



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวน

A Study of Tracking on Insulating Surface

นามผู้วิจัย นางสาวอนงค์พันธุ์ แม่นอิม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รับราชการแทน

หัวหน้าภาค

( อาจารย์วินัย พุกกะวัน, Dr.Ing )

( อาจารย์ปานจิต คำรงกุลกำจร, Ph.D. )

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ. ....

**สิงสิงณี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวน

A Study of Tracking on Insulating Surface

โดย

นางสาวอนงค์พันธุ์ แม้นอ้ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนงค์พันธุ์ แม่น้อม 2553: การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิว  
ฉนวน ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วินัย พลฤกษ์วัน,  
Dr.Ing. 96 หน้า

งานวิจัยนี้ นำเสนอการศึกษาผลลัพธ์จากพฤติกรรมของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิว  
ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยผลจากการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้านั้น ได้กลายเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้  
เกิดความเสียหายต่อฉนวนนั้นคือ การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน (Tracking)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM : D  
2303 (Reapproved 2004) โดยทดสอบด้วยวิธี Incline-Plane Tracking (IPT) Test แบบ Time-to-  
Track ซึ่งได้ทำการทดสอบวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ โดยวางไว้บนแผ่นเอียง  $45^\circ$  ที่ต่อเข้ากับ  
วงจรไฟฟ้า และใช้สารละลายที่มีความนำไฟฟ้าหยดไหลผ่านผิวฉนวน จากนั้นทำการจ่ายแรงดัน  
ทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนขึ้นบนผิวฉนวนและเกิดเป็นรอยไหม้ในที่สุด

ผลการทดสอบที่ได้จัดเก็บเป็นข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบความคงทนต่อการเกิดรอย  
ไหม้บนผิววัสดุทดสอบในแต่ละประเภท และนำมาใช้ประโยชน์ในการประมาณอายุการใช้งาน  
ของฉนวน เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ต่อไป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Anongpun Man-im 2010: A Study of Tracking on Insulating Surface.

Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering,

Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Winai Plueksawan, Dr. Ing.

96 pages.

This Paper presents the result from partial discharge behavior on insulating surface, which deteriorate surface of materials and causes insulating surface tracking.

This study was referred to the ASTM : D 2303 (reapproved 2004) standard. By Inclined-Plane Tracking (IPT) Test with time-to-track method, which tested insulating material placed on the plate inclined at 45° from the horizontal. The specimen was connected to electrical circuit and contaminant solution was dropped on the specimen surface and then voltage was applied until surface tracking occurred on the specimen surface.

The results were recorded to compare the tracking strength of each material and estimate the life of the tested materials for using in suitable electrical equipments.

---

Student's signature

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ดร.วินัย พุกกะวัน ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร. เกียรติยุทธ กวีญาณ กรรมการสาขาวิชาเอก ในการให้คำแนะนำการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานที่ห้องทดสอบบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบและอำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้าน

สุดท้าย กราบขอบพระคุณคุณตา คุณยาย บิดา มารดา พี่ชาย และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

อนงค์พันธุ์ แม่น้อม

เมษายน 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	49
ผล	49
วิจารณ์	79
สรุปและข้อเสนอแนะ	92
สรุป	92
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์ และความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของ ตัวอย่างวัสดุฉนวนแรงดันไฟฟ้า	13
2	อัตราสารละลาย	29
3	ข้อมูลเวลาการทดสอบของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 "	50
4	ข้อมูลเวลาการทดสอบของ ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC	54
5	ข้อมูลเวลาการทดสอบของ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 " ฟันสีสเปรย์สี ขาว	58
6	ข้อมูลเวลาการทดสอบของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC 3/4 " ฟันสีฉนวน	62
7	ระยะเวลาความเสียหายจากการทดสอบของวัสดุทดสอบ	81
8	สรุปอายุการใช้งานโดยประมาณของวัสดุทดสอบต่างๆ	82

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Bushing ของหม้อแปลง 230 kV	3
2	ลูกถ้วยและอุปกรณ์สำหรับแขวนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	3
3	ฉนวนหุ้มสายไฟแบบต่างๆ	4
4	ตำแหน่งที่สามารถเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนภายในเนื้อฉนวนที่อยู่ระหว่างสายเปลือยทองแดงและแกนเหล็กที่ต่อลงดิน	7
5	การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนที่ผิวของฉนวนที่อยู่ระหว่างสายเปลือยทองแดงและแกนเหล็กที่ต่อลงดิน	8
6	วงจรมุมของฉนวน	8
7	วงจรมุมของดิสชาร์จไฟฟ้าในช่องว่าง	9
8	ช่องว่างในเนื้อฉนวนจากการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน	9
9	วงจรมุมของช่องว่างในเนื้อฉนวน	10
10	รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าในช่องว่าง	14
11	ลักษณะพัลส์แรงดันที่เกิดดิสชาร์จไฟฟ้า	14
12	กราฟ 3 มิติ ของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน	16
13	ความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ด้านบวกกับพัลส์ด้านลบ และฉนวนที่ทำหน้าที่เป็นแคโทดซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดี และวงจรมุมของ ภาพที่ 13-A, 13-B และ 13-C	17
14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนกับช่วงที่ผิวฉนวนเกิดความเสียหาย	18
15	ปรากฏการณ์กระแสรั่ว และการเกิดอาร์กที่พื้นที่แห้งเล็กๆ	20
16	ลักษณะกราฟลูกคลื่นกระแสรั่ว	23
17	ลักษณะการต่ออุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2303	27
18	ลักษณะอิเล็กโทรดบนตามมาตรฐาน ASTM D2303	28
19	ลักษณะอิเล็กโทรดล่าง และการประกอบเข้ากับตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2303	28
20	การต่อวงจรสำหรับการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้	32
21	กราฟอัตราการไหลของสารละลายที่ต้องการตามการจ่ายแรงดัน	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การสรุปผลของค่าแรงดันเริ่มเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน	35
23	หม้อแปลง : AC High Voltage Tester, Type OT-2A20, Output Voltage 25 kV Max Input Voltage 230 kV 50/60 Hz, Capacity 2 kVA, OTOWA ELECTRIC CO.,L TD	37
24	Oscilloscope : 500 MHz 5 GS/s, Tektronix TDS 3052B, two Channel Color Digital PHOSPHOR OSCILLOSCOPE.	37
25	High Voltage Probe : Tektronix P6015, 1000x 3 pF 100 M $\Omega$ , With dielectric fluid : 40 kV PK, 20 kV DC, Without dielectric fluid : 13 kV PK or DC	38
26	Resistor: 180 k $\Omega$ 225	38
27	ความต้านทานต่อขนานกัน 4 ตัว มีความต้านทานรวม 45 k $\Omega$ 225 W	38
28	Digital Ammeter : Leakage Clam-on Tester CL-613, YOKOGAWA, 300 A max 50/60 Hz	38
29	อุปกรณ์สำหรับวางตัวอย่างทดสอบพร้อมทั้งที่ยึดกรวยแยกที่ใช้สำหรับ สารละลาย	39
30	กรวยแยกใส่สารละลายที่ดัดแปลงโดยนำที่ควบคุมหยดสารละลายของสาย น้ำเกลือมาช่วยควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย	39
31	Conductivity Meter : ที่ใช้วัดค่าความต้านทานของสารละลาย	40
32	นาฬิกาจับเวลา	40
33	อุปกรณ์สำหรับวางแผ่นอะคลิคพร้อมขาตั้งที่ใช้ยึดขวดสารละลาย	41
34	อุปกรณ์ขาตั้งพร้อมแผ่นอะคลิคและที่ยึดจับขวดกรวยแยก	42
35	อุปกรณ์ขวดกรวยแยกพร้อมชุดควบคุมการไหลของสารละลายและที่ยึดจับขวด กรวยแยก	42
36	การหุ้มอิเล็กโทรดสำหรับตัวอย่างทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้	43
37	การเตรียมสารละลายเพื่อทำการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้	45
38	การบันทึกผลการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ด้วยกล้องวีดีโอ	47
39	การต่อวงจรการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ตามภาพที่ 20 หน้า 32	47
40	การต่อวัสดุทดสอบเข้ากับวงจรการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้	48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	ทำการจัดบันทึกผลการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุทดสอบ	48
42	ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4" ที่หุ้มฉนวนก่อนทำการทดสอบ	49
43	ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้น	51
44	ลักษณะรอยไหม้ที่ขยาย 15 เท่า	52
45	ฉนวนชั้นนอกสุดที่ถูกปอกออกจากสายไฟ XLPE	53
46	ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE หุ้มฉนวนก่อน	53
47	ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้น	55
48	ลักษณะรอยไหม้ที่ขยาย 15 เท่า	56
49	ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีสเปรย์ก่อนทำการทดสอบ	57
50	สีสเปรย์สีขาวสำหรับเคลือบรถที่ใช้ฟันตัวอย่างทดสอบ	57
51	ลักษณะรอยไหม้ของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีสเปรย์สีขาว	59
52	ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น	60
53	ลักษณะท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีฉนวนก่อนการทดสอบ	61
54	สีฉนวนสำหรับฟันตัวอย่างทดสอบ	61
55	ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุทดสอบ	63
56	รอยไหม้บนผิววัสดุทดสอบที่ถูกขยาย 15 เท่า	64
57	ลักษณะที่ครอบกันนก Silicone Rubber	64
58	ลักษณะวัสดุที่ครอบกันนกก่อนทำการทดสอบ	65
59	ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนวัสดุที่ครอบกันนก Silicone Rubber	66
60	ลักษณะรอยไหม้ผิวฉนวนที่ครอบกันนก Silicone Rubber ที่ถูกขยาย 15 เท่า	66
61	ลักษณะฉนวน PE ก่อนทำการทดสอบ	67
62	ฉนวน PE ก่อนทำการทดสอบที่ติดฉนวนแล้ว	67
63	ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นบนฉนวน PE	68
64	ลักษณะการสึกกร่อนของฉนวน PE ที่ถูกขยาย 15 เท่า	69
65	ฉนวน XLPE ที่ถูกขัดด้วยกระดาษทรายที่ผิว	69
66	ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิว XLPE	70
67	รอยสึกกร่อนของ XLPE ที่ถูกขยาย 15 เท่า	71

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	ลักษณะฉนวน XLPE ตากแดด 14 วัน ก่อนการทดสอบ	71
69	ลักษณะการลึกร่อนของ XLPE ตากแดด 14 วัน ถูกขยาย 15 เท่า	72
70	ลูกถ้วย HTV	73
71	ลักษณะของลูกถ้วย HTV ก่อนการทดสอบ	73
72	ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนลูกถ้วย HTV	74
73	รอยไหม้บนลูกถ้วย HTV ที่ถูกขยาย 15 เท่า	74
74	ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ	75
75	ลักษณะไลน์ การ์ด ก่อนทำการทดสอบ	75
76	รอยลึกร่อนบนผิวไลน์ การ์ด ถูกขยาย 15 เท่า	76
77	กราฟแนวโน้มเวลาของวัสดุทดสอบในเหตุการณ์เริ่มเกิดดิซชาร์จไฟฟ้า	77
78	กราฟแนวโน้มเวลาของวัสดุทดสอบในเหตุการณ์ที่เกิดรอยไหม้หรือรอยลึกร่อนขยายตัวประมาณ 1 นิ้ว	78
79	ลักษณะเส้นประกายไฟ (ดิซชาร์จไฟฟ้า)	79
80	กราฟแรงดันขณะที่เกิดเส้นประกายไฟ	80

# การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวน

## A Study of Tracking on Insulating Surface

### คำนำ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลลัพธ์จากพฤติกรรมของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยผลจากการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้านั้นได้กลายเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวฉนวนนั่นคือ การเกิดรอยไหม้ (Tracking) บนผิวฉนวน

การศึกษาการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM : D 2303 (Reapproved 2004) โดยทดสอบด้วยวิธี Incline-Plane Tracking (IPT) Test แบบ Time-to-Track ซึ่งได้ทำการทดสอบวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ โดยวางไว้บนแผ่นเอียง  $45^{\circ}$  ที่ต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าและใช้สารละลายที่มีความนำไฟฟ้าหยาบไหลผ่านบนผิวฉนวนจากนั้นทำการจ่ายแรงดันทดสอบ จนกระทั่งเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนขึ้นบนผิวฉนวนและเกิดเป็นรอยไหม้ในที่สุด

ผลการทดสอบที่ได้จัดเก็บเป็นข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุทดสอบในแต่ละประเภท และนำมาประมาณอายุการใช้งานของฉนวน ซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประมาณอายุการใช้งานของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวน และศึกษาความเสียหายเนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับผิวฉนวนนั้นคือ การเกิดรอยไหม้ หรือการเกิดการสึกกร่อนที่ผิวฉนวน โดยทำการทดสอบที่อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D2303 และนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบความสามารถในการทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าของวัสดุทดสอบชนิดต่างๆ รวมทั้งประมาณอายุการใช้งานของวัสดุฉนวนต่างๆ



## การตรวจเอกสาร

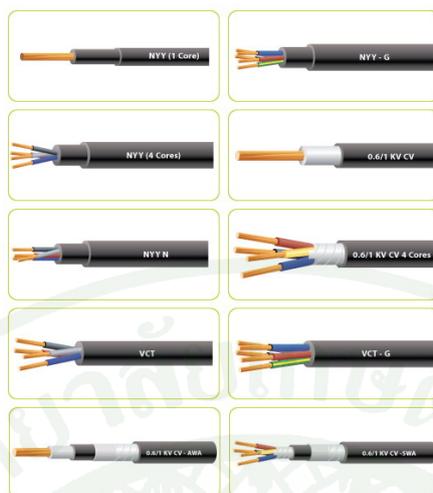
ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงส่วนใหญ่มักถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่อยู่นอกอาคาร เมื่อระยะเวลาผ่านไปมลภาวะของสิ่งแวดล้อมทำให้ฉนวนเหล่านั้นถูกปกคลุมหรือถูกเคลือบด้วยสิ่งสกปรกและสารเคมีต่างๆ มลภาวะที่เคลือบนี้จะไม่ผลอันตรายต่อเมื่อฉนวนอยู่ในสภาพที่แห้ง เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์จำกัดการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าของผิวฉนวนที่แห้งและกระแสรั่ว (Leakage Current, LC) ที่ขนาดเล็กมากได้ไหลข้ามฉนวนได้โดยสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการที่บรรยากาศมีความชื้นจะทำให้สิ่งสกปรกขนาดเล็กๆ บนผิวฉนวนรวมเข้ากับหยดน้ำ และเชื่อมต่อกันระหว่างด้านอิเล็กโทรดแรงดันสูงกับด้านที่ต่อลงดิน เมื่อฉนวนไฟฟ้าเปียกจะเกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าไหลข้ามบนผิวฉนวนได้ ซึ่งความเครียดของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการดิสชาร์จไฟฟ้าขึ้น จนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนคือ การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน (Surface Tracking)



ภาพที่ 1 Bushing ของหม้อแปลง 230 kV



ภาพที่ 2 ลูกถ้วยและอุปกรณ์สำหรับแขวนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



ภาพที่ 3 ฉนวนหุ้มสายไฟแบบต่างๆ

### 1. กระบวนการการเกิดเบรกดาวน์ (Basic Breakdown Processes)

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาการวิจัยได้รวบรวมข้อคิดเห็นต่างๆ เพื่อที่จะชี้ให้เห็นถึงรูปแบบพื้นฐานของการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศดังนี้

#### 1.1 อิเล็กตรอนอิสระเริ่มแรก (Primary electrons)

อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาช่วงเวลาสั้นๆ ในอากาศนั้นจะไม่ใช่เป็นปัจจัยที่ทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกดักจับไว้โดยโมเลกุลอื่น หลังจากการสร้างรังสีคอสมิก หรือ ภายหลังการแผ่รังสี เพื่อโมเลกุลนั้นจะได้อยู่ในรูปของไอออนลบ แต่อย่างไรก็ตาม อิเล็กตรอนเหล่านี้ก็สามารถถูกแยกออกได้อีกจากไอออนลบโดยความเร่ง และการชนกันของโมเลกุลที่เป็นกลางในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง

#### 1.2 ปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน (Ionization)

อิเล็กตรอนที่เป็นอิสระสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้วิ่งชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง จากนั้นอิเล็กตรอนจะค่อยๆ ลดความเร็วลงเท่ากับค่าคงที่ในสนามไฟฟ้าของฉนวน เมื่อมีพลังงานที่เพียงพอ การชนกันของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลที่เป็นกลางอาจจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระได้อีกแล้วเหลือเป็นไอออนบวกไว้ กระบวนการดังกล่าวจะถูกสะสมไว้ทำให้เกิดการก่อตัวของอิเล็กตรอนอิสระอย่างมหาศาล การ

ขยายจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกเหล่านี้ได้กลายเป็นตัวนำเล็กๆ ในอากาศซึ่งไม่ได้นำไปสู่การเกิดเบรกควานซ์ขึ้นในทันทีแต่จะนำไปสู่การคายประจุไฟฟ้าบางส่วน

### 1.3 การกระตุ้น (Excitation)

บริเวณที่อิเล็กตรอนอิสระของอะตอมก๊าซมีพลังงานที่เพียงพอจนสามารถเกิดการไอออไนเซชันบริเวณดังกล่าวได้ ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานต่ำที่มีจำนวนมากจนสามารถกระตุ้นอะตอมก๊าซที่เป็นกลางที่อยู่ใกล้เคียงให้เคลื่อนที่ได้โดยปราศจากการการหลุดของอิเล็กตรอน เมื่ออะตอมจำนวนมากเคลื่อนที่ลงสู่กรวดอะตอมที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้จะปล่อยคลื่นรังสีที่ตาสามารถมองเห็นได้ หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet Light) คุณสมบัตินี้เองที่ถูกใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลายเพื่อชี้ให้เห็นถึงการแสดงออกของปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน

### 1.4 กระบวนการของอิเล็กตรอนอิสระแบบอื่น

อิเล็กตรอนอิสระที่ถูกสร้างโดยการขยายตัวของปรากฏการณ์ไอออไนเซชันในอากาศอาจถูกดักจับและเคลื่อนย้ายออกจากกระบวนการไอออไนเซชันได้ โดยกระบวนการนี้คือ กระบวนการที่ไอออนดึงดูดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจนเป็นไอออนลบ แต่เมื่อสนามไฟฟ้านั้นสูงพอจนอัตราของการเกิดไอออไนเซชันมากกว่าอัตราของกระบวนการดักจับอิเล็กตรอนของอะตอม ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนสุทธิที่เพิ่มจำนวนขึ้นจากการหลุดออกของอิเล็กตรอนจากไอออนลบเกิดขึ้นในขณะเดียวกันเพราะจากการชนของอะตอมที่เป็นกลางด้วยอิเล็กตรอนอิสระ หรือจากการทำปฏิกิริยากับโฟตอน การรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวก และระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบเป็นองค์ประกอบที่เพิ่มขยายขึ้นในกระบวนการเหล่านี้คือ สิ่งที่เกิดขึ้นในก๊าซที่เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน

### 1.5 การเปลี่ยนรูป (Regeneration)

เริ่มแรก Townsend (John Sealy Edward Townsend (7 June 1868-16 February 1957) นักฟิสิกส์คณิตศาสตร์ที่ ทำการศึกษาในเรื่องของความนำไฟฟ้าของแก้ว โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน) ได้อ้างว่าไอออนบวกสามารถเกิดการไอออไนซ์ได้เช่นกัน โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบเพื่อที่จะปล่อยอิเล็กตรอนเพิ่มเติม โดยการแผ่รังสีครั้งที่ 2 ดังนั้นกระบวนการไอออไนเซชันจะสามารถยังคงอยู่และขยายตัวได้อย่างไม่มีกำหนดจนกระทั่งเกิดการเบรกควานซ์ แต่จากการทดสอบต่อมาแสดงให้เห็นว่าการเบรกควานซ์สามารถเกิดได้มากขึ้นอย่างรวดเร็วกว่ากระบวนการดังกล่าวข้างต้น คำอธิบายจึงได้เผยแพร่กับการอ้างที่ว่าไอออนบวกที่เกิดจากการไอออไนซ์เพียงพอต่อการสร้างสนามไฟฟ้า และเมื่อเพิ่มการจ่ายแรงดันเข้าไปทำให้กระบวนการไอออน

ในเซชันก็จะเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระในตอนเริ่มต้นได้ถูกเพิ่มเติมจากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นซึ่งจะทำการแผ่รังสีของโฟตอนจากขั้วลบในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มเพียงพอ เหตุการณ์เหล่านี้เป็นการสะสม และสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ความเข้มของกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวร้อนขึ้นทำให้ความหนาแน่นของอากาศบริเวณนั้นลดต่ำลง ก่อให้เกิดความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอากาศบริเวณนั้นมีค่าความต้านทานที่ต่ำมากทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าบริเวณดังกล่าว

### 1.6 ค่าสนามไฟฟ้าที่ลดลง

จากกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาในข้างต้นทั้งหมดขึ้นอยู่กับกระแสแรงดัน ซึ่งได้ข้อสรุปโดยพลังงานของอิเล็กตรอนและไอออนที่ได้มาระหว่างการชนกัน ดังนั้นอัตราส่วน  $E/N$  โดยสนามไฟฟ้า  $E$  หน่วย  $v/cm$  ต่อ ความหนาแน่นของอากาศ  $N$  หน่วย  $mols/cm^3$  ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ขณะที่การอ้างอิงยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เมื่อการวัดค่าปริมาณพื้นฐาน หน่วยของอัตราส่วน  $E/N$  คือ Townsend (Td) ซึ่งมีค่า  $10^{-7} v \cdot cm^2 / mols$

$$Townsend(Td) = \frac{E(v/cm)}{N(mols/cm^3)} = 10^{-7} v \cdot cm^2 / mols \quad (1)$$

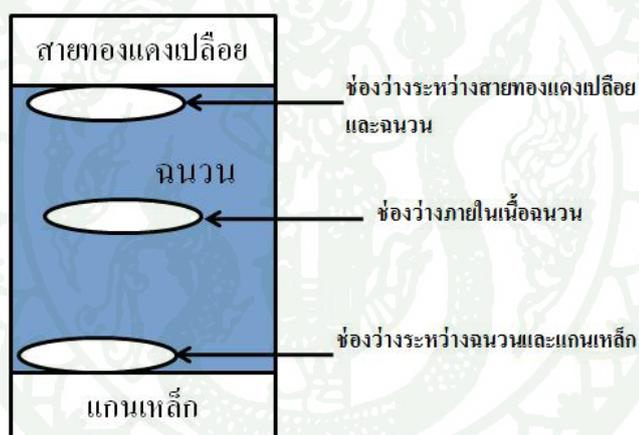
## 2. ดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน (Partial Discharge)

เมื่อบริเวณฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความเครียดทางไฟฟ้าที่บริเวณหนึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ของฉนวน หรือเกิดจากสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณพื้นผิวของฉนวนมีค่ามากจนเกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) คือสภาพอากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนสภาพกลายเป็นตัวนำ ก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์หรือเบรกดาวน์เป็นเพียงบางส่วนดังที่ได้อธิบายไปข้างต้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าพลังงานที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จนั้นมากพอหรือไม่ ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ก็จะกลายเป็นการเกิดดิสชาร์จแบบพัลส์สั้นๆ หรือเรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งเปรียบเทียบกับได้กับการคายประจุไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์พอที่จะเชื่อมกันจนเป็นสะพานระหว่างตัวนำไฟฟ้า ดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าก่อให้เกิดผลในระยะยาวต่อการสึกกร่อน และนำไปสู่ความเสียหายต่อฉนวนไฟฟ้าในที่สุด

การวัดผลของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนได้ถือเป็นมาตรฐานในการทดสอบประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง ปฏิกริยาของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนที่ถูกตรวจจับได้บนอุปกรณ์ที่ใช้งาน

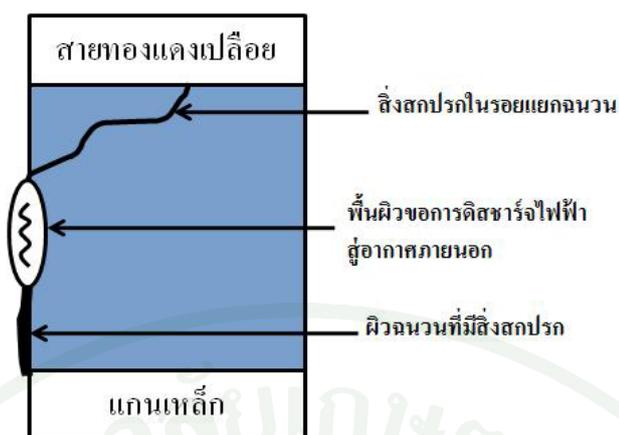
ทำให้ทราบว่า ความเสียหายของฉนวนยังคงมีอยู่ การทดสอบทางด้านวิศวกรรมต่างๆ จะตั้งค่าที่ทนได้สูงสุดสำหรับดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนโดยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบ และวัสดุฉนวนที่นำมาใช้ ขณะที่ระบบฉนวนป้องกันต่างๆ มีการใช้วัสดุโพลิเมอร์ (Polymer) มากขึ้นทำให้ระดับของการดิสชาร์จไฟฟ้าบนฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าน้อยลงด้วย

การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบนฉนวนทั้งระบบฉนวนแข็งและฉนวนของเหลว การเกิดดิสชาร์จนี้เป็นส่วนที่เชื่อมช่องว่างระหว่างฉนวนกับส่วนที่ต่อลงดิน หรือ ระหว่างฉนวนกับฉนวนในทำนองเดียวกันดิสชาร์จไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างตัวนำทองแดง และฉนวน หรือเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนเอง, เกิดระหว่างฉนวนด้านนอกและส่วนที่ต่อลงดิน หรือเกิดขึ้นตามผิวของฉนวน ดิสชาร์จไฟฟ้านับว่าเป็นการเกิดอาร์กขนาดเล็กที่มีผลต่อความเสถียรภาพของฉนวน และท้ายที่สุดจะสามารถทำลายสภาพฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ ดูรายละเอียดภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตำแหน่งที่สามารถเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนภายในเนื้อฉนวนที่อยู่ระหว่างสายเปลือยทองแดงและแกนเหล็กที่ต่อลงดิน (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

