

การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับ
ระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

นายปรัชญา แก้วจันทิก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**AGEING DETERIORATION OF HIGH-DENSITY
POLYETHYLENE CABLE SPACER FOR
DISTRIBUTION SYSTEMS UNDER ARTIFICIAL
ACCELERATED AGEING TEST**

Pratya Kaewchanthuek



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2013

การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับ
ระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. ธนัชชัย กุลวรรณิขพงษ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. รอ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปรัชญา แก้วจันทิก : การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ (AGEING DETERIORATION OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE CABLE SPACER FOR DISTRIBUTION SYSTEMS UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED AGEING TEST)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี, 161 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุ ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ และการสึกกร่อนของพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบดังนี้ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ 1,000 ชั่วโมง การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด 1,000 ชั่วโมง และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ 30,000 รอบ ผลจากการวิจัยพบว่า เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นในระหว่างการทดสอบ และพบว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถเห็นร่องรอยของการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ ได้อย่างชัดเจนโดยเฉพาะตำแหน่งจุดต่อลงดิน จากการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการสึกกร่อนสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางกายภาพ นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย FTIR ของเคเบิลสเปเซอร์หลังการทดสอบพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาคาร์บอนิเซชัน ทำให้พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการเสื่อมอายุ ยืนยันได้จากปริมาณพันธะ C=O และ C=C ที่เพิ่มขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

PRATYA KAEWCHANTHUEK : AGEING DETERIORATION OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE CABLE SPACER FOR DISTRIBUTION SYSTEMS UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED AGEING TEST.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng.,
161 PP.

AGEING OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE / SALT FOG AGEING TEST/MULTI-STRESS TEST/SALT WATER DIP WHEEL TEST/CABLE SPACER

This thesis presents ageing deterioration of high-density polyethylene cable spacer for 22 kV distribution systems under artificial accelerated ageing test. Ageing characteristic and anti-tracking of cable spacer surface were studied. The test was divided into three parts: salt fog ageing test of 1000 hrs, multi-stress test of 1000 hrs and salt water dip wheel test of 30,000 cycles. During artificial ageing test, dry band arc and corona discharge were observed on cable spacer surface. After ageing test, the physical analysis results obtained from obviously surface erosion and tracking were observed especially on the ground end. Scanning electron microscopy showed erosion of cable spacer surface as same as those analyzed from visual observation. In addition, chemical analysis results from Fourier Transforms Infrared Spectroscopy show chemical change from oxidation and carbonization reaction occurring on tested cable spacer. Increasing of C=O and C=C bonds confirmed surface ageing.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ จรเกตุ เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ. อุตรดิตถ์ ที่ให้การช่วยเหลือเรื่องการจัดหาเคเบิลสเปเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบ รวมถึงให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเดชา พลวิเศษ เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ. นครราชสีมา ที่ให้การช่วยเหลือเรื่องการจัดหาเคเบิลสเปเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบและมาตรฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์ รวมถึงคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่วรวิทย์ พันธ์โฆ และพี่ ๆ กลุ่มเทคโนโลยีการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายประพจน์ แก้วจันทิก ผู้เป็นบิดา และนางบุญเหลือม แก้วจันทิก ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมาจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

