

การศึกษาการเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ

STUDY ON SURFACE TRACKING OF JACKET INSULATION FOR
SPACE AERIAL CABLE

สาธิต ไกรระภี
SATHIT KRIRAPEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-005

การศึกษาการเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ

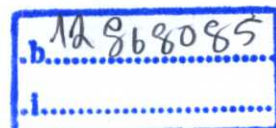
STUDY ON SURFACE TRACKING OF JACKET INSULATION FOR
SPACE AERIAL CABLE



สาธิต ไกรระภี

SATHIT KRIRAPEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148261
วันเดือนปี 10 ต.ค. 2560



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-005

STUDY ON SURFACE TRACKING OF JACKET INSULATION FOR
SPACE AERIAL CABLE

SATHIT KRIRAPEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-020-005

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ
Thesis Title Study on Surface Tracking of Jacket Insulation for Space Aerial Cable
นักศึกษา นายสาธิต ไกรระภี
รหัสประจำตัว 57601092
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-005

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.พีรภูมิ	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 12.00-14.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ
นักศึกษา	นายสาธิต ไกรระภี
รหัสประจำตัว	57601092
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดรอยทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ วัสดุฉนวนสำหรับสายเคเบิลที่นำมาศึกษา มี 5 ชนิด ได้แก่ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน(XLPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก, ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ชิ้นตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร, ยาว 50.8 มิลลิเมตร และหนา 1.52 มิลลิเมตร ชิ้นตัวอย่างทดสอบได้แบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นชิ้นตัวอย่างใหม่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และกลุ่มที่สองเป็นชิ้นตัวอย่างที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อนโดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้งสองกลุ่มจะถูกนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยด้านหนึ่งของชิ้นตัวอย่างทดสอบต่อกับขั้วอิเล็กโทรดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยลวดนิโครมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร อีกด้านหนึ่งของชิ้นตัวอย่างทดสอบจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ร้อยละ 0.1 ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อลงดิน กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในบริเวณที่ห่าง 25.4 มิลลิเมตร แล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบ ขณะที่อัตราการจุ่มชิ้นตัวอย่างทดสอบในสารละลาย 4 ครั้งต่อนาที ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบอยู่ในช่วง 1-3.5 kV การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) การทดสอบกระทำจนกระทั่งเกิดความล้มเหลวของฉนวนซึ่งจะสังเกตเห็นได้ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่เกิดความล้มเหลวจะถูกบันทึกไว้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้งที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุของ HDPE และ XLPE ชนิดที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กนั้นมีความต้านทานการเกิดรอยทางผิวสูงกว่า XLPE ชนิดที่ผสมคาร์บอนแบล็ก, LDPE และ MDPE ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความเครียดทางความร้อนภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวไม่มีผลมากนักต่อคุณสมบัติของการเกิดรอยทางผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ และสรุปได้ว่าโครงสร้างของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดนั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณลักษณะการเกิดรอยบนพื้นผิวของวัสดุฉนวนเคเบิล

Thesis	Study on Surface Tracking of Jacket Insulation for Space Aerial Cable
Student	Mr. Sathit Krirapee
Student ID.	57601092
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Siriwat Potivejkul
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis proposes to represents the investigation of surface tracking of various types of cable insulations. Five kinds of cable material i.e. XLPE-unfilled carbon black, XLPE-filled carbon black, low density polyethylene (LDPE-filled carbon black), medium density polyethylene (MDPE-filled carbon black), and high density polyethylene (HDPE-unfilled carbon black) were examined. The test specimen has a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1.52 mm in thickness. The test samples were classified into two groups for investigation. The former group was the new test samples, whereas the latter test samples were stressed by thermal ageing with 120°C for 168 hours. Then both specimens were examined. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of 1 mm diameter Nichrome wire. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode. The spacing between electrodes at dry area was determined for 25.4 mm. After completion of the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute. The test voltage level was in the range of 1-3.5 kV. The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B). The test voltage was applied to the test specimen until the insulation failure could be observed. Then, the insulation failure voltage and failure time were recorded. The test results illustrated that both unaged and aged HDPE and XLPE-unfilled carbon black provided the higher surface tracking resistance

than XLPE-filled carbon black, LDPE and MDPE respectively. Besides, the thermal stress aging had not much effect on the surface tracking characteristic of tested material. It can be summarized that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่าน รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาเป็นอย่างดี ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ต่างๆที่ดีแก่ข้าพเจ้า จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศุภกิตต์ โชติโก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รวมทั้ง รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร และ ผศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด มหาชน (CTW) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณเกษม กุหลาบแก้ว คุณสถิตย์ ตาบเพชร คุณสุวิทย์ วีระพงษ์ คุณนิภา สุนทรธนโสภณ คุณไพโรจน์ เนืองนอง คุณอนันต์ บุณนาค และพี่ๆน้องๆ ฝ่ายผลิต ฝ่ายออกแบบ และฝ่ายประกันคุณภาพทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า คุณแม่บังอร ไกรระภิ และคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณสมภัทร์พร ไกรระภิ ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สาธิต ไกรระภิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	9
1.8 แผนการดำเนินงาน.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ทฤษฎีของสนามไฟฟ้า.....	11
2.2 ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้า.....	24
2.3 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด.....	26
2.4 สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง.....	30
2.5 สนามไฟฟ้าของจุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์.....	34
2.6 ดิสชาร์จตามผิวและรอยทางผิว.....	38
2.7 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสายไฟและสายเคเบิล.....	43
2.8 ค่าความจุไฟฟ้าและแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในฉนวนไดอิเล็กตริก.....	50
2.9 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน.....	51
2.10 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง.....	53
2.11 มาตรฐานการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย.....	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 อุปกรณ์ทดสอบ การออกแบบ และวิธีการทดสอบ.....	60
3.1 อุปกรณ์ทดสอบและการออกแบบ.....	60
3.2 วิธีการทดสอบ.....	75
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	79
4.1 ผลการทดสอบของฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	79
4.2 ผลการทดสอบของฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	81
4.3 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	83
4.4 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	85
4.5 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก	87
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของฉนวนตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุสำหรับฉนวนชนิดต่างๆ	89
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของฉนวนตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ.....	89
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก มาตรฐานและข้อกำหนดของสายเคเบิลอากาศ.....	98
ภาคผนวก ข ขบวนการผลิตสายเคเบิลอากาศ.....	103
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.8	แผนการดำเนินงาน.....	10
2.1	ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศที่คำนวณได้ โดยเปรียบเทียบขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระบบ 22 kV และ 33 kV ขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม.....	34
2.2	ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสและด้านข้างจุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 ชนิด โดยเปรียบเทียบขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระบบ 22 kV และ 33 kV ขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม.....	37
2.3	พลังงานต้นกระตุ่นและพลังงานไอออไนซ์เซชันของโมเลกุลต่างๆ.....	40
2.4	พลังงานพันธะและความยาวพันธะของพันธะต่างๆ.....	42
2.5	คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสายไฟและสายเคเบิลชนิดต่างๆ.....	48
2.6	ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน.....	52
3.1	ข้อมูลของวัตถุดิบชนิดต่างๆ จากแหล่งผู้ขาย.....	67
3.2	ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH ₄ Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่วัดได้.....	73
3.3	ตารางบันทึกผลการทดสอบแรงดันทดสอบและเวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ	77
3.4	ตารางบันทึกผลการทดสอบลักษณะการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ.....	78
4.1	เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	80
4.2	ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	81
4.3	เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	82
4.4	ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	83

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.5	เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็กที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	84
4.6	ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	85
4.7	เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	86
4.8	ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	87
4.9	เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	88
4.10	ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก.....	89
ก.1	มาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของสายเคเบิลอากาศ.....	98
ก.2	ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม มอก. 2341-2555 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 25 กิโลโวลต์.....	99
ก.3	ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม มอก. 2341-2555 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 35 กิโลโวลต์.....	100
ก.4	ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม MEA Specification No. 406 : 12-2008 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 15 กิโลโวลต์ และ 25 กิโลโวลต์.....	101

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.5	ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม PEA Specification No. RCBL-038/2559 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 22 กิโลโวลต์ และ 33 กิโลโวลต์.....	102
ข.1	หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในชั้นตอนรีดลวดตัวนำ.....	104
ข.2	หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในชั้นตอนตีเกลียวลวดตัวนำ.....	106
ข.3	หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในชั้นตอนหุ้มฉนวนและเปลือก (ชั้นตอนสุดท้าย).....	108

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	(ก) สายเคเบิลอากาศ(SAC) สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (ข) โครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ(SAC).....	1
1.2	ดิสชาร์จบางส่วนตรวจสอบด้วยกล้องโคโรนา (ก) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสาย SAC กับลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (ข) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์.....	2
1.3	การเกิดรอย(tracking) และการสึกกร่อน(erosion)บนผิวสาย SAC	2
1.4	ความล้มเหลวเนื่องจากการเกิดรอยทางผิวที่บริเวณผิวสาย SAC กับลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า.....	3
1.5	ความล้มเหลวเนื่องจากการเกิดรอยทางผิวที่บริเวณผิวสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์.....	3
2.1	แรง F ที่เกิดขึ้นจากประจุ Q1 เทียบกับประจุ Q' ที่มีระยะทาง r.....	11
2.2	ลักษณะทิศทางของสนามไฟฟ้าบริเวณรอบประจุบวกและประจุลบ.....	12
2.3	ลักษณะของแรงที่กระทำระหว่างประจุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน.....	13
2.4	ลักษณะของสนามไฟฟ้าระหว่างประจุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน.....	13
2.5	ความเข้มสนามไฟฟ้าระบบประจุที่จุด P ที่เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ \vec{E}_{Q1} และ \vec{E}_{Q2}	13
2.6	ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงเส้นบนตัวนำยาวเป็นอนันต์ไปตามแกน X..	14
2.7	ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงพื้นผิวบนแผ่นตัวนำบางที่มีความหนาแน่นประจุ ρ_s	16
2.8	ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงปริมาตรบนตัวนำทรงกลมที่มีความหนาแน่นประจุ ρ_v	17
2.9	เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า ψ ทำมุม β กับพื้นที่ A.....	19
2.10	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบจุดประจุเดี่ยว.....	22
2.11	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบจุดประจุสองประจุต่างชนิดกัน.....	22
2.12	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบจุดประจุสองประจุชนิดเดียวกัน.....	23
2.13	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบประจุบนแผ่นระนาบขนานกัน.....	23
2.14	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบประจุบนทรงกลมกับระนาบ.....	23
2.15	ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบประจุบนแท่งปลายแหลมกับระนาบ.....	23
2.16	สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	24
2.17	สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย.....	25
2.18	สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง.....	25
2.19	ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แนวรอยต่อผิวระหว่างฉนวนไดอิเล็กตริก 2 ชนิด.....	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.20	การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวนที่ค่า $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$	29
2.21	ฉนวนต่างชนิดต่อกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	29
2.22	สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลหุ้มฉนวนหนึ่งชั้น.....	30
2.23	สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลหุ้มฉนวนสองชั้น.....	32
2.24	รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายของสายเคเบิลอากาศวางบนเคเบิลสเปเซอร์.....	35
2.25	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างที่ใกล้จุดสัมผัส J ระหว่างวิธีประมาณค่าตามสมการที่ (2.74) กับค่าสนามไฟฟ้าที่ถูกต้องตามวิธี Images method และเปรียบเทียบระหว่างเคเบิลสเปเซอร์ที่มี $\epsilon_s = 2.2$ และ $\epsilon_s = 7$	36
2.26	การเกิดดิสชาร์จตามผิวและร่องรอยทางผิวของวัสดุฉนวนพอลิเมอร์.....	38
2.27	ชนิดของดิสชาร์จบางส่วน.....	39
2.28	ลักษณะดิสชาร์จของแกปอากาศระยะ 1 เซนติเมตร ที่ความดันบรรยากาศ.....	41
2.29	การเกิดคาร์บอนโซของฉนวนพอลิเอทิลีน.....	42
2.30	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์แบบต่างๆ.....	43
2.31	โครงสร้างทางเคมีของ PVC.....	44
2.32	โครงสร้างทางเคมีของ PE	45
2.33	ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด.....	46
2.34	โครงสร้างโมเลกุลของ PE ถูกเปลี่ยนให้เป็น XLPE	46
2.35	โครงสร้างทางเคมีของ EPR.....	47
2.36	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน.....	50
2.37	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข่งกับช่วงระยะเวลาที่ป้อนแรงดัน.....	53
2.38	โครงสร้างของแถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ.....	54
2.39	ลักษณะดิสชาร์จเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ในเนื้อฉนวนแข็ง.....	55
2.40	สิ่งบกพร่องต่างๆ ภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิล.....	56
2.41	วิธี Arc Resistance Test ตามมาตรฐาน ASTM D-495.....	57
2.42	วิธี Dust and Fog Test ตามมาตรฐาน ASTM D2132.....	58
2.43	วิธี Drop Test ตามมาตรฐาน IEC 60112.....	58
2.44	วิธี Inclined Plane Test ตามมาตรฐาน IEC 60587.....	59
2.45	วิธี Dip-Track Test ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B).....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	ชุดจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 kV ความถี่ 50 Hz.....	61
3.2	ตัวต้านทานจำกัดกระแส 51 k Ω	61
3.3	ชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานการเกิดรอย(track resistance) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test.....	62
3.4	การขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการอัดเข้าแม่พิมพ์(compression molding) ด้วยความร้อน.....	62
3.5	เครื่องสไลด์ขึ้นตัวอย่างทดสอบ.....	63
3.6	การวัดความหนาขึ้นตัวอย่างทดสอบ ด้วยไมโครมิเตอร์.....	63
3.7	ชิ้นตัวอย่างที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง.....	64
3.8	ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน.....	64
3.9	ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน.....	65
3.10	ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน.....	65
3.11	ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน.....	66
3.12	ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน.....	66
3.13	ลวดนิโครม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร.....	67
3.14	ที่ยึดขึ้นตัวอย่างทดสอบ และปากจับขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง.....	68
3.15	การเตรียมสารแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) โดยการชั่งน้ำหนักปริมาณ 1 กรัม.....	68
3.16	สารแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) 1 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	69
3.17	การจัดวางตำแหน่งและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในภาชนะบรรจุสารละลาย.....	70
3.18	มอเตอร์และการควบคุมระยะการจุ่มขึ้น-ลง 25.4 มิลลิเมตร.....	71
3.19	ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์	71
3.20	กิโลโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและโวลเตจดีไวเดอร์.....	72
3.21	เครื่องชั่งน้ำหนัก	72

สารบัญรูป(ต่อ)

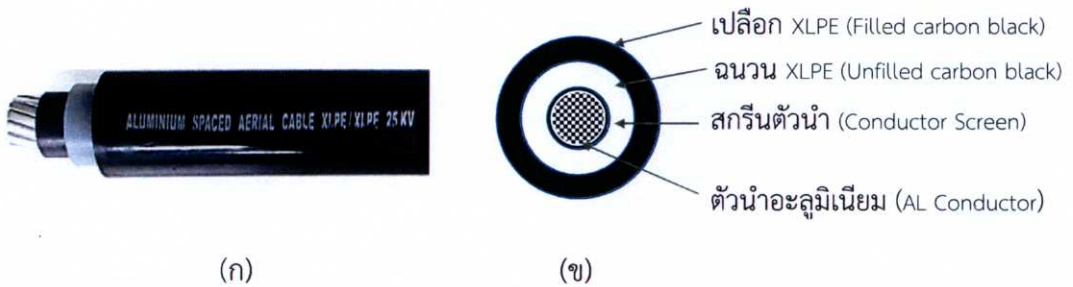
รูปที่		หน้า
3.22	การวัดค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1.....	73
3.23	เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	74
3.24	นาฬิกาจับเวลา.....	74
3.25	วงจรถอดสอบความต้านทานการเกิดรอย ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test	75
3.26	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	76
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ(unaged) สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ.....	90
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุ(ageing) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ.....	90
5.1	คุณลักษณะของความต้านทานการเกิดรอยทางผิวของวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test.....	92
ข.1	ผังขั้นตอนกระบวนการผลิตของสายเคเบิลอากาศ(SAC).....	103
ข.2	ขั้นตอนการรีดลวดตัวนำ.....	104
ข.3	ขั้นตอนการตีเกลียวลวดตัวนำ.....	105
ข.4	ขั้นตอนการหุ้มฉนวนและเปลือกพร้อมกันของสายเคเบิลอากาศ(SAC).....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

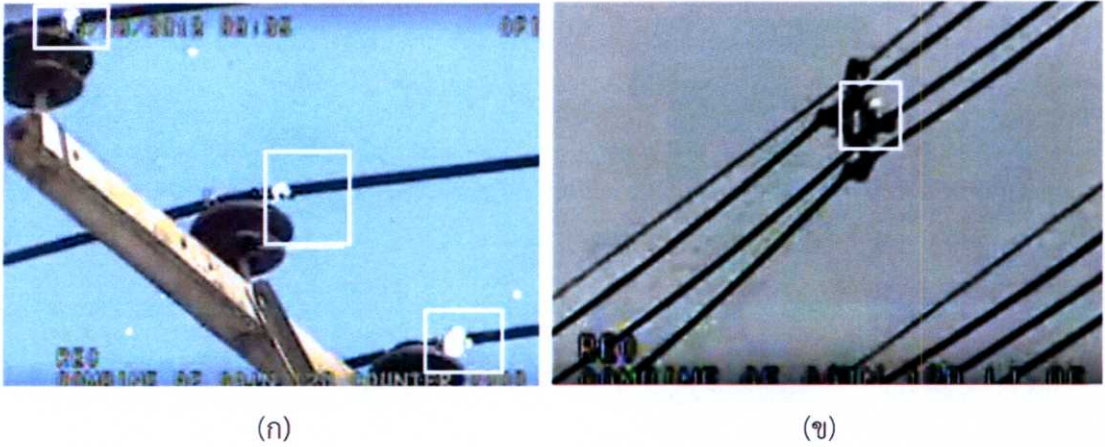
ในปัจจุบัน สายเคเบิลอากาศ(space aerial cable) หรือที่นิยมเรียกกันว่าสาย SAC มีตัวนำเป็นอะลูมิเนียมตีเกลียว หุ้มด้วยฉนวนสองชั้น ฉนวนชั้นที่หนึ่งเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black) ฉนวนชั้นที่สองหรือเปลือกนอกเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black) ดังรูปที่ 1.1 สายชนิดนี้ไม่มีชีลด์(shield) ถูกนำมาใช้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 22kV, 33kV สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA) และระบบ 24kV สำหรับการไฟฟ้านครหลวง(MEA) (รายละเอียดดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ก-ข)



รูปที่ 1.1 (ก) สายเคเบิลอากาศ(SAC) สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า
(ข) โครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ(SAC) [1]

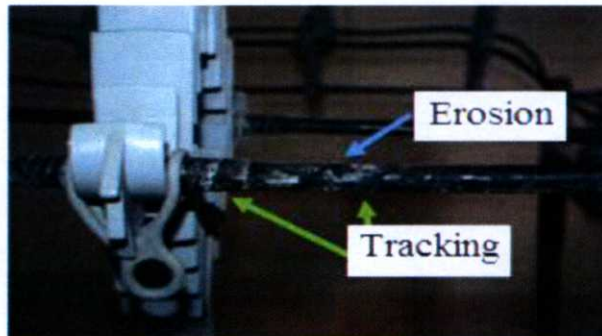
ปัญหาที่พบบ่อยเสมอๆ คือ สภาพผิวของสาย SAC เกิดการเสื่อมสภาพหรือถูกทำลายให้เกิดความเสียหายภายหลังจากที่ได้ติดตั้งใช้งานไปสักระยะเวลาหนึ่ง สาเหตุของการถูกทำลายของผิวฉนวนอาจเกิดมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความเครียดสนามไฟฟ้า อุณหภูมิ ความร้อน แสงแดด แรงทางกล สภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ติดตั้งใช้งาน ฝุ่นละออง ฝนกรด ไอเกลือ หรืออาจจะเกิดจากวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวนของสายไฟ หรืออาจจะเกิดจากอุปกรณ์เสริมต่างๆ ที่ใช้ในการติดตั้งร่วม เป็นต้น

ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ จะทำให้สภาพผิวของสาย SAC ค่อยๆ เริ่มเสียสภาพของการเป็นฉนวนลงเรื่อยๆ ทำให้เกิดมีกระแสรั่วไหลที่ผิวสูงขึ้น และเกิดการดิสชาร์จบางส่วน(partial discharge) บนผิวของสาย SAC ดังที่เราอาจจะเคยได้ยินเสียงความถี่สูงกันบ่อยๆ ตามบนยอดเสาไฟบริเวณที่มีการติดตั้งสาย SAC กับลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า(insulator) เช่นดังรูปที่ 1.2(ก) หรือที่บริเวณสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์(cable spacer) เช่นดังรูปที่ 1.2(ข)



รูปที่ 1.2 ดิสชาร์จบางส่วนตรวจสอบด้วยกล้องโคโรนา (ก) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสาย SAC กับลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า (ข) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์

ผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะก่อให้เกิดคลื่นสัญญาณรบกวนระบบวิทยุ และสื่อสาร (radio interference) และทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ที่เรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนา (corona loss) เมื่อเกิดสภาวะกระแสรั่วไหลตามผิวของฉนวน จนเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) จะทำให้เกิดร่องรอยบนผิว ที่เรียกว่า tracking หรืออาจเกิดการสึกกร่อน (erosion) เกิดขึ้นได้ เช่นดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การเกิดรอย (tracking) และการสึกกร่อน (erosion) บนผิวสาย SAC

เมื่อเกิดรอย tracking มากขึ้น กระแสรั่วไหลก็จะยิ่งมากขึ้น จนกระทั่งทำให้เกิดการอาร์ก (arcing) หรือสปาร์ก (spark) แล้วนำไปสู่ความล้มเหลวที่สมบูรณ์ของการเกิดรอยทางผิว หรือ surface tracking failure ของสาย SAC เช่นดังรูปที่ 1.4 ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างสาย SAC กับลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า และรูปที่ 1.5 ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์ จนเป็นเหตุให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าและเกิดไฟฟ้าดับ (blackout) ทำให้ระบบกำลังไฟฟ้านั้นมีความน่าเชื่อถือ (reliability) และเสถียรภาพ (stability) ลดลง ก่อให้เกิดความเสียหายต่อภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม เป็นวงกว้างได้



รูปที่ 1.4 ความล้มเหลวเนื่องจากการเกิดรอยทางผิวที่บริเวณผิวสาย SAC กับลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 1.5 ความล้มเหลวเนื่องจากการเกิดรอยทางผิวที่บริเวณผิวสาย SAC กับเคเบิลสเปเซอร์

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดรอยทางผิว(surface tracking)ของสาย SAC จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และยังไม่มีการวิจัยที่แน่ชัดเกี่ยวกับวัสดุฉนวนที่เหมาะสมสำหรับทำสาย SAC ซึ่งมีข้อสงสัยว่า ถ้าเปลี่ยนฉนวนของเปลือกนอกสาย SAC จากเดิมซึ่งเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็กมาเป็นสารทดแทนชนิดอื่นที่เหมาะสมจะช่วยแก้ปัญหาเรื่อง tracking ได้ดีกว่าอย่างไร

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การเกิดรอยทางผิวสำหรับฉนวนของเปลือกสายเคเบิลอากาศ และศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับฉนวนแบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กและครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก กับฉนวนชนิดใหม่อีก 3 ชนิด ซึ่งเป็นชนิดพอลิเอทิลีน(polyethylene) ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน(thermal ageing) ขั้นตอนและวิธีการทดสอบดำเนินการสอดคล้องตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) [2] หรือวิธี Dip-Track Test [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับเป็นฉนวนของเปลือกสาย SAC
2. เพื่อออกแบบชุดทดสอบความต้านทานการเกิดรอยทางผิว(track resistance test set) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B)
3. เพื่อศึกษาการเกิดรอยทางผิวและหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ ในสภาวะปกติ และในสภาวะที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน
4. เพื่อสรุปความเหมาะสมของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้ทำฉนวนของเปลือกสาย SAC ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาเรื่อง tracking

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากข้อมูลรายงานผลงานวิจัยของ MTEC (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) เมื่อ 26 กุมภาพันธ์ 2557 ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA) ได้ให้ทุนวิจัยแก่ MTEC ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีน เนื่องจากเคเบิลสเปเซอร์แบบเดิมที่เกิดปัญหาบ่อยบางครั้ง ครึ่งปีก็แตกหัก เพราะทนความร้อนจากแสงแดดหรือรังสียูวีไม่ไหวหรือในบางพื้นที่ก็มีปัญหาเรื่องความชื้นที่ทำให้สเปเซอร์เสื่อมสภาพเร็วรวมถึงฝุ่นละอองที่มาจับหน้าทำให้บางครั้งสเปเซอร์กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นต้นเหตุทำให้เกิดปัญหาสาย SAC ระเบิดขาดบ่อยๆ ซึ่งจะต้องเสียค่าซ่อมแซมในแต่ละครั้งเป็นเงินจำนวนมาก

ผลการวิจัยของ MTEC เป็นที่น่าพอใจโดยวิจัยและพัฒนาเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นผลสำเร็จ ซึ่งได้ผ่านการทดสอบแล้วว่ามีความทนทานสูงกว่าแบบเดิมมากในทุกๆ สภาวะเงื่อนไข

ดังนั้นจึงได้สมมติฐานว่าหากจะเปลี่ยนฉนวนของเปลือกสาย SAC มาเป็นฉนวนชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอาจจะดีกว่าฉนวนแบบเดิมหรือไม่เกี่ยวกับปัญหาเรื่อง tracking

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ ที่เหมาะสมกับสาย SAC และทำการทดสอบวิเคราะห์การเกิดรอยทางผิว หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิล 5 ชนิด คือ 1) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black) 2) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black) 3) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก 4) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

และ 5) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ขึ้นตัวอย่างทดสอบ ชนิดที่ 1 และ 2 นั้นนำมาจากฉนวนของสาย SAC ส่วนขึ้นตัวอย่างทดสอบชนิดที่ 3, 4 และ 5 ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ขึ้นตัวอย่างทดสอบแต่ละชนิดแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็น ขึ้นตัวอย่างใหม่ไม่ได้ถูกแรงอายุ ทดสอบในสภาวะปกติ และกลุ่มที่สองเป็นขึ้นตัวอย่างที่ถูกแรงอายุด้วยความร้อนโดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ขึ้นตัวอย่างทดสอบทั้งสองกลุ่มจะถูกนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยด้านหนึ่งของขึ้นตัวอย่างทดสอบต่อกับขั้วอิเล็กโทรดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยลวดนิโครม(nichrome wire) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร อีกด้านหนึ่งของขึ้นตัวอย่างทดสอบจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH₄Cl) ร้อยละ 0.1 ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อลงดิน กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในบริเวณที่แห้ง(dry band) 25.4 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 1-3.5 kV โดยดำเนินการ สอดคล้องตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) [2] หรือวิธี Dip-Track Test [3] วัสดุที่นำมาทดสอบถูกจัดหาเตรียมการโดยโรงงานผู้ผลิตสายไฟ ทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และโรงงานผู้ผลิตสายไฟ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด มหาชน

1.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี 2503 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Electrical Tracking Resistance of Polymers” [4] โดย G. M. L. SOMMERMAN ใน AIEE Electrical Insulation Committee, Atlantic City, N. J., June 19-24, 1960, Paper 60-857 โดยได้ทำการศึกษาความต้านทานการเกิดรอยของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น Polyester chlorinated, Polyvinyl chloride(PVC), Epoxy resin, Polycarbonate resin, Polyamide (FM-3001), Polystyrene, Epoxy modified, Polyester acrylic modified, Butyl rubber, Polyethylene(PE), Methyl methacrylate, Polyoxymethylene, Polypropylene, Polytetrafluoroethylene เป็นต้น ด้วยวิธีการทดสอบ Dust and Fog Test (ASTM2132) เปรียบเทียบกับวิธี Arc Test (ASTM D495) พบว่าระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวของวิธี Dust and Fog Test จะมากกว่าของวิธี Arc Test เช่น ระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวของ PVC สำหรับ Dust and Fog Test จะประมาณ 0.5 ชั่วโมง แต่สำหรับวิธี Arc Test จะประมาณ 5 วินาที , ส่วน PE สำหรับ Dust and Fog Test จะประมาณ 15-40 ชั่วโมง แต่สำหรับวิธี Arc Test จะประมาณ 95 วินาที ผลการทดสอบที่ได้ของทั้งสองวิธีจะเป็นไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน

ปี 2508 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Discharge-Resistant Characteristics of the Polyethylenes for Wire and Cable” [5] โดย E.K. Duffy, S.Jovanovitch, I.J. Marwick ใน IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-84, No. 9, September, 1965, pp. 815-825 โดยได้ทำการศึกษาความต้านทานการเกิดรอยของวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ ด้วย

วิธีการทดสอบ Dust and Fog Test (ASTM2132) พบว่าฉนวนชนิด Ozone-resistant rubber (oil base), Polyvinyl Chloride(TW type), Neoprene(jacket composition) และ Ozone-resistant rubber(butyl base) มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว น้อยกว่า 1 ชั่วโมง Hypalon และ Polyethylene (weather-resistant, black) มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว น้อยกว่า 2 ชั่วโมง ส่วน Polyethylene (low molecular weight) ที่ไม่ใส่สารเติมเต็ม มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว 40-60 ชั่วโมง Polyethylene (high molecular weight) ที่ไม่ใส่สารเติมเต็ม มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว 200-250 ชั่วโมง Polypropylene (black) มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว 250-300 ชั่วโมง Polyethylene (high density) ที่ไม่ใส่สารเติมเต็ม และ Irradiated Polyethylene(black) มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลว 350-400 ชั่วโมง สำหรับ Teflon และ Silicone rubber ที่ไม่ใส่สารเติมเต็ม มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวที่สูงที่สุด คือ 400-500 ชั่วโมง และพบว่าการเติมสารคาร์บอนแบล็กมีผลทำให้มีระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวลดลง เช่น ฉนวน Polyethylene (PE) ที่มีส่วนผสมคาร์บอนแบล็ก น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% ระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวจะประมาณ 200-250 ชั่วโมง ถ้ามีส่วนผสมคาร์บอนแบล็กมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5% ระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวจะลดลงเหลือน้อยกว่า 2 ชั่วโมง

ปี 2510 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Dip-Track Test” [3] โดย C.F Wallace, C.A. Bailey ใน IEEE Transactions on Electrical Insulation, December 1967, Vol. EI-2, No.3, p. 137 (Paper 31 TP66-360) โดยได้ทำการศึกษาความต้านทานการเกิดรอยของวัสดุชนิดต่างๆ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับวิธี Inclined Plane (IEC587) พบว่าวัสดุชนิด 2029 Paper Phenolic นั้นมีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของการเกิดรอยดังนี้ สำหรับวิธี Dip-Track Test จะอยู่ประมาณ 1.6 kVac วิธี Inclined Plane จะอยู่ที่ประมาณ 1.5 kVac สำหรับวัสดุชนิด 11508 Glass Cloth วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 2.6 kVac วิธี Inclined Plane จะประมาณ 2.7 kVac สำหรับวัสดุชนิด Vulkene I (Carbon filled XLPE) Cloth วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 1.2 kVac สำหรับวัสดุชนิด Vulkene II (Noncarbon filled XLPE) วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 2.5 kVac วิธี Inclined Plane จะประมาณ 1.75 kVac สำหรับวัสดุ Neoprene I วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 1.4 kVac วิธี Inclined Plane จะประมาณ 1.25 kVac สำหรับวัสดุ Butyl วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 1.5 kVac วิธี Inclined Plane จะประมาณ 1.25 kVac และสำหรับ วัสดุ PVC วิธี Dip-Track Test จะประมาณ 1.3 kVac วิธี Inclined Plane จะประมาณ 0.75 kVac และสรุปว่าวิธี Dip-Track Test ได้ผลที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกันกับวิธี Inclined Plane แต่มีข้อดีกว่าวิธี Inclined Plane คือขนาดของชิ้นตัวอย่างทดสอบจะเล็กกว่าเหมาะสำหรับวัสดุที่ใช้งานจริงที่มีข้อจำกัดของขนาดที่ไม่สามารถเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบได้ นอกจากนี้ยังได้ผลที่รวดเร็วกว่าวิธีอื่น เช่น วิธี Dust and Fog Test (ASTM2132) จะใช้เวลาในการทดสอบ 200 ชั่วโมงขึ้น สำหรับวิธี Inclined Plane (IEC587) จะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 2

ถึง 3 ชั่วโมง สำหรับวัสดุบางชนิด และวิธี Drop Test (IEC112) จะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 30 นาที แต่วิธี Dip-Track Test จะใช้เวลาในการทดสอบเพียงไม่กี่นาที จึงสามารถที่จะทำการทดสอบซ้ำได้หลายๆครั้ง ทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและแน่นอนกว่า

ปี 2547 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Analysis of surface degradation of high density polyethylene (HDPE) insulation material due to tracking” [6] โดย R Sarathi, S Chadrasekar, V Sabari Giri, C Venkateshaiah and R Velmurugan ใน Bull. Mater. Sci., Vol. 27, No. 3, June 2004, pp. 251–262. (Indian Academy of Sciences) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรอย(tracking)สำหรับวัสดุฉนวนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยทำการทดสอบการเกิดรอย(tracking test) ด้วยวิธี Inclined Plane (IEC587) พบว่าระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวของการเกิดรอย(tracking time) ที่แรงดันทดสอบ 2 kVac , 3 kVac, 4.5 kVac และ 5 kVac คือ 360 วินาที, 60 วินาที, 30 วินาที และ 25 วินาที ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวของการเกิดรอย(tracking time) ที่ความนำไฟฟ้า(conductivity)ของสารละลายทดสอบ 1,000 2,500 3,500 และ 5,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ สำหรับตัวอย่างที่ไม่ถูกเร่งอายุ คือ 35 วินาที, 34 วินาที, 20 วินาที และ 9 วินาที ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน 90°C , 15 วัน คือ 24 วินาที , 20 วินาที, 14 วินาที และ 4 วินาที ตามลำดับ

ปี 2554 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Study on the Field Behavior at the Contact Point between a Covered Conductor and a Dielectric Solid” [7] โดย Quoc Viet Huynh, Boonchai Techaumnat ใน 2011 International Conference on Engineering and Information Management, 15-17 April 2011, Chengdu, Sichuan, China, pp. 148-151 โดยได้ศึกษาสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ ซึ่งมีผลทำให้ฉนวนของสาย SAC เกิดการเสื่อมสภาพลงและเกิดรอย tracking จนนำไปสู่การล้มเหลวของระบบไฟฟ้า จากการศึกษา พบว่าสนามไฟฟ้าในอากาศมีค่ามากที่สุด ณ จุดสัมผัส และลดลง เมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสเปเซอร์เพิ่มขึ้น การจัดเรียงสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับระบบที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลน แต่มีขนาดสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสต่ำกว่าประมาณ 41 % สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของสเปเซอร์เพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่ลดลงเล็กน้อย เมื่อชั้นพอลิเอทิลีนหนาแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบทำให้สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าลดลง

ปี 2554 มีงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาถึงการสร้างร่องรอยบนฉนวน” [8] โดย นายบุญจันทร์ นาขมัน และนายวัฒนพงศ์ สาสิมมา โดยได้ศึกษาถึงการสร้างร่องรอยบนฉนวนไฟฟ้าประเภทฉนวนแข็ง ซึ่งทำมาจากอีพ็อกซีเรซินผสมกับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนแตกต่างกันคือ

0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60587 (วิธี Inclined Plane) ด้วยแรงดันกระแสสลับขนาด 5.2 kV พบว่าฉนวนไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตในอีพ็อกซีเรซิน ตั้งแต่ 0% ถึง 40% มีระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเกิดเบรกดาวนเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตในอีพ็อกซีเรซินมากกว่า 40% พบว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเกิดเบรกดาวนจะเร็วขึ้น และเมื่อเปลี่ยนมุมระนาบเอียงที่ใช้ในการทดสอบจากที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่มุม 45 องศา โดยทดสอบที่มุม 30 องศา และ 60 องศา เพิ่มเติมพบว่า มุมระนาบเอียงที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเกิดเบรกดาวนเพิ่มขึ้นและมุมระนาบเอียงที่ลดลงจะส่งผลให้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเกิดเบรกดาวนลดลง

ปี 2555 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Electric-Field Analysis of Spacer Cable Systems for Compact Overhead Distribution Lines” [9] โดย Isaias Ramirez-Vázquez, Member, IEEE, and Fermin P. Espino-Cortés, Member, IEEE ใน IEEE Transaction Power Delivery, Vol. 27, No. 4, October 2012, Mexico City. Paper no. TPWRD-00113-2012 พบว่าความแตกต่างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกระหว่างสายกับเคเบิลสเปเซอร์หรือวัสดุรัดสายยิ่งมาก จะทำให้สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสเพิ่มขึ้น และผลจากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการจ่ายไฟ 3 เฟส โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 สาย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณ messenger wire กับเคเบิลสเปเซอร์ แต่ถ้าเฟส A และ B มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด น้อยกว่าเฟส C ครึ่งหนึ่ง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณ เฟส C หรือถ้าเฟส A หรือ B มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าครึ่งหนึ่งของเฟสอื่นๆ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณเฟสนั้น

ปี 2556 มีงานวิจัยเรื่อง “การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ” [10] โดย นายปรัชญา แก้วจันทิก โดยศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุ ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ และการสึกกร่อนของพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบ คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ 1,000 ชั่วโมง การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด 1,000 ชั่วโมง และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ 30,000 รอบ พบว่า เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นในระหว่างการทดสอบ และพบว่า เคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถเห็นร่องรอยของการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะตำแหน่งจุดต่อลงดิน และผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของเคเบิลสเปเซอร์หลังการทดสอบพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันทำให้พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการเสื่อมอายุยืนยันได้จากปริมาณพันธะ C=O และ C=C ที่เพิ่มขึ้น

ปี 2557 มีงานวิจัยเรื่อง “โครงการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีน” [11] โดย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ร่วมกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA) ได้

