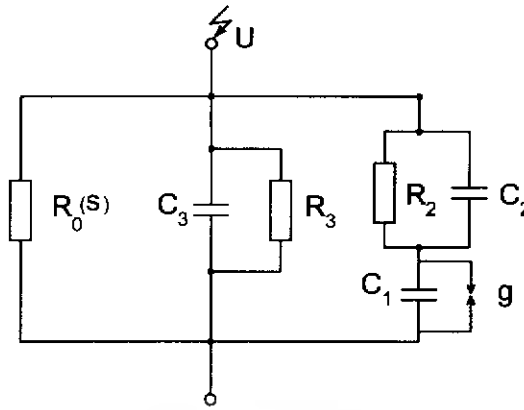
$$\text{tg} \delta = \text{แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก}$$

ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริกมีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกแบ่งได้ 3 รูปแบบ

- 1) กำลังสูญเสียจากสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  (conduction loss)
- 2) กำลังสูญเสียจากโพลาไรเซชัน (polarization loss)
- 3) กำลังสูญเสียจากไอออไนเซชัน (ionization loss) ในลักษณะของดีสชาร์จ

บางส่วน

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เวลา และคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเอง กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกทั้ง 3 แบบ ดังกล่าวข้างต้น อาจเขียนแทนด้วยวงจรมุมลในรูปที่ 2.25



**รูปที่ 2.25** วงจรสมมูลของไดโวลีเกดริกที่แทนกำลังสูญเสียไดโวลีเกดริก เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โพลาริเซชันและ ดิสซาร์จบางส่วน

ในรูป 2.25 เป็นวงจรสมมูลของไดโวลีเกดริกที่แทนกำลังสูญเสียไดโวลีเกดริก คือ  $R_0(\sigma)$  แทนกำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  $C_3$  จะแทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของไดโวลีเกดริกและ  $R_3$  จะแทนกำลังสูญเสียไดโวลีเกดริกเนื่องจากโพลาริเซชัน ส่วน  $C_1, C_2$  และสปาร์กแก๊ป  $g$  แทนวงจรสมมูลของดิสซาร์จบางส่วน  $R_2$  แทนกำลังสูญเสียในฉนวนเนื่องจากดิสซาร์จบางส่วน  $PD$

2.9.3 การคำนวณกำลังสูญเสียไดโวลีเกดริก กำลังสูญเสียไดโวลีเกดริกที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันที่ป้อน มีดังต่อไปนี้

2.9.3.1 กำลังสูญเสียไดโวลีเกดริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสดร่ง ในสนามไฟฟ้าคงตัว  $E$  ที่มีแรงดันกระแสดร่ง  $U$  ค่าความหนาแน่นของกระแส  $J$  อาจคำนวณโดยอาศัยกฎของโอห์มจากค่าสภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ  $\sigma$  และความต้านทาน  $R_0$  ได้คือ

$$P = U^2 / R_0 \quad (2.38)$$

$$J = \sigma E \quad (2.39)$$

กำลังสูญเสียไดโวลีเกดริกต่อปริมาตรจะหาได้จากสูตร

$$P'_0 = EJ = \sigma E^2 \quad (2.40)$$

สภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  ของระบบการฉนวน ซึ่งประกอบด้วยของเหลว ของแข็ง จะเป็นผลมาจากไอออน สภาพนำไฟฟ้าของ  $\sigma$  จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณ ความชื้น ค่าความต้านทานกระแสรั่วไหล  $R_0(\sigma)$  ของฉนวน อาจหาได้โดยการวัดค่ากระแส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ ผลของการวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย ฉะนั้นควรวัดค่าที่ 1 นาที หลังจากสับสวิทช์แล้ว ค่าสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  อาจคำนวณได้จากความต้านทานที่วัดได้จากค่าความต้านทานที่วัดได้ แรงดันที่ใช้ในการวัดปกติจะมีค่า 100 โวลต์ หรือ 1000 โวลต์

2.9.3.2 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสสลับ ในกรณีของแรงดันกระแสสลับที่มีความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอาจจะได้จากความสัมพันธ์

$$\bar{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (2.41)$$

ในฉนวนนอกจากกำลังสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า แล้วยังมีกำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน และไอออไนเซชัน ฉะนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีใช้แต่ค่าจริงอย่างเดียว หากแต่มีค่าจินตภาพด้วยค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย  $\text{tg}\delta$  ของฉนวนซึ่งมีนิยามคืออัตราส่วนค่ากระแสกำลัง  $I_d$  ต่อค่ากระแสประจุ  $I_c$  นั่นคือจากรูปที่ 2.24 จะได้

$$\text{tg}\delta = \frac{I_d}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2.42)$$

ซึ่งกำลังสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามที่กล่าว คือ

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \quad (2.43)$$

เมื่อ  $P_d$  คือ กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก  
 $P_\sigma$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน  
 $P_p$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากไอออไนเซชัน  
 ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันเป็น

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \quad (2.44)$$

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_\sigma + \text{tg}\delta_p + \text{tg}\delta_i \quad (2.45)$$

$\delta$  เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไดอิเล็กตริก เป็นกระแสประจุกับกระแสกำลังที่ค่ามุมเล็กๆ จะได้  $\text{tg}\sigma$  เท่ากับแฟคเตอร์  $\cos\phi$   
 ฉะนั้น กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = P_b \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (2.46)$$

โดยที่  $P_b = UI = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

ถ้าคิดเป็นกำลังสูญเสียต่อปริมาตรของฉนวนจะได้

$$P'_d = \omega \epsilon_0 \epsilon' E^2 \operatorname{tg} \delta \quad (2.47)$$

เมื่อ  $P'_d$  คือ กำลังสูญเสียต่อปริมาตร

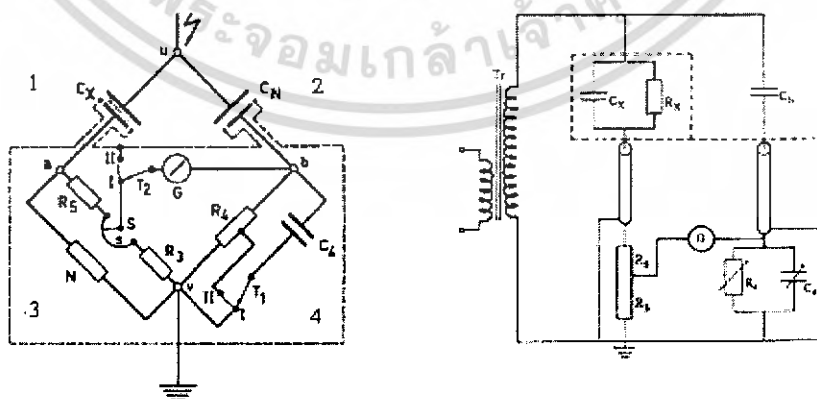
$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

ถ้า  $C$  คือ ค่าเก็บประจุไฟฟ้าเป็น  $F$  และ  $U$  คือค่าแรงดันที่ป้อนเป็น  $V$

จะได้  $P_d$  คือ ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็น  $W$

2.9.4 การวัดค่าเก็บประจุ  $C$  และแฟกเตอร์  $\operatorname{tg} \delta$  กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนที่หาได้จากสมการ  $P_d = C U^2 \operatorname{tg} \delta$  โดยการวัดค่า  $\operatorname{tg} \delta$  และค่าเก็บประจุ  $C$  วิธีวัดค่าทั้งสองนี้โดยทั่วไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัดดีมิเตอร์ และวิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง  $10^6$  Hz บริดจ์ที่นิยมใช้กันคือ Schering bridge และ Glynne bride (transformer ratio arm bridge) ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz

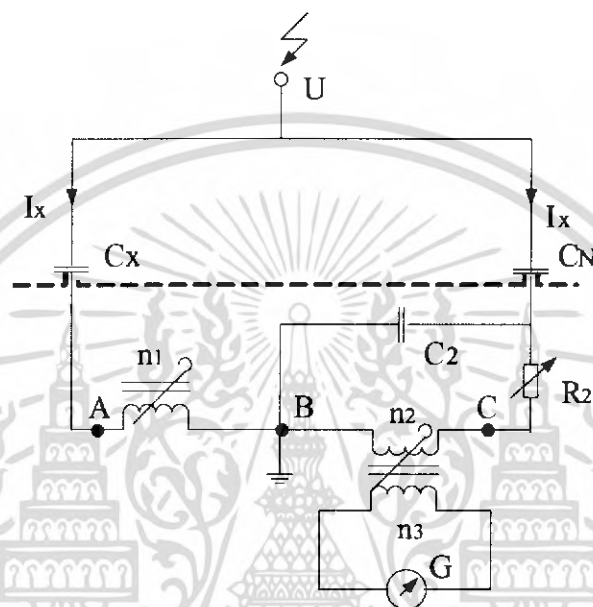
2.9.4.1 Schering bridge เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าเก็บประจุและแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก  $\operatorname{tg} \delta$  ของตัวเก็บประจุ โดยการเปรียบเทียบกับค่าเก็บประจุมาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัดความดัน (Compressed Gas Standard Capacitor) มีกำลังสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงาน หรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจร Schering bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4.2 Glynne bridge คือ บริดจ์ที่โดยทั่วไปเรียกว่า Transformer ratio arm bridge เพื่อให้ง่ายต่อการเรียกชื่อ จึงขอใช้เรียกว่า Glynne bridge เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้พัฒนาบริดจ์นี้ขึ้นซึ่ง Schwab ได้อธิบายไว้ถึง Glynne bridge นี้ว่าเป็นบริดจ์ที่ใช้อ่าน  $\tan \delta$  ได้โดยตรง มีหลักการใช้การสมดุลของวงจรตามข้อเสนอแนะของ Blumlein ตั้งแต่ปี 1928 และออกแบบสร้างเป็นบริดจ์สมบูรณ์โดย Glynne เมื่อเริ่มแรกออกแบบเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 Glynne bridge

## 2.10 การสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจาก แรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายนอก คือ เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อที่จะดูว่าทนต่อแรงดันเกินเหล่านี้ได้ไหม ความคงทนต่อแรงดันหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอิมพัลส์ของฉนวนมิใช่ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงสุดเท่านั้น หากแต่ยังขึ้นอยู่กับการแปรของแรงดันไปตามเวลาอีกด้วย ฉะนั้น เพื่อความสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดสอบ จึงมีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้น โดยยึดเอารูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์

รูปลักษณะของคลื่นอิมพัลส์อาจกำหนดด้วย

1. ขนาดของแรงดันโดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากออสซิลเลชันใกล้เคียง ยอดรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก

2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน

3. เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด

4. เวลาช่วงหลังคลื่น  $T_2$  หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

2.10.1 ข้อกำหนดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองที่เกิดขึ้นจะมีรูปคลื่นและคาบเวลาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบขึ้นมา คือ มาตรฐาน IEC 60-1

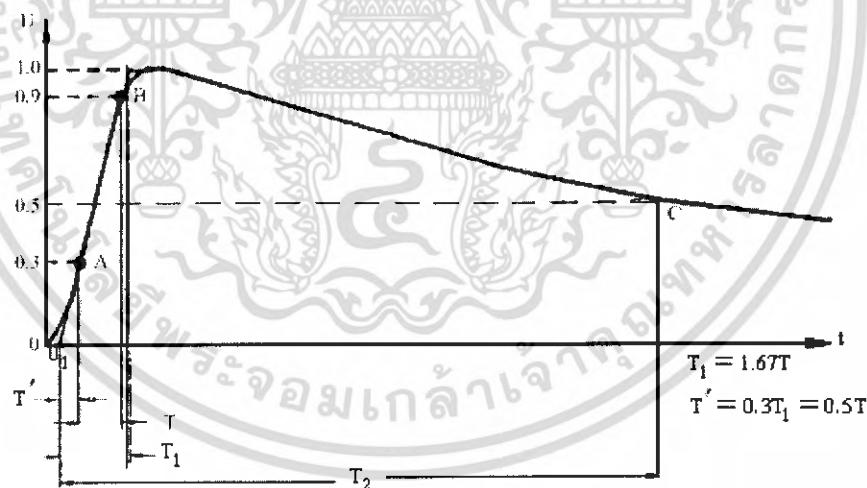
2.10.1.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นเต็ม (Lighting Impulse Full Wave)

$$T_1/T_2 = 1.2 / 50 \quad \mu\text{sec}$$

$$\text{เวลาช่วงหน้าคลื่น } T_1 = 1.2 \quad \mu\text{sec} \quad \pm 30 \%$$

$$\text{เวลาช่วงหลังคลื่น } T_2 = 50 \quad \mu\text{sec} \quad \pm 20 \%$$

$$\text{ค่ายอดแรงดันทดสอบ } U_m \quad \pm 3 \%$$



**รูปที่ 2.28** แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะเต็มคลื่น

จากรูปที่ 2.28 เมื่อ

จุด A คือ จุดที่ 30 % ของค่ายอด

จุด B คือ จุดที่ 90% ของค่ายอดขาขึ้น

จุด C คือ จุดที่ 50% ของค่ายอดขาลง

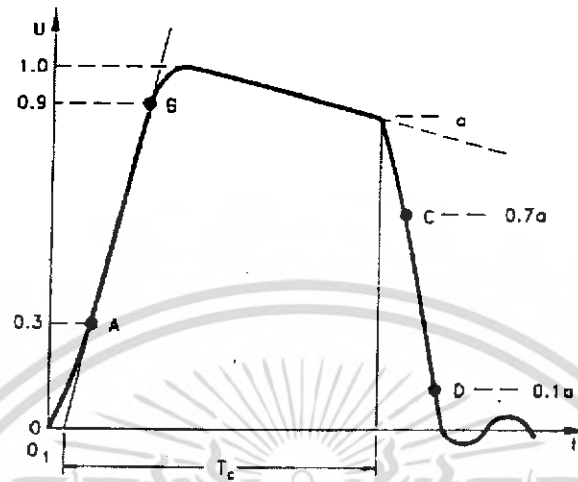
จุด  $O_1$  คือ จุดที่เส้นตรง AB ตัดกับแกน t (จุดเริ่มต้นรูปคลื่นอิมพัลส์)

$T_1$  คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น

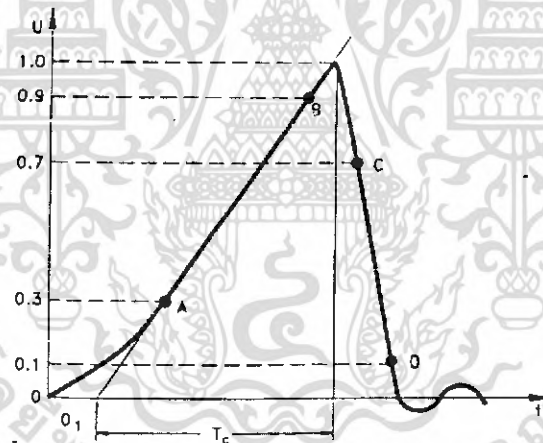
$T_2$  คือ เวลาช่วงหลังคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัด (Lightning Impulse chopped Wave) มีได้ 2 แบบ คือ ลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่นและหลังคลื่นเวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c = 2 - 6 \mu\text{sec}$  (IEC) หรือ  $1 - 3 \mu\text{sec}$  (ANSI)



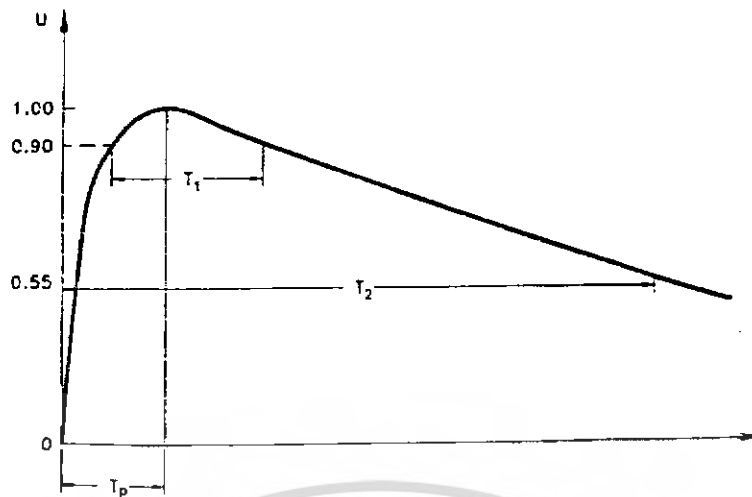
รูปที่ 2.29 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หลังคลื่น



รูปที่ 2.30 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

2.10.1.3 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (Switching Impulse) แรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง ซึ่งแตกต่างไปจากแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าก็คือ ช่วงหน้าคลื่นจะยาวกว่า ความหมายของเวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  จะมีนิยามเหมือนอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าส่วนเวลาช่วงหน้าคลื่นจะกำหนดเป็น  $T_p$  ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาที่นับจากจุดที่แรงดันเริ่มจากศูนย์จริงไปจนถึงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอด รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตชิง โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่น  $250/2500 \mu\text{sec}$  และกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้อยู่ในเกณฑ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

$$T_p = 250 \mu\text{sec} \pm 20 \%$$

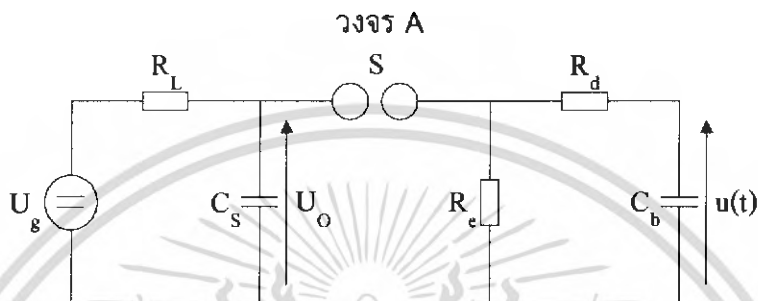
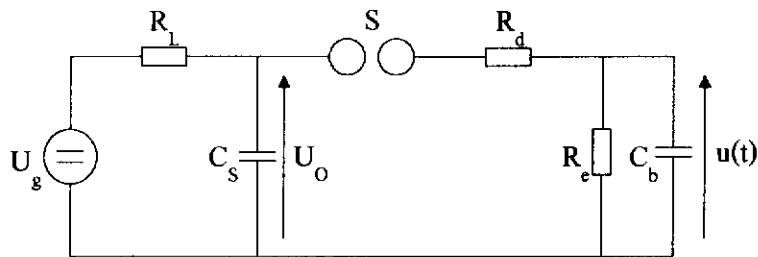
$$T_2 = 2500 \mu\text{sec} \pm 60 \%$$

เวลาช่วงยอดคลื่น  $T_1$  คือ ช่วงเวลาที่ 90% ของหน้าคลื่น

จากรูปที่ 2.28 เป็นลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นเต็ม (Full Wave) หมายถึงรูปคลื่นที่มีลักษณะที่ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอด (Peak) แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าแรงดันเป็นศูนย์ โดยที่แรงดันรูปคลื่นเต็มนี้อาจจะเกิดเป็นรูปคลื่นตัด (Chopped Wave) คือรูปคลื่นที่มีลักษณะของแรงดันลดลงอย่างกะทันหัน ซึ่งช่วงที่แรงดันลดลงอย่างกะทันหันนี้ อาจจะเกิดหลังจากที่แรงดันผ่านช่วงค่ายอดไปแล้วหรือเกิดก่อนที่แรงดันจะถึงค่ายอดก็ได้โดยจะเรียกลักษณะของรูปคลื่นแบบนี้ว่ารูปคลื่นตัดช่วงหลังคลื่น (รูปที่ 2.29) และรูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น (รูปที่ 2.30) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามลักษณะของรูปคลื่นตัดดังกล่าวนี้จะมีข้อกำหนดที่สำคัญคือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped time)  $T_c$  ตามมาตรฐานโดยทั่วไปจะกำหนดเวลาช่วงคลื่นตัด  $T_c$  ให้อยู่ระหว่าง 2 - 6  $\mu\text{sec}$  โดยที่สาเหตุของการเกิดคลื่นตัดนี้อาจมีสาเหตุมาจากการป้อนแรงดันรูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบแล้วการฉนวนของวัสดุทดสอบทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้จึงเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาทไฟตามผิวหรือเกิดเบรกตัวนำผ่านทะลุทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น

2.10.1.4 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แรงดันอิมพัลส์อาจสร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรทรานเซียน RC หรือวงจรทรานเซียน RLC โดยทั่วไปแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้กันมากมักได้จากวงจร RC โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ( $U = \frac{Q}{C}$ ) แล้วปล่อยให้คลายประจุหรือดิสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการได้

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.32 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจร B

**รูปที่ 2.32** วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หนึ่งขั้น วงจร A และ วงจร B  
 ความหมายในรูปวงจร A และ B

- $U_g$  คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- $U_o$  คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- $C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- $C_b$  คือ โหลดตัวเก็บประจุ (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์  
 เครื่องวัดและอื่นๆ)
- $R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- $R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง
- $R_e$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ
- $u(t)$  คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- $S$  คือ สปรັกแกป

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจรคือ แรงดันกระแสตรง  $U_g$  เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์จนกระทั่งได้แรงดันที่ต้องการ  $U_o$  การอัดประจุนี้จะผ่านความต้านทาน  $R_L$  ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า (ปกติ 2-3 วินาที) ค่าแรงดันอัดประจุได้  $U_o$  นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปรັกแกป  $S$  ที่ปรับได้ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ สปรັกแกปนอกจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้วยังทำหน้าที่เหมือนกับสวิตหรือไก (trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปรັกแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า  $100 \mu\text{sec}$  ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กเมื่อกำหนดระยะห่างช่องสปาร์กแกป อาจจะแตกต่างกันไปบ้างแต่ไม่มากนักประมาณน้อยกว่า 1% ถ้าหากอากาศสะอาดปราศจากฝุ่นละอองช่วงระยะเวลาระหว่างการเกิดสปาร์กต่อเนื่องจะถี่หรือห่างขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ  $C_s$  ถ้าปรับ  $U_0$  ให้สูงมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดสปาร์กง่ายหรือสปาร์กถี่ขึ้น เมื่อเกิดสปาร์กที่  $S$  แรงดันอัดประจุ  $U_0$  จะครอบคลุม  $R_d$  และ  $C_b$  ประจุจะถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย  $C_b$  การถ่ายเทหรือปล่อยประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ  $R_d$  และ  $C_b$  นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า  $R_d$  และ  $C_b$  นี้จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  เมื่อถ่ายประจุให้กับ  $C_b$  จนเต็มที่แล้วประจุก็จะดิสชาร์จหรือปล่อยประจุออกไปสู่  $R_e$  จึงกล่าวได้ว่า  $R_e$  ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  คือถ้า  $R_e$  มีค่าสูง  $T_2$  ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย (ค่าคงตัวเวลาคายประจุวงจร A เท่ากับ  $C_s \cdot (R_d + R_e)$  และวงจร B เท่ากับ  $C_s \cdot R_e$ )

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง  $U$  จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ  $U_0$  เพราะประจุจะกระจายให้กับ  $C_s$  และ  $C_b$  ฉะนั้นอัตราส่วนของ  $U$  ต่อ  $U_0$  จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร} \quad \eta = \frac{U}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (2.48)$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูง ๆ ควรเลือกให้  $C_s$  มีค่าสูงกว่าโหลด  $C_b$  มาก ๆ ( $C_s \gg C_b$ )

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดโดย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด  $U_0$  (kV)
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด  $U_0$  (kV)
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด  $C_s$  ( $\mu F$ )
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด  $W_e$  (kJ)
- อัตราการดิสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดันแบบฟ้าผ่าแบบสวิตชิง

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL หรือ SIL ตามมาตรฐานกำหนดตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ซึ่งมีหลักการเลือกและการกำหนดทำนองเดียวกับการกำหนดขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องกำหนด พลังงานของเครื่องกำเนิดขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า  $C_s$  และแรงดันอัดประจุ  $U_0$  ซึ่งคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \\
 &= \frac{1}{2} C_s U_0^2 \times 10^{-9} \text{ kJ} \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

เมื่อ

W คือ พลังงานอัดประจุเป็น kJ  
 C<sub>s</sub> คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็น pF

## 2.11 การเร่งอายุและการประมาณอายุการใช้งานของสายเคเบิล [10]

สำหรับสายเคเบิลที่มีไฟฟ้า ความร้อนและความเค้นทางกลเกิดขึ้นพร้อมกันในสายอันเนื่องมาจากแรงดันหรือกระแสที่สูงๆ ในการเร่งอายุฉนวนของสายเคเบิลภายใต้สภาวะที่เกิดความเค้นซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นฉนวนซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประมาณอายุการใช้งานของสายเคเบิล ในการทดสอบสายเคเบิลจะทำการเร่งอายุด้วยแรงดัน ความถี่ และอุณหภูมิ โดยจะกล่าวโดยสรุปดังต่อไปนี้

การเร่งอายุด้วยแรงดัน

การคายประจุไฟฟ้าบางส่วนและการเกิด treeing สามารถลดอายุการใช้งานของเคเบิล การคายประจุไฟฟ้าบางส่วนทำให้วัสดุเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งเกิดจากสองสาเหตุหลักคือ แรงดันและความถี่ ในการเกิดโพรงและการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนอายุการใช้งานของฉนวน (t) ที่มีผลกระทบจากแรงดัน (v) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ

$$V^n t = D_v \quad (2.50)$$

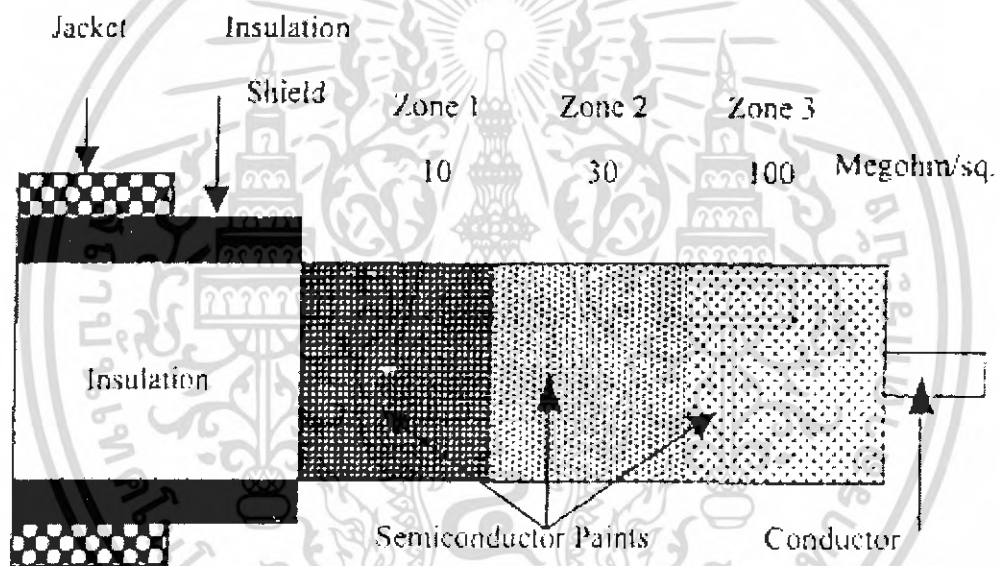
เมื่อ  $D_v$  คือค่าคงที่ และ n คือแฟกเตอร์แรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเป็นฉนวนของวัสดุ วิธีที่ผู้ผลิตใช้ ขนาดของสายและชนิดของแรงดันที่ใช้ สำหรับสายเคเบิลค่า n จะอยู่ระหว่าง 5-25 ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ระดับแรงดันปานกลางค่าที่เหมาะสม n = 9 จากรูปที่ 2.33 แสดงกราฟอายุการใช้งานตามพิภักต์แรงดันของสายเคเบิล 3 เฟส belted type ฉนวน XLPE และ PVC จากสมการที่ 2.50 ใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของสายเคเบิลจากการจ่ายแรงดันเท่านั้น



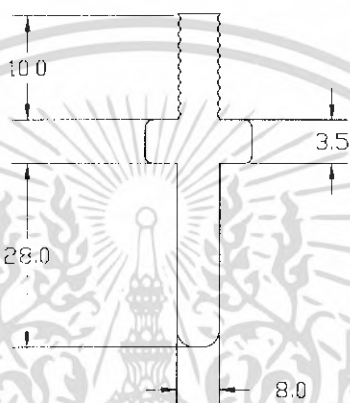
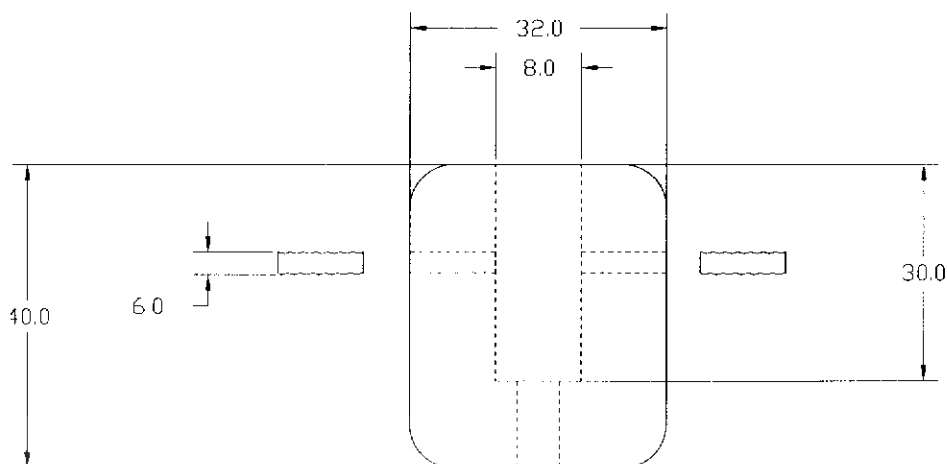
## 2.12 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง [9]

ในการออกแบบได้เลือกใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบชั้นฉนวนที่มีของแข็งที่มีอยู่หลายชั้น โดยออกแบบจากลักษณะของสายเคเบิลสายเคเบิลแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 24 kV ขนาดสาย 35 ตารางมิลลิเมตร จากแนวทางในการทำงานปริญญาโทครั้งนี้ ชั้นแรกออกแบบโดยใช้ฉนวนเหลว คือน้ำมันหม้อแปลง เป็นฉนวนบริเวณขั้วต่อสายเคเบิล

2.12.1 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง การออกแบบจะคำนึงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (Conductor) ด้านในคือทองแดงและการฉีกสายซิลต์ของสายเคเบิลออกเพื่อใช้ในการต่อสายกราวด์ โครงสร้างของสายที่ปลอกออกเป็นโซนๆ ในรูปที่ 2.34 โดยทำการออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลที่ใช้หลักการของการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบตัวนำมีขนาดความหนาของการเพิ่มพื้นที่ของทองแดงที่ใช้กึ่งทำขั้วต่อตัวนำสายในรูปที่ 2.35 และ 2.36 ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงกึ่งจากทองแดง