ปรีชญา แก้วจันทิก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	6
2 ปรัชญาและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 สรุป.....	14
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 บทนำ	15
3.2 เคเบิลสเปเซอร์	15
3.2.1 ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์	16
3.2.2 การออกแบบและการผลิตเคเบิลสเปเซอร์	17
3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4	การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์	22
3.3	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	23
3.3.1	การเกิดพันธะโควาเลนต์ของโครงสร้างโมเลกุลเอทิลีน	25
3.3.2	ขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์	26
3.4	คุณสมบัติทางไฟฟ้า	27
3.4.1	ความคงทนไดอิเล็กทริก	27
3.4.2	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	28
3.4.3	กำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก	29
3.4.4	แฟกเตอร์กำลังงานสูญเสีย	30
3.4.5	สภาพต้านทาน	30
3.5	คุณสมบัติทางกล	30
3.6	คุณสมบัติทางความร้อน	31
3.7	ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์	34
3.7.1	ความเครียดทางกล	35
3.7.2	ความเครียดทางไฟฟ้า	35
3.7.3	ความเครียดจากสภาวะแวดล้อม	37
3.7.4	การเกิดออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน	38
3.7.5	การเกิดคาร์บอนในเซชันของพอลิเอทิลีน	39
3.8	กล้องจุลทรรศน์แบบสแตเรียโอ	39
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	40
3.10	เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	42
3.11	การวัดระดับความเปรอะเปื้อน	45
3.12	สรุป	46
4	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์	48
4.1	บทนำ	48
4.2	เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	49
4.3.1	อุปกรณ์การทดสอบ	50
4.3.2	การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์	54
4.3.3	วิธีดำเนินการทดสอบ	55
4.4	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	55
4.4.1	อุปกรณ์การทดสอบ	56
4.4.2	การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์	59
4.4.3	วิธีดำเนินการทดสอบ	60
4.5	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	62
4.5.1	อุปกรณ์การทดสอบ	63
4.5.2	การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์	66
4.5.3	วิธีดำเนินการทดสอบ	67
4.6	การป้อนแรงดันไฟฟ้าและแบ่งวัดแรงดันสูง	69
4.7	สรุป	71
5	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์	72
5.1	บทนำ	72
5.2	ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า	72
5.3	ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและผลการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	77
5.4	ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	85
5.5	ผลการวัดระดับความเปรอะเปื้อน	89
5.6	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของเคเบิลสเปเซอร์	90
5.6.1	การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ	90
5.6.2	การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	93
5.7	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเคเบิลสเปเซอร์	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8	การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว.....	113
5.9	สรุป.....	117
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	120
6.1	สรุป.....	120
6.2	ข้อเสนอแนะ	122
	รายการอ้างอิง	123
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ.....	127
	ภาคผนวก ข. มาตรฐานเกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์.....	141
	ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	155
	ประวัติผู้เขียน	161

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
3.1 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลนเคลือบเซรามิก และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	18
3.2 ขนาดสายเคเบิลที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์	20
3.3 คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	31
3.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ T_g และ T_m ของพอลิเมอร์	34
3.5 ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมี	44
3.6 ช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์	45
4.1 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	50
4.2 อุปกรณ์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	50
4.3 วงรอบการทดสอบสภาวะหมอกไอเกลือ	55
4.4 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	56
4.5 อุปกรณ์เพิ่มเติมการจำลองพหุความเครียด	56
4.6 วงรอบการทดสอบสภาวะพหุความเครียด	60
4.7 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	62
4.8 อุปกรณ์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	63
4.9 แรงดันทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	67
4.10 สรุปค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด	70
5.1 เปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ	77
5.2 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือรอบที่ 1	81
5.3 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือรอบที่ 2	82
5.4 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดรอบที่ 1	83
5.5 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดรอบที่ 2	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6	เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือรอบที่ 1.....87
5.7	เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือรอบที่ 2.....88
5.8	ผลการคำนวณ SDD ที่ได้จากการทดสอบ89
5.9	ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเรียงตามระดับความรุนแรง90
5.10	ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพที่ตรวจพบตามตำแหน่งต่าง ๆ92
5.11	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ95
5.12	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ด้วยพหุความเครียด.....96
5.13	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ (12.7 kV)97
5.14	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ (15 kV)98