รายงานสรุปผลการวิจัย เมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2557 โดย MTEC สามารถวิจัยได้วัสดุพอลิเอทิลีนชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ได้ผ่านการทดสอบในทุกๆ สภาวะเงื่อนไข สามารถใช้ได้ทนทานกว่าของเดิมที่ใช้เพียง 1 ปีก็ต้องเปลี่ยน ซึ่งวัสดุใหม่ที่ได้ตั้งเป้าไว้ว่าควรจะใช้งานได้นานอย่างน้อย 5 ปี ปรากฏว่าผ่านไป 8 ปี ก็ยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ
2. เกิดความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดรอยทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ
3. ได้ชุดทดสอบความต้านทานการเกิดรอยทางผิว(track resistance test) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) สำหรับทดสอบวัสดุฉนวนเคเบิลหรือวัสดุฉนวนชนิดอื่นๆ
4. สามารถนำไปปรับปรุงหรือพัฒนาวัสดุฉนวนชนิดใหม่ให้มีประสิทธิภาพดีกว่า เหมาะสมกับการใช้งานเป็นฉนวนของเปลือกสาย SAC

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ขั้นตอนการศึกษา และแผนการดำเนินงาน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย ทฤษฎีของสนามไฟฟ้า ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อของฉนวน สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง สนามไฟฟ้าของสายเคเบิลอากาศและอากาศ สนามไฟฟ้าของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและรอยทางผิว คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสายไฟและสายเคเบิล ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง และมาตรฐานการทดสอบความต้านทานการเกิดรอยต่างๆ

บทที่ 3 อุปกรณ์ทดสอบ การออกแบบ และวิธีการทดสอบความต้านทานการเกิดรอยทางผิว (surface tracking resistance) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.8 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย																														
	ปี พ.ศ. 2557					ปี พ.ศ. 2558												ปี พ.ศ. 2559													
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1. รวบรวมข้อมูล และทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา	■	■	■																												
2. ศึกษาขั้นตอนและวิธีการตามมาตรฐาน			■	■	■																										
3. ออกแบบและสร้างเครื่องมือทดสอบ					■	■	■	■																							
4. จัดหาและเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ					■	■	■	■																							
5. ทำการทดสอบ และบันทึกผล								■	■	■																					
6. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบ										■																					
7. จัดทำและเสนอบทความวิชาการ ในงานประชุม ISH 2015 ที่สาธารณรัฐเช็ก											■	■	■																		
8. ทำการทดสอบแก้ไข วิเคราะห์และสรุปผล														■	■	■															
9. จัดทำและเสนอบทความวิชาการ ในงานประชุม วิชาการ iEECON2016 ที่เชียงใหม่																■	■	■	■												
10. จัดทำวิทยานิพนธ์																		■	■	■	■										
11. สอบวิทยานิพนธ์																				■	■	■	■								

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

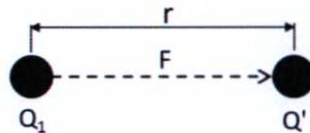
2.1 ทฤษฎีของสนามไฟฟ้า [12,13,14]

การหาสนามไฟฟ้าหรือความเข้มสนามไฟฟ้า เราสามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็น 4 ระบบดังต่อไปนี้

2.1.1 สนามไฟฟ้าระบบจุดประจุ(Electric Field of a Point Charge)

คือ ระบบประจุที่เกิดจากประจุจำนวนหนึ่งกระจายอยู่ในปริภูมิ การหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ ในปริภูมิสามารถทำได้โดยการนำประจุทดสอบไปวางที่จุดนั้น แล้วหาเวกเตอร์สนามไฟฟ้าลัพธ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุแต่ละจุดประจุ

กฎของคูลอมบ์(Coulomb's Law) กล่าวว่า “หากมีประจุ Q_1 และ Q' ที่มีขนาดเล็กเป็นจุดวางห่างกันเป็นระยะทาง r จะเกิดแรง F กระทำต่อกันในแนวทิศทางต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 แรง F ที่เกิดขึ้นจากประจุ Q_1 เทียบกับประจุ Q' ที่มีระยะทาง r

$$F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{Q'Q_1\vec{r}}{4\pi\epsilon r^3} = \frac{Q'Q_1\hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ $F_{Q_1 \rightarrow Q'}$ คือ แรงจากประจุ Q_1 เทียบกับประจุ Q' ที่มีระยะทาง r มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Q_1, Q' คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

\vec{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q' เทียบกับ Q_1 ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$

ϵ คือ สภาพยอมตัวกลางหรือเปอร์มิตติวิตีของตัวกลาง(absolute permittivity)

$$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$$

ϵ_0 คือ เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ(vacuum permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์(relative permittivity) หรือบางทีเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) สำหรับอากาศ จะมีค่า $\epsilon_{r,Air} = 1$

ถ้ามีประจุ จำนวน N ประจุ กระจายอยู่หลายจุด และมีเวกเตอร์ตำแหน่งต่างๆ กัน เป็น \vec{r}_i ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วยเท่ากับ \hat{r} ($i = 1, 2, 3 \dots N$) ตามตำแหน่งของ Q_i เมื่อเทียบกับ Q' แรงทั้งหมดที่กระทำต่อ Q' จะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของแต่ละแรง คือ $F_{Q'}$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

$$F_{Q'} = \sum_{i=1}^N F_{Q_i \rightarrow Q'} = \sum_{i=1}^N \frac{Q'Q_i\vec{r}}{4\pi\epsilon r_i^3} = \sum_{i=1}^N \frac{Q'Q_i\hat{r}}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) แรงที่ประจุต่างๆ กระทำต่อประจุ Q' ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ Q' ค่านี้เรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress : E) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.3)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} = \frac{\vec{F}}{e} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i\hat{r}}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ e คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน เท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์

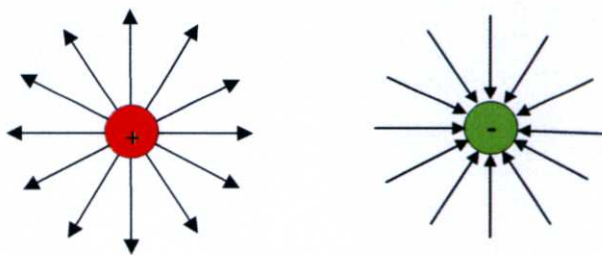
กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ ดังสมการที่ (2.4)

$$F = QE \quad (2.4)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้า E คือ แรง F ที่กระทำต่อประจุ Q ขนาดหนึ่งหน่วยที่จุดนั้น มีหน่วยเป็น นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) ดังสมการที่ (2.5)

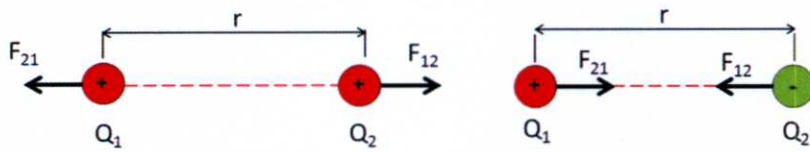
$$E = \frac{F}{Q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.5)$$

ถ้าประจุ Q เป็นประจุบวก (+) ทิศทางของเส้นสนามไฟฟ้านั้นจะพุ่งออก แต่ถ้าประจุ Q เป็นประจุลบ(-) ทิศทางของเส้นสนามไฟฟ้านั้นจะพุ่งเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2

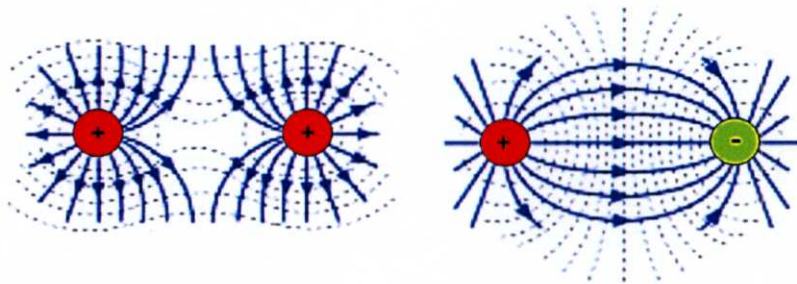


รูปที่ 2.2 ลักษณะทิศทางของสนามไฟฟ้าบริเวณรอบประจุบวกและประจุลบ

หากประจุ Q เป็นประจุชนิดเดียวกันจะเกิดแรงผลักกัน แต่ถ้าประจุ Q นั้นต่างชนิดกันจะเกิดแรงดูดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และมีลักษณะของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.4



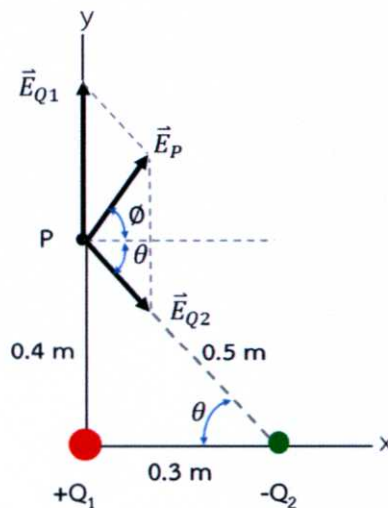
รูปที่ 2.3 ลักษณะของแรงที่กระทำระหว่างประจุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.4 ลักษณะของสนามไฟฟ้าระหว่างประจุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน

ตัวอย่างการหาสนามไฟฟ้าระบบประจุที่จุดใดๆ

สมมติประจุ Q_1 เป็นประจุบวกมีค่า $7\mu\text{C}$ วางอยู่ที่จุด $(0,0)$ และประจุ Q_2 เป็นประจุลบมีค่า $5\mu\text{C}$ วางอยู่ที่จุด $(0.3,0)$ m จะสามารถหาสนามไฟฟ้าที่จุด P ที่วางอยู่ที่จุด $(0,0.4)$ m ดังรูปที่ 2.5 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าระบบประจุที่จุด P ที่เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ \vec{E}_{Q1} และ \vec{E}_{Q2}

$$\text{หาขนาดสนามไฟฟ้า } E_{Q1} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(7 \times 10^{-6})}{(0.4)^2} = 3.9 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\text{หาขนาดสนามไฟฟ้า } E_{Q2} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(5 \times 10^{-6})}{(0.5)^2} = 1.8 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\text{ทิศทางสนามไฟฟ้าของ } E_{Q1} \text{ ไปตามแกน } y \text{ มีค่าเท่ากับ } 3.9 \times 10^5 \hat{j} \text{ N/C}$$

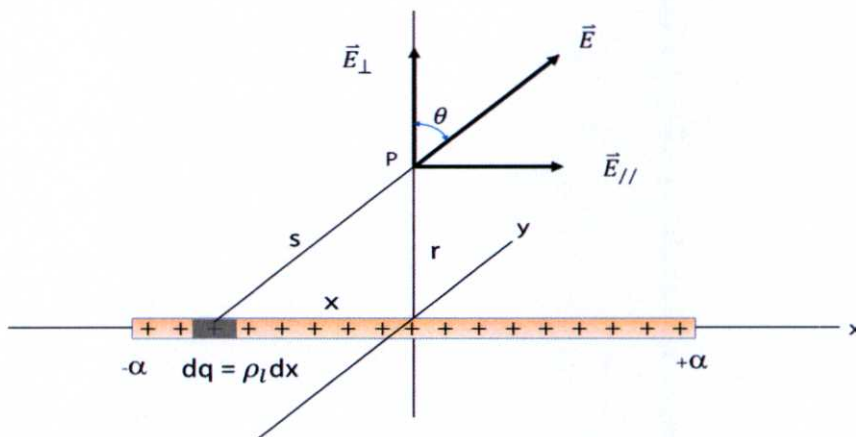
$$\text{ทิศทางสนามไฟฟ้าของ } E_{Q2} \text{ มีค่าเท่ากับ } E_2 \cos \theta \hat{i} + E_2 \sin \theta \hat{j} \text{ N/C}$$

$$\text{ซึ่งมีค่าเท่ากับ } \frac{3}{5} E_2 \hat{i} - \frac{4}{5} E_2 \hat{j} \text{ N/C}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุด } P \text{ มีค่าเท่ากับ } \vec{E}_p &= \vec{E}_{Q1} + \vec{E}_{Q2} \\ &= 3.9 \times 10^5 \hat{j} + 1.1 \times 10^5 \hat{i} - 1.4 \times 10^5 \hat{j} \\ &= 1.1 \times 10^5 \hat{i} + 2.5 \times 10^5 \hat{j} \text{ N/C} \end{aligned}$$

2.1.2 สนามไฟฟ้าระบบประจุเชิงเส้น(Electric Field of a Line Charge)

กรณีประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอบนตัวนำที่ยาวเป็นอนันต์ ที่วางไปบนแกน x ดังรูปที่ 2.6 โดยมีความหนาแน่นประจุเชิงเส้น(line charge density) เท่ากับ ρ_l มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อเมตร (C/m)



รูปที่ 2.6 ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงเส้นบนตัวนำยาวเป็นอนันต์ไปตามแกน x

สามารถหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด $P(0,0,r)$ ได้ดังนี้

จาก $\rho_l = q/x$ (C/m) ดังนั้น $dq = \rho_l dx$

ประจุย่อย dq ทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด P เป็น $d\vec{E}$ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ทิศทางตามเวกเตอร์ s

เวกเตอร์ $\vec{s} = x\hat{a}_x + r\hat{a}_z$ ได้ $s = \sqrt{x^2 + r^2}$

ดังนั้น เวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศทางตาม s คือ $\hat{a}_s = \frac{x\hat{a}_x + r\hat{a}_z}{\sqrt{x^2 + r^2}}$

จาก $\vec{E}_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{a}_r$ แทน \vec{E}_r ด้วย $d\vec{E}$, แทน Q ด้วย dq , แทน r^2 ด้วย s^2

และแทน \hat{a}_r ด้วย \hat{a}_s ดังนั้นจะได้ $d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 s^2} \hat{a}_s$

แล้วแทนค่า $dq = \rho_l dx$, $\hat{a}_s = \frac{x\hat{a}_x + r\hat{a}_z}{\sqrt{x^2 + r^2}}$ และ $s = \sqrt{x^2 + r^2}$

จะได้ $d\vec{E} = \frac{\rho_l dx}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{x^2 + r^2})^2} \frac{x\hat{a}_x + r\hat{a}_z}{\sqrt{x^2 + r^2}} = \frac{\hat{a}_x x \rho_l dx}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{x^2 + r^2})^3} + \frac{\hat{a}_z r \rho_l dx}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{x^2 + r^2})^3}$

พจน์ $\frac{\hat{a}_x x \rho_l dx}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{x^2 + r^2})^3}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากการกระจายประจุ ทางแกน $-X$ และ $+X$ มี

ความสมมาตรกันทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าหักล้างกัน

ดังนั้นจะได้ $d\vec{E} = \frac{\hat{a}_z r \rho_l dx}{4\pi\epsilon_0 (\sqrt{x^2 + r^2})^3}$

หาปริพันธ์ได้โดย $\vec{E} = \int d\vec{E}$

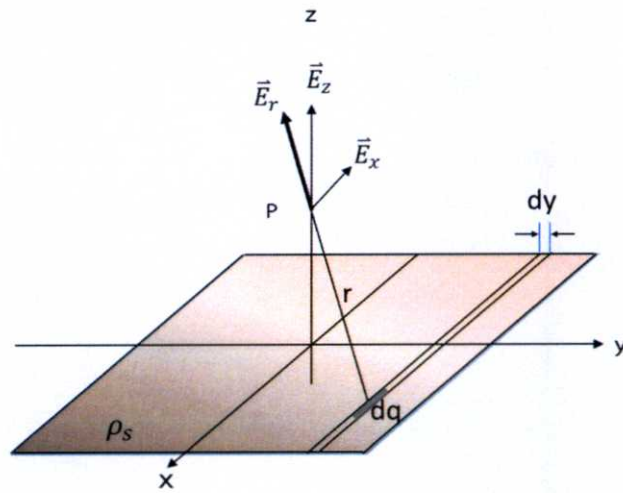
จะได้ $\vec{E} = \frac{\hat{a}_z r \rho_l}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(\sqrt{x^2 + r^2})^3}$

ดังนั้น จะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด $P(0,0,r)$ ดังสมการที่ (2.7)

$$\vec{E}_r = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r} \hat{a}_z \quad ; \quad \text{โดยที่ } \hat{a}_z = \hat{a}_r \quad (2.7)$$

2.1.3 สนามไฟฟ้าระบบประจุเชิงพื้นผิว(Electric Field of a Surface Charge)

กรณีประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอบนตัวนำที่เป็นแผ่นบาง มีความกว้างและความยาวเป็นอนันต์ ดังรูปที่ 2.7 โดยมีความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิว(surface charge density) เท่ากับ ρ_s มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อตารางเมตร(C/m^2)



รูปที่ 2.7 ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงพื้นผิวบนแผ่นตัวนำบางที่มีความหนาแน่นประจุ ρ_s

สามารถหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด $P(0,0,z)$ ได้ดังนี้

พิจารณาแบ่งส่วนตัวนำตามยาวออกเป็นเส้นเล็กๆ กว้าง dy วางขนานแกน x และวางเรียงกันไปบนระนาบ xy แต่ละเส้นเล็กๆ จะมีความหนาแน่นเชิงเส้น ρ_l เมื่อแบ่งส่วนของเส้นเป็นส่วนย่อยๆ ยาว dx แต่ละส่วนจะมีประจุ $dq = \rho_l dx$

แต่ละส่วนย่อยที่แบ่งพื้นที่ $ds = dx dy$ ดังนั้น $dq = \rho_s dx dy$

จะได้ความสัมพันธ์ $\rho_l = \rho_s dy$

จากรูปที่ 2.7 จุด P มีเวกเตอร์ตำแหน่งเทียบกับประจุ เป็น $\vec{r} = -y\hat{a}_y + z\hat{a}_z$ และได้

$$r = \sqrt{y^2 + z^2} \quad \text{หาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศทางตาม } r \quad \text{คือ } \hat{a}_r = \frac{-y\hat{a}_y + z\hat{a}_z}{\sqrt{y^2 + z^2}}$$

จาก $\vec{E}_r = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r} \hat{a}_r$ แทนค่า \vec{E}_r ด้วย $d\vec{E}$ แทน $\rho_l = \rho_s dy$

$$\text{แทน } r = \sqrt{y^2 + z^2} \quad \text{และแทน } \hat{a}_r = \frac{-y\hat{a}_y + z\hat{a}_z}{\sqrt{y^2 + z^2}}$$

$$\text{จะได้ } d\vec{E} = \frac{\hat{a}_z z \rho_s dy}{2\pi\epsilon_0 (y^2 + z^2)}$$

หาปริพันธ์ได้โดย $\vec{E} = \int d\vec{E}$

$$\text{จะได้ } \vec{E} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{a}_z z \rho_s dy}{2\pi\epsilon_0 (y^2 + z^2)}$$

$$\vec{E} = \frac{\hat{a}_z \rho_s}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{z dy}{(y^2 + z^2)}$$

แทนค่า $y = z \tan \theta$, $dy = z \sec^2 \theta d\theta$ และ $\tan^2 \theta + 1 = \sec^2 \theta$

โดยขีดจำกัดการหาปริพันธ์ ที่ $y = -\infty$ ได้ $\theta = -\frac{\pi}{2}$, ที่ $x = +\infty$ ได้ $\theta = \frac{\pi}{2}$

จะได้
$$\vec{E} = \frac{\hat{a}_z \rho_s}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta = \frac{\hat{a}_z \rho_s}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2}\right) \right]$$

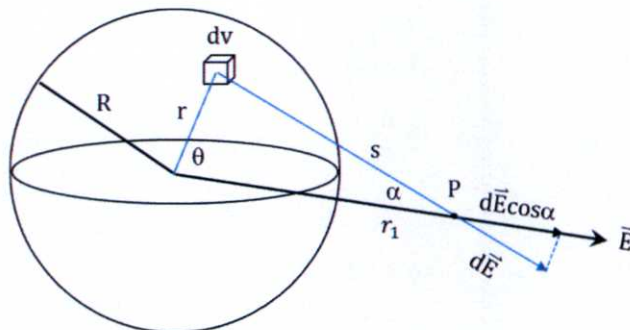
ดังนั้น จะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด P (0,0,z) ดังสมการที่ (2.8)

$$\vec{E}_r = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} \hat{a}_z \tag{2.8}$$

โดยที่ $\hat{a}_z = \hat{a}_n$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ

2.1.4 สนามไฟฟ้าระบบประจุเชิงปริมาตร(Electric Field of a Volume Charge)

กรณีประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทุกส่วนในเนื้อสารบนนำทรงกลม โดยมีความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร(volume charge density) เท่ากับ ρ_v มีหน่วยเป็นลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบประจุเชิงปริมาตรบนตัวนำทรงกลมที่มีความหนาแน่นประจุ ρ_v

สามารถหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด P ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางทรงกลม ระยะทาง r_1 ได้ดังนี้ พิจารณาแบ่งส่วนตัวนำทั้งหมดออกเป็นปริมาตรเล็กๆ dv ที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางทรงกลม r โดยในปริมาตรเล็กๆนี้ มีประจุ $dq = \rho_v dv$ และภายนอกทรงกลมที่จุด P อยู่ห่างจากส่วนเล็กๆของประจุ dq เป็นระยะทาง s ประจุ dq ทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด P เป็น $d\vec{E}$ แต่ทรงกลมมีความสมมาตรจึงทำให้มีสนามไฟฟ้าในแนวเส้น r_1 หาค่าได้คือ $d\vec{E} \cos \alpha = \hat{a}_r dE \cos \alpha$

พิกัดทรงกลม $dv = r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$

ใช้กฎ cosine จะได้ $\cos\alpha = \frac{s^2 + r_1^2 - r^2}{2sr_1}$, $\cos\theta = \frac{r^2 + r_1^2 - s^2}{2rr_1}$

$$\text{และ } \sin\theta d\theta = \frac{s ds}{rr_1}$$

จาก $\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{a}_r$ แทนค่า \vec{E} ด้วย $d\vec{E}$ แทน Q ด้วย $dq = \rho_v dv$

แทน $dv = r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$ และแทน r ด้วย s จะได้สมการที่ (2.9)

$$d\vec{E} = \hat{a}_r \frac{\rho_v r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi}{4\pi\epsilon_0 s^2} \cos\alpha \quad (2.9)$$

แทนค่า $\cos\alpha$ และ $\sin\theta d\theta$ จะได้สมการที่ (2.10)

$$d\vec{E} = \hat{a}_r \frac{\rho_v r^2 s ds dr d\phi}{4\pi\epsilon_0 s^2 r r_1} \left(\frac{s^2 + r_1^2 - r^2}{2sr_1} \right) \quad (2.10)$$

หาปริพันธ์ได้โดย $\vec{E} = \int_v d\vec{E}$

หาปริพันธ์เทียบกับ $d\phi$ จะได้สมการที่ (2.11)

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \hat{a}_r \iint \left(\int_0^{2\pi} d\phi \right) \frac{\rho_v r ds dr}{4\pi\epsilon_0 s^2 r_1^2} \left(\frac{s^2 + r_1^2 - r^2}{2} \right) \\ \vec{E} &= \hat{a}_r \frac{\pi\rho_v}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \iint r \left(1 + \frac{r_1^2 - r^2}{s^2} \right) ds dr \end{aligned} \quad (2.11)$$

แล้วหาปริพันธ์เทียบกับ ds จะได้สมการที่ (2.12)

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \hat{a}_r \frac{\pi\rho_v}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \int r \left(\int_{r_1-r}^{r_1+r} ds + (r_1^2 - r^2) \int_{r_1-r}^{r_1+r} (-ds^{-1}) \right) dr \\ \vec{E} &= \frac{\pi\rho_v \hat{a}_r}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \int r (4r) dr \end{aligned} \quad (2.12)$$

และหาปริพันธ์เทียบกับ dr จะได้สมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \frac{\pi\rho_v \hat{a}_r}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \int_{r=0}^{r=R} 4r^2 dr \\ \vec{E} &= \frac{\hat{a}_r}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \left(\frac{4}{3} \pi\rho_v R^3 \right) \\ \vec{E} &= \frac{Q \hat{a}_r}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \quad ; \quad \text{เมื่อ } Q = \frac{4}{3} \pi\rho_v R^3 \end{aligned} \quad (2.13)$$

ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้ากับความเข้มสนามไฟฟ้า

ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density หรือ electric displacement) เขียนแทนด้วยเวกเตอร์ \vec{D} หมายถึง จำนวนเส้นฟลักซ์ Ψ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับแนวที่คิด มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉาก ดังสมการที่ (2.14)

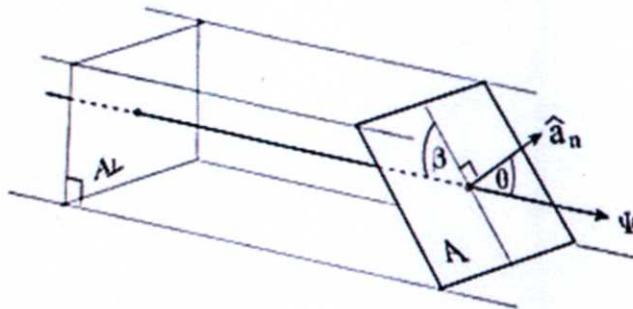
$$\vec{D} = \frac{\Psi}{A_{\perp}} \quad (2.14)$$

เมื่อ \vec{D} คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า ณ พื้นที่ \vec{A}

Ψ คือ จำนวนเส้นฟลักซ์ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

A_{\perp} คือ พื้นที่ตั้งฉากกับฟลักซ์ \vec{D}

จากรูปที่ 2.9 ให้ฟลักซ์ไฟฟ้า Ψ ทำมุม β กับพื้นที่ A แต่ทำมุม θ กับทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หรือทำมุมกับ \hat{a}_n และ \hat{a}_n เป็นทิศทางของพื้นที่ A ที่ไม่ตั้งฉากกับ Ψ ที่พุ่งผ่าน และ A_{\perp} คือพื้นที่ตั้งฉากกับฟลักซ์ ดังนั้นหาฟลักซ์ไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.15)



รูปที่ 2.9 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า Ψ ทำมุม β กับพื้นที่ A

$$\Psi = DA \cos \theta = \vec{D} \cdot \vec{A} = \vec{D} \cdot A \hat{a}_n \quad (2.15)$$

จากการทดลองของฟาราเดย์ พบว่า ฟลักซ์ไฟฟ้า Ψ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุ Q เป็นไปตามดังสมการที่ (2.16)

$$\Psi = Q \quad (2.16)$$

แทนค่า สมการที่ (2.15) และ (2.16) ในสมการที่ (2.5)

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{\Psi}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{D}{\epsilon}$$

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า D กับความเข้มสนามไฟฟ้า E ดังสมการที่ (2.17)

$$D = \epsilon E \quad (2.17)$$

จากการทดลองของฟาราเดย์จึงเป็นที่มาของ กฎของเกาส์(Gauss's Law) กล่าวคือ ฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งออกจากปริมาตรใดๆที่หุ้มด้วยพื้นที่ปิดจะมีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในพื้นผิวปิดนั้น เขียนได้ดังสมการที่ (2.18)

$$\psi = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{\text{ที่อยู่ในพื้นผิวปิด}} \quad (2.18)$$

หากประจุภายในผิวปิดไม่ใช่จุดประจุโดยจัดวางเป็นกลุ่มมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรเป็น ρ_v จำนวนประจุภายในผิวปิด หาได้ดังสมการที่ (2.19)

$$Q = \int_V \rho_v \, dv \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.18) และ สมการที่ (2.19) จะได้ว่า

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho_v \, dv \quad (2.20)$$

จากทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์(divergence) $\int_V (\nabla \cdot \vec{A}) \, dv = \oint_S \vec{A} \cdot d\vec{s}$

$$\text{ดังนั้น} \quad \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V (\nabla \cdot \vec{D}) \, dv \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) จะได้ว่า

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.22)$$

แทนค่า $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ในสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.23)$$

ศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มสนามไฟฟ้า

ถ้าประจุ Q อยู่ภายในสนามไฟฟ้า E จะเกิดแรงกระทำต่อประจุ คือ $\vec{F} = Q\vec{E}$ ดังนั้นต้องใส่แรงจากภายนอกเข้าไปเพื่อเคลื่อนย้ายประจุนี้ จะต้องเป็นค่าเท่ากับแรงจากสนามไฟฟ้า $-Q\vec{E}$ การเคลื่อนที่ย้ายประจุจากจุด A ไปยังจุด B ด้วยแรง $-Q\vec{E}$ จะทำให้เกิดงานทางไฟฟ้า W ดังนี้คือ

$$W = -Q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.24)$$

นิยามว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า(electric potential) คือ งาน W จากแหล่งพลังงานภายนอกที่ใช้ในการเคลื่อนประจุทดสอบบวกหนึ่งหน่วย จากจุด A ไปยังจุด B ภายใต้สนามไฟฟ้า เขียนได้ดังสมการที่ (2.25)

$$V_{AB} = V_A - V_B = + \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.25)$$

หรือถ้าเขียนเป็น $V_{BA} = V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.26)$

ในกรณีที่ประจุที่จุดอนันต์เป็นจุดอ้างอิง ซึ่งมักใช้พื้นดินเป็นจุดอ้างอิง(ground) ศักย์ไฟฟ้านั้นจะเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$V_A = - \int_{\infty}^A \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.27)$$

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า V กับความเข้มสนามไฟฟ้า E ดังสมการที่ (2.28)

$$\mathbf{V} = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.28)$$

ถ้าหากประจุนั้นเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าสถิตจนครบรอบในเส้นทางหนึ่งเป็นวงปิด เปรียบเสมือนจุด A และจุด B เป็นจุดเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่มีการทำงานหรือได้งานมา นั่นคือ

$$W = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.29)$$

สนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับสมการที่ (2.29) เราจะเรียกว่าเป็น **สนามอนุรักษ์(conservative field)** จากสมการที่ (2.29) เมื่อใช้ทฤษฎีสโตกส์(Stokes's theory) เปลี่ยนปริพันธ์ตามผิวเป็นปริพันธ์ตามเส้นหรือกลับกัน คือ $\oint_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{s} = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l}$

ดังนั้นจะได้ว่า $\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (2.30)$

สมการที่ (2.30) เป็นพื้นฐานสมการแมกซ์เวลล์ซึ่งมีความหมายว่าสนามไฟฟ้าไม่มีเคิร์ล

เนื่องจากพิจารณาสนามไฟฟ้าสถิต ($\nabla \times \vec{E} = 0$) ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอาจหาได้จากเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าได้ว่า

$$\vec{E} = -\nabla V = -(\hat{x} \frac{\partial V}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial V}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial V}{\partial z}) \quad (2.31)$$

แทนค่าสมการที่ (2.31) ในสมการที่ (2.23) จะได้ว่า

$$\nabla \cdot (-\nabla V) = \frac{\rho v}{\epsilon} \quad (2.32)$$

$$\nabla^2 V = - \frac{\rho v}{\epsilon} \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.33) เรียกว่า สมการพัวซอง(Poisson's equation)

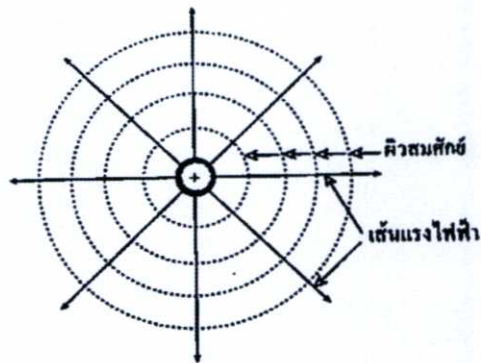
ในกรณีที่ไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆในปริมาตรนั้น นั่นคือ $\rho_v = 0$

จะได้ว่า
$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.34)$$

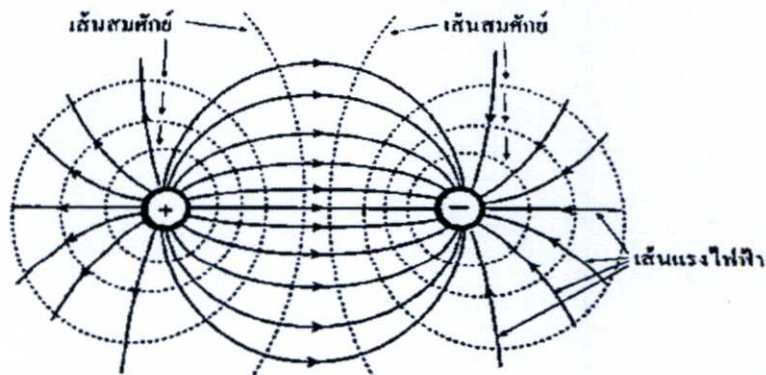
สมการที่ (2.34) เรียกว่า สมการลาปลาซ(Laplace's equation)

ผิวสมศักย์และเส้นสมศักย์

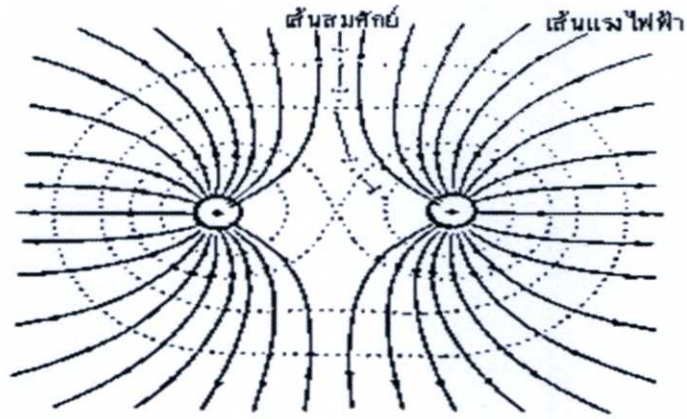
เส้นสมศักย์(equipotential line) คือ เส้นที่เชื่อมโยงระหว่างจุดที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากันบนระนาบใดๆของสนามเดียวกัน ส่วนผิวสมศักย์(equipotential surface) คือปริภูมิผิวปิดผ่านจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ในสนามไฟฟ้าเดียวกันมีผิวสมศักย์หลายผิวซ้อนๆ กันผิวที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะอยู่ชั้นในสุดสำหรับสนามของจุดประจุบวก ลักษณะของเส้นสมศักย์และผิวสมศักย์ของระบบประจุแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.10 ถึง 2.15



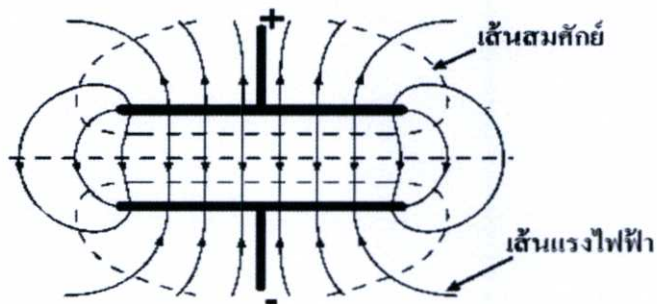
รูปที่ 2.10 ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบจุดประจุเดี่ยว



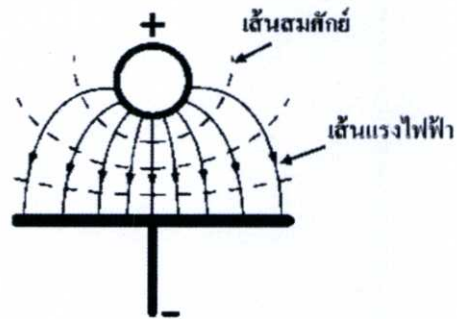
รูปที่ 2.11 ผิวสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าระบบจุดประจุสองประจุต่างชนิดกัน



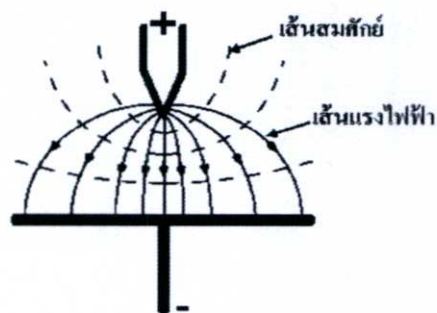
รูปที่ 2.12 ผิวนสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าในระบบจุดประจุสองประจุชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.13 ผิวนสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าในระบบประจุบนแผ่นระนาบขนานกัน



รูปที่ 2.14 ผิวนสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าในระบบประจุบนทรงกลมกับระนาบ



รูปที่ 2.15 ผิวนสมศักย์และเส้นแรงไฟฟ้าในระบบประจุบนแท่งปลายแหลมกับระนาบ

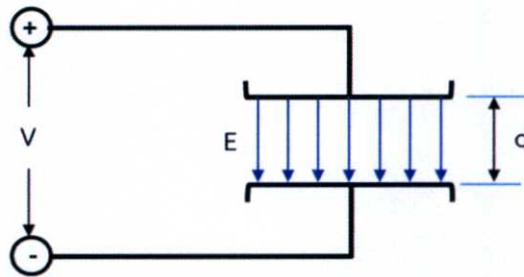
2.2 ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้า [12,13]

ลักษณะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด แบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
2. สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-uniform Field)
3. สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-uniform Field)

2.2.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าทุกๆจุดที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดนั้นเท่ากัน เช่น ลักษณะอิเล็กโทรดที่เป็นแบบระนาบ-ระนาบ (plane-plane electrodes) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) เท่ากับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยหรือที่จุดใดๆ (E_{av}) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.35)



รูปที่ 2.16 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} = \frac{V}{d} \quad (2.35)$$

เมื่อ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร(V/m) หรือกิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร(kV/mm)

E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยหรือที่จุดใดๆ มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร(V/m) หรือกิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร(kV/mm)

V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์(V) หรือกิโลโวลต์(kV)

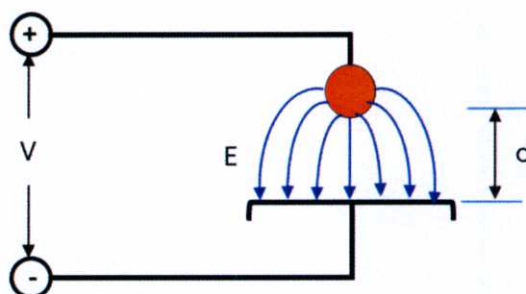
d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เมตร(m) หรือมิลลิเมตร(mm)

η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor หรือ field efficiency factor) หรือดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อย

เพียงใด ซึ่ง $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$ ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ จะมีค่า $\eta^* = 1$