รูปที่ 2.34 ส่วนประกอบของโครงสร้างสายเคเบิล



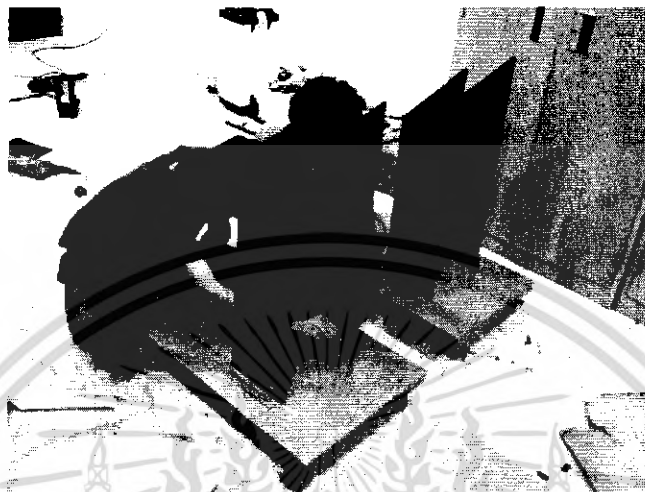
รูปที่ 2.35 แบบตัวนำสายเคเบิล 12/20 KV ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.36 ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงกึ่งจากทองแดง

การออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงในงานวิจัยใช้ขั้วต่อสายเคเบิล  
 ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ทดสอบที่แรงดันใช้งานสายปกติ 12/20(24) KV ตามขนาดสาย  
 เคเบิลดังรูปที่ 2.35 และ 2.36  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ส่วนของฐานรองรับ จะต้องมีการสัมผัสกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงพอดีไม่ก่อให้เกิดเบรคดาวน และในอีกหน้าที่หนึ่งจะต้องเป็นจุดต่อสายเคเบิลในการทดสอบเพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายทดสอบโดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนสายเคเบิลในการทดสอบดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ชุดฐานรองรับท่ออะคลีลิก

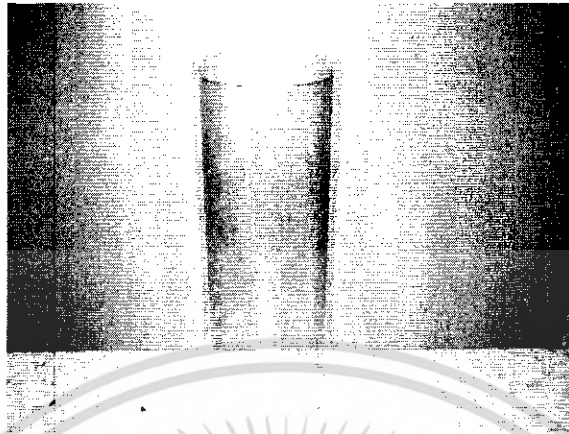
2.12.3 การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลีลิกไซ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออะคลีลิกไซจะขึ้นอยู่กับค่าความคงทนไดอิเล็กตริก โดยจากทฤษฎี (ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ได้ค่าประมาณ 30 -35 kV) ชุดทดลองนี้ใช้สำหรับทดสอบที่มีแรงดัน 42 kV และสายเคเบิลที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.1 เซนติเมตร ดังนั้นระยะห่างที่ปลอดภัย คือ

$$\text{ระยะห่างจากสายเคเบิล} = \frac{\text{ระดับแรงดันทดสอบ}}{\text{แรงดันเบรคดาวนน้ำมันต่อเซนติเมตร}} \times \text{Safety factor} \quad (2.52)$$

$$\text{ระยะห่างจากสายเคเบิล} = \frac{42 \times 10^3}{25 \times 10^3} \times 4 = 6.72 \text{ เซนติเมตร}$$

สายเคเบิลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.1 เซนติเมตร คิดที่รัศมีของสายเคเบิล คือ  $3.1/2 = 1.55$  เซนติเมตร จะได้รัศมีของท่ออะคลีลิกไซ =  $6.72 + 1.55 = 8.27$  เซนติเมตร ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลีลิกไซ =  $8.27 \times 2 = 16.54$  เซนติเมตร พิจารณาเลือกท่ออะคลีลิกไซที่มีขายในท้องตลาดคือ 16 เซนติเมตร โดยที่ท่ออะคลีลิกไซสามารถป้องกันการวาวไฟตามผิวท่อได้ ภายในท่ออะคลีลิกไซจะสามารถบรรจุน้ำมันได้เพื่อใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าเหตุผลที่ต้องใช้ท่ออะคลีลิกไซ เนื่องจากต้องการให้สามารถมองเห็นภายใน และสามารถเห็นฟองอากาศที่เกิดขึ้นตอนใส่สายที่จะทดสอบเพื่อที่จะไล่ฟองอากาศออกให้หมดไปได้ เพราะหากใช้เป็นท่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PVC เพราะหากเกิดการเบรกดาวน์จะไม่สามารถมองเห็นภายในท่อ ท่ออะคลีลิกใสแสดงในรูปที่ 2.38



**รูปที่ 2.38** ท่ออะคลีลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร

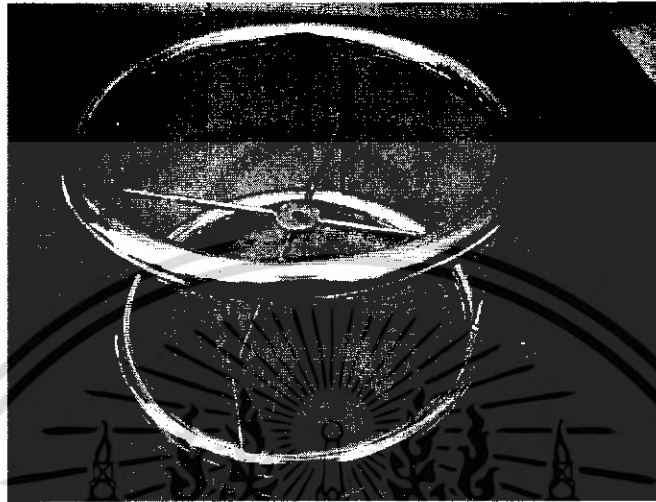
การออกแบบในส่วนปิดท้ายท่ออะคลีลิกใช้สำหรับป้องกันการซึมของน้ำมันหม้อแปลงออกจากชุดทดสอบสายเคเบิลซึ่งกึ่งจากซูปเปอร์ลีน โดยออกแบบจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออะคลีลิกใส แสดงดังรูปที่ 2.39



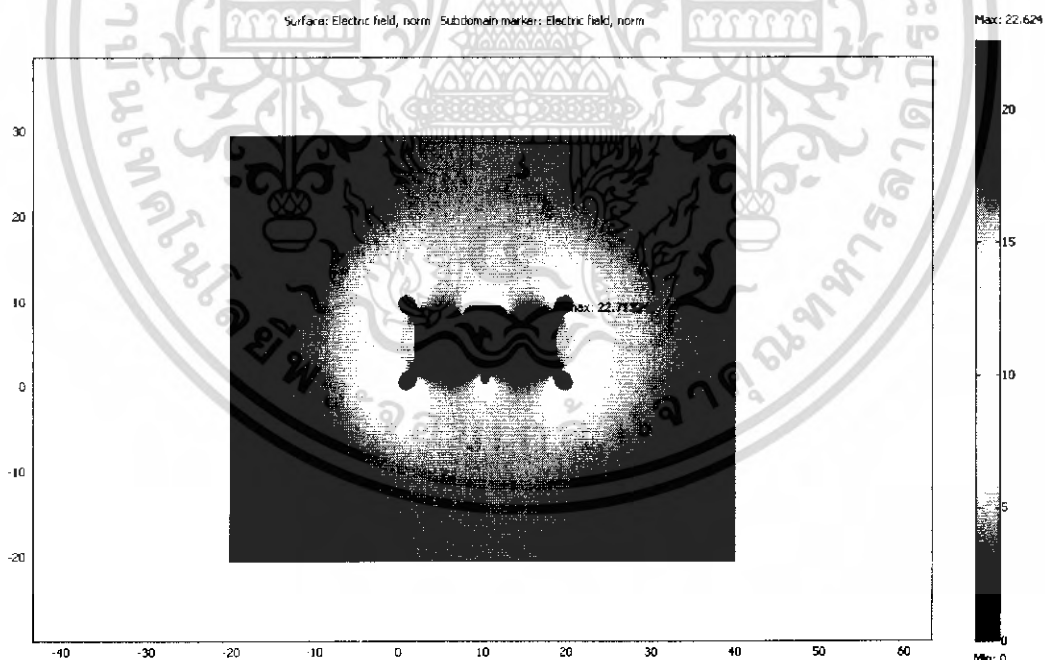
**รูปที่ 2.39** ซูปเปอร์ลีนที่ใช้ยึดติดกับท่ออะคลีลิกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.4 การออกแบบซิลด์ที่ใช้กับชุดหัวต่อสายเคเบิล ใช้ลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัสแรงดันสูงที่ชุดทดสอบให้มีพื้นที่ที่มาก ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง ไม่ก่อให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนเนื่องจากโคโรนาดีสชาร์จหรือดิสชาร์จตามผิว



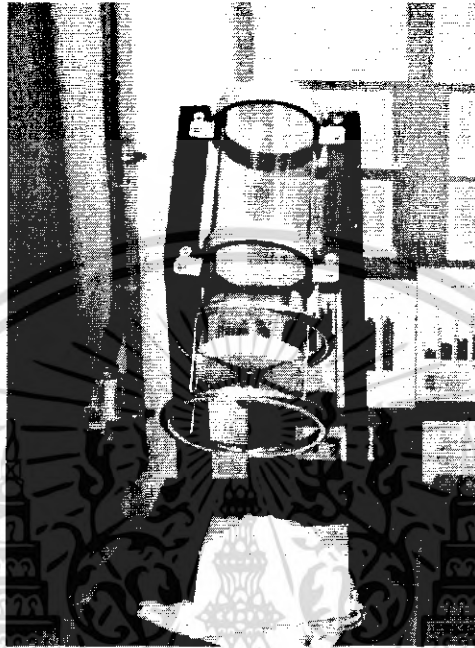
รูปที่ 2.40 ซิลด์ที่ใช้กับชุดหัวต่อสายเคเบิล



รูปที่ 2.41 ผลที่ได้จากโปรแกรม FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์  $E_{\max} = 22.71 \text{ V/m}$  (จ่ายแรงดัน 100 V) มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอสมควร (ซึ่งไม่ใช่ซิลด์ที่ดีที่สุดจากการออกแบบไว้ทั้งหมด 5 แบบ) แต่เหตุผลที่ใช้ซิลด์แบบนี้เพราะงบประมาณมีจำกัดและสามารถทำได้ง่าย สะดวก และสามารถใช้ในการทดสอบสายเคเบิลได้



รูปที่ 2.42 ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### สายเคเบิลใต้ดิน

สายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน เป็นระบบการส่งจ่ายที่ใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว หรือฉนวนก๊าซอัดความดัน เพื่อให้ทนต่อแรงดันได้สูงโดยความหนาของฉนวนไม่ต้องมากนัก สายเคเบิลใต้ดินจะมีข้อแตกต่างจากสายที่ใช้เดินในอากาศ ในด้านการฉนวน คือสายเคเบิลต้องได้รับการฉนวนทางไฟฟ้า (electrical insulation) ที่เพียงพอ เพื่อป้องกันตัวนำสัมผัสกับดิน หรืออุปกรณ์ติดตั้ง นอกจากนี้ยังต้องป้องกันตัวนำจากแรงทางกล ตัวอย่างของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน

#### 3.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน [11]

สายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้งานกับแรงดันต่ำ แรงดันปานกลาง และแรงดันสูง จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยจำนวนชั้น (layers) แตกต่างกัน และแต่ละชั้นก็จะมีหน้าที่พิเศษสำหรับการใช้งานเป็นของตัวเอง ซึ่งสามารถพิจารณาส่วนประกอบในแต่ละชั้นโดยเริ่มต้นจากศูนย์กลางของสายเคเบิลได้

3.1.1 ตัวนำ (conductor) ผลิตจากทองแดงหรืออลูมิเนียม มีหน้าที่ในการนำกระแสโครงสร้างโดยทั่วไปของตัวนำจะมีทั้งสายตัวนำเส้นเดี่ยว สายตัวนำตีเกลียว หรือตัวนำเป็นเชกเมนต์ สำหรับสายเคเบิลหนึ่งเส้นอาจแบ่งเป็นสายเคเบิลตัวนำแกนเดี่ยว (single-core cable) หรือใช้ตัวนำ 3 แกน (three-core cable) ก็ได้ แต่ในทางปฏิบัติของการไฟฟ้านครหลวง จะใช้เฉพาะสายเคเบิลตัวนำผลิตจากทองแดงและเป็นชนิดแกนเดี่ยว เพราะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกระแสได้สูงกว่าอะลูมิเนียม วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำตัวนำมีอยู่ 2 ชนิดคือ ทองแดง และ อะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ทองแดง มีคุณสมบัติคือ

- 1) เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูง
- 2) มีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี
- 3) มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมาก และราคาสูง

อะลูมิเนียม มีคุณสมบัติคือ

- 1) เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงรองจากทองแดง
- 2) มีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าทองแดง
- 3) มีออกไซด์ของอะลูมิเนียมเกาะตามผิวช่วยป้องกันการสึกกร่อน แต่มีข้อเสียคือ ทำการเชื่อมต่อได้ยาก

**ตารางที่ 3.1** เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอะลูมิเนียม

คุณสมบัติ	ทองแดง	อะลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ทองแดง = 100)	100	61
สภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C ( $\Omega\text{m} \times 10^{-8}$ )	1.724	2.803
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (per °C $\times 10^{-6}$ )	17	23
จุดหลอมเหลว (°C)	1083	659
ความนำความร้อน (W/cm °C)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 °C ( $\text{g/cm}^3$ )	8.89	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

**รูปที่ 3.2** ลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลใต้ดิน

ก) ตัวนำแบบวงกลมหลายเส้น

ข) ตัวนำแบบกลมประกอบด้วยส่วนของวงกลมมีรูกลวงใช้กับ

พื้นที่หน้าตัดใด ๆ

3.1.2 ตัวกันตัวนำ (conductor screen) ส่วนประกอบของชั้นนี้ถ้าเป็นสายเคเบิลฉนวนกระดาษ ตัวกันตัวนำจะทำมาจากกระดาษ ส่วนสายเคเบิลฉนวนด้วยครอสลิงก์โพลีเอทิลีน (XLPE) ตัวกันตัวนำจะทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์นำกระแส (conductive polymer material) ซึ่งจัดได้ว่าเป็น สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ชั้นตัวกันตัวนำนี้จะเคลือบบนผิวนอกของตัวนำโดยตรงเพื่อทำให้ผิวนอกของตัวนำมีความเรียบและไม่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นนอกสุดของลวดทองแดงตีเกลียวที่ใช้เป็นตัวนำ เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการแตกตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศในช่องว่างดังกล่าวเมื่อสายเคเบิลได้รับแรงดันสูง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ตัวนำได้รับความเสียหายได้ ดังนั้นสายที่นำมาใช้กับแรงดันมากกว่า 2 kV จึงต้องมีชั้นตัวกันตัวนำ

3.1.3 ฉนวน (insulation) ผลิตจากยาง (rubber) โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride: PVC) ครอสลิงก์โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนหรือกระดาษชุบน้ำมันซึ่งชั้นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินต้องมีคุณสมบัติทำให้แรงดันตกคร่อมที่ผิวนอกของฉนวนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่สุดคือวัสดุที่ใช้ทำฉนวนต้องเป็นสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และต้องปราศจากสารเจือปน (impurities) เพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) และการเจาะทะลุ (puncturing) ซึ่งเป็นสาเหตุให้สายเคเบิลใต้ดินได้รับความเสียหาย

ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน ความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายเคเบิล ดังนั้นในการเลือกใช้ชนิดของฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง

วัสดุที่นิยมใช้ทำฉนวนสายเคเบิลในปัจจุบัน คือ โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ครอสลิงก์โพลีเอทิลีน (cross-linked polyethylene, XLPE) มีคุณสมบัติเปรียบเทียบดังตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.2** คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

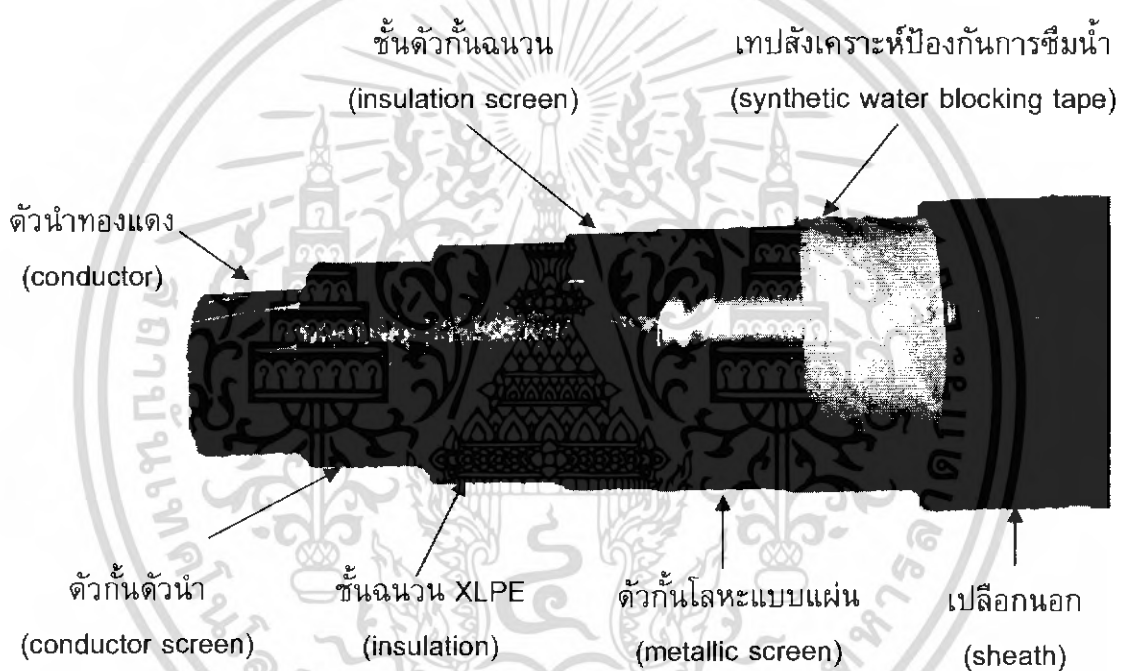
คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน ( $^{\circ}\text{C}$ )	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร ( $^{\circ}\text{C}$ )	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.4	0.92
ความนำความร้อน ( $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	2.5	3

3.1.4 ตัวกันฉนวน (insulation screen) ทำหน้าที่ช่วยกระจายสนามไฟฟ้าของฉนวน ให้กระจายตัวสม่ำเสมอในแนวรัศมี เป็นการป้องกันการรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อตัวกันฉนวนลงดิน จะช่วยลดอันตราย จากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายของแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน ซึ่งตัวกันฉนวนนี้จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

วัสดุที่ใช้ทำตัวกันฉนวนจะเหมือนกับตัวกันตัวนำ กล่าวคือจะต้องไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างฉนวนและตัวกัน มิฉะนั้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนและการเจาะทะลุ โดยทั่วไปสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับแรงดันต่ำกว่า 5 kV ไม่จำเป็นต้องมีชั้นตัวกันฉนวน

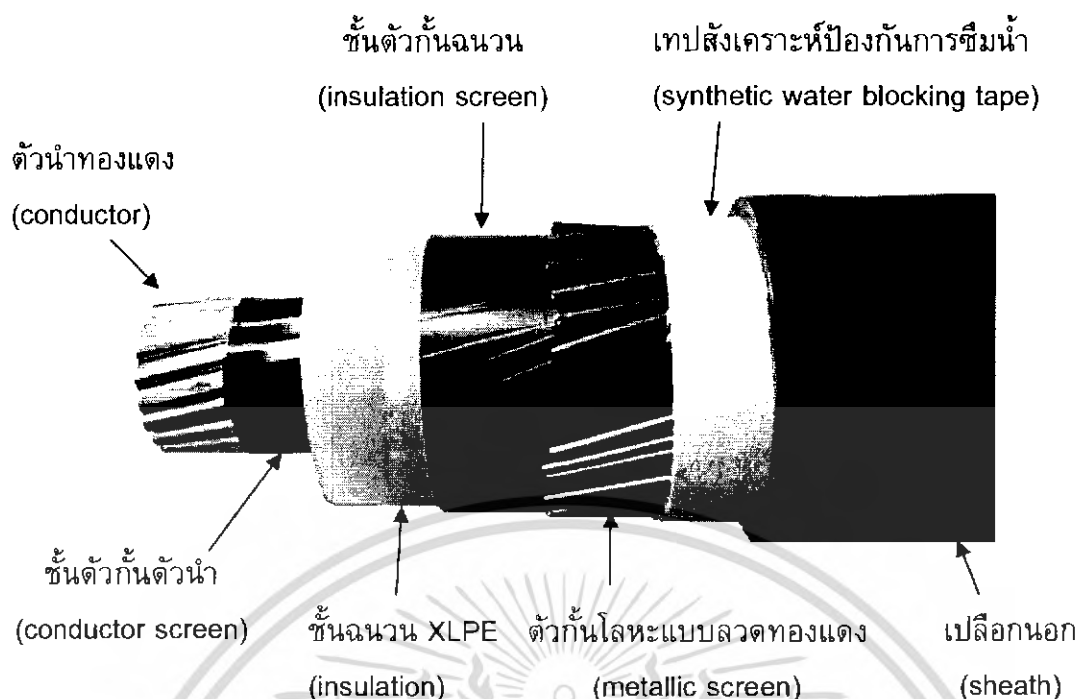
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ตัวกันหรือชีลด์โลหะ (screen or metallic shield) ทำมาจากทองแดง ตะกั่ว หรืออลูมิเนียม ที่นำมาประกอบขึ้นรูปเป็นลวด เเทปหรือปลอกคลุม ชีลด์ของฉนวนนี้จะทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันการรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดิน จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านสำหรับให้กระแสรั่ว (leakage current) ไหลลงดิน และเป็นตัวนำสำหรับกระแสลัดวงจรไหลกลับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นสิ่งที่เพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานสายเคเบิลใต้ดินนั่นเอง โดยปกติสายเคเบิลฉนวนกระดาษจะใช้ชีลด์ในรูปปลอกตะกั่วคลุมตลอดความยาวของสายเคเบิล เพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปในฉนวน สำหรับสายเคเบิลฉนวนด้วยครอสลิงก์โพลีเอทิลีน ส่วนใหญ่ชีลด์จะเป็นลวดทองแดงและพันทับด้วยเทปทองแดง ตัวอย่างของสายเคเบิลที่ใช้ตัวกันโลหะแบบแผ่นและแบบลวดทองแดง แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 สายเคเบิลที่ใช้ตัวกันโลหะแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.4** สายเคเบิลที่ใช้ตัวกันโลหะแบบลวดทองแดง

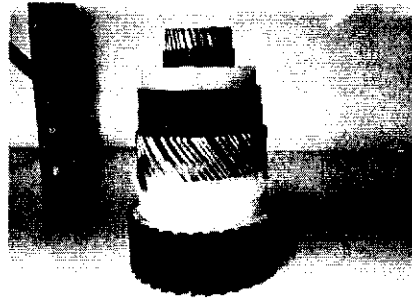
3.1.6 เทปสังเคราะห์ป้องกันการซึมน้ำ (synthetic water blocking type) หมายถึง เทปที่ทำจากสารสังเคราะห์ที่สามารถดูดซึมน้ำไว้ในตัวเทปได้ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำซึมไปในสายเคเบิล และป้องกันไม่ให้ส่วนที่เป็นโลหะทำให้เกิดรอยหรือสัมผัสโดยตรงกับอโลหะ เทปนี้มี 2 สองประเภท คือ ประเภทที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และ ประเภทที่ไม่เป็นสารกึ่งตัวนำ

3.1.7 เปลือกนอก (jacket or sheath) เป็นชั้นนอกสุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความชื้น และการกัดกร่อน (corrosion) โดยจะต้องมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดีและทนต่อความร้อนได้สูง ถ่ายความร้อนได้ดี อีกทั้งทนต่อแรงดึงได้สูง เปลือกนอกของสายเคเบิลจะผลิตจาก PVC หรือโพลีเอทิลีน (PE) สำหรับภายในของเปลือกนอกบางครั้งอาจมีแผ่นอะลูมิเนียมติดอยู่เพื่อทำให้การป้องกันความชื้นมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

3.1.8 เครื่องห่อหุ้ม (armouring) บางครั้งจะใช้เครื่องห่อหุ้มต่อจากชั้นตัวกันหรือชีลด์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความดัน หรือความเครียด (stress) ต่างๆที่มากกระทำต่อฉนวนหรือดัวนำของสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งทำให้สายมีความแข็งแรงขึ้นและป้องกันการกัดทะจากปลวกและหนู

3.1.9 สารบรรจุแน่น (filler) ทำหน้าที่แทรกช่องในการตีเกลียวแกน เพื่อให้สายมีลักษณะกลม และช่วยให้การเรียงของแกนแข็งแรงขึ้นใช้ในกรณีสายเคเบิลมีจำนวนแกนตั้งแต่สองแกนขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องห่อหุ้ม

ก)



สารบรรจุแน่น

ข)

รูปที่ 3.5 ก) เครื่องห่อหุ้ม ข) สารบรรจุแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

#### 4.1 นิยามและคำจำกัดความ [12]

##### 4.1.1 การทดสอบ

1) การทดสอบประจำของสายเคเบิล (routine test on cable) หมายถึง การทดสอบที่กระทำโดยผู้ผลิตบนความยาวของสายเคเบิลที่ผลิตแต่ละเส้น เพื่อตรวจสอบว่าตลอดความยาวของสายเคเบิลทั้งหมดที่ผลิตแต่ละเส้นเป็นไปตามข้อกำหนด

2) การทดสอบตัวอย่างของสายเคเบิล (sample test on cable) หมายถึง การทดสอบที่ทำโดยผู้ผลิตบนตัวอย่างของสายเคเบิลสำเร็จรูปแต่ละตัวอย่าง หรือส่วนประกอบที่ได้มาจากสายเคเบิลสำเร็จรูป เพื่อทวนสอบว่าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเป็นไปตามข้อกำหนด

3) การทดสอบเฉพาะแบบ (type test) หมายถึง การทดสอบก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ออกสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งต้องการการทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวัสดุประกอบของสายเคเบิล หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

4) การทดสอบทางไฟฟ้าหลังจากการติดตั้ง หมายถึง การทดสอบที่แสดงให้เห็นความสมบูรณ์ของสายเคเบิล และอุปกรณ์อื่นๆ เมื่อการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์

##### 4.1.2 ค่าที่เกี่ยวข้องกับมิติ

1) ค่าที่ระบุ (nominal value) หมายถึง ค่าต่างๆที่กำหนดไว้และใช้ในตารางต่างๆ

2) ค่ามัธยฐาน (median value) หมายถึงค่าตรงกลางถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นเลขคู่ หรือค่าเฉลี่ยของค่าตรงกลาง 2 ค่า ถ้าจำนวนทั้งหมดเป็นเลขคู่ เมื่อผลที่ได้จากการทดสอบมีหลายจำนวน และเรียงตามจำนวนจากมากไปหาน้อย หรือน้อยไปหามาก

3) ค่าประมาณ (approximate value) หมายถึง ค่าที่ไม่รับรองหรือตรวจสอบได้ ใช้สำหรับเป็นตัวอย่างในการคำนวณหาค่าที่เกี่ยวข้องกับขนาดต่างๆ

##### 4.1.3 พิกัดแรงดัน [13]

1) แรงดันปกติของระบบ เป็นแรงดันที่วัดได้ระหว่างเฟส-เฟสของระบบที่กำหนดและสัมพันธ์กับการทำงานของระบบ

2) แรงดันสูงสุดของระบบไฟฟ้า 3 เฟส เป็นแรงดันที่วัดได้สูงสุดระหว่าง เฟส-เฟส ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติที่เวลาและจุดต่างๆในระบบ ซึ่งรวมทั้งแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ เช่น แรงดันที่เกิดจากการสวิตช์ของระบบ หรือแรงดันที่เกิดที่เกิดจากสภาวะผิดปกติของระบบ เช่น แรงดันที่เกิดจากการลัดวงจร หรือเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) แรงดันเกินฟ้าผ่า เป็นแรงดันเกินระหว่างเฟส-ดิน หรือเฟส-เฟส ที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากฟ้าผ่าหรือกรณีอื่น โดยสามารถที่จะพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณได้ พิกัดแรงดันโดยทั่วไปของสายเคเบิลจะกำหนดรูปแบบเป็น  $U_0/U$  ( $U_m$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $U_0/U$  และ  $U_m$

พิกัดแรงดันของสายเคเบิลและอุปกรณ์ $U_0/U$ (kV)	แรงดันสูงสุด $U_m$ (kV)
1.8/3 และ 3/3; 1.9/3.3 และ 3.3/3.3	3.6
3.6/6 และ 6/6; 3.8/6.6 และ 6.6/6.6	7.2
6/10 และ 8.7/10; 6.35/11 และ 8.7/11	12
8.7/15	17.5
12/20; 12.7/22	24
18/30; 19/33	36
26/45; 27/47	52
38/66; 40/69	72.5
63.5/110; 66/115	123
76/132; 80/138	145
87/150; 93/161	170
127/220; 133/230	245
159/275; 166/287	300
190/330; 200/345	362
220/380; 230/400	420
290/500	525
405/700; 430/750	765

เมื่อ  $U_0$  คือ แรงดันที่วัดได้ที่ความถี่กำลังระหว่างตัวนำแต่ละตัวกับตัวกันหรือเปลือกของสายเคเบิล

$U$  คือ แรงดันที่วัดได้ที่ความถี่กำลังระหว่างตัวนำสองตัวของสายเคเบิล โดยที่แรงดัน  $U_0$  และ  $U$  มีผลกระทบต่อรูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีของฉนวนของสายเคเบิล

$U_m$  คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้ระหว่างตัวนำของสายเคเบิล โดยที่แรงดันนี้เป็นแรงดันสูงสุดที่สายเคเบิลสามารถทนได้ ภายใต้สภาวะที่เวลาและจุดต่างๆ เป็นปกติ โดยพิกัดแรงดันนี้จะเป็นพิกัดแรงดันที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ที่เป็นผลมาจากสภาวะผิดปกติ หรือเกิดจากการปลดโหลดที่มีขนาดใหญ่ในทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$U_p$  คือ ค่าสูงสุดที่สามารถทนแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ระหว่างตัวนำแต่ละตัวนำกับตัวกันโลหะ

สายเคเบิลที่จะนำมาใช้งาน พิกัดแรงดันไฟฟ้าของสายจะต้องเหมาะสมกับสภาวะการทำงานของระบบ ซึ่งในมาตรฐานจะแบ่งระบบออกเป็น 3 ประเภท

ประเภท A จะประกอบด้วยระบบที่ซึ่งตัวนำเฟสใดๆที่มาต่อกับกราวด์หรือกราวด์ตัวนำไม่ได้ต่อกับระบบภายใน 1 นาที