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	การใช้เคเบิลสเปเซอร์ช่วยในการพาดสายไฟฟ้าแบบใหม่.....	2
1.2	เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกที่เสื่อมสภาพจากการใช้งาน	3
1.3	เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งาน	3
3.1	เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก.....	16
3.2	เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	17
3.3	เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในประเทศไทย อิหร่าน และอเมริกา	17
3.4	แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปเคเบิลสเปเซอร์	18
3.5	สายเคเบิลอากาศ	20
3.6	ตัวรัดสายแบบเส้นลวดอลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวนพอลิเอทิลีน	21
3.7	ตัวรัดสายแบบรัดและแบบล็อก	21
3.8	ลักษณะของการติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก.....	22
3.9	การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	22
3.10	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	23
3.11	โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน (ขยาย 525 เท่า)	24
3.12	ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์.....	24
3.13	การเกิดพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลเอทิลีน	25
3.14	โครงสร้างของ Activated Ethylene Molecule	26
3.15	ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ	33
3.16	ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์	35
3.17	การเกิดออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน.....	39
3.18	การเกิดคาร์บอนในเซชันของพอลิเอทิลีน	39
3.19	กล้องจุลทรรศน์แบบสแตไดโอ	40
3.20	ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
3.21	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 เครื่องฉาบผิวขึ้นงาน.....	42
3.23 เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR.....	43
4.1 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	49
4.2 ลักษณะห้องทดสอบ.....	52
4.3 การติดตั้งเครื่องสร้างหมอก	52
4.4 วงจรการวัดกระแสรั่วตามผิว.....	53
4.5 ชุดวัดกระแสรั่วตามผิว	53
4.6 บอร์ดแปลงสัญญาณ (DAQ Board).....	54
4.7 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์สถานะหมอกไอเกลือ	54
4.8 หลอดอัลตราไวโอเลต	57
4.9 การติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเลต.....	57
4.10 วงจรควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต.....	58
4.11 ชุดควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต	58
4.12 ฮีทเตอร์พร้อมชุดโคมและเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้ง	59
4.13 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับฮีทเตอร์	59
4.14 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์สถานะพหุความเครียด.....	60
4.15 ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ.....	61
4.16 อุปกรณ์ด้านแรงสูงสำหรับการทดสอบ	61
4.17 ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบการเสื่อมอายุแบบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ	62
4.18 ถังสแตนเลส	64
4.19 มอเตอร์.....	64
4.20 ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์	65
4.21 ชุดกรองน้ำแยกไอออน	65
4.22 ลักษณะการติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์บนเพลลา.....	66
4.23 ลักษณะการติดตั้งขั้วรับแรงดัน.....	66
4.24 ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดสอบ	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ชุดทดสอบการเสื่อมอายุแบบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ	68
4.26 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ	69
4.27 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ	69
5.1 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า	73
5.2 ตัวอย่างของ Triangular Mesh	74
5.3 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น	74
5.4 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวเคเบิลสเปเซอร์	78
5.5 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	79
5.6 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	79
5.7 ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้ง	85
5.8 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ	86
5.9 ตัวอย่างสารละลายจากความเปราะเปื้อนของการทดสอบต่าง ๆ	89
5.10 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานใหม่	93
5.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	100
5.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	100
5.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ	101
5.14 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	102
5.15 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด	103
5.16 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ	104
5.17 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ $C=C$ ต่อ $C-C$ ของการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด.....	107
5.19 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ $C=C$ ต่อ $C-C$ ของการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ.....	108
5.20 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ $C=O$ ต่อ $C-C$ ของการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ.....	109
5.21 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ $C=O$ ต่อ $C-C$ ของการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด.....	110
5.22 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ $C=O$ ต่อ $C-C$ ของการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ.....	111
5.23 ขนาดกระแสรั่วจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ.....	114
5.24 ขนาดกระแสรั่วจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด.....	115

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบเศรษฐกิจและภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นการพัฒนาคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าถือเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลต่อการพัฒนาระบบเศรษฐกิจของประเทศ ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบสายพาดในอากาศ (Overhead Line) เนื่องจากมีราคาต้นทุนในการติดตั้งและการซ่อมบำรุงรักษาต่ำ รวมทั้งสามารถมองเห็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสายส่งได้ง่ายกว่าระบบฝังใต้ดิน