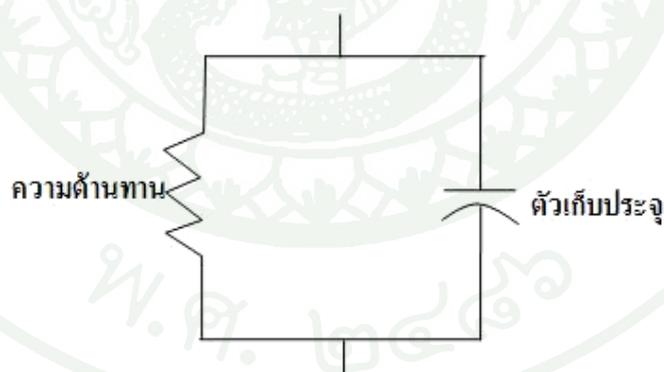
การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนที่บริเวณอื่นคือ การเกิดรอยไหม้ของวัสดุฉนวน การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าเหล่านี้จะสามารถเชื่อมระหว่างด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าและด้านที่ต่อลงดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดูรายละเอียดภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเกิดคายประจุไฟฟ้าบางส่วนที่ผิวของฉนวนที่อยู่ระหว่างสายเปลือยทองแดงและแกนเหล็กที่ต่อลงดิน (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

## 2.1 รูปแบบระบบฉนวน (Insulation System Model)

รูปแบบที่เข้าใจง่ายของระบบฉนวนสามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitance) และความต้านทาน (Resistance) ที่ต่อขนานกัน กระแสจะแยกไหลในส่วนของตัวเก็บประจุและความต้านทานโดยค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คือ สัดส่วนของกระแสทั้งหมดกับส่วนประกอบความต้านทานของกระแส ดูรายละเอียดภาพที่ 6

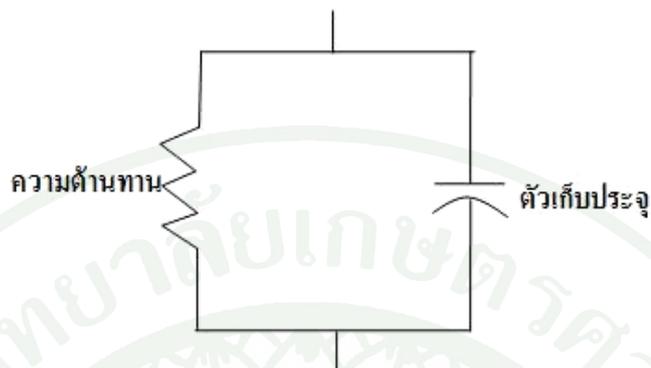


ภาพที่ 6 วงจรสมมูลของฉนวน (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

## 2.2 รูปแบบคายประจุไฟฟ้าในช่องว่าง

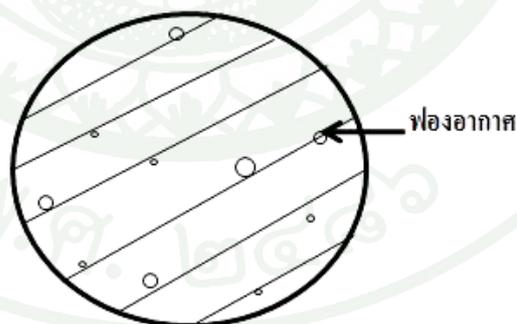
รูปแบบในส่วนของช่องว่างสามารถอธิบายได้ว่าเป็นส่วนประกอบตัวเก็บประจุ จากรูปแบบการขยายตัวของความเสียหาย เนื่องจากช่องว่างเหล่านี้ทำให้เห็นว่าเป็นการเพิ่มความ

ต้านทานให้ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังนั้นรูปแบบของคิซาร์จไฟฟ้าในช่องว่างจึงมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบของจนวน ดูรายละเอียดภาพที่ 7



ภาพที่ 7 วงจรสมมูลของคิซาร์จไฟฟ้าในช่องว่าง (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

จนวนแบบแข็งต่างๆ ถูกผลิตขึ้นเพื่อให้ความเครียดทางไฟฟ้าสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระหว่างตัวนำ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการทำหน้าที่ดังกล่าวเป็นไปได้ยากที่จะสำเร็จได้อย่างแท้จริง เนื่องจากช่องว่างเหล่านี้มักจะถูกเติมด้วยอากาศที่มีความทนต่อการเกิดเบรกดาวนต่ำกว่าจนวนแข็งโดยรอบ และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คองที่ต่ำกว่าจนวนแข็งดังนั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติความเครียดของจนวนขณะที่แรงดันตกคร่อมช่องว่างนั้นอาจจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันเบรกดาวนและเพิ่มค่าเริ่มต้นแรงดันเบรกดาวนในช่องว่างได้ ดูรายละเอียดภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ช่องว่างในเนื้อจนวนจากการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 9 วงจรสมมูลของช่องว่างในเนื้อฉนวน (Colin, 2005)

จากภาพที่ 9 สมมติให้ฉนวนแข็งมีความหนา  $d$  ที่มีช่องว่างอยู่ภายในที่มีความหนา  $t$  และมีพื้นที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า  $A$  โดยวงจรได้ใช้ตัวเก็บประจุ  $C_c$  เป็นเหมือนกับช่องว่าง  $C_b$  เป็นเหมือนกับตัวเก็บประจุของฉนวนที่ต่ออนุกรมกัน และ  $C_a$  คือตัวเก็บประจุของฉนวนในส่วนที่ไม่มีช่องว่าง

กำหนดให้ตัวเก็บประจุ  $C$  มีหน่วยเป็น  $\text{Farads/m}^2$  โดยมีสมการดังนี้

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ในอากาศ =  $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

$\epsilon_r$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพัทธ์ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ในฉนวนของแข็ง

$A$  = พื้นที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า

$d$  = ความหนาของฉนวนของแข็ง

ถ้าสมมติให้อากาศในช่องว่าง (ที่มีความหนา  $t$ ) มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพัทธ์ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ในฉนวนของแข็งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุในช่องว่าง คือ

$$C_c = \frac{\epsilon_0 A}{t} \quad (3)$$

ค่าตัวเก็บประจุในฉนวนของแข็งในส่วนที่ต่อจากช่องว่าง คือ

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-t} \quad (4)$$

ค่าตัวเก็บประจุในฉนวนของแข็ง คือ

$$C_a = \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (5)$$

โดยที่  $\epsilon_r$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพัทธ์ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ในฉนวนของแข็ง จากภาพที่ 9 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_b$  และ  $C_c$  เท่ากันจึงสามารถหาค่า  $V_c$  ได้ดังนี้

$$I_c = I_b \quad (6)$$

$$V_c C_c = (V_a - V_c) C_b \quad (7)$$

$$V_c C_c = V_a C_b - V_c C_b \quad (8)$$

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} V_a \quad (9)$$

แทนค่าตัวเก็บประจุ  $C_b$  และ  $C_c$  ในสมการ (9) จะได้

$$V_c = \left[ \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-t}}{\frac{\epsilon_0 A}{t} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d-t}} \right] V_a \quad (10)$$

$$V_c = \left[ \frac{\frac{\epsilon_0}{d-t}}{\frac{1}{t} + \frac{\epsilon_r}{d-t}} \right] V_a \quad (11)$$

$$V_c = \left[ \frac{1}{\frac{d-t}{\epsilon_r t} + 1} \right] V_a \quad (12)$$

$$V_c = \left[ \frac{1}{t \left( \frac{d}{t} - 1 \right) + 1} \right] V_a \quad (13)$$

$$V_c = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left( \frac{d}{t} - 1 \right)} \quad (14)$$

จาก  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1 d_2}{V_2 d_1} \quad (15)$

ดังนั้น ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องว่าง ( $E_c$ ) คือ

$$\frac{E_c}{E_a} = \frac{V_c d}{V_a t} \quad (16)$$

$$E_c = E_a \frac{d}{t \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left( \frac{d}{t} - 1 \right) \right\}} \quad (17)$$

กำหนดให้ระยะ  $t \ll d$  และ  $\epsilon_r$  มีค่ามากกว่า 1 ทำให้เห็นได้ว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องว่างมากกว่าฉนวน โดยรอบ และตามความจริงค่าคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศในช่องว่างนั้นต่ำกว่าค่าคงทนการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวน ซึ่งทำให้อากาศในช่องว่างจึงไวต่อการเบรกดาวน์ภายใต้การทำงานปกติ จากสมการข้างต้นสามารถแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฉนวนที่ซึ่งทำการทำการคายประจุ  $V_{ai}$  ได้ดังนี้

$$V_{ai} = E_{cb} \left\{ t \frac{d}{t \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left( \frac{d}{t} - 1 \right) \right\}} \right\} \quad (18)$$

โดยที่  $E_{cb}$  = ความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศในช่องว่าง

ในทางปฏิบัติ ช่องว่างในฉนวนแข็งมักจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นสมการสนามไฟฟ้าในช่องว่างคือ

$$E_c = \frac{3\varepsilon_r E_a}{\varepsilon_{rc} + 2\varepsilon_r} \quad (19)$$

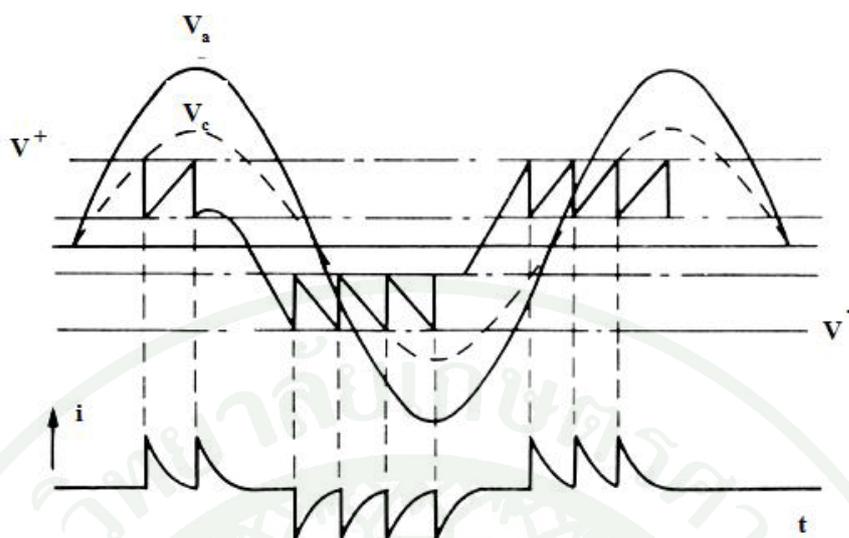
โดย  $\varepsilon_{rc}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ของอากาศในช่องว่าง  
เมื่อ  $\varepsilon_r \gg \varepsilon_{rc}$  จึงประมาณได้ว่า

$$E_c = \frac{3}{2} E_a \quad (20)$$

**ตารางที่ 1** แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์ และความคงทนต่อการเบรกดาวนของตัวอย่างวัสดุ ฉนวนแรงดันไฟฟ้า

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์	ความคงทนต่อการเบรกดาวน (kV mm <sup>-1</sup> )
อากาศ (บรรยากาศโลก)	1.0006	3
ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม	2.2	28
โพลีเอทิลีน	2.3	24
โพลียูรีเทน	4.0	10
กระดาษ	3.0	9
ฉนวนไมก้า	6.0	42
อีพ็อกซี่	4.7	12

สรุปว่าฉนวนไมก้ามีค่าความคงทนต่อการเบรกดาวนสูงสุดในขณะที่อากาศมีค่าความคงทนต่อการเบรกดาวนต่ำสุด การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าในช่องว่างแต่ละครั้งการชาร์จประจุจะเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งของช่องว่างไปยังช่องว่างหนึ่งจนกระทั่งความแตกต่างที่ข้ามช่องว่างเล็กๆ ที่เกิดขึ้นยังคงรักษาการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าอยู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมฉนวนอยู่ในรูปของคลื่นรูปไซน์ซึ่งการชาร์จประจุจะชาร์จขึ้นภายในช่องว่างไม่ว่าจะจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดูภาพอธิบายรูปภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าในช่องว่าง (Colin, 2005)

โดยที่  $V^+$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าบวก

$V^-$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าลบ

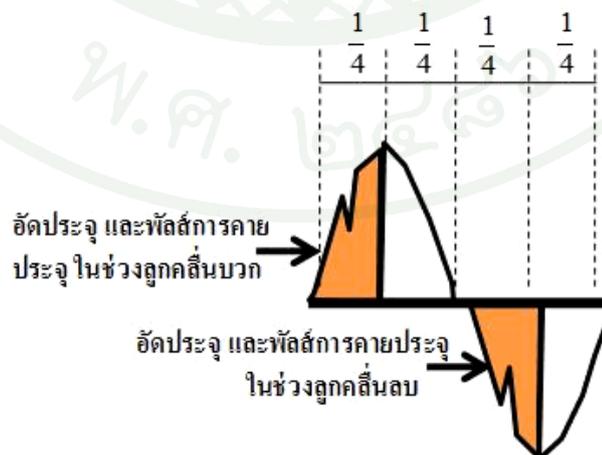
$V_a$  คือ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในเนื้อฉนวน

$V_c$  คือ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในช่องว่าง

$i$  คือ รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในช่องว่าง

$t$  คือ เวลา

### 2.3 หลักการของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน (Partial Discharge Concepts)

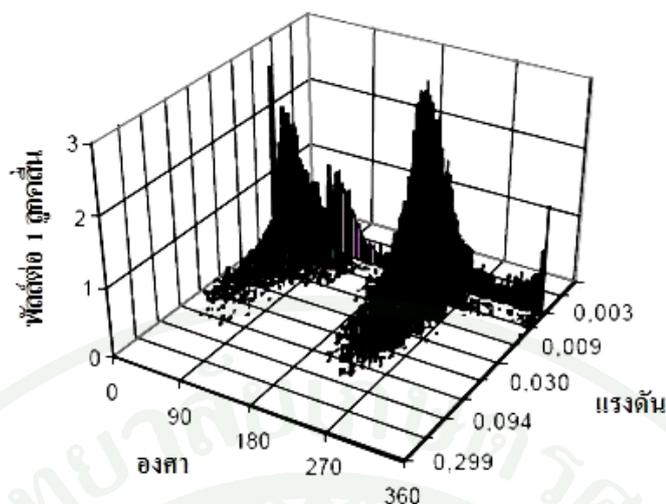


ภาพที่ 11 ลักษณะพัลส์แรงดันที่เกิดดิสชาร์จไฟฟ้า (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

หลักการแรก เพื่อที่จะทบทวนคุณลักษณะเฉพาะของการเกิดดิซาร์จไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงกราฟที่เพิ่มขึ้นของสัญญาณบวก และช่วงกราฟที่เพิ่มขึ้นของสัญญาณลบของรูปคลื่นแรงดัน ระหว่างกราฟช่วงขึ้นของสัญญาณบวก ตัวเก็บประจุทุกตัวจะทำการอัดประจุจนกระทั่งแรงดันของดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนเริ่มก่อตัวขึ้นจนสามารถข้ามช่องว่างที่เกิดขึ้นได้ และเริ่มต้นการเกิดดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนขึ้น เมื่อกราฟลูกคลื่นบวกเริ่มที่จะลดลงแรงดันบวกที่ข้ามไปยังอีกช่องว่างหนึ่งก็จะลดลงด้วยหลังจากนั้นตัวเก็บประจุยังคงมีการอัดประจุเหลืออยู่ ในช่วงแรกที่กราฟเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือ กำลังสร้างประจุบวกและผลลัพธ์เป็นดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วน ในภาพที่ 11 กราฟช่วงที่ 3 เพิ่มขึ้นในทางลบทำให้การอัดประจุบวกกลับทิศแต่ก็ยังส่งผลเป็นดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนเช่นกัน

หลักการที่สอง เพื่อที่จะทบทวนว่าดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนจะถูกวัดอยู่ในรูปของพัลส์แรงดัน ดังนั้นในช่วงลูกคลื่นบวก, การคายประจุ หรือการลัดวงจรบางส่วนจะเกิดผลในทางลบแนวพัลส์จะเคลื่อนที่ลง นี่คือการอ้างถึงดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนด้วยขั้วลบ ซึ่งเกิดขึ้นในภาพที่ 11 กราฟช่วง  $\frac{1}{4}$  แรกของลูกคลื่นของแรงดันบวกที่จ่ายเพิ่มขึ้นแก่ช่องว่าง ในภาพที่ 11 กราฟช่วงที่  $\frac{3}{4}$  ของลูกคลื่นที่เพิ่มการจ่ายแรงดันลบซึ่งการลัดวงจรบางส่วนเป็นผลในดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนกับขั้วบวก

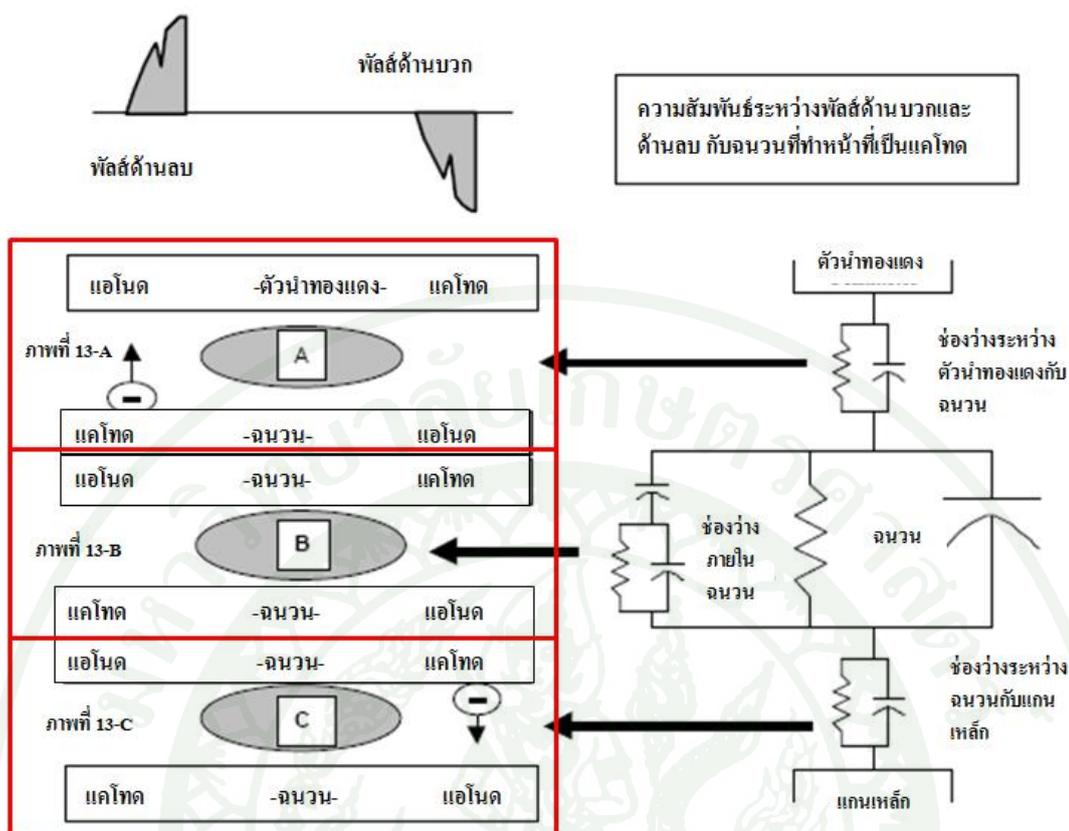
ตามที่ได้กำหนดไว้ ตั้งแต่พัลส์ของแรงดันเปลี่ยนแปลง พัลส์ขั้วลบเกิดขึ้นในภาพที่ 11 กราฟช่วง  $\frac{1}{4}$  แรกของลูกคลื่น หรือช่วงที่กราฟเพิ่มขึ้นด้านบวก และในทางกลับกัน พัลส์ขั้วบวกเกิดขึ้นในภาพที่ 11 กราฟช่วง  $\frac{3}{4}$  ต่อมาของลูกคลื่น หรือช่วงที่กราฟเพิ่มขึ้นด้านลบ เมื่อดูผลของสัญญาณดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนด้วยกราฟ 3 มิติ กับการวัด 2 ค่าวิกฤติในความสัมพันธ์ที่ 360 องศาของลูกคลื่นที่เป็นตัวอย่าง 360 องศาโดยทั่วไปจะแยกออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนั้นระดับของดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนในภาพที่ 11 กราฟ  $\frac{1}{4}$  แรกของลูกคลื่น หรือช่วงการคายประจุของขั้วลบ สามารถเปรียบเทียบกับช่วง  $\frac{3}{4}$  ของลูกคลื่นหรือช่วงการคายประจุของขั้วบวก ความแตกต่างของพัลส์ดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนขั้วบวกกับขั้วลบจะเกี่ยวข้องกับความเป็นไปได้ของสาเหตุหลัก และการกระทำที่ถูกต้อง การวัด 2 ค่าที่ถูกลำมาเป็นตัวอย่างบนกราฟ 2 มิติ เป็นค่าสูงสุดของดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนซึ่งปกติจะอยู่ในหน่วยมิลลิโวลต์ และเกิดพัลส์ขึ้นซ้ำๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นโดยจำนวนของพัลส์ดิซาร์จไฟฟ้าบางส่วนในช่วง 1 ลูกคลื่นของลูกคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดูรูปอธิบายภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟ 3 มิติ ของดิซชาร์จไฟฟ้าบางส่วน (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

ขนาดของดิซชาร์จไฟฟ้าบางส่วนสัมพันธ์กับเหตุการณ์การคายประจุที่เป็นอันตราย ดังนั้นจึงสัมพันธ์กับความรุนแรงที่เกิดขึ้นต่อฉนวน อัตราการเกิดพัลส์ขึ้นซ้ำๆ ซึ่งให้เห็นถึงคุณภาพการคายประจุที่มีระดับสูงในหลายค่า

หลักการที่ 3 เพื่อที่จะทบทวนผลกระทบของพัลส์ชั่วลบที่มีค่าสูงซึ่งเกิดขึ้นในช่วง  $\frac{1}{4}$  แรกของลูกคลื่นในความสัมพันธ์กับพัลส์ชั่วบวกที่มีค่าสูงซึ่งเกิดขึ้นในช่วง  $\frac{3}{4}$  ของลูกคลื่นโดยถูกพบว่าชั่วบวกคายประจุได้มากกว่าชั่วลบแล้วความเป็นไปได้ของสาเหตุหลักคือช่องว่างระหว่างฉนวนกับตัวนำ, ภายในฉนวน หรือบนผิวฉนวน และถ้าชั่วลบสามารถปล่อยประจุได้มากกว่าชั่วบวกแล้วความเป็นไปได้ของสาเหตุหลักคือ ช่องว่างระหว่างตัวนำกับฉนวนเท่านั้น นี่เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจที่เกี่ยวข้องกับระดับการจ่ายแรงดันให้กับช่องว่าง ซึ่งรูปทรงของช่องว่างและชนิดของวัสดุนั้นเป็นการกระทำที่เปรียบเสมือนแอมโพล และแคโทดตามลำดับ โดยวัสดุจะทำหน้าที่เป็นแคโทดตั้งแต่แคโทดจ่ายอิเล็กตรอนอิสระเพื่อที่จะให้เกิดดิซชาร์จไฟฟ้าบางส่วนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังภาพตัวอย่างข้างล่างที่แสดงให้เห็นการกระทำของวัสดุที่เป็นแคโทด และแอมโพลต่างกันออกไป สำหรับในส่วนทางด้านบวกและลบของกราฟแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดูรูปอธิบายภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างฟ้าผ่าด้านบวกกับฟ้าผ่าด้านลบ และจำนวนที่ทำหน้าที่เป็นแคโทดซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้ดี และวงจรมูลของ ภาพที่ 13-A, 13-B และ 13-C (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

เมื่อจำนวนกลายเป็นแคโทด และเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนขึ้นที่ผิวของจำนวน คุณสมบัติของจำนวนจะสามารถสร้างพลาสมาได้ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งจ่ายของอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่จะสนับสนุนการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน และพื้นที่ของดิสชาร์จไฟฟ้านี้จะแผ่ขยายตามพื้นที่ของพลาสมา ผลลัพธ์คือ เป็นแนวโน้มที่ดีในการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนเมื่อจำนวนมีสภาพเป็นแคโทด สำหรับฟ้าผ่าขั้วลบที่จำนวนทำหน้าที่เป็นแคโทดครอบคลุมช่องว่างในตัวนำถึงช่องว่างในจำนวน ดังภาพที่ 13-A ในช่วงนี้ฟ้าผ่าขั้วลบจะมีแนวโน้มที่ดีของดิสชาร์จที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ใกล้กับตัวนำ ดังนั้นถ้าฟ้าผ่าขั้วลบจะเพิ่มขึ้นได้ดีกว่าฟ้าผ่าขั้วบวกแล้วสาเหตุหลักที่ควรคำนึงถึงคือ การเกิดช่องว่างในพื้นที่ตัวนำถึงจำนวน สำหรับฟ้าผ่าขั้วบวกก็เป็นลักษณะเดียวกันซึ่งเมื่อจำนวนทำหน้าที่เป็นแคโทดแนวโน้มการเกิดดิสชาร์จจะเกิดใกล้กับตัวนำเช่นกันแต่อาจจะเกิดบนผิวจำนวนได้อีกด้วย ดังภาพที่ 13-C และเมื่อช่องว่างมีมากภายในเนื้อจำนวน ดังภาพที่ 13-B แล้วสำหรับ ฟ้าผ่าทั้ง

ขั้วบวกและขั้วลบซึ่งความเป็นแอมโพลยังคงอยู่ในตัวของฉนวนเอง เมื่อพัลส์ของขั้วทั้งสองมีมากมายพอๆ กันแล้วสาเหตุหลักที่ควรคำนึงถึงคือ ช่องว่างภายในเนื้อฉนวนเอง

รูปแบบความเสียหายตามความเป็นจริงได้ชี้ไปยังความรุนแรงของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดขึ้นในช่วงสั้นๆ จนเสียหายโดยสมบูรณ์ สิ่งเหล่านี้จะเกิดขึ้นเมื่อการอาร์กภายในมีส่วนที่เป็นตัวนำคาร์บอนเกิดขึ้นตรงจุดที่ซึ่งเป็นองค์ประกอบของความต้านทานที่มีค่าพอที่จะป้องกันการเกิดแรงดันตกคร่อมช่องว่างที่มีอยู่ค่าความต้านทานที่ต่ำนี้จะอนุญาตให้กระแสที่มีค่าสูงไหลผ่าน ได้ด้วยทำให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งเป็นผลอันตรายต่อฉนวนที่เห็นได้ชัดคือ การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน (Tracking)