ประเภท B จะประกอบด้วยระบบที่อยู่ภายใต้สภาวะฟอลต์ ที่เกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆกับเฟสกราวด์ใดๆ ซึ่งในช่วงเวลาในการเกิดฟอลต์นี้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60183 [14] ซึ่งไม่ควรจะเกิน 1 ชั่วโมง สำหรับสายเคเบิลที่ครอบคลุมด้วยมาตรฐานนี้ ช่วงระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นได้แต่ละครั้งที่เกิดฟอลต์ต้องไม่เกิน 8 ชั่วโมง โดยระยะเวลาที่เกิดฟอลต์รวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละปีจะต้องไม่เกิน 125 ชั่วโมง

ประเภท C ประเภทนี้จะประกอบด้วยระบบทั้งหมดที่ซึ่งไม่ตรงกับประเภท A หรือ B ค่าแรงดัน  $U_0$  สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.4 ส่วนประกอบของฉนวนและข้อย่อของฉนวน แสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.2** พิกัดแรงดัน  $U_0$

แรงดันสูงสุดของระบบ ( $U_m$ ) kV	พิกัดแรงดัน ( $U_0$ ) kV	
	ประเภท A และ B	ประเภท C
7.2	3.6	6.0
12.0	6.0	8.7
17.5	8.7	12.0
24.0	12.0	18.0
36.0	18.0	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** ชื่อย่อของฉนวน

องค์ประกอบของฉนวน	ชื่อย่อ
a) thermoplastic polyvinyl chloride ในสายเคเบิลที่พิกัดแรงดัน $U_0/U = 3.6/6$ kV	PVC/B*
b) thermosetting : ethylene propylene rubber หรือ คล้ายคลึงกัน (EPM หรือ EPDM) high modulus หรือ hard grade ethylene propylene rubber cross – linked polyethylene	EPR HEPR XLPE
*องค์ประกอบพื้นฐานของฉนวน polyvinyl chloride ในสายเคเบิลที่พิกัดแรงดัน $U_0/U \leq 1.8/3$ kV จะใช้ชื่อย่อเป็น PVC/A ในมาตรฐาน IEC 60502-1 [15]	

**ตารางที่ 4.4** อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ

องค์ประกอบของฉนวน	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ 8c	
	normal operation	short-circuit (ระยะเวลาสูงสุด 5 วินาที)
polyvinyl chloride (PVC/B)		
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ $\leq 300$ mm <sup>2</sup>	70	160
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ $\geq 300$ mm <sup>2</sup>	70	140
cross - linked polyethylene (XLPE)	90	250
ethylene propylene rubber (EPR และ HEPR)	90	250

อุณหภูมิที่แสดงในตารางที่ 4.4 เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่มีอยู่ในตัวของวัสดุฉนวน ซึ่งมีความสำคัญที่ต้องคำนึงถึงร่วมกับตัวแปรอื่น ในการที่ใช้คำนวณหาพิกัดกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะปกติ กรณีที่สายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง เมื่อทำการจ่ายโหลดต่อเนื่อง (ที่โหลด 100 %) อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำจะแสดงในตารางที่ 4.4 ทำให้ความต้านทานความร้อนของดินรอบ ๆ สายเคเบิลในช่วงเวลานี้เพิ่มขึ้นจากค่าปกติ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดินรอบ ๆ สายเคเบิล สิ่งก็ตามมา คืออาจจะทำให้อุณหภูมิของตัวนำเกินกว่าค่าสูงสุดมาก

4.1.5 ตัวนำ (conductors) ตัวนำต้องเป็นแบบสายตัวนำเดี่ยว หรือสายตัวนำดีเกลียวซึ่งทำมาจากทองแดงบริสุทธิ์ ทองแดงอบนึ่ง อลูมิเนียมบริสุทธิ์ หรืออลูมิเนียมอัลลอยด์ ตามมาตรฐาน IEC 60228 [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวนำจะมีทั้งสายตัวนำเส้นเดียว สายตัวนำตีเกลียว หรือตัวนำเป็นเชกเมนต์ สำหรับสายเคเบิลหนึ่งเส้นอาจแบ่งเป็นสายเคเบิลตัวนำแกนเดียว (single-core cable) หรือใช้ตัวนำ 3 แกน (three-core cable) ก็ได้ แต่ในทางปฏิบัติของการไฟฟ้านครหลวง จะใช้เฉพาะสายเคเบิลตัวนำผลิตจากทองแดงและเป็นชนิดแกนเดียว เพราะสามารถนำกระแสได้สูงกว่าลุ่มิเนียม อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเปลือกที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำตามชนิดของเปลือกที่ใช้

องค์ประกอบของเปลือก	ชื่อย่อ	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำที่สภาวะปกติ 8c
a) thermoplastic:		
polyvinyl chloride (PVC)	ST <sub>1</sub>	80
polyethylene	ST <sub>2</sub>	90
	ST <sub>3</sub>	80
	ST <sub>7</sub>	90
b) elastomeric:		
polychloroprene, chlorosulfonated polyethylene หรือ คล้ายกับ polymers	SE <sub>1</sub>	85

4.1.6 ฉนวน (insulation) ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินสามารถผลิตจากยาง (rubber) โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride: PVC) ครอสลิงก์โพลีเอทีลีน หรือกระดาษชุบน้ำมัน ซึ่งชั้นฉนวนของสายเคเบิลต้องมีคุณสมบัติทำให้แรงดันตกคร่อมที่ผิวนอกของฉนวนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่สุดคือวัสดุที่ใช้ทำฉนวนต้องเป็นสารเนื้อเดียวกัน และต้องปราศจากสารเจือปนเพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วน และการเจาะทะลุ ซึ่งเป็นสาเหตุให้สายเคเบิลได้รับความเสียหาย ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดพลังสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน โดยความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายไฟ การเลือกใช้ชนิดของฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง

วัสดุที่นิยมใช้ทำฉนวนสายเคเบิลในปัจจุบัน คือ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ครอสลิงก์โพลีเอทีลีน (XLPE) มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.6 โดยฉนวนจะเป็นฉนวนแข็งชนิดไอโซชนิดหนึ่งที่ระบุในตารางที่ 4.3 ส่วนความหนาของฉนวนปกติจะระบุในตารางที่ 4.7-4.9 ซึ่งความหนาดังกล่าวจะไม่รวมความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวกันของชั้นตัวนำหรือชั้นฉนวน

**ตารางที่ 4.6** คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE [10]

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

**ตารางที่ 4.7** ความหนาของฉนวน PVC/B

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (mm <sup>2</sup> )	ความหนาของฉนวนที่พิกัดแรงดัน 3.6/6(7.2) kV	
	mm	
10 -1600	3.4	

**ตารางที่ 4.8** ความหนาของฉนวน cross-linked polyethylene (XLPE)

พื้นที่หน้าตัด ของตัวนำ mm <sup>2</sup>	ความหนาของฉนวนที่พิกัดแรงดัน U <sub>0</sub> /U(U <sub>m</sub> )				
	3.6/6(7.2)kV	6/10(12) kV	8.7/15(17.5)kV	12/20(24)kV	18/30(36)kV
	mm	mm	mm	mm	mm
10	2.5	-	-	-	-
16	2.5	3.4	-	-	-
25	2.5	3.4	4.5	-	-
35	2.5	3.4	4.5	5.5	-
50-185	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0
240	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0
300	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0
400	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0
500-1600	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** ความหนาของฉนวน ethylene propylene rubber (EPR) และฉนวน hard ethylene propylene rubber (HEPR)

พื้นที่หน้า ตัดของ ตัวนำ mm <sup>2</sup>	ความหนาของฉนวนที่พิกัดแรงดัน $U_o/U(U_m)$					
	3.6/6(7.2) kV		6/10(12) kV	8.7/15(17.5) kV	12/20(24) kV	18/30(36) kV
	unscreened mm	screened mm	mm	mm	mm	mm
10	3.0	2.5	-	-	-	-
16	3.0	2.5	3.4	-	-	-
25	3.0	2.5	3.4	4.5	-	-
35	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	-
50 -185	3.0	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0
240	3.0	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0
300	3.0	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0
400	3.0	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0
500-	3.2	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0
1600						

4.1.7 ตัวกัน (screening) สายเคเบิลทั่วไปจะมีชั้นโลหะรอบๆแกน ซึ่งจะมีทั้งตัวกันเฉพาะของในสายเคเบิลแกนเดียว กรณีที่สายเคเบิลมี 3 แกน ตัวกันกันจะมีทั้งตัวกันเฉพาะของแต่ละแกน และตัวกันรวม โดยตัวกันของสายเคเบิลจะประกอบไปด้วย ตัวกันตัวนำและตัวกันฉนวน แต่มีข้อยกเว้นดังนี้

1) สายเคเบิลที่พิกัดแรงดัน 3.6/6(7.2) kV ที่มีใช้ EPR และ HEPR เป็นฉนวน อาจจะไม่มิตัวกันโลหะ ถ้าความหนาของฉนวนมีขนาดมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.9

2) สายเคเบิลที่พิกัดแรงดัน 3.6/6(7.2) kV ที่ใช้ PVC เป็นฉนวนจะไม่มิตัวกัน

โลหะ

4.1.7.1 ตัวกันตัวนำ (conductor screen) ชั้นตัวกันตัวนำจะต้องไม่เป็นโลหะ โดยส่วนประกอบจะเป็นสารกึ่งตัวนำอัตรัดหุ้มรอบตัวนำ ตัวกันตัวนำจะทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์นำกระแส (conductive polymer material) ซึ่งจัดได้ว่าเป็น สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สำหรับสายที่นำมาใช้กับแรงดันที่มากกว่า 2 kV จะต้องมีชั้นตัวกันตัวนำ

4.1.7.2 ตัวกันฉนวน (insulation screen) ชั้นตัวกันฉนวนจะต้องไม่เป็นโลหะ สำหรับหน้าที่และวัสดุที่ใช้ทำตัวกันฉนวนจะเหมือนกับชั้นเครื่องป้องกันตัวนำ สำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับแรงดันต่ำกว่า 5 kV ไม่จำเป็นต้องมีชั้นตัวกันฉนวน

4.1.8 ตัวกันโลหะ (metallic screen) ชั้นตัวกันโลหะทำมาจากทองแดง ตะกั่ว หรืออลูมิเนียม ที่นำมาประกอบขึ้นรูปเป็นลวด เทปหรือปลอกคลุมตีเกลียวรอบแกนของสาย ในการเลือกวัสดุจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกัดร่อนและความปลอดภัยทางกล และทางไฟฟ้าด้วย ข้อกำหนดของตัวกันโลหะทั้งทางไฟฟ้า รูปร่าง และช่องว่างต้องเป็นไปตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ

4.1.9 เปลือกนอก (jacket) โดยปกติเปลือกนอกจะเป็นสีดำเป็นชั้นนอกสุดของสาย เปลือกนอกจะผลิตจากเทอร์โมพลาสติก (PVC) โพลีเอทิลีน (PE) หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายโพลีเมอร์ สำหรับภายในของเปลือกนอกบางครั้งอาจมีแผ่นอะลูมิเนียมติดอยู่เพื่อทำให้การป้องกันความชื้นมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ความหนาของเปลือกนอกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$t_r = 0.035D + 1.0 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเมื่อยังไม่หุ้มเปลือกนอกเป็นมิลลิเมตร

## 4.2 กาวและเงื่อนไขการทดสอบ

1) อุณหภูมิโดยรอบ หากมิได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่นในรายละเอียด สำหรับการทดสอบเฉพาะให้ทดสอบที่อุณหภูมิโดยรอบที่ 20±15°C

2) ความถี่และรูปแบบคลื่นแรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่กำลัง ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าทดสอบกระแสสลับต้องอยู่ในช่วง 49 Hz ถึง 61 Hz รูปคลื่นจะต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ ค่าที่ใช้คือค่ารากของกำลังสองเฉลี่ย

3) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทดสอบอิมพัลส์ จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ IEC 60230 [17] กำหนด โดยคลื่นอิมพัลส์จะต้องมีช่วงเวลานำคลื่นระหว่าง 1 ไมโครวินาที ถึง 5 ไมโครวินาที และช่วงเวลาหลังคลื่นระหว่างระหว่าง 40 ไมโครวินาที ถึง 60 ไมโครวินาที ในกรณีอื่นที่เกี่ยวข้องกับคลื่นอิมพัลส์จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060 -1 [18]

## 4.3 การทดสอบ

### 4.3.1 การทดสอบประจำของสายไฟฟ้า (Routine tests)

มาตรฐานการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแบ่งตามระบบแรงดันที่ใช้ดังต่อไปนี้ ระบบแรงดัน 1-3 kV มาตรฐาน IEC 60502-1 [15] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ
- 2) การทดสอบแรงดัน

ระบบแรงดัน 6-30 kV มาตรฐาน IEC 60502-2 [13] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของตัวนำ
- 2) การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน
- 3) การทดสอบแรงดันไฟฟ้า

ระบบแรงดัน 30-150 kV มาตรฐาน IEC 60840 [19] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน
- 2) การทดสอบแรงดัน
- 3) การทดสอบทางไฟฟ้าบนเปลือกนอกของสายเคเบิล

#### 4.3.2 การทดสอบตัวอย่างของสายไฟฟ้า (Sample tests)

ระบบแรงดัน 1-3 kV มาตรฐาน IEC 60502-1 [15] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การตรวจสอบจำนวนตัวนำ
- 2) การตรวจสอบมิติ
- 3) การทดสอบการยึดตัวของฉนวน EPR, HEPR และ XLPE เมื่อได้รับความร้อน

ระบบแรงดัน 6-30 kV มาตรฐาน IEC 60502-2 [13] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การตรวจสอบตัวนำ (Conductor examination)
- 2) การตรวจสอบขนาด (Check of dimensions)
- 3) การวัดความหนาของฉนวนและเปลือกอลูโหะ
- 4) การวัดความหนาของซิลด์ตะกั่ว
- 5) การวัดเครื่องหุ้มสายและเทป
- 6) การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
- 7) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าของสายที่พิกัดแรงดันที่สูงกว่า 3.6/6 (7.2) kV
- 8) การทดสอบการยึดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อนสำหรับฉนวนที่เป็น EPR, HEPR และ XLPE และ เปลือก elastomeric

ระบบแรงดัน 30-150 kV มาตรฐาน IEC 60840 [19] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การวัดจำนวนตัวนำ
- 2) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำและตัวกันโลหะ
- 3) การวัดความหนาของฉนวนและเปลือก
- 4) การวัดความหนาของตัวกันโลหะ
- 5) การตรวจสอบมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) การทดสอบการยึดตัวของฉนวน EPR, HEPR และ XLPE เมื่อได้รับความร้อน
- 7) การทดสอบความจุไฟฟ้า
- 8) การวัดค่าความหนาแน่นของฉนวน HDPE
- 9) การทดสอบการซึมของน้ำ
- 10) การทดสอบแผ่นฟอล์ยตามแนวแกนยาวของสายเคเบิล

#### 4.3.3 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของสาย (type tests)

ระบบแรงดัน 1-3 kV มาตรฐาน IEC 60502-1 [15] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

##### การทดสอบทางไฟฟ้า

- 1) การวัดค่าความต้านทานของฉนวนที่อุณหภูมิปกติ
- 2) การวัดค่าความต้านทานของฉนวนที่อุณหภูมิตัวนำสูงสุด
- 3) การทดสอบแรงดัน 4 ชั่วโมง

##### การทดสอบทางฟิลิกส์

- 1) การวัดความหนาของฉนวน
- 2) การวัดความหนาของเปลือกกอลโหะ
- 3) การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของฉนวนทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 4) การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของเปลือกกอลโหะทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 5) การทดสอบการเร่งใช้งานสายเคเบิล
- 6) การทดสอบการสูญเสียมวลของเปลือก PVC ชนิด ST<sub>2</sub>
- 7) การทดสอบความดันของฉนวนและเปลือกกอลโหะที่อุณหภูมิสูง
- 8) การทดสอบฉนวน PVC และเปลือกกอลโหะที่อุณหภูมิต่ำ
- 9) การทดสอบความทนต่อ heat shock ของฉนวน PVC และเปลือกหุ้ม
- 10) การทดสอบความต้านทานชั้นบรรยากาศของฉนวน EPR และ HEPR
- 11) การทดสอบการทนความร้อนของฉนวน EPR, HEPR และ XLPE และชั้นเปลือกนอก
- 12) การทดสอบการแช่น้ำมันของชั้น Elastomeric
- 13) การทดสอบการซีมน้ำของฉนวน
- 14) การทดสอบการลุกลามของไฟบนสายเคเบิลเดี่ยว
- 15) การทดสอบปริมาณคาร์บอนแบล็กในเปลือกพอลิเอทิลีน
- 16) การทดสอบการหดตัวของฉนวนครอสลิงด์พอลิเอทิลีน
- 17) การทดสอบความโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 18) การหาค่าความแข็งของฉนวน HEPR
- 19) การทดสอบเพื่อหาค่าความยืดหยุ่นตัวของฉนวน HEPR
- 20) การทดสอบการหดตัวของเปลือกพอลิเอทิลีน
- 21) การทดสอบทางกลของเปลือก halogen free
- 22) การทดสอบการซึมของน้ำ

ระบบแรงดัน 6-30 kV มาตรฐาน IEC 60502-2 [13] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

#### การทดสอบทางไฟฟ้า

- 1) การทดสอบความโค้งงอแล้วทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน
- 2) การทดสอบวัดค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 3) การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าในวัฏจักรการให้ความร้อนแล้วทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน
- 4) การทดสอบแรงดันอิมพัลส์แล้วทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้า
- 5) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### การทดสอบทางฟิสิกส์

- 1) การวัดความหนาของฉนวน
- 2) การวัดความหนาของเปลือกโลหะ
- 3) การทดสอบเพื่อหาคคุณสมบัติทางกลของฉนวนทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 4) การทดสอบเพื่อหาคคุณสมบัติทางกลของเปลือกโลหะทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 5) การทดสอบการเร่งใช้งานสายเคเบิล
- 6) การทดสอบการสูญเสียมวลของเปลือก PVC ชนิด ST<sub>2</sub>
- 7) การทดสอบความดันของฉนวนและเปลือกโลหะที่อุณหภูมิสูง
- 8) การทดสอบฉนวน PVC และเปลือกโลหะที่อุณหภูมิต่ำ
- 9) การทดสอบความทนต่อ heat shock ของฉนวน PVC และเปลือกหุ้ม
- 10) การทดสอบความต้านทานชั้นบรรยากาศของฉนวน EPR และ HEPR
- 11) การทดสอบการทนความร้อนของฉนวน EPR, HEPR และ XLPE และชั้นเปลือกนอก
- 12) การทดสอบการแช่น้ำมันของชั้น Elastomeric
- 13) การทดสอบการซึมน้ำของฉนวน
- 14) การทดสอบการลุกลามของไฟบนสายเคเบิลเดี่ยว
- 15) การทดสอบปริมาณคาร์บอนแบล็คในเปลือกพอลิเอทิลีน
- 16) การทดสอบการหดตัวของฉนวนครอสลิงด์พอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 17) การทดสอบความร้อนคงที่ของฉนวน PVC
- 18) การหาค่าความแข็งของฉนวน HEPR
- 19) การทดสอบเพื่อหาค่าความยืดหยุ่นตัวของฉนวน HEPR
- 20) การทดสอบการหดตัวของเปลือกพอลิเอทิลีน
- 21) การทดสอบลักษณะปกของชั้นตัวกันฉนวน
- 22) การทดสอบการซึมของน้ำ

ระบบแรงดัน 30-150 kV มาตรฐาน IEC 60840 [19] ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

#### การทดสอบทางไฟฟ้า

- 1) การทดสอบความโค้งงอแล้วทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน
- 2) การทดสอบวัดค่าพลังงานสูญเสียเปลวไดอิเล็กตริก
- 3) การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าในวัฏจักรการให้ความร้อน
- 4) การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่อุณหภูมิห้องทดสอบและที่อุณหภูมิสูง
- 5) การทดสอบความทนทานไฟฟ้าหลังจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์

#### การทดสอบทางฟิสิกส์

- 1) การตรวจสอบโครงสร้างของสายเคเบิล
- 2) การทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของฉนวนทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 3) การทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของเปลือกกอลโหะทั้งก่อนและหลังเร่งอายุใช้งาน
- 4) การทดสอบการเร่งอายุใช้งานของสายเคเบิล
- 5) การทดสอบการสูญเสียมวลของเปลือก PVC ชนิด ST<sub>2</sub>
- 6) การทดสอบความดันของฉนวนและเปลือกกอลโหะที่อุณหภูมิสูง
- 7) การทดสอบฉนวน PVC และเปลือกกอลโหะที่อุณหภูมิต่ำ
- 8) การทดสอบความทนต่อ heat shock ของเปลือก PVC
- 9) การทดสอบความต้านทานชั้นบรรยากาศของฉนวน EPR และ HEPR
- 10) การทดสอบการทนความร้อนของฉนวน EPR, HEPR และ XLPE และชั้นเปลือกนอก
- 11) การทดสอบความหนาแน่นของฉนวน HDPE
- 12) การทดสอบปริมาณคาร์บอนแบล็กในเปลือกพอลิเอทิลีน
- 13) การทดสอบการหดตัวของฉนวน PE, HDPE และ XLPE
- 14) การทดสอบการหดตัวของเปลือก PE
- 15) การหาค่าความแข็งของฉนวน HEPR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) การทดสอบเพื่อหาค่าความยืดหยุ่นตัวของฉนวน HEPR
- 17) การทดสอบการทนไฟไหม้
- 18) การทดสอบการซึมน้ำ

#### 4.4 การทดสอบประจำ (routine test)

การทดสอบจะทำโดยผู้ผลิตบนความยาวของสายเคเบิลทดสอบที่ผลิตแต่ละเส้น เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตลอดความยาวของสายเคเบิลทั้งหมดที่ผลิตแต่ละเส้นเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งในส่วนของมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] กำหนดการทดสอบประจำของสายดังกล่าวต่อไปนี้

##### 4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวนำ (electrical resistance of conductors)

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำจะทำการวัดตลอดความยาวตัวนำของสายเคเบิลทดสอบ โดยสายเคเบิลทดสอบสำเร็จรูป หรือตัวอย่างจะต้องอยู่ในห้องทดสอบ โดยจะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่อย่างน้อย 12 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ ในกรณีที่ไม่แน่ใจว่าอุณหภูมิตัวนำของสายเคเบิลที่จะทำการทดสอบจะเหมือนกันกับห้องทดสอบ การวัดค่าความต้านทานจะทำการวัดหลังจากที่นำสายเคเบิลทดสอบไว้ในห้องทดสอบ 24 ชั่วโมง หรืออาจจะทำการวัดค่าความต้านทานของสายเคเบิลทดสอบได้ โดยนำสายเคเบิลทดสอบแช่ในน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างน้อยที่สุด 1 ชั่วโมง

ค่าความต้านทานที่วัดได้จะต้องเป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 8C โดยค่าความต้านทานต่อ 1 กิโลเมตร ที่อุณหภูมิตัวนำ 20 8C สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 กรณีตัวนำทองแดง

$$R_{20} = R_t \frac{254.5}{234.5 + t} \times \frac{1000}{L} \quad (4.2)$$

กรณีตัวนำเป็นอลูมิเนียม

$$R_{20} = R_t \frac{248}{228 + t} \times \frac{1000}{L} \quad (4.3)$$

- เมื่อ  $R_{20}$  คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 8C เป็นโอห์มต่อกิโลเมตร  
 $R_t$  คือ ความต้านทานของสายเคเบิลทดสอบยาว  $L$  เมตร ที่อุณหภูมิ  $t$  องศาเซลเซียส  
 $t$  คือ อุณหภูมิของสายเคเบิลขณะวัดเป็นองศาเซลเซียส  
 $L$  คือ ความยาวของสายเคเบิลทดสอบ เป็นเมตร



#### 4.5. การทดสอบตัวอย่างสาย (sample tests)

เป็นการทดสอบที่ทำโดยผู้ผลิตบนตัวอย่างของสายเคเบิลสำเร็จรูปแต่ละตัวอย่าง หรือส่วนประกอบที่ได้มาจากสายเคเบิลสำเร็จรูป เพื่อทวนสอบว่าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งในส่วนของมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] กำหนดการทดสอบตัวอย่างของสายดังกล่าวต่อไปนี้

##### 4.5.1 การตรวจสอบตัวนำ

เป็นการตรวจนับจำนวนของตัวนำโดยให้พิจารณาตามข้อกำหนดโครงสร้างตัวนำในมาตรฐาน IEC 60228 [16] จะทำการทดสอบด้วยการนับหรือโดยเครื่องมือวัดก็ได้

##### 4.5.2 การตรวจสอบขนาดสาย

###### 1) การวัดความหนาของฉนวนและเปลือก

วิธีการทดสอบต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ในหัวข้อ 8 ของมาตรฐาน IEC 60811-1-1 [21]

การเลือกความยาวของสายเคเบิลแต่ละเส้นสำหรับทดสอบพิจารณา โดยเอาท่อนของปลายสายเคเบิลหลังจากการนั้นจะใช้ไม่ได้ ถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้ส่วนต่างๆที่นำมาจะเกิดความเสียหาย

###### ข้อกำหนดสำหรับฉนวน

ในแต่ละชั้นของแกนขนาดค่าที่น้อยที่สุดที่วัดได้จะต้องไม่ต่ำกว่า 90% ของค่าปกติ โดยต้องมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร

$$t_{\min} \geq 0.9t_n - 0.1 \quad (4.4)$$

และ

$$(t_{\max} - t_{\min}) / t_{\max} \leq 0.15 \quad (4.5)$$

เมื่อ  $t_{\max}$  คือ ค่าความหนาสูงสุด (มิลลิเมตร)

$t_{\min}$  คือ ค่าความหนาต่ำที่สุด (มิลลิเมตร)

$t_n$  คือ ค่าความหนาปกติ (มิลลิเมตร)

###### ข้อกำหนดสำหรับเปลือกนอก

สำหรับสายเคเบิลไม่ได้หุ้มและสายเคเบิลที่มีการหุ้มปกคลุมไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับเนื้อสายลงดินหรือตัวนำแกนร่วมกันค่าที่น้อยที่สุดของเครื่องมือวัดจะไม่น้อยกว่า 85 % ของค่าที่น้อยที่ระบุไว้โดยต้องมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร ดังตัวอย่าง

$$t_{\min} \geq 0.85t_n - 0.1 \quad (4.6)$$

สำหรับเปลือกเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับเหนือที่หุ้มสายลงดินหรือตัวนำแกนร่วมและสำหรับเปลือกที่แยกห่างกันค่าที่น้อยที่สุดของขนาดที่วัดได้ไม่น้อยกว่า 80 % ของค่าที่ระบุไว้ โดยมากกว่า 0.2 มิลลิเมตร ดังตัวอย่าง

$$t_{\min} \geq 0.8t_n - 0.2 \quad (4.7)$$

## 2) การวัดขนาดเปลือกหุ้มสาย

เส้นผ่าศูนย์กลางสายไฟกลมและความหนาสายแบนจะวัดโดยไมโครเตอร์ flat nose to มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 0.1$  mm. สำหรับสายไฟกลมมี 2 ขนาน จะทำการวัดมุมขวาของแต่ละเส้น ที่เหมือนกับการหาตำแหน่งและค่าเฉลี่ยของ 2 ค่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง

## 3) การวัดขนาดเทป

จะวัดด้วยไมโครเตอร์มี 2 flat nose ของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 mm. มีผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 0.01$  mm. สำหรับเทปมากถึง 40 mm. ของความกว้างหนาจะมีการวัดที่ตรงกลางของความกว้างสำหรับความกว้างเทปมีขนาด 20 mm. จากขอบเทปและค่าเฉลี่ยของผลของผลที่วัดได้จากความหนา

### ข้อกำหนด

ขนาดของเปลือกหุ้มสายและเทปจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดต่อไปนี้

- 5 % สำหรับสายกลม
- 8 % สำหรับสายแบน
- 10 % สำหรับเทป

## 4) การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

ถ้าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิลมีการทดสอบตัวอย่าง จะทำตามหัวข้อที่ 8 ของมาตรฐาน IEC 60811-1-1 [21]

### 4.5.3 การทดสอบแรงดันที่เวลา 4 ชั่วโมง

ในการทดสอบนี้สามารถใช้การทดสอบสายเคเบิลที่พิกัดแรงดันสูงกว่า

3.6/6 (7.2) kV

### การสุ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างจะเป็นสายเคเบิลที่สมบูรณ์แล้วยาวอย่างน้อย 5 เมตร

ต้องมีแรงดันที่ความถี่กำลังที่ใช้เป็นเวลา 4 ชม. ที่อุณหภูมิห้องทดสอบระหว่าง

ตัวนำและชั้นโลหะ

แรงดันทดสอบจะมีค่าเท่ากับ  $4U_0$  ค่าของแรงดันทดสอบสำหรับมาตรฐาน

แรงดันจากตารางที่ 4.12

#### ตารางที่ 4.12 แรงดันการทดสอบตัวอย่างสายตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [13]

พิกัดแรงดันของสาย $U_0$ , kV	6	8.7	12	18
แรงดันทดสอบ kV	24	35	48	72

การขึ้นแรงดันทดสอบจะต้องค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงค่าระบุไว้ในตาราง และค้างไว้จนครบเวลา 4 ชม.