เมื่อมีชุมชนใหม่เกิดขึ้นหรือชุมชนเดิมมีการขยายตัว สายไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีอยู่เดิมอาจจะไม่สามารถรองรับความต้องการกำลังงานไฟฟ้าเพิ่มได้อีก บางครั้งจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเดินสายไฟฟ้าใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรืออาจต้องทำการปักเสาไฟฟ้าพาดสายไฟฟ้าใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และใช้เวลาในการติดตั้งระบบใหม่ค่อนข้างนาน ทำให้ปัจจุบันระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงมีการพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวขึ้น โดยที่ไม่ต้องรื้อสายไฟฟ้าเดิมหรือตั้งเสาไฟฟ้าใหม่ นั่นคือ การนำระบบเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer System) เข้ามาช่วยในการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแทนระบบสายเปลือย (Bare Wire System) ซึ่งจะเป็นการนำสายเคเบิลหุ้มฉนวน (Covered Cable) มาใช้แทนสายเคเบิลแบบเปลือย โดยมี “ตัวแยกสายไฟฟ้า” หรือที่นิยมเรียกกันว่า “เคเบิลสเปเซอร์” (เรียกสั้น ๆ ว่า “สเปเซอร์”) เป็นตัวยึดจับสายเคเบิลตลอดแนวสาย ทำให้สามารถติดตั้งสายส่งได้หลายวงจร ลดระยะห่างระหว่างสายและลดการแกว่งของสายเคเบิลได้มาก อีกทั้งยังช่วยให้สามารถพาดสายในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เคเบิลสเปเซอร์มักใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณการส่งกระแสไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ เพราะใช้เวลาไม่นาน มีขั้นตอนสะดวกกว่า และสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการตั้งเสาเพิ่ม หรือการเปลี่ยนสายไฟฟ้าใหม่ให้เป็นขนาดที่รองรับกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากในการตั้งเสาใหม่และการเปลี่ยนสายไฟฟ้านั้น นอกจากจะต้องเปลี่ยนสายไฟฟ้าแล้ว ยังต้องเปลี่ยนอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

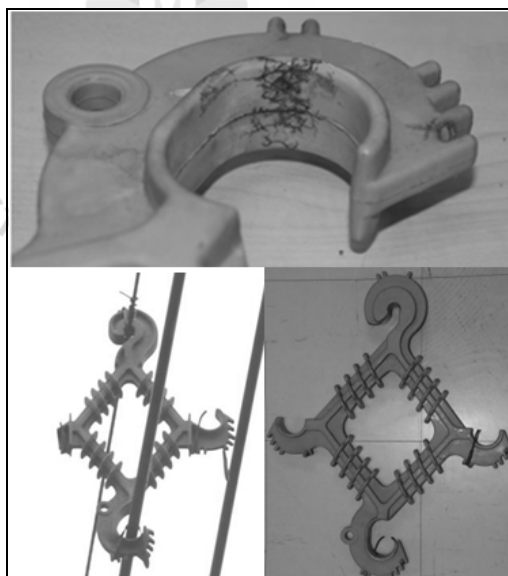


รูปที่ 1.1 การใช้เคเบิลสเปเซอร์ช่วยในการพาดสายไฟฟ้าแบบใหม่

อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ผิวของฉนวนหุ้มเคเบิลและเคเบิลสเปเซอร์ก็เกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้มีฝุ่นละอองมาเกาะที่เคเบิลสเปเซอร์ยากต่อการทำความสะอาดได้ด้วยน้ำฝน จนทำให้มีกระแสรั่วไหลเพิ่มสูงขึ้น คุณสมบัติการเป็นฉนวนของเคเบิลสเปเซอร์ก็เสื่อมสภาพลง เกิดชำรุดบริเวณจุดสัมผัสระหว่างเคเบิลสเปเซอร์กับสายเคเบิล นำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ฉนวนหุ้มสายชำรุดและเกิดการลัดวงจรในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และรูปที่ 1.3 ปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดไฟฟ้าดับและเป็นผลเสียต่อคุณภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างมาก ซึ่งสาเหตุในการเสื่อมสภาพก็มีหลายปัจจัย เช่น กระบวนการผลิต การเลือกวัสดุ และการออกแบบการผลิต ตัวแปรอื่นที่มีผลอย่างมากต่อการเสื่อมสภาพการเป็นฉนวน คือ สภาพแวดล้อมในการใช้งาน เช่น อากาศที่ร้อนชื้นและแดดที่แรงจัด เป็นต้น



รูปที่ 1.2 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกเสื่อมสภาพจากการใช้งาน
(ที่มา: อ้นชูริย์พร เชอสินธุ์, ม.ป.ป.)