2.2.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย จะเกิดขึ้นเมื่อลักษณะอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแบบทรงกลมกับระนาบ (sphere-plane electrodes) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ดังสมการที่ (2.36)



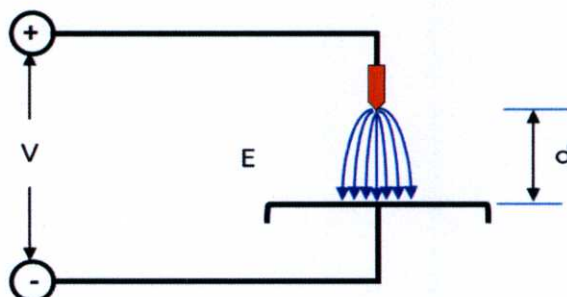
รูปที่ 2.17 สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

$$E_{max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.36)$$

สำหรับสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย จะมีค่า $0.4 < \eta^* \leq 0.8$

2.2.3 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดขึ้นเมื่อลักษณะอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแบบแท่งปลายแหลมกับระนาบ (rod-plane electrodes) ดังรูปที่ 2.18 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) คำนวณได้ดังสมการที่ (2.36) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสำหรับสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงจะมีค่า $0.1 < \eta^* \leq 0.3$



รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง

ความเครียดสนามไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างมากต่อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า อย่างเช่น ฉนวนสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล เป็นต้น ความล้มเหลวของฉนวนส่วนใหญ่่นั้นเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้า

ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า(dielectric strength) หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (E_b) ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ ดังสมการที่ (2.37)

$$E_b = f(\text{ลักษณะของสนามไฟฟ้า, คุณสมบัติของวัสดุฉนวน, เวลา}) \quad (2.37)$$

- ลักษณะของสนามไฟฟ้า นั้นขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด
- คุณสมบัติของวัสดุฉนวน หมายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี และทางความร้อน
- เวลา หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันไฟฟ้าคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับรูปแบบและรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ(ac) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(dc) แรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์(impulse) เป็นต้น

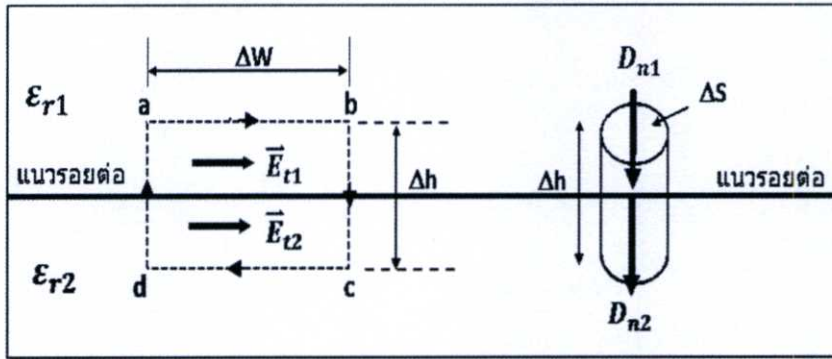
ดังนั้น ในการเลือกฉนวนใช้งานสำหรับไฟฟ้าแรงสูง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า(E_b) ของฉนวนนั้นจะต้องมากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด(E_{max})ที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (2.38)

$$E_b > E_{max} \quad (2.38)$$

2.3 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด [12,13]

ตามเงื่อนไขขอบ(boundary condition) เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าในตัวกลางฉนวนไดอิเล็กตริกที่ 1 (ϵ_{r1}) เป็น E_1 ทำมุมกับรอยต่อผิว ทำให้ได้ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผิวเป็น E_{t1} และในแนวตั้งฉากผิวเป็น E_{n1} ทำนองเดียวกันได้ความเครียดสนามไฟฟ้าในตัวกลางฉนวนไดอิเล็กตริกที่ 2 (ϵ_{r2}) ในแนวขนานและในแนวตั้งฉากผิวเป็น E_{t2} และ E_{n2} ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แนวรอยต่อผิวของฉนวนไดอิเล็กตริกทั้งสอง คือ E_{t1} และ E_{t2} สามารถคำนวณหาได้โดยใช้ปริพันธ์เชิงเส้นความเครียดสนามไฟฟ้าไปตามวงปิด abcd โดยที่ $\Delta h \rightarrow 0$ ทำให้ระยะ ad และ cd ซึ่งยาว เท่ากับ Δw อยู่ติดกับแนวรอยต่อผิว ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แนวรอยต่อผิวระหว่างฉนวนไดอิเล็กตริก 2 ชนิด

เมื่อ
$$\oint_{abcd} \vec{E} \cdot d\vec{L} = 0 \quad (2.39)$$

จะได้
$$\int_a^b E_{t1} dL_1 + \int_b^c E_{n1} dL_2 - \int_c^d E_{t2} dL_3 - \int_d^a E_{n2} dL_4 = 0 \quad (2.40)$$

พจน์ที่ 3 และ 4 มีค่าเป็นลบ เนื่องจากทิศทางตรงข้ามกัน และพจน์ที่ 2 และ 4 จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจาก $\Delta h \rightarrow 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\int_a^b E_{t1} dL_1 - \int_c^d E_{t2} dL_3 = 0 \quad (2.41)$$

ได้
$$E_{t1} \Delta w - E_{t2} \Delta w = 0 \quad (2.42)$$

$$E_{t1} - E_{t2} = 0 \quad (2.43)$$

ดังนั้น
$$\mathbf{E}_{t1} = \mathbf{E}_{t2} \quad (2.44)$$

จากสมการที่ (2.44) แสดงว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อในแนวขนานกับผิวที่สัมผัสกันมีความต่อเนื่อง

และจาก $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

จะได้ว่า
$$\frac{D_{t1}}{\epsilon_{r1}} = \frac{D_{t2}}{\epsilon_{r2}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (2.45)$$

จากสมการที่ (2.45) แสดงว่าความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในแนวขนานกับรอยต่อผิวไม่ต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขตรงผิวสัมผัสที่รอยต่อของส่วนประกอบสนามในแนวตั้งฉาก เราสามารถหาได้โดยใช้กฎของเกาส์ (Gauss's Law) โดยสร้างผิวปิดรูปทรงกระบอกเล็กๆ ล้อมปิดพื้นที่วงกลม Δs ที่ผิวรอยต่อ และทรงกระบอกมีความสูง $\Delta h \rightarrow 0$ ตามรูปที่ 2.19

จากกฎของเกาส์
$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \Delta Q = \rho_s \Delta s \quad (2.46)$$

เมื่อ ρ_s คือความหนาแน่นประจุเชิงผิว

$$\text{จะได้} \quad D_{n1}\Delta s - D_{n2}\Delta s = \rho_s\Delta s \quad (2.47)$$

$$\text{หรือ} \quad D_{n1} - D_{n2} = \rho_s \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.48) แสดงว่าถ้าที่รอยต่อผิวมีความหนาแน่นประจุ ρ_s ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าจะไม่ต่อเนื่อง แต่ด้วยสมบัติของฉนวนไดอิเล็กตริกไม่มีประจุอิสระ ทำให้ $\rho_s = 0$ ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในแนวตั้งฉากรอยต่อผิวมีความต่อเนื่อง

$$\text{ดังนั้น ทำให้ได้} \quad D_{n1} = D_{n2} \quad (2.49)$$

และจาก $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$

$$\text{จะได้ว่า} \quad \epsilon_{r1}E_{n1} = \epsilon_{r2}E_{n2} \quad (2.50)$$

จากสมการที่ (2.50) แสดงว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากผิวของฉนวนไดอิเล็กตริกจะไม่ต่อเนื่อง จากเงื่อนไขเหล่านี้ เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกัน จะแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ \vec{D} และ \vec{E} ที่ผิวสัมผัส ถ้าให้ \vec{D}_1 (และ \vec{E}_1) วางทำมุม α_1 กับเส้นตั้งฉากของระนาบผิวสัมผัส ดังในรูปที่ 2.20 เนื่องจากส่วนประกอบของ D ในแนวตั้งฉากผิวของฉนวนไดอิเล็กตริกมีความต่อเนื่อง

$$\text{ดังนั้น} \quad D_{n1} = D_1\cos\alpha_1 = D_2\cos\alpha_2 = D_{n2} \quad (2.51)$$

และส่วนประกอบของ D ในแนวขนานกับผิว จากสมการที่ (2.45)

$$\text{จะมีค่าเป็น} \quad \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{D_1\sin\alpha_1}{D_2\sin\alpha_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (2.52)$$

$$\text{หรือ} \quad \epsilon_{r2}D_1\sin\alpha_1 = \epsilon_{r1}D_2\sin\alpha_2 \quad (2.53)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.51) หาด้วยสมการที่ (2.53) จะได้

$$\frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (2.54)$$

จากสมการที่เหล่านี้ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \quad (2.55)$$

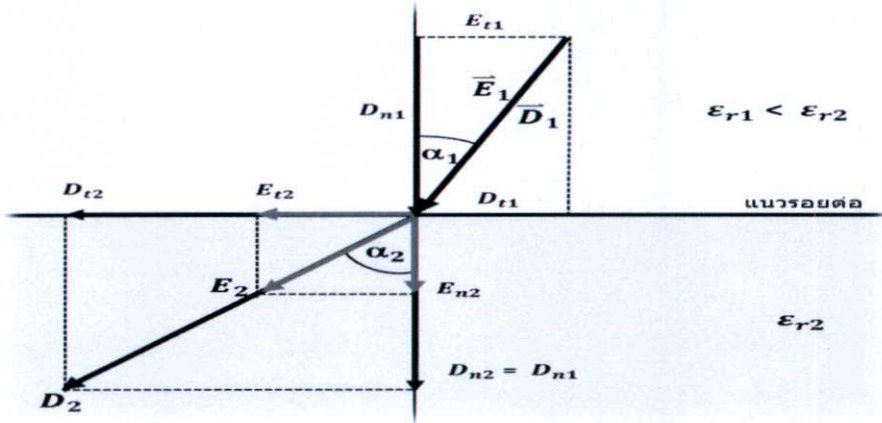
เราสามารถหาขนาดของ D_2 ได้จากสมการที่ (2.51) และ (2.53) คือ

$$D_2 = D_1 \sqrt{\cos^2 \alpha_1 + \left(\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}\right)^2 \sin^2 \alpha_1} \quad (2.56)$$

และขนาดของ E_2 ซึ่งมีทิศเดียวกันกับ D_2 เพราะ $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ได้จากสมการที่ (2.50) และ (2.55) คือ

$$E_2 = E_1 \sqrt{\sin^2 \alpha_1 + \left(\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}\right)^2 \cos^2 \alpha_1} \quad (2.57)$$

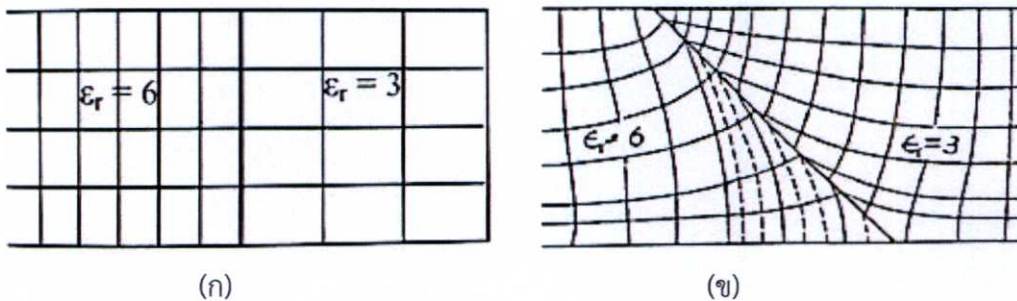
ถ้า $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$ เพราะฉะนั้น $\alpha_1 < \alpha_2$ การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวนจะเป็นไปดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวนที่ค่า $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$

สรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D และสนามไฟฟ้า E ในเนื้อสารที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อ แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ_r สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

ตัวอย่างดังในรูปที่ 2.21 แสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดแผ่นระนาบขนาน ซึ่งมีฉนวนที่มีค่า ϵ_r แตกต่างกันในรูปที่ 2.21 (ก) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนตั้งฉากกับระนาบของอิเล็กโทรด ส่วนในรูปที่ 2.21 (ข) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนทำมุมเฉียงกับผิวระนาบของอิเล็กโทรด



(ก)

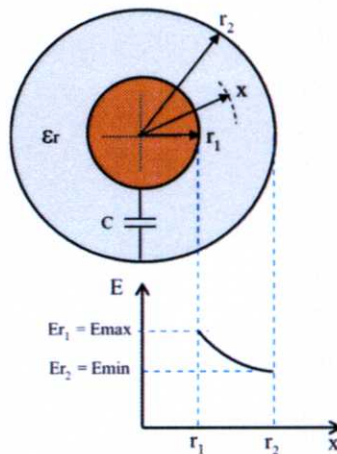
(ข)

รูปที่ 2.21 ฉนวนต่างชนิดต่อกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จะเห็นว่าที่ปากฉลอมของฉนวนที่มีค่า ϵ_r ต่ำ จะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะจุดตัดระหว่างผิวระนาบของอิเล็กโทรดกับแนวรอยต่อของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า E_b ก่อน และทำให้เกิดดีสชาร์จขึ้นได้ที่บริเวณนั้น

2.4 สนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลแรงสูง [12,15]

สายเคเบิลซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันรวม มีขนาดรัศมีของตัวนำเท่ากับ r_1 หุ้มด้วยฉนวนแข็งหนึ่งชั้น มีค่าเปอร์มิตติวิตีเท่ากับ ϵ_r มีรัศมีภายนอกสุดเท่ากับ r_2 และมีความยาวเท่ากับ l ดังรูปที่ 2.22 เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า V ระหว่างตัวนำกับฉนวน จะเกิดประจุ Q ที่ตัวนำ และจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า E ขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหา E ที่ระยะ x ใดๆ ($r_1 < x < r_2$) ได้ดังสมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.59) ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลหุ้มฉนวนหนึ่งชั้น

ความเครียดสนามไฟฟ้า
$$E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_l x} \quad (2.58)$$

หรือ
$$E_x = \frac{V}{x \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.59)$$

- เมื่อ
- E_x = ความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ระยะ x ใดๆ ($r_1 < x < r_2$) มีหน่วยเป็น kV/mm
 - V = แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน มีหน่วยเป็น kV
 - x = รัศมีที่ตำแหน่งใดๆของชั้นฉนวน มีหน่วยเป็น mm
 - r_1 = รัศมีตัวนำ หรือรัศมีด้านในสุดของชั้นฉนวน มีหน่วยเป็น mm
 - r_2 = รัศมีด้านนอกสุดของชั้นฉนวน มีหน่วยเป็น mm

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวนำ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.60)

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{มีหน่วยเป็น kV/mm} \quad (2.60)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{min} จะเกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของฉนวน ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.61)

$$E_{min} = \frac{V}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{มีหน่วยเป็น kV/mm} \quad (2.61)$$

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

ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับสายเคเบิลทรงกระบอกชั้นกันร่วม E_{av} จะมีค่าเท่ากับ

$$E_{av} = \frac{V}{r_2 - r_1} \quad (2.62)$$

ดังนั้นจะได้ว่า $\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.63)$

มิติที่เหมาะสม(optimum dimension) สำหรับสายเคเบิลทรงกระบอกชั้นกันร่วม

การออกแบบให้ได้มิติที่เล็กที่สุดหรือมิติที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของฉนวน(E_b) โดยที่ฉนวนนั้นสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดโดยไม่เกิดการเบรกดาวน หาได้ดังนี้

$$\text{แรงดันเบรกดาวนของฉนวนเคเบิล คือ } V_b = E_b r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.64)$$

$$\text{มิติที่เหมาะสม คือ } \frac{dV_b}{dr_1} = 0 \quad \text{จะได้ } E_b [\ln \frac{r_2}{r_1} - 1] = 0$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad \ln \frac{r_2}{r_1} = 1$$

ดังนั้น มิติที่เหมาะสม(optimum) สำหรับสายเคเบิลทรงกระบอกชั้นกันร่วม คือ

$$\left[\frac{r_2}{r_1} \right]_{opt} = e \quad (2.65)$$

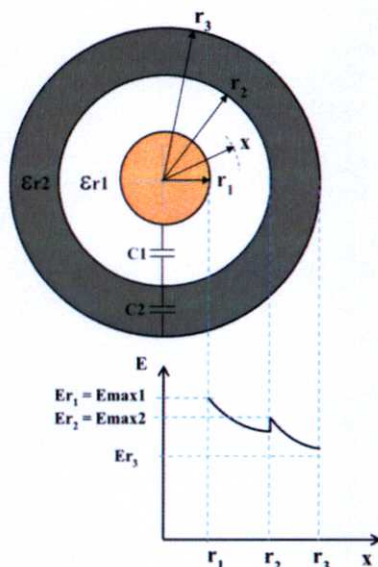
ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าที่ r_1 มีค่าต่ำสุด นั่นคือ

$$E_{r_1} (min) = \frac{V}{r_1} \quad (2.66)$$

และสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด คือ

$$V_{bmax} = E_b r_1 \quad (2.67)$$

สำหรับสายเคเบิลที่หุ้มด้วยฉนวนหลายชั้น



รูปที่ 2.23 สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลหุ้มฉนวนสองชั้น

จากรูปที่ 2.23 สามารถที่จะคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าได้ ดังนี้

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนชั้นที่ 1 (E_{max1}) จะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.68)

$$E_{max1} = \frac{\epsilon_2 V}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.68)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนชั้นที่ 2 (E_{max2}) จะเกิดขึ้นที่รัศมี r_2 ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.69)

$$E_{max2} = \frac{\epsilon_1 V}{r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.69)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของฉนวนชั้นที่ 2 สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.70)

$$E_{r3} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{r_3 \epsilon_3 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.70)$$

อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

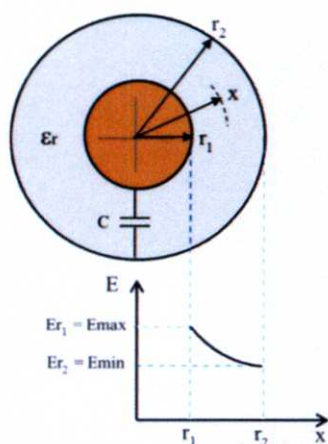
$$\frac{E_{max1}}{E_{max2}} = \frac{\epsilon_2 r_2}{\epsilon_1 r_1} \quad (2.71)$$

ดังนั้น เมื่อต้องการให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ของฉนวนแต่ละชั้นมีค่าเท่ากันหรือที่เรียก

กันว่า grading จะทำได้โดยให้ $\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \epsilon_x r_x$

ตัวอย่างการคำนวณสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลอากาศและอากาศ

สายเคเบิลอากาศซึ่งมีโครงสร้างเป็นไปตามดังรูปที่ 1.1 การคำนวณสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลอากาศและอากาศ เราจะจำลองรูปแบบการกำหนดค่าของรูปทรงกระบอกซ้อนกันตามดังรูปที่ 2.22 เนื่องจากฉนวนและเปลือกของสายเคเบิลอากาศเป็นประเภทเดียวกันคือเป็นครอสลิงค์โพลีเอททีลีน(XLPE) เพียงแต่ฉนวนของเปลือกนั้นมีการผสมคาร์บอนแบล็กเพียงเล็กน้อยโดยปกติจะไม่เกิน 2.5% ดังนั้นเราอาจจะมองว่าฉนวนและเปลือกนั้นคือฉนวนชั้นเดียวกัน เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศได้ดังสมการที่ (2.59) ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนี้คือ



$$E_{r_2} = \frac{V}{r_2 \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

โดยให้

E_{r_2} คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศ หน่วยเป็น kV/mm

V คือ แรงดันเฟสของสายกับนิวทรัลเป็นค่ายอด หน่วยเป็น kVp ($V_p = V_{\text{ระบบ}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$)

r_1 คือ รัศมีด้านในสุดของชั้นฉนวนสายเคเบิลอากาศ มีหน่วยเป็น mm
(มีค่าเท่ากับ รัศมีของตัวนำรวมกับความหนาของตัวกันตัวนำ)

r_2 คือ รัศมีด้านนอกสุดของสายเคเบิลอากาศ (รวมทั้งฉนวนของเปลือก) มีหน่วยเป็น mm

ϵ_1 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนและเปลือกสายเคเบิลอากาศ (XLPE = 2.3)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะอ้างอิงขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ดูได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ ก.5) โดยจะเลือกขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม ที่ใช้ในระบบ 22 kV และ 33 kV จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศ โดยได้เปรียบเทียบกับขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ ผลจากการคำนวณที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศที่คำนวณได้ โดยเปรียบเทียบขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระบบ 22 kV และ 33 kV ขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม

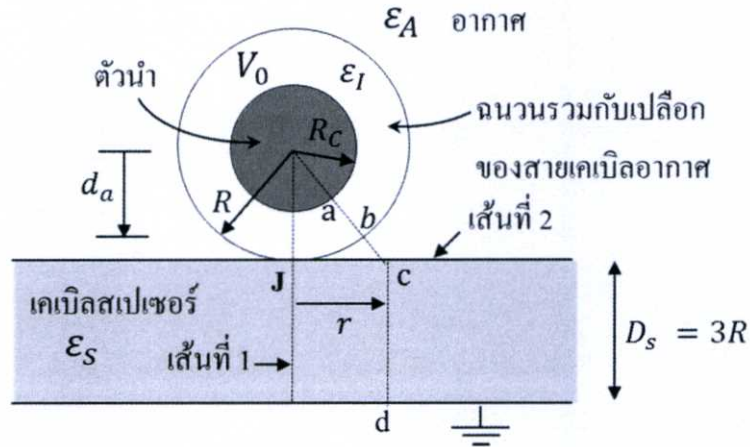
แรงดันระบบ (kV)	ขนาดตัวนำ (ตร.มม.)	รัศมีของตัวนำ		ความหนาตัวกันตัวนำ		รัศมีด้านในสุดของชั้นฉนวน, r_1 (mm)		ความหนาของฉนวน		ความหนาของเปลือก		รัศมีด้านนอกสุดของชั้นเปลือก, r_2 (mm)		สนามไฟฟ้ารอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศ E_{r_2} (kV/mm)	
		เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่
		22	50	4.165	4	0.3	0.3	4.465	4.3	3.175	4.85	3.175	1.75	10.815	10.9
	185	7.99	7.99	0.3	0.3	8.29	8.29	3.175	4.85	3.175	1.75	14.64	14.89	2.16	2.06
33	50	4.165	4	0.3	0.3	4.465	4.3	4.445	7.18	3.175	1.75	12.085	13.23	2.24	1.81
	185	7.99	7.99	0.3	0.3	8.29	8.29	4.445	7.18	3.175	1.75	15.91	17.22	2.60	2.14

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศที่คำนวณได้ทั้งหมด มีค่าไม่เกิน 3 kVp/mm หรือ 30 kVp/cm ซึ่งมีค่าไม่เกินกว่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ 30 kVp/cm จึงทำให้ไม่เกิดการดิสชาร์จที่บริเวณรอบๆสายในส่วนที่เป็นอากาศ และจากการที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แก้ไขปรับปรุงข้อกำหนดใหม่มีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศมีค่าลดลงอีก

หากสายเคเบิลอากาศนั้นได้ถูกติดตั้งร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์ สนามไฟฟ้าที่รอบนอกของสายเคเบิลอากาศนั้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร ดูตัวอย่างในข้อที่ 2.5 ต่อไป

2.5 สนามไฟฟ้าของจุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ [16]

จากงานวิจัยของ นาย สุย เวียด ควอค [16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสมุมศูนย์ระหว่างฉนวนสามชนิด โดยได้ทำการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ โดยจำลองรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายของสายเคเบิลอากาศวางบนเคเบิลสเปเซอร์ โดยมีตัวกลางพื้นหลังเป็นอากาศ โดยจะพิจารณาสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 เส้นที่ 1 คือเส้นในแนวตั้ง เริ่มจากจุดศูนย์กลางของตัวนำถึงกราวด์ เพื่อคำนวณหาค่าที่จุดสัมผัส J และเส้นที่ 2 คือเส้นตรงบนผิวเคเบิลสเปเซอร์ โดยการกำหนดจุด 4 จุด ได้แก่ จุด a, b, c และ d ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะได้สมการสำหรับประมาณค่าสนามไฟฟ้าที่ใกล้กับจุดสัมผัส J ดังสมการที่ (2.72)



รูปที่ 2.24 รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายของสายเคเบิลอากาศวางบนเคเบิลสเปเซอร์

$$E = \frac{V}{\overline{bc} + \overline{ab} \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_I}\right) + \overline{cd} \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_S}\right)} \quad (2.72)$$

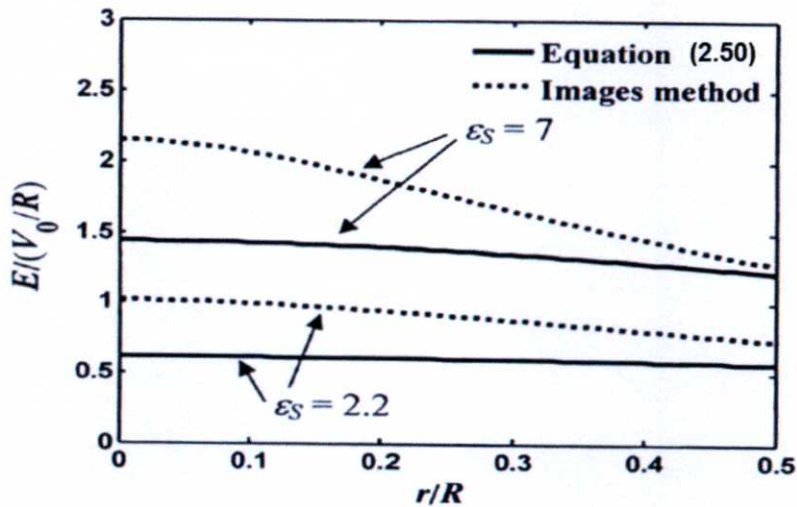
จากสมการที่ (2.72) กำหนดใหม่ว่า ระยะ $\overline{ab} = R - R_c$, $\overline{bc} = \sqrt{R^2 + r^2} - R$ และ $\overline{cd} = D_s$ หากให้ระยะ $\overline{bc} = 0$ จะสามารถหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J (E_c) ได้ดังสมการที่ (2.73)

$$E_c = \frac{V}{(R - R_c) \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_I}\right) + D_s \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_S}\right)} \quad (2.73)$$

และหากให้ระยะ $\overline{bc} = r^2/2R$ จะสามารถหาความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างใกล้กับจุดสัมผัส J (E) ได้ดังสมการที่ (2.74)

$$E = \frac{V}{(r^2/2R) + (R - R_c) \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_I}\right) + D_s \left(\frac{\epsilon_A}{\epsilon_S}\right)} \quad (2.74)$$

จากการศึกษาของ นาย ฮุย เวียด ควอค[16] ได้แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเลือกใช้สายเคเบิลอากาศ ขนาดของตัวนำ 50 ตร.มม. ที่แรงดันพิกัด 22 kV กำหนดความหนาของเคเบิลสเปเซอร์ $D_s = 3R$ กำหนดให้ $\epsilon_I = 2.3$ สำหรับฉนวนสายเคเบิลอากาศ และ $\epsilon_A = 1$ สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ แล้วทำการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างที่ใกล้จุดสัมผัส J โดยเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี คือ $\epsilon_S = 2.2$ สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE และ $\epsilon_S = 7$ สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างที่ใกล้จุดสัมผัส J ระหว่างวิธีประมาณค่าตามสมการที่ (2.74) กับค่าสนามไฟฟ้าที่ถูกต้องตามวิธี Images method และเปรียบเทียบระหว่างเคเบิลสเปเซอร์ที่มี $\epsilon_s = 2.2$ และ $\epsilon_s = 7$

จากรูปที่ 2.25 ซึ่งจะได้ค่าสนามไฟฟ้าด้านข้างที่ใกล้จุดสัมผัส J สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลนจะมีค่าสูงกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE และค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.74) จะมีค่าต่ำกว่าการคำนวณตามวิธี Images method ซึ่งจะแตกต่างกันประมาณ 40% และ 30% สำหรับ $\epsilon_s = 2.2$ และ $\epsilon_s = 7$ ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยอ้างอิงขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ดูได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ ก.5) โดยจะเลือกขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม ที่ใช้ในระบบ 22 kV และ 33 kV (เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่แล้ว การคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศ) จากนั้นนำมาคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J (E_C) ตามสมการที่ (2.73) และหาความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างใกล้กับจุดสัมผัส J (E) ตามสมการที่ (2.74) โดยกำหนดให้ระยะ $r = 1$ mm, $D_s = 3R$ และ $\epsilon_l = 2.3$ สำหรับฉนวนสายเคเบิลอากาศ โดยเปรียบเทียบขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ และที่ค่า $\epsilon_s = 2.2$ และ $\epsilon_s = 7$ ตามลำดับ ผลจากการคำนวณที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสและด้านข้างจุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 ชนิด โดยเปรียบเทียบขนาดโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่าและข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระบบ 22 kV และ 33 kV ขนาดตัวนำ 50 ตร.มม และ 185 ตร.มม

แรงดันระบบ (kV)	ขนาดตัวนำ (ตร.มม.)	รัศมีของตัวนำ		ความหนาตัวกันตัวนำ		รัศมีด้านในสุดของชั้นฉนวน		ความหนาของฉนวน		ความหนาของเปลือก		รัศมีด้านนอกสุดของชั้นเปลือก		สนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J				สนามไฟฟ้าที่ด้านข้าง J			
		(mm)		(mm)		.R _C (mm)		(mm)		(mm)		.R (mm)		Ec (kVp/mm)				E (kVp/mm) ที่ r=1 mm			
		เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	กับเคเบิลสเปเซอร์ชนิด							
		HDPE		พอร์ซเลน		HDPE		พอร์ซเลน		ε=2.2		ε=7		ε=2.2		ε=7					
22	50	4.17	4	0.3	0.3	4.465	4.3	3.18	4.85	3.175	1.75	10.82	10.9	1.03	1.01	3.14	3.03	1.02	1.01	2.41	2.37
	185	7.99	7.99	0.3	0.3	8.29	8.29	3.18	4.85	3.175	1.75	14.64	14.89	0.79	0.78	4.78	4.74	0.79	0.77	1.98	1.93
33	50	4.17	4	0.3	0.3	4.465	4.3	4.45	7.18	3.175	1.75	12.09	13.23	1.36	1.23	3.45	3.15	1.36	1.23	3.16	2.81
	185	7.99	7.99	0.3	0.3	8.29	8.29	4.45	7.18	3.175	1.75	15.91	17.22	1.08	0.98	5.09	4.86	1.08	0.98	2.65	2.39

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J (E_c) ของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ มีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าที่ด้านข้างจุดสัมผัส ถ้าเคเบิลสเปเซอร์เป็นชนิดพอร์ซเลน ค่าสนามไฟฟ้าที่ใกล้จุดสัมผัส J (E) จะมีค่าสูงเกินกว่า 30 kVp/cm ซึ่งเกินกว่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ จึงทำให้เกิดการดิสชาร์จที่บริเวณนี้ ผลของการดิสชาร์จอาจทำให้เกิดดิสชาร์จตามผิวและร่องรอยทางผิว ซึ่งจะอธิบายในข้อที่ 2.6 ต่อไป

แต่ถ้าเปลี่ยนมาใช้เคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE ค่าสนามไฟฟ้าที่ใกล้จุดสัมผัส J จะมีค่าไม่สูงเกิน 30 kVp/cm ของอากาศ จึงไม่ทำให้เกิดการดิสชาร์จขึ้นได้ และโครงสร้างตามข้อกำหนดใหม่นั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ต่ำกว่าโครงสร้างตามข้อกำหนดเก่า เมื่อเทียบกับตารางที่ 2.1 สรุปได้ว่าสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J (E_c) ของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน จะมีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศ และสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัส J (E_c) ของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE จะมีค่าต่ำกว่าสนามไฟฟ้าที่รัศมีรอบนอกของสายเคเบิลอากาศและอากาศ

2.6 ดิสชาร์จตามผิวและรอยทางผิว [12,17]

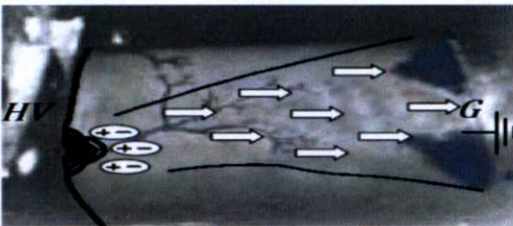
การเกิดดิสชาร์จตามผิว(surface discharge) และรอยทางผิวที่เรียกว่า tracking ของวัสดุฉนวนประเภทพอลิเมอร์(polymer) สามารถที่จะอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.26



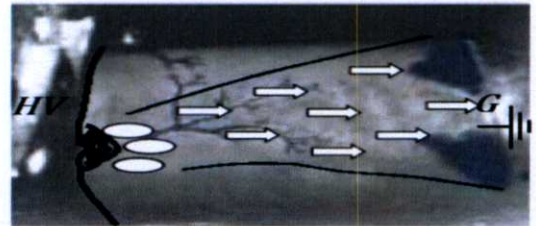
(ก) เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวของฉนวน บริเวณรอยต่อหรือจุดสัมผัส



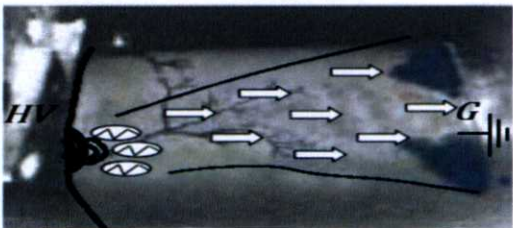
(ข) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงๆนั้นจะทำให้อากาศรอบๆ เกิดการแตกตัวไอออน (ionizes) การดิสชาร์จ (discharge) อาจเกิดขึ้นในบริเวณนี้



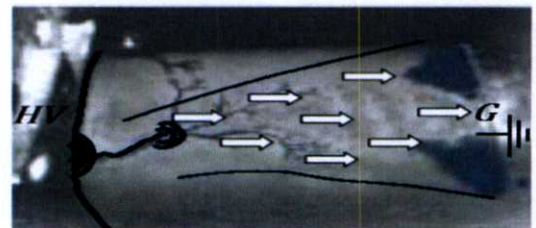
(ค) ประกอบกับมีสิ่งปนเปื้อนและความชื้นที่ผิว ทำให้ความต้านทานทางผิว(surface resistance)มีค่าต่ำลง จนทำให้เกิดกระแสรั่วไหล(leakage current)มีเส้นทางจากผิวลงสู่กราวด์



(ง) อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสรั่วสูงขึ้นทำให้ความชื้นที่ผิวเกิดการระเหยไป และเกิดการสร้างพื้นที่แห้งเล็กๆ ในหลายๆบริเวณ ซึ่งจะทำให้การไหลของกระแสรั่วนั้นถูกขัดขวาง



(จ) พื้นที่แห้งเล็กๆ เปรียบเสมือนมีความต้านทานสูง และหากมีแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าวสูงพอจะส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่แห้งสูงกว่าค่าความคงทนของอากาศ จนทำให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า จนมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดประกายไฟ(spark)ขึ้นที่บริเวณพื้นที่แห้งที่กระจายอยู่ในหลายบริเวณบนผิวฉนวน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(partial discharge : PD) ชนิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว(surface discharge)



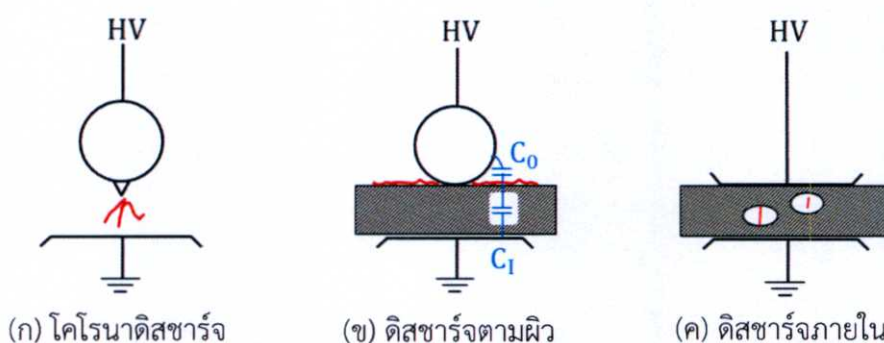
(ฉ) เกิดการดิสชาร์จต่อเนื่องและทำให้เกิดกระแสดิสชาร์จ(discharge current)และเกิดการอาร์ก(arc)บริเวณพื้นที่แห้งมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีความร้อนสูงขึ้น และมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้โมเลกุลและโครงสร้างทางเคมีของฉนวนนั้นแตกสลายจนเกิดเป็นรอยไหม้ที่เรียกว่า tracking ผลที่ได้จากการอาร์ก คือ คาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยไหม้ ทำให้ระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นลงจนกระทั่งฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันที่ตกคร่อมนั้นได้ จึงเกิดการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ของผิวฉนวน

รูปที่ 2.26 การเกิดดิสชาร์จตามผิวและร่องรอยทางผิวของวัสดุฉนวนพอลิเมอร์

ดิสชาร์จบางส่วน(PD)

หมายถึง การดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งพลังงานที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนนั้นเปลี่ยนสภาพให้นำไฟฟ้าได้ โดยจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่ไม่มีความสม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(ค่า ϵ_r ต่างกันมาก) หรือมีสิ่งเจือปน(contaminant) อาจทำให้สนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าวิกฤต แต่ก็ไม่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้แต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น ดิสชาร์จบางส่วน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. โคโรนาดิสชาร์จ(corona discharge)
2. ดิสชาร์จตามผิว(surface discharge) และ
3. ดิสชาร์จภายใน(internal discharge) แสดงดังในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ชนิดของดิสชาร์จบางส่วน

โคโรนาดิสชาร์จ

คือ ดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในอากาศ จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตอากาศ(E_c) ตามรูปที่ 2.27(ก)

ดิสชาร์จตามผิว

จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน(tangential field : E_t) มีค่าสูงกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต ตามรูปที่ 2.27(ข) ค่าตัวเก็บประจุระหว่างอิเล็กโทรด $C_0 \ll$ ค่าเก็บประจุของฉนวนแข็ง C_1 ดังนั้นแรงดันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะตกคร่อม C_0 เกือบทั้งหมดทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบนส่วน C_0 มีค่าสูงเกินสนามไฟฟ้าวิกฤต(E_c) ได้ จึงเกิดการเบรกดาวน์หรือดิสชาร์จในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็งมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์หรือ E_b สูง จึงไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ทะลุฉนวนได้ แต่จะดิสชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง

ดิสชาร์จภายใน

จะเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลวซึ่งมีฟองก๊าซอยู่ภายในตามรูปที่ 2.27(ค) ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดิสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ

ที่อยู่ภายใน ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอื่นอยู่จะทำให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากเบรกดาวนครั้งแรก แล้วจะเป็นต้นเหตุนำไปสู่การเบรกดาวนในที่สุด (ดูเพิ่มเติมในข้อ 2.10.6)

ไอออไนซ์

หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจึงมีประจุบวก จะเรียกว่าเกิดไอออไนซ์(ionizes) ส่วนกระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซและมีประจุบวก เราจะเรียกว่า ไอออไนซ์เซชัน(ionization)

พลังงานไอออไนซ์เซชัน

คือ พลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนซ์เซชัน (W_i) สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับศูนย์ในทิศทางสนามไฟฟ้า \vec{E}_x เป็นระยะทางเท่ากับระยะอิสระ λ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า (W) ดังสมการที่ (2.75)

$$W = e \int_0^\lambda \vec{E}_x dx = eU \quad (2.75)$$

$$\text{จะเกิดไอออไนซ์เซชันก็ต่อเมื่อ } W \geq W_i = eU_i \quad (E \text{ คงที่}, \lambda = \lambda_i) \quad (2.76)$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันไอออไนซ์เซชัน หน่วยเป็น V

eU_i คือ พลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนซ์เซชัน (W_i) หน่วยเป็น eV

ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนซ์ได้ ก็จะทำให้โมเลกุลที่ถูกชนนั้นอยู่ในสภาพที่ตื่นกระตุ้นได้ และเราจะเรียกว่า พลังงานตื่นกระตุ้น(W_e)

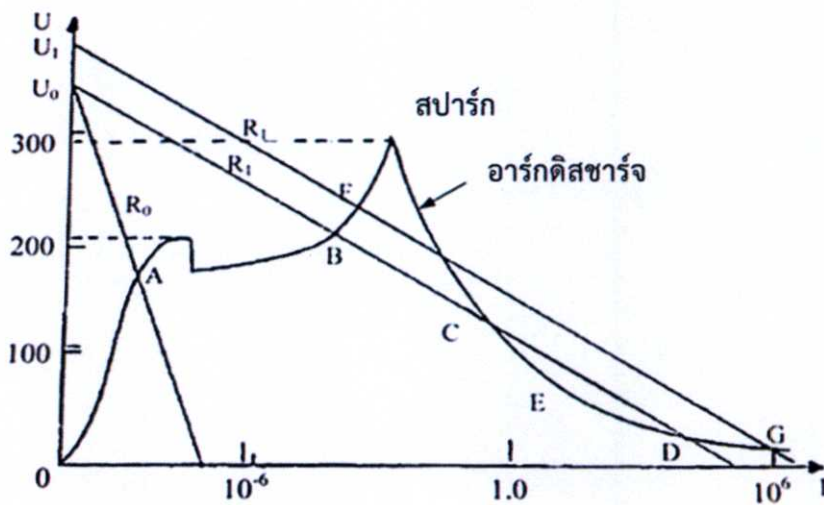
พลังงานตื่นกระตุ้นและพลังงานไอออไนซ์เซชันของโมเลกุลของก๊าซต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พลังงานตื่นกระตุ้นและพลังงานไอออไนซ์เซชันของโมเลกุลต่างๆ [12]

ก๊าซ	พลังงานตื่นกระตุ้น W_e (eV)	พลังงานไอออไนซ์เซชัน W_i (eV)
N	10.33	14.54
O	9.15	13.61
H	10.16	13.59
N ₂	6.3	15.60
O ₂	7.9	12.50
H ₂	7	15.40
NO	5.4	9.50
CO ₂	10	14.40
N ₂ O	-	11.00
H ₂ O	7.6	12.59

อาร์กดิสชาร์จ

ลักษณะของอาร์กดิสชาร์จ เป็นส่วนหนึ่งของลักษณะดิสชาร์จ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมอาร์กกับกระแสที่ไหลผ่านอาร์ก ในรูปที่ 2.28 แสดงถึงลักษณะโวลต์-แอมแปร์ของอาร์กดิสชาร์จของแก๊สอากาศยาว 1 เซนติเมตร ที่ความดันบรรยากาศ โดยมีแรงดันตัวจ่าย U_0 คงตัว แล้วเปลี่ยนความต้านทาน R_0 ลดลงเป็น R_1 และให้ความต้านทานคงตัวเท่ากับ R_1 แต่เปลี่ยนแรงดันตัวจ่ายเป็น U_1 การเปลี่ยนความต้านทานหรือแรงดันทำให้กระแสเปลี่ยนไปด้วย ในช่วงที่กระแสเพิ่มขึ้นเลยจุดที่เรียกว่า สปาร์ก (spark) เป็นช่วงที่เรียกว่า อาร์กดิสชาร์จ(arc discharge) ซึ่งแรงดันคร่อมแก๊สจะลดลงเมื่อกระแสอาร์ก(arc current)เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.28 ลักษณะดิสชาร์จของแก๊สอากาศระยะ 1 เซนติเมตร ที่ความดันบรรยากาศ [12]

การเกิดคาร์บอนไอเซชัน

คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัสดุต่างๆให้เป็นธาตุคาร์บอน(carbon)ด้วยความร้อน หรือเป็นกระบวนการผลิตถ่าน นั่นเอง เช่น การเกิดคาร์บอนไอเซชันของฉนวนพอลิเอทิลีนที่เกิดจากการเผาไหม้และความร้อนจากการดิสชาร์จต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวนพอลิเอทิลีนซึ่งประกอบด้วยพันธะ C-C และ C-H ได้รับพลังงาน (Δh) มากพอที่จะทำให้โมเลกุลนั้นเกิดการแตกสลาย ทำให้อะตอมไฮโดรเจน(H) หลุดออกเปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ดังรูปที่ 2.29 ทำให้ฉนวนพอลิเอทิลีนมีความเป็นฉนวนลดลงเพราะเนื่องจากคาร์บอนที่เกิดขึ้นนั้นมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า



รูปที่ 2.29 การเกิดคาร์บอนไซของฉนวนพอลิเอทิลีน

พลังงานพันธะ

พลังงานพันธะ (energy bond) คือ พลังงานสลายพันธะแต่ละพันธะโมเลกุล พลังงานพันธะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล ดังนี้

พลังงานพันธะของพันธะเดี่ยว < พลังงานพันธะของพันธะคู่ < พลังงานพันธะของพันธะสาม
 เช่นดังตารางที่ 2.4 จะเห็นว่า พันธะ C-C มีพลังงานพันธะ 88 kJ/mol พันธะ C=C มีพลังงานพันธะ 162 kJ/mol และพันธะ C≡C มีพลังงานพันธะ 213 kJ/mol

นอกจากนี้ พลังงานพันธะก็ขึ้นอยู่กับ ความยาวพันธะ (bond length) คือ

ความยาวพันธะต่ำๆ <=> พลังงานพันธะจะมีค่าสูง

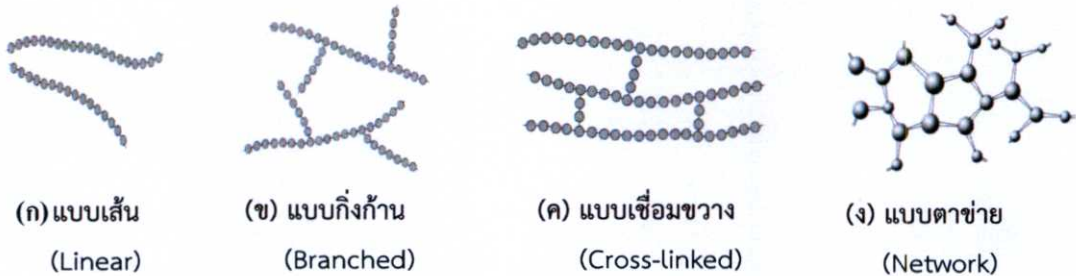
ตามตารางที่ 2.4 พันธะ C-C มีความยาวพันธะ 0.154 nm พันธะ C=C มีความยาวพันธะ 0.13 nm และพันธะ C≡C มีความยาวพันธะ 0.12 nm จะเห็นว่าความยาวพันธะของ C≡C มีค่าต่ำกว่าแต่จะมีพลังงานพันธะมากกว่า

ตารางที่ 2.4 พลังงานพันธะและความยาวพันธะของพันธะต่างๆ [17]

พันธะ	พลังงานพันธะ		ความยาวพันธะ (nm)
	kJ/mol	Kcal/mol	
C-C	88	370	0.154
C=C	162	680	0.13
C≡C	213	890	0.12
C-H	104	435	0.11
C-Cl	81	340	0.18
C-N	73	305	0.15
C-O	86	360	0.14
C=O	128	535	0.12
O-H	119	500	0.10
H-H	104	435	0.074

2.7 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสายไฟและสายเคเบิล [18,19,20,21,22,23,24]

ปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ได้รับนิยมนำมาใช้ทำเป็นฉนวนหรือเปลือกของสายไฟและสายเคเบิล ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) พอลิเอทิลีน(PE) ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน(XLPE) และยางเอทิลีนพรอพิลีน(EPR) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นมีหลายแบบ แสดงดังในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์แบบต่างๆ

ก. พอลิเมอร์แบบเส้น(linear) มีทรงกลมแต่ละลูกแทนหน่วยย่อยของเมอร์จะเชื่อมต่อกันแบบปลายชนปลายในสายโซ่เส้นเดียว อาจขยายขึ้นโดยพันธะแวนเดอร์วาลหรือพันธะไฮโดรเจนเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ จะมีความยืดหยุ่นและมีลักษณะคล้ายเส้นสปาเกตตี พอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ PVC, PE เป็นต้น

ข. พอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน(branched) มีลักษณะการต่อกันของสายโซ่บริเวณด้านข้างของสายโซ่เป็นหลัก โดยกิ่งก้านของสายโซ่ที่ด้านข้างจะเกิดขึ้นขณะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ กิ่งก้านของพอลิเมอร์จะทำให้ประสิทธิภาพการอัดตัวกันให้แน่นลดลง พอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) , พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง(MDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง(HDPE) เป็นต้น

ค. พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง(cross-linked) เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างเส้นสายโซ่พอลิเมอร์กับเส้นอื่นโดยตำแหน่งเชื่อมต่อจะแตกต่างกัน การเชื่อมต่อเกิดขึ้นจากพันธะโคเวเลนต์ กระบวนการเชื่อมขวางอาจเกิดจากขณะทำการสังเคราะห์หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ย้อนกลับที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง บ่อยครั้งที่ตัวเชื่อมขวางจะเกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่เติมเข้าไปแล้วทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสายโซ่ขึ้น พอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน(XLPE) และยางเอทิลีนพรอพิลีน(EPR) เป็นต้น

ง. พอลิเมอร์แบบตาข่าย(network) ซึ่งมีลักษณะเป็น 3 มิติ มีปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ขึ้น 3 พันธะ เชื่อมโยงเป็นตาข่าย บางครั้งพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางที่มีการเชื่อมต่อกันปริมาณมากก็จัดอยู่ในกลุ่มตาข่ายได้เช่นกันทำให้มีสมบัติทางกลและทางความร้อนเด่นชัด พอลิเมอร์ชนิดนี้ ได้แก่ อีพอกซี(epoxy) เป็นต้น

พอลิเมอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภทตามพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน คือ

1. ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

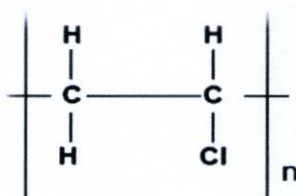
พอลิเมอร์ประเภทนี้ มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถทำให้หลอมเหลวและเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน เมื่อนำมาขึ้นรูปแล้วปล่อยให้เย็นลงก็จะมีลักษณะตามที่ขึ้นรูปไว้ และสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้โดยการหลอมเหลวอีกครั้ง แต่สำหรับวัสดุที่ใช้ในการผลิตสายไฟฟ้าจะใช้พอลิเมอร์หรือพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาครั้งแรกเท่านั้น พอลิเมอร์หรือพลาสติกชนิดนี้ที่นิยมใช้ทำฉนวนหรือเปลือกของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล ได้แก่ PVC และ PE เป็นต้น

2. ประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

พอลิเมอร์ประเภทนี้ เป็นพลาสติกที่สามารถหลอมเหลวได้ในขั้นตอนแรกเท่านั้น เมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจะเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแห หรือแบบสามมิติแล้วจะไม่สามารถอ่อนตัวหรือหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน แต่ถ้าได้รับความร้อนสูงมากๆ จะทำให้พันธะที่ยึดอะตอมไว้ภายในโมเลกุลแตกออก พอลิเมอร์จะเกิดการสลายตัว พอลิเมอร์ประเภทนี้จึงไม่สามารถที่จะนำมาทำการหลอมหรือขึ้นรูปใหม่ได้ พลาสติกเทอร์โมเซตติงที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลักของสายเคเบิลที่สำคัญคือ XLPE และ EPR เป็นต้น

พอลิไวนิลคลอไรด์(PVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์ เกิดจากมอนอเมอร์ชื่อ ไวนิลคลอไรด์ ($\text{CH}_2 = \text{CHCl}$) มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างทางเคมีของ PVC

PVC มีคุณสมบัติ คือ เหนียว มีทั้งอ่อนและแข็ง ขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ ได้ง่าย ราคาถูก ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด ด่าง แต่ไม่ค่อยทนทานต่อความชื้น ติดไฟยาก แต่ให้ปริมาณควันมากเป็นก๊าซพิษ เมื่อละลายน้ำมีสภาพความเป็นกรดสูง มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1.4 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวประมาณ $204\text{-}212^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานปกติ $60\text{-}75^\circ\text{C}$ ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 105°C ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ สามารถดูในตารางที่ 2.5

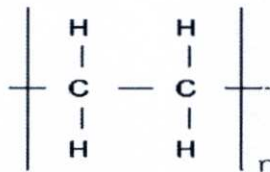
ถ้า PVC มีปริมาณของคลอรีน(Cl) มากจะทำให้ติดไฟยากและป้องกันสารเคมีได้ดี นอกจากนี้ PVC ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถผสมได้กับสารอื่นๆ ทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพของ PVC ให้ดียิ่งขึ้นได้ สารดังกล่าวอาจเป็น

- พลาสติกไซเซอร์(plasticizers) ทำให้ PVC อ่อนตัวหรือเหนียวขึ้น
- สารที่ทำให้มีเสถียรความร้อน(heat stabilizers) ช่วยให้ PVC ไม่สลายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างการผลิต
- สารหล่อลื่น(lubricants) เช่น ซีผึ้ง, Fatty ester, Metallic soaps ฯลฯ ช่วยทำให้ PVC ที่หลอมเหลว ไม่เกาะติดกับเครื่องจักรที่ใช้ผลิต
- สารเติมแต่ง(fillers) ทำให้ PVC มีปริมาณมากขึ้น เป็นการลดราคาให้ต่ำลง เช่น ใช้ผงหินปูนผสม
- สีส้ม(pigments) เป็นสีอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ผสมกับ PVC เพื่อให้มีสีสันสวยงาม (แต่ PVC อาจขุ่นขึ้น) และทนต่อสภาวะอากาศได้ดีขึ้น

PVC นิยมใช้ทำเป็นฉนวนและเปลือกของสายไฟแรงดันต่ำ หรือใช้ทำเป็นเปลือกนอกของสายไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูงปานกลางระดับแรงดันไฟฟ้า 1.8/3(3.6) kV ถึง 18/30(36) kV หรือใช้ทำเป็นเปลือกนอกของสายไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูง เช่น สาย 69 kV และ 115 kV เป็นต้น PVC ไม่นิยมใช้ทำเป็นฉนวนหรือเปลือกของสายไฟที่ใช้ในระบบสายเคเบิลอากาศแรงสูง เนื่องจากไม่ค่อยทนทานต่อสภาพอากาศ แสงแดด และความชื้น ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกหรือเปราะได้ง่าย

พอลิเอทิลีน(PE)

พอลิเอทิลีน เกิดจากมอนอเมอร์ชื่อ เอทิลีน ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$) มีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างทางเคมีของ PE

PE มีคุณสมบัติ คือ เหนียว แข็ง ขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ ได้ง่าย ราคาไม่แพง ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด ด่าง และความชื้น ได้ดีมาก แต่ติดไฟได้ง่ายกว่า PVC เมื่อติดไฟแล้วดับยาก มีค่าความหนาแน่นประมาณ $0.91\text{-}0.97 \text{ g/cm}^3$ มีจุดหลอมเหลวประมาณ $105\text{-}180^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานปกติ $70\text{-}80^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดประมาณ $80\text{-}110^\circ\text{C}$ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ สามารถดูในตารางที่ 2.5

พลาสติกชนิดนี้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene : MDPE)
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)

ทั้ง 3 ประเภท มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.33

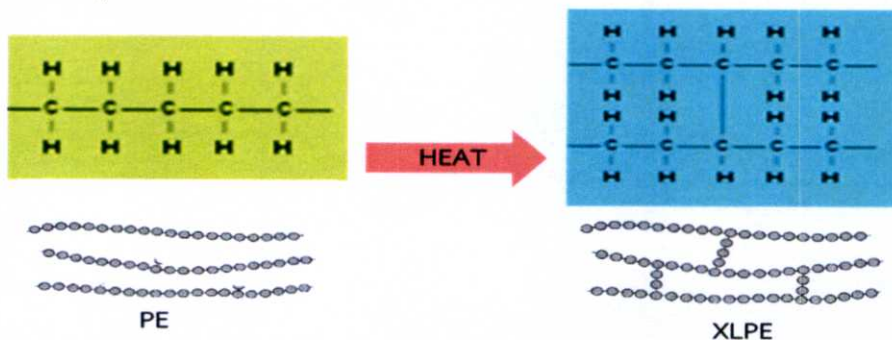


รูปที่ 2.33 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด

PE เป็นพลาสติกที่มีความนิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นเป็นพิเศษในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ทั้งยังมีราคาถูกเพราะพลาสติกชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ LDPE นั้นนิยมใช้ทำเป็นเปลือกของสายโทรศัพท์ ส่วน MDPE นิยมใช้ทำเป็นเปลือกของสายไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูงปานกลางระดับแรงดันไฟฟ้า 1.8/3(3.6) kV ถึง 18/30(36) kV และสายไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูง เช่น 69 kV 115 kV และ 230 kV ส่วน HDPE นิยมใช้ทำเป็นฉนวนของสายโทรศัพท์และยังใช้ทำเป็นเปลือกของสายเคเบิลอากาศและสายไฟเบอร์ออปติก เนื่องจาก PE แต่ละชนิดนั้นมีความสมบัติทนทานต่อสภาพอากาศ แสงแดด และความชื้นได้ดี

ครอสลิงค์พอลิเอทิลีน(XLPE)

ครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวนเคเบิลแรงสูง จะเกิดจากสารประกอบพอลิเอทิลีน $(CH_2 = CH_2)_n$ ประเภท LDPE นำมาเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลจากเส้นตรง(linear)หรือกิ่งก้าน(branch) ให้เกาะเกี่ยวเป็นแบบเชื่อมขวาง(cross-linked) หรือแบบร่างแหหรือข่าย(network) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.34

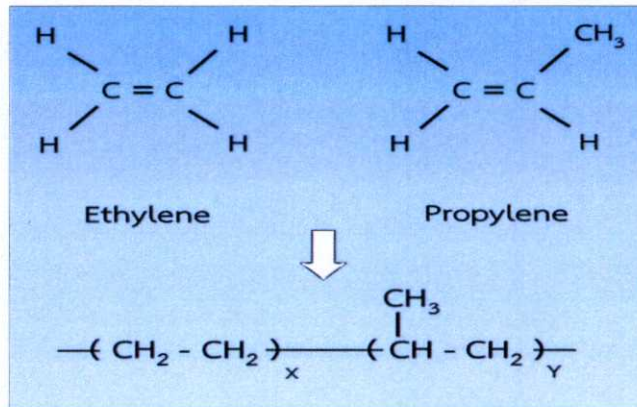


รูปที่ 2.34 โครงสร้างโมเลกุลของ PE ถูกเปลี่ยนให้เป็น XLPE

XLPE มีคุณสมบัติ คือ แข็ง เหนียว ขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ ได้ง่าย แต่ไม่สามารถที่จะนำมาทำการหลอมหรือขึ้นรูปใหม่ได้ ราคาแพงกว่า PE และ PVC ตามลำดับ ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด ต่าง และความชื้น ได้ดี ติดไฟได้ง่ายกว่า PVC เมื่อติดไฟแล้วดับยาก เช่นเดียวกับ PE มีค่าความหนาแน่นประมาณ $0.92-0.93 \text{ g/cm}^3$ มีจุดหลอมเหลว $> 200^\circ\text{C}$ อุณหภูมิใช้งานปกติ 90°C อุณหภูมิใช้งานสูงสุด $130-140^\circ\text{C}$ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ สามารถดูในตารางที่ 2.5

ยางเอทิลีนพรอพิลีน(EPR)

EPR เป็นประเภทครอสลิงค์เกิดจากรวมของเอทิลีนและไอโซพรอพิลีน ที่ถูกเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลให้เป็นแบบเชื่อมขวาง มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 โครงสร้างทางเคมีของ EPR

EPR มีคุณสมบัติ คือ อ่อน กว่า PE และ XLPE ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ไม่ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรด ต่าง ติดไฟได้ง่าย มีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.87 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลวประมาณ 200°C อุณหภูมิใช้งานปกติ 90°C อุณหภูมิใช้งานสูงสุดประมาณ 110°C ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ สามารถดูในตารางที่ 2.5

EPR นิยมใช้ทำท่ออย่าง รองเท้าบูต สายพานตัววี ยางรถยนต์ และเป็นฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้า เช่น ฉนวนสายไฟแรงดันต่ำ และสายไฟฟ้าใต้ดินแรงดันสูงปานกลาง ไม่นิยมนำมาใช้ทำเป็นเปลือกของสายไฟ

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนสายไฟและสายเคเบิลชนิดต่างๆ

คุณสมบัติ	PVC	PE			XLPE		EPR
		LDPE	MDPE	HDPE	Unfilled carbon	Filled carbon	
Density (g/cm ³)	1.4	0.91-0.93	0.93-0.95	0.95-0.97	0.92	0.93	0.87
Melting point (°C)	204-212	105-115	120-180	120-180	> 200		200
Thermal resistivity (°C-cm/W)	500	350			350		500
Operating temperature (°C)	60-75	70	70-80	70-80	90		90
Min. operating temperature (°C)	-20	-60			-40		-60
Max. operating temperature (°C)	105	80	110	110	130-140		110
Short-circuit temperature (°C)	140-160	140	160	160	250		250
Tensile strength (N/mm ²)	13-20	7-30	20-30	14-34	19-23	20-27	12
Elongation (%)	150-300	300-800	400-900	600-700	500-600		400
Hardness (Shore D)	35-43	43	53-54	57-61	59		50
Volume resistivity : ρ (Ω-cm)	10 ¹⁴	> 10 ¹⁷			> 10 ¹⁷		> 10 ¹⁶
Relative permittivity : ε _r	6 – 8	2.5-2.8	2.5	2.3-2.5	2.3	2.5-4.5	2.3-3.5
Dielectric strength (kV/mm)	20-35	20-50			22-50		30-40
Dissipation factor : Tan δ (%)	4-12	0.02	0.03	0.03	0.02-0.03		0.15-0.4
Oxygen Index @ 25°C (%)	47	18			18		18
Halogen content (%wt)	22-29	<0.02			<0.02		<0.02
Water Absorption 24 hr@ 25°C %wt)	0.2-1	0.005-0.01			0.005-0.01		0.005-0.01

ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนพอลิเมอร์ [19]

วัสดุพอลิเมอร์เสื่อมสภาพ(deterioration or degradation) ได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากส่วนใหญ่ถูกใช้งานที่ภายนอกอาคาร ผลของการเสื่อมสภาพนี้เราเรียกว่า การเสื่อมสภาพในบรรยากาศ(weathering deterioration) ซึ่งอาจจะเป็นผลรวมของกระบวนการเสื่อมสภาพหลายกระบวนการ การเสื่อมสภาพในสภาวะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากออกซิเดชันซึ่งถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต(UV)จากแสงแดด พอลิเมอร์อาจดูดซับน้ำได้ทำให้ความแข็งและความต้านทานการบิดงอลดลง ยกตัวอย่างเช่น PVC จะเกิดการเสื่อมสภาพในบรรยากาศได้ค่อนข้างง่าย

พอลิเมอร์อาจเสื่อมสภาพโดยกระบวนการที่เรียกว่า ชีสชัน(scission) ซึ่งคือการแตกสลายของพันธะในสายโมเลกุล เป็นเหตุให้เกิดการแยกสลายที่ตำแหน่งจุดชีสชันและทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง

ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับระดับของความเป็นผลึก(crystallinity) ผนวพอลิเมอร์นั้นจะมีระดับของความเป็นผลึกแตกต่างจากโลหะ ซึ่งโดยทั่วไปโลหะจะมีระดับของความเป็นผลึก 100% พอลิเมอร์จะมีค่าประมาณ 95% พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหหรือตาข่ายนั้นจะมีระดับของความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นตรงและแบบกิ่งก้าน

การแตกสลายของพันธะอาจมีผลจาก การแผ่รังสี ผลของความร้อน และผลของปฏิกิริยาเคมี

➤ ผลจากการแผ่รังสี

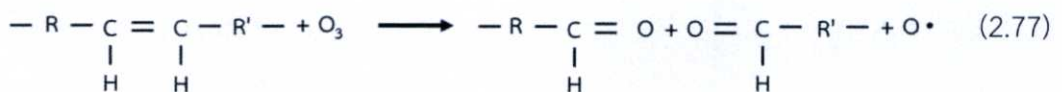
รังสีต่างๆ เช่น ลำแสงอิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีบีตา และรังสี UV มีพลังงานเพียงพอที่จะทะลุทะลวงพอลิเมอร์และทำปฏิกิริยากับอะตอมหรืออิเล็กตรอน ปฏิกิริยาดังกล่าวคือ การเกิดไอออนหรือไอออนไนเซชัน ซึ่งรังสีจะชนกับอิเล็กตรอนบางตัวทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนบวก ผลคือพันธะโควาเลนต์จะสลายและมีการจัดเรียงอะตอมหรือกลุ่มอะตอมใหม่ตรงตำแหน่งนั้น ผลของรังสีทั้งหมดไม่จำเป็นต้องไปทางลบ การเชื่อมโยง(cross-linked) อาจเกิดขึ้นด้วยการแผ่รังสีก็ได้

➤ ผลจากความร้อน

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนเป็นผลมาจากพอลิเมอร์บางชนิดเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วเกิดก๊าซขึ้น ปฏิกิริยานี้ตรวจพบจากน้ำหนักของวัสดุที่หายไป เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์เป็นดัชนีวัดความต้านทานต่อการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อนมีความสัมพันธ์กับขนาดพลังงานพันธะระหว่างอะตอมในพอลิเมอร์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ 2.6 พอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุดอาจนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง

➤ ผลของปฏิกิริยาเคมี

ออกซิเจน โอโซน และสารอื่นๆ สามารถเร่งซิสชันของสายโมเลกุลด้วยการเกิดปฏิกิริยาเคมี ผลนี้เกิดขึ้นโดยเฉพาะกับยางที่ผ่านการอบด้วยกำมะถัน ซึ่งอะตอมคาร์บอนเกิดพันธะคู่ตามสายหลักของโมเลกุลและสัมผัสกับโอโซน(O₃) อันเป็นบรรยากาศพิษ ปฏิกิริยาซิสชันหนึ่งอาจแสดงได้ดังสมการที่ (2.77)



สายโมเลกุลจะสลายที่ตำแหน่งของพันธะคู่ R และ R' เป็นกลุ่มอะตอมที่สร้างพันธะกับตัวสายแต่ไม่ได้รับผลจากปฏิกิริยา ปกติถ้ายางอยู่ในสภาวะไม่ได้รับความเค้นจะเกิดฟิล์มที่ผิวป้องกันเนื้อยางจากปฏิกิริยาอื่นๆ แต่ถ้ายางรับแรงดึง รอยแตกและรอยแยกจะเกิดขึ้นและเคลื่อนที่ไปในทิศตั้งฉากกับแรง บางครั้งยางอาจแยกออกจากกันรอยแตกเหล่านี้เกิดจากซิสชันที่กระตุ้นด้วยโอโซนจำนวนมาก

➤ นอกจากนี้ผนวพอลิเมอร์ อาจเสื่อมสภาพจากผลของทางไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวไปในข้อ 2.6

2.8 ค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในฉนวนไดอิเล็กตริก [12]

จากรูปที่ 2.23 เราสามารถคำนวณหาความจุไฟฟ้า C ที่มีหน่วยเป็นฟารัดต่อความยาว 1 เมตร (F/m) ได้ดังสมการที่ (2.78) และสมการที่(2.79)

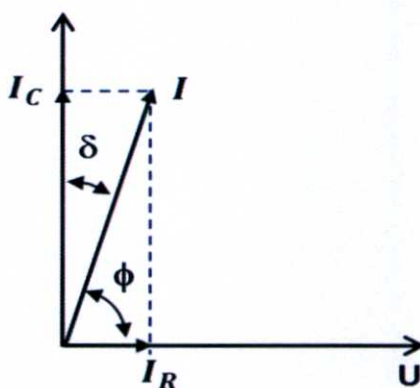
$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln\frac{r_2}{r_1}} ; \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln\frac{r_3}{r_2}} \quad (2.78)$$

$$\text{และ } C_{\text{รวม}} = C_1 + C_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.79)$$

สามารถคำนวณหากระแสอัดประจุ(charging current : I_C) ได้ดังสมการที่ (2.80) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้า U ค่าความจุไฟฟ้า C ของฉนวน และความถี่ f

$$I_C = j\omega CU = j(2\pi f)CU \quad (2.80)$$

โดยทั่วไป ไดอิเล็กตริกหรือฉนวน จะมีคุณสมบัติไม่เป็นตัวเก็บประจุบริสุทธิ์ นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านฉนวนไดอิเล็กตริกนั้นไม่เป็นกระแสอัดประจุบริสุทธิ์ คือ นำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศาเท่ากับมุม δ ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน

ดังนั้น จากรูปที่ 2.36 สามารถที่จะคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของฉนวน (resistive current : I_R) ได้ดังสมการที่ (2.81) ซึ่งกระแส I_R คือ กระแสรั่วไหล(leakage current) ในเนื้อฉนวน หรืออาจเรียกว่า กระแสกำลังสูญเสียเปล่า ปกติจะมีค่าต่ำมากๆ

$$I_R = I_C \tan \delta = 2\pi f C U \tan \delta \quad (2.81)$$

หากฉนวนไดอิเล็กตริกนั้นไม่มีความสมบูรณ์จะทำให้ i_R มีค่าสูง ทำให้เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนมีค่าสูงขึ้นตาม กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน (P_d) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.82) เนื่องจาก $\delta = 90^\circ - \phi$ เป็นมุมเล็กๆ ดังนั้น $\sin \delta = \tan \delta$ จึงนิยมเรียก $\tan \delta$ ว่า แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก หรือแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก และเรียกมุม δ ว่า มุมแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก หรือมุมแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$$P_d = UI \cos \phi = UI \sin \delta = UI \tan \delta \quad (2.82)$$

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวน ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้า U และอุณหภูมิความร้อนภายในเนื้อฉนวน ฉนวนส่วนมากจะนำความร้อนได้ไม่ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นระบายออกไปได้ยาก กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนก็จะยิ่งมากขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน ถือว่ายังคงอยู่ในสภาพที่สมดุล ฉนวนจะยังคงไม่เกิดความเสียหาย แต่ถ้าระบายความร้อนออกไม่ทัน อุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่ง ก็จะทำให้ฉนวนนั้นเกิดเบรคดาว์นได้ นอกจากนี้กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ความชื้น และคุณสมบัติของฉนวนไดอิเล็กตริก เช่น สิ่งเจือปน ความต้านทาน ความนำไฟฟ้า และกระแสรั่วไหลของฉนวน เป็นต้น

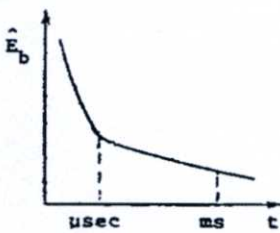
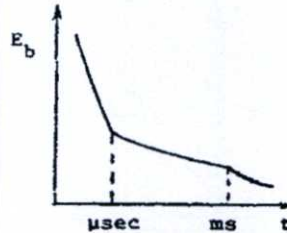
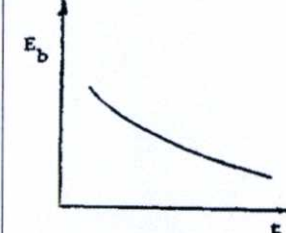
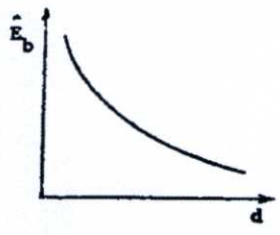
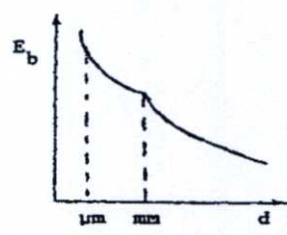
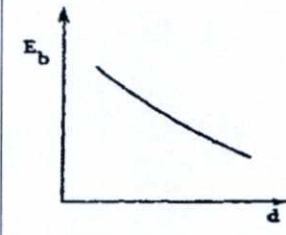
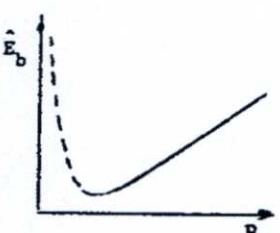
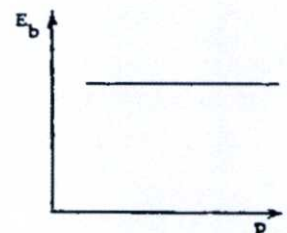
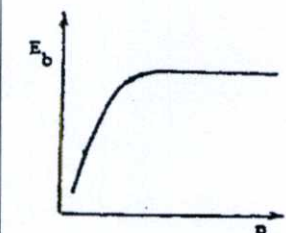

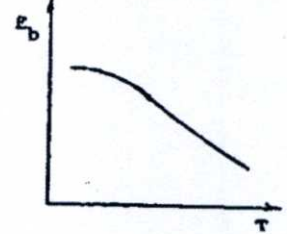
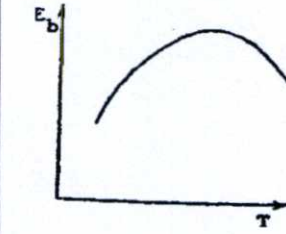
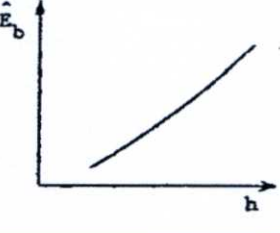
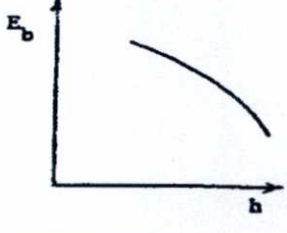
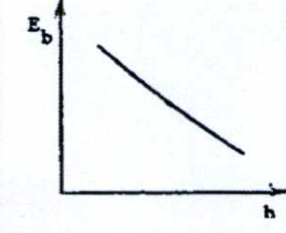
คุณสมบัติของฉนวนไดอิเล็กตริกที่ต้องการ คือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength : U_b)
2. เพอร์มิตติวิตี (permittivity : ϵ)
3. แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกหรือแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ($\tan \delta$)
4. ความคงทนต่อแรงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อน
6. ความคงทนต่อการเกิดร่องรอยทางผิว

2.9 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน [12]

ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า และแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

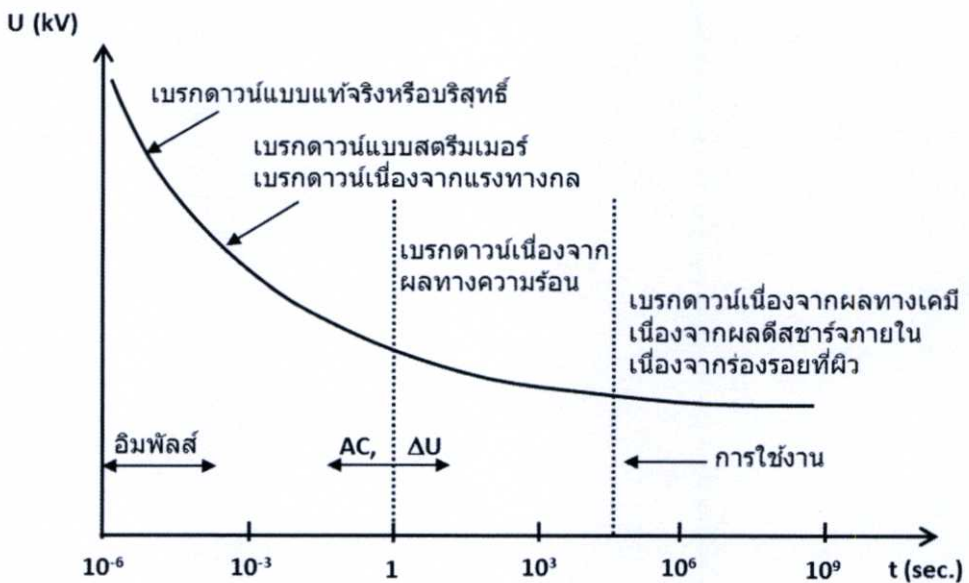
ตารางที่ 2.6 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน

ปัจจัย	ฉนวนก๊าซ	ฉนวนแข็ง	ฉนวนเหลว
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า	ค่ายอด(peak)	ค่า rms.	ค่ายอด หรือค่า rms.
เวลา t ที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า			
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (d)			
ความดัน (p)			
อุณหภูมิ (T)			
ความชื้น (h)			