##### ข้อกำหนด

จะต้องไม่เกิดเบรกดาวขึ้นในฉนวน

4.5.4 การทดสอบการทนต่อความร้อนของฉนวน EPR, HEPR, XLPE และเปลือกนอก

##### วิธีการทดสอบ

การสุ่มตัวอย่างและวิธีการทดสอบจะต้องทำให้สอดคล้องกับหัวข้อที่ 9 ของมาตรฐาน IEC 60811-2-1 [22] โดยเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในตารางที่ ก.1 และ ก.2

##### ข้อกำหนด

ผลการทดสอบจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในตารางที่ ก.1 สำหรับฉนวน EPR, HEPR และ XLPE และในตารางที่ ก.2 สำหรับเปลือก SE<sub>1</sub>

#### 4.6 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า (type tests)

เป็นการทดสอบก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ออกสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งต้องการการทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวัสดุประกอบของสายเคเบิล หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในส่วนของมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] กำหนดการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของสายดังหัวข้อต่อไปนี้

##### ข้อกำหนดพิเศษในการทดสอบ

1) การวัดค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) ขึ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ อาจจะเป็นคนละชิ้นกับชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในหัวข้อ 4.6.1), 4.6.3), 4.6.4), 4.6.5)

2) ไม่ต้องทำการวัดค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) หากสายเคเบิลที่ทำการทดสอบมีพิกัดแรงดันต่ำกว่า 6/10(12) kV

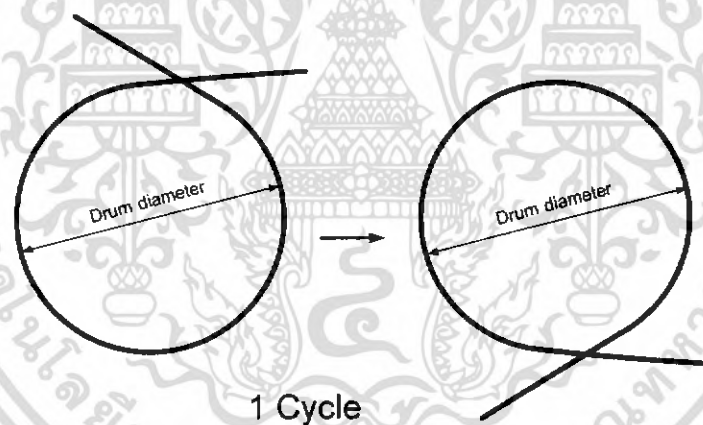
3) การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า 4 ชั่วโมง ในข้อ 4.6.5) อาจจะเป็นชิ้นตัวอย่างใหม่ แต่สายเคเบิลทดสอบจะต้องผ่านกระบวนการทดสอบในข้อ 4.6.1) และ 4.6.3) มาก่อน

#### 4.6.1 การทดสอบความโค้งแล้วทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน (Bending test, followed by a partial discharge test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าสายเคเบิลที่ผลิตขึ้นมา นั้น เมื่อมีแรงทางกลมากกระทำ สายเคเบิลจะสามารถทนต่อแรงทางกลที่เกิดขึ้นได้หรือไม่ เพราะในการติดตั้งสายเคเบิลในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ต้องใช้แรงในการลากและดึงสายเคเบิล ไปตามแนวของการเดินสาย ในการลากสายเคเบิลอาจทำให้สายเคเบิลเกิดความผิดปกติขึ้น ภายในฉนวนของสายเคเบิล หากสายเคเบิลนั้นไม่สามารถทนแรงทางกลดังกล่าวได้ ภายหลังจากการติดตั้งสายเคเบิลเข้าไปในระบบแล้ว อาจเกิดปัญหาขึ้น เนื่องมาจากความผิดพร่องของฉนวนสายเคเบิล หากฉนวนของสายเคเบิลทนต่อแรงทางกลไม่ได้

การทดสอบความโค้ง

- 1) ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้าอย่างน้อย 10 เมตร
- 2) นำตัวอย่างตัดโค้งรอบทรงกระบอกที่อุณหภูมิห้องทดสอบอย่างน้อย 1 รอบทรงกระบอก หลังจากนั้นคลายออกแล้วตัดให้โค้งงอ ในทิศทางตรงกันข้ามนับเป็น 1 ครั้ง จะต้องตัดโค้งงอทั้งหมด 3 ครั้ง โดยการตัดสายตัวอย่างในทิศทางตรงกันข้ามโดยตรงโดยการตัดต้องไม่ตัดตามแนวแกน โดยทำการตัดสายไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.1 ลักษณะของการตัดสายเคเบิลทดสอบ

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทรงกระบอกทดสอบจะเป็นดังนี้

- สำหรับสายเคเบิลที่มีชั้นโลหะได้เปลือหรือใช้พอยล์โลหะซ้อนทับกันตามความยาว
  - $25(d+D)65\%$  สำหรับสายเคเบิลแกนเดียว
  - $20(d+D)65\%$  สำหรับสายเคเบิล 3 แกน
- สำหรับสายเคเบิลอื่นๆ
  - $20(d+D)65\%$  สำหรับสายเคเบิลแกนเดียว
  - $15(d+D)65\%$  สำหรับสายเคเบิล 3 แกน

เมื่อ  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่วัดได้ เป็นมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของสายไฟที่ทำการทดสอบที่วัดได้ เป็นมิลลิเมตร  
- กรณีที่ตัวนำไม่เป็นวงกลม พิจารณาได้จากสมการที่ 4.8

$$d = 1.13\sqrt{S} \quad (4.8)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่หน้าตัดที่ระบุ ในหน่วยของตารางมิลลิเมตร

การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน (partial discharge test)

การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60885-3 [20] โดยความไวเท่ากับ 5 pC หรือ ดีกว่า การจ่ายแรงดันทดสอบจะค่อยๆเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทดสอบจนกระทั่งเท่ากับ  $2U_0$  และคงแรงดันไฟฟ้าทดสอบดังกล่าวเป็นเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นค่อยๆลดแรงดันไฟฟ้าทดสอบดังกล่าวจนเหลือ  $1.73 U_0$  โดยที่ไม่พบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนเกินกว่าความไวที่ระบุจากสายทดสอบที่  $1.73 U_0$  และการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดขึ้นจะต้องไม่ทำให้สายเคเบิลทดสอบเกิดความเสียหาย

4.6.2 การวัดค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$  measurement)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนเพื่อหาค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) ในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลที่เป็นวัสดุทดสอบ โดยในมาตรฐาน IEC 60502-2 [6] กำหนดไว้ว่าการวัดค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) สายเคเบิลที่จะนำมาทดสอบต้องมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 6/10 (12) kV ขึ้นไป โดยในการทดสอบจะตัดสายตัวอย่างยาว 10-15 เมตร มาผ่านกระบวนการให้ความร้อนในน้ำ เตาอบ หรือทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวกันโลหะ ตัวนำ หรือทั้งคู่ เพื่อให้อุณหภูมิของตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าอุณหภูมิปกติของตัวนำ  $5-10^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นนำสายเคเบิลดังกล่าว มาทำการวัดค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก แรงดันที่ใช้ในการทดสอบต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2 kV สำหรับค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่วัดได้จะต้องไม่เกินจากที่ กำหนดไว้ในตารางที่ 4.13

**ตารางที่ 4.13** ข้อกำหนดของฉนวนในการทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้า

ฉนวน	PVC/B	EPR/HEPR	XLPE
อุณหภูมิตัวนำสูงสุดที่ในสภาวะปกติ	70°C	90°C	90°C
ค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ )			
- ที่ 20 °C	$10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$	-	-
- อุณหภูมิตัวนำสูงสุดที่ในสภาวะปกติ	$10^{11} \Omega \cdot \text{km}$	$10^{12}$	-
ค่าคงที่ความต้านทานของฉนวน $K_i$			
- ที่ 20 °C	367 M $\Omega \cdot \text{km}$	-	-
- อุณหภูมิตัวนำสูงสุดที่ในสภาวะปกติ	0.37M $\Omega \cdot \text{km}$	3.67	-
Tan $\delta$			
ค่า Tan $\delta$ ที่อุณหภูมิตัวนำสูงกว่าอุณหภูมิตัวนำสูงสุดที่ในสภาวะปกติ 5-10°C	-	$400 \times 10^{-4}$	$40 \times 10^{-4}$

4.6.3 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจากที่ได้ทำการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน (heating cycle, followed by a partial discharge test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการจำลองการใช้งานของสายเคเบิลเพื่อดูว่าเมื่อสายเคเบิลได้รับความร้อนจากการจ่ายกระแสเข้าไปแล้วจะไม่ทำให้เกิดความผิดปกติของฉนวน โดยการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน (heating cycle) จะนำสายเคเบิลที่ใช้เป็นชิ้นตัวอย่างทดสอบวางบนพื้นห้องทดสอบ และทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวนำ ด้วยหม้อแปลงจ่ายกระแส โดยการทดสอบจะจ่ายกระแส จนอุณหภูมิของตัวนำสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำในสภาวะปกติ 5-10 °C ในกรณีที่สายเคเบิลมี 3 แกน จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวนำทั้ง 3 แกน ซึ่งระยะเวลาในการให้ความร้อนจะใช้เวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิของตัวนำคงที่ เหนืออุณหภูมิใช้งานปกติ 5-10°C แล้ว หลังจากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิของตัวนำเย็นตัวลงในอากาศอย่างน้อยที่สุด 3 ชั่วโมง กระบวนการให้ความร้อน รักษาอุณหภูมิของตัวนำแล้วทำให้อุณหภูมิของตัวนำเย็นลงดังกล่าวนับเป็น 1 รอบ ซึ่งการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน (heating cycle) นี้จะทำการทดสอบ 20 รอบ หลังจากทำการทดสอบครบตามที่กำหนดแล้ว จะนำสายเคเบิลทดสอบดังกล่าวมาทำการทดสอบการปล่อยประจุไฟฟ้าบางส่วน

4.6.4 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า หลังจากที่ได้ทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ (Impulse test, followed by a voltage test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าสายเคเบิลที่ออกแบบและผลิตนั้นสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในระบบการส่งจ่ายได้หรือไม่ กรณีเกิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า หรือสวิตช์ชิ่งขึ้น ก่อนที่จะนำสายเคเบิลมาทำติดตั้งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยในการทดสอบจะทำให้ภูมิของตัวนำเพิ่มขึ้นสูงกว่าภูมิของตัวนำสูงสุดในสภาวะปกติ 5-10°C โดยกระบวนการการให้ความร้อนในน้ำ เตาอบ หรือทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อน (Heating current) หลังจากนั้นนำสายเคเบิลทดสอบไปทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งขนาดของแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเป็นตามที่มาตรฐาน IEC 60230 [17] กำหนด โดยขนาดของแรงดันอิมพัลส์จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.14

**ตารางที่ 4.14** ขนาดของแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ

พิกัดแรงดัน $U_0/U_m$ kV	3.6/6(7.2)	6/10(12)	8.7/15(17.5)	12/20(24)	18/30(36)
แรงดันทดสอบ (peak) kV	60	75	95	125	170

การทดสอบแรงดันอิมพัลส์จะจ่ายแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ชั่วบวก 10 ครั้ง และชั่วลบ 10 ครั้งตามลำดับ ซึ่งแต่ละแกนของสายเคเบิลที่ทำการทดสอบ ต้องสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวกและลบดังกล่าวได้ หลังจากทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์แล้ว จะนำสายเคเบิลทดสอบไปทำการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีขนาดเท่ากับ  $3.5U_0$  ที่อุณหภูมิห้อง ใช้ระยะเวลาของการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 15 นาที ขนาดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.15

**ตารางที่ 4.15** แรงดันทดสอบกระแสสลับที่ความถี่กำลัง

พิกัดแรงดัน $U_0$ (kV)	3.6	6	8.7	12	18
แรงดันทดสอบ (kV)	12.5	21	30.5	42	63

4.6.5 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า สำหรับ 4 ชั่วโมง (voltage test for 4 hour)

การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเป็นการทดสอบเพื่อดูว่าสายเคเบิลที่ผลิตนั้น เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น สายเคเบิลสามารถทนต่อแรงดันผิดปกติดังกล่าวได้หรือไม่ การทดสอบจะใช้แรงดัน  $4U_0$  จ่ายให้ระหว่างตัวนำกับเครื่องป้องกันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ซึ่งในการจ่ายแรงดันทดสอบดังกล่าวจะค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งมีค่าเท่า  $4U_0$  และคงแรงดันทดสอบนี้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยผลของการทดสอบจะต้องไม่เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนเกิดขึ้น

#### 4.7 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์ (non-electrical type test)

เป็นการทดสอบก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ออกสู่ท้องตลาด เพื่อแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งต้องการการทดสอบที่สมบูรณ์เป็นหลักฐานเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องทดสอบซ้ำ ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวัสดุประกอบของสายเคเบิล หรือการออกแบบ หรือกระบวนการผลิต ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในส่วนของมาตรฐาน IEC 60840 [19] กำหนดการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของสายดังกล่าวต่อไปนี้

##### 4.7.1 การตรวจสอบตัวนำ

###### เครื่องมือ

ไมโครมิเตอร์หรือเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่วัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

###### วิธีทดสอบ

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่หน้าตัดเดียวกัน ในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วนับจำนวนเส้นลวด

###### การรายงานผล

ให้รายงานค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเป็นค่าเฉลี่ยและจำนวนเส้นลวด

##### 4.7.2 การตรวจสอบความหนาของฉนวน

###### เครื่องมือ

กล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องฉายหน้าตัดข้าง (profile projector) ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 10 เท่าและวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีข้อสงสัยให้ใช้การวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีอ้างอิง

###### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างจากปลายด้านหนึ่งของสายไฟฟ้า ปอกสิ่งห่อหุ้มภายนอกออกโดยไม่ให้ฉนวนเสียหายด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสมถ้าตัวกันตัวนำและฉนวนเป็นแบบติดกันก็ไม่ต้องเอาออก ตัดฉนวนเป็นแผ่นบางตามระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวนำ ถ้าการทำเครื่องหมายบนฉนวนเป็นเหตุให้ความหนาส่วนนั้นลดลง ให้ใช้ฉนวนตรงที่มีเครื่องหมายนั้นเป็นชิ้นทดสอบ

###### วิธีทดสอบ

ถ้าผิวภายในและภายนอกของชิ้นทดสอบเป็นวงกลมเรียบสม่ำเสมอให้วัดความหนา 6 ครั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวงเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ ก.1

ถ้าผิวภายในชิ้นทดสอบของชิ้นทดสอบเรียบแต่ภายนอกไม่เรียบ ให้วัดความหนาทั้ง 6 ครั้ง ตามรูปที่ ก.2 และจุดแรกที่วัดต้องเป็นจุดที่ความหนาฉนวนต่ำสุด

ในกรณีที่ตัวกันฉนวนและฉนวนไม่สามารถแยกออกจากกันได้ การวัดจะไม่รวมความหนาของตัวกัน ให้วัดความหนาสูงสุดของฉนวน

###### การรายงานผล

ให้รายงานค่าเฉลี่ยจาก 6 ค่า ความหนาของฉนวนต่ำสุด ความหนาของฉนวนสูงสุด และความแตกต่างระหว่างความหนาของฉนวนต่ำสุดกับความหนาของฉนวนสูงสุดที่วัดได้จากชั้นทดสอบ โดยคิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วปิดเศษเหลือทศนิยม 1 ตำแหน่ง

#### 4.7.3 การตรวจสอบความหนาของเปลือก

##### เครื่องมือ

กล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องฉายหน้าตัดข้าง (profile projector) ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 10 เท่าและวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีข้อสงสัยให้ใช้การวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีอ้างอิง

##### การเตรียมชั้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างจากปลายด้านหนึ่งของสายไฟฟ้า ปอกสิ่งห่อหุ้มทั้งภายในและภายนอกโดยไม่ให้เปลือกเสียหายด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม ตัดเปลือกเป็นแผ่นบางตามระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของสายไฟฟ้า ถ้าการทำเครื่องหมายบนเปลือกเป็นเหตุให้ความหนาส่วนนั้นลดลง ให้ใช้เปลือกตรงที่มีเครื่องหมายนั้นเป็นชั้นทดสอบ

##### วิธีทดสอบ

ถ้าผิวภายในและภายนอกของชั้นทดสอบ เป็นวงกลมเรียบสม่ำเสมอให้วัดความหนา 6 ครั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวงเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ ก.1

ถ้าผิวภายในซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นวงกลม ไม่สม่ำเสมอหรือไม่เรียบ ให้วัดความหนาทั้ง 6 ครั้ง ที่เปลือกต่ำสุด ตามรูปที่ ก.2

ถ้าผิวภายในและภายนอกซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นวงกลม ไม่สม่ำเสมอหรือไม่เรียบ ให้วัดความหนาทั้ง 6 ครั้ง ที่เปลือกต่ำสุด ตามรูปที่ ก.3 โดยจุดแรกที่วัดต้องเป็นจุดที่ความหนาเปลือกต่ำสุด

##### การรายงานผล

ให้รายงานค่าเฉลี่ยของความหนาของเปลือกนอกจาก 6 ค่า ซึ่งได้จากชั้นทดสอบโดยคิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วปิดเศษเหลือทศนิยม 1 ตำแหน่ง

#### 4.7.4 การตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า

##### เครื่องมือ

เครื่องฉายหน้าตัดข้าง (profile projector) ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 10 เท่าหรือเครื่องมือที่ใช้วัดได้ 2 ทิศทางในแนวตั้งฉากกันและวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

##### วิธีทดสอบ

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้าที่หน้าตัดเดียวกัน ในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน

##### การรายงานผล

ให้รายงานค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้าเป็นค่าเฉลี่ย

#### 4.7.5 การทดสอบความต้านทานกระแสดตรงของตัวนำ

##### เครื่องมือ

เครื่องทดสอบความต้านทานกระแสดตรงของตัวนำ

##### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้าหรือตัวอย่างที่มีความยาวอย่างน้อย 1 เมตร ก่อนวัดความต้านทานต้องเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องทดสอบอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ถ้าสงสัยว่าอุณหภูมิตัวนำจะไม่เท่ากับอุณหภูมิห้องทดสอบให้ทดสอบได้หลังจากสายไฟฟ้าอยู่ในห้องทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

##### วิธีทดสอบ

วัดความต้านทานตัวนำที่อุณหภูมิห้องทดสอบและคำนวณความต้านทานต่อ 1 กิโลเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจากสูตร

ถ้าเป็นตัวนำทองแดง

$$R_{20} = R_t \frac{254.5}{(234.5 + t)} \times \frac{1000}{L} \quad (4.9)$$

ถ้าเป็นตัวนำอะลูมิเนียม

$$R_{20} = R_t \frac{248}{(228 + t)} \times \frac{1000}{L} \quad (4.10)$$

เมื่อ  $R_{20}$  คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นโอห์มต่อกิโลเมตร

$R_t$  คือ ความต้านทานของสายไฟฟ้ายาว  $L$  เมตร ที่อุณหภูมิ  $t$  องศาเซลเซียส เป็นโอห์ม

$t$  คือ อุณหภูมิของตัวอย่างสายไฟฟ้าขณะวัดเป็นองศาเซลเซียส

$L$  คือ ความยาวของตัวอย่างสายไฟฟ้า เป็นเมตร

##### การรายงานผล

ให้รายงานค่าความต้านทานกระแสดตรง เป็นโอห์มต่อกิโลเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส

#### 4.7.6 การทดสอบความยืดตัวของฉนวน

##### เครื่องมือ

เครื่องมือในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60811-2-1 [22] และ

IEC 60811-1-2 [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น ของฉนวนจากตัวอย่างโดยแยกตัวกันออกด้วยตามแนวแกน ขัดหรือตัดชิ้นทดสอบจนผิวทั้งสองด้านมีความหนาสม่ำเสมอตลอดความยาวพิกัด และในขณะที่ ขัดแต่งต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินควร ภายหลังจากขัดหรือตัดความหนาของชิ้นทดสอบ ต้องไม่น้อยกว่า 2.0 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นรูปดัมป์เบลล์ ดังแสดงในรูปที่ ก.4 และ ทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ 2 แห่ง ห่างกัน 20 มิลลิเมตร เป็นความยาวพิกัด

### วิธีการทดสอบ

นำชิ้นทดสอบแขวนในตู้อบ และมีน้ำหนักติดอยู่ข้างล่าง ใช้เป็นแรงถ่วงน้ำหนัก 20 นิวตันต่อตารางเซนติเมตรของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบส่วนที่ทำเครื่องหมาย อบชิ้น ทดสอบเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส  $\pm$  3 องศาเซลเซียส วัดระยะทาง ระหว่างเครื่องหมายและคำนวณร้อยละของความยืด ถ้าตู้อบไม่มีช่องหน้าต่าง การเปิดประตู เพื่อวัด ต้องทำให้เสร็จภายใน 30 นาที

กรณีที่มีข้อโต้แย้ง การทดสอบต้องดำเนินการโดยใช้ตู้อบที่มีหน้าต่างและการ วัดต้องทำโดยไม่เปิดประตู

นำน้ำหนักถ่วงออก โดยตัดชิ้นทดสอบด้านล่างได้เครื่องหมายที่ทำไว้ให้ปล่อย ชิ้นทดสอบไว้ในตู้อบออกไปอีก 5 นาที แล้วนำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลง อย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้องหลังจากนั้นวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมายอีกครั้ง

### การรายงานผล

ให้รายงานผลเป็นค่ามัธยฐานของความยืดหลังจากอบ 15 นาที และค่ามัธยฐาน ของความยืดหลังจากปล่อยให้เย็น เป็นร้อยละ

#### 4.7.7 การทดสอบความจุไฟฟ้า

##### เครื่องมือ

เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า

### การเตรียมชิ้นทดสอบ

สามารถตัวอย่างเดียวกับการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนได้

### วิธีทดสอบ

วัดความจุไฟฟ้าระหว่างตัวกันตัวนำกับตัวกันโลหะ

### การรายงานผล

ให้รายงานค่าความจุไฟฟ้า เป็นไมโครฟารัดต่อกิโลเมตร

#### 4.7.8 การทดสอบสภาพต้านทานของตัวกันที่สารกึ่งตัวนำ

##### เครื่องมือ

เครื่องวัดความต้านทาน

### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้ายาว 150 มิลลิเมตร และเตรียมตัวอย่างก่อนและหลังเร่งอายุใช้งานตามรูปที่ 5 และรูปที่ ก.6

### วิธีทดสอบ

ทำขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง A B C และ D ตามรูปที่ ก.5 และรูปที่ ก.6 การเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าต้องใช้ตัวหนีบที่เหมาะสม ในการต่อกับขั้วไฟฟ้าตัวกันตัวนำ ต้องทำให้แน่ใจว่า ตัวหนีบได้รับการป้องกันไม่ให้สัมผัสหรือมีฉนวนกันกับตัวกันของฉนวนที่อยู่ผิวด้านนอกของตัวอย่าง นำตัวอย่างที่เตรียมไว้เข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิที่ตัวนำระหว่าง 90 องศาเซลเซียสถึง  $\pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา อย่างน้อย 30 นาที สภาพด้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าต้องวัดโดยวงจรที่มีกำลังไม่เกิน 100 มิลลิวัตต์ หลังจากวัดค่าทางไฟฟ้า ให้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันตัวนำและของฉนวน ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ให้หาค่าเฉลี่ยจากการวัด 6 ครั้ง วัดจากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ ก.6

การคำนวณสภาพความต้านทาน ( $\rho$ ) หน่วยเป็นโอห์ม.เมตร จากสูตร  
ตัวกันตัวนำ

$$\rho_c = \frac{R_c \times \pi \times (D_c - T_c) \times T_c}{2L_c} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $\rho_c$  คือ สภาพด้านทานเชิงปริมาตร เป็นโอห์ม.เมตร

$R_c$  คือ ความต้านทานที่วัดได้เป็นโอห์ม

$L_c$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า B และ C เป็นเมตร

$D_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันตัวนำ เป็นเมตร

$T_c$  คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวกันตัวนำ เป็นเมตร

ตัวกันฉนวน

$$\rho_i = \frac{R_i \times \pi \times (D_i - T_i) \times T_i}{2L_i} \quad (4.12)$$

เมื่อ  $\rho_i$  คือ สภาพด้านทาน เป็นโอห์ม.เมตร

$R_i$  คือ ความต้านทานที่วัดได้เป็นโอห์ม

$L_i$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า B และ C เป็นเมตร

$D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันฉนวน เป็นเมตร

$T_i$  คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวกันฉนวน เป็นเมตร

### การรายงานผล

ให้รายงานค่าสภาพด้านทานของตัวกัน เป็นโอห์ม.เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.9 ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนแรงอายุใช้งานของฉนวน

##### เครื่องมือ

1) กล้องจุลทรรศน์ หรือเครื่องวัดที่เทียบเท่าที่มีแรงกดสัมผัสไม่เกิน 7 นิวตัน  
ต่อตารางเซนติเมตร

2) เครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอัตราการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที  $\pm$  50 มิลลิเมตร  
ต่อนาที

##### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ 5 ชั้น (อีก 5 ชั้น สำหรับการทดสอบภายหลังแรง  
อายุใช้งาน โดยตัดจากบริเวณที่อยู่ติดกัน การทดสอบความต้านแรงดึงก่อนแรงอายุใช้งานและ  
ภายหลังแรงอายุใช้งานให้ทำอย่างต่อเนื่องทันที) หากตัวอย่างชำรุดซึ่งเกิดจากความเสียหาย  
ทางกล ไม่ให้ทำเป็นชิ้นทดสอบ การทำชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ทำได้โดยผ่านฉนวนตาม  
แนวแกนและเปิดเอาตัวนำออก ตัดตัวอย่างแต่ละชั้นให้มีขนาดพอเพียงสำหรับทดสอบและทำ  
เครื่องหมายที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบให้สัมพันธ์กัน เพื่อให้ทราบว่าตัดชิ้นส่วนมาจากตัวอย่างและ  
ตำแหน่งใด และมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ชัดและตัดชิ้นทดสอบจนผิวทั้งสองด้าน ขนานกัน  
ในช่วงความยาวพิกัด ในขณะที่ขีดแต่งต้องระวังมิให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินควรภายหลังการขัดหรือ  
การตัด ความหนาของชิ้นทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร และไม่มากกว่า 2.0 มิลลิเมตร  
นำชิ้นทดสอบแต่ละชั้นที่เตรียมไว้มาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ตามรูปที่ ก.5 หรือถ้า  
เป็นไปได้ให้ตัดชิ้นทดสอบให้ด้านยาวในตำแหน่งเคียงข้างกัน ทำขีดเครื่องหมาย 2 แห่งห่างกัน  
20 มิลลิเมตร เป็นความยาวพิกัด ตรงกลางชิ้นส่วนทดสอบสำหรับชิ้นทดสอบตามรูปที่ ก.4

##### การหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ คำนวณจากความกว้างและความ  
หนาดำสุด ซึ่งได้จากการวัดชิ้นทดสอบ 3 ครั้ง ระหว่างขีดเครื่องหมาย ถ้ามีข้อสงสัยในเรื่อง  
ความสม่ำเสมอของความกว้าง ให้วัดความกว้างที่ผิวของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ด้าน 3 ตำแหน่งที่  
เกี่ยวกับการวัดความหนาแล้วหาค่าเฉลี่ยของการวัดทั้ง 2 ด้านนั้น เป็นความกว้างของแต่ละ  
ตำแหน่ง ค่าที่น้อยที่สุดของพื้นที่หน้าตัด 3 ค่าที่หาได้ให้นำไปคำนวณหาความต้านแรงดึง ใน  
การวัดความหนาและความกว้าง ให้คิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง เป็นมิลลิเมตร

##### การปรับภาวะของชิ้นทดสอบ

ก่อนทดสอบความต้านแรงดึง ให้เก็บชิ้นทดสอบทั้งหมดไว้ที่อุณหภูมิ 23 องศา  
เซลเซียส  $\pm$  2 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง

##### วิธีทดสอบ

##### 1. อุณหภูมิทดสอบ

ให้ทดสอบที่อุณหภูมิห้องทดสอบ โดยทดสอบให้เสร็จภายใน 5 นาที นับจาก  
ชิ้นทดสอบออกจากการปรับภาวะ ในกรณีที่มีข้อสงสัยให้ทดสอบซ้ำที่อุณหภูมิ 23 องศา  
เซลเซียส  $\pm$  2 องศาเซลเซียส

## 2. ระยะห่างระหว่างปากจับ

ให้เป็น 50 มิลลิเมตร สำหรับชั้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ตามรูปที่ ก.4

## 3. การวัด

บันทึกค่าเป็นแรงดึง และระยะห่างระหว่างขีดทั้งสองในขณะที่ฉนวนขาด ผลที่ไม่เป็นตามเกณฑ์เนื่องจากชั้นทดสอบขาดนอกความยาวพิกัด ไม่ต้องนำมาพิจารณา ในกรณีนี้หากมีผลที่เป็นไปตามเกณฑ์อย่างน้อย 4 ค่าให้นำมาคำนวณความต้านแรงดึงและความยืด แต่ถ้ามีผลที่เป็นไปตามเกณฑ์น้อยกว่า 4 ค่า ต้องทดสอบซ้ำ

### การรายงานผล

ให้รายงานผลเป็นค่ามัธยฐาน โดยคำนวณความต้านแรงดึง และความยืด ดังนี้

$$TS = \frac{F}{A} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $TS$  คือ ความต้านแรงดึง เป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร

$F$  คือ ค่าของแรงที่วัดได้ที่จุดขาด เป็นนิวตัน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชั้นทดสอบ เป็นนิวตัน

$$EL = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4.14)$$

เมื่อ  $EL$  คือ ความยืด เป็นร้อยละ

$L_1$  คือ ความยาวพิกัดขณะขาด เป็นมิลลิเมตร

$L_0$  คือ ความยาวพิกัดขณะเดิม เป็นมิลลิเมตร

### 4.7.10 ความต้านแรงดึงและความยืดหลังเร่งอายุใช้งานของฉนวน

#### เครื่องมือ

ตู้อบที่มีอากาศหมุนเวียนตามธรรมชาติ หรือโดยการขับ ทั้งนี้อากาศต้องไหลผ่านทั่วพื้นผิวชั้นทดสอบและไหลออกใกล้ส่วนบนของตู้อบ อากาศต้องถ่ายเทชั่วโมงละไม่น้อยกว่า 8 เท่า และไม่เกิน 20 เท่าของปริมาตรตู้อบ ที่อุณหภูมิที่กำหนดในตารางที่ ก.3 ห้ามให้ใบพัดลมในตู้อบ

#### การเตรียมชั้นทดสอบ

1. ชั้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ ให้ปฏิบัติตามข้อ 4.7.9

2. ชั้นส่วนของสายไฟฟ้า ตัดสายไฟฟ้าตัวอย่างโดยเลือกเอาจากบริเวณที่ติดอยู่กับตัวอย่างที่นำมาทดสอบความต้านแรงดึงและความยืดก่อนเร่งอายุใช้งาน เป็นชั้นส่วน 3 ชั้น ยาวประมาณชั้นละ 200 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

การปรับภาวะของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

วิธีทดสอบ

ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ แขนชิ้นทดสอบในแนวตั้ง ให้อยู่บริเวณกลางด้าม แต่ละชิ้นทดสอบห่างกันอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ ก.3 เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด นำชิ้นทดสอบออกจากด้าม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทดสอบไม่ให้ถูกแสงอาทิตย์โดยตรงเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบความแรงดึง และความยืดตามวิธีในข้อ 4.7.9

การรายงานผล

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

4.7.11 ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนเร่งอายุใช้งานเปลือก

เครื่องมือ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ 5 ชิ้น มีรูปร่างเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9 อีก 5 ชิ้น สำหรับการทดสอบภายหลังเร่งอายุใช้งาน โดยตัดจากบริเวณที่อยู่ติดกัน การทดสอบความต้านแรงดึงก่อนเร่งอายุใช้งานและภายหลังเร่งอายุใช้งาน ให้ทำอย่างต่อเนื่องทันที) หากตัวอย่างชำรุดซึ่งเกิดจากความเสียหายทางกล ไม่ให้ทำเป็นชิ้นทดสอบ การทำชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ สำหรับเปลือกที่มีสันซึ่งเกิดจากแกนภายใน ให้ผ่าเปลือกตามแนวสัน แล้วขัดหรือตัดให้เรียบ

การหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

การปรับภาวะของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

วิธีทดสอบ

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

การรายงานผล

ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.9

4.7.12 ความต้านแรงดึงและความยืดหลังเร่งอายุใช้งานเปลือก

เครื่องมือ

ด้ามที่มีอากาศหมุนเวียนตามธรรมชาติ หรือโดยการขับ ทั้งนี้อากาศต้องไหลผ่านทั่วพื้นผิวชิ้นทดสอบและไหลออกใกล้ส่วนบนของด้าม อากาศต้องถ่ายเทชั่วโมงละไม่น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า 8 เท่า และไม่เกิน 20 เท่าของปริมาตรดื้อบ ที่อุณหภูมิที่กำหนดในตารางที่ ก.3 ห้ามให้ ไบพัตลมในดื้อบ