รูปที่ 1.3 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์เสื่อมสภาพจากการใช้งาน
(ที่มา: อ้นชูริย์พร เชอสินธุ์, ม.ป.ป.)

เนื่องจากสถานะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ จึงนำมาสู่การศึกษาค้นคว้าและการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการเสื่อมอายุ การเสื่อมสมรรถนะความทนทานและการเสียสภาพการเป็นฉนวนของเคเบิลสเปเซอร์ โดยการจำลองสภาพการใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาองค์ความรู้สำหรับประยุกต์ใช้ประเมินค่าความเชื่อมั่นในการใช้งานเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อลดปัญหาในระบบจำหน่ายและเพื่อเพิ่มคุณภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะยาว

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density Polyethylene: HDPE) ของระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้การทดสอบการจำลองสภาพหมอกไอเกลือ การจำลองสภาพพายุความเครียด (มาตรฐาน IEC Publ. 61109) และการทดสอบแบบวงล้อย่น้ำเกลือ (มาตรฐาน IEC Publ. 62217)

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ภายใต้การทดสอบ การจำลองสภาพหมอกไอเกลือ การจำลองสภาพพายุความเครียด และการทดสอบแบบวงล้อย่น้ำเกลือ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดเดียวกับที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้งานจริง

1.3.2 การจ่ายไฟจะใช้ไฟฟ้าเฟสเดียวเท่านั้น

1.3.3 การทดสอบภายใต้ การจำลองสภาพหมอกไอเกลือ และการจำลองสภาพพายุความเครียด

1) กำหนดให้ห้องทดสอบมีขนาด 9.6 m^3

2) ใช้อัลตราโซนิคฮิวมิดิไฟเออร์ในการสร้างหมอกไอเกลือและหมอกไอสะอาด

3) ระยะเวลาทำการทดสอบต่อครั้ง 1,000 ชั่วโมง

1.3.4 การทดสอบแบบวงล้อย่น้ำเกลือ

1) เปลี่ยนน้ำเกลือ ทุก ๆ 7 วัน เพื่อรักษาความเข้มข้นของน้ำเกลือให้คงเดิม

2) การหมุน 1 รอบใช้เวลา 192 วินาที

3) ระยะเวลาทำการทดสอบต่อครั้ง 30,000 รอบ หรือ 1,600 ชั่วโมง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาปฏิกิริยารีดอกซ์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

1.4.2 ศึกษาข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 และ IEC Publ. 62217

1.4.3 ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ประกอบด้วย

1) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ ระยะเวลาทำการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

2) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด ระยะเวลาทำการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

3) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อย่น้ำเกลือ 30,000 รอบ

1.4.4 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพิกนนวนเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย

1) การสังเกต (visual Observation)

2) การตรวจสอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared : ATR-FTIR)

3) วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเสื่อมอายุเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

1.5.2 สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ภายใต้การจำลองสภาวะหมอกไอเกลือได้

1.5.3 สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ภายใต้การจำลองสภาวะพหุความเครียด

1.5.4 สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ด้วยวงล้อย่น้ำเกลือ 30,000 รอบได้

1.5.5 ทราบตำแหน่งที่เคเบิลสเปเซอร์เกิดการชำรุด เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือพัฒนาเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับผู้สนใจต่อไป