2.10 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง [12,15,18,20]

การเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง จะแตกต่างจากการเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลว เนื่องจากเมื่อเกิดการเบรกดาวน์แล้วจะเสียสภาพอย่างถาวร ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้เหมือนเดิม กลไกการเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง ขึ้นอยู่กับลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน และขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน ซึ่งมีขบวนการที่ซับซ้อน ดังในรูปที่ 2.37 โดยสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

1. เบรกดาวน์แบบแท้จริงหรือบริสุทธิ์ (intrinsic breakdown)
2. เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (streamer breakdown)
3. เบรกดาวน์เนื่องจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (electromechanical breakdown)
4. เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางความร้อน (thermal breakdown)
5. เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี (chemical breakdown)
6. เบรกดาวน์เนื่องจากผลดีสชาร์จภายใน (internal discharge breakdown)
7. เบรกดาวน์เนื่องจากร่องรอยที่ผิวและการรั่วของฉนวน (tracking breakdown)



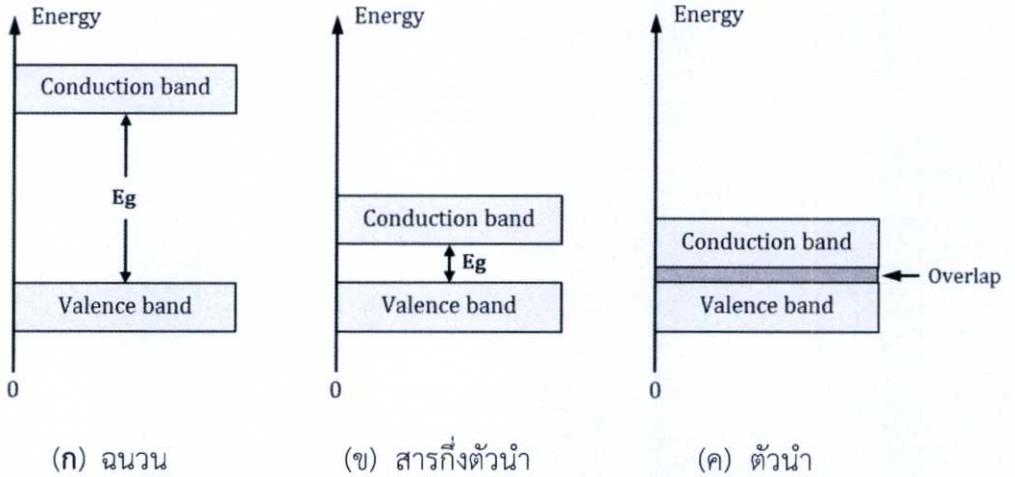
รูปที่ 2.37 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งกับช่วงระยะเวลาที่ป้อนแรงดัน

2.10.1 เบรกดาวน์แบบแท้จริงหรือบริสุทธิ์

หมายถึง การเกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันที่มีช่วงเวลาสั้น ประมาณ 0.01 ไมโครวินาที หรือต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมากกว่า 10 MV/cm จึงจะทำให้ฉนวนแข็งแบบบริสุทธิ์เกิดการเบรกดาวน์แบบแท้จริงหรือบริสุทธิ์ ความเครียดสนามไฟฟ้าของเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากในไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนมากพอที่จะข้าม

ช่องแถบพลังงานต้องห้าม(forbidden energy band) หรือเรียกอีกอย่างว่า energy gap : E_g จากแถบวาเลนซ์(valence band)ไปสู่แถบความนำไฟฟ้า(conduction band) จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มทวีคูณมากขึ้นในแถบความนำไฟฟ้าและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด

โครงสร้างของแถบพลังงาน(energy band)ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ แสดงดังในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 โครงสร้างของแถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

ถ้าต้องการทำให้ฉนวนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ จะต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าแถบพลังงานต้องห้าม(E_g) ซึ่งปกติมักจะมีค่าประมาณ 6-7 eV สำหรับแถบพลังงานต้องห้าม(E_g) ของสารกึ่งตัวนำ จะแคบกว่าของฉนวน จะมีค่า < 2 eV สำหรับตัวนำจะไม่มีแถบพลังงานต้องห้าม(E_g) จึงมีค่าความนำไฟฟ้าสูงมากกว่าฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

เราจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าหรือสภาพนำไฟฟ้า(σ) บ่งบอกลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ โดยค่า σ จะมีค่าเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าหรือสภาพความต้านทานไฟฟ้า(ρ) ดังสมการที่ (2.83)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.83)$$

ซึ่งค่า σ จะมีหน่วยเป็น $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ หรือ $(\Omega\text{-m})^{-1}$

ส่วนค่า ρ จะมีหน่วยเป็น $\Omega\text{-cm}$ หรือ $\Omega\text{-m}$ และสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.84)

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2.84)$$

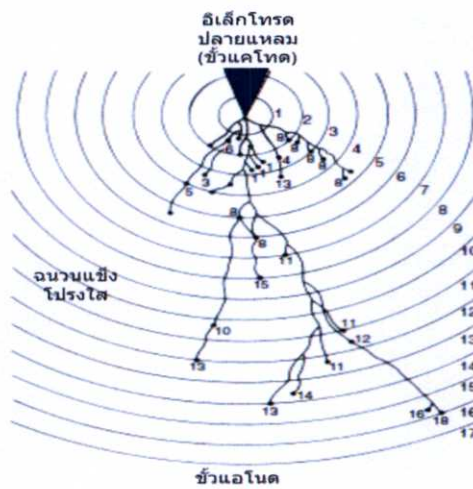
เมื่อ R คือ ความต้านทานของฉนวน มีหน่วยเป็น Ω

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น m^2

l คือ ความยาว มีหน่วยเป็น m

2.10.2 เบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์

การเกิดเบรกดาวนแบบนี้ จะเหมือนกับการเกิดเบรกดาวนในก๊าซตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากนำอิเล็กโทรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่ขั้วแคโทดจะเคลื่อนที่ไปหายังขั้วแอโนด และได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่เคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าเกินค่าพลังงานไอออไนซ์เซชันของโครงสร้างผลึกจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมโครงสร้างผลึกที่ถูกชน จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มทวีขึ้นเป็นอวาลานซ์ และเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในอวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต ในทางปฏิบัติการเบรกดาวนมักจะไม่ได้เกิดการดิสชาร์จครั้งเดียว หรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการดิสชาร์จหลายครั้ง จนกระทั่งรอยการดิสชาร์จเชื่อมโยงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจนเกิดการเบรกดาวนขึ้น ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 ลักษณะดิสชาร์จเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ในเนื้อฉนวนแข็ง

2.10.3 เบรกดาวนเนื่องจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า

ฉนวนแข็งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าระดับสูงๆ จากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของฉนวนด้านสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างผิวของฉนวนทำให้เนื้อฉนวนได้รับแรงอัดบีบตัวได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินกว่าค่าความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะทำให้ฉนวนนั้นเกิดการแตกร้าหรือแตกสลายได้

2.10.4 เบรกดาวนเนื่องจากผลทางความร้อน

เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนแต่จะมีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้หากความร้อนที่

เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่ตัวกลางรอบๆได้ทัน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินกว่าขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนสูงเกินกว่าที่ระบายออกไป ก็จะทำให้เสียความสมดุล จนอุณหภูมิสูงเกินกว่าขีดจำกัดของฉนวน จนทำให้ฉนวนนั้นเกิดเบรคดาวนได้

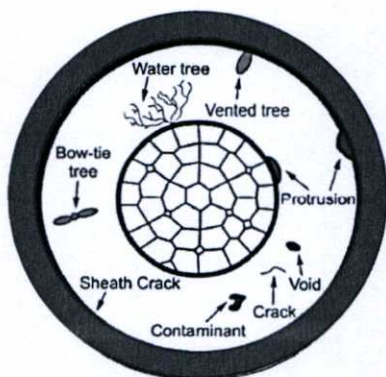
2.10.5 เบรคดาวนเนื่องจากผลทางเคมีและเคมีไฟฟ้า

ฉนวนอาจเสื่อมสภาพทางเคมีได้ แม้ไม่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า ฉนวนจะเสื่อมสภาพอย่างช้าๆ ในสภาวะใช้งานปกติ แต่จะขึ้นอยู่อย่างมากกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเป็นผลมาจากการแตกสลายของโครงสร้างในเนื้อสาร ฉนวนบางชนิดเสื่อมสภาพลงเนื่องจากในเนื้อสารนั้นมีอากาศ ออกซิเจน หรือโอโซน เช่น ยาง โพลีเทน จะเกิดออกซิเดชันทำให้ผิวแตกคราก(cracking) เมื่อยืดและได้รับแสงแดด ฉนวนบางชนิดเสื่อมสภาพลงถ้าได้รับทั้งความชื้นและความร้อนจะเกิดไฮโดรลิซิสขึ้น ทำให้เสียสภาพทางกลและทางไฟฟ้า อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากผลทางเคมีไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแสรั่ว ซึ่งขึ้นอยู่กับการแตกตัวต่างๆ ดังนี้

1. ความหนาแน่นของไอออนในเนื้อฉนวนอันเกิดจากสิ่งเจือปนในเนื้อฉนวน
2. อุณหภูมิที่ทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มเร็วขึ้น เป็นผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น
3. สารที่เป็นโพลาร์ คือ โมเลกุลที่มีขั้ว จะมีกระแสรั่วมากกว่าสารที่ไม่เป็นโพลาร์

2.10.6 เบรคดาวนเนื่องจากผลดิสชาร์จภายใน

ดิสชาร์จภายใน หรือเรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน(partial discharge)ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากภายในเนื้อฉนวนไม่บริสุทธิ์หรือมีสิ่งบกพร่อง(defect)ต่างๆ เช่น มีโพรงหรือโพรงอากาศ(void) มีความชื้นหรือน้ำเข้า มีสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งเจือปน(contaminant)ต่างๆ เช่น ผงฝุ่น เศษวัสดุ ใยผ้า ผงโลหะ อยู่ภายในฉนวนแข็ง ส่วนที่ยื่น(protrusion)ระหว่างรอยต่อในเนื้อฉนวน เช่นดังรูปที่ 2.40 เป็นผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงหรือสิ่งเจือปนสูงกว่าเนื้อฉนวน ทำให้เกิดการดิสชาร์จภายใน และเกิดการรากลทางไฟฟ้า(หรือที่เราเรียกว่า treeing)ภายในเนื้อฉนวน กระทั่งเกิดการเชื่อมโยงทางไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จนเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดเบรคดาวนของฉนวนในที่สุด



รูปที่ 2.40 สิ่งบกพร่องต่างๆ ภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิล

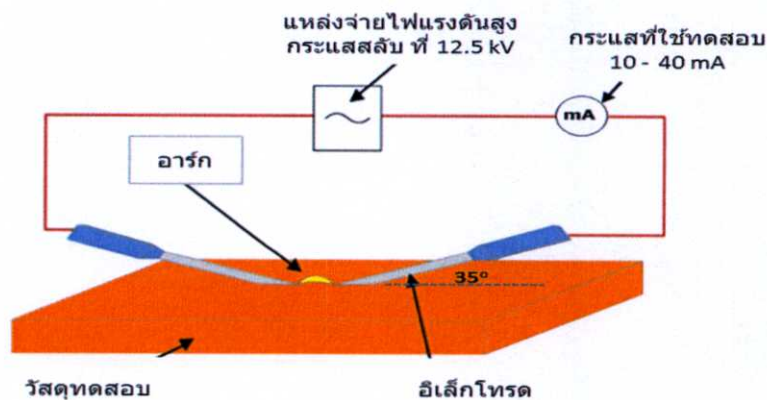
2.10.7 เบรกดาวน์เนื่องจากร่องรอย tracking ที่ผิวของฉนวน

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการฉนวนอาจเสียเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าหรือ tracking ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ 2.6

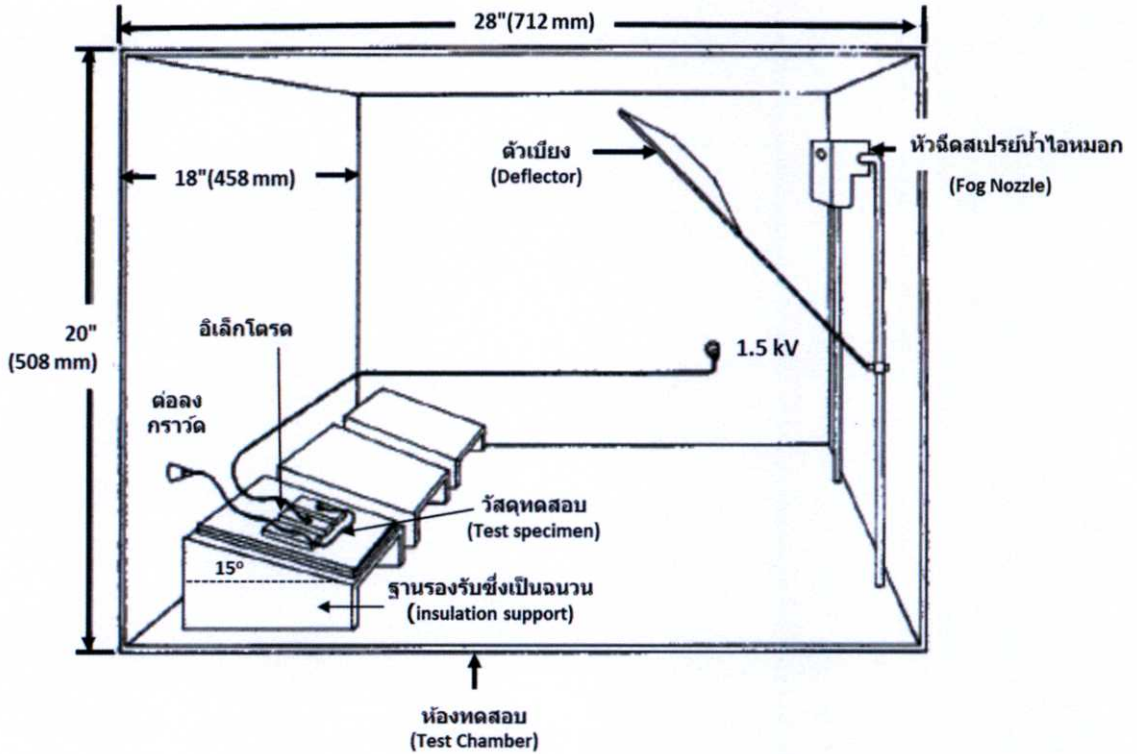
การเกิด tracking หมายถึง การเกิดเป็นทางของคาร์บอนบนผิวของฉนวน ซึ่งจะเป็นการพอร์มตัวทางเดินตัวนำถาวรบนผิวฉนวน สาเหตุมาจาก ความชื้น หรือน้ำค้าง ฝนกรด ไอเกลือ หรือสิ่งเปราะเปรี๊นต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง สารเคมี กลายเป็นฟิล์มตัวนำบนผิวฉนวน ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านได้ ซึ่งจะเรียกว่า กระแสรั่วไหล กระแสรั่วไหลนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ผิวของฉนวนก็จะแห้งลง ความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละจุดบนผิวของฉนวนมีค่าไม่เท่ากัน เกิดการแห้งบางส่วน และจะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว อาจก่อให้เกิดการสปาร์ก(spark)ได้ จนเป็นผลทำให้ผิวของฉนวนนั้นเสื่อมสภาพและเสียหายลง การเกิดเสียหายเนื่องจากร่องรอย tracking นี้ จะแตกต่างไปจากการเสียหายเพราะดิสชาร์จ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นในก๊าซรอบนอกฉนวน อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเซน แต่เบรกดาวน์จากร่องรอย tracking อาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมาก และไม่ขึ้นอยู่กับการเบรกดาวน์ของก๊าซรอบๆ

2.11 มาตรฐานการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย [25,26,27,28]

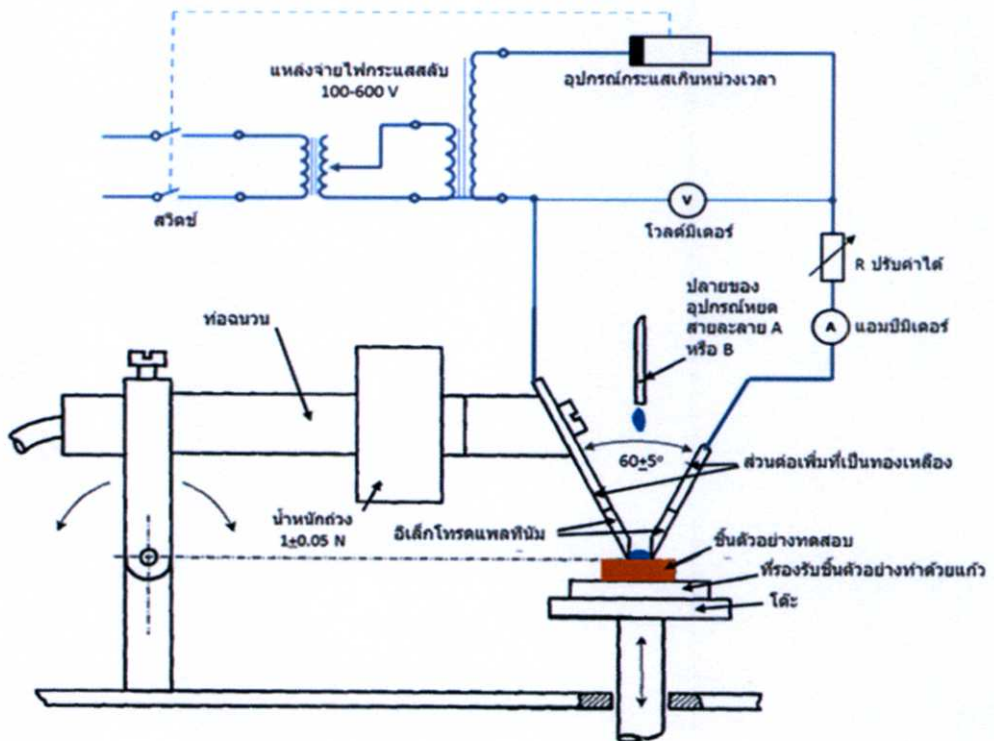
มาตรฐานสำหรับการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย(tracking resistance test) นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้ คือ วิธี Arc Resistance Test แสดงดังในรูปที่ 2.41 รายละเอียดดูในตามมาตรฐาน ASTM D-495 [25] วิธี Dust and Fog Test แสดงดังในรูปที่ 2.42 รายละเอียดดูในตามมาตรฐาน ASTM D2132 [26] วิธี Drop Test แสดงดังในรูปที่ 2.43 รายละเอียดดูในตามมาตรฐาน IEC 60112 [27] วิธี Inclined Plane Test แสดงดังในรูปที่ 2.44 รายละเอียดดูในตามมาตรฐาน IEC 60587 [28] และวิธี Dip-Track Test แสดงดังในรูปที่ 2.45 รายละเอียดวิธีการทดสอบนี้จะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป



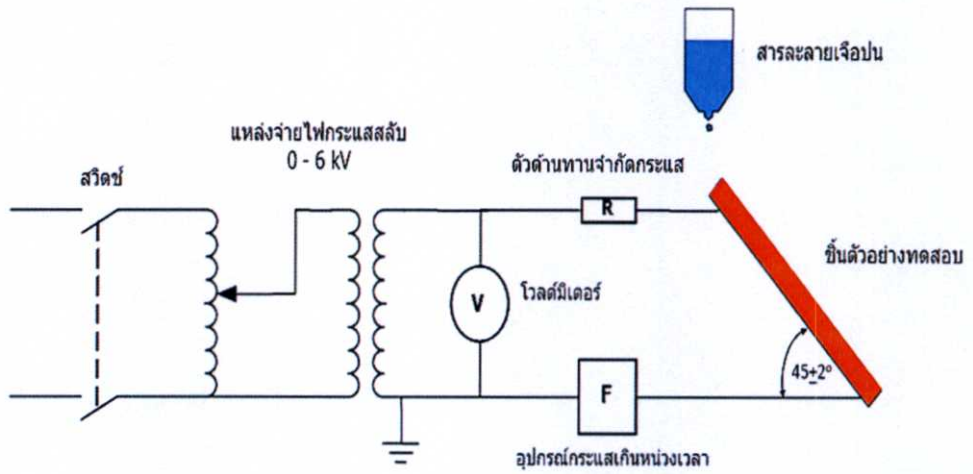
รูปที่ 2.41 วิธี Arc Resistance Test ตามมาตรฐาน ASTM D-495



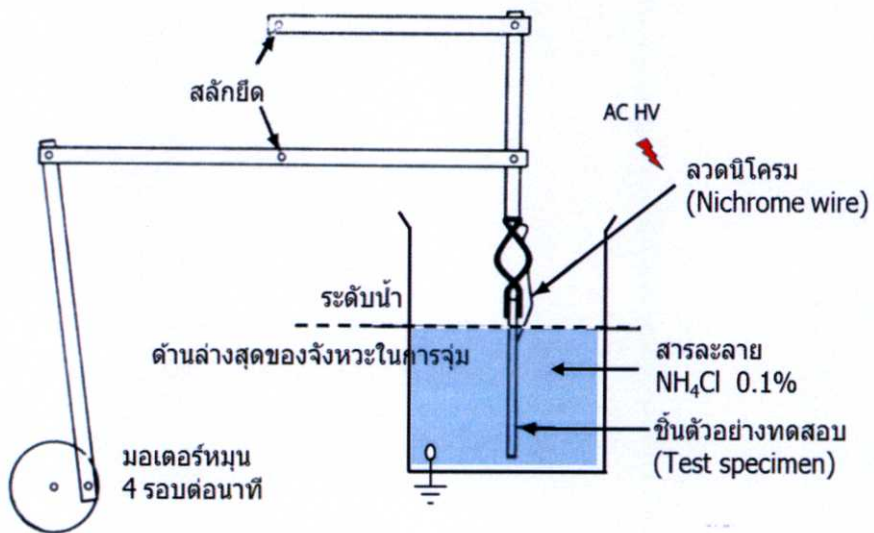
รูปที่ 2.42 วิธี Dust and Fog Test ตามมาตรฐาน ASTM D2132



รูปที่ 2.43 วิธี Drop Test ตามมาตรฐาน IEC 60112



รูปที่ 2.44 วิธี Inclined Plane Test ตามมาตรฐาน IEC 60587



รูปที่ 2.45 วิธี Dip-Track Test ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอ้างอิงวิธีการทดสอบตาม Dip-Track Test เนื่องจากมาตรฐาน มอก. 2341-2555[1] สำหรับสายเคเบิลอากาศกำหนดให้ใช้วิธีการทดสอบดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดของวิธีการทดสอบ Dip-Track Test จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3 เรื่องอุปกรณ์ทดสอบ การออกแบบและวิธีการทดสอบ

บทที่ 3

อุปกรณ์ทดสอบ การออกแบบ และวิธีการทดสอบ

3.1 อุปกรณ์ทดสอบและการออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องจัดเตรียมเพื่อนำมาใช้สำหรับทดสอบความต้านทานการเกิดรอย(track resistance) สอดคล้องตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) [2] หรือวิธี Dip-Track Test [3] มีดังต่อไปนี้

1. ชุดจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC high voltage supply)
2. ตัวต้านทานจำกัดกระแส (current limiting resistor)
3. ชิ้นตัวอย่างทดสอบ (test specimens)
4. ลวดนิโครม (nichrome wire)
5. ที่ยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบ (specimen holder) และปากจับขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง (HV electrode clip)
6. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ร้อยละ 0.1 และภาชนะที่ใส่สารละลาย
7. มอเตอร์และชุดควบคุมความเร็ว (motor and speed control)
8. มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltmeter) และโวลเตจดีไวเดอร์ (voltage divider)
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก (digital balance)
10. เครื่องวัดค่า pH และความนำไฟฟ้า (pH and conductivity meter)
11. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (temperature & relative humidity meter)
12. นาฬิกาจับเวลา (timer)

3.1.1 ชุดจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ

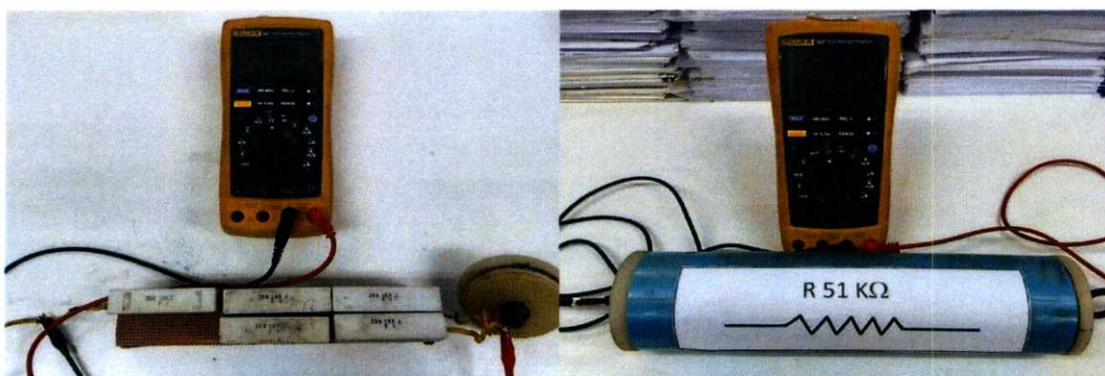
ชุดจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับที่นำใช้ทดสอบ มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 0-30 kV ความถี่ 50 Hz (ดังรูปที่ 3.1) โดยจะทำการปรับแรงดันไฟฟ้าทดสอบอยู่ในช่วง 1-3.5 kV คือที่ 1 kV, 1.5 kV, 2.0 kV, 2.5 kV, 3.0 kV และ 3.5 kV ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ชุดจ่ายแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับ มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 kV ความถี่ 50 Hz

3.1.2 ตัวต้านทานจำกัดกระแส

ตัวต้านทานจำกัดกระแสที่ใช้ มีค่าประมาณ 51 k Ω เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่านวงจรการทดสอบ โดยนำตัวต้านทาน R ชนิดกระเบื้อง ขนาด 10 k Ω จำนวน 5 ตัวมาต่ออนุกรม(series) ใช้โวลต์มิเตอร์ตรวจเช็ควัดค่าได้ 51 k Ω ดังรูปที่ 3.2



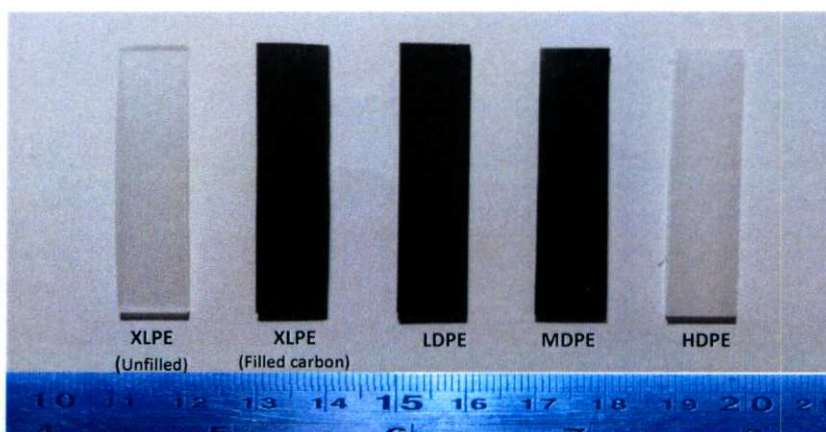
รูปที่ 3.2 ตัวต้านทานจำกัดกระแส 51 k Ω

3.1.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบ ตามที่มาตรฐานกำหนด จะต้องมีความหนาอย่างน้อย 1.52 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 51 มิลลิเมตร ความกว้างนั้นไม่ได้กำหนด (ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมทดสอบ มีความหนาประมาณ 1.52 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 51 มิลลิเมตร และความกว้าง ประมาณ 10 มิลลิเมตร)

ชิ้นตัวอย่างทดสอบที่จะนำมาทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ มี 5 ชนิด (ดังรูปที่ 3.3) ได้แก่

- 1) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black)
- 2) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black)
- 3) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(LDPE-filled carbon black)
- 4) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(MDPE-filled carbon black)
- 5) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(HDPE-unfilled carbon black)



รูปที่ 3.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบความต้านทานการเกิดรอย(track resistance) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) [2] หรือวิธี Dip-Track Test [3]

ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดที่ 1 และ 2 นั้นนำมาจากฉนวนและเปลือกของสาย SAC ส่วนชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดที่ 3, 4 และ 5 ได้จากการนำเม็ดวัตถุดิบมาขึ้นรูปด้วยการอัดเข้าแม่พิมพ์ (compression molding) ด้วยความร้อน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการอัดเข้าแม่พิมพ์(compression molding) ด้วยความร้อน

สำหรับชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจะนำมาทดสอบนั้นมีความหนาเท่ากันทั้งหมด คือ ประมาณ 1.52 มิลลิเมตร เตรียมด้วยเครื่องสไลด์ชิ้นตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องสไลด์ชิ้นตัวอย่างทดสอบ

นำชิ้นตัวอย่างทดสอบแต่ละชิ้น มาตรวจเช็คความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) ที่ได้รับการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 จาก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท. ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การวัดความหนาชิ้นตัวอย่างทดสอบ ด้วยไมโครมิเตอร์

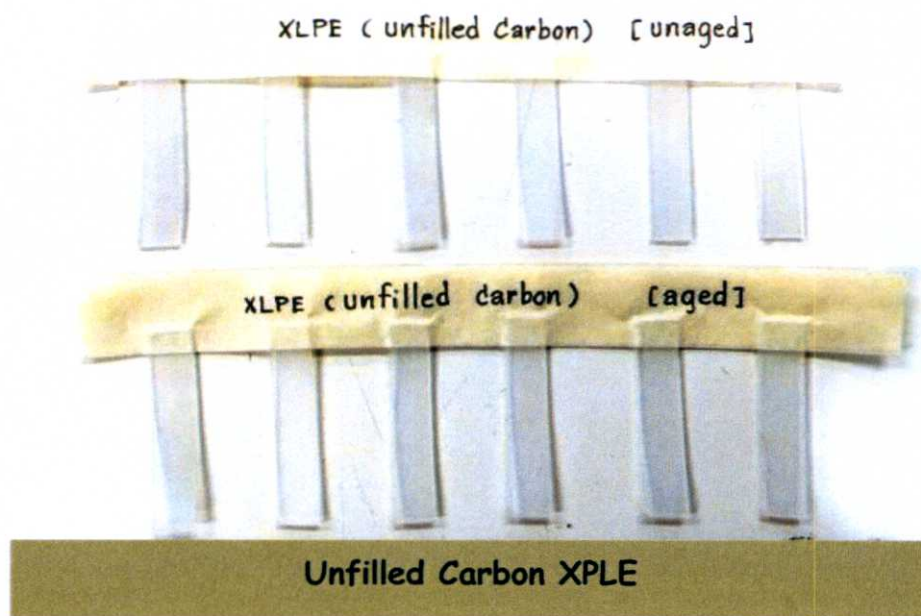
ชิ้นตัวอย่างทดสอบแต่ละชนิด จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม (ดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.12)

กลุ่มแรก เป็นชิ้นตัวอย่างใหม่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ(unaged)

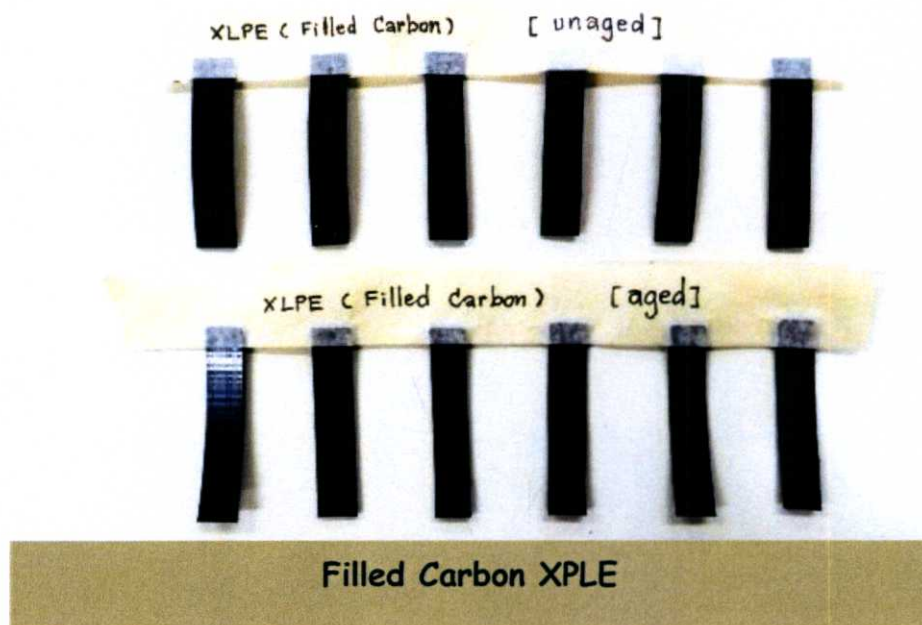
กลุ่มที่สอง เป็นชิ้นตัวอย่างที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน(thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 3.7)



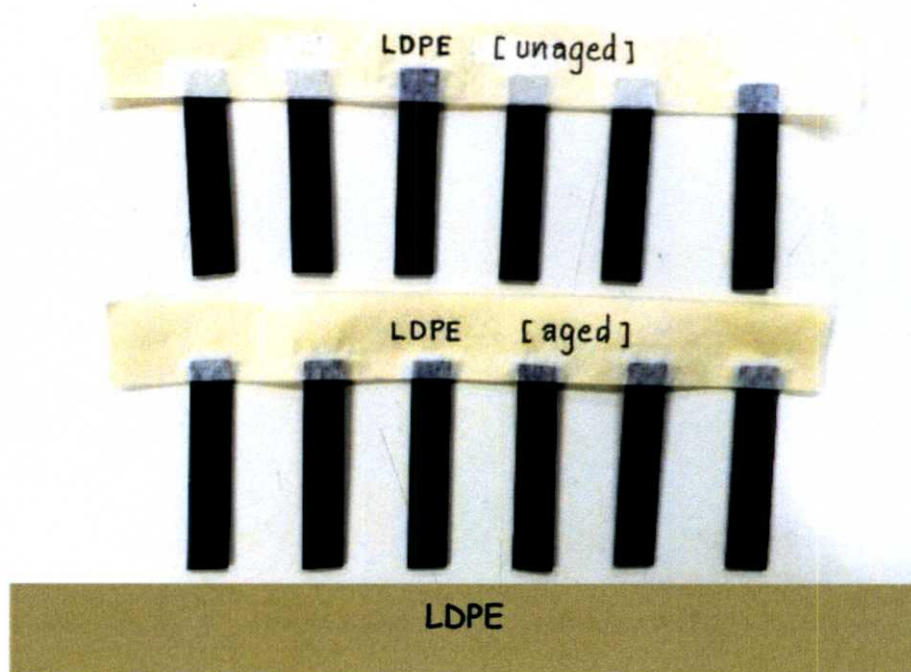
รูปที่ 3.7 ชิ้นตัวอย่างที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง



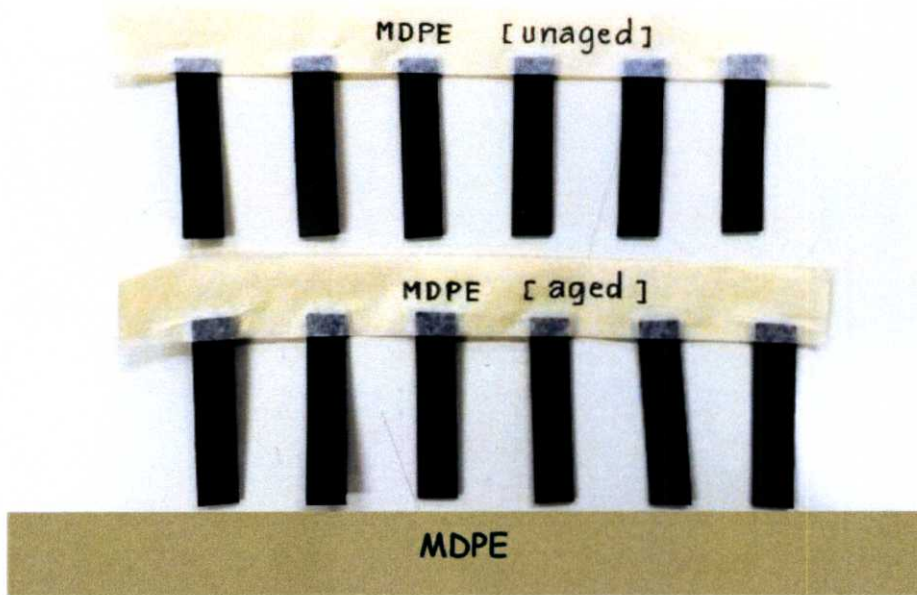
รูปที่ 3.8 ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน



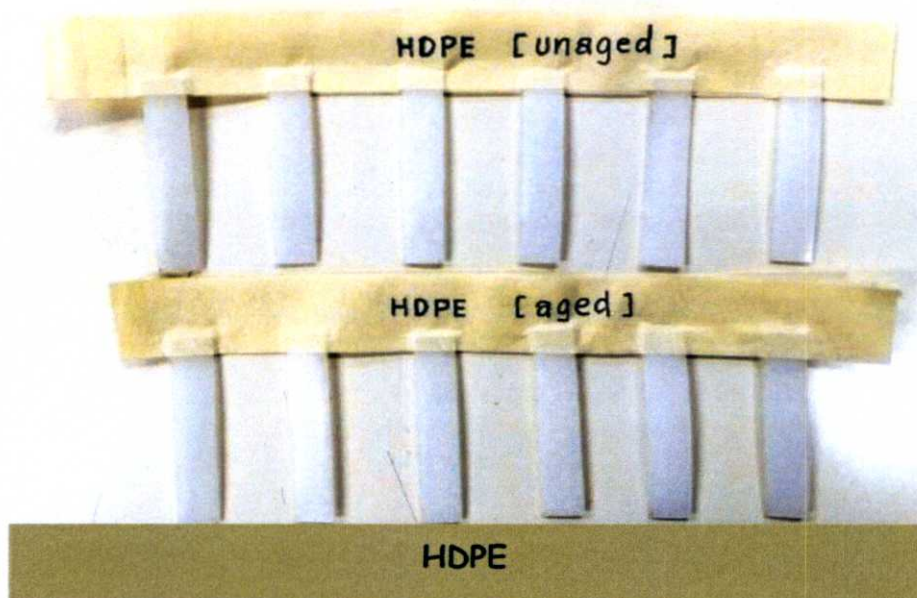
รูปที่ 3.9 ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 3.10 ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 3.11 ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 3.12 ชิ้นตัวอย่างทดสอบชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อน