การเตรียมชิ้นทดสอบ

1. ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ ให้ปฏิบัติตามข้อ 4.7.10

2. ชิ้นส่วนของสายไฟฟ้า ดัดสายไฟฟ้าตัวอย่างโดยเลือกเอาจากบริเวณที่ติดอยู่กับ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบความต้านแรงดึงและความยืดก่อนแรงอายุใช้งาน เป็นชิ้นส่วน 3 ชิ้น ยาว ประมาณชิ้นละ 200 มิลลิเมตร

การหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติตามเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.10

การปรับภาวะของชิ้นทดสอบ

ให้ปฏิบัติตามเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.10

วิธีทดสอบ

ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมป์เบลล์ แขนชิ้นทดสอบในแนวตั้ง ให้อยู่บริเวณกลาง ดื้อบ แต่ละชิ้นทดสอบห่างกันอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ ก.3 เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด นำชิ้นทดสอบออกจากดื้อบ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทดสอบไม่ให้ถูก แสงอาทิตย์โดยตรงเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบความแรงดึง และความยืด ตามวิธีในข้อ 4.7.10

การรายงานผล

ให้ปฏิบัติตามเช่นเดียวกับที่กำหนดในข้อ 4.7.10

4.7.13 การทดสอบความเข้ากันได้ของวัสดุประกอบของสาย

เครื่องมือ

1) กล้องจุลทรรศน์ หรือเครื่องวัดที่เทียบเท่าที่มีแรงกดสัมผัสไม่เกิน 7 นิวตัน ต่อตารางเซนติเมตร

2) เครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอัตราการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที  $\pm$  50 มิลลิเมตร ต่อนาที

การเตรียมชิ้นทดสอบ

ดัดตัวอย่างสายไฟฟ้าความยาว 200 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น โดยดัดตัวอย่าง สายไฟฟ้าในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ดัดเพื่อทดสอบความต้านแรงดึงก่อนแรงอายุ นำ ตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น แขนในแนวตั้งกลางดื้อบ แต่ละตัวอย่างห่างกันอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร และ ต้องมีปริมาตรไม่เกินร้อยละ 2 ของปริมาตรดื้อบ อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส  $\pm$  2 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำออกจากดื้อบและปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ อย่างน้อย 16 ชั่วโมง นำตัวอย่างสายไฟฟ้าที่ผ่านการอบและปล่อยให้เย็นตัวตามที่กำหนดแล้ว มาแยกฉนวนและเปลือกออก เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ ตามรูปที่ ก.3 โดยเตรียม 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นทดสอบของฉนวน และ 2 ชั้นทดสอบของเปลือก จากแต่ละตัวอย่างสายไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีชั้นทดสอบของฉนวน 6 ชั้น และชั้นทดสอบของเปลือก 6 ชั้น

วิธีทดสอบ

1) อุณหภูมิทดสอบ

ให้ทดสอบที่อุณหภูมิห้องทดสอบ โดยทดสอบให้เสร็จภายใน 5 นาที นับจากชั้นทดสอบออกจากการปรับภาวะตามข้อ 4.7.9 ในกรณีที่มีข้อสงสัยให้ทดสอบซ้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส  $\pm 2$  องศาเซลเซียส

2) ระยะห่างระหว่างปากจับ

ให้เป็น 50 มิลลิเมตร สำหรับชั้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ตามรูปที่ ก.4

3) การวัด

บันทึกค่าเป็นแรงดึง และระยะห่างระหว่างขีดทั้งสองในขณะที่ฉนวนขาด ผลที่ไม่เป็นตามเกณฑ์เนื่องจากชั้นทดสอบขาดนอกความยาวพิกัด ไม่ต้องนำมาพิจารณา ในกรณีนี้หากมีผลที่เป็นไปตามเกณฑ์อย่างน้อย 4 ค่า ให้นำมาคำนวณความต้านแรงดึงและความยืด แต่ถ้ามีผลที่เป็นไปตามเกณฑ์น้อยกว่า 4 ค่า ต้องทดสอบซ้ำ

การรายงานผล

ให้รายงานผลเป็นค่ามัธยฐาน โดยคำนวณความต้านแรงดึง และความยืด ดังนี้

$$TS = \frac{F}{A} \quad (4.15)$$

เมื่อ  $TS$  คือ ความต้านแรงดึง เป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร

$F$  คือ ค่าของแรงที่วัดได้ที่จุดขาด เป็นนิวตัน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชั้นทดสอบ เป็นนิวตัน

$$EL = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4.16)$$

เมื่อ  $EL$  คือ ความยืด เป็นร้อยละ

$L_1$  คือ ความยาวพิกัดขณะที่ขาด เป็นมิลลิเมตร

$L_0$  คือ ความยาวพิกัดขณะเดิม เป็นมิลลิเมตร

#### 4.7.14 การทดสอบการเปลี่ยนรูปขณะมีแรงกดที่อุณหภูมิสูงของเปลือก

เครื่องมือ

เครื่องทดสอบดังแสดงดังรูปที่ ก.7

### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้าความยาว 250 มิลลิเมตร ถึง 500 มิลลิเมตร แล้วให้ปอกเปลือกและเอาส่วนที่อยู่ภายในที่อยู่ภายในได้เปลือกออก แล้วตัดชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น แต่ละชิ้นต้องตัดให้ต่อเนื่องกันยาวชิ้นละ 50 มิลลิเมตร ถึง 100 มิลลิเมตร (ความยาวของชิ้นตัวอย่างขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง) ถ้าเปลือกไม่มีสัน ให้ทำชิ้นทดสอบโดยตัดตัวอย่างตามแนวแกนของสายไฟฟ้า กว้างประมาณ 1 ใน 3 ของเส้นรอบวง ถ้าเปลือกมีสันซึ่งเกิดจากภายใน ให้ทำชิ้นทดสอบโดยตัดชิ้นตัวอย่างตามแนวของสัน และอย่างน้อยให้มีร่องหนึ่งระหว่างสันอยู่ประมาณในแนวกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ

### วิธีทดสอบ

วางชิ้นทดสอบในลักษณะตามรูปที่ ก.7 โดยรองชิ้นทดสอบด้วยท่อหรือแท่งโลหะกลม ซึ่งอาจผ่าครึ่งในแนวในแนวก้นเพื่อให้เป็นที่รองที่มั่นคง รัศมีของที่รองประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบ

การจัดเครื่องทดสอบ ชิ้นทดสอบ ที่รองชิ้นทดสอบ และใบมีดกดลงบนผิวภายนอกของชิ้นทดสอบ แรงที่กดและใบมีด ต้องตั้งฉากกับแกนของที่รองชิ้นทดสอบ แรงกดคำนวณได้จากสูตร

$$F = k\sqrt{2D\delta - \delta^2} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงที่กดบนชิ้นทดสอบ เป็นนิวตัน

$k$  คือ สัมประสิทธิ์ตัวคูณ มีค่าเท่ากับ 0.7

$\delta$  คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นทดสอบของเปลือก เป็นมิลลิเมตร

$D$  คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นทดสอบของเปลือก เป็นมิลลิเมตร

ค่า  $\delta$  และ  $D$  ให้ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง และที่คำนวณได้อาจปัดเศษลงได้ไม่เกินร้อยละ 3

นำชิ้นทดสอบพร้อมเครื่องทดสอบตามรูปที่ ก.7 ไปอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้อบตามตารางที่ ก.3 เมื่อครบตามระยะที่กำหนด ทำให้ชิ้นทดสอบเย็นลงอย่างรวดเร็วขณะที่มีแรงกด โดยใช้ น้ำเย็นพ่นลงไปจุดที่ใบมีดกด หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบและเครื่องทดสอบแล้วแช่ในน้ำเย็น หลังจากแช่ในน้ำเย็นแล้ว ตัดชิ้นทดสอบเป็นแถบบางตามแนวแกนของสายไฟฟ้า โดยตัดตั้งฉากกับรอยกดตามรูปที่ ก.8 วางแถบที่ตัดให้อยู่ในแนวราบบนเครื่องวัด แล้ววัดความหนาตรงจุดที่ลึกที่สุดของรอยกดและผิวภายนอกของชิ้นทดสอบตามในรูปที่ ก.8 ด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องฉายหน้าตัดข้าง

## การรายงานผล

ให้รายงานค่ามัธยฐานของความลึก ที่รอยกดของชั้นทดสอบทั้ง 3 ชั้นเป็นร้อยละของความหนาเฉลี่ยของชั้นทดสอบที่วัดได้

### 4.7.15 การทดสอบปริมาณคาร์บอนแบล็คในเปลือกพอลิเอทิลีน

#### เครื่องมือ

เครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ ก.9

#### การเตรียมชั้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างจากปลายข้างหนึ่งของสายไฟฟ้าและตัดเป็นชั้นทดสอบมีขนาดกว้างไม่เกิน 5 มิลลิเมตรความยาวไม่เกิน 5 มิลลิเมตรและความหนาไม่เกิน 5 มิลลิเมตร

#### การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายไพโรแกลลอล (pyrogallol) โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 50 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มไล่ออกซิเจนแล้ว 100 มิลลิลิตร เมื่อสารละลายเย็นไพโรแกลลอล 5 กรัม

#### วิธีทดสอบ

- 1) ปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนไปที่ 1.7 ลิตรต่อนาที  $\pm$  0.3 ลิตรต่อนาที ไนโตรเจนต้องมีส่วนผสมของออกซิเจน น้อยกว่าร้อยละ 0.5
- 2) ใส่สารละลายไพโรแกลลอล 1 ใน 3 ของขวดที่ 1 ทันทีที่เปิดขวดและรีบปิดฝาขวด
- 3) ใส่ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) 2 ใน 3 ของขวดที่ 2 และขวดที่ 3 สำหรับขวดที่ 2 ใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำแข็งแห้ง
- 4) นำถาดทนไฟไปเผาบนตะเกียงจนกระทั่งถาดทนไฟแดง และใส่ไว้ในเดซิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นอย่างน้อย 30 นาที
- 5) นำถาดทนไฟที่เย็นไปชั่งด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม บันทึกค่า  $m_1$  แล้ว ใส่ชั้นทดสอบที่จะทดสอบหนัก 1.0 กรัม  $\pm$  0.1 กรัม ชั่งอีกครั้งบันทึกค่า  $m_2$
- 6) ใส่ถาดทนไฟที่มีชั้นทดสอบที่ทดสอบไว้กลางท่อแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 30 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร  $\pm$  50 มิลลิเมตร (หรือความยาวที่เหมาะสมกับเตาเผา) สวมยางซิลิโคนซึ่งยึดไว้กับท่อไนโตรเจน และเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของท่อแก้วไนโตรเจนให้ไหลผ่านถาดทนไฟด้วยอัตราการไหลที่กำหนด
- 7) ใส่ท่อแก้วเข้าไปในเตาเผาไฟฟ้า โดยที่ปลายทั้ง 2 ด้านของท่อให้โผล่พ้นจากเตาเผาไฟฟ้าระยะเท่าๆ กัน ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อแก้วให้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ตามข้อ 3)
- 8) เริ่มให้ความร้อนกับเตาเผาไฟฟ้า จนได้อุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส ถึง 350 องศาเซลเซียส  $\pm$  5 องศาเซลเซียส ภายในเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนได้ประมาณ 450 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิอีกจนได้ 500 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลเซียส  $\pm 5$  องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลาให้ถอดอุปกรณ์ตามข้อ 3) ออก แล้วนำท่อแก้วออกจากตู้เผาไฟฟ้า ปลดยทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 5 นาที โดยคงเปิดไนโตรเจนไว้ หลังจากนั้นเปิดจุกทางด้านไนโตรเจนเข้าและนำเอาภาดทนไฟออกมา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เป็นเวลา 20 นาที ถึง 30 นาที จากนั้นนำไปชั่งบันทึกค่า  $m_3$

9) ต่อจากนั้น นำภาดทนไฟใส่กลับท่อแก้ว แต่ให้ปล่อยอากาศหรือออกซิเจนไหลเข้าไปแทนไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส  $\pm 20$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งคาร์บอนแบล็คที่เหลือถูกเผาไหม้ (เผาประมาณ 10 นาที) ปลดยให้แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่า  $m_4$

10) การคำนวณผลการทดสอบให้สูตรดังนี้  
ปริมาณคาร์บอนแบล็ค เป็นร้อยละ

$$\frac{m_3 - m_4}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (4.18)$$

การรายงานผล

ให้รายงานปริมาณคาร์บอนแบล็ค เป็นร้อยละ

4.7.16 การทดสอบการหดตัวของฉนวนครอสลิงก์พอลิเอทิลีน  
เครื่องมือ

การติดตั้งทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60811-1-3 [24]

การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดปลายของสายไฟฟ้าออกไปอย่างน้อย 500 มิลลิเมตร ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้ายาวประมาณ 300 มิลลิเมตร แล้วปลอกสิ่งห่อหุ้มทั้งหมดออกจนเหลือถึงตัวกันฉนวน ให้แล้วเสร็จภายในเวลา 5 นาทีหลังจากตัดตัวอย่าง ให้ทำเครื่องหมายระยะ 200 มิลลิเมตร  $\pm 5$  มิลลิเมตร กลางชิ้นทดสอบวัดระยะระหว่างเครื่องหมายให้ละเอียด 0.5 มิลลิเมตร แต่ละชิ้นทดสอบให้ปลอกฉนวนออกจากปลายทั้งสองด้านของชิ้นทดสอบ จากจุดที่ทำเครื่องหมายระหว่าง 2 ถึง 5 มิลลิเมตร ตามรูปที่ ก.10

วิธีทดสอบ

1) วางชิ้นทดสอบลงบนที่รองรับตามแนวนอนในตู้อบ โดยให้ปลายของตัวนำที่อยู่บนที่รองรับ หรือบนผิวของขอบที่ลื่น เพื่อตัวอย่างสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ

2) อบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส  $\pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปลดยให้เย็นในอุณหภูมิห้องทดสอบ และวัดระยะระหว่างเครื่องหมายทั้งสองของแต่ละชิ้นทดสอบอีกครั้งให้ละเอียด 0.5 มิลลิเมตร

#### การรายงานผล

ให้รายงานความแตกต่าง เป็นร้อยละของระยะเครื่องหมายก่อนอบ และหลังอบที่ปล่อยให้เป็น

#### 4.7.17 การทดสอบการซึมของน้ำ

##### เครื่องมือ

เครื่องทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60840 [19] ดังแสดงในรูปที่ ก.11

##### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้ายาวอย่างน้อย 6 เมตร ซึ่งนำมาจากตัวอย่างที่ทดสอบ ความโค้งยาว 3 เมตรเป็นชิ้นทดสอบ วางในแนวนอนและปลอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นทดสอบโดยรอบกว้างประมาณ 50 มิลลิเมตรจนถึงชั้นของตัวกันของฉนวน ผิวที่ถูกตัดจะต้องไม่มีส่วนใดไปปิดช่องว่างของโครงสร้างเดิมที่มีการป้องกันน้ำ เพื่อให้ส่วนป้องกันน้ำสามารถป้องกันน้ำได้เต็มที่ ผิวของส่วนที่ถูกตัดที่อยู่ใกล้สามารถป้องกันน้ำด้วยวัตถุที่เหมาะสมหรือสิ่งห่อหุ้มภายนอกอาจนำออกไปก็ได้ แล้วจัดเครื่องมือ ตามรูปที่ ก.11 โดยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ น้ำ อย่างน้อย 10 มิลลิเมตร วางในแนวตั้งเหนือตำแหน่งที่ปกของชิ้นทดสอบ และอุดเปลือกที่ต่ออยู่กับปลายเครื่องมือทั้งสองข้างเพื่อป้องกันการรั่วของน้ำ และต้องไม่ทำให้เกิดความเค้นทางกลบนสายไฟฟ้า

##### วิธีการทดสอบ

1) เติมน้ำที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส  $\pm 10$  องศาเซลเซียส ลงในถังน้ำให้มีระดับความสูง 1 เมตรจากจุดกึ่งกลางของสายไฟฟ้าตามแนวแกนภายใน 5 นาที ตามรูปที่ ก.11 แล้วปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

2) ทำตัวนำให้ร้อนด้วยวิธีที่เหมาะสม 10 วัฏจักรการให้ความร้อน โดยให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 95 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามต้องไม่ถึง 100 องศาเซลเซียส

3) ทำตัวนำให้ร้อนอย่างน้อย 8 ชั่วโมง โดยที่อุณหภูมิของตัวนำต้องอยู่ในระดับ 95 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ของแต่ละครั้งที่ทำให้ตัวนำร้อน และปล่อยให้เป็นที่อุณหภูมิห้องทดสอบอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ถือเป็น 1 วัฏจักรการให้ความร้อน และระดับน้ำในท่อต้องรักษาให้มีระดับ 1 เมตรตลอด

#### การรายงานผล

ให้รายงานว่าระหว่างทดสอบมีน้ำซึมออกจากปลายทั้งสองด้านหรือไม่

#### 4.7.18 การทดสอบการสูญเสียมวลของเปลือกพอลิไวนิลคลอไรด์

##### เครื่องมือ

- 1) ตู้อบ ตามมาตรฐาน IEC 60811-3-2 [25]
- 2) เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม
- 3) เดซิซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4) ที่ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์

## การเตรียมชิ้นทดสอบ

ปอกเปลือกชิ้นตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง ไม่ทำให้เปลือกเสียหายหรือชำรุด  
ตัดเปลือกเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์ดังแสดงในรูปที่ ก.4 จำนวน 3 ชิ้น

## การคำนวณพื้นที่ส่วนที่ระเหย

ให้หาพื้นที่ผิว (A) ของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น เป็นตารางเมตรก่อนนำไปทดสอบ

$$A = \frac{1256 + (180\delta)}{100} \quad (4.19)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

## วิธีการทดสอบ

1) วางชิ้นทดสอบในเตชิกเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ เป็นเวลาอย่างน้อย  
20 ชั่วโมง ซึ่งชิ้นทดสอบทันทีที่นำออกจากเตชิกเคเตอร์ เป็นมิลลิกรัมทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2) แขนวชิ้นทดสอบในแนวตั้ง กึ่งกลางดื่อบ ให้แต่ละชิ้นห่างกันอย่างน้อยน้อย  
20 มิลลิเมตร เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส  $\pm 2$  องศาเซลเซียส  
ปริมาตรชิ้นทดสอบรวมต้องไม่เกินร้อยละ 0.5 ของปริมาตรดื่อบ

3) หลังจากอบ นำชิ้นทดสอบไปวางในเตชิกเคเตอร์เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้ว  
ชั่งชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นอีกครั้ง คำนวณความแตกต่างระหว่างมวลที่ชั่งได้ในข้อ 1) กับข้อ 3) ของ  
แต่ละชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร

## การรายงานผล

ให้รายงานเป็นค่ามัธยฐาน ของค่าที่ได้จากการหาความแตกต่าง เป็นมิลลิกรัม  
ต่อตารางเซนติเมตร

4.7.19 การทดสอบความทนต่อการช็อกด้วยความร้อนของเปลือกพอลิไวนิล  
คลอไรด์

## เครื่องมือ

## ดื่อบแบบแมนเดรล

## การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างสายไฟฟ้าให้มีความยาวเหมาะสม 2 ตัวอย่าง จากสายไฟฟ้า 2  
ตำแหน่ง ห่างกันอย่างน้อย 1 เมตร ปอกเปลือกออก แล้วนำเปลือกออก แล้วนำเปลือกไปทำ  
เป็นชิ้นทดสอบดังนี้

สายไฟฟ้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 12.5 มิลลิเมตร และความหนาของเปลือก  
ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ให้ทำชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นเป็นแผ่นยาวตามแนวแกนให้มีความกว้างไม่เกิน  
1.5 เท่าของความหนาเปลือก แต่ไม่น้อยกว่า 4 มิลลิเมตร

### วิธีทดสอบ

พื้นชั้นทดสอบแต่ละชั้นบนแมนเดรล ให้แน่นเป็นวงชิดกันตามตารางที่ 4.16 และยึดให้อยู่กับที่ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ แล้วนำไปใส่ในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส  $\pm$  3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ แล้วตรวจพินิจ

### การรายงานผล

ให้รายงานว่ามีการแตกร้าวหรือไม่

**ตารางที่ 4.16** เส้นผ่านศูนย์กลางของแมนเดรลและจำนวนรอบที่พื้น

ความหนาของชั้นทดสอบ mm	เส้นผ่านศูนย์กลางของแมนเดรล mm	จำนวนรอบ รอบ
ไม่เกิน 1	2	6
เกิน 1 ถึง 2	6	6
เกิน 2 ถึง 3	4	6
เกิน 3 ถึง 4	8	4
เกิน 4 ถึง 5	10	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การศึกษากระบวนการทดสอบในโรงงานอุตสาหกรรม

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทดสอบ และเทคนิคต่างๆในการทดสอบสายเคเบิลในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการดูงานกระบวนการทดสอบเพื่อให้สามารถเข้าใจในหลักการและขั้นตอนของกระบวนการทดสอบยิ่งขึ้น อีกทั้งจะได้รู้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการทดสอบ รวมถึงวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ อีกทั้งหากพบปัญหาในกระบวนการทดสอบแล้ว สามารถทำการวิเคราะห์และสามารถแก้ไขปัญหา โดยใช้หลักทางวิศวกรรมมาวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาได้

#### 5.1 การทดสอบประจำ (Routine test)

5.1.1 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน (partial discharge test) เครื่องมือทดสอบและการจัดเตรียมวงจรการทดสอบจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60885-3 [20] ยกเว้นความไวที่กำหนดไว้ใน IEC 60885-3 [20] ต้องเท่ากับ 10 pC หรือดีกว่า โดยจะค่อยๆเพิ่มแรงดันทดสอบจนมีค่าเท่ากับ  $2U_0$  และคงแรงดันดังกล่าวไว้ 10 วินาที หลังจากนั้นค่อยๆลดแรงดันลงจนเหลือ  $1.73U_0$  แล้วทำการวัดค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน ค่าพิกัดแรงดันที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.10

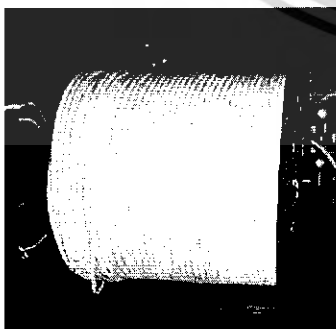
##### 5.1.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.1



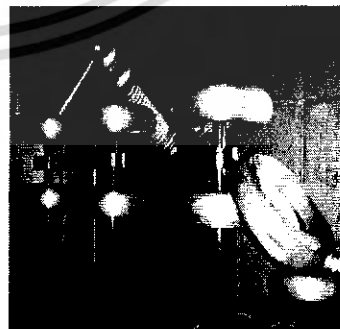
ก)



ข)



ค)



ง)

**รูปที่ 5.1** อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ก) หม้อแปลงทดสอบ ข) หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมัน (oil terminator) ค) สายเคเบิลทดสอบ ง) LC Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

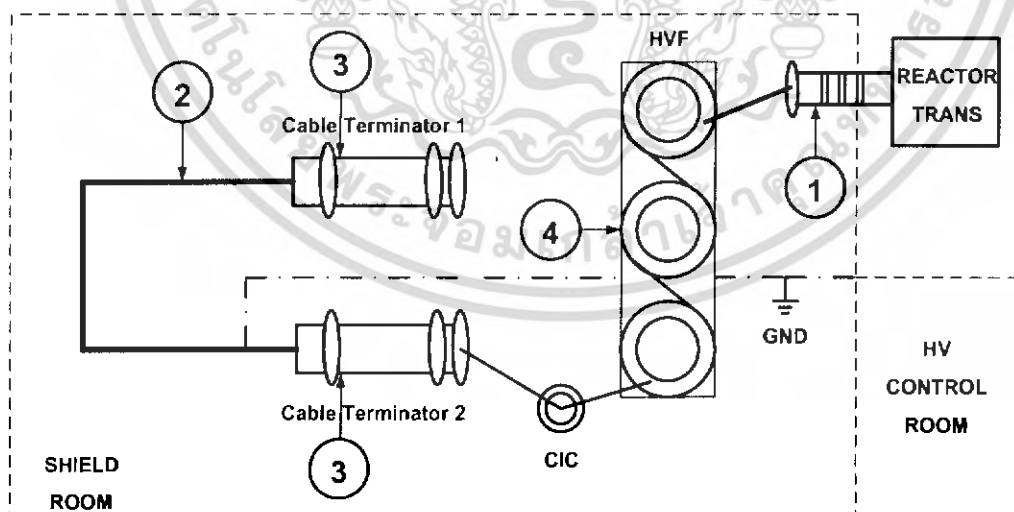


ค)



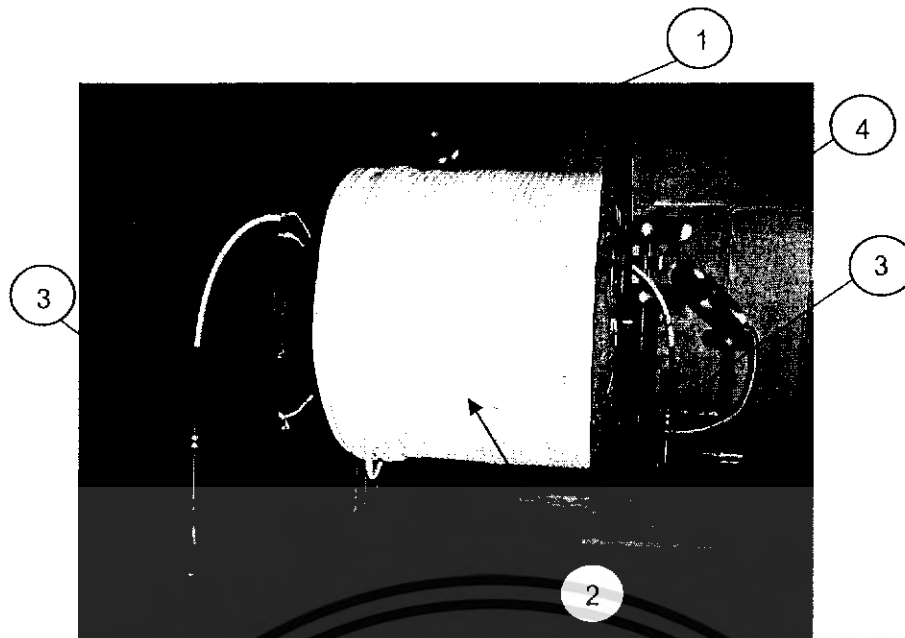
ง)

**รูปที่ 5.2** กระบวนการเตรียมการทดสอบ ก) การปลอกปลายสายเคเบิล ข) การนำปลายสายเคเบิลต่อเข้ากับหัวต่อสาย ค) ต่อกราวด์ของสายเคเบิลเข้ากับวงจร ง) ต่อสายแรงสูงจาก CIC เข้าตัวนำของสายเคเบิล



**รูปที่ 5.3** วงจรทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.4** วงจรการทดสอบที่ต่อสมบูรณ์แล้ว

- เมื่อ
- 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ (100 kVA)
  - 2 คือ สายเคเบิลทดสอบ (12/20(24) kV 500 mm<sup>2</sup>)
  - 3 คือ หัวต่อสายแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวน (oil terminator)
  - 4 คือ LC Filter

#### 5.1.1.2 วิธีการทดสอบ

- 1.จ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบระหว่างตัวนำและเครื่องป้องกันโลหะ โดยการเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งแรงดันมีค่าเท่ากับ  $2U_0$  และคงแรงดันทดสอบเป็นเวลา 10 วินาที
- 2.หลังจากนั้นค่อยๆลดแรงดันจนเหลือเท่ากับ  $1.73U_0$
- 3.ทำการวัดค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่ทดสอบ



**รูปที่ 5.5** การบันทึกค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

1. ค่าของการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่วัดได้ คือ 8.3 pC ซึ่งการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [13]

2. โดยค่าของการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดขึ้นจะไม่ทำให้สายเคเบิลทดสอบเกิดความเสียหาย

5.1.2 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า (voltage test) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าจะทำที่อุณหภูมิแวดล้อม โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่กำลัง กรณีสายเคเบิลแกนเดียวการทดสอบแรงดันจะจ่ายแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและเครื่องป้องกันโลหะเป็นเวลา 5 นาที โดยที่แรงดันทดสอบที่ความถี่กำลังจะเป็น  $3.5U_0$  ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.15 สำหรับวิธีการทดสอบนั้นการจ่ายแรงดันทดสอบจะค่อย ๆ เพิ่มแรงดันทดสอบอย่างช้า ๆ จนถึงค่าแรงดันทดสอบที่กำหนด โดยฉนวนจะต้องไม่เกิดการเบรกดาวนขึ้น

## 5.2 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า (Type test electrical)

5.2.1 การทดสอบความโค้งงอแล้วทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน (Bending test, followed by a partial discharge test)

การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดสายเคเบิลที่จะใช้เป็นตัวตัวอย่างทดสอบยาว 10 -15 เมตร

วิธีการทดสอบ

1) นำสายเคเบิลมาตัดโค้งงอรอบทรงกระบอก โดยอาจจะตัดสายรอบล้อบรรจุได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.6 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกที่ใช้ทดสอบจะต้องเป็นไปตามที่หัวข้อ 4.6.1 ในบทที่ 4 กำหนด โดยจะตัดสายเคเบิลที่เป็นตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 1 รอบทรงกระบอกแล้วตัดกลับในทิศทางตรงกันข้ามนับเป็น 1 ครั้ง ซึ่งจะทำการตัดโค้งสายจำนวน 3 ครั้ง

2) หลังจากนั้นนำสายเคเบิลที่ผ่านการตัดโค้งงอแล้วไปทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนสำหรับสายเคเบิลที่อยู่ในมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] จะค่อย ๆ เพิ่มแรงดันจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ  $2U_0$  เป็นเวลา 10 วินาทีแล้วค่อย ๆ ลดแรงดันอย่างช้า ๆ จนกระทั่งค่าแรงดันเท่ากับ  $1.73 U_0$  ส่วนสายเคเบิลที่อยู่ในมาตรฐาน IEC 60840 [19] จะค่อย ๆ เพิ่มแรงดันจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ  $1.75U_0$  เป็นเวลา 10 วินาทีแล้วค่อย ๆ ลดแรงดันอย่างช้า ๆ จนกระทั่งค่าแรงดันเท่ากับ  $1.5U_0$