1.5.5 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการทดสอบการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในที่ประชุมวิชาการ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่าย ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณักวิจัยที่เคยมีการดำเนินการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการสืบค้นข้อมูลเช่น ข้อมูลจาก IEEE, IEC, WASET, Science Direct และอื่น ๆ ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิจัย และนำมาประยุกต์ พัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจาก การนำเคเบิลสเปเซอร์มาใช้งานร่วมกับสายเคเบิลหุ้มฉนวน ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น ยังถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ที่มีมาได้ไม่นานนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีการใช้งานได้ไม่กี่สิบปี จึงทำให้ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนั้น มีค่อนข้างน้อย แต่ก็ยังมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าวิจัย และสามารถสรุปการดำเนินงานวิจัยโดยอธิบายได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1967	Gill et al.	ทดลองผลของแรงดันอิมพัลส์ต่อเคเบิลสเปเซอร์ โดยจำลองระบบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าระยะห่างระหว่างเฟสกับนิวตรอลมีผลต่ออิมพัลส์ที่สเปเซอร์ได้รับ ระยะห่างมากอิมพัลส์ก็มีผลต่อสเปเซอร์น้อยและความสำคัญของฉนวนสเปเซอร์ก็จะมีค่าน้อย แต่เมื่อระยะห่างระหว่างเฟสกับนิวตรอลมีค่าน้อยก็จะทำให้ชนิดของฉนวนมีความสำคัญมากขึ้น
1969	Smith	ศึกษาและออกแบบเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อใช้งานในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยเน้นการใช้วัสดุในการทำเคเบิลสเปเซอร์ มีส่วนประกอบของอลูมินาที่ค่อนข้างสูง และทำการทดสอบวาวไฟตามผิว และกระแสรั่วไหลตามผิว จากการทดสอบวาวไฟตามผิวนั้นก็ได้ผลที่น่าพอใจ แต่การทดสอบกระแสรั่วตามผิวยังมีค่าสูง เนื่องมาจากผิวของเคเบิลสเปเซอร์มีการปนเปื้อนได้ง่าย จึงปรับปรุงโดยการเคลือบผิวของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยสารที่ทำให้ไม่เปียกน้ำ เช่น สารฟลูออโรคาร์บอน จึงทำให้ได้ผลที่น่าพอใจ
1990	Giam et al.	ศึกษาผลของความดันที่มีต่อการเสื่อมอายุของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปพัฒนาเป็นสายส่งกำลังงานไฟฟ้าได้นำทำการทดสอบโดยนำแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงไปอัดด้วยความดัน 1-300 บาร์ ที่อุณหภูมิ 70 °C พร้อมกับจ่ายแรงดันไฟฟ้าตลอดระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่า ที่ความดัน 300 บาร์ ค่าความคงทนทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าสูงกว่าที่ความดัน 1 บาร์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการทดสอบมากขึ้นก็ทำให้ความคงทนทางไฟฟ้าลดลง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1998	Khan et al.	ศึกษาการพ่นคื่นตัวคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยการแช่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในสารละลายเกลือที่มีค่าความนำไฟฟ้าตั้งแต่ $5-10^5 \mu\text{S/cm}$ และควบคุมที่ $23\pm 3^\circ\text{C}$, $44\pm 2^\circ\text{C}$ และ $73\pm 2^\circ\text{C}$ หลังการทดสอบ 3,000 ชั่วโมง พบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีการพ่นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นโดยสมบูรณ์ที่ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ $5 \mu\text{S/cm}$ ที่อุณหภูมิ $23\pm 3^\circ\text{C}$, $44\pm 2^\circ\text{C}$ แต่ที่ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายสูงขึ้น ณ อุณหภูมิใดก็ตามพบว่า เกิดการพ่นคื่นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการพ่นคื่นตัวคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย
1999	Ueki et al.	ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงคาร์บอน จากการศึกษาพบว่าผงคาร์บอนมีผลต่อการเพิ่มค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นอย่างมาก ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นให้ผลที่น้อยกว่า ดังนั้นผงคาร์บอนจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการใช้ปรับปรุงคุณภาพความเป็นฉนวนไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแทนที่ไทเทเนียมไดออกไซด์และเพิ่มความทนทานจากรังสีอัลตราไวโอเลต
2000	Champion et al.	ศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีน โดยใช้แรงดันไฟฟ้าช่วง $8-27 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ที่ความถี่ 50 Hz และอุณหภูมิช่วง $20-70^\circ\text{C}$ ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวทริอิง โดยเฉพาะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นประกอบกับแรงดันที่สูงขึ้นทำให้ความยาวของทริอิงทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นและรัศมีการแผ่ออกจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2002	Rocha et al.	นำเสนอการออกแบบการติดตั้งระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคเบิลสเปเซอร์ รวมทั้งเทคนิคที่น่าสนใจ วิธีการบำรุงรักษา ระบบให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยเทคนิคทั้งหมดที่เป็นของบริษัท CEMIC ซึ่งเป็นบริษัทเอกชนรายใหญ่
2003	บริษัท เอเชียน อินซูเลเตอร์ จำกัด (มหาชน)	ได้พัฒนาเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลนเคลือบเซรามิก ได้สำเร็จ ซึ่งทำขึ้นโดยใช้เซรามิกทั้งตัวเคเบิลสเปเซอร์และเคลือบด้วยพอร์ซเลนคุณสมบัติสำคัญที่เป็นจุดเด่นได้แก่ ความแข็งแรง ความคงทนต่อแสงแดด ค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลง และอายุการใช้งานที่ยาวนาน