อันตรายของรอยไหม้คือ ความร้อนที่รุนแรงต่อพื้นที่ที่มีรอยไหม้นั้นเนื่องจากกระแสรั่วโดยกระแสรั่วเหล่านี้จะไหลผ่านคราบหรือฟิล์มของสิ่งสกปรกหรือของความชื้นใดๆ ก็ตามที่อยู่บนผิวฉนวนที่เชื่อมต่อกันเป็นทาง ทรายเท่าที่ความยาวของแผ่นฟิล์มนี้จะขยายอย่างชัดเจนและต่อเนื่องกันซึ่งความร้อนที่ทำงานร่วมกับกระแสรั่วจะขยายออกตามพื้นที่แนวกว้าง อย่างไรก็ตาม ความร้อนได้สนับสนุนให้แผ่นฟิล์มเกิดการระเหยกลายเป็นไอ สาเหตุนี้เองที่ทำให้แผ่นฟิล์มได้แตกออกกลายเป็นส่วนเล็กๆ กระจัดกระจายกันออกไป ในแต่ละส่วนที่แผ่นฟิล์มแตกออกได้นำไปสู่การขัดขวางการไหลของกระแสรั่วซึ่งเป็นต้นเหตุในการเกิดอาร์กที่เล็กมาก ถึงแม้ว่าจะเป็นอาร์กที่มีขนาดเล็กมากแต่ก็ให้ความร้อนที่รุนแรงต่อพื้นที่ ความร้อนที่รุนแรงของอาร์กที่เกิดจากกระแสรั่วเป็นปริมาณที่เพียงพอเพื่อที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดการเบรกดาวน์ระดับโมเลกุลและสารเคมีของพื้นฐานฉนวน บนวัสดุฉนวนแบบสารอินทรีย์บ่อยครั้งที่อาร์กของวัสดุชนิดนี้เป็นคาร์บอน อาร์กเล็กๆ ที่เกิดตลอดแนวผิวฉนวนสามารถเกิดขึ้นซ้ำๆ โดยการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน ภาพที่ 14 เป็นกราฟตัวอย่างระหว่างช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายของฉนวนสัมพันธ์กับความรุนแรงของดิสชาร์จไฟฟ้าที่วัดได้



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนกับช่วงที่ฉนวนเกิดความเสียหาย (Alex, 1999 ; Gabe, 1999)

### 3. กระแสรั่วและปรากฏการณ์การเกิดรอยไหม้

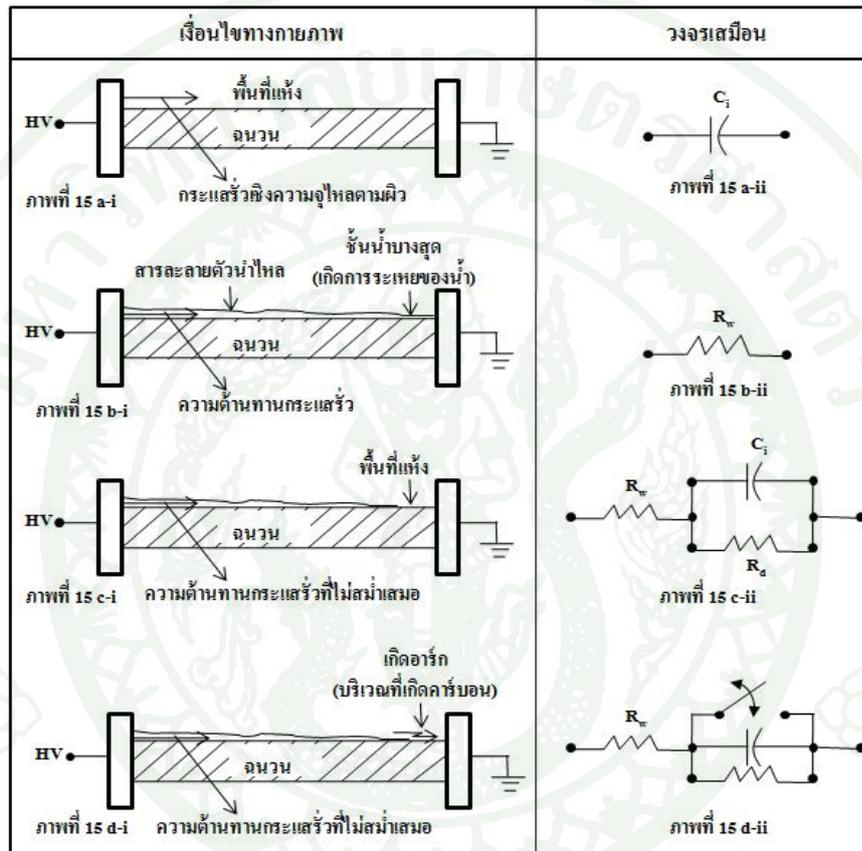
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการเกิดรอยไหม้เนื่องจากกระแสรั่วซึ่งหัวข้อก่อนหน้านี้ไม่ได้กล่าวถึงกระแสรั่วที่เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหาย โดยส่วนใหญ่ฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงมักถูกใช้นอกอาคาร มลภาวะของสิ่งแวดล้อมสามารถเป็นสาเหตุทำให้ฉนวนถูกเคลือบด้วยสิ่งสกปรกและสารเคมีต่างๆ ในระยะยาว มลภาวะที่เคลือบนี้จะไม่ทำอันตรายต่อฉนวนเมื่ออยู่สภาพที่แห้ง สนามไฟฟ้าสถิตจำกัดการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าบนฉนวนแห้งและจำกัดการไหลของกระแสรั่วซึ่งความจุที่มีขนาดเล็กมากๆ ข้ามผ่านฉนวนไป อย่างไรก็ตามในสภาพที่บรรยากาศที่เปียกซึ่งส่วนของสิ่งสกปรกบนผิวฉนวนจะรวมเข้ากับน้ำและเตรียมเส้นทางที่ต่อเนื่องระหว่างด้านอิเล็กโทรดแรงดันสูงและด้านที่ต่อลงดิน และเมื่อฉนวนเปียกทำให้กระแสรั่วไหลบนผิวได้ซึ่งโดยปกติแล้วมีค่าสูงกว่าความจุเชิงกระแสในกรณีที่ฉนวนแห้ง กระแสรั่วนี้ให้ผลในรูปของความร้อนที่ไม่มีรูปแบบของชั้นสิ่งสกปรกนั้นในสุดท้ายทำให้เกิดพื้นที่แห้งๆ หลายๆ แห่งเพื่อเป็นช่องทางแคบๆ ที่ซึ่งความหนาแน่นของกระแสรั่วบนผิวมีค่าสูงสุด การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าตลอดบนผิวของฉนวนที่เปียก และสกปรกจะไม่เหมือนกันเมื่อพื้นที่แห้งได้ก่อตัวขึ้น และต่อเชื่อมกันด้วยฟิล์มตัวนำ เพราะความต้านทานของพื้นที่เล็กๆ นี้มีค่าสูงมากทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายผ่านฉนวนนั้นได้ตกคร่อมพื้นที่แห้งนั้นด้วย ขณะที่ผลก็คือเกิดการเบรกดาวน์ข้ามพื้นที่แห้งเมื่อค่าแรงดันสูงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าวาบไฟวิกฤติของอากาศ และสร้างประกายไฟเล็กๆ มากมายขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มความชื้นที่กระจัดกระจายตัวอยู่ กระบวนการนี้ได้ให้ผลกระทำที่เปรียบเสมือนอิเล็กโทรดที่ขยายตัว ผลของความร้อนจากประกายไฟเล็กๆ เป็นเหตุให้เกิดคาร์บอนและการระเหยบนผิวฉนวนและนำไปสู่การก่อตัวของรอยไหม้ถาวรบนผิวฉนวน กระบวนการจะเกิดมากขึ้นและต่อเนื่องซึ่งฉนวนที่เสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อรอยไหม้นั้นเชื่อมถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน” โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นบนผิวของฉนวนที่เปียกและสิ่งสกปรกซึ่งหลักการเกิดรอยไหม้เนื่องจากกระแสรั่วนี้มีหลักการเหมือนกับที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้

#### 3.1 การวิเคราะห์กระแสรั่ว

เมื่อฉนวนเกิดความสกปรกทำให้เกิดกระแสรั่ว ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายและถูกสะสมที่กราวด์ของฉนวน การวิเคราะห์กระแสรั่วได้ใช้วิธีตรวจสอบบนลูกคลื่นกระแสรั่วและลักษณะสเปกตรัมความถี่ ความสำคัญของขนาด, ฮาร์โมนิก และระยะเวลาการดิซชาร์จของกระแสรั่ว ซึ่งข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวน

### 3.2 ลักษณะของกระแสรั่ว

การขยายตัวของรอยไหม้ตลอดบนผิวฉนวนเกิดขึ้นระหว่างที่การสร้างคิซซาร์จไฟอย่าง ต่อเนื่อง ความคงทนกระแสรั่วขึ้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าและสิ่งแวดล้อมและระดับความ สกปรกบนผิว กระบวนการของรูปแบบรอยไหม้บนผิวฉนวนจากการขยายตัวของกระแสรั่วและ พื้นที่แห้งเล็กๆ ได้แสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ปรากฏการณ์กระแสรั่ว และการเกิดอาร์กที่พื้นที่แห้งเล็กๆ (Suda,2001; Fernando, 1999)

การเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วจนกระทั่งเกิดวาบไฟซึ่งสามารถแบ่งประเภทสถานะต่างๆ กัน เงื่อนไขระหว่างที่ผิวแห้งฉนวนจะมีความต้านทานสูงและมีประจุไฟฟ้าที่น้อยมาก (Suda,2001; Fernando, 1999) กระแสรั่วไหลบนผิวดังภาพที่ 15 a-i เนื่องจากคุณลักษณะประจุไฟฟ้าของกระแสรั่วนี้ฉนวนจึงสามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุกับค่าความต้านทานที่สูงดังภาพที่ 15 a-i เมื่อผิวฉนวนเปียกโดยทั่วตลอดการไหลของสารละลายไฟฟ้า (electrolyte) จากสารละลายสิ่งสกปรกความต้านทานกระแสรั่วกับขนาดที่สูงกว่าเริ่มที่ไหลผ่านแผ่นฟิล์มตัวนำ กระแสรั่วนี้ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนเนื่องจากแผ่นฟิล์มนั้นมีรูปแบบที่แน่นอน ภายใต้การทดสอบรอยไหม้บนผิวซึ่งบนฉนวน

ถูกขยายเส้นทางนั้นสารละลายไฟฟ้าจะไหลจากด้านอิเล็กโทรดสูงไปยังกราวด์อิเล็กโทรด ดังนั้น ชั้นน้ำบางๆ ได้ถูกสังเกตเห็นที่กราวด์อิเล็กโทรดและดังนั้นผลในความหนาแน่นที่สูงสุดของกระแสรั่วในขอบเขตนี้ได้บรรยายในภาพที่ 15 b-i ที่สถานะนี้วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยชั้นของน้ำที่เท่ากับความต้านทาน  $R_w$  ดังภาพที่ 15 b-ii การผ่านของกระแสที่มีความหนาแน่นสูงที่ขอบเขตต่างๆ เป็นเหตุทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนได้ถูกสร้างขึ้นจากกระแสรั่วนี้ที่ได้ระเหยความชื้นออกไป และเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดพื้นที่แห้งเล็กๆ ในภาพที่ 15 c-i องค์ประกอบวงจรของฉนวนที่เปียกได้ถูกปรับปรุงโดยการเพิ่มอนุกรมของความต้านทาน  $R_d$  และตัวเก็บประจุ  $C_d$  ที่ต่อขนานกันสำหรับพื้นที่แห้งดังภาพที่ 15 c-ii การทำงานก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าการให้ตัวเก็บประจุ  $C_d$  แก่กระแสรั่ว น้อยมากเนื่องจากระดับที่กระเพื่อมขึ้นน้อยมากซึ่งสังเกตได้จากลูกคลื่นระหว่างแรงดันและกระแสรั่ว ดังนั้นลักษณะของกระแสรั่วสามารถพิจารณาในฐานะที่เป็นความต้านทานกระแสรั่วที่ไม่เป็นเชิงเส้นและระดับของกระแสรั่วต่ำกว่าเงื่อนไขของภาพที่ 15 b-i เนื่องจากค่าความต้านทานของพื้นที่แห้งนั้นสูงกว่า นับตั้งแต่ค่าความต้านทานของพื้นที่แห้งสูงมากเทียบกับค่าความต้านทานของชั้นน้ำทำให้แรงดันทั้งหมดที่จ่ายผ่านฉนวนได้ไปตกคร่อมพื้นที่แห้งเล็กๆเหล่านั้น และมีผลในค่าแรงดันที่สูงกว่าลดลง ถ้าการเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าอย่างเฉียบพลันก็เพิ่มค่าการเกิดเบรกควานด้วย ซึ่งการดิซชาร์จเริ่มแรกได้อธิบายในภาพที่ 15 d-i อาร์กได้สร้างจากการดิซชาร์จไฟฟ้าบนผิวที่เผาไหม้และทำให้โครงสร้างของโมเลกุลของฉนวนตัวอย่างสลายตัวเพื่อที่จะทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้น ภายใต้วิธีการทดสอบรอยไหม้เส้นประกายไฟเล็กๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และรอยคาร์บอนที่เกิดขึ้นมากมายจะถ่ายถอดลักษณะไปสู่การเป็นอิเล็กโทรดแรงดัน การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพื้นที่แห้งจะดีเทียบเท่ากับระยะทางของชั้นมลภาวะที่มีอิทธิพลต่อระดับการไหลของกระแสรั่ว ลักษณะกระแสรั่วที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไปจะให้ผลในรูปแบบลูกคลื่นที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบคุณสมบัติกระแสรั่วอย่างเช่น พวกขนาด, การอัดประจุสะสม, จำนวนการกระเพื่อมของกราฟที่นับได้ และขนาดฮาร์มอนิกภายใต้การกระทำของดิซชาร์จไฟฟ้ามีผลให้ความเข้าใจที่ดีกว่าของระยะเริ่มต้นการเสื่อมสภาพของวัสดุ

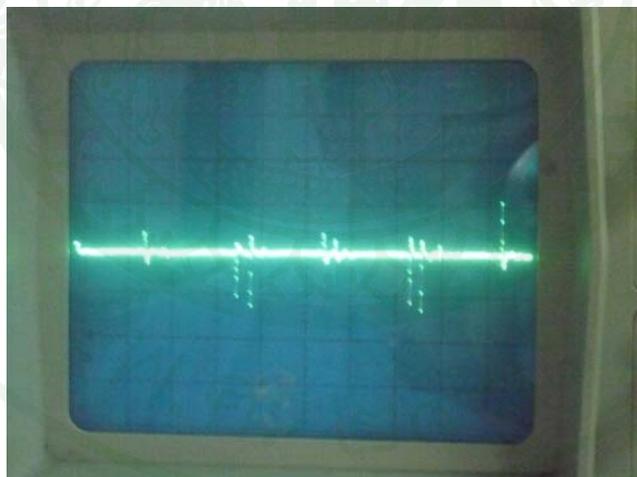
### 3.2 ปัจจัยที่กระทบจากพฤติกรรมของกระแสรั่ว

การรวมกระแสรั่วและพื้นที่แห้งที่ดิซชาร์จไฟฟ้าก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ให้ผลโดยตรงสำหรับการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อน ยิ่งไปกว่านั้นสภาพแวดล้อมก็มีผลเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็น ความชื้น, รังสีอัลตราไวโอเล็ต และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ส่งผลต่อการแสดงออกถึงความเป็นฉนวนตลอดจนมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของฉนวน โดยทั่วไปวัสดุโพลีเมอร์จะสูญเสียความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) หลังจากเริ่มเกิดความเครียดสนามไฟฟ้า และสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงนี้ในผิวลักษณะไฮโดรโฟบิกได้นำไปสู่กระแสรั่วที่เพิ่มขึ้น ทำให้

เกิดรอยไหม้บนผิวและเกิดการสึกกร่อนของฉนวน ทำนองเดียวกันคุณสมบัติของวัสดุอย่างเช่นวัสดุที่ประกอบด้วยสูตรโมเลกุลที่แตกต่างกันจะให้ผลกระทบต่อพฤติกรรมของกระแสรั่วด้วย โดยมีข้อมูลจากการศึกษาการทดสอบสิ่งที่เกี่ยวข้องกับกระแสรั่วซึ่งจำนวนกระแสที่กระเพื่อมและการอัดประจุทั้งหมดที่ไหลข้ามผิวของตัวอย่างทดสอบชนิดยางซิลิโคน (Silicone Rubber) ที่ถูกเคลือบด้วยน้ำเกลือภายใต้การทดสอบหมอกที่มีค่าความเค็ม (หมอกน้ำเกลือ) พบว่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเกลือ เพราะการสูญเสียความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้นกับหมอกน้ำเกลือที่มีปริมาณมากขึ้นได้ทำปฏิกิริยากับผิววัสดุประเภทยาง (Kim, 1992 : Hackam, 1988) และมีการศึกษาการกระทำของไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนโดยวิธีการทดลองใช้แผ่นเอียง (Inclined-plane tracking and erosion) บนตัวอย่างที่แตกต่างกัน 2 ชนิดของวัสดุประเภทโพลีเมอร์ ความแตกต่างของการทำให้วัสดุเปียกจากอัตราการไหลต่างๆ ได้ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของพื้นที่แห้งเล็กๆ และได้ค่ากระแสโดยเฉลี่ย ซึ่งสภาพสิ่งแวดล้อมที่ประกอบด้วยอนุภาคสิ่งสกปรกมากมายหลายชนิด ความแตกต่างของสิ่งสกปรกนี้ได้ให้ความแตกต่างของระดับกระแสรั่วด้วย เพราะความแตกต่างขององค์ประกอบไอออนของสารละลายไฟฟ้าภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าเดียวกัน การหาอายุการใช้งานของฉนวนโพลีเมอร์ที่ใช้ทั้งภายในและภายนอกอาคารได้ถูกเปิดเผยว่าฉนวนที่โดนลมและฝนบ่อยๆ ดังนั้นฉนวนที่ใช้งานนอกอาคารจะมีระดับกระแสรั่วที่มากกว่าฉนวนที่ใช้งานในอาคาร แสดงให้เห็นว่าฉนวนภายนอกอาคารต้องถูกสะสมความสกปรกและอนุภาคสิ่งสกปรกมากกว่าจากมลภาวะสิ่งแวดล้อม การที่ฉนวนสกปรกจึงเป็นการสร้างอิเล็กโทรดตัวนำที่สูงบนผิวเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่เปียก

ระดับความแตกต่างของสิ่งปนเปื้อนของสารละลายไฟฟ้าชี้ให้เห็นความเป็นตัวนำที่แตกต่างของแผ่นฟิล์มตัวนำบนผิวฉนวนว่าเป็นตัวควบคุมระดับการไหลของกระแสรั่ว ได้มีการทดสอบบนวัสดุที่เคลือบด้วยยางซิลิโคนภายใต้เงื่อนไขที่โดนสิ่งสกปรก ซึ่งการทดสอบได้พยายามนำตัวชี้วัดกระแสรั่วกับความแตกต่างของความเป็นตัวนำของสารละลายไฟฟ้ามาสัมพันธ์กัน และพบว่าสารละลายที่มีความเป็นตัวนำสูงทำให้ผิวฉนวนหยาบและส่งผลให้เกิดกระแสรั่วมาก เนื่องจากความถี่ของการอาร์กบนพื้นที่แห้งที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามความแน่นอนของผลการทดสอบต่างๆ มีความหลากหลาย ถ้าหากขอบเขตของความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้กว้างขึ้น สภาพอากาศต่างๆ เช่น ความดันบรรยากาศและความชื้นถูกพบว่ามีอิทธิพลสำคัญต่อการขยายตัวของดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวนจากการวิจัยมากมาย ซึ่งได้มีการบันทึกว่าความต้านทานการเกิดรอยไหม้ของวัสดุนั้นแตกต่างกันออกไปภายใต้สภาพอากาศที่ต่างกัน ระดับของความเสื่อมสภาพขึ้นอยู่กับความทนต่อการเกิดดิสชาร์จเนื่องจากการไหลของกระแสรั่ว และพบความเหมือนกันของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อตรวจสอบลักษณะการเปียกบนฉนวนที่ต่างประเภทกัน ผลลัพธ์ได้แสดง

การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของระดับความชื้น การปรากฏของความชื้นได้ช่วยให้ความต้านทานของผิวลดลงเนื่องผิวสูญเสียคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิกไป มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาว่าการก่อตัวของพื้นแห้ง และการเกิดเส้นประกายไฟได้ผันแปรกับระดับกระแสรั่วเท่ากับรูปแบบของลูกคลื่นที่เสถียรรูปไปจากลักษณะลูกคลื่นปกติ และทำให้เพิ่มขนาดฮาร์มอนิกของลูกคลื่นด้วย กราฟที่กระเพื่อมเนื่องจากกระแสรั่วจะสังเกตที่บริเวณส่วนยอดของลูกคลื่นแรงดันกระแสสลับที่จ่ายเข้าไปเนื่องจากการดิสชาร์จไฟฟ้าได้สร้างจากปลายของหยดน้ำที่เสถียรรูป เมื่อพื้นที่แห้งได้ก่อตัวขึ้น จุดยอดของกราฟแรงดันลูกคลื่นกระแสรั่วจะมียอดแหลมเล็กๆ มากมาย ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเกิดขึ้นเร็วมากแสดงถึงการกระทำของดิสชาร์จเนื่องจากโคโรนา ข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากลูกคลื่นกระแสรั่วสามารถใช้ประเมินความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนของวัสดุฉนวนโพลีเมอร์ที่ใช้ในอาคารได้ ปัจจัยที่ซึ่งวัสดุมีประสบการณ์ที่ผิวเกิดการเสื่อมสภาพสามารถตัดสินได้จากคุณสมบัติของกระแสรั่วและระยะเวลาที่เกิดดิสชาร์จ ซึ่งสามารถใช้สำหรับตรวจพบความเสียหายระยะเริ่มต้นได้ นอกจากนี้ได้มีผลจากการทดสอบพบว่าขนาดของกระแสรั่ว, ขนาดฮาร์มอนิกของกระแสรั่ว และระยะเวลาที่เกิดดิสชาร์จเป็นความแตกต่างที่สำคัญระหว่างที่ส่วนของการทดสอบตอนที่การเสื่อมสภาพยังมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นขณะที่เปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวเมื่อการเสื่อมสภาพที่สามารถมองเห็นได้เกิดขึ้น (Gorur *et al.*, 1997)



ภาพที่ 16 ลักษณะกราฟลูกคลื่นกระแสรั่ว

#### 4. การวิเคราะห์การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน

วัสดุอินทรีย์ส่วนใหญ่ใช้สำหรับฉนวนไฟฟ้าอาจจะเผชิญกับการเกิดรอยไหม้ การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนซึ่งคือ ปรากฏการณ์ที่พิเศษของวัสดุโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุล โดยรอยไหม้เกิดขึ้นบนผิวเป็นเพราะผลของดิซซาร์จที่ค่อยๆ เคลื่อนที่จากสิ่งสกปรกบนผิว มันจะแปรผันตามกับความถี่ของสัปดาห์ที่เกาะบนผิวซึ่งขนาดของกระแสบนผิวและสถานะของดิซซาร์จระหว่างที่ผิวฉนวนเปียกและระดับสิ่งสกปรก การเกิดรอยไหม้ครั้งหนึ่งฉนวนไฟฟ้าจะเสียหายอย่างสมบูรณ์และไม่สามารถคืนรูปหรือฟื้นกลับมาใหม่ได้

##### 4.1 คุณสมบัติการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนของวัสดุโพลีเมอร์

ทุกๆ วัสดุให้ความทนต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างในโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ดังข้อมูลจากการทดสอบของ Chang และ Mazeika ได้พิสูจน์ว่าการกระทำของไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นระหว่างที่ปรากฏการณ์การเกิดรอยไหม้บนผิวคือวัสดุที่ต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น อ้างอิงผลที่สังเกตได้จาก Silicone Rubber (SR) ที่ไม่มี Alumina Trihydrate (ATH) และ Ethylene Vinyl Acetate (EVA) กับ ATH ปานกลาง ได้แสดงให้เห็นความทนต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนที่ดีกว่า SR ที่มี ATH สูง การศึกษาวัสดุ Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) ได้แสดงให้เห็นว่าความทนต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนของสารประกอบ EPDM/ATH ได้ถูกปรับปรุงด้วยการเพิ่มปริมาณ ATH อย่างไรก็ตาม ความทนต่อรอยไหม้ของสารประกอบ EPDM มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อขนาดของ ATH เพิ่มขึ้นเกินจากขอบเขตที่เหมาะสม การเปรียบเทียบระหว่าง SR และ EPDM แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ SR มีความทนต่อการเกิดรอยไหม้ได้ดีกว่า EPDM และมีระยะเวลาสั้นกว่าที่จะเกิดการเบรกดาวน์ การทนต่อการเกิดรอยไหม้และความร้อนที่ดีกว่าของ SR เนื่องจากคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกที่ดีเยี่ยมเมื่อผิวของ SR ถูกปกคลุมด้วยกลุ่ม Methyl Hydrophobic ดังนั้นมันจะยังคงทนรอยไหม้ได้ดีเท่าที่กระแสรวดขนาดลงมากที่สุดจริงๆ แล้ว ได้มีการค้นพบว่าการให้ความสำคัญของคาร์บอนที่ทำให้เกิดรอยไหม้ได้ถูกประมาณน้ำหนักเพียงแค่ 1% ของน้ำหนักกากของแข็งที่เหลือทั้งหมดที่ก่อกำเนิดจากการอาร์กพื้นที่แห้ง การศึกษาผลกระทบในระยะยาวของกระบวนการการเกิดรอยไหม้ได้แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างความทนต่อการเกิดรอยไหม้ตามที่ชนิดและสิ่งๆที่เติมลงไปในวัสดุด้วยประเภทตัวอย่างที่แตกต่างกันอาจจะให้ความแตกต่างของระดับไฮโดรโฟบิก และเงื่อนไขที่ผิวฉนวนเปียกอาจจะไม่เหมือนกัน เป็นที่รู้กันดีว่าการเติม ATH เป็นบทบาทสำคัญที่จะปรับปรุงความทนต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนของสารประกอบโพลีเมอร์ส่วนใหญ่ แต่ส่วนประกอบบางอย่างที่รวมกันตั้งแต่ 2 ชนิด หรือประกอบเมทออลออกไซด์ (Metal Oxide) มากพบว่าคุณสมบัติ

ความคงทนรอยไหม้ดีกว่า ในด้านข้อได้เปรียบของการใช้ ATH ในการปรับปรุงซึ่งมีสารประกอบอื่นอย่างเช่นซิลิกาทำให้ผลเช่นเดียวกันด้วย ซึ่งพบว่าจากการทดลองนั้นช่วงเวลาที่เกิดการรอยไหม้ของสารประกอบ EPDM/SR นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มส่วนประกอบซิลิกาเพิ่มขึ้น