**รูปที่ 5.6** การตัดสายเคเบิลโค้งงอรอบล้อบรรจุสาย



**รูปที่ 5.7** การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจากการทดสอบความโค้งงอ

ผลการทดสอบ

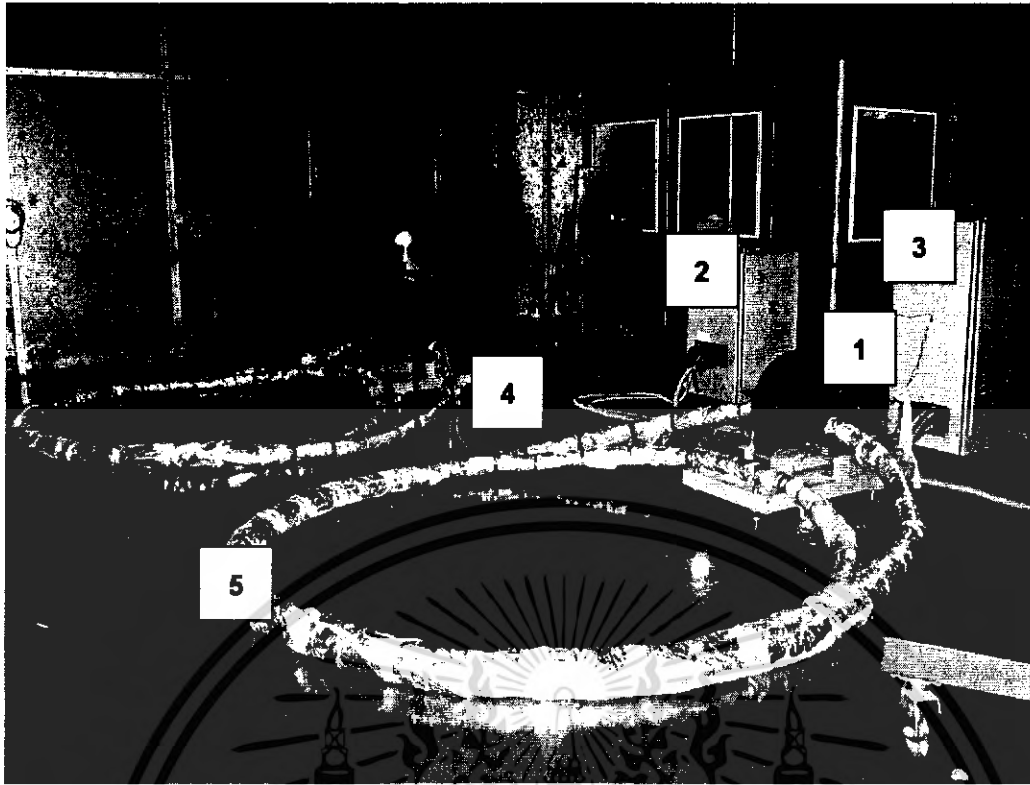
สายเคเบิลที่ทำการทดสอบผ่านการทดสอบเพราะค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่วัดได้ไม่เกิน 10 pC

5.2.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนหลังจากที่ได้ทำการทดสอบวัฏจักรการให้ความร้อน (heating cycle test, followed by a partial discharge test)

1) การเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ จะทำการตัดสายเคเบิลยาวประมาณ 10-15 เมตร จำนวนสองเส้น (เส้นหนึ่งจะทำการเจาะสายเพื่อทำการวัดอุณหภูมิของตัวนำโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล อีกเส้นจะใช้เป็นสายที่ใช้ในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า "Dummy" ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการทดสอบ)

2) วงจรการทดสอบ การทดสอบ heating cycle จะใช้อุปกรณ์และวงจรการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.8** การทดสอบ Heating Cycle

เมื่อ 1 คือ หม้อแปลงกระแส

2 คือ ชุดควบคุมการจ่ายกระแส

3 คือ ชุดบันทึกอุณหภูมิ

4 คือ เทอร์โมคัปเปิล

5 คือ สายเคเบิลทดสอบ



ก)

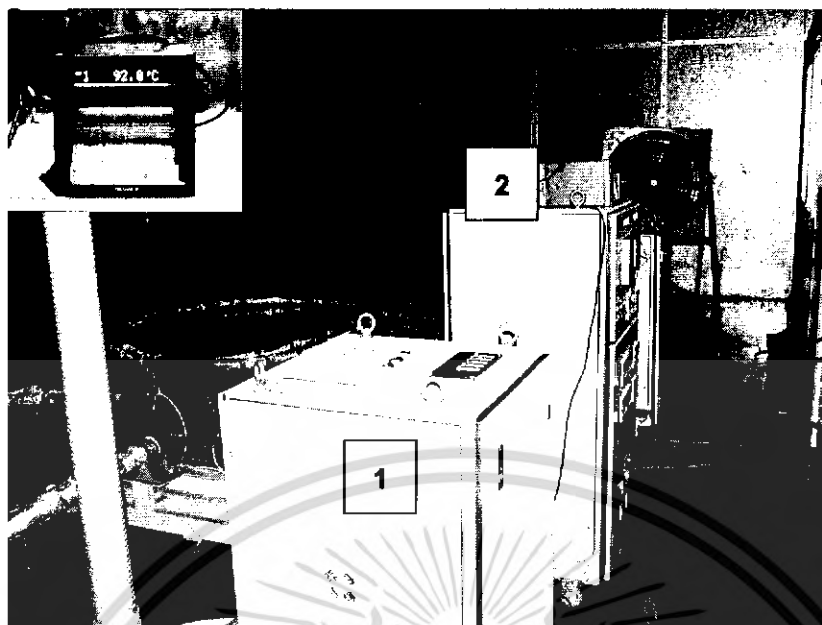


ข)



ค)

**รูปที่ 5.9** ก), ข) และ ค) การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของตัวนำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.10** อุปกรณ์ควบคุมและบันทึกผลในการทดสอบ Heating Cycle

เมื่อ 1 คือ ชุดควบคุมการจ่ายกระแสให้ตัวนำ

2 คือ ชุดบันทึกอุณหภูมิ

3) วิธีการทดสอบ จะใช้วิธีการให้ความร้อนด้วยหม้อแปลงกระแสโดยให้มีอุณหภูมิที่ตัวนำระหว่าง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนที่ตัวนำของสายเคเบิลทดสอบอย่างน้อย 8 ชั่วโมง โดยจะต้องรักษาอุณหภูมิให้ได้ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียสอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ในเวลาของการให้ความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างน้อย 3 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบ ในการทดสอบจะทำการให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลง จำนวน 20 รอบ เมื่อครบรอบสุดท้ายแล้ว นำสายเคเบิลไปทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน ซึ่งในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนจะจ่ายแรงดันทดสอบที่  $2U_0$  เป็นเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นค่อยๆ ลดแรงดันให้เหลือ  $1.73U_0$  สำหรับสายมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] (ส่วนกรณีสายเคเบิลที่อยู่ในมาตรฐาน IEC 60840 [19] จะใช้แรงดันทดสอบที่  $1.5U_0$  เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดแรงดันเท่ากับ  $1.5U_0$ ) แล้วทำการวัดค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน

4) ผลการทดสอบ สายเคเบิลที่ทดสอบจะต้องไม่เสียหายโดยฉับพลันหรือวาบไฟที่ผิว ผลของการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน IEC 60502-2 [13] กำหนดไว้ว่าจะต้องไม่เกินกว่า 5 pC หรือดีกว่า สำหรับมาตรฐาน IEC 60840 [19] กำหนด 10 pC หรือดีกว่า ซึ่งผลการทดสอบสายพบว่าผ่านการทดสอบ โดยที่สายมีค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนไม่เกินกว่าที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

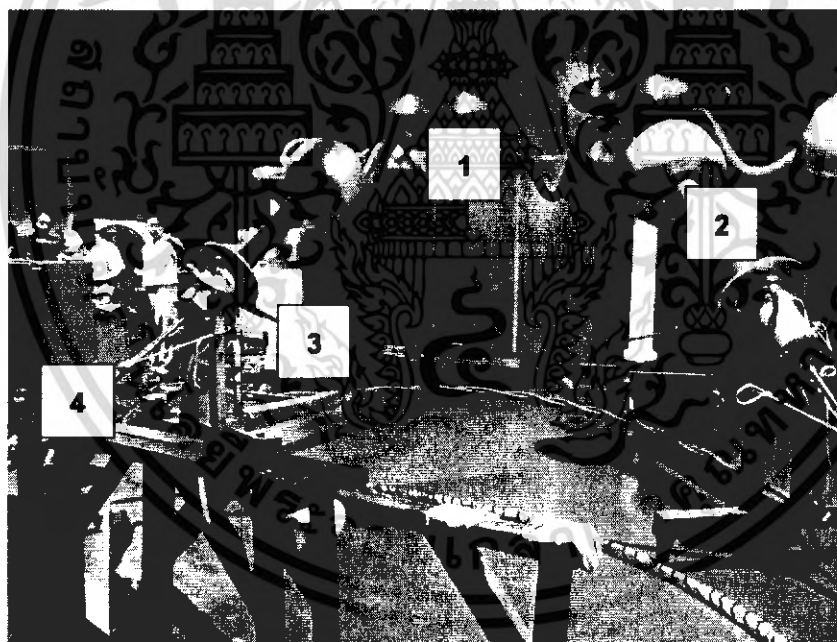
5.2.3 การวัดค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Tan  $\delta$  measurement for rated voltage 6/10(12) kV and above)

1) การเตรียมชั้นทดสอบ จะตัดสายเคเบิลที่จะใช้เป็นชั้นตัวอย่างยาว 10-15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.11

2) วงจรการทดสอบ การทดสอบ tan  $\delta$  มีอุปกรณ์และวงจรการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 สายเคเบิลทดสอบ



รูปที่ 5.12 วงจรการทดสอบหาค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

- เมื่อ 1 คือ LC Filter  
 2 คือ Water Terminator  
 3 คือ Standard Capacitor  
 4 คือ สายเคเบิลทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

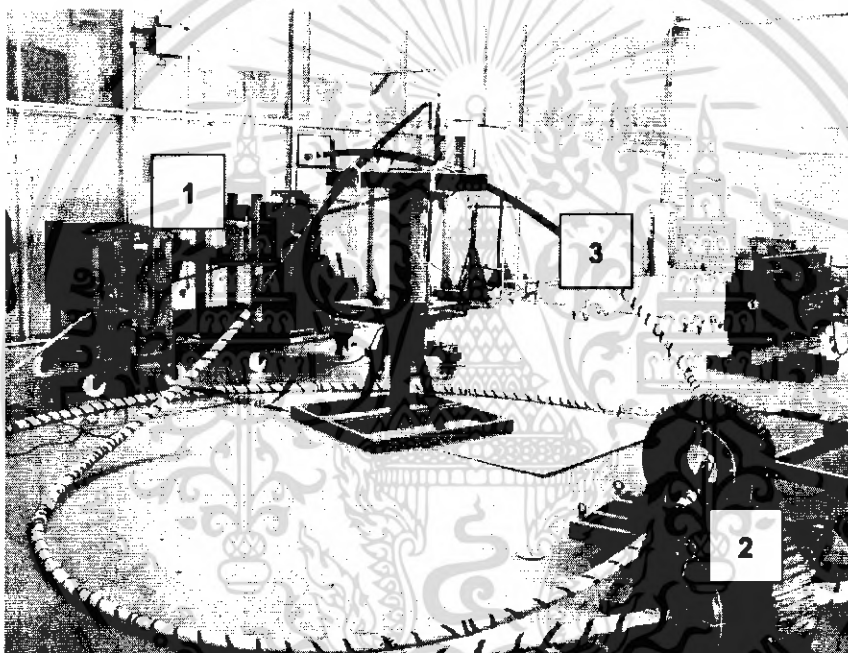
1) วิธีการทดสอบ การทดสอบจะใช้หม้อแปลงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวนำของสายเคเบิลทดสอบ เพื่อให้อุณหภูมิของตัวนำเพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิของตัวนำปกติ 5-10 องศาเซลเซียส (95-100 องศาเซลเซียส)

2) หลังจากนั้นทำการวัดค่าแพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

5.2.4 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า หลังจากที่ได้ทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ (Impulse test followed by a voltage test)

1) การเตรียมชิ้นทดสอบ การเตรียมชิ้นทดสอบจะตัดสายตัวอย่าง ยาว 10 -15 เมตร แล้วเข้าหัวสายโดยใช้ Termination

2) วงจรการทดสอบ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ มีอุปกรณ์และวงจรการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.13



**รูปที่ 5.13** วงจรการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

เมื่อ 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2 คือ หม้อแปลงกระแส

3 คือ สายเคเบิลทดสอบ

3) วิธีการทดสอบ การทดสอบจะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ตัวนำของสายเคเบิลทดสอบโดยใช้หม้อแปลงกระแส ให้มีอุณหภูมิตัวนำอยู่ระหว่าง 95-100 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิที่กำหนดแล้วนำสายเคเบิลทดสอบ ไปทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ โดยการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์รูปคลื่นบวก 10 ครั้ง และรูปคลื่นลบ 10 ครั้ง ซึ่งแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60230 [17] กำหนด ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 เป็นตารางที่แสดงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

4) ผลการทดสอบ ในการทดสอบจะต้องไม่เกิดการเบรกดาว์ของฉนวนเกิดขึ้น

**ตารางที่ 5.1** แรงดันอิมพัลส์ทดสอบสายเคเบิลมาตรฐาน IEC 60502-2 [13]

พิกัดแรงดัน $U_0/U(U_m)$ kV	3.6/6(7.2)	6/10(12)	8.7/15(17.5)	12/20(24)	18/30(36)
แรงดันทดสอบ(peak) kV	60	75	95	125	170

**ตารางที่ 5.2** แรงดันอิมพัลส์ทดสอบสายเคเบิลมาตรฐาน IEC 60840 [19]

U	$U_m$	$U_0$	แรงดันทดสอบ (peak)
kV	kV	kV	kV
45 to 75	52	26	250
60 to 69	72.5	36	325
110 to 115	123	64	550
132 to 138	145	76	650
150 to 161	170	87	750

5.2.5 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า 4 ชั่วโมง (Voltage test for 4 h.) การทดสอบแรงดันไฟฟ้า 4 ชั่วโมง จะทำการทดสอบหลังจากที่ได้นำสายเคเบิลทดสอบไปทำการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์แล้ว ซึ่งวงจรการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน

- 1) วิธีการทดสอบ การทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่  $4U_0$  ระหว่างตัวนำและScreen เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งในการทดสอบจะค่อยๆจ่ายแรงดันจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด
- 2) ผลการทดสอบ จะต้องไม่เกิดการเบรกดาว์ของฉนวนเกิดขึ้น

### 5.3 การทดสอบทางฟิสิกส์ (Physical Type test)

5.3.1 การทดสอบการยึดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อน (Hot Set Test)

ขั้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการทดสอบจะต้องเป็นไปตาม Clause ที่ 9 ในมาตรฐาน IEC 60811-2-1 [22] กำหนด

- 1) การเตรียมชิ้นทดสอบ ตัดสายเคเบิลที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบยาวประมาณ 50 mm. ใช้ Cutter กรีดฉนวนออกตามแนวของแกน หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการขีดหรือตัดด้านทั้งสองข้างให้เรียบ โดยความหนาของชิ้นทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 0.8 mm. แต่ต้องไม่มากกว่า 2.0 mm. หลังจากนั้นนำแผ่นที่ผ่านการขีดหรือตัดนั้น มาทำดัดเป็นรูปดัมเบลล์ ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 5.14 จากนั้นนำชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์มาวัดความหนา โดยใช้ Micrometer แล้วทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ ห่างกัน 20 mm.



รูปที่ 5.14 ชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์



ก)

ข)

รูปที่ 5.15 การวัดขนาดของชิ้นทดสอบรูปดัมป์เบลล์

- ก) วัดความกว้างของชิ้นทดสอบ
- ข) วัดความหนาของชิ้นทดสอบ

หลังจากที่วัดค่าความกว้างและความหนาของดัมป์เบลล์แล้ว ทำการคำนวณหาค่าน้ำหนักที่จะใช้ถ่วง โดยน้ำหนักที่จะใช้ถ่วงนั้นมีค่าเท่ากับ 20 นิวตันต่อตารางเซนติเมตรของพื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบ

2) การทดสอบ จะนำชิ้นทดสอบแขวนในดรัม โดยมื่อน้ำหนักถ่วงอยู่ด้านล่างแล้วทำการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมาย หลังจากนั้นเอาน้ำหนักถ่วงออก ปล่อยให้ชิ้นทดสอบไว้ในดรัมต่อไปอีก 5 นาที แล้วนำชิ้นทดสอบออกจากดรัมแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการวัดระยะห่างระหว่างเครื่องหมายอีกครั้ง

3) การคำนวณและการรายงานผลการทดสอบ

คำนวณหาค่า %Elongation หลังจากอบ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{Elongation หลังจากอบ 15 นาที} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \% \quad (5.1)$$

คำนวณหาค่า %Elongation หลังจากปล่อยให้เย็น

$$\% \text{Elongation หลังจากปล่อยให้เย็น} = \frac{L_2 - L_0}{L_0} \times 100 \% \quad (5.2)$$

เมื่อ  $L_0$  คือ ความยาวระหว่างเครื่องหมาย (200 mm.)

$L_1$  คือ ความยาวระหว่างเครื่องหมายหลังจากอบเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิ

200638C

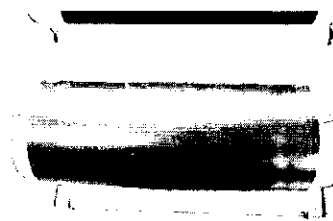
$L_2$  คือ ความยาวระหว่างเครื่องหมายหลังจากปล่อยให้เย็น



**รูปที่ 5.16** การทดสอบการหดตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อน

5.3.2 Shrinkage Test for PE sheaths เป็นการทดสอบการหดตัวของเปลือกนอกของสายเคเบิล

1) การเตรียมชิ้นทดสอบ จะตัดสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบยาวประมาณ 300 มิลลิเมตร แล้วทำการ mark ตรงช่วงกลางระหว่างชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.17



**รูปที่ 5.17** ระยะ mark ชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วิธีการทดสอบ จะนำชิ้นทดสอบไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 130<sup>o</sup>C 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการวัดระยะ mark

3) ผลการทดสอบ การคำนวณหาค่า %Shrinkage ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะต้องไม่เกิน 4 %

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \% \quad (5.3)$$

โดยที่  $L_1$  = ความยาว mark ก่อนการทดสอบ (200 mm.)

$L_2$  = ความยาวของระยะ mark ที่วัดได้หลังจากการทดสอบ



**รูปที่ 5.18** การวัดระยะ mark หลังจากการทดสอบ

### 5.3.3 Tensile strength and elongation of insulation test (before and after ageing)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย

- 1) เครื่องทดสอบแรงดึง
- 2) เครื่องมือวัดความยืด
- 3) Micrometer

การเตรียมชิ้นทดสอบ

1) ผ่าฉนวนตามแนวแกนและเปิดตัวนำออก ตัดตัวอย่างแต่ละชิ้นให้ขนาดพอเพียงสำหรับการทดสอบ และทำเครื่องหมายที่ชิ้นตัวอย่างและตัวอย่างให้สัมพันธ์กัน เพื่อให้ทราบว่าตัดชิ้นตัวอย่างที่ตัวอย่างใดและสัมพันธ์กันอย่างไร

2) ขัดหรือตัดชิ้นทดสอบจนผิวทั้งสองด้าน ขนานกันในช่วงความยาวพิกัด ในขณะที่ขัดแต่งต้องไม่ให้อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นเกินควร ภายหลังจากขัดหรือตัดความหนาของชิ้นทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 0.80 mm. และไม่มากกว่า 2.0 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นที่เตรียมไว้มาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้น (5 ชิ้นแรกใช้ในการทดสอบความต้านแรงดึงก่อนเร่งอายุการใช้งาน 5 ชิ้นที่เหลือใช้ทดสอบหลังเร่งอายุการใช้งาน)

4) ทำขีดเครื่องหมาย 2 แห่ง ห่างกัน 20 mm. เป็นความยาวพิกัดตรงความยาวของชิ้นทดสอบ

5) นำชิ้นทดสอบมาวัดความหนาและความกว้างโดยใช้ Micrometer แล้วคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ จะคำนวณจากค่าความกว้างและความหนาดำสุด ที่ได้จากการวัดชิ้นทดสอบ 3 ครั้ง ระหว่างขีดเครื่องหมาย (กรณีที่มีข้อสงสัยในเรื่องความสม่ำเสมอของความกว้าง ให้วัดความกว้างที่ผิวของชิ้นทดสอบทั้งสองด้าน เป็นความกว้างของแต่ละตำแหน่ง ค่าที่น้อยที่สุดของพื้นที่หน้าตัด 3 ค่าที่หาได้ จะนำไปคำนวณหาความต้านแรงดึง ซึ่งในการวัดความหนาและความกว้างให้คิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 5.19 การใช้ Micrometer วัดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 5.20 ระยะห่างของขีดเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ

การทดสอบความต้านแรงดึงและยืดของฉนวนก่อนเร่งอายุการใช้งาน

1) ก่อนการทดสอบการต้านแรงดึงจะต้องเก็บชิ้นทดสอบทั้งหมดไว้ที่อุณหภูมิ 23±2°C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

2) นำชิ้นทดสอบมาตั้งจนชิ้นทดสอบขาด โดยการทดสอบจะทดสอบที่อุณหภูมิห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) บันทึกค่าแรงดึงและระยะระหว่างขีดเครื่องหมายทั้ง 2 ในขณะที่ฉนวนขาด (ในการทดสอบหากชั้นทดสอบขาดนอกความยาวพิกัดจะไม่นำมาพิจารณา ในกรณีที่ผลการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์อย่างน้อย 4 ค่าให้นำผลจากการวัดระยะที่ชั้นทดสอบขาดมาคำนวณหาความต้านแรงดึงและความยืด แต่ถ้าผลการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์น้อยกว่า 4 ค่าจะต้องทำการทดสอบซ้ำ)

4) นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาความต้านแรงดึงและความยืด

การรายงานผลการทดสอบ

ให้รายงานผลการทดสอบเป็นค่ามัธยฐาน โดยคำนวณความต้านแรงดึงและความยืดดังนี้

$$TS = \frac{F}{A} \quad (5.4)$$

เมื่อ TS คือ ความต้านแรงดึง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

F คือ ค่าของแรงที่วัดได้ขณะที่ชั้นทดสอบขาด หน่วยเป็นมิลลิเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชั้นทดสอบ หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

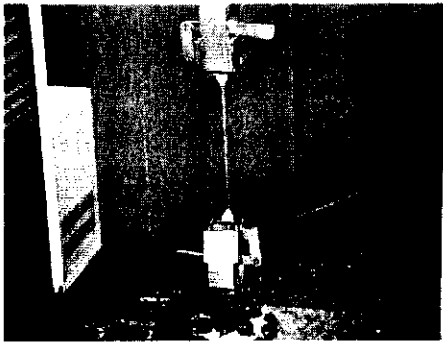
$$EL = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (5.5)$$

เมื่อ EL คือ ความต้านแรงดึง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

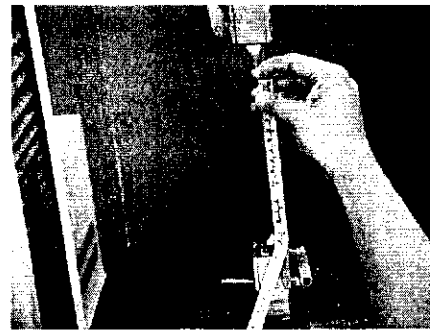
$L_0$  คือ ความยาวพิกัดเดิมของชั้นทดสอบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

$L_1$  คือ ความยาวของชั้นทดสอบขณะที่ขาด หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

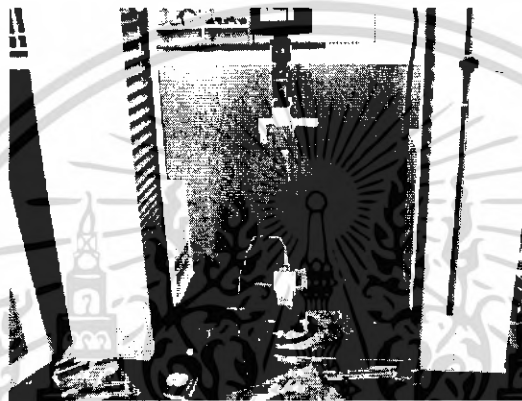
โดยผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] กำหนด Tensile strength ต้องมากกว่า 12.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และElongationขณะชั้นทดสอบขาดต้องมากกว่า 200 %



ก)



ข)



ค)

**รูปที่ 5.21** การทดสอบการต้านแรงดึงของฉนวนก่อนเร่งอายุการใช้งาน

- ก) การจับชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบ
- ข) การวัดระยะความยืดของชิ้นทดสอบ
- ค) การตั้งชิ้นทดสอบจนขาด

การทดสอบการต้านแรงดึงและความยืดของฉนวนหลังเร่งอายุการใช้งาน  
เครื่องมือ

- 1) ตู้อบ
- 2) Micrometer
- 3) เครื่องทดสอบแรงดึง

การเตรียมชิ้นทดสอบ

การเตรียมชิ้นทดสอบและการหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ จะเหมือนกับการทดสอบ  
ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนเร่งอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

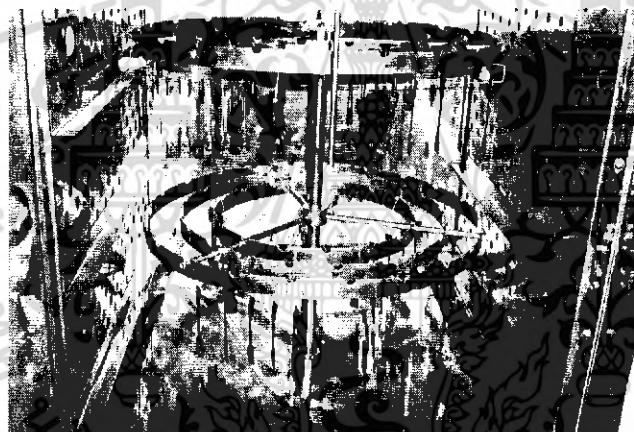
## วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะแขวนชิ้นทดสอบทั้ง 5 ชิ้นในแนวตั้งภายในตู้อบ โดยให้อยู่บริเวณกลางตู้อบ โดยให้ชิ้นตัวอย่างห่างกันอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร อบชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 135638C เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทดสอบอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นทดสอบไปทดสอบความต้านแรงดึงและความยืดเหมือนการทดสอบความต้านแรงดึงและยืดของฉนวนก่อนเร่งอายุการใช้งาน

## การรายงานผลการทดสอบ

การรายงานผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าความต้านแรงดึงและความยืดให้เช่นเดียวกับการทดสอบความต้านแรงดึงและความยืดก่อนเร่งอายุการใช้งานของฉนวน

โดยผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [13] (2005) กำหนด Tensile strength หลังเร่งอายุการใช้งานสูงสุด 625% และElongation หลังเร่งอายุการใช้งานขณะชิ้นทดสอบขาดสูงสุด 625%



รูปที่ 5.22 การอบชิ้นทดสอบ

### 5.3.4 การตรวจสอบความหนาของฉนวนและเปลือก

#### เครื่องมือ

กล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องฉายหน้าตัดข้าง (profile projection) ที่มีกำลังขยายอย่างน้อย 10 เท่า และวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีข้อสงสัยให้ใช้การวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีการอ้างอิง

#### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างจากปลายสายด้านหนึ่งของสายไฟฟ้า ปอกสิ่งห่อหุ้มภายนอกออกไม่ใหฉนวนเสียหาย ด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม ถ้าตัวกันตัวนำและฉนวนเป็นแบบติดกันก็ไม่ต้องเอาออก ตัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนเป็นแผ่นบางตามระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของตัวนำ ถ้าการทำเครื่องหมายของฉนวนเป็นเหตุที่ทำให้ความหนาของฉนวนลดลง ให้ใช้ฉนวนตรงที่มีเครื่องหมายนั้นเป็นชั้นทดสอบ

#### วิธีการทดสอบ

1) ถ้าผิวภายในและภายนอกของชั้นทดสอบเป็นวงกลมเรียบสม่ำเสมอ ให้วัดความหนา 6 ครั้ง ที่ระยะตามแนวเส้นรอบวงเท่าๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.24 ก)

2) ถ้าผิวภายในของชั้นทดสอบไม่เรียบแต่ผิวภายนอกเรียบ ให้วัดความหนา 6 ครั้งตามรูปที่ 5.24 ข) (โดยการวัดในข้อ 1 และ 2 จุดแรกที่วัดต้องเป็นจุดที่มีความหนาฉนวนต่ำสุด)

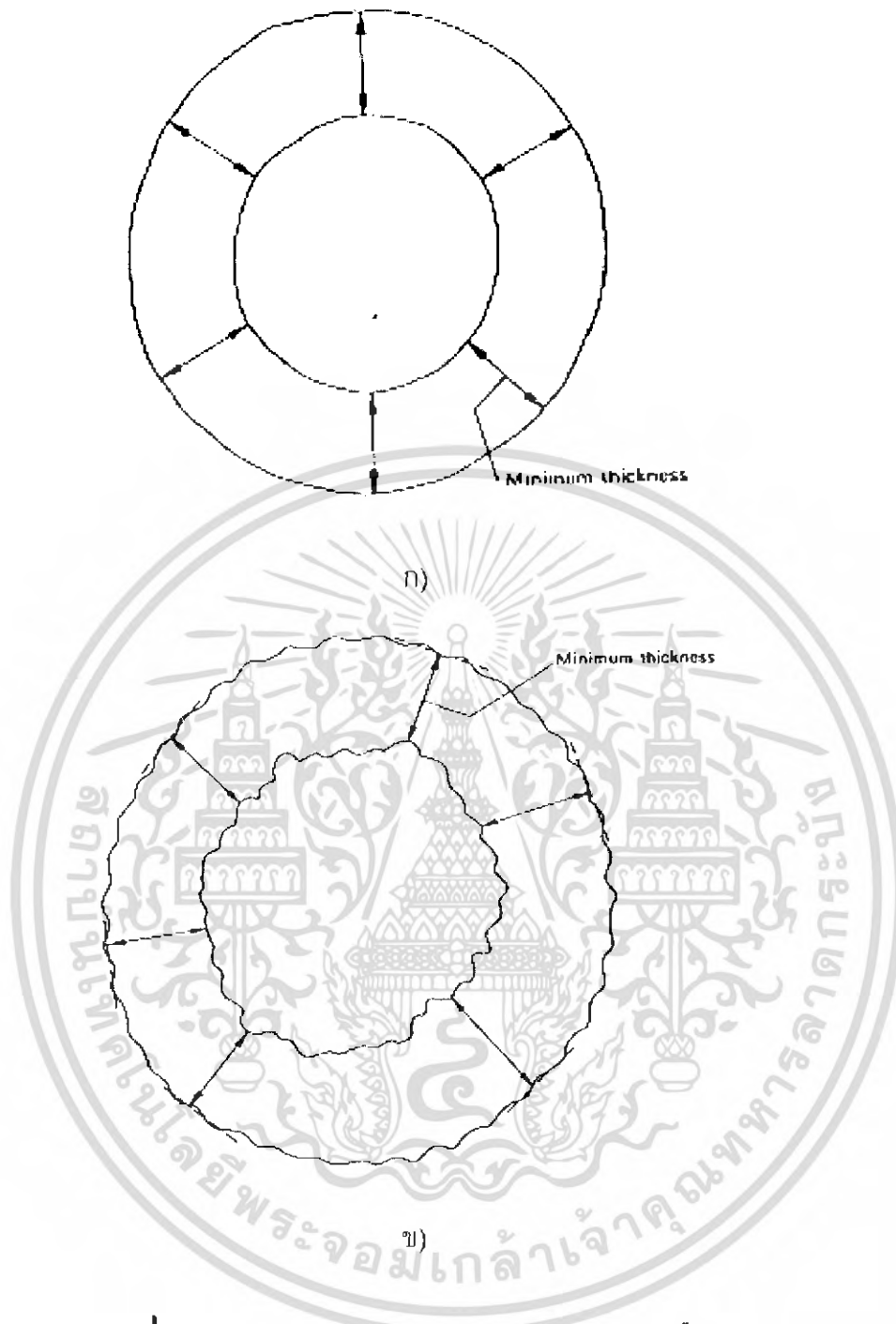
3) ในกรณีที่ตัวกันตัวนำและฉนวนไม่สามารถแยกออกได้ การวัดจะไม่รวมความหนาของตัวกัน