2004	Schwantes et al.	ศึกษาความคงทนทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยการเติมสารเติมแต่งคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ซึ่งจากการวิจัยพบว่า การเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้ค่าความคงทนทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าสูงที่สุดคือ 5 MV/cm
2004	Wu et al.	ศึกษาผลของการรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีต่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากการศึกษพบว่า หลังการฉายรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดพันธะ C=O และ C-O ขึ้นสายโซ่ มีการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น แต่รูปร่างผลึกและระยะห่างผลึกยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวมีค่าลดลงและยังพบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความชอบน้ำสูงขึ้นด้วย
2005	Burani et al.	ศึกษาพฤติกรรมการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าและนำเสนอการตรวจวัดค่ากระแสรั่วไหล เพื่อใช้บ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพวัสดุพอลิเมอร์ของเคเบิลสเปเซอร์และสายเคเบิลหุ้มฉนวนในระบบจำหน่ายที่มีแนวโน้มสูงโดยเฉพาะบริเวณใกล้กับชายฝั่ง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2007	Phueakbuakhao	ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่ที่ผสมสารเติมแต่งคือแคลเซียมคาร์บอเนตและมีการปรับปรุงพื้นผิวแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยา 4 ชนิดได้แก่ กรดสเตียริก สารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน (AMPTES และ GPTMS) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากการทดลองพบว่า การปรับปรุงพื้นผิวแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ทนต่อแรงกระแทก เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ส่งผลให้ด้านทานการแตกหักมากขึ้นยืนยันได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2008	Bouford	นำเสนอบทความเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคือระบบที่ใช้เคเบิลสเปเซอร์แทนการใช้ระบบสายส่งแบบสายเปลือย เพื่อลดปัญหาในเรื่องของไฟฟ้าดับบ่อยและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบเดิมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสำหรับการตัดกิ่งไม้หรือต้นไม้ประมาณปีละหลายสิบล้านบาท
2008	การไฟฟ้านครหลวง	ศึกษาปรับปรุงเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกเพื่อลดปัญหาคูณภาพไฟฟ้า โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีเช่นเดียวกับลูกถ้วยฉนวนคือการเคลือบผิวแบบ Glazing และเพิ่มปีกให้กับเคเบิลสเปเซอร์ ผลคือ ใช้งานได้ยาวนานขึ้นและค่ากระแสรั่วตามผิวลดลง
2008	Mitsumoto et al.	ศึกษาผลของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อค่าประจุไฟฟ้าสะสมในฉนวนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตรโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 5 kV, 18 kV และ 30 kV มีการทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ 25-90 °C จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงและอุณหภูมิสูง ประจุสะสมในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะเป็นประจุบวกทำให้เกิดการคายประจุได้เร็วกว่ากรณีที่อุณหภูมิการทดสอบต่ำเนื่องจากมีประจุสะสมเป็นประจุลบ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	John et al.	ศึกษาผลการเร่งเสื่อมอายุด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต โดยทำการศึกษาวัสดุ 3 ชนิด เปรียบเทียบกัน คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน หลังการทดสอบ 144 ชั่วโมงพบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี และมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนไม่พบการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แต่พบว่าสีของพอลิเอทิลีนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนเล็กน้อย แต่ก็ยังมีค่าเฉลี่ยเล็กน้อย
2010	Lewin et al.	ศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ต่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากการศึกษาพบว่า การเกิดแรงดันอิมพัลส์ซ้ำ ๆ ทำให้ความคงทนต่อการเสียสภาพของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลกระทบต่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและผลของแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวและแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก
2011	Saithongin	ศึกษาสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลและเคเบิลสเปเซอร์ระบบ 22 kV ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีการเปรียบเทียบระหว่างเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกและชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งพบว่าสนามไฟฟ้าบริเวณจุดสัมผัสของเคเบิลสเปเซอร์ทั้งสองแบบจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น แต่ชนิดพอลิเอทิลีนจะมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าประมาณ 41% และเมื่อแทรกบริเวณจุดสัมผัสสายเคเบิลของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และจะลดลงได้อีกเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความหนาของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายเคเบิลกับสายตัวนำลงดินก็ช่วยให้สนามไฟฟ้าบริเวณจุดสัมผัสมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Tarafdar Hagh et al.	นำเสนอการออกแบบและการผลิตเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิโอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับระบบจำหน่าย 20 และ 33 kV รวมถึงผลการทดสอบทั้งทางกลและทางไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบผลความต้านทานแรงดึงของสเปเซอร์ที่ใช้ในประเทศไทย อิหร่าน และอเมริกา ซึ่งผลที่ได้คือสเปเซอร์ที่ใช้ในอิหร่านทนต่อแรงดึงได้ดีที่สุด