#### 4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อน

จากการวิเคราะห์กระแสรั่วข้างต้นความเครียดทางไฟฟ้าและมลภาวะที่แน่เป็นที่รู้กันว่าให้ผลกระทบที่สำคัญต่อลักษณะกระแสรั่ว แสดงว่าคุณสมบัติของกระแสรั่วที่เปลี่ยนไปจะสร้างคุณสมบัติการเกิดรอยไหม้และรูปแบบของรอยไหม้ที่ต่างออกไป นักวิจัยหลายคนได้บันทึกว่าคุณสมบัติของการเกิดรอยไหม้และรูปแบบของรอยไหม้ที่หลากหลายเนื่องจากผลกระทบของสิ่งแวดล้อมและเงื่อนไขการทดสอบ และจากการสังเกตรูปแบบรอยไหม้คาร์บอนที่มีลักษณะเหมือนแปรงที่มีการแผ่ขยายกิ่งกว้างออกไปภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต และลม อีกทั้งยังพบว่าปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมจะมีผลอย่างสำคัญต่อระยะเวลาการเกิดเบรกดาวน์ คุณสมบัติทางกายภาพของตัววัสดุเองก็สามารถมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการณ์ต่อการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนได้ ข้อมูลในหลายๆ งานวิจัยพบว่า การทนต่อแรงดึง และการแตกร้าวที่ลดลงของวัสดุได้มีผลในการเพิ่มอัตราการเกิดรอยไหม้และการสึกกร่อนได้ และจากการศึกษาค้นคว้าของนักวิจัยหลายคนพบว่าความหนาที่แตกต่างกันของวัสดุจนวนชนิดยางซิลิโคนได้แสดงถึงเวลาที่เสียหายจากรอยไหม้ไม่เหมือนกันรวมทั้งกระบวนการการผลิตอย่างเช่นเวลาในการอบยางโดยผสมกำมะถัน (Vulcanization) ที่น้อยไปหรือมากไป ก็สามารถทำให้ความคงทนการเกิดรอยไหม้ และการสึกกร่อนลดลงมากแม้จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน โครงสร้างเดิมตามธรรมชาติของวัสดุพบว่า มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการขยายตัวของกระบวนการการเกิดเส้นทางคาร์บอน โดยบริเวณของเส้นทางคาร์บอนสำหรับวัสดุจนวนประเภทพลาสติกที่คืนรูปได้เมื่อโดนความร้อน (Thermoplastic Material) มีแนวโน้มเพิ่มจำนวนขึ้นตามแรงดันทดสอบ แต่วัสดุจนวนประเภทพลาสติกที่คืนรูปไม่ได้ (Thermosetting Material) เมื่อโดนความร้อนนั้นจะให้ผลตรงข้ามกับวัสดุจนวนประเภทพลาสติกที่คืนรูปได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่กระจายไปตามเส้นทางคาร์บอนของวัสดุจนวนประเภทพลาสติกที่คืนรูปได้จะเป็นลักษณะจุด ๆ เกิดขึ้น ขณะที่ผลของวัสดุจนวนประเภทพลาสติกที่คืนรูปไม่ได้จะเป็นลักษณะเส้นเล็กๆ และการที่วัสดุจนวนโดนฝนกรด และสารละลายถึงสกปรกบ่อยๆ จะเป็นการเพิ่มความเสื่อมสภาพของวัสดุและลดความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ด้วย และผิววัสดุจนวนที่ไม่เรียบจะลดความเป็นไฮโดรโฟบิกที่ผิวลง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดลงของความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้เนื่องจากสาเหตุที่ได้กล่าวในข้างต้นส่งผลให้มีการไหลของกระแสรั่วที่ผิวจนวนเพิ่มมากขึ้น

## 5. มาตรฐานการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้บนผิววัสดุ

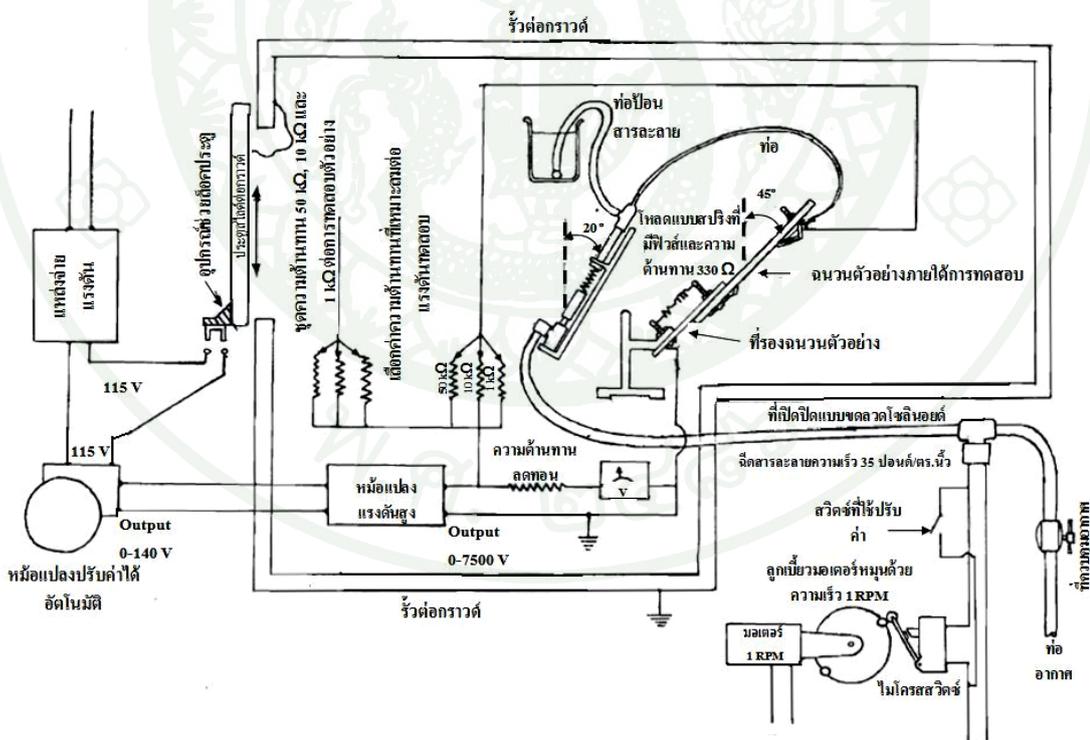
งานวิจัยการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้บนผิววัสดุนี้ได้นำจากมาตรฐาน ASTM Designation : D 2303 – 97 (Reproved 2004) Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials

เป็นมาตรฐานที่ทำการออกแบบการทดสอบวัสดุที่เป็นฉนวนในสภาพแวดล้อมที่เลียนแบบสภาพแวดล้อมจริง คือบริเวณที่ตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ โดยเฉพาะอุปกรณ์นอกอาคารที่มีมลภาวะค่อนข้างสูงซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการทำให้ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย มาตรฐานดังกล่าวได้ทำการพิสูจน์ความสามารถในการทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุทดสอบ โดยใช้สารละลายที่กำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือนกับมลภาวะชั้นรุนแรงที่เกิดขึ้นจริง โดยสารละลายดังกล่าวจะมีสภาพเป็นตัวนำได้ถูกใช้กับผิวของตัวอย่างทดสอบในอัตราที่เหมาะสม เพื่อให้การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการปรับใช้ค่าแรงดันทดสอบภายในช่วงเวลาไม่กี่ชั่วโมงเพื่อที่จะให้เป็นสาเหตุของความเสียหายที่ผิวตัวอย่างทดสอบเหมือนที่เกิดขึ้นกับฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานจริงในบริเวณที่มีมลภาวะ และมีความเสียหายในช่วงระยะเวลาสั้น โดยแรงดันเริ่มแรกของการเกิดรอยไหม้ถูกพบว่ามีความเหมาะสมสำหรับการประเมินค่าวัสดุฉนวน เพื่อที่จะใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหรืออุปกรณ์ที่ใช้นอกอาคารและอุปกรณ์ที่ไม่ได้มีการป้องกันใดๆ ได้ดีเท่ากับการกำหนดแรงดันทดสอบสำหรับการทดสอบแบบ Time-to-track วิธีการทดสอบเหล่านี้จะหาค่าผลกระทบที่สัมพันธ์ต่อการกระทำต่อวัสดุฉนวนซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้าต่อผิววัสดุ ผลกระทบนี้อาจเกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของมลภาวะที่รวมตัวกับความชื้นที่กลายเป็นน้ำจากบรรยากาศ

มาตรฐานของการทดสอบนี้สามารถบอกได้ว่าวัสดุฉนวนมีความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ได้ดีหรือไม่ วิธีการทดสอบได้ใช้สารละลายสิ่งสกปรก (liquid-contaminant) ที่เป็นสารละลายนำไฟฟ้าและใช้แผ่นที่ลาดเอียง (inclined-plane) ในการทดสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบเหล่านี้สามารถใช้ประมาณค่าความทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุต่างๆได้ และสามารถนำไปเป็นข้อมูลในการใช้เปรียบเทียบประเภทวัสดุที่จะนำมาเลือกใช้เป็นฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า อีกทั้งยังนำข้อมูลจากการทดสอบเป็นมาตรฐานของวัสดุประเภทนั้นได้ และนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิงในการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ เพื่อทำการพัฒนาคุณภาพและประสิทธิภาพของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อไป

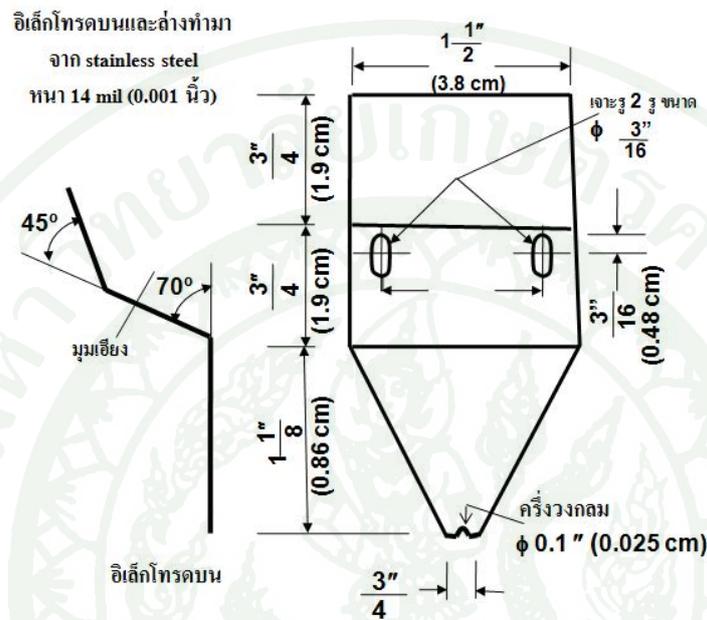
5.1 วิธีทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM Designation : D 2303 – 97 (Reproved 2004)

5.1.1 ระดับแรงดันที่เป็นอันตรายที่อาจเป็นไปได้ระหว่างการทดลองนี้ มันเป็นสิ่งจำเป็นว่า อุปกรณ์ที่ทดลอง และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่มีการเชื่อมต่อไฟฟ้าควรถูกออกแบบอย่างเหมาะสม และติดตั้งเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ในส่วนตัวนำไฟฟ้าทั้งหมดจะต่อกับ solidly ground สำหรับผู้ใช้งานที่ต้องสัมผัสอุปกรณ์ในระหว่างการทดลองให้เตรียมค่ากลางที่ต่อกับกราวด์เพื่อใช้ในทุกรทดสอบที่สมบูรณ์ และในทุกส่วนที่เป็นแรงดันสูงที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองหรืออาจเป็นไปได้สำหรับเกิดการเหนี่ยวนำของประจุของแหล่งจ่ายแรงดัน มีคำแนะนำแก่ผู้ใช้งานอย่างละเอียดในกระบวนการที่ถูกต้องเพื่อปฏิบัติการทดลองได้อย่างปลอดภัย เมื่อทำการทดสอบแบบ High Voltage Test โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการอัดแก๊สหรือน้ำมันเข้าไปซึ่งมีความเป็นไปได้ที่พลังงานเหล่านั้นถูกปล่อยออกมาถึงจุดเบรกควานี้ได้มากพอที่จะมีผลต่อการเกิดไฟ, ระเบิด หรือการแตกร้าวของห้องทดลอง การออกแบบอุปกรณ์การทดลอง, ห้องทดลอง และตัวอย่างทดสอบต่างๆ ควรหลีกเลี่ยงการเกิดเหตุการณ์เหล่านี้ และเพื่อจัดปัญหาที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บต่อผู้ทำการทดลอง ถ้ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้อุปกรณ์ขั้วยังไฟที่ออกมาดังภาพที่ 17

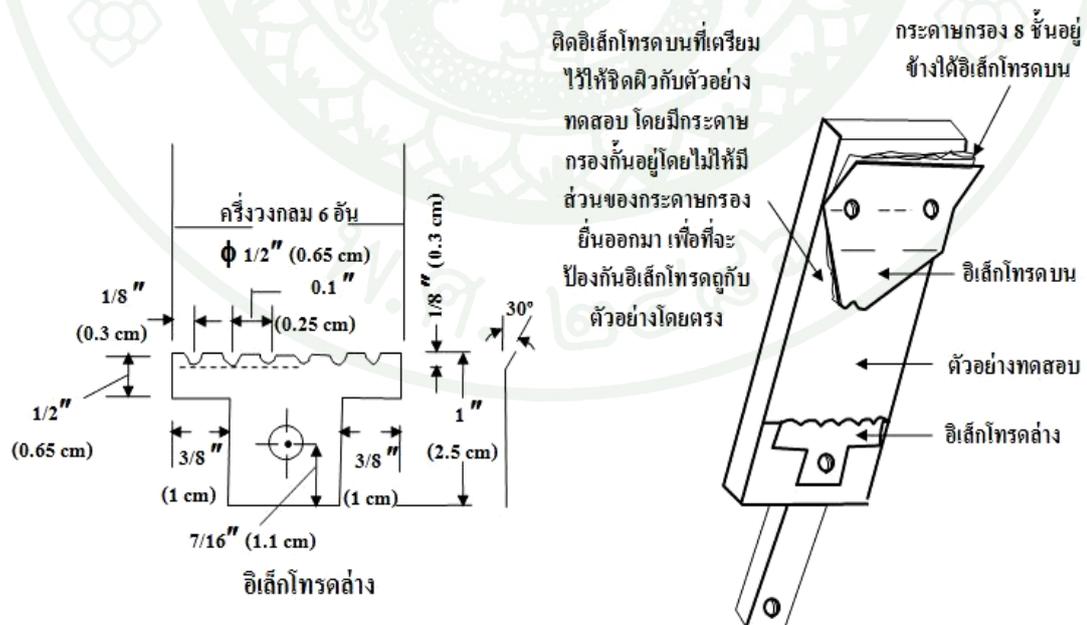


ภาพที่ 17 ลักษณะการต่ออุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2303

5.1.2 สิ่งที่ใช้รองกับฟิวส์ที่ต่อกับแผ่นตัวอย่างทดสอบที่เรียบให้ทำมุมกับแนวราบ 45° ดังแสดงใน ภาพที่ 17 แล้วฉีดสารละลายสิ่งสกปรกผ่านทาง Contaminant delivery hose (หลอดที่ให้สารละลายไหลไปยังกระดวยกรอง) เมื่อสารละลายไหลไปได้ครึ่งทาง กระดวยกรองที่มีความหนา 8 แผ่น ดูรายละเอียดใน ภาพที่ 18 และ ภาพที่ 19



ภาพที่ 18 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ตามมาตรฐาน ASTM D2303



ภาพที่ 19 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ล่าง และการประกอบเข้ากับตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2303

5.1.3 ก่อนที่จะเริ่มการทดลองในแต่ละวัน ต้องแทนที่กากของเหลวทั้งหมดใน beaker ที่ใส่สิ่งสกปรกไว้ด้วยสารละลายสิ่งสกปรกอันใหม่ ปิดปาก beaker ให้มิดชิดเพื่อที่จะไม่ให้ฝุ่นและสารละลายสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กกระเหยออกไปได้ แล้วใช้สารที่ผสมในน้ำกลั่นเพื่อช่วยในการซึมผ่านคือ 0.1 % โดยน้ำหนักของ ammonium chloride และ 0.02 % ของ nonionic สารละลายสิ่งสกปรกต้องมีความต้านทานอยู่ระหว่าง 370-400  $\Omega$ -cm เมื่อวัดที่  $23 \pm 1^\circ\text{C}$

5.1.4 หลังจากปรับค่าแล้วให้เริ่มกระบวนการต่างๆ โดยขึ้นกับการทดสอบตัวอย่างอันไหน นั่นก็จะเป็นอันที่เดิมที่เคลื่อนส่วนที่ได้ทดสอบในครั้งก่อนออกไป หรือจะเป็นอันใหม่ทั้งอัน

## ตารางที่ 2 อัตราสารละลาย

อัตราการไหลของสารละลาย แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 0.02 % (mL/min)	ช่วงค่าแรงดัน (kV)	ความต้านทาน (k $\Omega$ )
0.075	1.0 – 1.75	1
0.15	2.0 – 2.75	10
0.30	3.0 – 3.75	50
0.60	4.0 – 4.75	50
0.90	5.0 – 6.0	50

อัตราการไหลของสารละลายสิ่งสกปรกได้แสดงไว้อย่างเหมาะสมสำหรับสารละลายสิ่งสกปรกกับความต้านทานประมาณ 370-400  $\Omega$ -cm ที่  $23^\circ\text{C}$  บนตัวอย่างที่มีการซึมของสารละลาย ซึ่งตัวอย่างที่ซึมมันอาจจำเป็นที่จะเพิ่มการไหลของสารละลายสิ่งสกปรกที่ค่อนข้างคงที่ซึ่งจะทำให้เกิดแสงวาบบ่อๆ ถ้าความต้านทานของสิ่งสกปรกต่ำจะต้องการอัตราการไหลที่สูงกว่าสิ่งสกปรกที่มีค่าความต้านทานที่สูงกว่า ซึ่งการใช้สิ่งสกปรกในอัตราที่ต่ำนี้ต้องได้ข้อสรุปจากการทดลอง การเกิดแสงวาบที่อัตราสารละลายสิ่งสกปรกสูงจะลดลงได้ดีกว่าเพราะกระแสจะไหลบนแผ่นฟิล์มของสิ่งสกปรกโดยไม่ทำลายแผ่นฟิล์มนั้นอัตราของสารละลายสิ่งสกปรกที่ต่ำกว่าซึ่งระเหยไป ขณะที่เดือดหรือที่แรงดันที่สูงกว่าเป็นการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการเกิดแสงวาบเฉพาะที่เว้นช่วงจากระเบิดที่กระจายออก แนวโน้มสำหรับการเกิด รอยใหม่ และการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นด้วยการลดค่าความต้านทานของสารละลายสิ่งสกปรกหรือการรวมกันของวัสดุที่มีคาร์บอน เป็น

ส่วนประกอบเช่น น้ำตาลโดยธรรมชาติของสารเคมีของสิ่งสกปรกที่สามารถแตกตัวเป็น ไอออนได้ นั้นมักจะไม่ใช่สำคัญในการพิจารณาต่อการเกิดรอยไหม้ แต่อาจมีความสำคัญต่อการสึกกร่อน

5.1.5 สำหรับตัวอย่างที่ไม่เคยถูกกระทำโดยแรงดันและสิ่งปนเปื้อนมาก่อน (เป็นตัวอย่างอันใหม่) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการฉีดพ่นสารละลายสิ่งสกปรกเข้าไปในกระดวยกรองที่ยินยอมให้สารละลายสิ่งสกปรกใหม่ๆ ซึมผ่านทำให้เปียกอย่างทั่วถึง และแทนที่ของเหลวอันเก่าในหลอดและกระบอกฉีด และเพื่อที่จะให้อัตราการไหลคงที่ที่ไหลเข้าไปอีกด้านหนึ่งของผิวหน้าตัวอย่างการทดสอบระหว่างอิเล็กโตรด สิ่งสกปรกต้องไหลจากหลอดในส่วนล่างของอิเล็กโตรดด้านบน และไม่ควรฉีดพ่นออกมาด้านข้างๆ หรือข้างบนของกระดวยกรองระหว่างแรงดันที่เพิ่มขึ้น 1 จีของ pipette ปรับตัวอย่างให้เหมาะสมเพื่อให้สิ่งสกปรกไหลลงมาใกล้เส้นศูนย์กลางของตัวอย่างเท่าที่เป็นไปได้ หลีกเลี่ยงที่จะลากอุปกรณ์ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเย็นและแห้งเกินไป หรือเกิดไอน้ำที่มาจากกระเหยของสารละลายสิ่งสกปรก ปิดประตู safety และใช้แรงดันในการทดสอบให้เหมาะสมตามตารางที่ 2 โดยเงื่อนไขการไหลที่คงที่ควรสังเกตภายใน 5 นาทีแรก ที่อัตราการพ่นปกติของสิ่งสกปรกที่ไม่ใช่ใช้มือฉีดให้อัตราเร็วขึ้น

5.1.6 สำหรับตัวอย่างที่ใช้สารละลายสิ่งปนเปื้อนอันที่ทดสอบก่อนหน้า (นั่นคือได้หยุดการทดสอบตลอดทั้งคืน) ล้างผิวตัวอย่างทดสอบ และกระดวยกรองด้วยน้ำกลั่นเพื่อที่จะเอาสารสกปรกที่เหลือจากการทดสอบครั้งก่อนออก ห้ามเปลี่ยนกระดวยกรอง แล้วเริ่มให้สิ่งสกปรกไหลบนกระดวยกรองให้ทั่วและแทนที่ของเหลวอันเก่าในท่อและกระบอกฉีดจนกระทั่งสารละลายสิ่งปนเปื้อนไหลด้วยอัตราคงที่โดยกำหนดให้ไหลผ่านผิวตัวอย่างไปอีกด้านหนึ่ง กระดวยกรองจะจับสิ่งปนเปื้อนโดยทันที และฉีดน้ำกลั่น 2 mL ลงในกระดวยกรองด้วยกระบอกฉีด ล้างผิวตัวอย่างอีกครั้งอย่างรวดเร็วด้วยน้ำกลั่นแล้วปิดประตู safety จากนั้นเริ่มการไหลของสารละลายสิ่งสกปรกแล้วใช้แรงดันตามต้องการ เวลาเป็นส่วนประกอบสำคัญในที่นี้สำหรับทุกๆ ช่วงเวลาที่ผ่านไปจะส่งผลให้เริ่มเกิดความเสียหาย

5.1.7 ผลกระทบของแสงวาบที่มีลักษณะเป็นอาร์กสีเหลืองอ่อนถึงสีขาว (บางครั้งมีส่วนของสีฟ้า) ซึ่งควรปรากฏเด่นเหนืออิเล็กโตรดอันข้างล่างเป็นช่วงเวลาที่สั้นมากหลังจากใส่แรงดันการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า เหล่านี้ควรที่จะเกิดอย่างต่อเนื่อง แม้ว่ามันจะกระโดดจากแห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่งก่อนที่จะค่อยๆ เล็กลงแล้วดับไป แสง hot spot นี้จะเริ่มกักร้อนบนผิวตัวอย่างและสุดท้ายแล้วได้นำไปสู่การเกิดรอยไหม้ เงื่อนไขของผลกระทบของแสงวาบสามารถสังเกตด้วยออสซิโลสโคปแบบ cathode-ray สัญญาณอาจจะตัดส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องของความต้านทานผิวลึกลงไปที่

ละส่วน แสงวาวที่เหมาะสมสังเกตเห็นได้บ่อยๆ แต่มันจะไม่มีการแตกกระจายออกที่ 60 Hz ของคลื่นกระแสที่มากกว่าช่วงเวลา  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลของทั้งหมดผลกระทบของแสงวาวถือว่าเป็นวิกฤตอย่างหนึ่ง ถ้าไม่ต้องการให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว วงจรไฟฟ้า, ลักษณะการไหลของสิ่งสกปรก และความนำไฟฟ้าของสิ่งสกปรกต้องได้รับการตรวจสอบอย่างระมัดระวังรวมทั้งต้องปรับค่าให้เหมาะสมถ้าจำเป็น ไม่ว่าจะเริ่มต้นตัวอย่างเก่า หรือตัวอย่างใหม่ให้ดูที่แสงวาวไฟที่ 15 นาที แรก และทุกช่วงอย่างน้อยทุกชั่วโมง ดังนั้นเวลาที่เกิดรอยไหม้สามารถจับบันทึกได้ดังนี้

- ก. แสงวาวไฟที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ระหว่างการฉีดพ่นอย่างต่อเนื่อง
- ข. การสูญเสียสารละลายสิ่งสกปรกใดๆ เช่น กระจกเดินออกจากด้านข้างของกระดวยกรอง
- ค. การไหลลงของสารละลายสิ่งสกปรกอันใดอันหนึ่งในการทดสอบผิวตัวอย่างควรคงที่แทนที่จะพ่นออกมาอย่างฉับพลัน
- ง. ฟองอากาศที่เข้าไปในกระบอกฉีดจะทำให้เปลี่ยนแปลงอัตราของสิ่งสกปรกที่ใช้
- จ. การติดขัดของลูกกระบอกฉีด