ข้อมูลเพิ่มเติมของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่นำมาทดสอบในครั้งนี้ ดูในตารางที่ 3.1 ซึ่งได้มาจากแหล่งผู้ขาย(supplier)

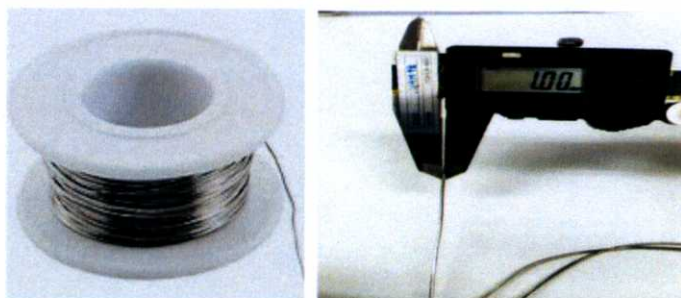
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของวัตถุดิบชนิดต่างๆ จากแหล่งผู้ขาย

ชนิดของวัสดุคุณภาพ	รหัส	Density (g/cm ³)	Dielectric constant	% Carbon Black Content	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
ชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก (XLPE-unfilled carbon black)	HFDB 4201	0.92	2.3	0%	19	500
ชนิดครอสลิงค์โพลีเอททีลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก (XLPE-filled carbon black)	HFDA-9210	0.93	2.48	2.0 %	26-27	525-600
พอลิเอททีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมคาร์บอนแบล็ก	LE8707	0.936	2.5	2.52%	30	800
พอลิเอททีลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) ผสมคาร์บอนแบล็ก	DHDA 6548	0.946	2.52	2.52%	30.6	919
พอลิเอททีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก (HDPE-unfilled carbon)	H511W	0.949	2.32	0%	34	600

3.1.4 ลวดนิโครม

ลวดนิโครม(Nichrome wire) ตามที่มาตรฐานกำหนดนั้น ต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร สำหรับเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดด้านไฟฟ้าแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.13

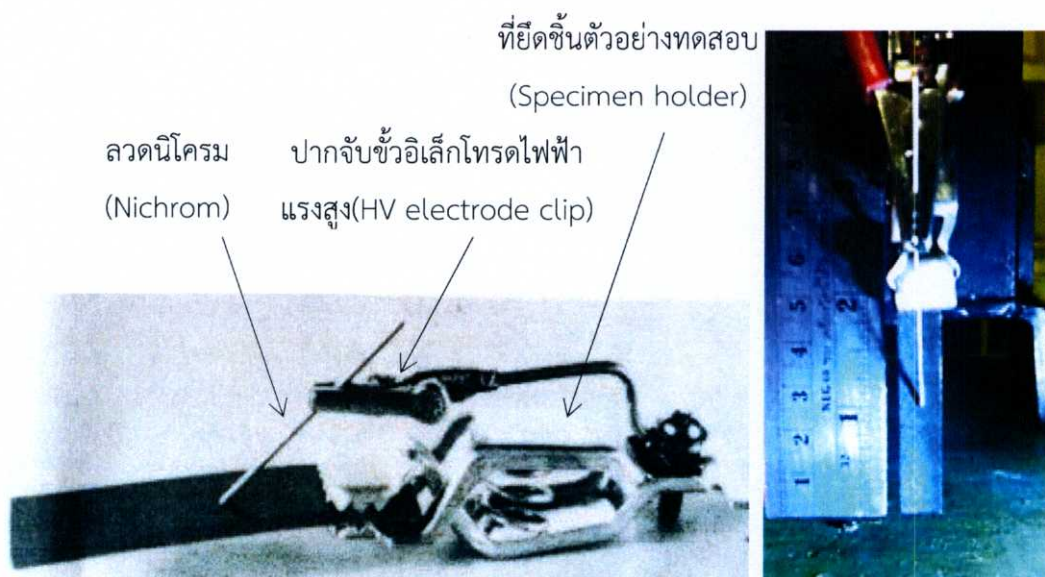
ลวดนิโครมเป็นโลหะผสมระหว่างนิกเกิล(Nickel) และโครเมียม(Chromium) ซึ่งมีราคาไม่แพง มีความต้านทานสูง ทนทานต่อความร้อนได้ดี สามารถใช้งานถึงอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.13 ลวดนิโครม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.1.5 ที่ยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบและปากจับขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดไฟฟ้าแรงสูง

ที่ยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบจะจับยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบ ส่วนปากจับขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดไฟฟ้าแรงสูง จะจับยึดหรือค้ำกับลวดนิโครมโดยจะทำมุมประมาณ 45° กับชิ้นตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ที่ยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบ และปากจับขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง

3.1.6 สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ร้อยละ 0.1 และภาชนะที่ใส่สารละลาย

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ตามที่มาตรฐานกำหนดนั้น คือ สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1

วิธีการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1

มีขั้นตอนดังนี้

1. นำสารแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) มาชั่งน้ำหนักปริมาณ 1 กรัม ด้วยเครื่องชั่งที่ได้มาตรฐาน ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเตรียมสารแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) โดยการชั่งน้ำหนักปริมาณ 1 กรัม

2. นำสารแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) 1 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน(distilled water หรือ deionized water) 1 ลิตร หรือ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยกระบอกตวงหรือขวดวัดปริมาตร(volumetric flask) ที่ได้ผ่านการสอบเทียบตามระบบมาตรฐาน ISO/IEC 17025 จาก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท. ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สารแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) 1 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3. เขย่าเบาๆ ประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้สารละลายนั้นเข้ากัน ก็จะได้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 สำหรับที่จะนำมาใช้ในการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย

การจัดวางตำแหน่งและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในภาชนะบรรจุสารละลาย

ชิ้นตัวอย่างทดสอบ จะถูกนำมาติดตั้งภายในภาชนะ ดังรูปที่ 3.17 โดยด้านหนึ่งของชิ้นตัวอย่างทดสอบต่อกับขั้วอิเล็กโทรดด้านไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยลวดนิโครมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร อีกด้านหนึ่งของชิ้นตัวอย่างทดสอบจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ร้อยละ 0.1 ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อลงดินด้วยเทปทองแดง(copper tape) กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด(ลวดนิโครม) ในบริเวณที่ห่าง 25.4 มิลลิเมตร

เทปทองแดง

(copper tape)

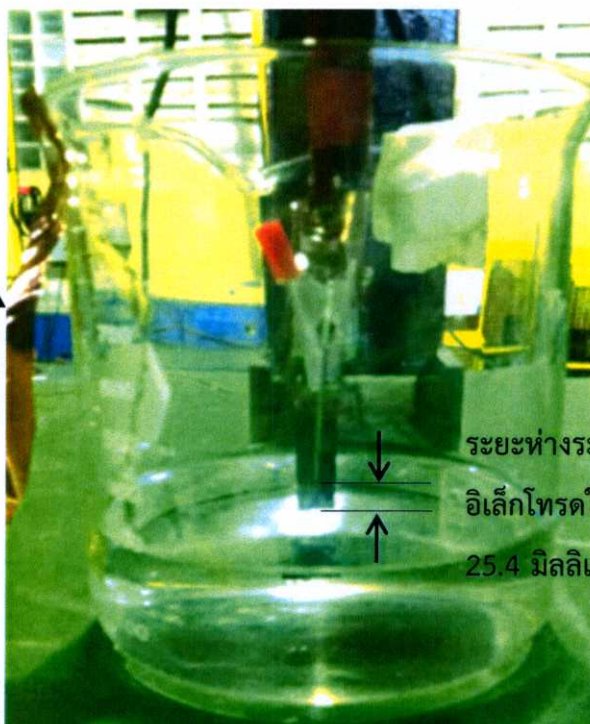
จุ่มลงในสารละลาย

แอมโมเนียมคลอไรด์

ร้อยละ 0.1 ซึ่งเป็น

ขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อ

ลงดิน



ระยะห่างระหว่างขั้ว

อิเล็กโทรดในบริเวณที่แห้ง

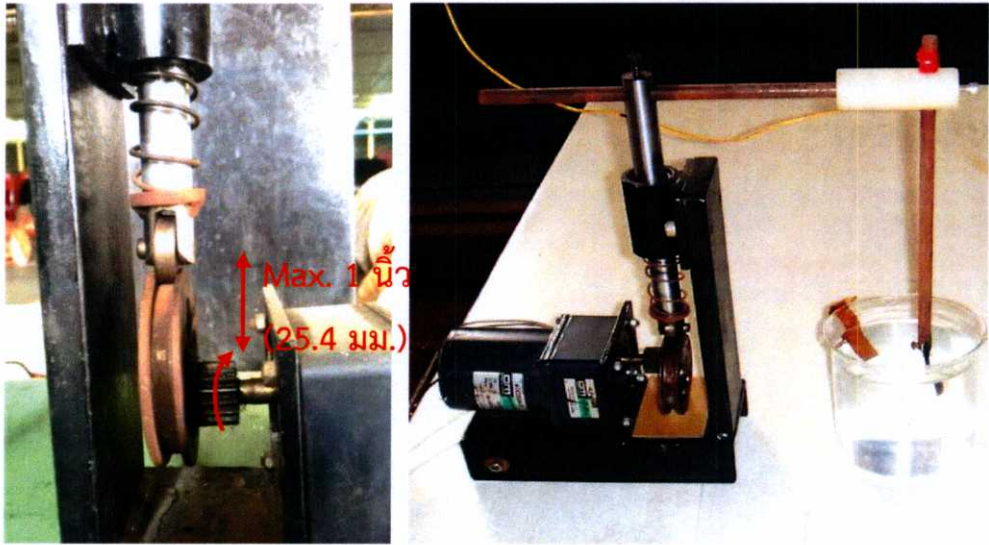
25.4 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.17 การจัดวางตำแหน่งและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในภาชนะบรรจุสารละลาย

3.1.7 มอเตอร์และชุดควบคุมความเร็ว

มาตรฐานนั้นกำหนดให้มีอัตราการจุ่มขึ้นตัวอย่างทดสอบลงไปในการละลายจนกระทั่งขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับผิวหน้าของสารละลายแล้วดึงขึ้นมาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 25.4 มิลลิเมตร ของความยาวของชิ้นตัวอย่างที่จุ่มในสารละลาย โดยมีความเร็วในการจุ่มสารละลาย 4 รอบต่อนาที

ดังนั้น จึงได้ทำการสร้างชุดทดสอบขึ้นเอง โดยการใช้มอเตอร์ควบคุมระยะการจุ่มขึ้น-ลง ให้ได้ 1 นิ้ว หรือ 25.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.18 และเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยการปรับความถี่ ดังรูปที่ 3.19 ให้มีความเร็วในการจุ่มสารละลาย 4 รอบต่อนาที โดยใช้นาฬิกาจับเวลาเป็นตัวตรวจเช็ค ดังรูปที่ 3.24



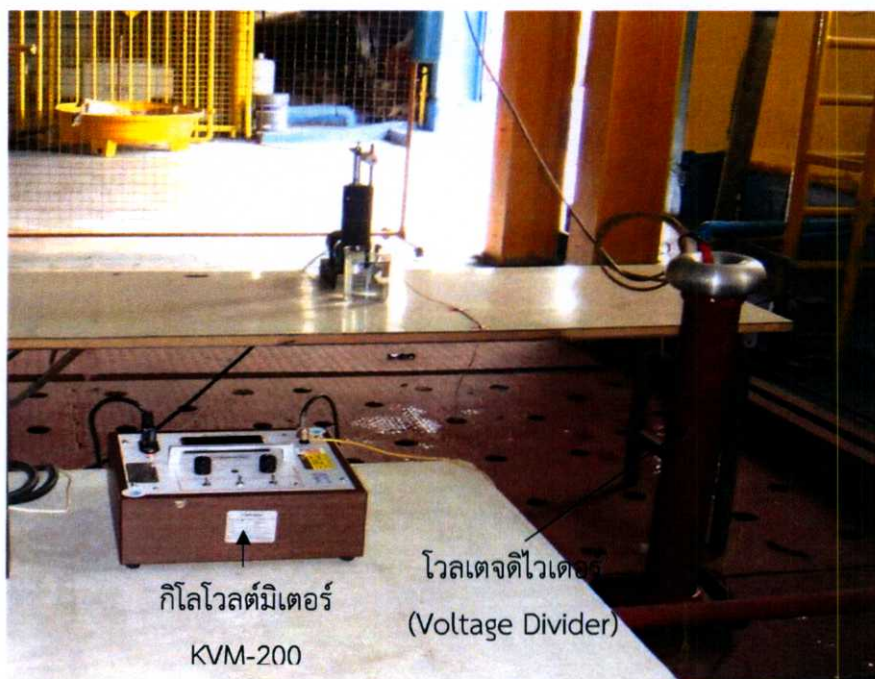
รูปที่ 3.18 มอเตอร์และการควบคุมระยะการจุ่มขึ้น-ลง 25.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

3.1.8 มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและโวลเตจติไวเตอร์

ชุดมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และโวลเตจติไวเตอร์ ที่ใช้ยี่ห้อ Hipotronics รุ่น KVM-200 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ได้สูงสุด 200 kV โวลเตจติไวเตอร์ มีอัตราส่วน 2000 : 1 ผ่านการสอบเทียบตามระบบมาตรฐาน ISO/IEC17025 จาก ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1-10 kV และได้ผ่านการสอบเทียบที่ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1-160 kV ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กิโลโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและโวลเตจดีไวเดอร์

3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้เป็นแบบดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer Series ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ความละเอียด 0.0001 กรัม ชั่งได้สูงสุด 210 กรัม ผ่านการสอบเทียบตามระบบมาตรฐาน ISO/IEC17025 จาก สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท. ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.1.10 เครื่องวัดค่า pH และความนำไฟฟ้า

นำสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่เตรียมมาวัดระดับค่า pH และค่าความนำไฟฟ้า เพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผล

เครื่อง pH Meter ที่ใช้ยี่ห้อ JENWAY รุ่น 3310 ผ่านการสอบเทียบตาม ISO/IEC 17025 ที่ AMRAC (ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด) และเครื่องวัดความนำไฟฟ้า ที่ใช้ยี่ห้อ JENWAY รุ่น 4310 ผ่านการสอบเทียบตามระบบมาตรฐาน ISO/IEC 17025 ที่ SPC (บ. เอส พี ซี แคลลิเบรชัน เซ็นเตอร์ จำกัด) ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การวัดค่า pH และค่าความนำไฟฟ้า ของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1

จากการวัดค่า pH และค่าความนำไฟฟ้า ของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ได้ผลดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่วัดได้

สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl)ความเข้มข้นร้อยละ 0.1	
ค่า pH ที่วัดได้ @ 24.3°C	5.31
ค่าความนำไฟฟ้า(conductivity)ที่วัดได้ @ 24.3°C	2,220 $\mu\text{S}/\text{cm}$

3.1.11 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 3.23 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

3.1.12 นาฬิกาจับเวลา

นาฬิกาจับเวลา ใช้สำหรับตรวจสอบความเร็วในการจุ่มชิ้นตัวอย่างทดสอบขึ้น-ลงในสารละลาย 4 รอบต่อนาที และใช้จับเวลาของการเกิดความลึ้มเหลว ในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 3.24 นาฬิกาจับเวลา

3.2 วิธีการทดสอบ

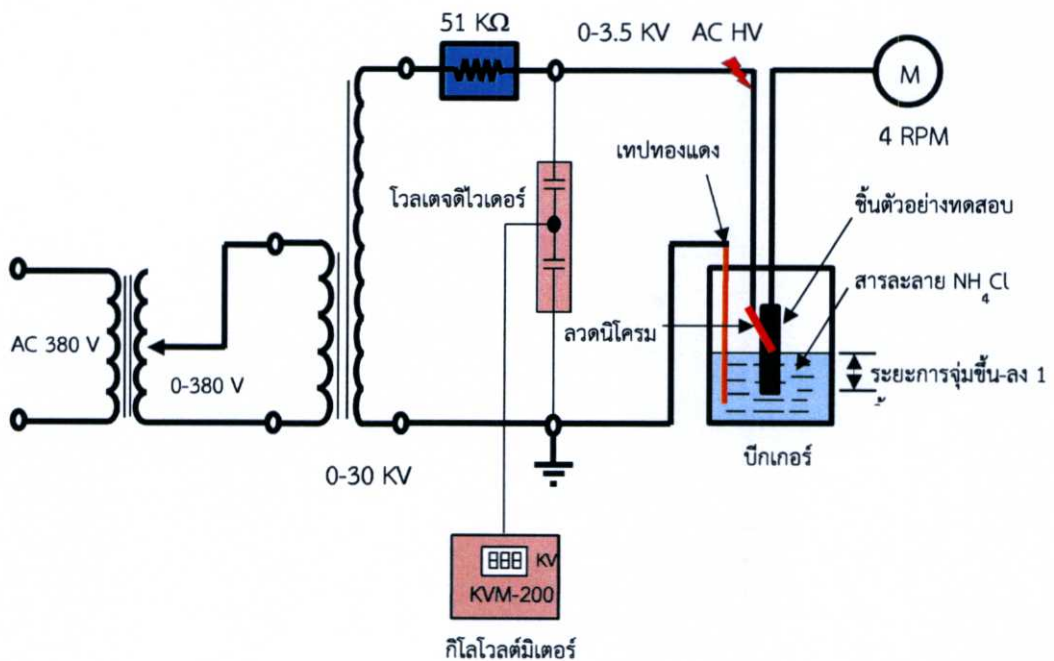
หลังจากเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ และเตรียมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ตามข้อ 3.1.3 และ 3.1.6 ตามลำดับ เรียบร้อยแล้ว พร้อมทั้งจะทำการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test

โดยจะทำการทดสอบกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามลำดับชิ้นตัวอย่างทดสอบ ดังต่อไปนี้

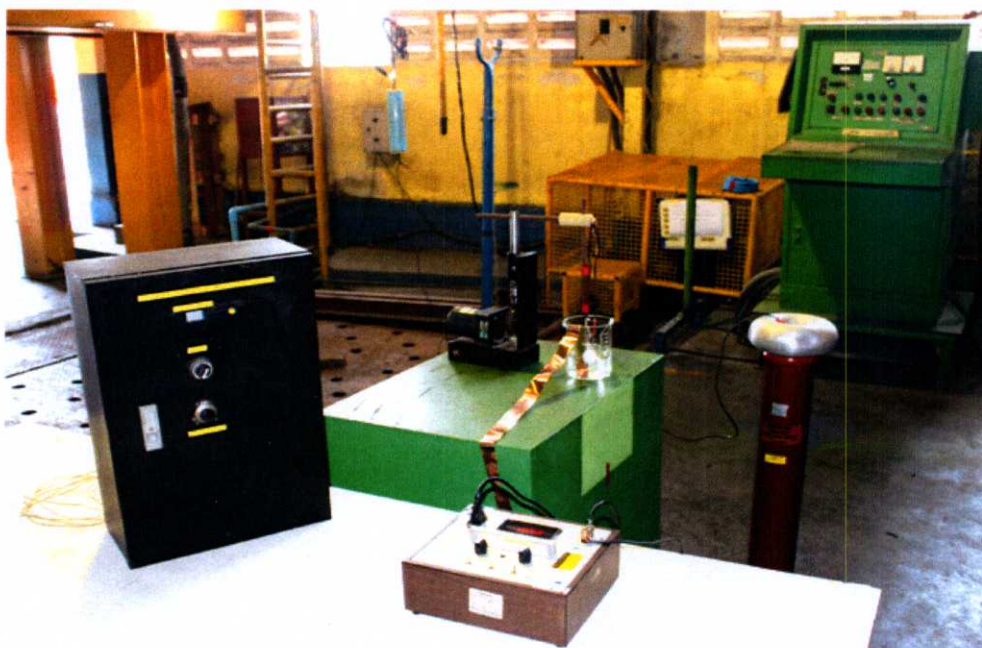
- 1) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black)
- 2) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black)
- 3) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(LDPE-filled carbon black)
- 4) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(MDPE-filled carbon black)
- 5) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(HDPE-unfilled carbon black)

ขั้นตอนการทดสอบ เป็นดังนี้

3.2.1 ต่อวงจรการทดสอบ ตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 วงจรการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test



รูปที่ 3.26 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

3.2.2 ติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ ตามข้อ 3.1.5

โดยยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบกับที่จับยึดชิ้นตัวอย่างทดสอบ และจับยึดลวดนิโครม กับปากจับขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง โดยให้ทำมุมประมาณ 45° กับชิ้นตัวอย่างทดสอบ ติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบในภาชนะ ดังรูปที่ 3.17 โดยชิ้นตัวอย่างทดสอบนั้นจะถูกจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ร้อยละ 0.1

3.2.3 ตรวจสอบระยะเวลาการจุ่มขึ้น-ลง ประมาณ 1 นิ้ว หรือ 25.4 มิลลิเมตร ด้วยไม้บรรทัด และตรวจสอบความเร็วในการจุ่มขึ้นตัวอย่างทดสอบขึ้น-ลงในสารละลาย 4 รอบต่อนาที โดยใช้นาฬิกาจับเวลาตรวจสอบ หากความเร็วยังไม่ได้ ให้ปรับเพิ่มหรือลดความเร็วที่ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์(speed control motor) จนกระทั่งความเร็วในการจุ่มตัวอย่างทดสอบขึ้น-ลงในสารละลายได้ตามที่ต้องการ

3.2.4 เมื่อทำการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมที่จะทดสอบ ให้ทำการจ่ายแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ค่าต่างๆ เริ่มต้นด้วยที่แรงดัน 1 kV, 1.5 kV, 2.0 kV, 2.5 kV, 3.0 kV และ 3.5 kV ตามลำดับ

3.2.5 บันทึกเวลาที่จ่ายแรงดันให้กับฉนวนตั้งแต่ได้รับการทดสอบไปจนกระทั่งเกิดความล้มเหลวของฉนวน(insulation failure) และบันทึกค่าแรงดันทดสอบและเวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกผลการทดสอบแรงดันทดสอบและเวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ชั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
.....	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ(unaged)	1						
.....		2						
.....		3						
ภายใต้สภาวะแวดล้อม		4						
อุณหภูมิ		5						
.....°C	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง	ค่าเฉลี่ย						
ความชื้น		1						
.....%		2						
สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 วัดค่า		3						
pH		4						
Conductivity		5						
.....µS/cm. @	ค่าเฉลี่ย							
..... °C								

3.2.6 ทำการทดสอบจนกระทั่งครบจำนวนชั้นตัวอย่างที่จะทดสอบ และเก็บชั้นตัวอย่างที่ทดสอบไว้สำหรับถ่ายภาพ และแสดงในตารางบันทึกผลการทดสอบลักษณะการเกิดรอยบนพื้นผิวของชั้นตัวอย่างทดสอบ ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดสอบลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ

ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
.....	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
.....							
.....							
.....	ถูกเร่งอายุด้วยความ ร้อน(thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						

หมายเหตุ :

- 1.) ในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นจะทำให้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl)เกิดการเสียสภาพได้เนื่องจากการอาร์กหรือเกิดความล้มเหลว(failure)ขึ้น ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์(NH_4Cl)ใหม่ทุกครั้งที่ทำทดสอบ
- 2.) ความล้มเหลวหรือความบกพร่อง(failure) คือ เมื่อเกิดการอาร์ก(arc) อย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย 2 รอบติดต่อกัน

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบตามวิธีการในข้อที่ 3.2 ซึ่งเป็นการทดสอบความต้านทานการเกิดรอย ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test สำหรับวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ ทั้งหมด 5 ชนิด คือ

- 1) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black)
- 2) ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black)
- 3) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(LDPE-filled carbon black)
- 4) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(MDPE-filled carbon black)
- 5) ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(HDPE-unfilled carbon black)

ซึ่งต้องการเปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลว (time to failure) และลักษณะของการเกิดรอย(tracking)บนพื้นผิวของฉนวนตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ สำหรับวัสดุฉนวนทั้ง 5 ชนิด ทั้งที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง

ผลจากการทดสอบวัสดุฉนวนเคเบิล ทั้ง 5 ชนิด เป็นไปตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบของฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก













4.1.1 เปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.1

4.1.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของฉนวนตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ชั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก (XLPE-unfilled carbon black) ภายใต้อุณหภูมิ 30.-35.°C ความชื้น 60.-70.%	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)	1	>24 hr	>24 hr	1.08 min	1.00 min	30 sec	16 sec
		2	>24 hr	>24 hr	1.04 min	1.14 min	28 sec	19 sec
		3	>24 hr	>24 hr	1.02 min	1.02 min	25 sec	22 sec
		4	>24 hr	>24 hr	1.05 min	1.12 min	27 sec	18 sec
		5	>24 hr	>24 hr	1.02 min	1.05 min	30 sec	18 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	>24 hr	1.04 min	1.07 min	28 sec	19 sec
สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 วัตค่า pH5.31..... Conductivity2,220.....µS/cm @24.3..... °C	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง	1	>24 hr	>24 hr	1.35 min	41 sec	36 sec	18 sec
		2	>24 hr	>24 hr	1.58 min	43 sec	42 sec	21 sec
		3	>24 hr	>24 hr	1.54 min	40 sec	40 sec	24 sec
		4	>24 hr	>24 hr	1.46 min	45 sec	45 sec	22 sec
		5	>24 hr	>24 hr	1.52 min	47 sec	38 sec	23 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	>24 hr	1.49 min	43 sec	40 sec	22 sec

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสม คาร์บอนแบล็ก

ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนครอส ลิงค์พอลิเอ ทิลีนที่ไม่ ผสม คาร์บอน แบล็ก (XLPE- unfilled carbon black)	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
		Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail
	ถูกเร่งอายุด้วย ความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						
		Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail

4.2 ผลการทดสอบของฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

4.2.1 เปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสม คาร์บอนแบล็กที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.3

4.2.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตาม ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบ ทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีน ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบ ไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ขั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก (XLPE-filled carbon black) ภายใต้สภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ 30.-35.°C ความชื้น 60.-70.% สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) ความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 วัตค่า pH5.31..... Conductivity2,220.....µS/cm @24.3..... °C	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)	1	>24 hr	1.20 min	60 sec	39 sec	34 sec	22 sec
		2	>24 hr	1.16 min	58 sec	41 sec	38 sec	25 sec
		3	>24 hr	1.14 min	59 sec	40 sec	35 sec	27 sec
		4	>24 hr	1.10 min	58 sec	43 sec	33 sec	26 sec
		5	>24 hr	1.12 min	60 sec	41 sec	35 sec	27 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	1.14 min	59 sec	41 sec	35 sec	25 sec
	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง	1	>24 hr	1.04 min	40 sec	34 Sec	18 sec	19 sec
		2	>24 hr	1.00 min	45 sec	29 sec	23 sec	19 sec
		3	>24 hr	1.02 min	37 sec	33 sec	25 sec	18 sec
		4	>24 hr	1.00 min	35 sec	30 sec	18 sec	17 sec
		5	>24 hr	1.05 min	38 sec	34 sec	18 sec	18 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	1.02 min	39 sec	32 sec	20 sec	18 sec

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนที่ผสม คาร์บอนแบล็ก

ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนพอลิเอ ทิลีนที่ผสม คาร์บอน แบล็ก (XLPE- filled carbon black)	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
	ถูกเร่งอายุด้วย ความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						
		Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
		Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

4.3 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

4.3.1 เปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.5

4.3.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ชั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ภายใต้อุณหภูมิ 30.-35.°C ความชื้น 60.-70.%	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)	1	>24 hr	39 sec	25 sec	27 sec	22 sec	20 sec
		2	>24 hr	42 sec	27 sec	25 sec	22 sec	17 sec
		3	>24 hr	37 sec	27 sec	27 sec	19 sec	23 sec
		4	>24 hr	38 sec	28 sec	23 sec	15 sec	21 sec
		5	>24 hr	35 sec	27 sec	25 sec	23 sec	15 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	38 sec	27 sec	25 sec	20 sec	19 sec
สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 วัดค่า pH5.31..... Conductivity2,220.....µS/cm @24.3..... °C	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง	1	>24 hr	44 sec	22 sec	22 sec	19 sec	18 sec
		2	>24 hr	42 sec	27 sec	20 sec	17 sec	17 sec
		3	>24 hr	36 sec	32 sec	24 sec	20 sec	20 sec
		4	>24 hr	33 sec	23 sec	22 sec	17 sec	19 sec
		5	>24 hr	40 sec	22 sec	23 sec	19 sec	20 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	39 sec	25 sec	22 sec	18 sec	19 sec

ตารางที่ 4.6 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						
		Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
		Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

4.4 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก











4.4.1 เปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.7

4.4.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ชั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
<p>พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก</p> <p>ภายใต้สภาวะแวดล้อม</p> <p>อุณหภูมิ 30.-35.°C</p> <p>ความชื้น 60.-70. %</p> <p>สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 วัตต์ค่า</p> <p>pH5.31.....</p> <p>Conductivity2,220.....µS/cm</p> <p>@24.3..... °C</p>	<p>ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)</p>	1	>24 hr	21 sec	11 sec	9 sec	10 sec	10 sec
		2	>24 hr	19 sec	13 sec	10 sec	9 sec	10 sec
		3	>24 hr	21 sec	11 sec	10 sec	10 sec	9 sec
		4	>24 hr	22 sec	14 sec	9 sec	9 sec	9 sec
		5	>24 hr	19 sec	14 sec	10 sec	10 sec	10 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	20 sec	13 sec	10 sec	10 sec	10 sec
	<p>ถูกรเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง</p>	1	>24 hr	19 sec	12 sec	16 sec	11 sec	10 sec
		2	>24 hr	18 sec	13 sec	15 sec	10 sec	9 sec
		3	>24 hr	16 sec	14 sec	14 sec	11 sec	10 sec
		4	>24 hr	16 sec	13 sec	15 sec	10 sec	8 sec
		5	>24 hr	17 sec	13 sec	15 sec	11 sec	9 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	17 sec	13 sec	15 sec	11 sec	9 sec

ตารางที่ 4.8 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก

ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
พอลิเอทิลีน ชนิดความ หนาแน่น ปานกลาง (MDPE) ที่ไม่ผสม คาร์บอน แบล็ก	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
	ถูกเร่งอายุด้วย ความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

4.5 ผลการทดสอบของฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก













4.5.1 เปรียบเทียบผลระหว่างแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิด ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.9

4.5.2 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ และถูกเร่งอายุด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เป็นไปตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของแรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอยที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก

แรงดัน-เวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz								
ขั้นตัวอย่างทดสอบ		ที่	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก <u>ภายใต้สภาวะแวดล้อม</u> อุณหภูมิ 30.-35.°C ความชื้น 60.-70.% สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH ₄ Cl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 วัตต์ค่า pH5.31..... Conductivity2,220.....µS/cm @24.3..... °C	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)	1	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.58 min	42 sec	38 sec
		2	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.50 min	39 sec	40 sec
		3	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.53 min	40 sec	38 sec
		4	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.55 min	38 sec	40 sec
		5	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.50 min	38 sec	39 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.53 min	39 sec	39 sec
	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง	1	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.43 min	46 sec	38 sec
		2	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.46 min	42 sec	39 sec
		3	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.42 min	40 sec	38 sec
		4	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.38 min	48 sec	40 sec
		5	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.40 min	38 sec	38 sec
		ค่าเฉลี่ย	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.42 min	43 sec	39 sec

ตารางที่ 4.10 ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่แรงดันทดสอบไฟฟ้า กระแสสลับต่างๆ ความถี่ 50 Hz สำหรับฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก

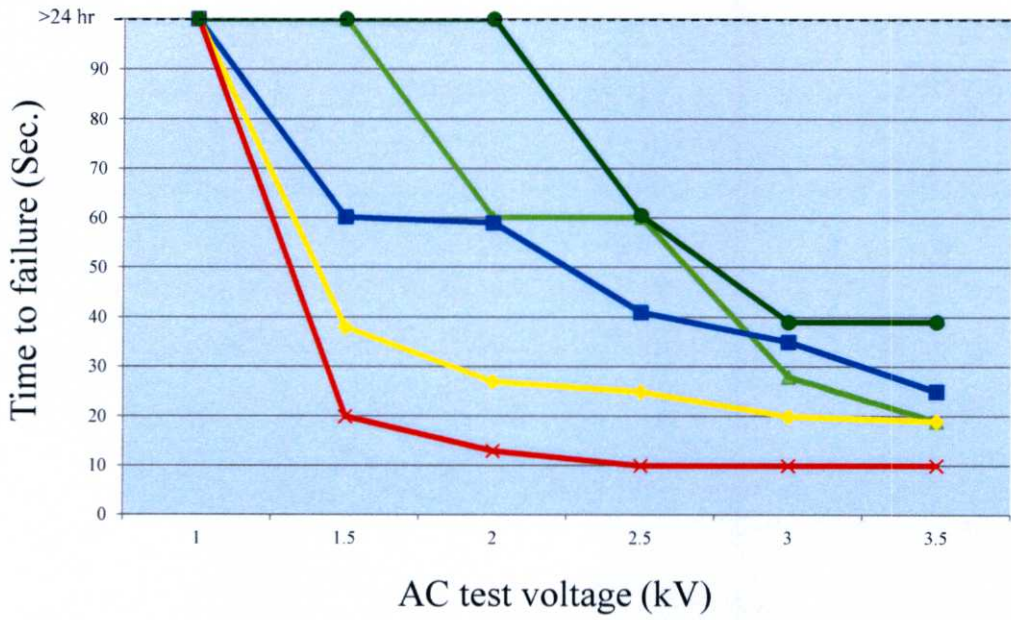
ลักษณะของการเกิดรอยบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ที่แรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ(AC test voltage) ต่างๆ ความถี่ 50 Hz							
ชิ้นตัวอย่างทดสอบ		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
ฉนวนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก	ไม่ได้ถูกเร่งอายุ (unaged)						
	ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน (thermal ageing) โดยการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง						
		Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail
		Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail

4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ

นำค่าที่ได้จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1, 4.3, 4.5, 4.7 และ 4.9 โดยนำค่าเฉลี่ยของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ มาพล็อตกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.1

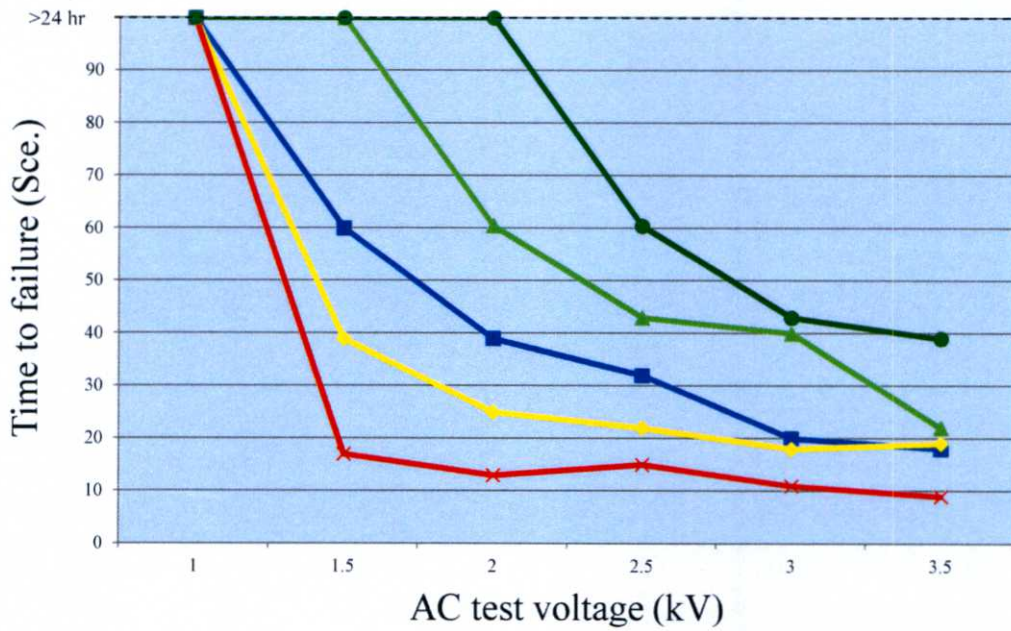
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุ ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ

นำค่าที่ได้จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1, 4.3, 4.5, 4.7 และ 4.9 โดยนำค่าเฉลี่ยของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุ มาพล็อตกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.2



—▲— XLPE(unfilled carbon) —■— XLPE(filled carbon) —◆— LDPE —×— MDPE —●— HDPE

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ(unaged) สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ



—▲— XLPE(unfilled carbon) —■— XLPE(filled carbon) —◆— LDPE —×— MDPE —●— HDPE

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุ(ageing) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง สำหรับฉนวนชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุของฉนวนชนิดต่างๆ พบว่า ฉนวน HDPE ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก มีเวลาของการเกิดความล้มเหลวโดยเฉลี่ยมากกว่าฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอน ฉนวน XLPE ชนิดที่เติมคาร์บอน, LDPE ชนิดที่เติมคาร์บอน และ MDPE ชนิดที่เติมคาร์บอน ตามลำดับ โดยฉนวน HDPE ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 2.0 kV รองลงมา คือ ฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอนทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 1.5 kV ส่วนฉนวน XLPE ชนิดที่เติมคาร์บอน kV ฉนวน LDPE ชนิดที่เติมคาร์บอนและ MDPE ชนิดที่เติมคาร์บอนทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 1.0 kV

จากรูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ของฉนวนชนิดต่างๆ ก็พบว่าฉนวน HDPE มีเวลาของการเกิดความล้มเหลวโดยเฉลี่ยมากกว่าฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอน มีความต้านทานการเกิดรอยบนพื้นผิวสูงกว่า XLPE ชนิดที่เติมคาร์บอน, LDPE และ MDPE ตามลำดับ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุตามในรูปที่ 4.1 คือ ฉนวน HDPE ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 2.0 kV รองลงมา คือ ฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอนทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 1.5 kV ส่วนฉนวน XLPE ชนิดที่เติมคาร์บอน kV ฉนวน LDPE ชนิดที่เติมคาร์บอนและ MDPE ชนิดที่เติมคาร์บอนทนต่อแรงดันไฟฟ้าทดสอบได้สูงสุด 1.0 kV เช่นเดียวกันกับชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเวลาของการเกิดความล้มเหลว(time to failure)ของฉนวนแต่ละชนิดมีค่าลดลงเมื่อแรงดันทดสอบนั้นเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็ชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุหรือที่ถูกเร่งอายุ และเวลาของการเกิดความล้มเหลวของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุหรือที่ถูกเร่งอายุมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน โดยชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ถูกเร่งอายุมีเวลาในการเกิดความล้มเหลวลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุ

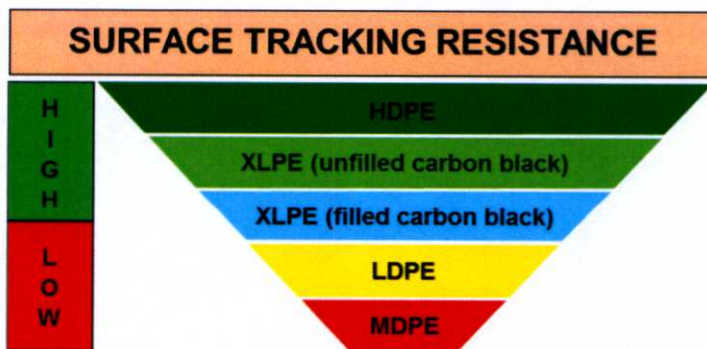
สำหรับตารางที่ 4.2, 4.4, 4.6, 4.8 และ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกิดรอย Tracking บนพื้นผิวของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะเป็นรอยไหม้สีดำที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนหรือถ่าน เช่น ตัวอย่างฉนวน HDPE ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กเมื่อเทียบกับฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอน ที่แรงดันทดสอบ 1.5 kV รอยไหม้สีดำที่เกิดขึ้นบนฉนวน HDPE ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กนั้นจะมีน้อยกว่าฉนวน XLPE ชนิดที่ไม่เติมคาร์บอน แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าฉนวนดังกล่าวจะไม่ได้เติมหรือผสมคาร์บอน แต่ก็ยังเกิดมีถ่านหรือผงคาร์บอน(C=C) หลังจากทดสอบเนื่องมาจากพันธะโมเลกุลของ HDPE และ XLPE ต่างก็มีองค์ประกอบคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-C และ C-H) อยู่แล้วนั่นเอง

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิเคราะห์การเกิดรอยทางผิวและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ ทั้งหมด 5 ชนิด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างฉนวนแบบเดิมของสายเคเบิลอากาศ(SAC)ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ทรอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black) และทรอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black) กับฉนวนชนิดใหม่อีก 3 ชนิด ซึ่งเป็นชนิดพอลิเอทิลีน อันได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างภายใต้สภาวะปกติไม่ได้ถูกเร่งอายุ(unaged) กับภายใต้สภาวะที่ถูกเร่งอายุด้วยความร้อน(thermal ageing) ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) (หรือวิธี Dip-Track Test) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. วัสดุฉนวนชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)ที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็กนั้นมีความต้านทานการเกิดรอยทางผิวสูงกว่าวัสดุฉนวนชนิดทรอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black), ทรอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-filled carbon black), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง(MDPE)ที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ตามลำดับ ทั้งที่ไม่ได้ถูกเร่งอายุและถูกเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [29] เพียงแต่ใช้ลักษณะชนิดของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเขียนสรุปได้ตามที่แสดงดังในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 คุณลักษณะของความต้านทานการเกิดรอยทางผิวของวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (วิธี B) หรือวิธี Dip-Track Test

2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า-เวลาของการเกิดความล้มเหลวทางผิวของวัสดุฉนวนเคเบิลชนิดต่างๆ นี้ แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบ(AC test voltage) นั้นมีผลต่อเวลาของการเกิดความล้มเหลวการเกิดรอย(time to tracking failure) ของวัสดุฉนวนเคเบิล คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบยิ่งสูง ระยะเวลาของการเกิดความล้มเหลวจะยิ่งสั้นลง นอกจากนี้เวลาในการเกิดความล้มเหลวจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเร่งอายุด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C, 168 ชั่วโมง

3. โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ นั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณลักษณะของการเกิดรอยทางผิว ซึ่งควรที่จะต้องพิจารณาและเลือกใช้งานให้เหมาะสม

4. การผสมสารคาร์บอนแบล็กในวัสดุฉนวนนั้นมีผล ก็คือ วัสดุฉนวนที่ผสมคาร์บอนแบล็กจะมีความต้านทานการเกิดรอยทางผิวที่ต่ำกว่าวัสดุฉนวนที่ไม่ผสมหรือเติมคาร์บอนแบล็ก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการวิจัยเพิ่มเติม เพื่อที่จะได้ตัดสินใจว่าจะนำ HDPE เอามาใช้ได้จริงหรือไม่ เช่น

1. วิจัยเกี่ยวกับวัสดุ วิธีการผสม อัตราส่วนผสม และการนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย เพื่อพัฒนาหรือหาวัสดุชนิดใหม่ที่ดีกว่าเดิม
2. ทดลองผลิตสายชนิดนี้โดยใช้ HDPE แล้วนำมาทำการทดลองทดสอบเปรียบเทียบผลตามมาตรฐานดูว่าอย่างไรจะได้ผลดีกว่ากัน
3. ทดสอบแรงอายุของสาย HDPE ที่ผลิตขึ้น ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ
4. ทดลองนำสาย HDPE ที่ผลิตขึ้น ไปติดตั้งใช้งานและนำกลับมาทดสอบเป็นระยะตามที่กำหนด เช่น ทุก 3 เดือน เป็นต้น
5. ศึกษาความคุ้มค่าในกระบวนการผลิต หากทำการผลิตเปลือกของสายชนิดนี้โดยใช้ HDPE

เอกสารอ้างอิง

- [1] มอก. 2341-2555, “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสายไฟฟ้าอากาศตัวนำอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนและเปลือกครอสลิงก์พอลิเอทิลีนสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 25 กิโลโวลต์ และ 35 กิโลโวลต์”, พ.ศ 2555.
- [2] ICEA S-66-524, “Cross-Linked-Thermosetting - Polyethylene-Insulated Wire and Cable for The Transmission and Distribution of Electric Energy”, Revision No.2, July 16, 1992.
- [3] C.F Wallace, C.A. Bailey, “Dip-Track Test”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, December 1967, Vol. EI-2, No.3, p. 137 (Paper 31 TP66-360).
- [4] G. M. L. SOMMERMAN, “Electrical Tracking Resistance of Polymers”, AIEE Electrical Insulation Committee, Atlantic City, N. J., June 19-24, 1960, paper 60-857.
- [5] E.K. Duffy, S.Jovanovitch, I.J. Marwick, “Discharge-Resistant Characteristics of the Polyethylenes for Wire and Cable”, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-84, No. 9, September, 1965, pp. 815-825.
- [6] R Sarathi, S Chadrasekar, V Sabari Giri, C Venkateshaiah and R Velmurugan, “Analysis of surface degradation of high density polyethylene (HDPE) insulation material due to tracking”, Bull. Mater. Sci., Vol. 27, No. 3, June 2004, pp. 251–262. © Indian Academy of Sciences.
- [7] Quoc Viet Huynh, Boonchai Techaumnat, “Study on the Field Behavior at the Contact Point between a Covered Conductor and a Dielectric Solid”, International Conference on Engineering and Information Management, 15-17 April 2011, Chengdu, Sichuan, China, pp. 148-151.
- [8] นายบุญจันทร์ นาขมื่น และนายวัฒน์พงศ์ สาสิมมา, “การศึกษาถึงการสร้างร่องรอยบนผิวฉนวน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2554.
- [9] Isaias Ramírez-Vázquez, Member, IEEE, and Fermin P. Espino-Cortés, Member, IEEE, “Electric-Field Analysis of Spacer Cable Systems for Compact Overhead Distribution Lines”, IEEE Transaction Power Delivery, Vol. 27, No. 4, October 2012, Mexico City. Paper no. TPWRD-00113-2012.

- [10] นายปรัชญา แก้วจันทิก, “การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [11] รายงานสรุปผลการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ร่วมกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA), “โครงการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีน”, เมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2557.
- [12] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, 2549.
- [13] รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, “เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [14] อีรพันธ์ สุทธิเทพ, วีรศักดิ์ บุญทน, “สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ELECTROMAGNETIC FIELD”, 2559.
- [15] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, “High Voltage Engineering”, Second edition, 2000.
- [16] นาย ชูย เวียต ควอค, “การศึกษาสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสสมมุติระหว่างฉนวนสามชนิด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [17] Gabe Paoletti, Alexander Golubev, “Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment”, paper 99-25 presented at the IEEE - IAS 34th Annual Meeting, Oct 3-7, 1999, Phoenix, Arizona USA.
- [18] รศ.แมน อมรสิทธิ์, รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา และ อ.ธรรมนุญ อุดมมันบัณฑิตย์, “วัสดุวิศวกรรม”, พิมพ์ครั้งที่ 5, 2551.
- [19] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ, “วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน”, บริษัท สำนักพิมพ์ ท้อป จำกัด, 2548.
- [20] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials”, พิมพ์ครั้งที่ 3 (ฉบับปรับปรุง), 2557.
- [21] มานพ ตันตระกูลบัณฑิตย์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), “วัสดุวิศวกรรม”, พิมพ์ครั้งที่ 4, 2539.
- [22] E.W.G. Bungay and D. McAllister, “Electric Cables Handbook”, BICC, Second edition.
- [23] NUC. Polymer Research Laboratory, “Polyethylene Training Manual Power & Communication”, 1996.

- [24] บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด มหาชน, “คู่มือการเลือกใช้สายไฟฟ้า สำหรับงาน ออกแบบ และติดตั้งระบบไฟฟ้า”, ฉบับปรับปรุงใหม่ ครั้งที่ 2, 2557.
- [25] ASTM D-495 : Standard Test Method for High-Voltage, Low-Current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation.
- [26] ASTM D-2132 : Standard Test Method for Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials.
- [27] IEC 60112 : Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials, 2009.
- [28] IEC 60587 : Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, Third edition, 2007-05.
- [29] S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech, “Surface Resistance Investigation for Space Aerial Cable”, 2015 The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH) 12-13 June 2015, Bangkok, Thailand, pp. 95-97.
- [30] MEA Specification No. 406/2544, “สายเคเบิลอากาศอลูมิเนียม แรงดัน 15 และ 25 กิโลโวลต์”.
- [31] PEA Specification No. R-825/2544, Specifications for SPACED AERIAL CABLES OF RATED VOLTAGES 22 kV AND 33 kV.
- [32] PEA Specification No. RCBL-038/2559, Specifications for SPACED AERIAL CABLES OF RATED VOLTAGES 22 kV AND 33 kV.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานและข้อกำหนดของสายเคเบิลอากาศ

มาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของสายเคเบิลอากาศที่ใช้สำหรับประเทศไทย ดูในตารางที่ ก.1

เดิมที่สายเคเบิลอากาศจะยึดตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฯ ต่างๆ เช่น การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) กำหนดตาม MEA Specification No. 406: 12-2008 [30] และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) กำหนดตาม PEA Specification No. R-825/2544 [31] หลังจากนั้นเมื่อปี พ.ศ 2550 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยหรือ สมอ. ได้มีการประกาศใช้เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับสายเคเบิลอากาศ ครั้งแรก คือ มอก.2341-2550 และได้มีการปรับปรุงแก้ไขอีกครั้งเมื่อปี พ.ศ 2555 เป็น มอก. 2341-2555 ถึงปัจจุบันยังไม่ได้มีการแก้ไขเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติม แต่เมื่อไม่นานนี้ กฟภ. ได้มีการปรับปรุงแก้ไขเป็นข้อกำหนดใหม่ เป็น PEA Specification No. RCBL-038/2559 [32] โดยได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายชนิดนี้ คือ เพิ่มความหนาของฉนวนแต่ลดความหนาของเปลือก (ดูตามตารางที่ ก.5) เหตุผลประการหนึ่งอาจจะสามารถอธิบายได้ตามในข้อที่ 2.4 (ตารางที่ 2.1) และข้อที่ 2.5 (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ ของสายเคเบิลอากาศ

มอก. 2341-2555 (ใช้ในปัจจุบัน เป็นมาตรฐานทั่วไป ไม่บังคับ)	<u>มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม</u> สายไฟฟ้าอากาศตัวนำอะลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวนและเปลือกครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 25 กิโลโวลต์ และ 35 กิโลโวลต์ (Aluminium Space Aerial Power Cables with XLPE Insulated and Sheathed for Rated Voltage 25 kV and 35 kV)
MEA Specification No. 406 : 12-2008	<u>ข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.)</u> สายเคเบิลอากาศอลูมิเนียม แรงดัน 15 และ 25 กิโลโวลต์
PEA Specification No. RCBL- 038/2559 ฉบับล่าสุด (เดิมเป็น PEA Specification No. R-825/2544))	<u>ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)</u> Specifications for SPACED AERIAL CABLES OF RATED VOLTAGES 22 kV AND 33 kV

- ข้อกำหนดของ มอก. 2341-2555 [1] สำหรับสายเคเบิลอากาศ เป็นไปตามตารางที่ ก.2 และ ก.3
- ข้อกำหนดของ MEA Specification No. 406 : 12-2008 สำหรับสายเคเบิลอากาศ เป็นไปตามตารางที่ ก.4

- ข้อกำหนดของ PEA Specification No. RCBL-038/2559 สำหรับสายเคเบิลอากาศ เป็นไปตามตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.2 ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม มอก. 2341-2555 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 25 กิโลโวลต์

ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้ และขนาดโครงสร้าง	สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 25 กิโลโวลต์							
	35	50	70	95	120	150	185	240
ขนาดตัวนำ	35	50	70	95	120	150	185	240
1. ตัวนำ (conductor)	ต้องเป็นลวดอะลูมิเนียมตีเกลียวรวมศูนย์กลมอัดแน่น (compact round concentric lay stranding) ตาม มอก. 293							
1.1 จำนวนเส้นลวดตัวนำ ต่ำสุด (เส้น)	6	6	12	15	15	15	30	30
1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวนำ (mm)	6.6-7.5	7.7-8.6	9.3-10.2	11-12	12.5-13.5	13.9-15	15.5-16.8	17.8-19.2
2. ตัวกันตัวนำ (conductor screen)	ต้องเป็นสารกึ่งตัวนำ (semi-conducting)							
2.1 ความหนาต่ำสุดของตัว กันตัวนำ (mm)	0.07							
2.2 ความหนาเฉลี่ยของตัวกัน ตัวนำ (mm)	0.3							
3. ฉนวน (insulation)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนไม่มีคาร์บอนแบล็กที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเพอร์ออกไซด์ (peroxide cross linking agent) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซิลเลน (silane cross linking agent)							
3.1 ความหนาของฉนวน (mm)	ต่ำสุด 2.862							
	เฉลี่ย 3.18							
4. เปลือก (sheath)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนชนิดเติมคาร์บอนแบล็กไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 และไม่เกินร้อยละ 10							
4.1 ความหนาของเปลือก (mm)	ต่ำสุด 2.862							
	เฉลี่ย 3.18							
5. เส้นผ่านศูนย์กลางของ สายไฟ (mm)	19.9 - 21.5	22.0 - 24.0	23.0 - 25.0	25.0 - 27.0	26.5 - 28.7	28.0 - 30.2	29.4 - 31.7	32.1 - 34.4

ตารางที่ ก.3 ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม มอก. 2341-2555
สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 35 กิโลโวลต์

ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้ และขนาดโครงสร้าง	สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 35 กิโลโวลต์							
ขนาดตัวนำ (mm ²)	35	50	70	95	120	150	185	240
1. ตัวนำ (conductor)	-	ต้องเป็นลวดอะลูมิเนียมตีเกลียวรวมศูนย์กลมอัดแน่น (compact round concentric lay stranding) ตาม มอก. 293						
1.1 จำนวนเส้นลวดตัวนำ ต่ำสุด (เส้น)	6	6	12	15	15	15	30	30
1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวนำ (mm)	-	7.7-8.6	9.3-10.2	11-12	12.5-13.5	13.9-15	15.5-16.8	17.8-19.2
2. ตัวกันตัวนำ (conductor screen)	-	ต้องเป็นสารกึ่งตัวนำ (semi-conducting)						
2.1 ความหนาต่ำสุดของตัว กันตัวนำ (mm)	-	0.07						
2.2 ความหนาเฉลี่ยของตัวกัน ตัวนำ (mm)	-	0.3						
3. ฉนวน (insulation)	-	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนไม่มีคาร์บอนแบล็กที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบเพอร์ออกไซด์ (peroxide cross linking agent) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบไซเลน (silane cross linking agent)						
3.1 ความหนาของฉนวน (mm)	-	ต่ำสุด 4.01						
	-	เฉลี่ย 4.45						
4. เปลือก (sheath)	-	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนชนิดเต็มคาร์บอนแบล็กไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 และไม่เกินร้อยละ 10						
4.1 ความหนาของเปลือก (mm)	-	ต่ำสุด 2.862						
	-	เฉลี่ย 3.18						
5. เส้นผ่านศูนย์กลางของ สายไฟ (mm)	-	24.2 - 26.4	25.6 - 27.8	27.3 - 29.5	28.8 - 31.0	30.2 - 32.5	32.0 - 34.4	34.4 - 36.8

ตารางที่ ก.4 ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม MEA Specification No. 406 : 12-2008 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 15 กิโลโวลต์ และ 25 กิโลโวลต์

ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้ และขนาดโครงสร้าง	สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด						
	15 กิโลโวลต์			25 กิโลโวลต์			
ขนาดตัวนำ	35	120	185	35	70	120	185
1. ตัวนำ (conductor)	ต้องเป็นลวดอะลูมิเนียมรีดแข็งตีเกลียวรวมศูนย์กลมอัดแน่น (compact round concentric lay stranding) ตาม มอก. 293						
1.1 จำนวนเส้นลวดตัวนำ ต่ำสุด (เส้น)	6	15	30	6	12	15	30
1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวนำ (mm)	6.6-7.5	12.5-13.5	15.5-16.8	6.6-7.5	9.3-10.2	12.5-13.5	15.5-16.8
1.3 ความต้านแรงดึงต่ำสุด(N)	5,591	18,518	28,974	5,591	10,420	18,518	28,974
2. ตัวกั้นตัวนำ (conductor screen)	ต้องเป็นสารกึ่งตัวนำ (semi-conducting) มีค่าความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรสูงสุดไม่เกิน 5,000 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง และไม่เกิน 50,000 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และมีความยืด(elongation) ต่ำสุด 100% ภายหลังจากที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน						
2.1 ความหนาต่ำสุดของตัว กั้นตัวนำ (mm)	0.0635						
2.2 ความหนาเฉลี่ยของตัวกั้น ตัวนำ (mm)	-						
3. ฉนวน (insulation)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนไม่มีคาร์บอนแบล็กที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเพอร์ออกไซด์ (peroxide cross linking agent)						
3.1 ความหนาของฉนวน (mm)	ต่ำสุด 1.72			ต่ำสุด 2.858			
	เฉลี่ย 1.91			เฉลี่ย 3.175			
4. เปลือก (sheath)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนชนิดเติมคาร์บอนแบล็กไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 และมีคุณสมบัติต้านทานการเกิดรอย(track resistance)						
4.1 ความหนาของเปลือก (mm)	ต่ำสุด 1.72			ต่ำสุด 2.858			
	เฉลี่ย 1.91			เฉลี่ย 3.175			
5. เส้นผ่านศูนย์กลางของ สายไฟ (mm)	15.47- 16.46	21.21- 22.67	24.03- 25.83	19.91- 21.48	23.00- 25.00	25.56- 27.48	28.93- 31.08

ตารางที่ ก.5 ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้และขนาดโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ ตาม PEA

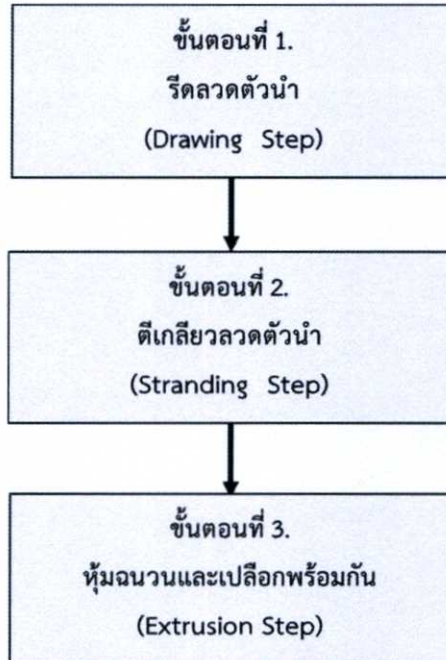
Specification No. RCBL-038/2559 สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด 22 กิโลโวลต์ และ 33 กิโลโวลต์

ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้ และขนาดโครงสร้าง	สำหรับสายไฟที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด							
	22 กิโลโวลต์				33 กิโลโวลต์			
ขนาดตัวนำ	50	95	120	185	50	95	120	185
1. ตัวนำ (conductor)	ต้องเป็นลวดอะลูมิเนียมรีดแข็งตีเกลียวรวมศูนย์กลมอัดแน่น (compact round concentric lay stranding) ตาม มอก. 293							
1.1 จำนวนเส้นลวดตัวนำ ต่ำสุด (เส้น)	6	15	15	30	6	15	15	30
1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวนำ (mm)	8.00 ±1%	11.45 ±1%	12.95 ±1%	15.98 ±1%	8.00 ±1%	11.45 ±1%	12.95 ±1%	15.98 ±1%
<i>Spec. เดิม</i>	8.33	11.45	12.95	15.98	8.33	11.45	12.95	15.98
1.3 ความต้านแรงดึงต่ำสุด(N)	7,313	14,098	18,518	28,974	5,591	10,420	18,518	28,974
<i>Spec. เดิม</i>	7,890	14,380	19,110	29,600	7,890	14,380	19,110	29,600
2. ตัวกั้นตัวนำ (conductor screen)	ต้องเป็นสารกึ่งตัวนำ XLPE (semi-conducting XLPE) มีค่าความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรสูงสุด ไม่เกิน 50,000 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส							
2.1 ความหนาต่ำสุดของตัว กั้นตัวนำ (mm)	0.07 <i>(Spec. เดิม 0.0635)</i>							
2.2 ความหนาเฉลี่ยของตัวกั้น ตัวนำ (mm)	0.3 <i>(Spec. เดิม 0.3)</i>							
3. ฉนวน (insulation)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนไม่มีคาร์บอนแบล็กที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเพอร์ออกไซด์ (peroxide cross linking agent)							
3.1 ความหนาของฉนวน (mm)	ต่ำสุด 4.365 <i>(Spec. เดิม 2.858)</i>				ต่ำสุด 6.462 <i>(Spec. เดิม 4.001)</i>			
	เฉลี่ย 4.85 <i>(Spec. เดิม 3.175)</i>				เฉลี่ย 7.18 <i>(Spec. เดิม 4.445)</i>			
4. เปลือก (sheath)	ต้องเป็นครอสลิงกด์พอลิเอทิลีนชนิดเติมคาร์บอนแบล็กไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 และมีคุณสมบัติต้านทานการเกิดรอย (track resistance)							
4.1 ความหนาของเปลือก (mm)	ต่ำสุด 1.575 <i>(Spec. เดิม 2.858)</i>				ต่ำสุด 1.575 <i>(Spec. เดิม 2.858)</i>			
	เฉลี่ย 1.75 <i>(Spec. เดิม 3.175)</i>				เฉลี่ย 1.75 <i>(Spec. เดิม 3.175)</i>			
5. เส้นผ่านศูนย์กลางของ สายไฟ (mm) <i>Spec. เดิม</i>	21.8	25.25	26.75	29.78	26.46	29.91	31.41	34.44
	22.0	25.2	26.7	29.7	24.6	27.7	29.2	32.2

ภาคผนวก ข

ขบวนการผลิตสายเคเบิลอากาศ

สายเคเบิลอากาศ (Space Aerial Cable : SAC) จะมีขั้นตอนกระบวนการผลิตในโรงงาน 3 ขั้นตอนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.1

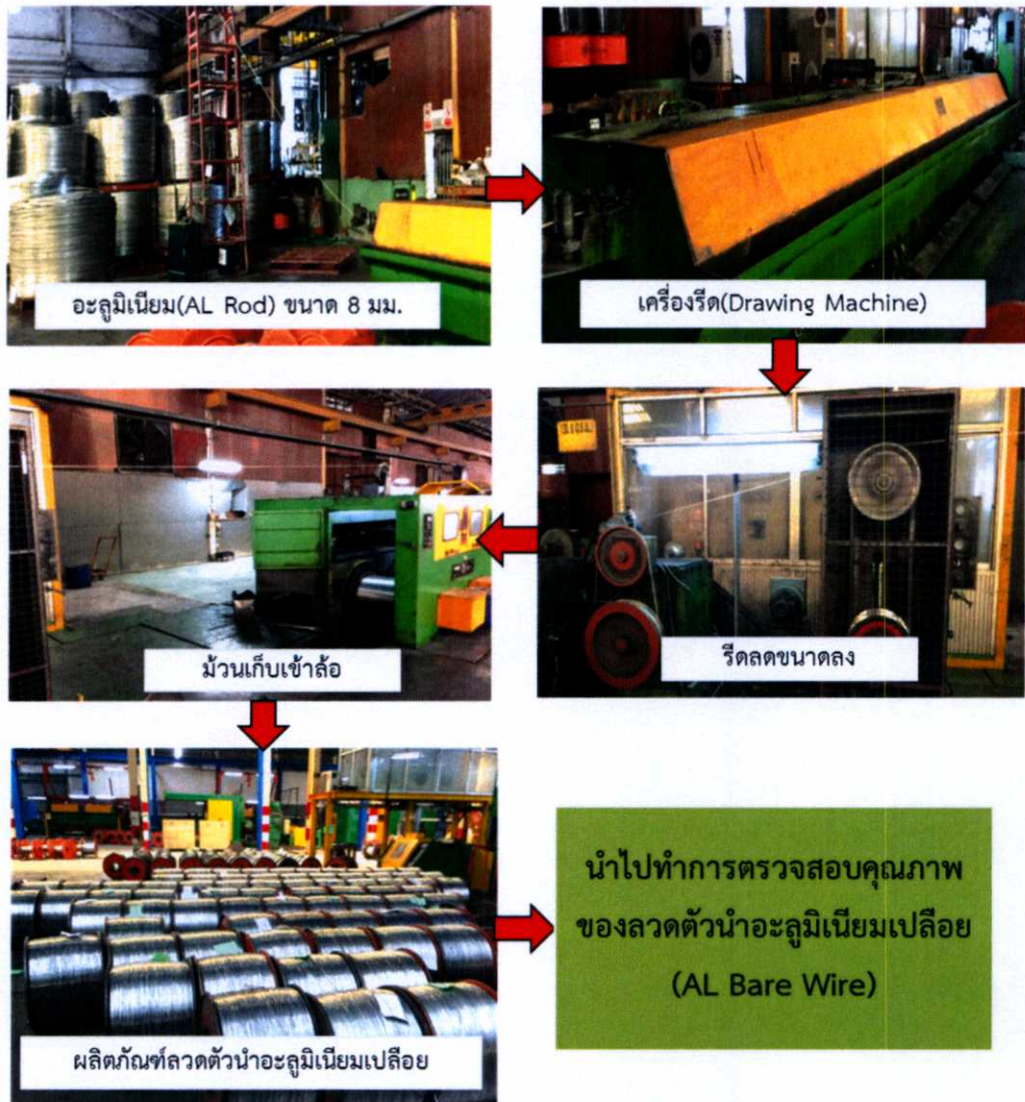


รูปที่ ข.1 ผังขั้นตอนกระบวนการผลิตของสายเคเบิลอากาศ(SAC)

ขั้นตอนกระบวนการผลิตของสายเคเบิลอากาศ SAC

ขั้นตอนที่ 1. รีดลวดตัวนำ (Drawing Step)

- นำแท่งอะลูมิเนียม(Aluminium rod) ขนาด 8 มิลลิเมตร มารีดลดขนาดลงไปเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการ ผลที่ได้หลังจากการรีดแล้ว จะเรียกว่า ลวดอะลูมิเนียมเปลือย(AL bare wire) ดังรูปที่ ข.2
- ในขั้นตอนนี้รีดลวดตัวนำนี้จะต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของลวดตัวนำ ตามหัวข้อที่ระบุไว้ในตารางที่ ข.1
- หลังจากผ่านการตรวจสอบในขั้นตอนนี้รีดลวดตัวนำแล้ว จะนำไปตีเกลียวลวดตัวนำในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป



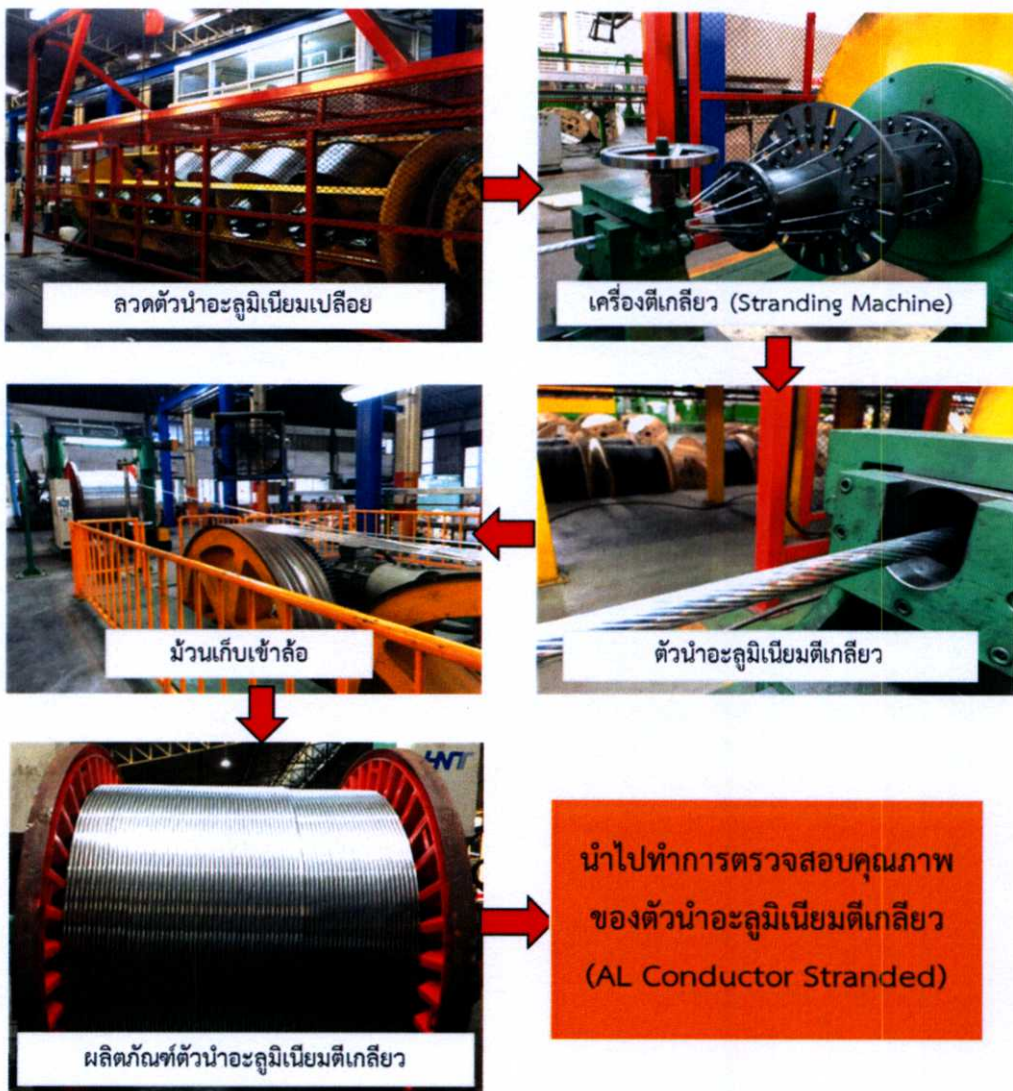
รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการรีดลวดตัวนำ

ตารางที่ ข.1 หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในขั้นตอนรีดลวดตัวนำ

หัวข้อการตรวจสอบประจำของโรงงาน (Routine Test)	การสุ่มตัวอย่างทดสอบ (Sampling)
1. สภาพทั่วไป (Appearance) เช่น ต้องไม่ดำคล้ำ หรือด่าง	100%
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (Diameter of wire)	100%
3. ความนำไฟฟ้าของลวด (Conductivity of wire)	20%
4. แรงดึงของลวด (Tensile strength of Wire)	20%
5. การยืดตัวของลวด (Elongation of Wire)	20%

ขั้นตอนที่ 2. ตีเกลียวลวดตัวนำ (Stranding Step)

- นำ AL bare wire ที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้วมาตีเกลียว โดยการตีเกลียวจะมี 2 วิธีการ คือ การตีเกลียวร่วมจุดศูนย์กลางธรรมดาไม่อัดแน่น(non-compacted concentric lay stranded) หรือตีเกลียวอัดแน่นร่วมจุดศูนย์กลาง(compact concentric lay stranded) ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของมาตรฐานและลูกค้า ดังรูปที่ ข.3
- ในขั้นตอนตีเกลียวลวดตัวนำนี้จะทำการตรวจสอบคุณภาพของลวดตัวนำ ตามหัวข้อที่ระบุไว้ในตารางที่ ข.2
- หลังจากผ่านการตรวจสอบในขั้นตอนตีเกลียวลวดตัวนำแล้ว จะนำไปหุ้มฉนวนและเปลือกในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นสุดท้าย



รูปที่ ข.3 ขั้นตอนการตีเกลียวลวดตัวนำ

ตารางที่ ข.2 หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในขั้นตอนตีเกลียวลวดตัวนำ

หัวข้อการตรวจสอบประจำของโรงงาน (Routine Test)	การสุ่มตัวอย่างทดสอบ (Sampling)
1. สภาพทั่วไป (Appearance) เช่น เกลียวไม่อัดแน่น	100%
2. จำนวนของเส้นลวดตัวนำ (Number of wires)	100%
3. ทิศทางของการตีเกลียว (Direction of lay)	100%
4. อัตราของการตีเกลียว (Pitch ratio)	100%
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (Diameter of conductor)	100%
6. ความต้านทานของตัวนำ (Conductor resistance)	100%
7. แรงดึงของตัวนำ (Tensile strength of conductor)	20%

ขั้นตอนที่ 3. หุ้มฉนวนและเปลือกพร้อมกัน (Extrusion Step)

- นำตัวนำตีเกลียว(stranded conductor) ที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้วมาหุ้มฉนวนและเปลือกด้วยเครื่องหุ้มชนิด CV (continuous vulcanization) Line โดยเครื่องหุ้มชนิดนี้จะทำการหุ้ม ทั้ง 3 ชั้นในเวลาเดียวกัน (triple extrusion) คือ ชั้นตัวกันตัวนำ(conductor screen) ซึ่งเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีน, ฉนวนซึ่งเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก(XLPE-unfilled carbon black Insulation) และเปลือกซึ่งเป็นครอสลิงค์พอลิเอทิลีนที่ผสมคาร์บอนแบล็ก (XLPE-filled carbon black sheath) โดยใช้อุณหภูมิในการบดเม็ดพลาสติกทั้ง3 ชนิดดังกล่าวนี้ อยู่ในช่วงประมาณ 113-118°C หลังจากหุ้มเข้ากับตัวนำแล้วต้องใช้อุณหภูมิในการบ่ม (curing) อยู่ในช่วงประมาณ 317-375°C เพื่อให้ฉนวนนั้นเกิดครอสลิงค์ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการ curing พอสมควร โดยท่อ curing จะมีหลาย zone ด้วยกัน เช่นดังรูปที่ ข.4 จะมีทั้งหมด 7 Zone เนื่องจากสายที่หุ้มมีอุณหภูมิที่สูงมาก เพราะฉะนั้นจึงทำให้ระยะทางท่อของเครื่องหุ้มนี้มีความยาวมากกว่าเครื่องหุ้มชนิดอื่นๆ จะมีการใช้น้ำหรือแก๊ส N₂ ช่วยในการ cooling เพื่อให้อุณหภูมิของสายนั้นเย็นลงก่อนที่จะม้วนเก็บเข้าไปยังในล้อเก็บสาย
- ในขั้นตอนหุ้มนี้จะทำการตรวจสอบคุณภาพตามหัวข้อที่ระบุไว้ในตารางที่ ข.3 เป็นการตรวจสอบขั้นตอนสุดท้าย(final inspection)
- เมื่อผ่านการตรวจสอบทั้งหมดแล้ว จึงจะนำไปบรรจุ (packing) และส่งมอบให้ลูกค้าต่อไป

ตารางที่ ข.3 หัวข้อการตรวจสอบคุณภาพและการสุ่มตัวอย่างทดสอบในขั้นตอนหุ้มฉนวน และเปลือก (ขั้นตอนสุดท้าย)

หัวข้อการตรวจสอบประจำของโรงงาน (Routine Test)	การสุ่มตัวอย่างทดสอบ (Sampling)
1. สภาพทั่วไป (Appearance) เช่น ตัวนำต้องไม่เกิดออกไซด์, ตัวกั้นตัวนำต้องไม่ฝังในตัวนำ เป็นต้น	100%
2. โครงสร้างทุกมิติของสายไฟ (Constructional check)	100%
3. เครื่องหมายบนสายไฟ (Marking)	100%
4. การทนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (AC high voltage test)	100%
5. ความต้านทานของฉนวน (Insulation resistance test)	20%
6. ความต้านทานของตัวนำ (Conductor resistance)	20%
7. ความต้านแรงดึงและความยืดก่อนและหลังแรงอายุใช้งาน ของฉนวนและเปลือก (Tensile strength and elongation of Insulation and sheath before and after ageing)	10%
8. ความยืดตัวเมื่อได้รับความร้อนของฉนวนและเปลือก (Hot set test of insulation and sheath)	10%

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech : Surface Resistance Investigation for Space Aerial Cable”, 2015 The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH) 12-13 June 2015, Bangkok, Thailand, pp. 95-97.