4) ทำการวัดความหนาสูงสุดของฉนวน

#### การรายงานผลการทดสอบ

การรายงานผลการทดสอบให้รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจาก 6 ค่า ความหนาของฉนวนต่ำสุด ความหนาของฉนวนสูงสุด และความแตกต่างระหว่างความหนาของฉนวนต่ำสุดและความหนาของฉนวนสูงสุดที่วัดได้ ซึ่งได้มาจากชั้นทดสอบ โดยคิดทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วปัดเหลือทศนิยม 1 ตำแหน่ง

**รูปที่ 5.23** ตัวอย่างชั้นทดสอบความหนาของฉนวนและเปลือก



**รูปที่ 5.24** การตรวจสอบความหนาของฉนวนและเปลือก

- ก). กรณีที่ผิวภายในและภายนอกของชั้นทดสอบเป็นวงกลมเรียบสม่ำเสมอ  
 ข). กรณีที่ผิวภายในและภายนอกของชั้นทดสอบไม่เป็นวงกลมเรียบสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.25** ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบความหนาของฉนวนและเปลือก

### 5.3.5 การทดสอบสภาพด้านทานของตัวกันที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

เครื่องมือ

เครื่องวัดความต้านทาน

การเตรียมชิ้นทดสอบ

จะทำการตัดสายเคเบิลตัวอย่างยาว 150 มิลลิเมตร และเตรียมตัวอย่างก่อนและหลังเร่งอายุการ

ใช้งานตามรูปที่ 5.26

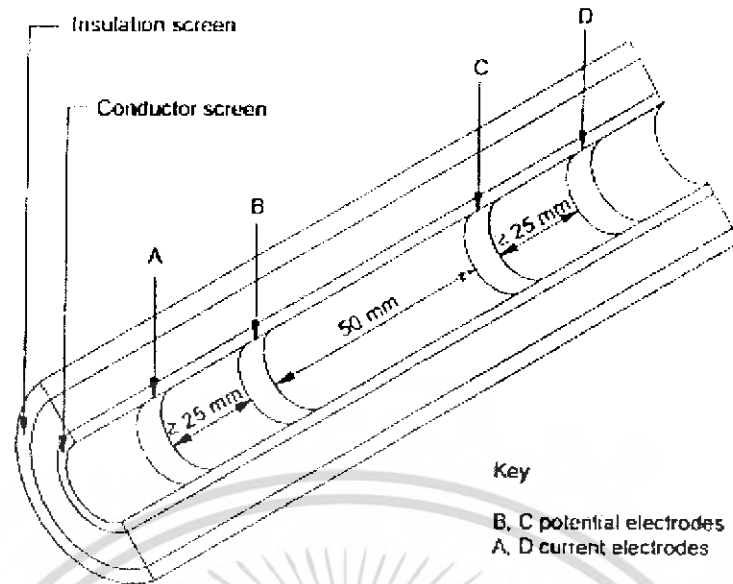


**รูปที่ 5.26** การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสภาพด้านทานของตัวกันที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

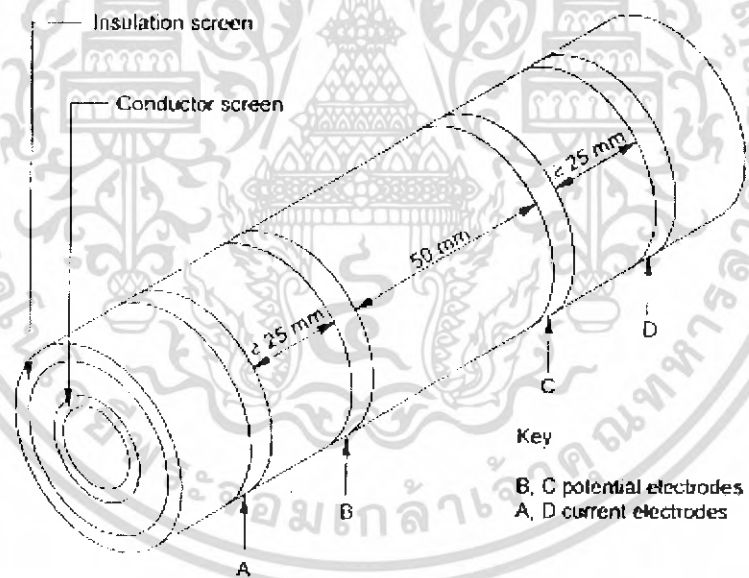
ก) ชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานของตัวกันตัวนำ

ข) ชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานของตัวกันฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานของตัวกั้นตัวนำ



รูปที่ 5.28 ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานของตัวกั้นฉนวน

วิธีการทดสอบ

1. ทำขั้วไฟตามตำแหน่ง A B C และ D ตามรูปที่ 5.27 และ 5.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เชื่อมต่อขั้วไฟกับชั้นทดสอบที่เตรียมไว้ โดยต้องใช้ตัวหนีบที่เหมาะสม ในการต่อขั้วไฟฟ้ากับตัวกันตัวนำ ต้องทำให้แน่ใจว่า ตัวหนีบได้รับการป้องกันไม่ให้สัมผัสหรือมี ฉนวนกันกับตัวกันของฉนวนที่ผิวด้านนอกของชั้นทดสอบ

3. นำชั้นทดสอบเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 62 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที สภาพความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าต้องวัดโดยวงจรที่มีกำลังไม่เกิน 100 มิลลิวัตต์

4. หลังจากวัดค่าทางไฟฟ้า ให้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันตัวนำ และของฉนวน ความหนาของตัวกันตัวนำและของฉนวน ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ให้ใช้ค่าเฉลี่ย จากการวัด 6 ครั้ง

5. การคำนวณสภาพต้านทาน ( $\rho$ ) หน่วยเป็น โอห์ม.เมตร จากสูตร

ตัวกันตัวนำ

$$\rho_c = \frac{R_c \times \pi \times (D_c - T_c) \times T_c}{2L_c} \quad (5.6)$$

เมื่อ  $\rho_c$  คือ สภาพต้านทานเชิงปริมาตร เป็นโอห์ม.เมตร

$R_c$  คือ ความต้านทานที่วัดได้ เป็นโอห์ม

$L_c$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า A และ B เป็นเมตร

$D_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันตัวนำ เป็นเมตร

$T_c$  คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวกันตัวนำ เป็นเมตร

ตัวกันฉนวน

$$\rho_i = \frac{R_i \times \pi \times (D_i - T_i) \times T_i}{2L_i} \quad (5.7)$$

เมื่อ  $\rho_i$  คือ สภาพต้านทานเชิงปริมาตร เป็นโอห์ม.เมตร

$R_i$  คือ ความต้านทานที่วัดได้ เป็นโอห์ม

$L_i$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า B และ C เป็นเมตร

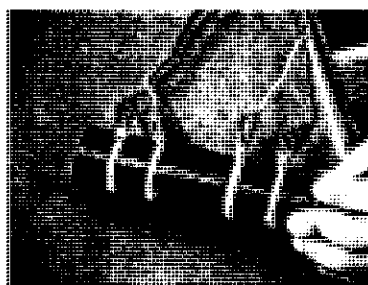
$D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวกันฉนวน เป็นเมตร

$T_i$  คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวกันฉนวน เป็นเมตร

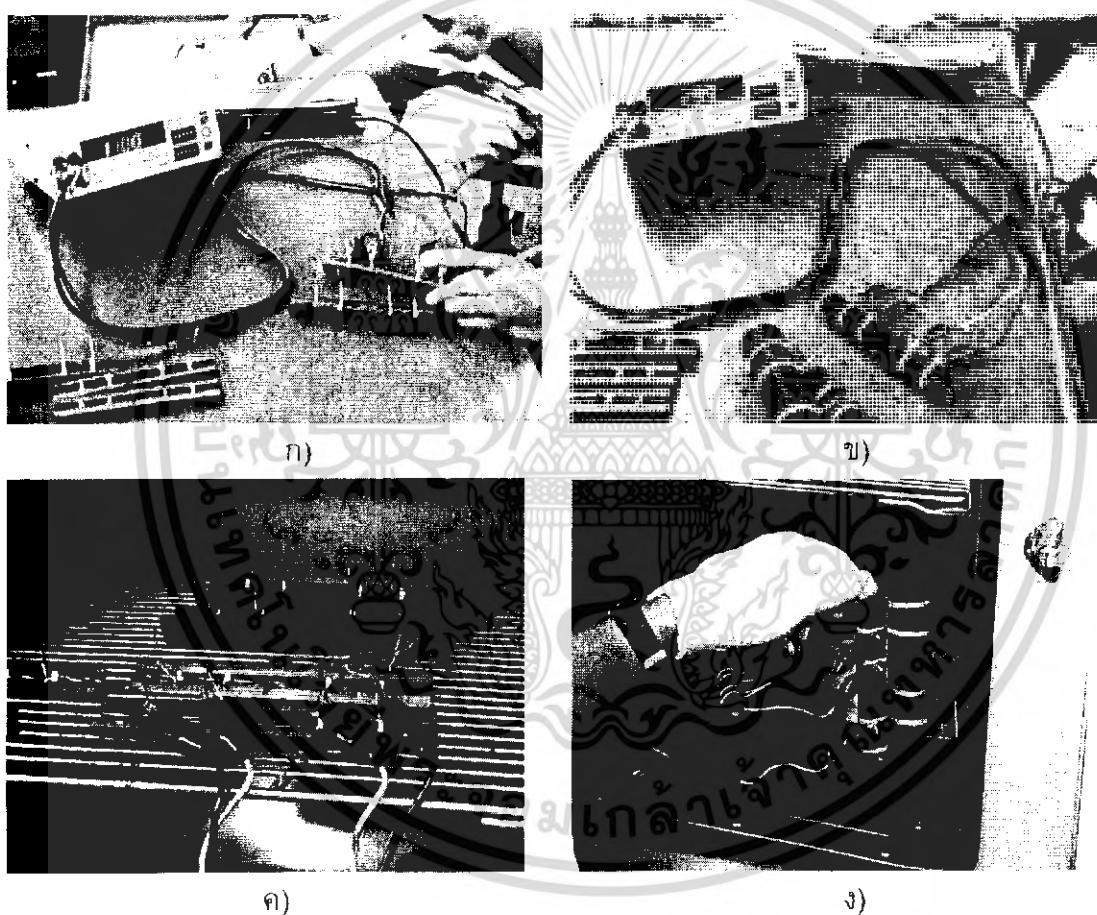
### การรายงานผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะรายงานผลการทดสอบเป็นโอห์ม.เมตร



**รูปที่ 5.29** ลักษณะของการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าทดสอบสภาพต้านทานของตัวกั้นฉนวน



**รูปที่ 5.30** การทดสอบสภาพต้านทานของตัวกั้นที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

- ก) การทดสอบสภาพความต้านทานของตัวกั้นตัวนำ
- ข) การทดสอบสภาพความต้านทานของตัวกั้นฉนวน
- ค) การทดสอบสภาพความต้านทานของตัวกั้นตัวนำในตู้อบ
- ง) การทดสอบสภาพความต้านทานของตัวกั้นฉนวนในตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างของสายเคเบิล

#### การตรวจสอบตัวนำ

เป็นการตรวจสอบที่ทำหลังจากกระบวนการผลิต เพื่อตรวจดูตัวนำว่าเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่ โดยการทดสอบวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ จะเป็นการวัดเพื่อดูว่าตัวนำ มีขนาดที่เป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ การนับจำนวนตัวนำก็เช่นเดียวกัน จะเป็นการตรวจสอบดูว่า มีจำนวนเส้นลวดตัวนำครบตามที่ออกแบบ และเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

เครื่องมือหรือเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ที่วัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

#### วิธีการทดสอบ

1. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่หน้าตัดเดียวกัน ในแนวตั้งฉากเดียวกัน
2. นับจำนวนเส้นลวด

#### การรายงานผลการทดสอบ

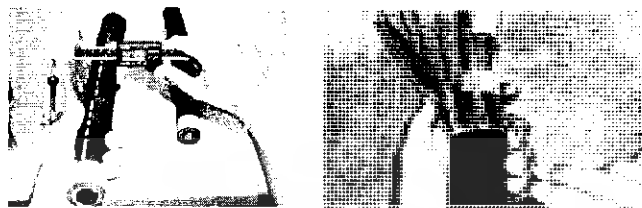
ให้รายงานค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ เป็นค่าเฉลี่ย และจำนวนเส้นลวด



**รูปที่ 5.31** การตรวจสอบตัวนำ ก) การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ข) การนับจำนวนเส้นลวด

การตรวจสอบมิติของสายเคเบิล (Check of dimension of cable )

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของสายเคเบิลที่ทำการผลิตออกมาว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ เช่น การวัดขนาดของสาย การนับจำนวนของ copper wire screen เป็นต้น



ก)

ข)



ค)

**รูปที่ 5.32** การตรวจสอบมิติของสายเคเบิล ก) การวัดขนาดสายเคเบิล ข) การนับจำนวนของ copper wire screen ค) การวัดขนาดของเส้น copper wire screen

#### 5.4 ตัวอย่างของปัญหาที่พบในกระบวนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน

จากการที่ได้ไปศึกษาดูงานกระบวนการทดสอบจริงในโรงงานอุตสาหกรรม พบปัญหาเกิดขึ้นในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน ของสายเคเบิลพิกัด 12/20(24) kV ขนาด 400 sq.mm โดยเกิดการเบรกดาวนของฉนวน XLPE ในลักษณะที่เป็น “treeing” ซึ่งเป็นการเกิดเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ในฉนวนแข็ง โดยจะเกิดการดิสชาร์จหลายครั้งในแนวเส้นเดียวกัน แต่มีลักษณะเป็นหลายแนวเส้นทาง จากการดิสชาร์จหลายครั้งดังแสดงในรูปที่ 5.34 ซึ่งการเบรกดาวนจะเกิดผ่านฉนวนแล้ววิ่งเข้าหาชั้นเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งการเกิดเบรกดาวนนี้อาจมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

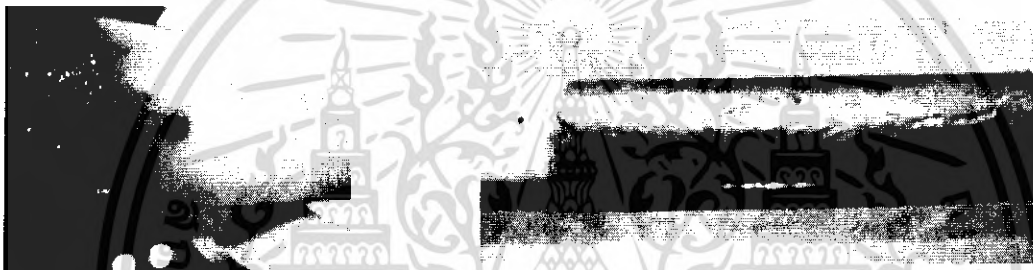
1) กระบวนการผลิต ฉนวนเกิดมีฟอง โพรงก๊าซ หรือมีสิ่งเจือปนในกระบวนการหล่อหุ้มฉนวนของสายเคเบิล เช่น เศษผง เซมิคอนดักเตอร์ หรือเศษทองแดงที่เป็นลักษณะของปลายแหลมที่ทิ่มเข้าไปภายในฉนวน XLPE ของสายเคเบิล ทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในฉนวนเกิดขึ้น

2) การเตรียมชิ้นทดสอบ โดยเกิดจากการที่ฉนวนภายนอกเกิดความเสียหาย มีรอย ซึ่งเกิดมาจากการปอกสายเคเบิล ในขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ จนเป็นสาเหตุของการเบรกดาวนดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.33** การเกิดเบรกดาว์นของสายเคเบิลในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน



**รูปที่ 5.34** ลักษณะของการเบรกดาว์นของฉนวนสายเคเบิล

### 5.5 การทดสอบหัวต่อสายเคเบิลแรงสูงแบบน้ำมัน

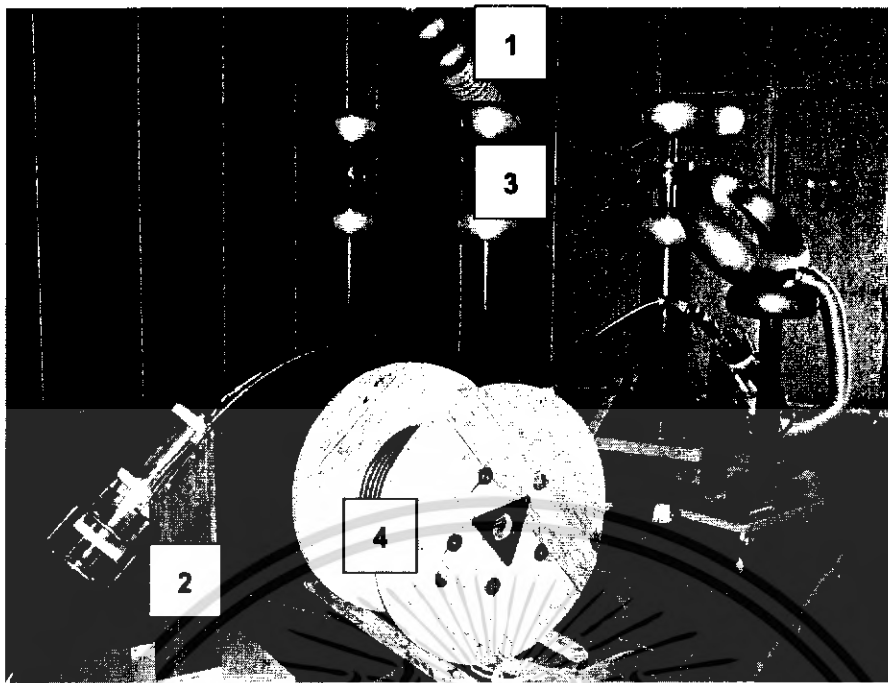
การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าหัวต่อสายเคเบิลที่ออกแบบ และจัดสร้างขึ้นมานี้ สามารถนำมาใช้เพื่อทำการทดสอบสายเคเบิลได้จริง โดยจะใช้การเปรียบเทียบผลของการทดสอบค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนของสายเคเบิลระหว่างหัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันของโรงงานผลิตสายเคเบิลกับค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่ได้มาจากการใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่จัดสร้างขึ้นมา ซึ่งในการทดสอบจะทำไปพร้อมกับการทดสอบแรงดันไฟฟ้า เพื่อดูว่าหัวต่อสายเคเบิลที่ออกแบบ สามารถทนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานได้หรือไม่

#### 5.5.1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้า

- 1) การทดสอบแรงดันไฟฟ้าใช้อุปกรณ์และวงจรการทดลองดังแสดงใน

รูปที่ 5.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.35** การทดสอบแรงดันไฟฟ้า ทำการทดลองที่ห้องทดสอบโรงงานผู้ผลิต

เมื่อ 1 คือ หม้อแปลงทดสอบ 100 kVA

2 คือ หัวต่อสายเคเบิลแรงสูงแบบน้ำมัน

3 คือ LC Filter

4 คือ สายเคเบิลทดสอบ

**ตารางที่ 5.3** ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

แรงดันทดสอบ (KV)	ผลการทดสอบ
5	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
10	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
15	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
20	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
25	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
30	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
35	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
40	ไม่เกิดการเบรกดาวน์
42	ไม่เกิดการเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2) การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน ในการทดสอบนี้จะต้องวงจรการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

1) วงจรการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น

- การทดลองหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ ดังแสดงวงจรการทดลองในรูปที่ 5.35

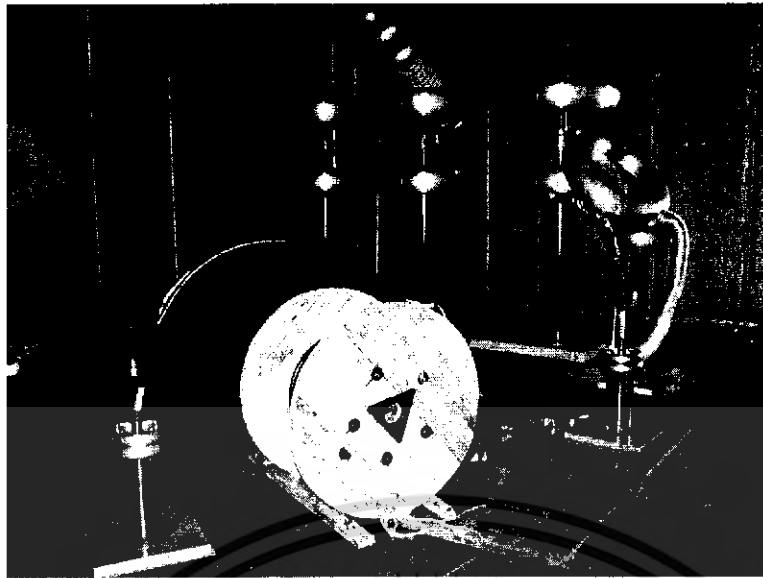
- การทดลองหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันของโรงงานผู้ผลิต ดังแสดงวงจรการทดลองในรูปที่ 5.36

- การทดลองหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ของโรงงานผู้ผลิต ดังแสดงวงจรการทดลองในรูปที่ 5.37

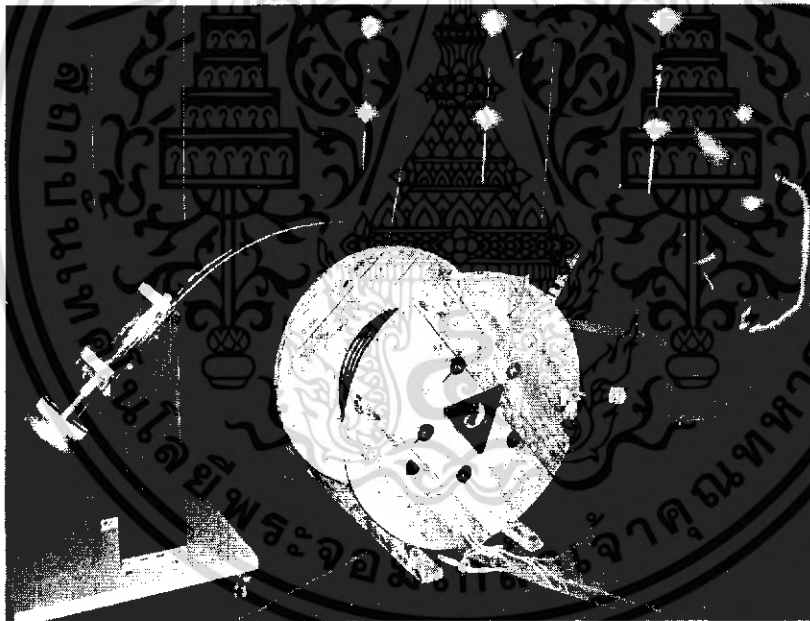
- การทดลองหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ที่จัดทำขึ้นมารวมกับซิลด์ของโรงงานผู้ผลิต ดังแสดงวงจรการทดลองในรูปที่ 5.38

2) วิธีการทดลอง จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ให้กับตัวนำของสายเคเบิลทดสอบ ที่  $2U_0$  เป็นเวลา 10 วินาที แล้วค่อยๆลดแรงดันจนเหลือ  $1.7U_0$  ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60502-2 [13] โดยมีสภาพแวดล้อมขณะทำการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิห้องทดสอบมีค่าเท่ากับ 29 องศาเซลเซียส แล้วบันทึกผลการทดลอง

3) ผลการทดสอบ ค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนแสดงในตารางที่ 5.4

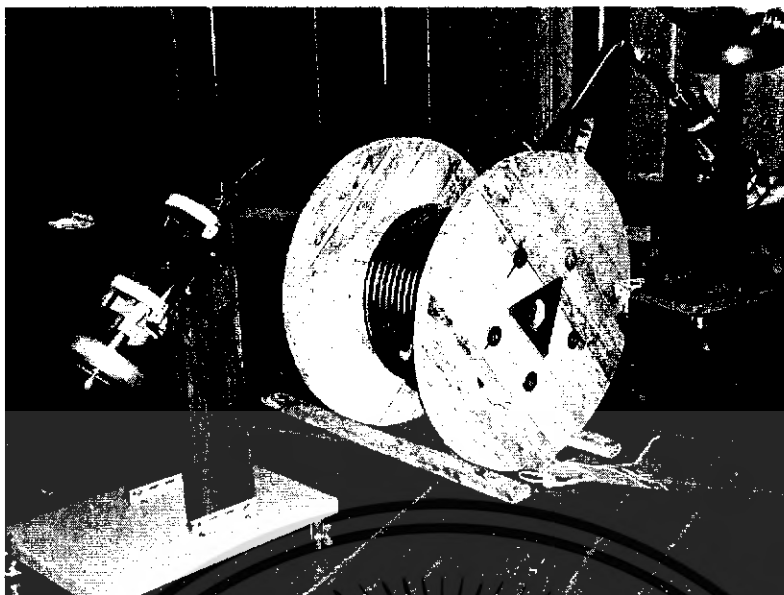


**รูปที่ 5.36** วงจรการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมัน  
ของโรงงานผู้ผลิต

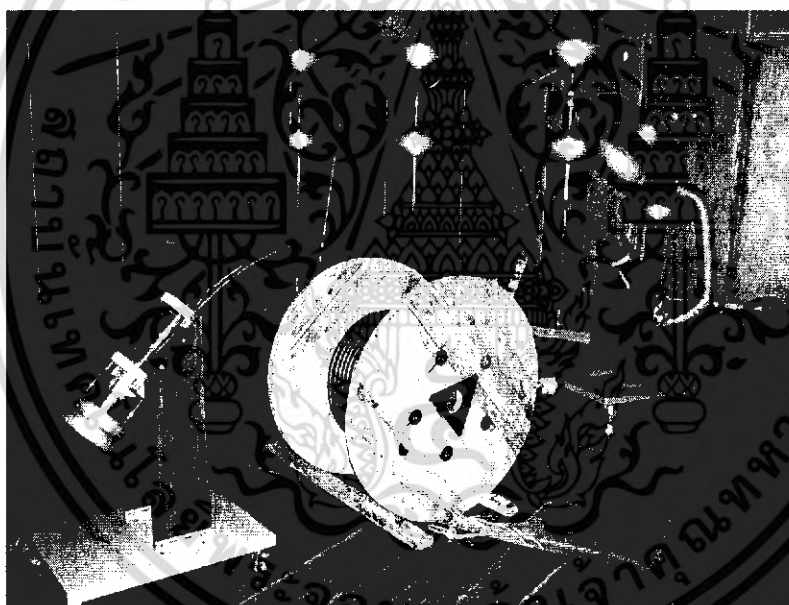


**รูปที่ 5.37** วงจรการทดสอบหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบ  
น้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ของโรงงานผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

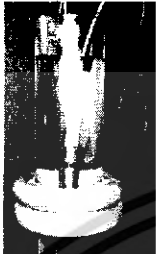
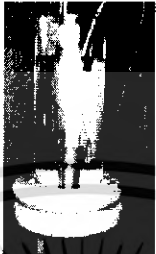










ข)

**รูปที่ 5.38** วงจรการทดสอบหาค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยใช้หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบ แต่ใช้ซิลด์ที่จัดทำขึ้นมา ร่วมกับซิลด์ของโรงงานผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 5.4** ค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนของการทดสอบหัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมัน

หัวต่อสายเคเบิล แบบน้ำมัน	ซีลด์		ค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน (pC)	
	ด้านแรงสูง	ด้านกราวด์	ที่ $2U_0$ (24kV)	ที่ $1.73U_0$ (21kV)
โรงงานผู้ผลิต			1.1-1.2	1.1-1.2
ออกแบบเอง			5-11	3.6
			3.2	2.8
			2.4-2.6	2.1-2.3
			2.7-2.8	1.9-2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า หัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบมาสามารถทนพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ตามจุดประสงค์ โดยได้ออกแบบมาเพื่อนำมาทดสอบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 12/20(24) kV ซึ่งต้องสามารถทนแรงดันทดสอบได้อย่างน้อย  $3.5U_0$  (42 kV) ในส่วนของการนำหัวต่อสายเคเบิลที่ออกแบบ มาทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับหัวต่อสายเคเบิลของทางบริษัทผลิตสายเคเบิล ซึ่งใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกันในการทดสอบพบว่า ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน มีความแตกต่างกันในระดับที่ยอมรับได้ โดยที่ผลการทดสอบสายเส้นดังกล่าวด้วยหัวน้ำมันที่ออกแบบมา และหัวต่อน้ำมันของโรงงานผลิตสายไฟ ผ่านการทดสอบด้วยกันทั้งคู่ ตามที่มาตรฐานการทดสอบสายกำหนด แต่ค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่ได้จากหัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่ออกแบบจะมีค่ามากกว่าของทางบริษัท ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการออกแบบและจัดสร้างซิลด์ที่ไม่ดีพอ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องของงบประมาณ เพื่อเป็นการยืนยันว่า สมมุติฐานที่ตั้งไว้จึงมีการนำซิลด์ของทางบริษัทมาใช้แทนซิลด์ที่ได้ออกแบบมา แล้วดูผลของค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วน จากผลการทดลองในตารางจะเห็นว่าค่าการคายประจุไฟฟ้าบางส่วนมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

ในการผลิตสายเคเบิลกระบวนการทดสอบเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก ภายหลังจากกระบวนการผลิตแล้วเสร็จ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าสายเคเบิลที่ผลิตออกมานั้น เป็นไปตามข้อกำหนด ข้อตกลงตามที่ลูกค้าต้องการ และต้องอยู่ในมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับ หรืออาจเป็นไปตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ เช่น ในประเทศไทย ก็จะมีสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม เป็นผู้ออกกฎเกณฑ์ ในกระบวนการผลิตและทดสอบ ซึ่งจากการที่ได้ศึกษากระบวนการทดสอบ และเยี่ยมชมกระบวนการทดสอบจริงพบว่า

1) ในโรงงานผลิตสายเคเบิลแต่ละแห่งนั้น จะมีกระบวนการผลิตและทดสอบที่คล้ายคลึงกัน แต่อาจจะมี ความแตกต่างกันตรงที่อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต และทดสอบสายเคเบิล เทคโนโลยีใหม่ๆ ที่เข้ามาในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้กระบวนการผลิตและทดสอบมีความรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้โดยง่าย

2) บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ ที่จะสามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และทดสอบนั้นยังมีอยู่น้อย ที่มีอยู่ก็อาศัยประสบการณ์และการสอบถามจากผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญเท่านั้น เมื่อเกิดปัญหาหน้างานจริงเกิดขึ้น เช่น เกิดในกระบวนการทดสอบก็ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นได้

3) ในการผลิตสายเคเบิลนั้น ลูกค้าหรือผู้สั่งซื้อนั้น เป็นผู้กำหนดความต้องการให้ผลิต แต่อย่างไรก็ตามต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ขึ้นอยู่กับว่าสายเคเบิลนั้นจะนำไปใช้ที่สถานที่ใด

4) จากการที่ได้ศึกษามาตรฐาน ยังพบว่ากระบวนการทดสอบหลายๆหัวข้อ ยังมีความไม่ชัดเจน ทำให้หลายกรณีมีการตีความหมายในการทดสอบ ไม่เป็นไปตามที่จุดมุ่งหมายของมาตรฐานบัญญัติไว้ อีกทั้งยังเป็นช่องทางหนึ่งที่ทำให้กระบวนการทดสอบไม่เป็นไปโดยสมบูรณ์ เมื่อสายผ่านการทดสอบแล้วนำไปติดตั้งทำให้เกิดปัญหาตามมา

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการศึกษากระบวนการทดสอบควรเป็นการศึกษาที่เน้นเฉพาะการทดสอบใดการทดสอบหนึ่งโดยตรง เพื่อที่จะได้มีความรู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน เช่น การศึกษาการเกิด partial discharge ในสายเคเบิล เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ผลของการทดสอบได้ ว่าสายเคเบิลนั้นผ่านการทดสอบหรือไม่ หากไม่ผ่านการทดสอบ เป็นผลมาจากสาเหตุใด สาเหตุเกิดจากกระบวนการผลิต หรือเกิดสาเหตุจากกระบวนการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สำหรับหัวต่อสายเคเบิลแบบน้ำมันที่จัดสร้างขึ้น ควรมีการจัดสร้างซิลด์ขึ้นมาใหม่ เพื่อให้หัวต่อสายมีผลการทดสอบใกล้เคียงกับหัวต่อสายที่มีอยู่ในโรงงาน สามารถที่จะนำมาทดสอบเพื่อเป็นกรณีศึกษา เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

3) ศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการเกิด partial discharge ในสายเคเบิล แต่ละแบบเพื่อเป็นกรณีศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พิสิทธิ์ ธีรวติน, "การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินระดับพิกัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [2] คำรณ หยตหยาด และ คณะ, "โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาาระบบไฟฟ้าใต้ดิน," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
- [3] ชัยสิทธิ์ เนียมถนอม เสกสรร ระวัง และ อนวัช แห่คำ, "การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้คอมพิวเตอร์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
- [4] กวี นำพาเจริญ ดนุวัต แซ่โจ้ว และ ตลภูว์ เก่งวินิจ, "การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิล," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [5] เฉลิมชัย ศิระพรหม อนุชิต ศิริวิทย์ปรีชา และ อภินันท์ พูลเพิ่ม, "เทคนิคการทดสอบความคงทนของฉนวนสายไฟฟ้าแรงสูง," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
- [6] อุทัย ทาสี และ คณะ, " การศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอโดยใช้โปรแกรม FEM," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547
- [7] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [8] กิติพงษ์ พิบูลย์ และ คณะ, "การพัฒนาห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อรองรับการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [9] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล, "การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [10] Naidu. M.S, V. Kamaraju. High voltage engineering, Electric insulators and insulation Breakdown (Electricity), New Delhi : ata McGraw-Hill, 1982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] วิบูล เขมวังสถุขย์. อุปกรณ์ส่งจ่ายไฟฟ้า การออกแบบและระบบป้องกัน, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2532
- [12] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก.2202-2547 สายไฟฟ้าแรงสูงหุ้มด้วยฉนวนครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดตั้งแต่ 60 กิโลโวลต์ ถึง 115 กิโลโวลต์
- [13] IEC 60502-2. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV) Part 2: Cables from rated voltages from 6 kV ( $U_m=7.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV), 2005
- [14] IEC 183 Guide to the selection of high – voltage cables, 1984
- [15] IEC 60502-1. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV) Part 1 : Cables from rated voltages from 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 3 kV ( $U_m=3.6$  kV) , 2004
- [16] IEC 60228. Conductors of insulate cables, 2004
- [17] IEC 60230 Impulse tests on cables and their accessories, 1966
- [18] IEC 60060 -1 High-voltage test techniques Past 1: General definition and test requirements, 1989
- [19] IEC 60840 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m=36$  kV) up to 150 kV ( $U_m=170$  kV) – Test methods and requirements, 2004
- [20] IEC 60885 -3. Electrical test methods for electric cables. Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables, 1988
- [21] IEC 60811-1-1 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables and optical cables. Part 1-1: Methods for general application - Measurement of thickness and overall dimensions - Test for determining the mechanical properties, 2001
- [22] IEC 60811-2-1 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables and optical cables. Part 2-1: Methods specific to elastomeric compounds - Ozone resistance, hot set and mineral oil immersion tests, 2001
- [23] IEC 60811-1-2 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables. Part 1-2: Methods for general application – Thermal ageing methods, 1985
- [24] IEC 60811-1-3 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables and optical cables. Part 1-3: General application – Methods for determining the density – Water absorption tests – Shrinkage tests, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] IEC 60811-3-2 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables. Part 3-2: Methods specific to PVC compounds – Loss of mass test – Thermal stability test, 1985



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

**ตารางที่ ก.1** ข้อกำหนดของการทดสอบฉนวนผสม

รายละเอียด	หน่วย	EPR	HEPR	XLPE
การทดสอบการทนความร้อน				
– อุณหภูมิ (ความคาดเคลื่อน $\pm 3^{\circ}\text{C}$ )	$^{\circ}\text{C}$	250	250	250
– ระยะเวลาที่ถ่วงน้ำหนัก	min	15	15	15
– ความเค้นทางกล	$\text{N/cm}^2$	20	20	20
ความยืดขณะถ่วงน้ำหนัก	%	175	175	175
ความยืดเมื่อเย็นตัว	%	15	15	15

**ตารางที่ ก.2** ข้อกำหนดของการทดสอบคุณสมบัติของเปลือก elastomeric

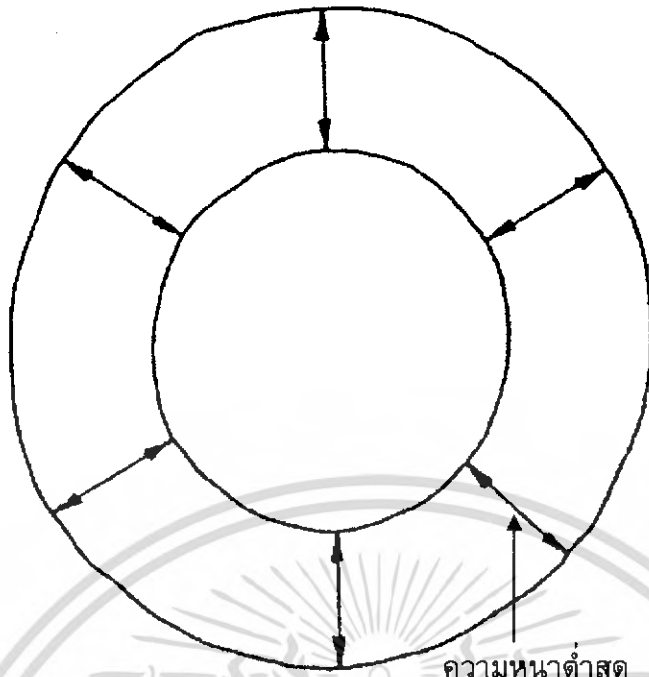
รายละเอียด	หน่วย	SE <sub>1</sub>
การทดสอบการทนความร้อน		
– อุณหภูมิ (ความคาดเคลื่อน $\pm 3^{\circ}\text{C}$ )	$^{\circ}\text{C}$	200
– ระยะเวลาที่ถ่วงน้ำหนัก	min	15
– ความเค้นทางกล	$\text{N/cm}^2$	20
ความยืดขณะถ่วงน้ำหนัก	%	175
ความยืดเมื่อเย็นตัว	%	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

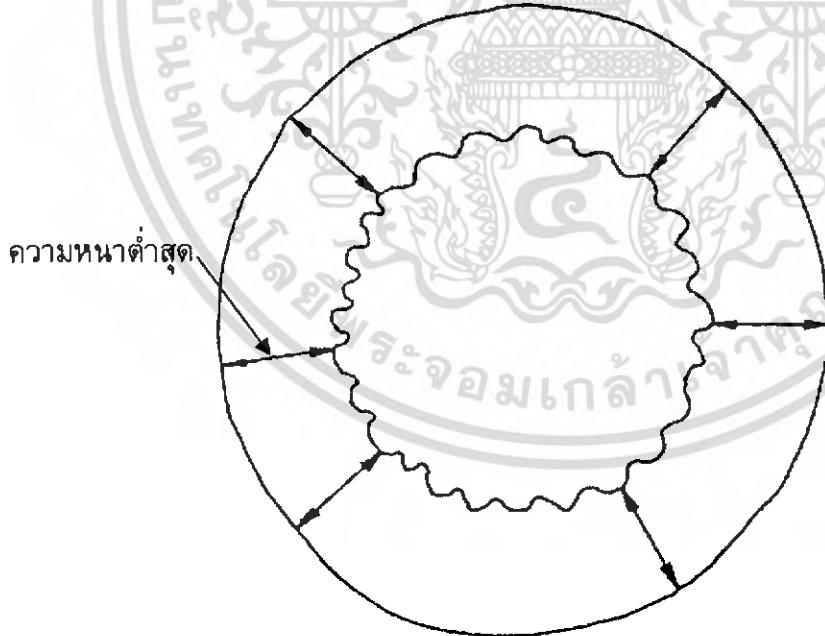
**ตารางที่ ก.3** คุณลักษณะทางกลและคุณลักษณะเฉพาะของฉนวนและเปลือก

รายละเอียด	หน่วย	ชนิดฉนวน		ชนิดของเปลือก	
		XLPE	PVC (ST <sub>2</sub> )	PE (ST <sub>7</sub> )	
ก่อนอบเร่งอายุการใช้งาน					
ความต้านแรงดึง ต่ำสุด	N/mm <sup>2</sup>	12.5	12.5	12.5	
ความยืดจนขาด ต่ำสุด	%	200	150	300	
หลังอบเร่งอายุการใช้งาน					
การอบ – อุณหภูมิที่ใช้ออบ	°C	135	100	100	
– เกณฑ์ความคาดเคลื่อน	°C	± 3	± 2	± 2	
– ระยะเวลาที่อบ	d	7	7	10	
ความต้านแรงดึง					
– ต่ำสุดหลังอบเร่งอายุการใช้งาน	N/mm <sup>2</sup>	-	12.5	-	
– ความเปลี่ยนแปลง	%	± 25	± 25	-	
ความยืดจนขาด					
– ต่ำสุดหลังอบเร่งอายุการใช้งาน	%	-	150	300	
– ความเปลี่ยนแปลง	%	± 25	± 25	-	
การทดสอบแรงกดที่อุณหภูมิสูง					
อุณหภูมิที่ทดสอบ	°C	-	90	110	
เกณฑ์ความคาดเคลื่อน	°C	-	± 2	± 2	
ปริมาณคาร์บอนแบล็ค					
ค่าที่ระบุ	%	-	-	2.5	
เกณฑ์ความคาดเคลื่อน	%	-	-	± 0.5	
การสูญเสียมวลของเปลือก					
พอลิไวนิลคลอไรด์					
การอบ – อุณหภูมิที่ใช้ออบ	°C	-	100	-	
– เกณฑ์ความคาดเคลื่อน	°C	-	± 2	-	
– ระยะเวลาที่อบ	d	-	7	-	
การสูญเสียมวลสูงสุดที่ยอมรับได้	mg/cm <sup>2</sup>	-	1.5	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

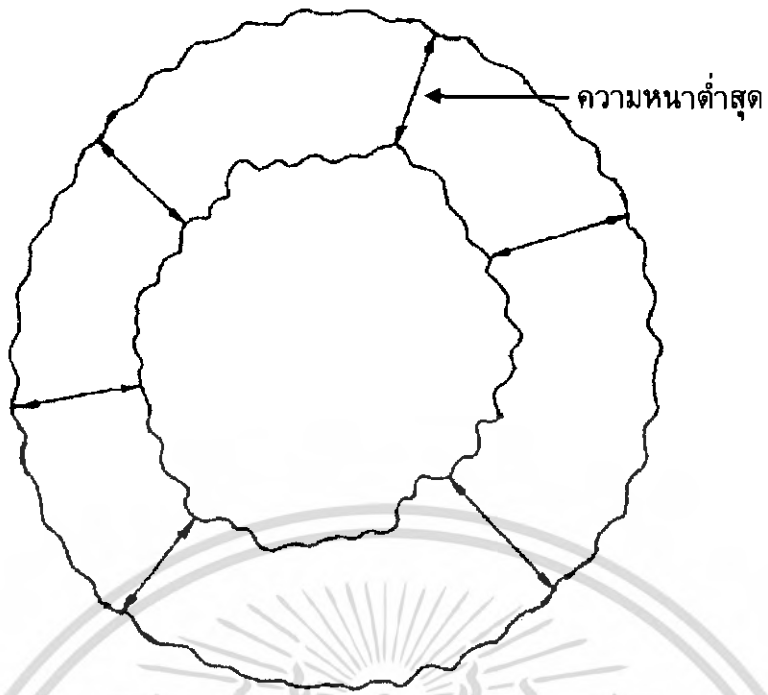


**รูปที่ ก.1** การตรวจสอบความหนาของฉนวนหรือเปลือก

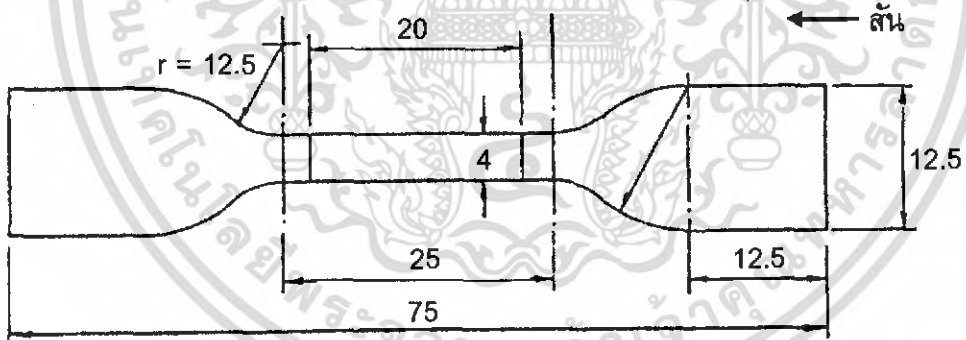


**รูปที่ ก.2** การตรวจสอบความหนาของฉนวนหรือเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

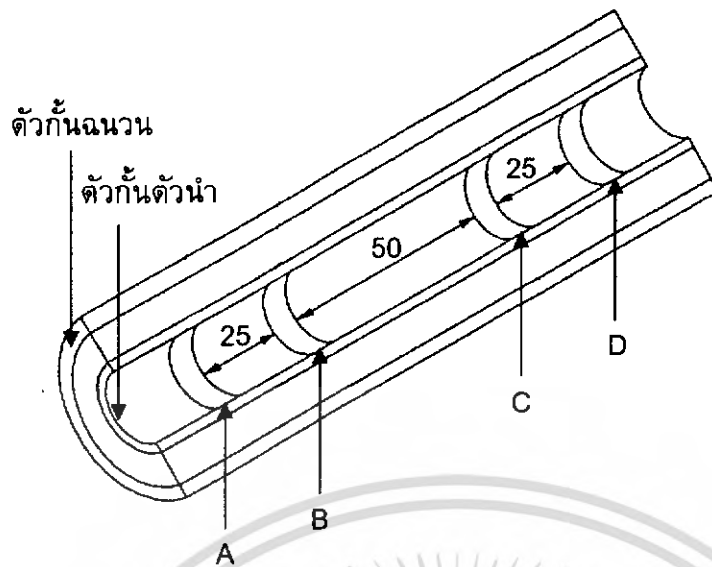


**รูปที่ ก.3** การตรวจสอบความหนาของฉนวนหรือเปลือก



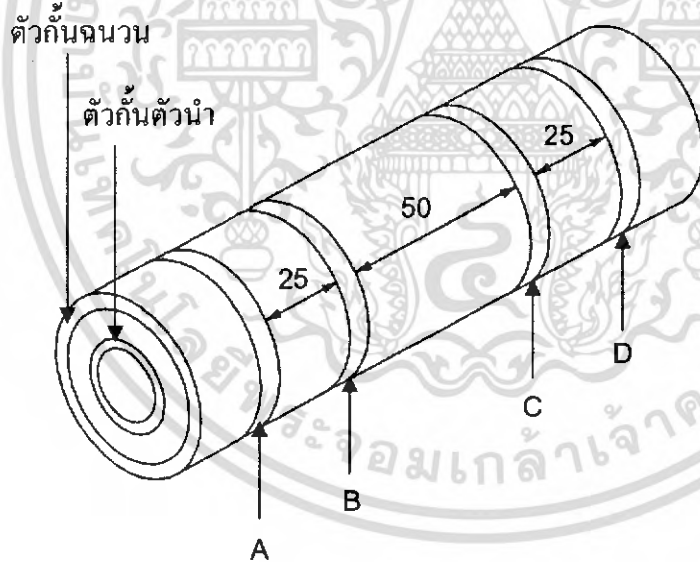
**รูปที่ ก.4** ชั้นทดสอบรูปตั้มบี้เบลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ก.5** การทดสอบความต้านทานของตัวกั้นตัวนำ

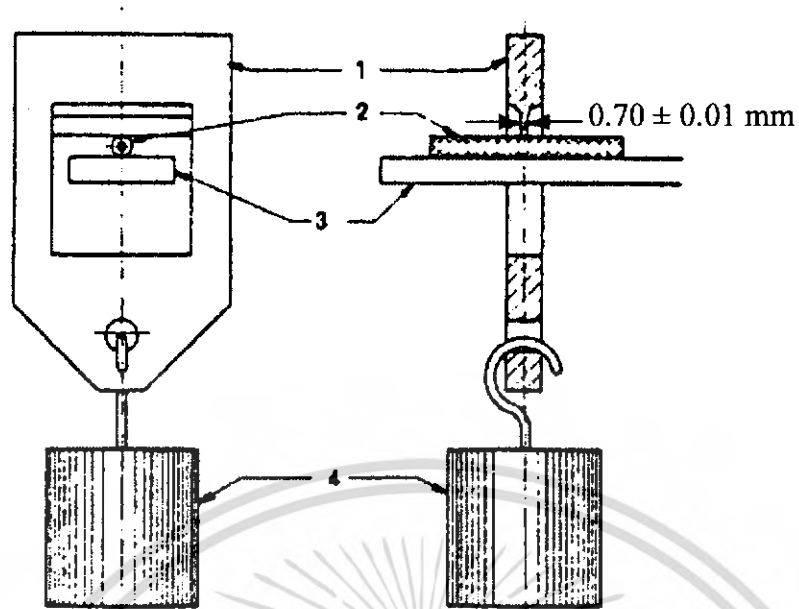
เมื่อ B, C คือ ขั้วความต่างศักย์  
A, D คือ ขั้วกระแสไฟฟ้า



**รูปที่ ก.6** การทดสอบความต้านทานของตัวกั้นฉนวน

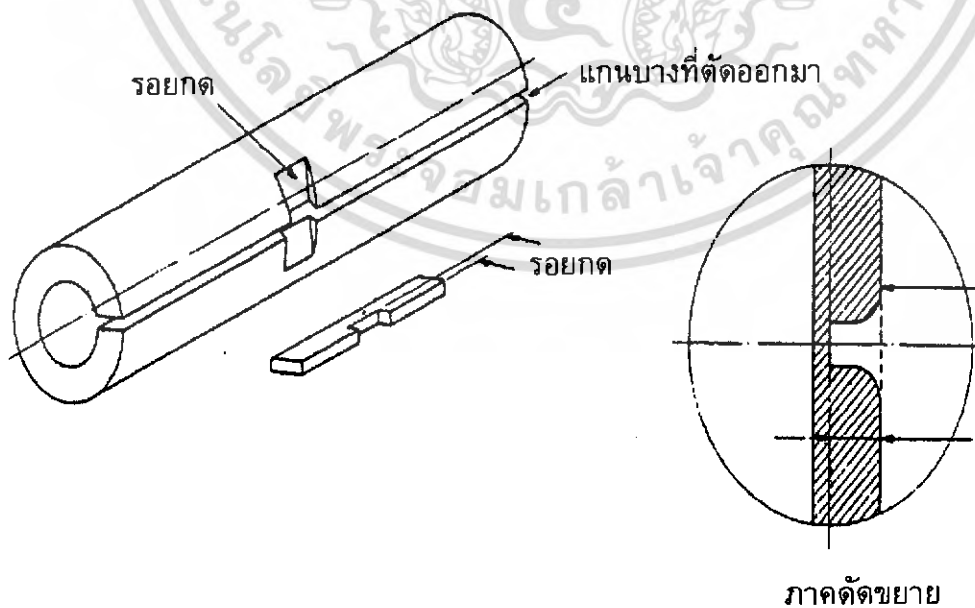
โดยที่ B, C คือ ขั้วความต่างศักย์  
A, D คือ ขั้วกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



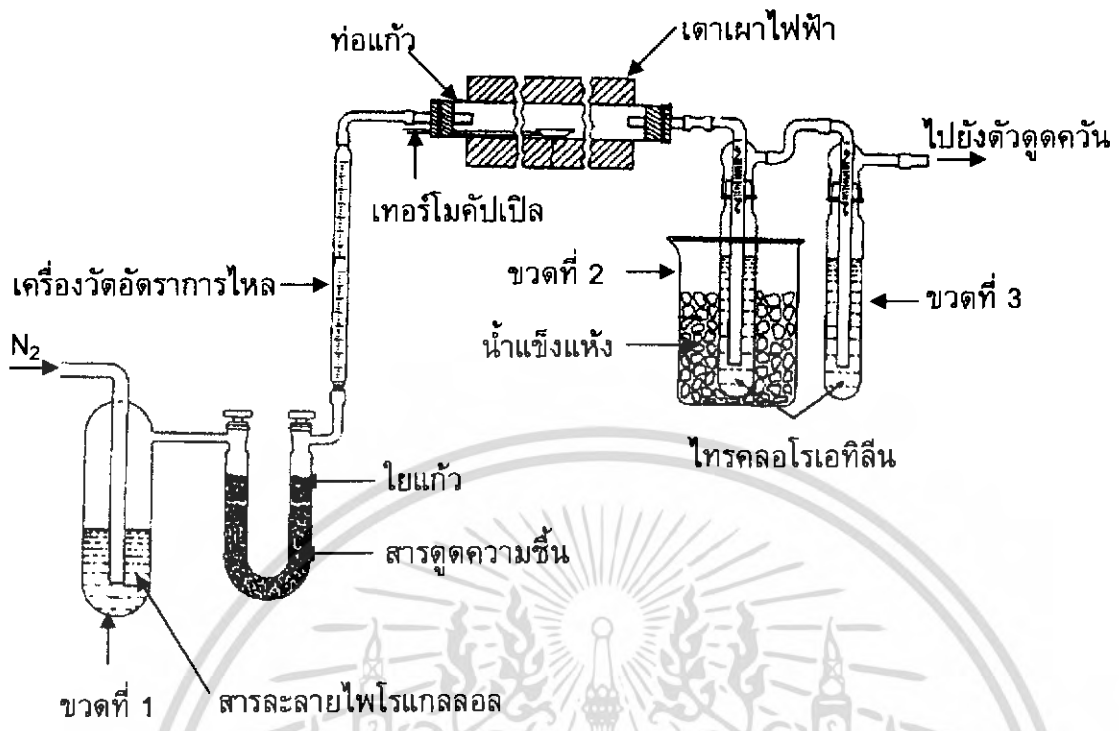
**รูปที่ ก.7** เครื่องทดสอบการเปลี่ยนรูปขณะมีแรงกดที่อุณหภูมิสูง

- โดยที่ 1 คือ ไบมีด  
 2 คือ ชั้นทดสอบ  
 3 คือ ที่รองรับ  
 4 คือ ลูกตุ้มน้ำหนัก



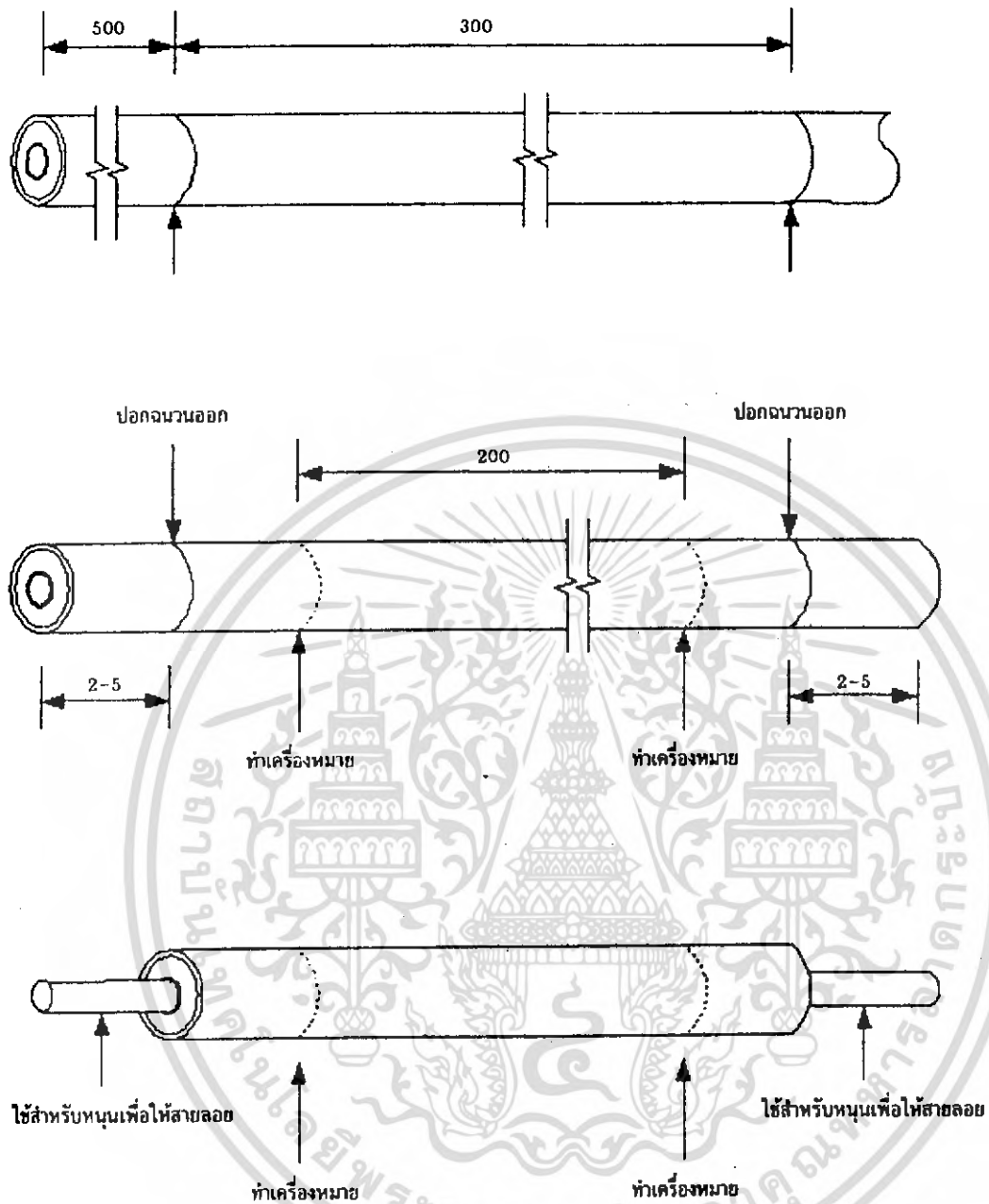
**รูปที่ ก.8** การวัดรอยกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ก.9** การทดสอบจำนวนคาร์บอนแบล็กในเปลือกพอลิเอทิลีน

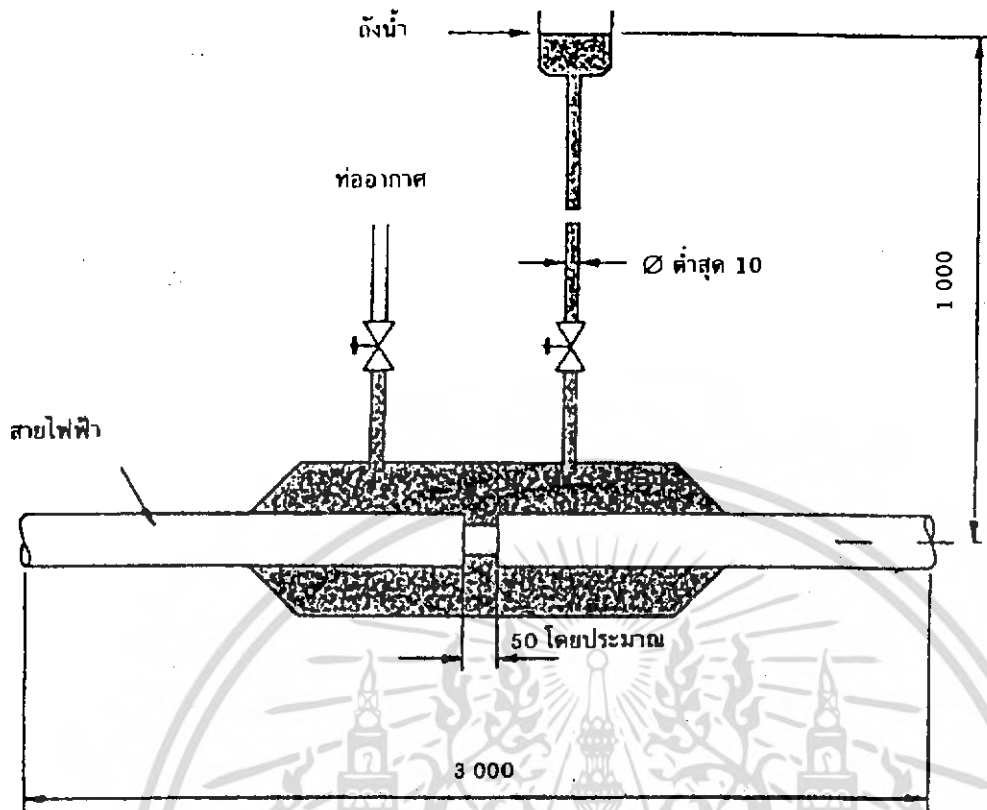
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

**รูปที่ ก.10** การทดสอบการหดตัวของฉนวนครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 การทดสอบการซึมของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้