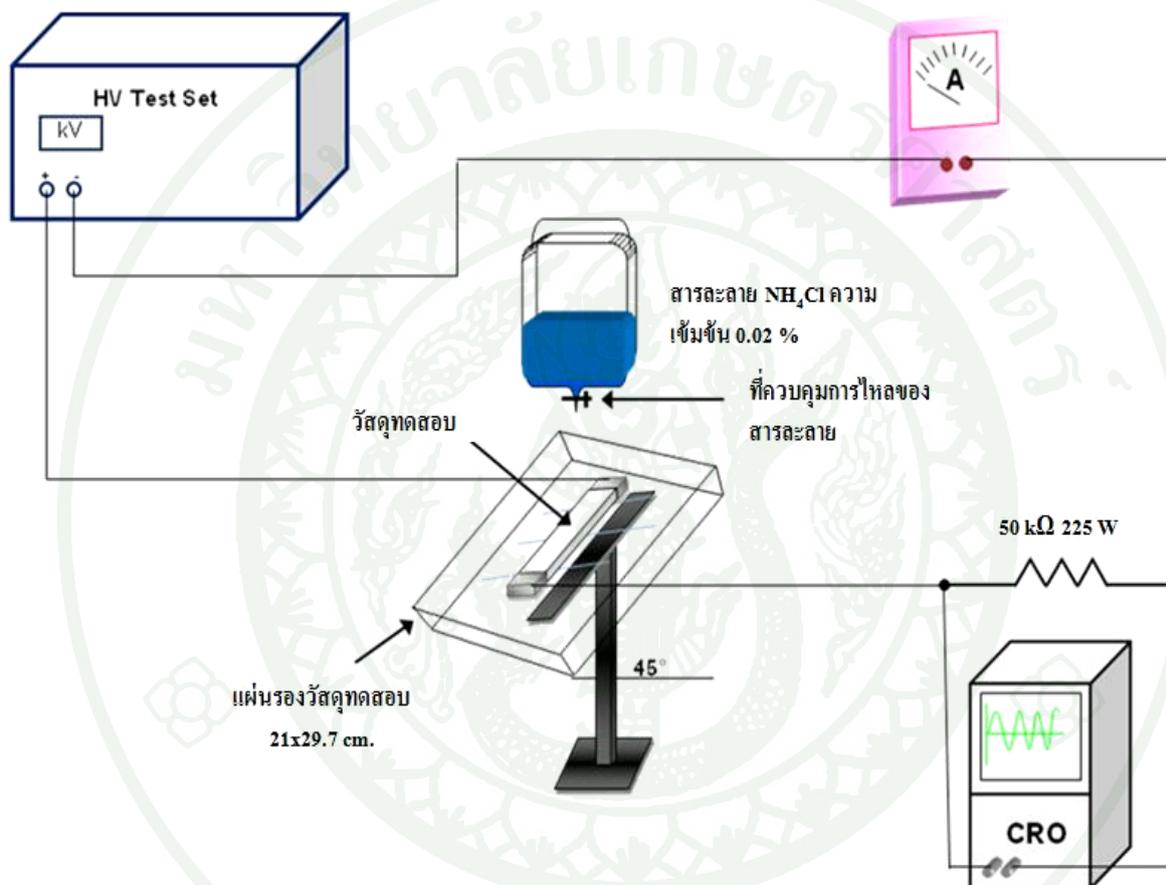
ให้จับบันทึกเวลาโดยที่ไม่ต้องหยุดการทดลอง การทดสอบตัวอย่างใดๆ นั้นถ้าเกิดรอยไหม้ขึ้น 1 นิ้ว แล้วให้หยุดการทดสอบแล้วปลดแหล่งจ่ายแรงดันออกชั่วขณะซึ่งจะยอมให้สารละลายสกปรกซึมมากขึ้นในพื้นที่ที่เกิดรอยไหม้บางส่วนของตัวอย่างที่มีส่วนอื่นยังไม่เสียหาย กับผลที่มาจากแสงวาวที่ชัดเจนหลังจากเริ่มต้นการทดลองใหม่อีกครั้ง กระแสที่มากเกินไปในตัวอย่งซึ่งความต้านทานผิวสัจจะทำให้เกิดการเกิดรอยไหม้ขึ้นอีกอย่างต่อเนื่อง

5.1.8 ถ้าการทดสอบไม่เสร็จสมบูรณ์ภายในวันทำการทดสอบ ซึ่งการทดสอบสามารถทำต่อได้ในวันถัดมาโดยป้องกันตามนี้

- ก. ให้เอาแหล่งจ่ายแรงดันออก และหยุดการป้อนสารละลายสิ่งสกปรก
- ข. ล้างกระดวยกรองอย่างละเอียดด้วยน้ำกลั่น ห้ามแทนที่ด้วยกระดวยกรองอันใหม่
- ค. ล้างผิวตัวอย่างอย่างละเอียดด้วยน้ำกลั่น
- ง. เอาสารละลายสิ่งสกปรกออกจาก beaker และแทนที่ด้วยน้ำกลั่น ดังนั้นการใส่น้ำเข้าไปในท่อจะทำให้ไม่มีการพอกของกากสิ่งสกปรกที่อันตรายค้างอยู่ ห้ามปั๊มฉีดน้ำกลั่นอย่างฉับพลันใส่ท่ออย่าง, กระดวยกรอง หรือกระบอกฉีด

### 5.1.9 วิธีการใช้แรงดัน และการประเมินลักษณะของรอยไหม้ และการสึกกร่อนขึ้นกับวิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน

จากเนื้อหาของมาตรฐาน ASTM D2303 ที่กล่าวมาในข้างต้นได้นำมาเป็นมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงกับงานวิจัยในเล่มนี้ จึงได้ทำการประยุกต์การต่อวงจรจากภาพที่ 17 ให้เข้าใจง่ายดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้

ส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดสอบ และขั้นตอนวิธีการทดสอบจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้ออุปกรณ์และวิธีการ หน้า 37 ต่อไป

## 6. งานวิจัยที่อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D2303

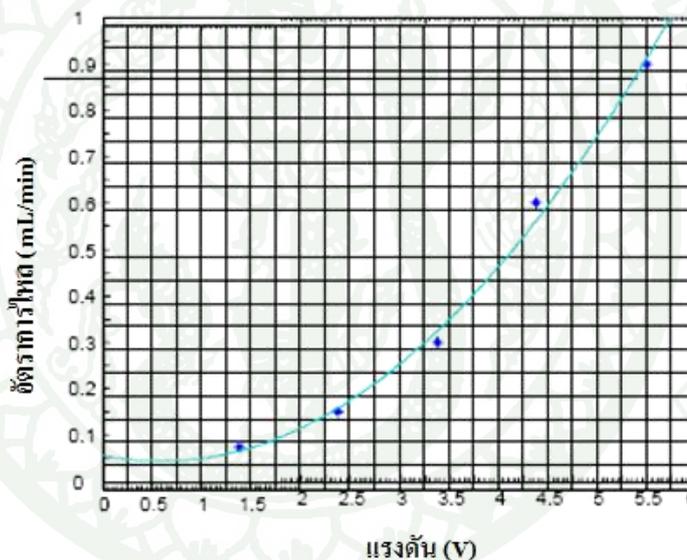
จากมาตรฐานที่ได้เสนอในข้างต้นนี้ได้มีนักวิจัยมากมายที่นำมาอ้างอิงเพื่อทำการทดสอบเกี่ยวกับคุณภาพของวัสดุฉนวนดั่งที่จะยกตัวอย่างบทความของงานวิจัยที่ได้ใช้มาตรฐาน ASTM D2303 นี้โดยสังเขป

6.1 บทความการทดสอบด้วยวิธีแผ่นเอียงกับ RTV-Silicone Rubber เคลือบ Porcelain และ Cyclo-Aliphatic Epoxy Resin

ฉนวนประเภทยางซิลิโคน (Silicone Rubber) เป็นที่รู้จักว่ามีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกซึ่งเป็นการทำวัสดุเหมาะสมมากสำหรับอุตสาหกรรมฉนวนนอกอาคารของสายส่งไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าแรงสูง ฉนวนลูกถ้วยของสายส่งได้ใช้ฉนวนยางซิลิโคนชนิด HTV (High Temperature Vulcanization Silicone Rubber) อย่างกว้างขวางซึ่งใช้แทนที่ลูกถ้วยแบบแก้ว และแบบ Porcelain ในหลายๆ ตัวอย่าง ในช่วงที่สภาพอากาศที่มีความชื้นมากๆ บนผิว Silicone Rubber จะไปขัดขวางการไหลของกระแสระหว่างที่มีเงื่อนไขของความชื้นและมลภาวะ ในกรณีของอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าที่ซึ่งการแทนที่ของลูกถ้วยแบบ Porcelain เป็นไปไม่ได้ ทำให้ปัญหาในเรื่องของมลภาวะสามารถถูกแทนที่โดยการเคลือบฉนวนแบบ RTV (Room Temperature Vulcanization Silicone Rubber) ผลลัพธ์จากการทดสอบอายุการใช้งานตามธรรมชาติที่สถาบันทดสอบ Koeberg Insulator (KIPTS) แนะนำว่าคุณสมบัติความร้อนของวัสดุฉนวนส่วนมากมีอิทธิพลต่อการแสดงออกของฉนวน

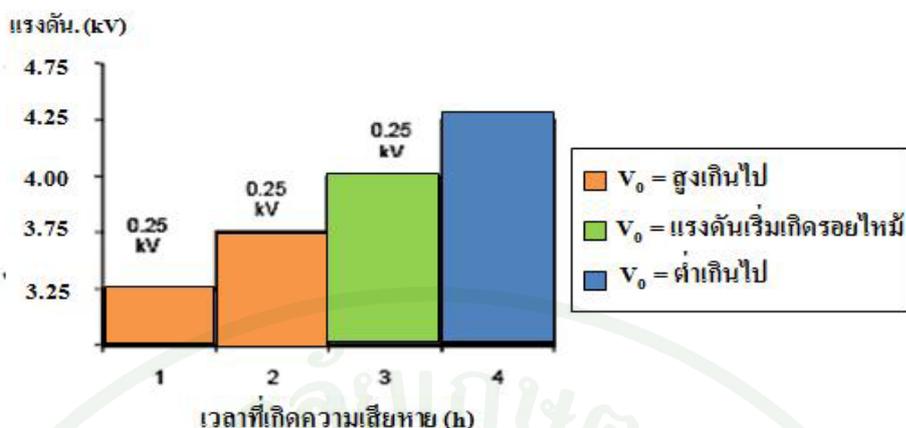
การทดสอบแบบ Inclined plane เป็นการทดสอบที่เข้มงวดต่อการประมาณการกระทำของรอยไหม้ของวัสดุฉนวน รอยไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นส่วนคาร์บอนตัวนำ เนื่องจากประกายไฟและการอาร์ค บนส่วนประกอบฉนวนที่ใช้งานนอกอาคาร การเกิดรอยไหม้ได้เริ่มจากการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวในส่วนที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และมันถูกดิสชาร์จอย่างสม่ำเสมอโดยความชื้น และสิ่งสกปรกบนผิวฉนวน เงื่อนไขต่างๆ ระหว่างการทดสอบแบบ Inclined Plane นั้นเหมือนกันต่อความชื้นและสิ่งสกปรกซึ่งเกี่ยวข้องกับการอาร์คที่พื้นที่แห้งเล็กๆ บนผิวฉนวน ด้วยเหตุนี้การทดสอบแบบ Inclined Plane ได้ถูกเลือกเพื่อที่จะประเมินการแสดงผลของหลายๆ ตัวอย่าง ขณะที่ส่วนผสม Silicone Rubber ไม่ได้ประกอบด้วยคาร์บอนการก่อตัวของรอยไหม้ก็เป็นไปไม่ได้ประกายไฟและการอาร์คได้นำไปสู่การสึกกร่อนของวัสดุซึ่งเป็นการเปิดเผยส่วนประกอบพื้นฐานของวัสดุ รอยไหม้อาจจะขยายตัวบนวัสดุที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเป็นวัฏจักรสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเป็น Porcelain เป็นความต้านทานการเกิดรอยไหม้

จากการทดสอบโดยเพิ่มแรงดันทีละขั้นจนเริ่มเกิดรอยไหม้ (Step-wise initial tracking voltage) ตัวอย่างที่นำมาทดสอบต้องทำความสะอาดก่อนและแช่ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ตลอดคืน ตัวอย่างทดสอบที่ติดตั้งบนแผ่นเอียงตั้งรูปกับกระดาษกรอง 8 ชั้นที่อยู่ด้านล่าง อิเล็กโทรดเพื่อที่จะเป็นตัวที่สะสมสำหรับสารละลายตัวนำไฟฟ้า ซึ่งสารละลายตัวนำไฟฟ้า ประกอบด้วย สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ที่ความเข้มข้น 0.1% ที่มีค่าความต้านทานระหว่าง 370-400  $\Omega\text{-m}$  สารละลายดังกล่าวจะถูกสูบขึ้นโดยปั๊ม อัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญมากที่เป็นตัวตัดสินการเกิดอาร์ก มันเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อการเกิดประกายไฟขึ้น ตารางได้ให้อัตราการไหลที่เป็นบทบาทของการจ่ายแรงดันที่ปรากฏในมาตรฐาน ข้อมูลนี้ได้ถูกเสนอในกราฟดังภาพที่ 21 แต่บางครั้งก็ยากต่อการกำหนดเงื่อนไขโดยเฉพาะในกรณีของวัสดุที่เคลือบด้วย Hydrophobic silicone rubber



ภาพที่ 21 กราฟอัตราการไหลของสารละลายที่ต้องการตามการจ่ายแรงดัน  
(Holtzhausen, 2005 ; Engelbrecht, 2005 ; Pieterse, 2005)

ที่จุดเริ่มต้นของการทดสอบจะเลือกแรงดันที่ค่า  $V_0$  ซึ่งตามมาตรฐานมีค่า 3.25 kV ตามที่แสดงในภาพที่ 22 ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นทีละ 250 V จนกระทั่งเริ่มเกิดความเสียหาย หลักการสำหรับความเสียหายคือ เกิดรอยไหม้ที่มีความยาวระหว่าง 12-25 mm เป้าหมายความเสียหายระหว่าง 3 ชั่วโมง ที่ซึ่งในกรณีที่แรงดันความเสียหายเป็นการค้นหาหลังจากแรงดันเริ่มเกิดรอยไหม้



ภาพที่ 22 การสรุปผลของค่าแรงดันเริ่มเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน  
(Holtzhausen, 2005 ; Engelbrecht, 2005 ; Pieterse, 2005)

การลดความไม่แน่นอนของผลทดสอบวิธีแผ่นเอียง เนื่องจากคุณสมบัติที่เชื่อมโยงทางไฟฟ้าและทางกลต่างๆ วัสดุฉนวนอินทรีย์จึงเป็นที่นิยมใช้เพิ่มขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าย่อย แม้แต่เพื่อใช้งานในสภาพอากาศนอกอาคารสาเหตุที่ฉนวนอินทรีย์นี้เป็นที่นิยมเพราะสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายถึงจะเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนและมีความเหนียวและเบา แต่อย่างไรก็ตามยังคงเกิดปัญหาขึ้นกับฉนวนคือ ความเสื่อมสภาพเนื่องจากการกระทำของรังสี UV, ความชื้น และอุณหภูมิที่สูง ซึ่งรอยไหม้บนผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่จำกัดความปลอดภัยในการทำงานของฉนวนอินทรีย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง และมีผลต่อการเริ่มเสื่อมสภาพโดยสมบูรณ์ของฉนวนจากการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิว ความรู้ในเรื่องของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ และความเสียหายของฉนวนเป็นฉนวน พบว่าการเกิดรอยไหม้เป็นสิ่งสำคัญต่อความน่าเชื่อถือและการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้ส่งผลไปถึงความน่าเชื่อถือทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไฟฟ้า

ในการใช้งานจริง เมื่อสิ่งสกปรกได้รวมตัวกับความชื้นจากบรรยากาศโดยรอบทำให้เกิดเป็นในชั้นที่เปียกของมลภาวะ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกลายเป็นเส้นทางที่นำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดด้านที่จ่ายแรงดันกับด้านที่ต่อลงดิน ความต้านทานของฉนวนได้ลดลงอย่างมากต่อการปรากฏของมลภาวะ และความชื้นความต้านทานที่ต่ำลงในทางกลับกันจะส่งผลไปสู่กระแสรั่วตามผิวที่สูงขึ้น ความสูญเสียนี้ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นของพื้นที่แห้งเล็กๆ เมื่อพื้นที่แห้งนี้เกิดขึ้นการไหลของกระแสรั่วก็จะถูกขัดขวาง ตัวเหนียวนำของระบบได้ผลิตแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นผลกระทบเป็นเหมือนกับ Circuit breakdown ที่ซึ่งหน้าสัมผัสได้ช่วยให้ระบบแรงดันไฟฟ้าเพิ่มความถี่สูงขึ้นชั่วขณะจนถึงสองเท่าของแรงดันที่จ่ายในระบบ ในกรณีที่เกิด

พื้นที่แห่งแรงดันที่จ่ายเกือบทั้งหมดได้รวมข้ามพื้นที่แห่งนี้และทำให้เกิดปรากฏการณ์คิซาร์จไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ฟิวลนนวนบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการอาร์กนำไปสู่การลี้กร่อนที่ละน้อย และเกิดการก่อตัวของกากคาร์บอนซึ่งกลายเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของการลี้กร่อน การเบรคดาวน์โดยสมบูรณ์ของฟิวลนนวนโดยทั่วไปเมื่อเส้นทางของคาร์บอนได้แผ่ขยายนั้นหมายความว่า การเป็นฉนวนที่ไม่สามารถคงทนต่อระบบแรงดันได้

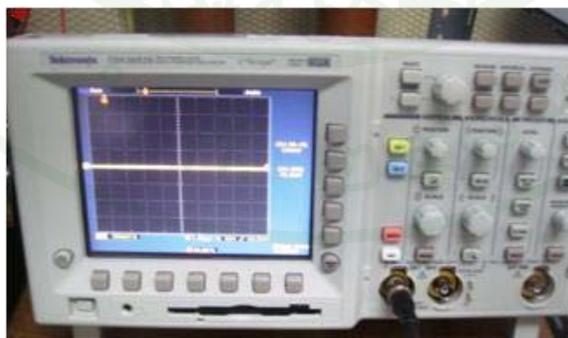
วิธีการทดสอบมาตรฐานสากลต่างๆ ที่มีอยู่มีเป้าหมายเพื่อที่จะประเมินความสัมพันธ์ของความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุฉนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ได้รวมถึงการใช้สิ่งเจือปนที่เป็นของเหลว หนึ่งในวิธีการทดสอบนั้นคือ การทดสอบแบบ Inclined-plane tracking ที่ถูกอธิบายในมาตรฐาน BS5604 ปี 1986, ใน IEC587 ปี 1984 และใน ASTM D2303 ปี 1984 ซึ่งมาตรฐาน ASTM D2303 ได้เสนอวิธีการทดสอบ 2 วิธี ได้แก่ วิธีแรงดันเริ่มแรกที่ทำให้เกิดรอยไหม้ (The initial tracking, ITV) และ วิธีระยะเวลาที่เริ่มเกิดรอยไหม้ (Time to track) มาตรฐาน BS5607 และ EC587 มีสิ่งจำเป็นที่เหมือนกันของวิธีการทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้คือ ระยะเวลาที่เริ่มเกิดรอยไหม้ทั้งที่ค่าแรงดันคงที่และค่าแรงดันที่ปรับขึ้นทีละค่า ขณะที่ระยะเวลาที่เริ่มเกิดรอยไหม้ภายใต้ค่าแรงดันคงที่เป็นวิธีการทดสอบที่เหมือนกันทั้ง 3 มาตรฐาน ดังนั้นวิธีการทดสอบแบบ Time to track จึงถูกอ้างถึงมากกว่าเพราะระหว่างตัวอย่างวัสดุทดสอบ 2 ตัวอย่างที่ให้ผลการทดสอบด้วยวิธี ITV ที่เหมือนกันถึงแม้จะมีค่าความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุทดสอบทั้ง 2 ที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้องวัดผลการทดสอบจากระยะเวลาเริ่มเกิดรอยไหม้ซึ่งอาจจะให้ผลแตกต่างกัน จากประสบการณ์มากมายในการประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานนี้ทำให้รู้ว่ากระบวนการของมาตรฐานได้สร้างความไม่คงที่ไว้มากเกินไปในผลของการทดสอบในกรณีเดียวกัน กระบวนการมาตรฐานได้เจาะจงเฉพาะ 5 ตัวอย่างทดสอบ และความไม่คงที่ที่มากเกินไปจะสามารถนำไปสู่ผลที่ผิดได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์



ภาพที่ 23 หม้อแปลง : AC High Voltage Tester, Type OT-2A20, Output Voltage 25 kV Max Input Voltage 230 kV 50/60 Hz, Capacity 2 kVA, OTOWA ELECTRIC CO.,L TD



ภาพที่ 24 Oscilloscope : 500 MHz 5 GS/s, Tektronix TDS 3052B, two Channel Color Digital PHOSPHOR OSCILLOSCOPE.



ภาพที่ 25 High Voltage Probe : Tektronix P6015, 1000x 3 pF 100 M $\Omega$ , With dielectric fluid : 40 kV PK, 20 kV DC, Without dielectric fluid : 13 kV PK or DC



ภาพที่ 26 Resistor: 180 k $\Omega$  225 W



ภาพที่ 27 ความต้านทานต่อขนานกัน 4 ตัว มีความต้านทานรวม 45 k $\Omega$  225 W



ภาพที่ 28 Digital Ammeter : Leakage Clam-on Tester CL-613, YOKOGAWA, 300 A max 50/60 Hz



ภาพที่ 29 อุปกรณ์สำหรับวางตัวอย่างทดสอบพร้อมกับที่ยึดกรวยแยกที่ใช้สำหรับ  
สารละลาย



ภาพที่ 30 กรวยแยกใส่สารละลายที่ดัดแปลงโดยนำที่ควบคุมหยดสารละลายของสาย  
น้ำเกลือมาช่วยควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย



ภาพที่ 31 Conductivity Meter : ที่ใช้วัดค่าความต้านทานของสารละลาย

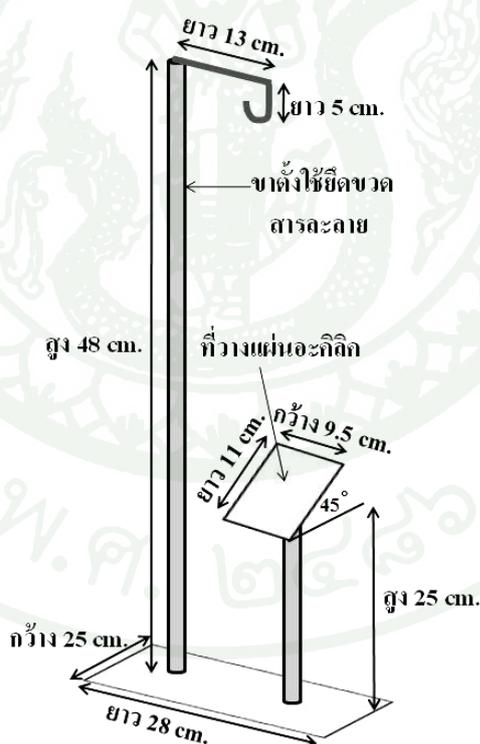


ภาพที่ 32 นาฬิกาจับเวลา

## วิธีการ

### 1. ศึกษาวิธีการทดสอบแบบ Time - to - track ในมาตรฐาน ASTM D2303

ทำการศึกษาวิธีการทดสอบแบบ Time – to –track ในมาตรฐาน ASTM D2303 วิธี time-to-track คือ การใช้ค่าแรงดันคงที่ตลอดทำการทดสอบ โดยเลือกค่าแรงดันที่มากที่สุดคือ ค่าแรงดัน 6.0 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min ตามตารางที่ 2 เพื่อเป็นการทดสอบในกรณีที่แย่มากที่สุดที่อ้างอิงจากค่าแรงดันในมาตรฐาน ซึ่งหยุดสารละลายให้ไหลจากอิเล็กโทรดทางด้านบนผ่านอิเล็กโทรดด้านล่างโดยให้เส้นทางของสารละลายอยู่บริเวณตรงกลางของวัสดุทดสอบ และทำการออกแบบการต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ ดังรายละเอียด ภาพที่ 18 โดยทำการออกแบบประยุกต์อุปกรณ์ในส่วนที่วางตัวอย่างวัสดุทดสอบให้เอียง 45° จากแนวราบ ซึ่งได้ออกแบบขาตั้งที่สามารถวางแผ่นอะกลีคขนาด 18 x 29.5 cm เพื่อใช้วางตัวอย่างทดสอบในแนวเอียง 45° จากแนวราบได้ ดูรายละเอียด ภาพที่ 33



ภาพที่ 33 อุปกรณ์สำหรับวางแผ่นอะกลีคพร้อมกับขาตั้งที่ใช้ยึดขวดสารละลาย

รวมทั้งทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับใส่สารละลายที่มีตัวควบคุมการไหลของสารละลาย ซึ่งสารละลายที่ใช้คือ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ที่มีความเข้มข้น 0.02 % โดยได้ประยุกต์ใช้ขวดกรวยแยกมาเป็นที่ใส่สารละลาย นำมาตัดในส่วนท้ายของขวดออกแล้วใช้ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของน้ำเกลือที่ปรับอัตราการไหลได้ติดเข้ากับส่วนท้ายของขวดกรวยแยกที่ถูกตัดออก พร้อมทั้งใช้ที่ยึดจับขวดกรวยแยกนี้กับขาตั้ง ดูรายละเอียด ภาพที่ 34 และภาพที่ 35



ภาพที่ 34 อุปกรณ์ขาตั้งพร้อมแผ่นอะกลีคและที่ยึดจับขวดกรวยแยก



ภาพที่ 35 อุปกรณ์ขวดกรวยแยกพร้อมชุดควบคุมการไหลของสารละลายและที่ยึดจับขวดกรวยแยก

## 2. เลือกวัสดุ และเตรียมตัวอย่างวัสดุจำนวนที่จะใช้ในการทดสอบ

ทำการเลือกวัสดุจำนวนที่จะนำมาทำการทดสอบซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวัสดุที่จะทำการทดสอบจำนวน 10 ประเภท ดังนี้

- 2.1 ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 "
- 2.2 ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC
- 2.3 ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันลีสเปรย์สีขาว
- 2.4 ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันลิฉนวนชนิดใส
- 2.5 ที่ครอบกันนก Silicone Rubber
- 2.6 ฉนวนโพลีเอทาลีน (Polyethylene, PE)
- 2.7 ฉนวน XLPE (Cross-link Polyethylene) ถูกขัดด้วยกระดาษทราย
- 2.8 ฉนวน XLPE (Cross-link Polyethylene) ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน
- 2.9 ฉนวนลูกถ้วยชนิด HTV
- 2.10 ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ (Conductor Cover)

เมื่อได้วัสดุที่ต้องทดสอบแล้วจะนำมาตัดเป็นชิ้นกว้าง 1 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดหัวท้ายของวัสดุทดสอบ ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้คือ กระดาษฟอยล์ ถ้าตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นท่อให้นำมาผ่าครึ่ง ดูรายละเอียด ภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การหุ้มอิเล็กโทรดของตัวอย่างทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้

### 3. ต่อวงจร ปรับอัตราการไหลของสารละลาย

เมื่อเตรียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเรียบร้อยแล้ว ให้ต่อวงจรดังภาพที่ 20 จากนั้นให้เตรียมสารละลายในการทดสอบ ดังภาพที่ 37 และทำการปรับอัตราการไหลของสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ให้ตรงกับค่ามาตรฐานตามตารางที่ 2 ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ได้เลือกค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV ดังนั้นอัตราการไหลของสารละลายคือ 0.9 ml/min โดยเริ่มแรกให้ปล่อยสารละลายไหลพอที่จะนับจำนวนหยดของสารละลายได้ให้นับจำนวนหยดของสารละลายที่ไหลออกมา 5 ml แล้วจดบันทึกจำนวนหยด จากนั้นให้เริ่มทำซ้ำใหม่ด้วยวิธีดังกล่าวอีก 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยจำนวนหยดสารละลายที่ให้ปริมาตร 5 ml ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลของสารละลายได้ดังนี้