ISLH 2015

The 2015 ISLH International Conference



ISLH | KMITL 2015

Proceedings of the International Symposium on Lightning Protection
and High Voltage Engineering 2015 (ISLH 2015)

June 12 – 13, 2015

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand



Surface Tracking Resistance Investigation for Space Aerial Cable

S. Krirapee*, S. Potivejkul, N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
 1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
 *sathit@ctw.co.th

Abstract

This paper presents a study on surface tracking resistance of various types of cable insulations. Non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE) were investigated. The test specimen has a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1-3.2 mm thick. The test samples were divided into two groups for investigation. The former group was the new test samples from the molding process, whereas the latter was prepared from the cables. Then, both specimens were experimented. One side of the specimen was equipped in the rectangular hole of the high voltage electrode made of 10 mm diameter steel rod. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode. The distance between electrodes at dry condition was fixed for 25.4 mm. After finishing the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute. The test voltage level was in the range of 2.8 and 3.0 kV. The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B). The test voltage was applied to the test specimen until the insulation failure could be observed. Then, the insulation failure voltage and failure time were recorded. The test results showed that HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than carbon filled XLPE, LDPE and MDPE respectively. Besides, the specified thickness of the investigated specimen had not much effect on the surface tracking resistance characteristic of tested material. The analysis part for the test results showed that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

There are many kinds of tracking and erosion test for solid insulation as recommended in IEC 60587 [5] and ICEA S-66-524 [6]. Another interesting test technique is developed and described in [7]. This paper represents the research work of surface tracking resistance of various types of cable insulation such as non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE). The tested material was prepared by the cable company.

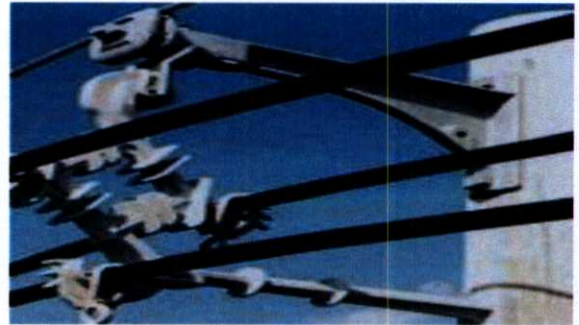
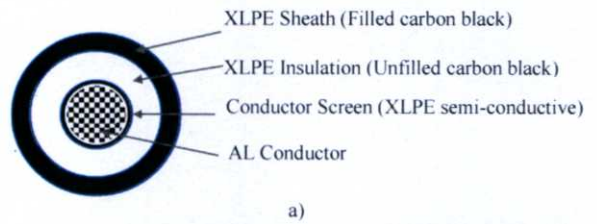


Fig. 1. a) SAC construction b) SAC for distribution system. c) Surface tracking problem of the installed SAC

Keywords: surface tracking resistance, space aerial cable

1. Introduction

Space Aerial Cable (SAC) is widely used in electrical distribution system in Thailand for long times. The structure of SAC [1] is shown in Figure 1. After SAC was installed in the distribution system for some years, its surface is always deteriorated from many factors such as ultraviolet, salt or contaminant and other installed accessory equipment [2-3]. The concept of resistance characteristics of wire and cable is well defined in [4].

2. Test Experiment

The test experiment was performed in the high voltage laboratory of Charoeng Thai wire and cable manufactory, Chachoengsao, Thailand. The test specimen had a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1-3.2 mm thick as shown in Figure 2. The test samples were divided into two groups for investigation. The former group was the new test samples from the molding process, whereas the latter test samples were prepared from the cables. Then both specimens were experimented. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of the steel rod. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode [7]. The distance between electrodes at dry condition was fixed for 25.4 mm as illustrated in Figure 3. The test circuit was setup as depicted in Figure 4. After finishing the test set up, The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B) [6]. AC high voltage was applied to the test specimen at the specific value and waited until the insulation failure could be observed (the happening of arcing at least 2 time continuously of testing). Then the insulation failure voltage and failure time were recorded. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute controlled by a speed control motor.



Fig. 4. Test circuit set-up

Where 1 : AC High-voltage supply 0-30kV, 2 : Current limiting resistor 51 k Ω , 3 : Voltage divider 200 kV, ratio 2000:1, 4 : AC/DC Kilovolt meter 200 kV, 5 : Test specimen under electrode arrangement, 6 : Motor with the speed of 4 RPM, 7 : Speed control motor.

3. Test Result

The test results show that HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than filled carbon XLPE, LDPE and MDPE respectively. Table I represents the tracking failure voltage and the failure test specimen from the experiment. Besides, the specified thickness of the investigated specimen had not much influence the surface tracking resistance characteristic of tested material. It was found that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

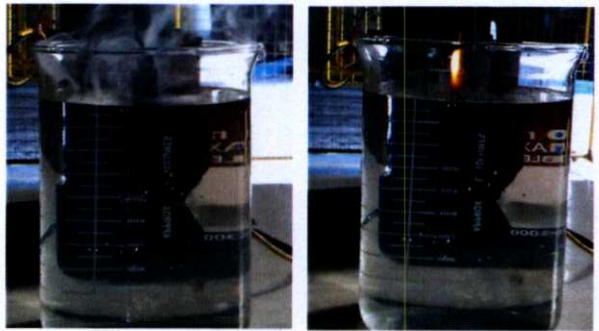


Fig. 5. Test results a) smoking after 1.3 minute of testing b) burning after smoking.

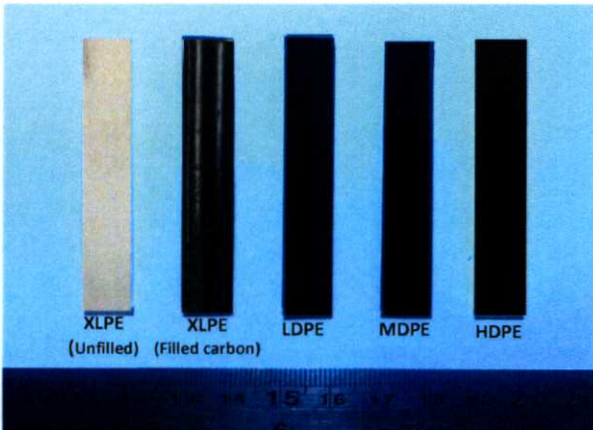


Fig. 2. Test specimens

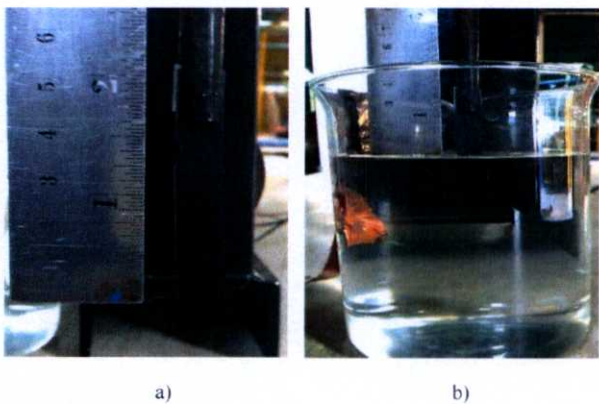















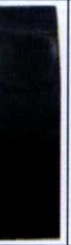


Fig. 3. a) Sample holder b) Electrode configuration

Table I
Time of tracking failure of the test specimens

Test voltage	2.8 kV		3 kV						
Test sample	XLPE (Sheath) SAC 25 kV		XLPE (Insulation) SAC 25 kV	XLPE (Sheath) SAC 25 kV		XLPE (Sheath) SAC 25 kV		XLPE (Sheath) SAC 35 kV	
						size 50 mm ²	size 240 mm ²	size 50 mm ²	size 240 mm ²
Thickness of the test specimen	~1.34 mm	~2.15 mm	~2.10 mm	~1.45 mm	~2.15 mm	~3.11 mm	~3.18 mm	~3.18 mm	~3.18 mm
Test specimen after test									
Test Result	Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
	50 cycles	50 cycles	50 cycles	4 cycles	4 cycles	4 cycles	4 cycles	4 cycles	4 cycles
	(-13 minute)	(-13 minute)	(-13 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)

Test voltage	3 kV						
Test sample	LDPE		MDPE		HDPE		
Thickness of the test specimen	~1.32 mm	~1.98 mm	~1.26 mm	~2.08 mm	~1.03 mm	~2.44mm	~2.52 mm
Test specimen after test							
Test Result	Fail	Fail	Fail	Fail	Pass	Pass	Pass
	4 cycles	4 cycles	4 cycles	4 cycles	50 cycles	50 cycles	50 cycles
	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-1 minute)	(-13 minute)	(-13 minute)	(-13 minute)

4. Conclusion

According to the testing experiment, the test voltage has effect on the insulation failure characteristic ; the higher test voltage the shorter failure time. Furthermore, the specified thickness of the investigated specimen had not much influence the surface tracking resistance characteristic of tested material. It can conclude that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give the special thanks to Electrical Engineering Department Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Charoong Thai Wire and Cable Public Company Limited for providing the facility in this research work.

References

- [1] Space Aerial Cable with Cross-linked Polyethylene for 25 kV and 35 kV Nominal voltage, TIS 2341-2007.
- [2] Vatcharin Saithongin, Boonchai Techaumnat : "Numerical Analysis of Electric Field at the Contact Point between A Spacer Aerial Cable and A Spacer", 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia, pp. 1-5.
- [3] Quoc Viet Huynh, Boonchai Techaumnat : "Study on The Field Behavior at The Contact Point between A Covered Conductor and A Dielectric Solid", Conference Proceedings of ISEIM2011, pp. 148-151.
- [4] E. K. Duffy, S. Jovanovitch, I. J. Marwick : "Discharge-Resistant Characteristics of The Polyethylenes for Wire and Cable", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-84, No. 9, September, 1965, pp. 815-825.
- [5] IEC 60587 : Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, Third edition 2007-05.
- [6] ICEA S-66-524 : Cross-Linked-Thermosetting - Polyethylene-Insulated Wire and Cable for The Transmission and Distribution of Electric Energy, Revision No.2, July 16, 1992.
- [7] C. F. Wallace, C. A. Bailey : "Dip-Track Test", IEEE Transactions on Electrical Insulation in Liquid Dielectrics under AC Voltage", ICDEL2011, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2011, pp. 1-4.

2. S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech, "STUDY ON SURFACE TRACKING RESISTANCE OF INSULATION MATERIALS OF CABLE", The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015

ISH19th International Symposium
on High Voltage Engineering**2015** Pilsen 2015
European Capital
of CultureFACULTY OF ELECTRICAL
ENGINEERING
UNIVERSITY
OF WEST BOHEMIA**August 23 – 28, 2015**[HOME](#)[PROGRAMME](#)[PAPER SUBMISSION](#)[REGISTRATION & ACCOMMODATION](#)[TOURS](#)[TRAVEL INFO](#)[SPONSORS & EXHIBITORS](#)

Pilsen

HOME

CONFERENCE ORGANIZED UNDER THE AUSPICES OF THE MINISTRY OF INDUSTRY AND TRADE OF CZECH REPUBLIC

**CONFERENCE PHOTOS**

- [View photos from the ISH 2015 in Pilsen](#)

Farewell Message**NEWS & NOTICE**

Conference Photos - view photos
from the ISH 2015 in Pilsen



Congratulation to ISH 2015
student awardees



Participant Registration



CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ELECTRIQUES
INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS

NÁRODNÍ KOMITÉT ČR a SR

STUDY ON SURFACE TRACKING RESISTANCE OF INSULATION MATERIALS OF CABLE

S. Krirapee*, S. Potivejkul, N. Pattanadech

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

*sathit@ctw.co.th

Abstract: This paper presents a study on surface tracking resistance of various types of cable insulations. Non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE) were investigated. The test specimen has a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1.52 mm thick. The test samples were divided into two groups for investigation. The former group was the new test samples, whereas the latter test samples were subjected to thermal ageing with 120°C for 168 hours. Then both specimens were experimented. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of 1 mm diameter Nichrome wire. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode. The distance between electrodes at dry condition was fixed for 25.4 mm. After finishing the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute. The test voltage level was in the range of 1-3.5 kV. The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B). The test voltage was applied to the test specimen until the insulation failure could be observed. Then, the insulation failure voltage and failure time were recorded. The test results showed that both unaged and aged HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than carbon filled XLPE, LDPE and MDPE respectively. Besides, the aforementioned thermal aging had not much effect on the surface tracking resistance characteristic of tested material. The analysis part for the test results showed that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

1 INTRODUCTION

Space Aerial Cable (SAC) is widely used in electrical distribution system in Thailand for long times. The structure of SAC [1] is shown in Figure 1. After SAC was installed in the distribution system for some years, its surface is always deteriorated from many factors such as ultraviolet, salt or contaminant and other installed accessory equipment [2-3]. The concept of resistance characteristics of wire and cable is well defined in [4]. There are many kinds of tracking and erosion test for solid insulation as recommended in IEC 60857 [5] and ICEA S-66-524 [6]. Another interesting test technique is developed and described in [7]. This paper represents the research work of surface tracking resistance of various types of cable insulation such as non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE). The tested material was prepared by the cable company.

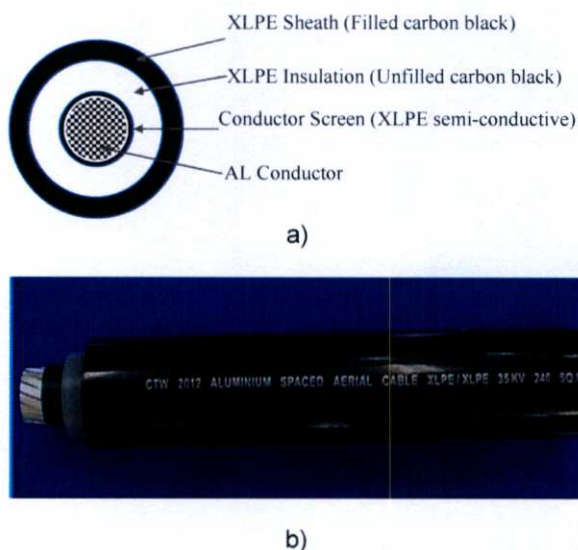


Figure 1: a) SAC construction b) SAC for distribution system.

2 TEST EXPERIMENT

The test experiment was performed in the high voltage laboratory of Charoong Thai wire and cable manufactory, Chachoengsao, Thailand. The test specimen had a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1.52 mm thick as shown in Figure 2. The test samples were divided into two groups for investigation. The former group was the unaged test samples, whereas the latter test samples were subjected to thermal ageing with 120°C for 168 hours. Then both specimens were experimented. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of 1 mm diameter Nichrome wire. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode [7]. The distance between electrodes at dry condition was fixed for 25.4 mm as illustrated in Figure 3. The test circuit was setup as depicted in Figure 4. After finishing the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The test voltage level was increased to 1-3.5 kV respectively. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute controlled by a speed control motor. The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B) [6]. The test voltage was applied to the test specimen until the insulation failure could be observed (the happening of arcing at least 2time continuously of testing). Then the insulation failure voltage and failure time were recorded.

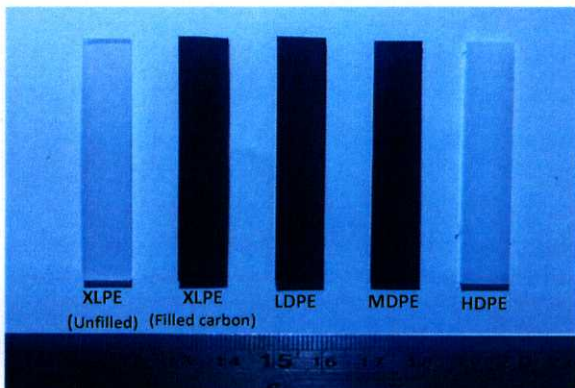


Figure 2: Test specimens

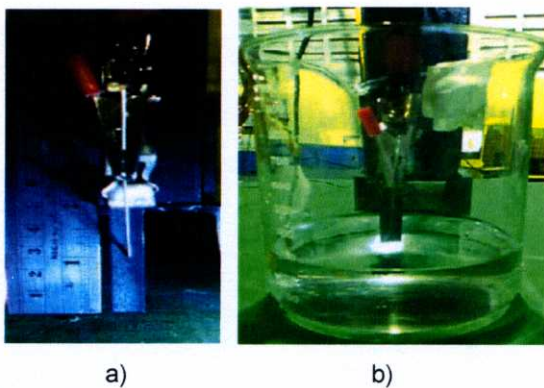


Figure 3: a) sample holder b) electrode configuration

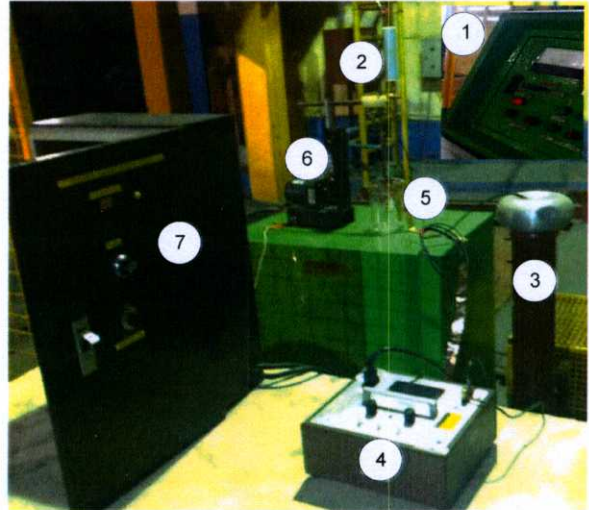


Figure 4: Test circuit set-up

Where 1 : AC High-voltage supply 0-30kV, 2 : Current limiting resistor 51 k Ω , 3 : Voltage divider 200 kV, ratio 2000:1, 4 : AC/DC Kilovolt meter 200 kV, 5 : Test specimen under electrode arrangement, 6 : Motor 4 RPM, 7 : Speed control motor.

3 TEST RESULT

The test results show that both unaged and aged HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than filled carbon XLPE, LDPE and MDPE respectively as shown in Table 1. Table 2 to Table 6 represent the failure test specimen from the experiment respectively. Besides, the aforementioned thermal aging had not much influence the surface tracking resistance characteristic of tested material. The time of failure of both tested specimen groups (unaged and thermal aged) was approximately the same. It was found that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

Table 1: Time of tracking failure of the test specimens

Test specimens		Time of tracking failure at ac test voltage					
		1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
XLPE (unfilled carbon)	unaged	>24 hr	>24 hr	1.04 min	1.07 min	28 sec	19 sec
	aged	>24 hr	>24 hr	1.49 min	43 sec	40 sec	22 sec
XLPE (filled carbon)	unaged	>24 hr	1.14 min	59 sec	41 sec	35 sec	25 sec
	aged	>24 hr	1.02 min	39 sec	32 sec	20 sec	18 sec
LDPE	unaged	>24 hr	38 sec	27sec	25 sec	20 sec	19 sec
	aged	>24 hr	39 sec	25 sec	22 sec	18 sec	19 sec
MDPE	unaged	>24 hr	20 sec	13 sec	10 sec	10 sec	10 sec
	aged	>24 hr	17 sec	13 sec	15 sec	11 sec	9 sec
HDPE	unaged	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.53 min	39 sec	39 sec
	aged	>24 hr	>24 hr	>24 hr	1.42 min	43 sec	39 sec

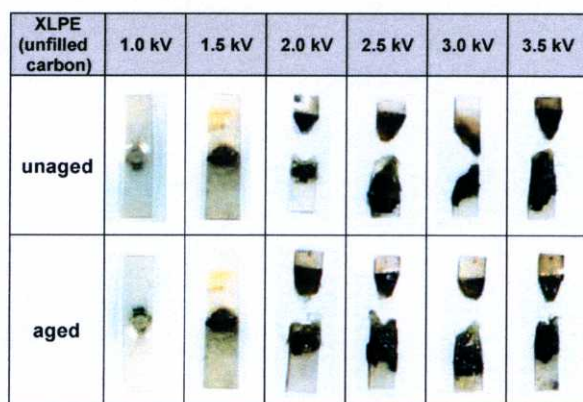
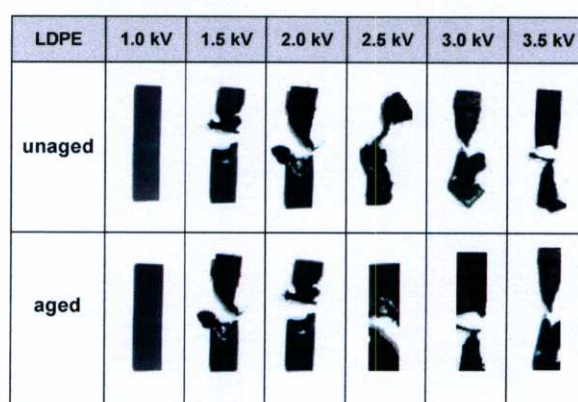
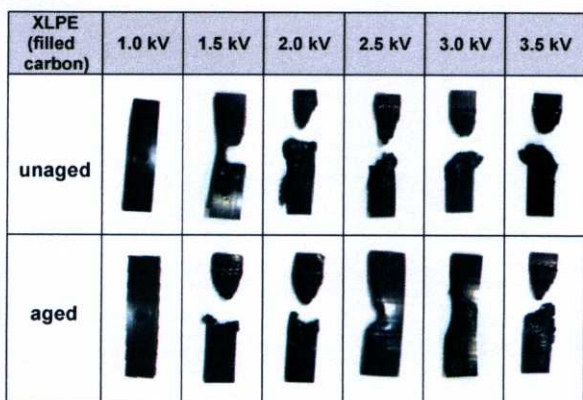
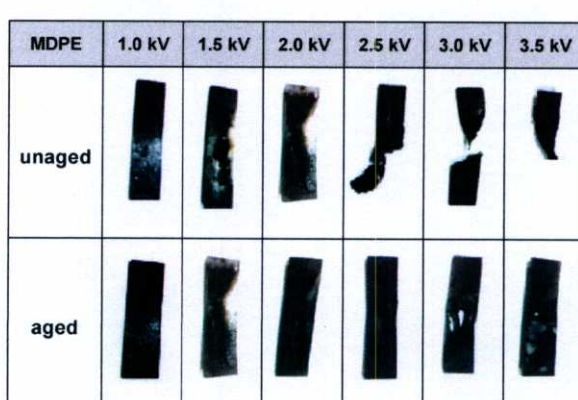












Table 2: Samples of surface tracking of XLPE (unfilled carbon) at different test voltages**Table 4:** Samples of surface tracking of LDPE at different test voltages**Table 3:** Samples of surface tracking of XLPE (filled carbon) at different test voltages**Table 5:** Samples of surface tracking of MDPE at different test voltages

Table 6: Samples of surface tracking of HDPE at different test voltages

HDPE	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
aged						

4 CONCLUSION

According to the testing experiment, the test voltage has effect on the insulation failure characteristic ; the higher test voltage the shorter failure time. Furthermore, the time of failure was a little bit reduced due to the thermal ageing. It can conclude that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to give the special thanks to Electrical Engineering Department Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Charoong Thai wire and cable company for providing the facility in this research work.

REFERENCES

- [1] Space Aerial Cable with Cross-linked Polyethylene for 25 kV and 35 kV Nominal voltage, TIS 2341-2007.
- [2] Vatcharin Saithongin, Boonchai Techaumnat : "Numerical Analysis of Electric Field at the Contact Point between A Spacer Aerial Cable and A Spacer", 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia, pp. 1-5.
- [3] Quoc Viet Huynh, Boonchai Techaumnat : "Study on The Field Behavior at The Contact Point between A Covered Conductor and A Dielectric Solid", Conference Proceedings of ISEIM2011, pp. 148-151.
- [4] E.K. Duffy, S.Jovanovitch, I.J. Marwick : "Discharge-Resistant Characteristics of The Polyethylenes for Wire and Cable", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-84, No. 9, September, 1965, pp. 815-825.
- [5] IEC 60587 : Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, Third edition 2007-05.

- [6] ICEA S-66-524 : Cross-Linked-Thermosetting - Polyethylene-Insulated Wire and Cable for The Transmission and Distribution of Electric Energy, Revision No.2, July 16, 1992.
- [7] C.F Wallace, C.A. Bailey : "Dip-Track Test", IEEE Transactions on Electrical Insulation in Liquid Dielectrics under AC Voltage", ICDL2011, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2011, pp.1-4.

บทความตีพิมพ์ Journal



Procedia
Computer Science

3. Sathit Krirapee, Siriwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, "Comparison of Voltage-Time to Surface Failure of Various Insulation Material for Space Aerial Cables", 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand, Procedia Computer Science 86 (2016) 413 – 416

iEECON 2016

2016 INTERNATIONAL ELECTRICAL ENGINEERING CONGRESS



Chiang Mai, Thailand

March 2 - 4, 2016

International conference on communications
 International conference on electronics & control
 International conference on digital signal processing
 International conference on power & energy
 International conference on computer & IT





2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand

Comparison of Voltage-Time to Surface Failure of Various Insulation Material for Space Aerial Cables

Sathit Krirapee^{a,b,*}, Siriwat Potivejkul^a, Norasage Pattanadech^a

^a*Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.*

^b*Charoong Thai Wire and Cable Public Company Limited, Chachoengsao, Thailand.*

Abstract

This paper aims to represent the investigation of surface tracking resistance of various types of cable insulations. Five kinds of cable material i.e. non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE) were examined. The test specimen has a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1.52 mm in thickness. The test samples were classified into two groups for investigation. The former group was the new test samples, whereas the latter test samples were stressed by thermal ageing with 120°C for 168 hours. Then both specimens were examined. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of 1 mm diameter Nichrome wire. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode. The spacing between electrodes at dry area was determined for 25.4 mm. After completion of the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The dip rate of the specimen into the solution was set up as 4 times per minute. The test voltage level was in the range of 1-3.5 kV. The experiment was performed in accordance with ICEA S-66-524 (Method B). The test voltage was applied to the test specimen until the insulation failure could be observed. Then, the insulation failure voltage and failure time were recorded. The test results illustrated that both unaged and aged HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than carbon filled XLPE, LDPE and MDPE respectively. Besides, the thermal stress aging had not much effect on the surface tracking resistance characteristic of tested material. It can be summarized that the material structure much more influenced the surface tracking characteristic of the cable material.

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of iEECON2016

Keywords: Crosslink polyethylene; Surface tracking resistance; Space aerial cable;

* Corresponding author. Tel.: +66-38-593-401-10 ; fax: +66-38-593-400.

E-mail address: sathit@ctw.co.th

1. Introduction

Focusing on the electrical distribution system in Thailand, Space Aerial Cable (SAC) as shown in Fig.1 is widely used in for long times.

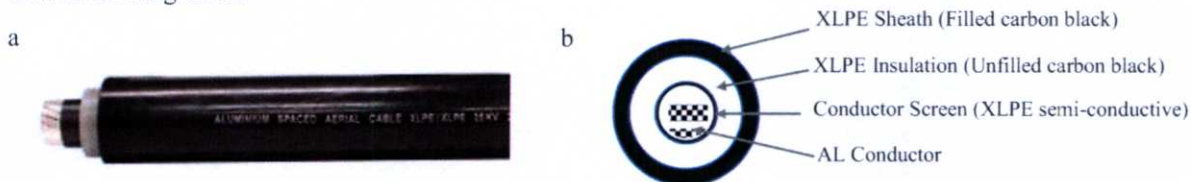


Fig. 1. (a) SAC for distribution system; (b) SAC construction [1].

Many evident revealed that the surface of some SAC have been deteriorated after they was installed for some years which may cause by many factors such as salt, contaminant, ultraviolet, and other installed accessory equipment [2-3]. The resistance characteristic concept of wire and cable is well explained in [4]. Many kinds of tracking and erosion test for solid insulation are recommended in IEC 60587 [5] and ICEA S-66-524 [6]. Another interesting test technique is developed and described in [7]. This research work investigated the surface tracking resistance of various types of cable insulation i.e. non carbon filled crosslink polyethylene (XLPE), carbon filled XLPE, low density polyethylene (LDPE), medium density polyethylene (MDPE), and high density polyethylene (HDPE). This study applied ICEA S-66-524 as the tracking & erosion test. The tested material was prepared by the cable company.

2. Test Experiment

The test experiment was performed in the high voltage laboratory of CTW. The test specimen had a dimension of 10 mm in width, 50.8 mm in length and 1.52 mm in thickness as illustrated in Fig.2.

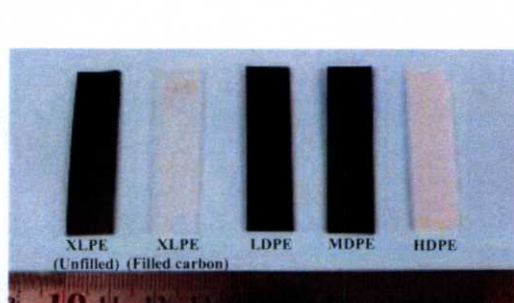


Fig. 2. Test specimens.

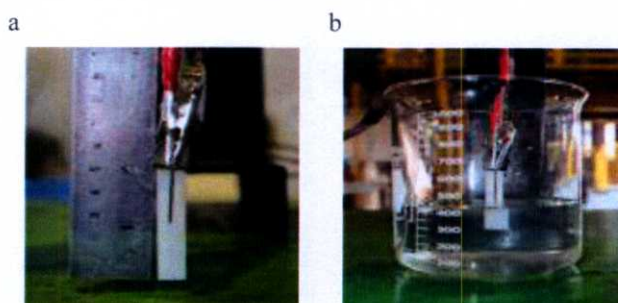


Fig. 3. (a) Sample holder; (b) Electrode configuration

The test samples were classified into two groups. The former group was the new test samples, whereas the latter test samples were subjected by thermal stress of 120°C for 168 hours. Then the specimens were investigated. One side of the specimen was contacted with high voltage electrode terminal made of 1 mm diameter Nichrome wire. Another side of the test specimen was dipped into 0.1 percent solution of ammonium chloride as grounded electrode [7]. The distance between electrodes at dry area section was fixed for 25.4 mm as depicted in Fig.3. The test circuit was setup as shown in Fig.4.

After complete the test set up, AC high voltage was applied to the test specimen. The test voltage was increased from 0 to 1-3.5 kV depending on the test experiment condition. The dip rate of the specimen into the solution was fix for 4 times per minute controlled by a speed control motor. The experiment was performed according to ICEA S-66-524[6]. The test voltage was applied to the tested specimen until the insulation failure was observed (the happening of arcing at least 2 times continuously of testing). Then the failure voltage and failure time were recorded.

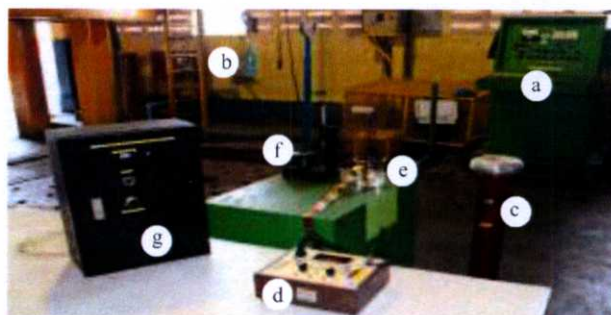


Fig. 4. Test experiment set-up : a) AC High-voltage supply 0-30kV; b) Current limiting resistor 51 k Ω ; c) Voltage divider 200 kV, ratio 2000:1; d) AC Kilovolt meter; e) Test specimen under electrode arrangement; f) Motor 4 RPM; g) Speed control motor.

3. Test Result

All The test results represented that both unaged and aged HDPE and non carbon filled XLPE provided the higher surface tracking resistance than filled carbon XLPE, LDPE and MDPE respectively as shown in Fig. 5. Table 1-5 demonstrate the failure test specimen from the experiment. Moreover, it was found that the thermal ageing had not much influence the surface tracking resistance characteristic of tested material. The time of failure of both tested specimen groups (unaged and thermal aged) was approximately the same. Therefore, the material structure should had much more affected the surface tracking characteristic of the cable material.

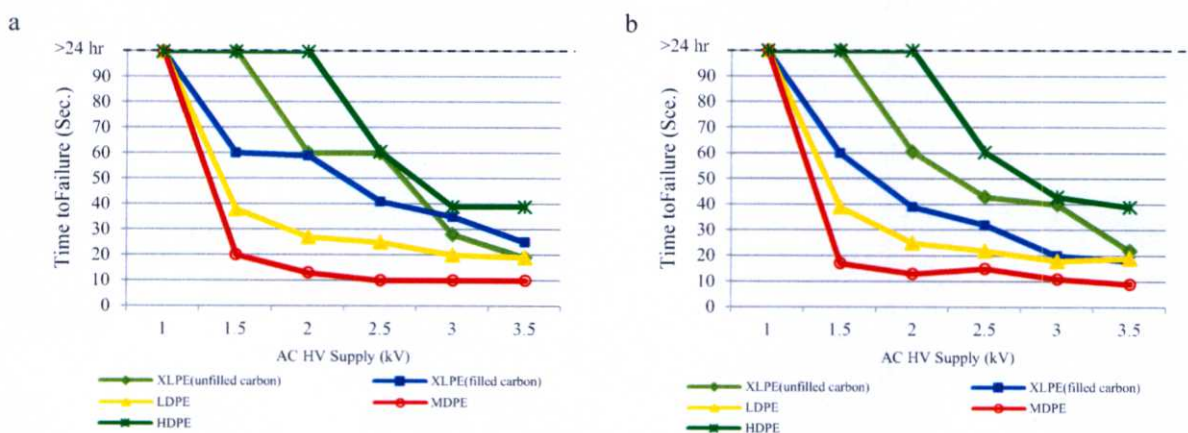


Fig. 5. Voltage and time relationship of tracking failure of the test specimens: (a) Unaged specimens; (b) Aged specimens.

4. Conclusion and Discussion

According to the test results, the test voltage clearly affected the time to failure of surface resistance of the cable materials; the higher test voltage the shorter failure time. Additionally, the time of failure was a little bit reduced due to the thermal ageing. The test result is corresponding to the former research employing different kind of the electrode configuration [8] which can be summarize as shown in Fig.6. Therefore, it can be concluded that the material structure or material types much more strongly influenced the surface tracking characteristic of the cable material

Acknowledgements

The authors would like to give the special thanks to Electrical Engineering Department Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Charoong Thai Wire & Cable Public Company Limited.

Table 1. Samples of surface tracking of XLPE (unfilled carbon) at different test voltages.

XLPE (unfilled carbon)	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail
aged						
	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail

Table 2. Samples of surface tracking of XLPE (filled carbon) at different test voltages.

XLPE (filled carbon)	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
aged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

Table 3 Samples of surface tracking of LDPE at different test voltages.

LDPE	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
aged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

Table 4. Samples of surface tracking of MDPE at different test voltages.

MDPE	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
aged						
	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail

Table 5 Samples of surface tracking of HDPE at different test voltages.

HDPE	1.0 kV	1.5 kV	2.0 kV	2.5 kV	3.0 kV	3.5 kV
unaged						
	Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail
aged						
	Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail

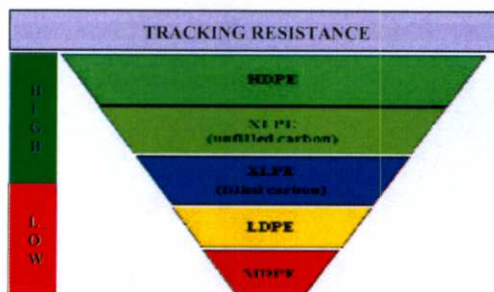


Fig. 6. Summarized diagram of the surface tracking characteristic of the cable materials.

References

1. Space Aerial Cable with Cross-linked Polyethylene for 25 kV and 35 kV Nominal voltage, TIS 2341-2007.
2. Vatcharin Saithongin, Boonchai Techaumnat : "Numerical Analysis of Electric Field at the Contact Point between A Spacer Aerial Cable and A Spacer", 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia, pp. 1-5.
3. Quoc Viet Huynh, Boonchai Techaumnat : "Study on The Field Behavior at The Contact Point between A Covered Conductor and A Dielectric Solid", Conference Proceedings of ISEIM2011, pp. 148-151.
4. E.K. Duffy, S.Jovanovitch, I.J. Marwick : "Discharge-Resistant Characteristics of The Polyethylenes for Wire and Cable", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-84, No. 9, September, 1965, pp. 815-825.
5. IEC 60587 : Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, Third edition 2007-05.
6. ICEA S-66-524 : Cross-Linked-Thermosetting - Polyethylene-Insulated Wire and Cable for The Transmission and Distribution of Electric Energy, Revision No.2, July 16, 1992.
7. C.F Wallace, C.A. Bailey : "Dip-Track Test", IEEE Transactions on Electrical Insulation in Liquid Dielectrics under AC Voltage", ICDL2011, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2011, pp.1-4.
8. S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech : Surface Resistance Investigation for Space Aerial Cable", 2015 The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH) 12-13 June 2015, Bangkok, Thailand, pp. 95-97.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายสาธิต ไกรระภี
 วัน เดือน ปีเกิด 13 กรกฎาคม 2514 ที่จังหวัดชัยนาท
 ที่อยู่ปัจจุบัน 59/14 หมู่บ้านฟ้านันทวัน ถนนประชาร่วมใจ
 แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510
 ปัจจุบันทำงานที่ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด มหาชน
 ตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ

ประวัติการศึกษา

- 2557 - ปัจจุบัน ศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2538 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- 2535 สำเร็จการศึกษาระดับอนุปริญญา สาขาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซีเมนต์ไทยอนุสรณ์ อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี
- 2532 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม จังหวัดชัยนาท
- 2526 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนถาวรพิทยาคม จังหวัดชัยนาท

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

- ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ (International Journal) : Procedia Computer Science
 : Sathit Krirapee, Siritwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, "Comparison of Voltage-Time to Surface Failure of Various Insulation Material for Space Aerial Cables" Procedia Computer Science 86 (2016) 413 – 416.
- ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ iEECON 2016 ที่จังหวัดเชียงใหม่
 : Sathit Krirapee, Siritwat Potivejkul, Norasage Pattanadech, "Comparison of Voltage-Time to Surface Failure of Various Insulation Material for Space Aerial Cables", 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand, paper 150.
- ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ ISH 2015 ที่ประเทศสาธารณรัฐเช็ก
 : S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech, "STUDY ON SURFACE TRACKING RESISTANCE OF INSULATION MATERIALS OF CABLE", The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen (ISH), Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.
- ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ ISLH 2015 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 : S. Krirapee, S. Potivejkul, N. Pattanadech : Surface Resistance Investigation for Space Aerial Cable", 2015 The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH), 12-13 June 2015, Bangkok, Thailand, pp. 95-97.