จำนวนเฉลี่ยของหยดสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  110 หยด ให้สารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ปริมาตร 5 ml  
 $\therefore$  จำนวนของหยดสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 หยด ให้สารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ปริมาตร

$$\frac{1 \times 5}{110} = 0.0408 \text{ ml} \quad (20)$$

$\therefore$  แสดงว่าสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 หยด ให้ปริมาตร 0.0408 ml หรือ 0.0408 ml/หยด  
 เนื่องจากในการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้ค่าอัตราการไหลของสารละลาย 0.9 ml/min จาก ปริมาตรสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.0408 ml เป็นจำนวน 1 หยด  
 $\therefore$  ปริมาตรสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.9 ml จะ ได้จำนวนหยดเท่ากับ

$$\frac{1 \times 0.9}{0.0408} = 22.06 \text{ หยด} \approx 22 \text{ หยด/นาที} \quad (21)$$

สารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  จำนวน 22 หยด ใช้ระยะเวลาในการไหล 60 วินาที

$\therefore$  สารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  จำนวน 1 หยด จะใช้ระยะเวลาในการไหลเท่ากับ

$$\frac{60 \times 1}{22} = 2.72 \text{ วินาที} \quad (22)$$

$\therefore$  อัตราการไหลของสารละลาย  $\text{NH}_4\text{Cl}$  คือ 2.72 วินาที/หยด

การรักษาอัตราการให้สารละลายสิ่งสกปรกไหลลงที่ตลอดการทดสอบ การปรับอัตราที่เหมาะสม ในตอนเริ่มต้นและตอนสุดท้ายของแต่ละวันการทดลองในกรณีที่ทำทดสอบไม่เสร็จในวันเดียว หรือปรับหลายๆ ครั้งถ้าอัตราการไหลไม่คงที่ การปรับอัตราให้มั่นคงต้องคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 5\%$  (ทางที่ดีไม่ควรเกิน  $\pm 1\%$ ) ซึ่งจำเป็นต่อการทดสอบการเกิดรอยไหม้ของตัวอย่าง



ภาพที่ 37 การเตรียมสารละลายเพื่อทำการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้

#### 4. จ่ายแรงดันเริ่มทำการทดสอบ

หลังจากปรับอัตราการไหลของสารละลายแล้ว นำตัวอย่างการทดสอบที่เตรียมไว้วางบนแผ่นอะคริลิกเอียง  $45^\circ$  ต่อเข้ากับวงจร โดยให้อิเล็กโทรดบนต่อเข้ากับแหล่งจ่าย อิเล็กโทรดล่างต่อกับความต้านทานที่ต่อขนานกัน 4 ตัว จากนั้นให้เริ่มทำการจ่ายแรงดันที่ 6 kV ตาม ตารางที่ 2 แล้วจดบันทึกการทดสอบและบันทึกวีดีโอไว้ตลอดช่วงการทดสอบ และจะหยุดทำการทดสอบเมื่อรอยไหม้มีการขยายตัวได้ประมาณ 1 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D2303 ซึ่งในการจดบันทึกผลการทดสอบจะจดข้อมูลดังนี้

4.1 เวลาเริ่มทำการทดสอบ

4.2 อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ), ความชื้น (%) และความดันบรรยากาศ (mmHg) ณ ที่ห้องทดสอบ

- 4.3 เวลาเริ่มเกิด ดิสชาร์จไฟฟ้า, กระแสที่วัดได้ขณะเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า
- 4.4 ลักษณะของกราฟแรงดันขณะเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า
- 4.5 ลักษณะของเส้น, สี, การขยายตัว และตำแหน่งที่ดิสชาร์จไฟฟ้าที่สังเกตได้  
ลักษณะของผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทำการทดสอบ, ขณะเมื่อถูกกระทำด้วยดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และหลังจากเกิดรอยไหม้ขึ้น
- 4.6 เวลาที่เริ่มเกิดรอยไหม้
- 4.7 เวลาที่สิ้นสุดการทดสอบเมื่อรอยไหม้ขยายตัวได้ประมาณ 1 นิ้ว บริเวณอิเล็กโทรดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้ง 2 ด้าน
- 4.8 ลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดรอยไหม้ ที่สังเกตได้เช่น สี, รอยเขม่า, ลักษณะการขยายตัว, ลักษณะรูปแบบของรอยไหม้ เป็นต้น และลักษณะตัวอย่างที่ทดสอบในตอนสิ้นสุดการทดสอบ
- 4.9 เวลาที่หยุดการทดสอบเมื่อรอยไหม้ขยายตัวได้ประมาณ 1 นิ้ว บริเวณอิเล็กโทรดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้ง 2 ด้าน
- 4.10 เหตุการณ์อื่นๆ ที่สังเกตได้ขณะทำการทดสอบ เช่น การเกิดแสงวาบยังอยู่ที่ตัวอย่างทดสอบ, การเปลี่ยนสีของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

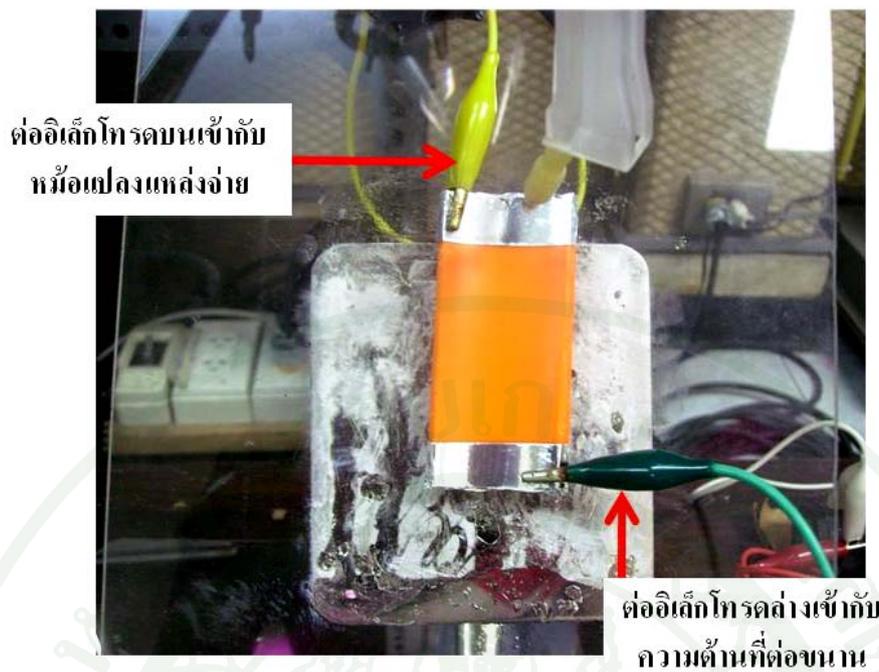
ในการทำการทดสอบจะใช้ค่าแรงดัน, อัตราการไหลของสารละลาย และค่าความต้านทาน เท่ากันกับทุกตัวอย่างทดสอบให้เป็นปัจจัยควบคุมเดียวกันตามวิธีการทดสอบแบบ Track – to – track เพื่อสามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบในตัวอย่างทดสอบทั้ง 10 ตัวอย่าง เนื่องจากความสัมพันธ์ของเวลาที่เกิดรอยไหม้นานๆ (ที่มากกว่า 10 ชม.) อาจส่งผลต่อความแน่นอนในการปล่อยสารละลายสิ่งสกปรกในอัตราที่คงที่ตลอดการทดลอง โดยควรปรับอัตราทั้งตอนเริ่มและตอนสุดท้ายของแต่ละการทดสอบ หรืออย่างน้อยปรับในตอนเริ่มต้นและตอนสุดท้ายในแต่ละวันของการทดลอง การจดบันทึกเวลาควรจดในรูปของ ชั่วโมง นาที วินาที (ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการทดสอบของแต่ละตัวอย่าง) ดูรายละเอียด ภาพที่ 38, ภาพที่ 39 และ ภาพที่ 40



ภาพที่ 38 การบันทึกผลการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ด้วยกล้องวิดีโอ



ภาพที่ 39 การต่อวงจรการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ตามภาพที่ 20 หน้า 32



ภาพที่ 40 การต่อวัสดุทดสอบเข้ากับวงจรการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยใหม่



ภาพที่ 41 ทำการจดบันทึกผลการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยใหม่ของวัสดุทดสอบ

## ผลและวิจารณ์

### ผล

#### 1. การทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 "

นำวัสดุทดสอบผ่าครึ่งแล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 42 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 42 ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4" ที่หุ้มอิเล็กโทรดก่อนทำการทดสอบ

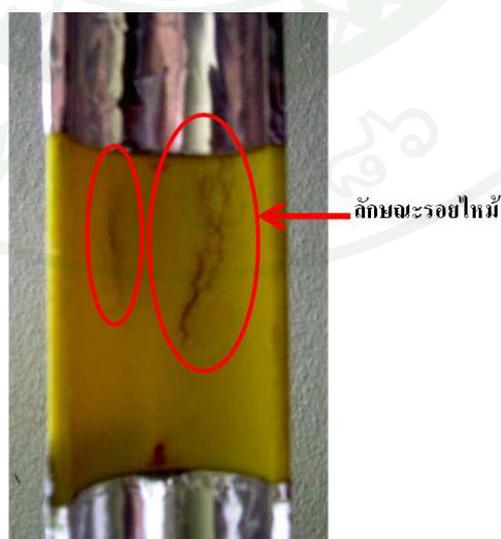
ตารางที่ 3 ข้อมูลเวลาการทดสอบของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 "

ตัวอย่างที่	เวลาเริ่มเกิดเส้นประกายไฟ หรือเกิดคิซชาร์จไฟฟ้า (นาทิจ : วินาที)	เวลาเริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จาง ๆ (นาทิจ : วินาที)	เวลาที่เกิดรอยไหม้ที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว (ชั่วโมง : นาทิจ : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ความดันบรรยากาศ (mmHg)
1	01:30	14:50	46:00	25	62	760
2	01:03	23:50	1:06:00	25	60	760
3	04:03	14:03	45:16	25	58	760
4	01:00	11:19	49:41	25	56	760
5	00:40	13:40	44:02	25	55	760
6	00:38	07:04	21:52	25	55	760
7	00:40	15:34	23:30	25	57	760
8	00:30	14:30	22:49	25	57	760
9	00:20	13:09	39:02	24	60	760
10	00:13	03:00	13:43	25	63	760

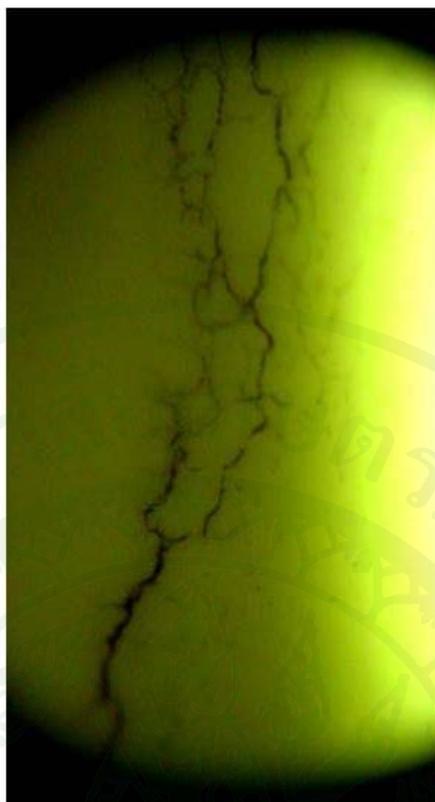
เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ	: 1:04	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จางๆ	: 13:06	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เกิดรอยไหม้ที่ความยาวประมาณ 1 นิ้ว	: 37:12	นาที
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย	: 24.9	°C
ค่าความชื้นเฉลี่ย	: 58.3	%
ค่าความดันบรรยากาศเฉลี่ย	: 760	mmHg

### ลักษณะรอยไหม้

หลังจากเริ่มการทดสอบเพียงชั่วครู่จึงเริ่มเกิดเส้นประกายไฟดิซชาร์จไฟฟ้า ต่อมาได้เริ่มเกิดไฟระยิบระยับขึ้นบริเวณที่สารละลายกระเด็นออกด้านข้างเนื่องจากแรงกระแทกของดิซชาร์จไฟฟ้า ซึ่งเป็นการลุกไหม้ของผิวฉนวน และต่อมาจะเกิดเป็นรอยไหม้จางๆ สีดำเกิดขึ้น เมื่อยังคงปล่อยให้สารละลายไหลผ่านอย่างต่อเนื่องไฟที่ลุกไหม้ภายในเนื้อฉนวนนั้นจะลุกลามพร้อมกับปรากฏรอยไหม้ที่ชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ บางๆ ที่กระจัดกระจายจนเมื่อเวลาผ่านไปเส้นรอยไหม้เหล่านั้นได้เชื่อมต่อกันจนเป็นแนวยาวและแตกแขนงออกเป็นเส้นเล็กๆ จากแนวตรงกลางออกไปคล้ายกับรากไม้รวมทั้งมีควันและได้กลิ่นของการไหม้เกิดขึ้นจนเกิดการลุกไหม้อย่างรุนแรงและรวดเร็วที่วัสดุทดสอบ โดยตลอดแนวรอยไหม้นั้นมีเขม่าสีดำเข้มที่ตรงกลางและมีผงเขม่าจากผิวฉนวนที่ไหม้ และบริเวณอิเล็กโทรดด้านบนที่ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันและด้านล่างที่ต่อกราวด์ซึ่งเป็นจุดที่เกิดเส้นประกายไฟเช่นกันจะมีร่องรอยสีน้ำตาลแดงที่เกิดจากการกระทำของเส้นประกายไฟอย่างต่อเนื่องที่วัสดุ ดังในภาพที่ 43 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 44



ภาพที่ 43 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 44 ลักษณะรอยใหม่ที่ขยาย 15 เท่า

## 2. ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC

ปลอกฉนวนนอกสุดของสายไฟ XLPE ดังภาพที่ 45 นำวัสดุมาตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" หุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 46 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 45 ฉนวนชั้นนอกสุดที่ถูกปอกออกจากสายไฟ XLPE



ภาพที่ 46 ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE หุ้มอีเล็กโตรด

ตารางที่ 4 ข้อมูลเวลาการทดสอบของ ฉนวนชั้นนอกสุด (Jacket Outer) ของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC

ตัวอย่างที่	เวลาเริ่มเกิดเส้นประกายไฟ หรือเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า (นาที : วินาที)	เวลาเริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จาง ๆ (นาที : วินาที)	เวลาที่เกิดรอยไหม้ที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว (ชั่วโมง : นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ความดันบรรยากาศ (mmHg)
1	23:32	24:11	26:40	24	68	760.5
2	00:05	01:23	02:54	24	68	760.5
3	00:10	03:40	05:25	24	68	760.5
4	19:24	20:06	25:03	24	63	760.5
5	12:47	16:30	19:31	24	63	760.5
6	05:18	15:53	20:40	24	62	760.5
7	03:58	15:32	19:50	24	63	760.5
8	18:05	21:34	25:36	25	66	760.5
9	07:56	16:33	20:43	25	66	760.5
10	12:06	22:48	24:29	25	66	760.5

เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ	: 10:20	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จางๆ	: 15:49	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เกิดรอยไหม้ที่ความยาวประมาณ 1 นิ้ว	: 19:05	นาที
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย	: 24.3	°C
ค่าความชื้นเฉลี่ย	: 65.3	%
ค่าความดันบรรยากาศเฉลี่ย	: 760.5	mmHg

### ลักษณะรอยไหม้

หลังจากเริ่มจ่ายแรงดัน ไม่นานก็เริ่มเกิดไฟระยิบระยับขึ้นที่บริเวณที่สารละลายกระเด็น ออกด้านข้างซึ่งเป็นการลุกไหม้ของฟิวลนนวนเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบแรก แต่จะสังเกตเห็นรอยไหม้จางๆ สีดำที่เกิดขึ้นนั้นได้ยากเนื่องจากวัสดุทดสอบมีสีดำ และหลังจากเกิดเส้นประกายไฟไม่นานก็เกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็วและค่อนข้างรุนแรงกว่าวัสดุทดสอบตัวอย่างที่ 1 รวมทั้งมีควัน และได้กลิ่นของการลุกไหม้เกิดขึ้น ซึ่งแนวรอยไหม้เป็นเส้นยาวตามแนวทางการไหลของสารละลาย มีแนวแตกแขนงออกจากเส้นน้อยและเป็นรอยนูนแข็งมีเขม่าสีดำเข้มที่ตรงกลาง และรอบๆ รอยไหม้ มีผงเขม่าเกิดขึ้นเยอะและเกาะกันเป็นก้อนจากฟิวลนนวนที่ไหม้ ดังในภาพที่ 47 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 48



ภาพที่ 47 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 48 ลักษณะรอยไหม้ที่ถูกขยาย 15 เท่า

### 3. ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 " ฟอสเฟตเปรียสีขาว

นำท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 " นำมาผ่าครึ่งและตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" แล้วฟอสเฟตเปรียสีขาวซึ่งเป็นสีสำหรับเคลือบรถยนต์ ดังภาพที่ 50 ให้ทั่วตัวอย่างทดสอบ หุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 49 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 49 ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีสเปรย์ก่อนทำการทดสอบ



ภาพที่ 50 สีสเปรย์สีขาวสำหรับเคลือบรถที่ใช้ฟันตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 5 ข้อมูลเวลาการทดสอบของ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " ฟันลีสเปรย์สีขาว

ตัวอย่างที่	เวลาเริ่มเกิดเส้นประกายไฟ หรือเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า (นาที่ : วินาที)	เวลาเริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จาง ๆ (นาที่ : วินาที)	เวลาที่เกิดรอยไหม้ที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว (ชั่วโมง : นาที่ : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ความดันบรรยากาศ (mmHg)
1	00:40	01:19	07:32	25	66	760.5
2	00:30	01:06	10:49	25	66	760.5
3	00:27	00:52	14:54	25	66	760.5
4	00:10	00:49	01:54	25	65	760.5
5	00:05	00:37	07:22	25	65	760.5
6	00:03	00:23	05:38	25	65	760.5
7	00:03	00:30	10:34	24	63	760.5
8	00:06	00:46	11:05	24	63	760.5
9	00:15	00:58	05:49	24	65	760.5
10	00:20	00:51	12:47	24	65	760.5

เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ	: 0:16	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จางๆ	: 0:49	นาที
เวลาเฉลี่ยที่เกิดรอยไหม้ที่ความยาวประมาณ 1 นิ้ว	: 8:50	นาที
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย	: 24.7	°C
ค่าความชื้นเฉลี่ย	: 64.9	%
ค่าความดันบรรยากาศเฉลี่ย	: 760.5	mmHg

### ลักษณะรอยไหม้

พอเริ่มจ่ายแรงดันก็เกิดเส้นประกายไฟขึ้นเร็วมาก และผ่านไปไม่นานสีที่พ่นได้เริ่มนูนพองขึ้นและกลายเป็นรูเล็กๆ เมื่อสารละลายไหลผ่านก็ทำให้สีที่พ่นกลายเป็นรูตลอดแนวซึ่งผิวฉนวนที่อยู่ข้างในรูเล็กๆ ดังกล่าวก็จะถูกความร้อนของเส้นประกายไฟจนทำให้เกิดเป็นรอยไหม้ขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่นานก็เกิดการลุกลามที่ค่อนข้างรุนแรง รวมทั้งมีควัน และได้กลิ่นของการลุกลามเกิดขึ้น ซึ่งแนวรอยไหม้เป็นเส้นยาวตามแนวทางของสารละลายมีเขม่าสีดำเข้มที่ตรงกลาง และรอบๆ รอยไหม้ มีแนวแตกแขนงออกจากเส้นตรงกลางน้อยรวมทั้งมีผงเขม่าเกิดขึ้นเช่นกัน ดังในภาพที่ 51 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 52



ภาพที่ 51 ลักษณะรอยไหม้ของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พ่นสีสเปรย์สีขาว



ภาพที่ 52 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น

#### 4. ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีจนวนชนิดใส

นำท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " นำมาผ่าครึ่งและตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" แล้วฟันสีจนวนชนิดใสซึ่งเป็นที่ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนสำหรับเคลือบลูกถ้วย Porcelain ดังภาพที่ 54 ให้ทั่วตัวอย่างทดสอบ แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 53 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 53 ลักษณะท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พ้นสีฉนวนก่อนการทดสอบ



ภาพที่ 54 สีฉนวนสำหรับพ่นตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 6 ข้อมูลเวลาการทดสอบของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC 3/4 " ฟันลิ้นจวน

ตัวอย่างที่	เวลาเริ่มเกิดเส้นประกายไฟ หรือเกิดคิศจารจไฟฟ้า (นาที่ : วินาที)	เวลาเริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จาง ๆ (นาที่ : วินาที)	เวลาที่เกิดรอยไหม้ที่มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว (ชั่วโมง : นาที่ : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	ความดันบรรยากาศ (mmHg)
1	01:09	20:15	1:02:48	25	61	761
2	00:58	23:03	1:05:19	25	61	761
3	00:47	24:25	1:37:56	25	61	761
4	01:01	54:48	2:12:47	25	63	761
5	00:39	23:31	1:10:51	25	63	761
6	00:52	40:00	1:53:49	25	61	761
7	00:45	32:01	1:12:10	24	61	761
8	00:37	1:27:08	2:30:49	24	61	761
9	00:53	53:49	2:40:37	24	61	761
10	01:06	1:15:07	2:56:43	25	60	761

เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ	: 0:53 นาที
เวลาเฉลี่ยที่เริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จางๆ	: 43:25 นาที
เวลาเฉลี่ยที่เกิดรอยไหม้ที่ความยาวประมาณ 1 นิ้ว	: 1:50:23 ชั่วโมง
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย	: 24.7 °C
ค่าความชื้นเฉลี่ย	: 61.3 %
ค่าความดันบรรยากาศเฉลี่ย	: 761 mmHg

### ลักษณะรอยไหม้

เมื่อเส้นประกายไฟที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงและเสียงดังน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งผิวที่ลื่นเนื่องจากสีฉนวนที่พ่นทำให้หยดสารละลายไหลผ่านบนผิวฉนวนได้เร็วมาก และใช้เวลานานกว่าจะเกิดไฟระยิบระยับที่บริเวณด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำของเส้นประกายไฟที่ทำให้สารละลายที่ไหลกระเด็นออกด้านข้าง ไฟระยิบระยับนั้นไม่ได้เกิดขึ้นในทุกครั้งที่สารละลายไหลผ่านเหมือนตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ข้างต้น โดยในแต่ละครั้งที่เกิดไฟระยิบระยับจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที และมีขนาดเล็กมาก การเกิดรอยไหม้เป็นไปอย่างช้าๆ มีการลุกลามที่น้อยมาก และไม่รุนแรง เส้นรอยไหม้ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นบางเล็กๆ สั้นๆ รวมทั้งการแตกแขนงมีน้อย ไม่มีเขม่าและผงเขม่าเกิดขึ้น ส่วนควันที่เกิดขึ้นน้อยมากเช่นกัน ดังในภาพที่ 55 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 56



ภาพที่ 55 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุทดสอบ



ภาพที่ 56 รอยไหม้บนผิววัสดุทดสอบที่ถูกขยาย 15 เท่า

#### 5. ที่ครอบกันนก Silicone Rubber

นำที่ครอบกันนก Silicone Rubber ดังในภาพที่ 57 มาตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 58 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 57 ลักษณะที่ครอบกันนก Silicone Rubber



ภาพที่ 58 ลักษณะวัสดุที่ครอบกั้นก่อนทำการทดสอบ

เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ : 11 นาที  
เวลาที่เริ่มเกิดรอยไหม้ : 25 ชั่วโมง 57 นาที

#### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

เนื่องจากผิวของ Silicone Rubber มีความมันเงาทำให้หยดสารละลายไหลผ่านเร็วมาก ด้วยคุณสมบัติของโมเลกุลที่ออกแบบให้ทนต่อการเกิดรอยไหม้ได้ดีทำให้เมื่อเกิดแสงวาบไฟซึ่งแสดงถึงการลุกไหม้ของผิวฉนวนจะเกิดขึ้นแล้วดับลงเองโดยไม่มีกรลุกลามเหมือนตัวอย่างทดสอบที่ผ่านมาและไม่ได้เกิดทุกครั้งที่ยกสารละลายไหลผ่าน ลักษณะการไหม้จะเกิดเป็นการลุกไหม้ที่ลึกเข้าไปในเนื้อฉนวนเป็นเส้นเดียวไม่มีการแตกแขนงของรอยไหม้ มีเขม่าของรอยไหม้น้อยมาก เกิดควันขึ้นปานกลาง และมีกลิ่นคล้ายกับยางไหม้ ต้องใช้เวลานานมากกว่าที่รอยไหม้จะเกิดการขยายตัว ดังในภาพที่ 59 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 60



ลักษณะรอยไหม้

ภาพที่ 59 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนวัสดุที่ครอบกันนก Silicone Rubber



ภาพที่ 60 ลักษณะรอยไหม้ผิวฉนวนที่ครอบกันนก Silicone Rubber ที่ถูกขยาย 15 เท่า

## 6. ฉนวนโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE)

นำฉนวนโพลีเอทิลีน ดังในภาพที่ 61 มาตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอเล็กโตรดทั้งด้านบน และด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 62 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 61 ลักษณะฉนวน PE ก่อนทำการทดสอบ



ภาพที่ 62 ฉนวน PE ก่อนทำการทดสอบที่ติดอเล็กโตรดแล้ว

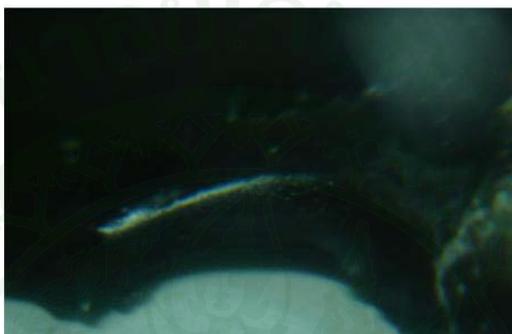
เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ	: 10 นาที
เวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้	: 28 ชั่วโมง 30 นาที

### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

ผลการทดสอบจนวน PE ไม่ได้เกิดเป็นรอยไหม้แต่เกิดเป็นลักษณะการหลอมละลาย และการสึกกร่อนของเนื้อวัสดุเนื่องจากความร้อนจากการกระทำเส้นประกายไฟโดยเฉพาะบริเวณขอบวัสดุ และมีเส้นสีขาวเล็กๆ สั้นๆ เกิดขึ้นที่ตามขอบ สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นเส้นของคราบเกลือของสารละลายที่ถูกความร้อนของเส้นประกายไฟจนสารละลายระเหิดและน่าจะเป็นจุดเริ่มต้นของการสึกกร่อนของเนื้อวัสดุ การลุกลามมีน้อยมาก ส่วนเนื้อวัสดุที่หลอมละลายมีลักษณะเป็นก้อนแข็งสีดำ ดังในภาพที่ 63 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 64



ภาพที่ 63 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นบนจนวน PE



ภาพที่ 64 ลักษณะการสึกกร่อนของฉนวน PE ที่ถูกขยาย 15 เท่า

#### 7. ฉนวน XLPE (Cross-link Polyethylene) ถูกขัดด้วยกระดาษทราย

นำฉนวน XLPE มาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียดสุดจนความมันของผิวหายไป ตัดให้ได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 65 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 65 ฉนวน XLPE ที่ถูกขัดด้วยกระดาษทรายที่ผิว

เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ : 7 นาที  
 เวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ : 22 ชั่วโมง 20 นาที

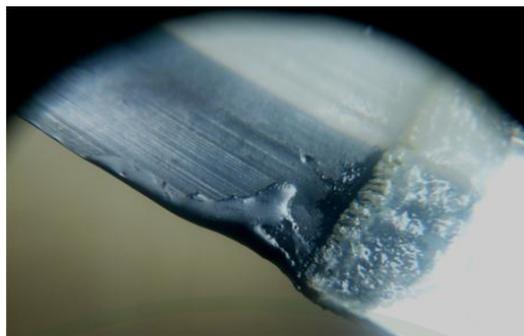
### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

หอคอยละลายไหลยากเกิดการค้างของหอคอยละลายบนผิวเนื่องจากผิวได้ถูกขัดด้วยกระดาษทรายจนความมันของผิวฉนวนหายไป แต่เมื่อเริ่มแรกเส้นประกายไฟยังคงเกิดน้อยและมีความรุนแรงน้อยอยู่และค่อยๆ เพิ่มความรุนแรงและเสียงดังมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเกิน 6 ชั่วโมง ผลการทดสอบคือ มีการหลอมละลายและสีกร่อนของเนื้อวัสดุเหมือนกับวัสดุ PE แต่ระยะเวลาในการเกิดความเสียหายเร็วกว่า รวมทั้งมีเส้นสีขาวจางๆ ค่อนข้างยาวเกิดขึ้นบนผิวฉนวน เมื่อเส้นประกายไฟรุนแรงขึ้นทำให้เกิดเป็นเหมือนรอยถูกของมีคมขูดซ้ำๆ จนผิวเป็นรอยที่มีเศษของเนื้อฉนวนเป็นรอยสีขาว และเกิดการหลอมละลายเป็นบริเวณกว้าง ดังในภาพที่ 66 และภาพขยายของรอยไหม้ในภาพที่ 67



← ลักษณะรอยสีกร่อน

ภาพที่ 66 ลักษณะการสีกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิว XLPE



ภาพที่ 67 รอยลึกร่อนของ XLPE ที่ถูกขยาย 15 เท่า

#### 8. ฉนวน XLPE (Cross-link Polyethylene) ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน

นำฉนวน XLPE ไปตากแดดกลางแจ้งเป็นเวลา 14 วัน โดยให้วางที่โคนแดดจัดถึงแม้ว่าเกิดฝนตกก็ไม่ต้องเก็บเข้าที่ร่ม เมื่อครบ 14 วัน ให้นำมาตัดได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 68 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ

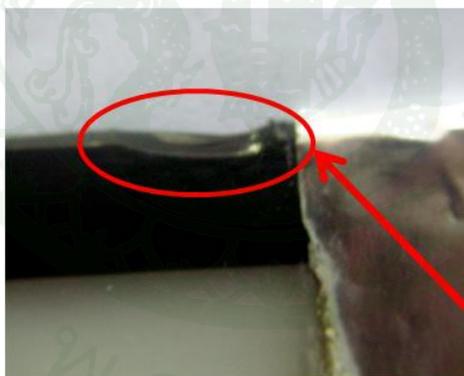


ภาพที่ 68 ลักษณะฉนวน XLPE ตากแดด 14 วัน ก่อนการทดสอบ

เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ : 13 นาที  
 เวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ : 46 ชั่วโมง 10 นาที

### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

หดยดสารละลายไหลได้เร็วและใช้เวลาเกิดเส้นประกายไฟนานกว่าตัวอย่างชนิดอื่น ซึ่งลักษณะเส้นประกายไฟในช่วงแรกไม่รุนแรงและมีปริมาณเส้นประกายไฟน้อยและสั้น โดยเริ่มแรกเส้นประกายไฟเกิดขึ้นที่บริเวณอิเล็กโทรดด้านบนก่อนเมื่อผ่านไปสักครู่ก็เริ่มเกิดเส้นประกายไฟที่อิเล็กโทรดด้านล่างแต่เส้นประกายไฟก็ยังไม่รุนแรง รวมทั้งไม่ได้เกิดเส้นประกายไฟทุกครั้งที่ยดสารละลายไหลผ่าน และเมื่อเกิดเส้นประกายไฟแล้วจะดับลงอย่างรวดเร็ว พอถึงจุดที่เกิดการหลอมเหลวของผิววัสดุจะเกิดขึ้นแล้วดับลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยจะไม่เกิดขึ้นติดต่อกันนานทำให้ถึงแม้เวลาผ่านไปก็ยังคงเกิดรอยสีกร่อนเพียงเล็กน้อย ลักษณะการสีกร่อนจะเหมือนกับตัวอย่างทดสอบ XLPE ที่ถูกขัดด้วยกระดาษทราย แต่มีขนาดเล็กกว่ามากและมีบริเวณที่เกิดน้อย นอกจากจะเกิดรอยสีกร่อนที่บนผิวแล้วยังเกิดการหลอมละลายที่บริเวณขอบของตัวอย่างด้วย เนื่องจากเส้นทางการไหลของสารละลายให้ไหลผ่านเฉียงเข้าใกล้ขอบวัสดุทดสอบ และเนื่องจากรอยการสีกร่อนมีขนาดเล็กมาก จึงต้องดูภาพขยายของรอยไหม้ใน ภาพที่ 69



ลักษณะรอยสีกร่อน



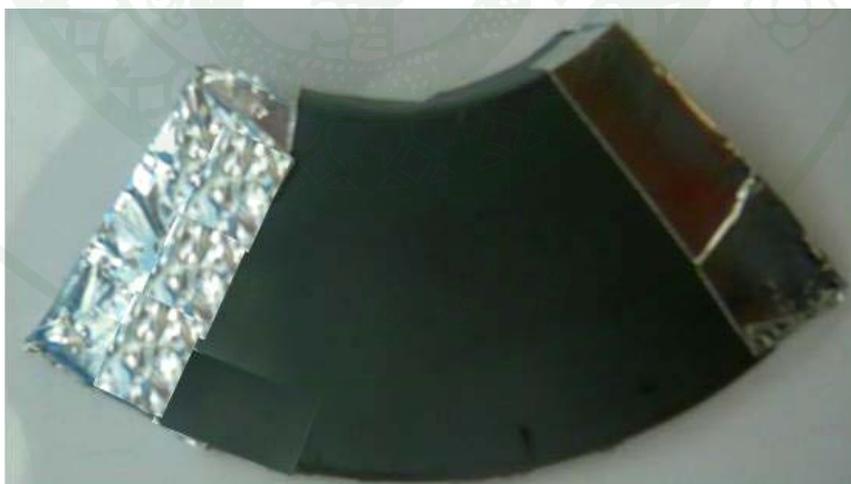
ภาพที่ 69 ลักษณะการสีกร่อนของ XLPE ตกแตก 14 วัน ถูกขยาย 15 เท่า

## 9. ฉนวนลูกถ้วย HTV

นำฉนวนลูกถ้วย HTV ดังภาพที่ 70 ตัดได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 71 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 70 ลูกถ้วย HTV



ภาพที่ 71 ลักษณะของลูกถ้วย HTV ก่อนการทดสอบ

เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ : 6 นาที  
 เวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ : 21 ชั่วโมง 40 นาที

### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

ลักษณะรอยไหม้เป็นลักษณะจุดเขม่าสีดำเล็กๆ บนผิวที่ไม่มีการถูกลามแต่เมื่อใช้แว่นขยายส่องดูจะพบว่าบริเวณจุดดำดังกล่าวได้มีร่องรอยของการสึกกร่อนบนผิว ดังในภาพที่ 72 และภาพขยายของรอยไหม้ใน ภาพที่ 73



ลักษณะรอยสึกกร่อน

ภาพที่ 72 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนลูกถ้วย HTV



ภาพที่ 73 รอยไหม้บนลูกถ้วย HTV ที่ถูกขยาย 15 เท่า

## 10. ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ (Conductor Cover)

นำไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ ดังภาพที่ 74 ตัดได้ขนาด 1" x 4" แล้วหุ้มด้วยอเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่างของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 75 โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบที่ 6 kV อัตราการไหลของสารละลาย 0.9 mL/min แล้วเริ่มทำการทดสอบ และจดบันทึกการทดสอบ



ภาพที่ 74 ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ



ภาพที่ 75 ลักษณะไลน์ การ์ด ก่อนทำการทดสอบ

เวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ : 6.40 นาที  
 เวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ : 16 ชั่วโมง 40 นาที

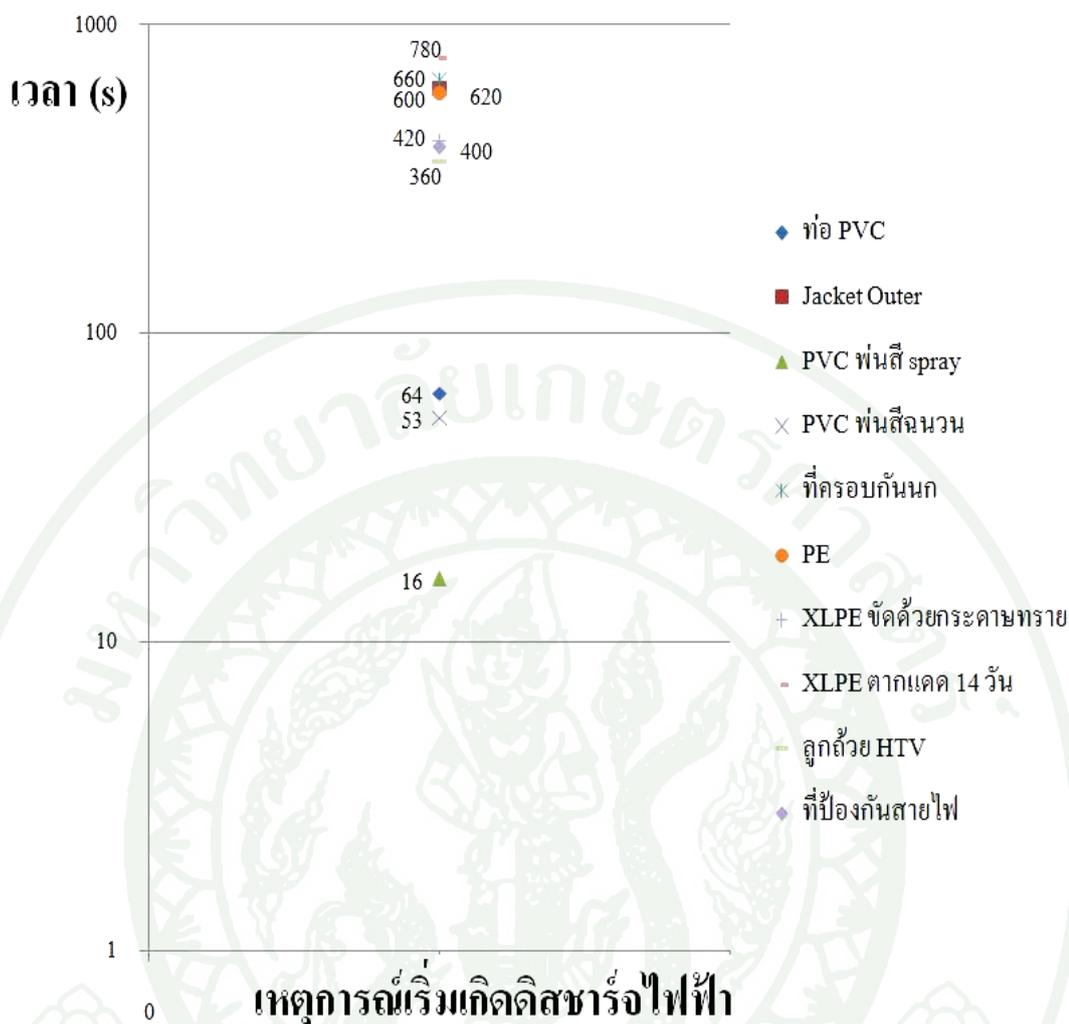
#### ลักษณะการเกิดรอยไหม้

เส้นประกายไฟเริ่มแรกยังรุนแรงแต่เมื่อเวลาผ่านไปเส้นประกายไฟเริ่มรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่อิเล็กทรอนิกส์ด้านล่าง ในตัวอย่างทดสอบนี้ไม่มีการเกิดเป็นรอยไหม้สีดำแต่เป็นลักษณะสีกร่อนที่ผิวแทนซึ่งได้หลอมละลายเหมือนพลาสติกที่ละลายเมื่อโดนความร้อน ถึงแม้ว่าเป็นวัสดุที่ทำมาจาก PVC แต่เนื่องด้วยวิธีการผลิตและสารเคมีที่ได้เติมลงไปทำให้มีคุณภาพดีกว่า PVC ทั่วไป และมีความทนกว่า ดังในภาพขยายของรอยไหม้ใน ภาพที่ 76



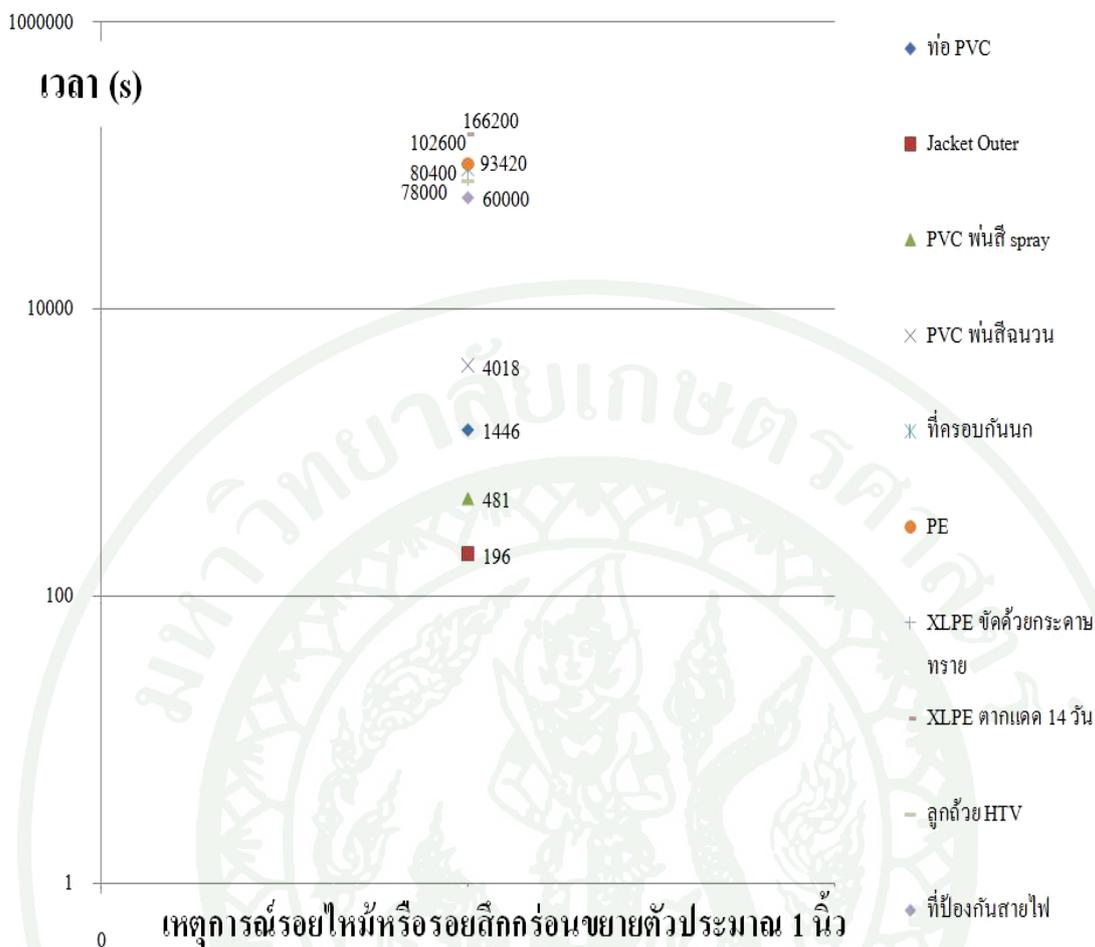
ภาพที่ 76 รอยสีกร่อนบนผิวไลน์ การ์ด ถูกขยาย 15 เท่า

จากการรวบรวมข้อมูลด้านเวลากับการเกิดเหตุการณ์เริ่มเกิดเส้นดิสชาร์จไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มเวลาของวัสดุตัวอย่างทดสอบได้ดังภาพที่ 77



ภาพที่ 77 กราฟแนวโน้มเวลาของวัสดุทดสอบในเหตุการณ์เริ่มเกิดดิสชาร์จไฟฟ้า

จากกราฟใน ภาพที่ 77 ทำให้สามารถทราบได้ว่าท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ที่ฟันตีสเปรย์สีขาวเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าได้เร็วที่สุดซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนมากกว่าวัสดุทดสอบชนิดอื่น และลูกถ้วย HTV เกิดดิสชาร์จไฟฟ้าช้าที่สุด นอกจากนี้จากข้อมูลด้านเวลายังสามารถเปรียบเทียบแนวโน้มในเหตุการณ์ที่เกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนขยายตัวประมาณ 1 นิ้ว ได้ดังภาพที่ 78



ภาพที่ 78 กราฟแนวโน้มเวลาของวัสดุทดสอบในเหตุการณ์ที่เกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนขยายตัวประมาณ 1 นิ้ว

จากกราฟใน ภาพที่ 78 พบว่าวัสดุทดสอบที่ทนต่อการเกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนได้ดีที่สุดคือ XLPE ดากแดดเป็นเวลา 14 วัน ส่วนวัสดุที่ทนต่อการเกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนได้แย่มากที่สุดคือ ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPR 33 kV ที่ทำมาจาก PVC

## วิจารณ์

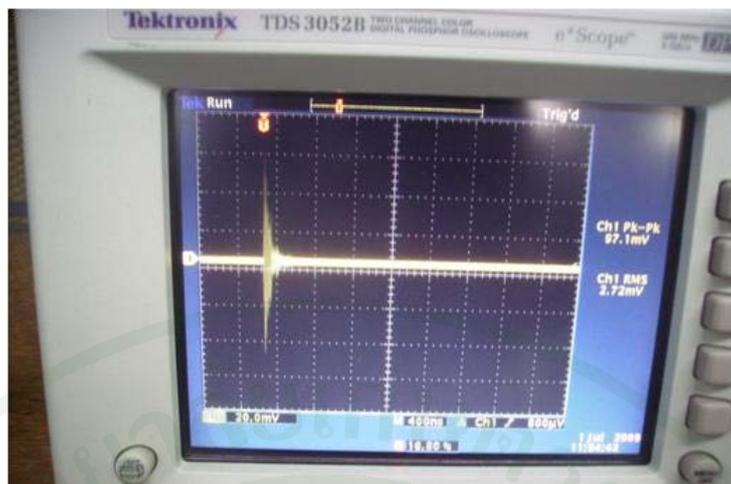
เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันสารละลายที่หยดลงบนผิวฉนวนจะยังคงมีลักษณะเป็นหยดที่ไหลผ่านลงมาอย่างรวดเร็วและมีเสียงดิสชาร์จไฟฟ้าที่ดังอย่างต่อเนื่อง พอเวลาผ่านไปไม่นานก็เริ่มเกิดเส้นประกายไฟสั้นๆ พร้อมมีเสียงดังและไอความร้อนเกิดขึ้นเมื่อหยดของสารละลายไหลผ่านบนผิวฉนวน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเรียกว่า “การเกิดอาร์กดิสชาร์จหรือดิสชาร์จไฟฟ้า” คือปรากฏการณ์ที่สารละลายเป็นตัวนำกระแสที่ดึงเอาอิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทดหรือขั้วที่ต่อกับด้านแหล่งจ่ายและมีแสงจ้า ลักษณะของเส้นประกายไฟมีสีม่วงชมพู เป็นเส้นเล็กๆ หลายนๆ เส้นรวมตัวกันเป็นแพ ดังภาพที่ 79



ดิสชาร์จไฟฟ้า

ภาพที่ 79 ลักษณะเส้นประกายไฟ (ดิสชาร์จไฟฟ้า)

จากนั้นสารละลายที่ไหลผ่านเริ่มก่อตัวเป็นลำทางของสารละลายทำให้เส้นประกายไฟขยายแผ่ออกกว้างและยาวขึ้น เสียงดังมากขึ้นและมีควันเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ทุกครั้งที่เกิดเส้นประกายไฟค่าแรงดันที่อ่านได้จากกราฟต้องนำไปคูณกับค่าของ Prope คือ 1000 เท่า ก่อนโดยค่าจากกราฟได้เริ่มที่ค่าประมาณไม่ถึง 200 mV จนมีค่าประมาณ 3 kV และค่ากระแสที่จับด้วยแอมมิเตอร์มีค่าตั้งแต่ประมาณไม่ถึง 0.5 mA จนถึงประมาณ 24.59 A ดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 กราฟแรงดันขณะที่เกิดเส้นประกายไฟ

เส้นทางของสารละลายจะระเหยอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนทำให้เส้นทางของสารละลายขาดเป็นช่วงๆ ที่มีเส้นประกายไฟเกิดขึ้น และเนื่องจากแรงกระทำของเส้นประกายไฟทำให้สายละลายบริเวณที่เกิดเส้นประกายไฟกระเด็นออกไปด้านข้างเป็นหยดเล็กๆ นอกจากนี้จากการสังเกตพฤติกรรมของดิสชาร์จไฟฟ้าพบว่าเมื่อหยดสารละลายหยดลงมาบนวัสดุแล้วขณะที่ไหลหยดสารละลายมีลักษณะยืดออกแล้วก็เกิดเส้นประกายไฟพร้อมๆ กับตอนที่หยดสารละลายไหลซึ่งจากพฤติกรรมนี้ได้สอดคล้องกับข้อมูลในเนื้อหาของหัวข้อ 3.3 ปัจจัยที่กระทบจากพฤติกรรมของกระแสรั่ว รวมทั้งทำให้แนวทางไหลของสารละลายเปลี่ยนทิศทางในบางครั้งจึงเกิดบริเวณที่มีหยดน้ำกระจายอยู่และเมื่อเส้นประกายไฟเริ่มมีการแผ่ขยายตัวออกไปก็ยิ่งทำให้เกิดเส้นประกายไฟเล็กๆ ที่พื้นที่ที่มีหยดน้ำซึ่งเวลาต่อมาทำให้เกิดไฟระยิบระยับขึ้นที่บริเวณดังกล่าว นั่นหมายถึงเริ่มสูญเสียความเป็นฉนวน เพราะไฟระยิบระยับเป็นการลุกไหม้ของฉนวนและต่อมาจะเกิดเป็นรอยไหม้จางๆ สีดำเกิดขึ้นหรือเกิดการ Tracking ขึ้น เมื่อยังคงปล่อยให้สารละลายไหลผ่านอย่างต่อเนื่องไฟระยิบระยับจะลุกลามพร้อมกับปรากฏรอยไหม้ที่ชัดเจนยิ่งขึ้นและได้กลิ่นการไหม้ของวัสดุทดสอบจนถึงจุดที่รอยไหม้นั้นมีความรุนแรงจนลุกไหม้ขึ้นซึ่งทำให้วัสดุเกิดความเสียหายในที่สุด

ดังนั้นจากการสังเกตการเกิดรอยไหม้ของฉนวนทำให้ทราบถึงความสามารถในการทนการเกิดรอยไหม้คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันให้กับวัสดุฉนวนทดสอบจนถึงเวลาที่เริ่มเกิดไฟระยิบระยับพร้อมเกิดรอยไหม้จางๆ ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาทั้งหมดที่ฉนวนเริ่มเสื่อมสภาพจนเกิดเป็นรอยไหม้ขึ้น แต่สำหรับวัสดุทดสอบที่เกิดการหลอมละลาย และการสึกกร่อนความสามารถในการทนดิสชาร์จไฟฟ้านั้นคือ ช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงสิ้นสุดการ

ทดสอบ ซึ่งการทดสอบด้วยวิธี Incline-Plane Tracking Test แบบ Time to Track นี้เป็นการเร่งให้วัสดุทดสอบเกิดความเสียหายโดยเกิดเป็นรอยไหม้หรือการสึกกร่อนภายใต้สภาวะปัจจัยต่างๆ ที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่นอกอาคารเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานๆ เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำผลข้อมูลที่ได้นี้มาประมาณอายุการใช้งานของวัสดุตัวอย่างทดสอบได้ แต่เนื่องจากบางวัสดุที่ทำการทดสอบไม่ได้เกิดรอยไหม้แต่เกิดการสึกกร่อนแทน ดังนั้นข้อมูลที่บันทึกจากการทดสอบครั้งนี้ที่จะนำมาใช้ในการประมาณอายุการใช้งานของวัสดุนั้นจึงใช้ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดการทดสอบมาเป็นบรรทัดฐานเดียวกันทั้งหมดเพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือในการประมาณอายุการใช้งาน จากข้อมูลที่บันทึกจากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุทดสอบ PVC ที่พ่นสีสเปรย์มีความสามารถในการทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าที่ต่ำสุด และวัสดุทดสอบ XLPE มีความสามารถในการทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าได้มากที่สุด โดยในการทดสอบครั้งนี้จะกำหนดให้วัสดุทดสอบชนิด PVC เป็นตัวเปรียบเทียบอ้างอิงเนื่องจากเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย หาซื้อง่ายและมีราคาที่ถูก ซึ่งลักษณะการใช้งานนั้นส่วนใหญ่จะอยู่นอกอาคารที่ต้องโดนมลภาวะ แสงแดด และความชื้นเป็นประจำจึงมีอายุการใช้งานเพียงประมาณ 6 เดือน ก็เริ่มเกิดความเสียหายจากมลภาวะสิ่งสกปรก และความชื้นดังกล่าว ซึ่งรูปแบบความเสียหายเหมือนกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ทำการทดสอบด้วยวิธีข้างต้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการเกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงกับระยะเวลาความเสียหายจากผลการทดสอบของวัสดุ PVC ทำให้สามารถหาค่าปัจจัยเร่งของการทดสอบได้ดังนี้

ระยะเวลาความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงของวัสดุ PVC

$$6 \text{ เดือน} = 180 \text{ วัน} = 180 \times 24 \times 60 = 15.552 \times 10^3 \text{ วินาที} \quad (23)$$

ระยะเวลาความเสียหายจากการทดสอบของวัสดุ PVC = 2,232 วินาที

$$\therefore \text{ปัจจัยเร่ง} = \frac{15.552 \times 10^3}{2232} \approx 6,967.742 \quad (24)$$

ตารางที่ 7 ระยะเวลาความเสียหายจากการทดสอบของวัสดุทดสอบ

ชนิดวัสดุทดสอบ	ระยะเวลาความเสียหาย
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด 3/4 "	37 นาที
ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC	19 นาที

ตารางที่ 7 (ต่อ) ระยะเวลาความเสียหายจากการทดสอบของวัสดุทดสอบ

ชนิดวัสดุทดสอบ	ระยะเวลาความเสียหาย
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสี spray สำหรับพ่นรด สีขาว	8 นาที
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีฉนวนชนิดใส	1 ชั่วโมง 50 นาที
ที่ครอบกันนก Silicone Rubber	25 ชั่วโมง 57 นาที
ฉนวน Polyethylene (PE)	28 ชั่วโมง 30 นาที
ฉนวน XLPE ที่ถูกขีดผิวด้วยกระดาษทราย	22 ชั่วโมง 20 นาที
ฉนวน XLPE ตกแตกเป็นเวลา 14 วัน	46 ชั่วโมง 10 นาที
ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV	21 ชั่วโมง 40 นาที
ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ	16 ชั่วโมง 40 นาที

ดังนั้นจึงสามารถประมาณอายุการใช้งานได้ดังนี้

$$\text{อายุการใช้งาน โดยประมาณ} = \text{ระยะเวลาที่เกิดความเสียหายในการทดสอบ} \times \text{ปัจจัยเร่ง} \quad (25)$$

ตัวอย่าง Jacket outer ของสายไฟ XLPE 33 kV สีดำ

ระยะเวลาที่เกิดความเสียหายในการทดสอบ = 19 นาที = 1,140 วินาที

$$\therefore \text{อายุการใช้งานโดยประมาณ} = 1,140 \times 6,967.742 = 7,943,226 \text{ วินาที} \approx 3 \text{ เดือน} \quad (26)$$

ตัวอย่าง ท่อ PVC สีเหลืองฟันสีฉนวนชนิดไม่มีสี

ระยะเวลาที่เกิดความเสียหายในการทดสอบ = 1 ชั่วโมง 50 นาที = 6,600 วินาที

$$\therefore \text{อายุการใช้งานโดยประมาณ} = 6,600 \times 6,967.742 = 4,598,710 \text{ วินาที} \approx 1 \text{ ปี 6 เดือน} \quad (27)$$

ตารางที่ 8 สรุปอายุการใช้งานโดยประมาณของวัสดุทดสอบต่างๆ

ชนิดวัสดุทดสอบ	อายุการใช้งาน
ฉนวน XLPE ตกแตกเป็นเวลา 14 วัน	≈ 30 ปี 9 เดือน
ฉนวน Polyethylene (PE)	≈ 19 ปี
ที่ครอบกันนก Silicone Rubber	≈ 17 ปี 3 เดือน
ฉนวน XLPE ที่ถูกขีดผิวด้วยกระดาษทราย	≈ 15 ปี

ตารางที่ 8 (ต่อ) สรุปอายุการใช้งานโดยประมาณของวัสดุทดสอบต่างๆ

ชนิดวัสดุทดสอบ	อายุการใช้งาน
ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV	≈ 14 ปี 5 เดือน
ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ	≈ 11 ปี 10 เดือน
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสลิคนวนชนิดใส	≈ 1 ปี 6 เดือน
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสปี spray สำหรับฟันรด สีขาว	≈ 1 เดือน
ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ "	≈ 6 เดือน
ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC	≈ 3 เดือน

การทดสอบด้วยวิธี Time to Track นั้นนอกจากจะสามารถประมาณอายุการใช้งานของวัสดุได้จากข้อมูลที่ได้นับที่กไว้แล้ว ยังสามารถเปรียบเทียบความคงทนต่อการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ของวัสดุที่ทำการทดสอบได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{\text{เวลาของวัสดุทดสอบที่ต้องการเปรียบเทียบ}}{\text{เวลาของวัสดุทดสอบที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ}} \quad (28)$$

\*เวลาเฉลี่ยที่นำมาคิดต้องเป็นข้อมูลทางด้านเวลาของเหตุการณ์เดียวกัน จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้จึงสามารถนำมาเปรียบเทียบโดยใช้สมการข้างต้นได้ดังนี้

เหตุการณ์เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 1 นาที 4 วินาที

เวลาของวัสดุฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 10 นาที 20 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสปี spray สำหรับฟันรด สีขาวที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 16 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พันสีฉนวนชนิดใส ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟ คือ 53 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบที่ครอบกันนก Silicone Rubber ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 11 นาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ฉนวน Polyethylene (PE) ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 10 นาที

เวลาของวัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ถูกขัดผิวด้วยกระดาษทรายที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 7 นาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ฉนวน XLPE ตกแดดเป็นเวลา 14 วัน ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 13 นาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 6 นาที

เวลาของไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ ที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟคือ 6 นาที 40 วินาที

ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้วัสดุท่อ PVC เป็นตัวเปรียบเทียบ

- จำนวนเท่าวัสดุฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC กับ วัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อ PVC สีเหลือง = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC  
= 10 นาที 20 วินาที = 620 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{620}{64} = 9.7 \text{ เท่า} \quad (29)$$

∴ วัสดุทดสอบ ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ มากกว่า วัสดุทดสอบ PVC 9.7 เท่า

- จำนวนเท่าของ ท่อ PVC สีเหลืองพ่นสี spray สำหรับพ่นรด กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที  
 เวลาของวัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC spray พ่นสี spray สำหรับพ่นรด สีขาว  
 = 16 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{16}{64} = 0.25 \text{ เท่า} \quad (30)$$

∴ วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC spray พ่นสี spray สำหรับพ่นรด สีขาว มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ น้อยกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " 0.25 เท่า

- จำนวนของ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พ่นสีฉนวนชนิดใส กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " คือ
- เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที  
 เวลาของวัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พ่นสีฉนวนชนิดใส = 53 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{53}{64} = 0.83 \text{ เท่า} \quad (31)$$

∴ วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC พ่นสีฉนวนชนิดใสมีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ น้อยกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " 0.83 เท่า

- จำนวนเท่าของ ที่ครอบกันนก Silicone Rubber ที่ทำจาก Silicone Rubber กับวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " คือ

เวลาของท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด  $\frac{3}{4}$  " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที  
 เวลาของที่ครอบกันนก Silicone Rubber = 11 นาที = 660 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{660}{64} = 10.32 \text{ เท่า} \quad (32)$$

∴ วัสดุทดสอบ ที่ครอบกันนก Silicone Rubber มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ มากกว่า วัสดุ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " 10.32 เท่า

- จำนวนเท่าของฉนวน Polyethylene (PE) กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ฉนวน Polyethylene (PE) = 10 นาที = 600 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{600}{64} = 9.38 \text{ เท่า} \quad (33)$$

∴ วัสดุทดสอบ ฉนวน Polyethylene (PE) มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ มากกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " 9.38 เท่า

- จำนวนเท่าของ วัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ถูกขีดผิวด้วยกระดาษทราย กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ถูกขีดผิวด้วยกระดาษทราย = 7 นาที = 420 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{420}{64} = 6.56 \text{ เท่า} \quad (34)$$

∴ วัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ถูกขีดผิวด้วยกระดาษทราย มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ มากกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " 6.56 เท่า

- จำนวนเท่าของ วัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " คือ

เวลาของวัสดุกับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¾ " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน = 13 นาที = 780 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{780}{64} = 12.19 \text{ เท่า} \quad (35)$$

∴ วัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟมากกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " 12.19 เท่า

- จำนวนเท่าของ ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV กับ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV = 6 นาที = 360 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{360}{64} = 5.62 \text{ เท่า} \quad (36)$$

∴ วัสดุทดสอบลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟมากกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " 5.62 เท่า

- จำนวนเท่าของ ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " คือ

เวลาของวัสดุทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " = 1 นาที 4 วินาที = 64 วินาที

เวลาของวัสดุทดสอบ ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ = 6 นาที 40 วินาที = 400 วินาที

$$\text{จำนวนเท่า} = \frac{400}{64} = 6.25 \text{ เท่า} \quad (37)$$

∴ วัสดุทดสอบ ไลน์ การ์ด ครอบสายไฟ มีความคงทนต่อการเกิดเส้นประกายไฟ มากกว่า วัสดุทดสอบ ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ " 6.25 เท่า

จากข้อมูลอายุการใช้งานโดยประมาณและค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ของวัสดุทดสอบนั้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

วัสดุทดสอบที่ 1: ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขนาด ¼ "

เป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจากค่าต่างๆ ที่คำนวณได้นั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อการเกิดรอยไหม้ที่ค่อนข้างต่ำและใช้เวลาในการขยายตัวของรอยไหม้ที่รวดเร็ว และรุนแรงซึ่งถ้าปล่อยให้เกิดขึ้นในการใช้งานจริงอาจจะก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าหรือกับผู้ใช้งานได้

วัสดุทดสอบที่ 2: ฉนวนชั้นนอกสุดของสายไฟ XLPE 33 kV ทำมาจาก PVC

เป็นวัสดุที่ทำมาจาก PVC แบบเดียวกับวัสดุทดสอบที่ 1 แต่มีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกัน โดย Jacket Outer นี้เป็นวัสดุที่อยู่ชั้นนอกสุดของสายไฟจึงมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานเพียงเพื่อป้องกันสายไฟจากการขูดขีดเท่านั้นจึงสามารถทนต่อการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าได้ไม่ต่างจากท่อ PVC นึก แต่จากข้อมูลการขยายตัวของรอยไหม้พบว่าเมื่อเกิดไฟระยิบระยับแล้วใช้เวลาในการลุกลามของรอยไหม้ที่รวดเร็วและรุนแรงกว่าท่อ PVC มาก ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าเมื่อเริ่มเกิดรอยไหม้แม้เป็นเพียงเส้นบางๆ ที่อาจจะสังเกตเห็นได้ยากแล้ว เวลาที่จะทำการป้องกันการลุกลามของรอยไหม้ก็น้อยลงไปด้วย

วัสดุทดสอบที่ 3: ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC spray ฟันสีสเปรย์ สำหรับฟนรด สีขาว

การที่นำสี spray มาพ่นเป็นวิธีที่ได้ตั้งสมมติฐานว่าอาจจะช่วยเคลือบผิวฉนวนเพื่อลดความรุนแรงของเส้นประกายไฟที่กระทำต่อผิวฉนวนไม่ว่าจะเป็นวิธีพ่นทา หรือชุบด้วยสีก็ตาม แต่จากการทดสอบพบว่าการพ่นสี spray ให้ผลที่แย่กว่าท่อ PVC ที่ไม่ได้พ่นสี เนื่องจากสีที่นำมาพ่นนั้นมีส่วนผสมของออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำเพราะฉะนั้นเมื่อเริ่มเกิดเส้นประกายไฟทำให้เกิดการลุกลามที่รวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งการพองของสีเนื่องจากความร้อนที่ทำให้การขยายตัวของสีไม่เท่ากันทำให้เกิดเป็นรู ซึ่งรูดังกล่าวทำให้เกิดความเครียดที่พื้นที่บริเวณนั้นมีสูงจึงเกิดความร้อนขึ้นและก่อให้เกิดเป็นรอยไหม้ในที่สุด โดยเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นเร็วมาก ดังนั้นสีที่จะนำมาเคลือบผิวฉนวนควรเป็นสีที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนเช่น สีที่พ่นให้กับลูกถ้วยของหม้อแปลง เป็นต้น

วัสดุทดสอบที่ 4: ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ฟันสีฉนวนชนิดใส (Clear Insulating Varnish) สีที่ใช้พ่นให้กับวัสดุทดสอบเป็นสีที่ใช้กับลูกถ้วยหม้อแปลงจึงมีคุณสมบัติความเป็นฉนวน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าใช้เวลานานกว่าวัสดุทดสอบทั้ง 3 ที่ทำการทดสอบก่อนหน้านี้หลายเท่า ถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดเส้นประกายไฟจะเร็วกว่าท่อ PVC แต่การเกิดรอยไหม้ นั้นต้องให้เวลาที่นานกว่ามาก และการลุกลามของรอยไหม้เป็นไปได้อย่าง ความรุนแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่ามาก ซึ่งถือว่าการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าท่อ PVC ที่มีการฟันสีฉนวนเป็นวิธีที่สามารถยืดอายุการใช้งาน และทนต่อการเกิดรอยไหม้ได้ดีกว่าท่อ PVC ที่ไม่ทำการฟันสี หรือฟันสีที่ไม่ใช้สีฉนวน

#### วัสดุทดสอบที่ 5: ที่ครอบกันนก Silicone Rubber

วัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่ใช้ครอบลูกถ้วยเพื่อป้องกันความสกปรกจากมูลนกซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดดิสชาร์จไฟฟ้าขึ้นที่ผิวลูกถ้วยนับว่าเป็นปัญหาที่พบบ่อยในสถานีไฟฟ้าแรงสูง จากการทดสอบพบว่าวัสดุ Silicone Rubber มีความเป็นฉนวนที่ดีชนิดหนึ่งเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีความทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าได้ดีซึ่งเมื่อเกิดการรอยไหม้ไฟระยิบระยับก็จะดับเองโดยไม่มี การลุกลามหรือลุกลามน้อยมาก และผิวของวัสดุที่มีความมันทำให้สิ่งสกปรกเกาะ ได้ยากซึ่งสังเกต ได้จากการทดสอบขณะที่สารละลายไหลผ่านบนผิววัสดุได้เร็ว แต่วัสดุ Bird Guard นี้ยังมีจุดอ่อนตรงที่วัสดุนั้นมีเนื้อที่นิ่มซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการเกิดรอยขีดหรือเมื่อมีนกมาเกาะอาจทำให้เกิดรอยฉีกขาดเนื่องจากเล็บของนก รอยฉีกขาดเหล่านี้ก็ถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิด ดิสชาร์จไฟฟ้าเพราะเนื่องจากที่ขอบของรอยขาดเป็นจุดที่ง่ายต่อการเกิดประกายไฟที่ไฟที่ไม่ สม่าเสมอ

#### วัสดุทดสอบที่ 6: ฉนวน Polyethylene (PE)

เป็นวัสดุที่รู้จักกันแพร่หลายที่ถูกพัฒนาเพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นฉนวน ซึ่งจากการทดสอบพิสูจน์ได้ว่ามีความทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกับวัสดุ Silicone Rubber แต่ผลลัพธ์ของความเสียหายนั้นแตกต่างกันเพราะความเสียหายเนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าที่ กระทำต่อวัสดุ Polyethylene (PE) มีลักษณะเป็นการหลอมละลายที่เนื้อวัสดุทดสอบจากความร้อน ของเส้นประกายไฟซึ่งทำให้การลุกลามเกิดขึ้นได้ยากกว่าความเสียหายที่เป็นลักษณะรอยไหม้จึง เป็นการบ่งบอกถึงสภาพความเป็นฉนวนที่ดีถึงแม้ว่าจะเริ่มเกิดความเสียหายแต่ก็ใช้เวลานานกว่าจะ ลุกลามจึงทำให้สามารถแก้ไขหรือป้องกันได้ทันเวลา

#### วัสดุทดสอบที่ 7: วัสดุทดสอบฉนวน XLPE ที่ถูกขัดผิวด้วยกระดาษทราย

วัสดุทดสอบ XLPE เป็นวัสดุที่พัฒนาต่อจากวัสดุ PE ที่เพิ่มประสิทธิภาพความเป็นฉนวนที่ดียิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่ในการทดสอบได้นำวัสดุ XLPE ไปขัดให้ความมันของวัสดุหายไปเนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีจากการทดสอบกับวัสดุก่อนหน้านี้ที่ความมันของวัสดุมีผลต่อการไหลของสารละลายบนผิวทำให้เกิดดิสชาร์จไฟฟ้าได้ยาก การทดสอบนี้จึงพิสูจน์ให้เห็นว่าถึงแม้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติฉนวนที่ดีกว่าชนิดอื่นแต่เมื่อความมันที่ผิววัสดุหายไปก็ทำให้การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าได้ง่ายกว่าวัสดุทดสอบ PE ที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีกว่า โดยผลจากการทดสอบพบว่าที่เวลาเริ่มเกิดเส้นประกายไฟของ XLPE ที่ถูกขัดผิวเกิดขึ้นเร็วกว่าวัสดุ PE และดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อนข้างรุนแรงกว่าทำให้เกิดความเสียหายที่เร็วกว่า ลักษณะของความเสียหายนั้นคล้ายกับวัสดุทดสอบ PE คือเกิดการหลอมละลายเป็นวงกว้าง ดังนั้นจากการทดสอบวัสดุนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการที่ผิวมีลักษณะมันก็เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานได้อีกวิธีหนึ่ง

#### วัสดุทดสอบที่ 8: ฉนวน XLPE ที่ตากแดดเป็นเวลา 14 วัน

วัสดุ XLPE เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายว่าเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนที่ดี ดังนั้นการทำร้ายผิววัสดุ XLPE โดยการนำไปตากแดดประมาณ 2 อาทิตย์เช่นนี้ เนื่องจากต้องการให้วัสดุเจอกับสภาพอากาศเดียวกับการใช้งานจริงนั่นคือ การที่ต้องเจอทั้งมลภาวะ แสงแดด และความชื้นจากอากาศ จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุที่ความทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าได้ดีที่สุดและใช้เวลาการเกิดความเสียหายบนผิวฉนวนได้นานกว่าวัสดุทดสอบชนิดอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่วัสดุ XLPE มีความทนต่อสภาพแวดล้อม มลภาวะต่างๆ ได้ดีและมีอายุการใช้งานที่มากกว่าวัสดุชนิดอื่น

#### วัสดุทดสอบที่ 9: ลูกถ้วย Silicone Rubber ชนิด HTV

วัสดุทดสอบนี้เป็นลูกถ้วยที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบันตามสถานีไฟฟ้าแรงสูงด้วยคุณสมบัติที่ถูกพัฒนาด้วยกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อนทำให้วัสดุมีความเป็นฉนวนที่ดีอีกชนิดหนึ่ง จากการทดสอบพบว่าความทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้านั้นใกล้เคียงกับวัสดุทดสอบ Bird Guard ซึ่งทำมาจากวัสดุเดียวกันแต่วิธีการผลิตที่แตกต่างกันซึ่งให้เหมาะสมกับการใช้งาน

#### วัสดุทดสอบที่ 10: โล้น การ์ด ครอบสายไฟ

วัสดุทดสอบชนิดนี้ทำมาจากวัสดุ PVC แต่วิธีการผลิตนั้นแตกต่างกันเนื่องจากวัตถุประสงค์ของการใช้งานคือที่ต้องอยู่ใกล้กับสถานที่ที่มีการก่อสร้างใกล้สายไฟ ดังนั้นเพื่อป้องกันสายไฟจากสิ่งที่จะตกลงใส่สายไฟขณะที่ทำการก่อสร้างและป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ใกล้สายไฟ วัสดุดังกล่าวจึงมีความแข็งแรงและมีความเป็นฉนวนที่ดีกว่า PVC ทั่วไปซึ่งดูได้จากผลลัพธ์

การทดสอบที่มีความคงทนต่อการเกิดดิซซาร์จไฟฟ้าได้ดีกว่าหลายเท่าและลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นก็แตกต่างจากวัสดุ PVC คือ เกิดการหลอมละลายที่ผิววัสดุแทนที่จะเกิดรอยไหม้เหมือนกับวัสดุ PVC ซึ่งทำให้เกิดการลุกลามได้ยาก ดังนั้นถึงแม้จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกันแต่กรรมวิธีการผลิตที่ต่างกันก็ทำให้ยืดอายุการใช้งานให้กับฉนวนได้เหมือนกัน



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การทดสอบเพื่อศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D2303 นี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความสามารถในการทนดิสชาร์จไฟฟ้าของวัสดุประเภทต่างๆ อีกทั้งยังสามารถสังเกตถึงลักษณะทั้งก่อนและหลังการเกิดเหตุการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของวัสดุทดสอบ ซึ่งทำให้ได้ทราบถึงพฤติกรรมต่างๆ ของดิสชาร์จไฟฟ้าที่กระทำต่อผิวฉนวนที่อาจจะไม่สามารถเห็นได้จากเหตุการณ์จริงแต่อาจจะสังเกตได้จากเสียงดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ ซึ่งจากการทดสอบทำให้ทราบว่าผลจากการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้าที่ได้ทำร้ายผิวฉนวนนั้น ไม่จำเป็นต้องเกิดในลักษณะของรอยไหม้แต่อาจเป็นลักษณะของการหลอมละลายหรือการสึกกร่อนโดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทดสอบและพบว่ากรณีที่ความเสียหายเป็นแบบลักษณะการหลอมละลายของเนื้อวัสดุทำให้การลุกลามเป็นไปได้ยากกว่าการเกิดความเสียหายแบบรอยไหม้ซึ่งการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าจะสร้างความเสียหายต่อวัสดุได้รุนแรงและมีการขยายตัวได้รวดเร็วกว่าลักษณะรอยไหม้จะเป็นที่สังเกตได้ชัดเจนซึ่งการลุกลามของรอยไหม้จะมากขึ้นกับประเภทของวัสดุ ความทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้านอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้วการที่ผิวของวัสดุมีความมันก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าได้ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบ XLPE ที่นำมาทำร้ายผิววัสดุโดยการขัดให้ความมันของผิววัสดุหายไปทำให้ได้ผลการทดสอบในการทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าได้น้อยกว่าวัสดุ PE ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าจากการทดสอบยังทำให้ทราบว่าถึงแม้จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกันแต่ถ้าถูกผลิตมาด้วยวิธีที่แตกต่างกันก็สามารถทำให้การทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าแตกต่างกันออกไปด้วยซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบวัสดุ PVC 2 ตัวอย่างที่มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันทำให้คุณสมบัติในการทนต่อดิสชาร์จไฟฟ้าได้แตกต่างกันรวมทั้งลักษณะของความเสียหายก็แตกต่างกัน ดังนั้นปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็น ลักษณะของวัสดุ, ความมันของผิววัสดุ หรือวิธีการผลิตวัสดุ ล้วนเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าทั้งสิ้น

จากข้อมูลที่ทำการบันทึกได้ของแต่ละประเภทวัสดุทดสอบทำให้บ่งบอกถึงคุณภาพ และประมาณอายุการใช้งานของวัสดุชนิดนั้นๆ ว่าเหมาะสมต่อการนำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือไม่ อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาในเรื่องของโครงสร้างของเนื้อวัสดุ ขั้นตอนการผลิต รวมถึงการหาวิธีป้องกันผิวฉนวน ซึ่งประโยชน์จากวิธีการทดสอบนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาได้ต่อเนื่องเพื่อให้กลายเป็นวิธีทดสอบที่ใช้เป็นมาตรฐานให้กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

เพื่อยืดอายุการใช้งานของฉนวนได้มากขึ้นและเป็นการเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานหรือเจ้าหน้าที่ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความมั่นคงในระบบไฟฟ้าอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

ในการทำการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการทนต่อการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าที่ฉนวนสามารถพัฒนาให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและมีการประมาณอายุได้หลากหลายตามสภาวะการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในหลายๆ พื้นที่ที่มีความแตกต่างในเรื่องของปัจจัยทางด้านมลภาวะที่ไม่เหมือนกัน หรือมีความเป็นเฉพาะในแต่ละพื้นที่ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำอุปกรณ์ทางไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการท่วิจัยอาจจะต้องมีการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้สำหรับการทดสอบให้ได้มาตรฐานมากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการพิสูจน์ปัญหาเนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าในรูปแบบอื่นๆ และนำไปสู่วิธีการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

อนงค์พันธุ์ แม้นอ้ม และอรพิม อภิสัทธี. 2549. การศึกษา Tracking ของฉนวนไฟฟ้าแบบ โพลีเมอร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ASTM Standard. 2004. **Standard Test Methods for Liquid Contaminant, Inclined Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials.** D2303.

Alex Golubev and P. Gabe. 1999. Partial Discharge Theory and Technologies Related to Traditional Testing Methods of Large Rotating Apparatus. **TAPPI Conference:** 1-15.

Colin Smith. 2005. **Partial Discharge & Insulation Failure.** IPEC Ltd.

D. D. Chang, T. S. Sudarshan and J. E. Thompson. 1986. Analysis of Electric Stress Distribution in Cavities Embedded within Dielectric Structures. **IEEE Transactions on Electrical Insulation.** Vol. EI-21 No.2

Fernando, M.A.R.M., S. M. Gubanski. 1999. Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces, **IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation.** 6(5): 688-694.

Gorur, R. S. et.al. 1997. A Laboratory Test for Tracking and Erosion Resistance of HV Outdoor Insulation., **IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation.** 4(6): 767-774.

G. Mitra, M.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E., and B. Salvage, B.Sc.(Eng.), Ph.D.,  
M.I.E.E. 1966. Electric stress in a circular cylindrical gaseous cavity in  
a solid dielectric, the axis of the cylinder being parallel to the field.  
**IEEE**. Vol. 113

Hackam, R. 1999. Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. **IEEE Trans.  
On Dielectrics and Electrical, Insulation**. 6(5): 557-585.

Kato Engelbrecht, J.P. Holtzhausen and P. Pieterse. 1988. Inclined Plane  
Tests on RTV-Silicone Rubber Coated Porcelain and Cyclo-Aliphatic  
Epoxy Resin Samples. R.S. Gorur, E.A. Cherney and R. Hackam, The  
AC and DC performance of polymeric insulating materials under  
accelerated aging in a fog chamber, **IEEE Trans. Power Del.**, Vol. 3,  
pp.1892 – 1902.

S.-H Kim, E.A Cherney and R. Hackam. 1992. Thermal characteristics of  
RTV silicone rubber coatings as a function of filler level, **IEEE  
CEIDP**. pp.713-718.

Suda, T. 2001. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of  
An Artificially Polluted Suspension Insulator. **IEEE Trans. On  
Dielectric and Electrical Insulation**. 8(4): 705-709.

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวอนงค์พันธุ์ แม้นอิม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 17 มีนาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิชาเอกวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-