จากผลงานวิจัยที่สรุปผ่านมามีผู้วิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิดวิเคราะห์การพัฒนาสมรรถนะของเคเบิลสเปเซอร์ให้ดียิ่งขึ้น รวมถึงแนวทาง วิธีการทดสอบการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ทำให้ผู้ศึกษาวิจัยทางด้านนี้มองเห็นแนวทางในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้จึงได้ทำการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้โดยย่อ ดังนี้

Pinheiro et al. (2008) ได้ศึกษาการใช้งานเคเบิลสเปเซอร์ร่วมกับสายเคเบิลหุ้มฉนวนที่ใช้ในงานบริเวณชายฝั่งทะเล โดยจำลองระบบในห้องปฏิบัติการ เพื่อสังเกตลักษณะการเกิดกระแสรั่วและวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์และสายเคเบิลหุ้มฉนวน จากการทดสอบเป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง พบว่าบริเวณพื้นผิวสายเคเบิลและเคเบิลสเปเซอร์ จะเกิดอาร์กุนแรงเป็นระยะ ๆ เมื่อได้รับละอองเกลือ แต่ในช่วงเวลาที่ไม่ม่มีละอองเกลือก็มักเกิดดิสชาร์จบางส่วน และค่ากระแสรั่วตามผิวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเสื่อมสภาพก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

Isaias et al. (2012) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนเคเบิลสเปเซอร์ โดยการจำลองผลด้วยโปรแกรมในรูปแบบ 3 มิติ ของเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ผลการจำลองพบว่า บริเวณที่รองรับสายเคเบิล และบริเวณที่ใช้ลวดผูกสายเคเบิลมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นมาก จึงปรับปรุงโดยการทดสอบให้วัสดุเป็นชนิดเดียวกัน ผลคือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง แต่บริเวณที่รองรับสายเคเบิล และบริเวณที่ใช้ลวดผูกสายเคเบิลยังคงมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอยู่ เมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ และผลการทดสอบก็แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพื้นผิวฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพทางไฟฟ้ามากที่สุด

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEC, WASET, Science Direct และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานวิจัยของ Worawit Payakcho และ Janejira Grasaesom ที่ได้สร้างชุดทดสอบขึ้นที่อาคารไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำให้ผู้วิจัยได้ใช้ประโยชน์ต่อโดยการประยุกต์ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากข้อมูลที่ค้นคว้ามาทั้งหมดนี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่าข้อมูลการวิจัยเกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์นั้นยังมีค่อนข้างน้อย เพราะเป็นนวัตกรรมใหม่ที่กำลังต้องการข้อมูลการวิจัยอย่างมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เริ่มวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้การเร่งเสื่อมอายุ



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ก่อนทำการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์ ในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับการใช้งานเคเบิลสเปเซอร์อย่างละเอียด เช่น ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์ การติดตั้ง อุปกรณ์ต่างที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์ คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน รวมถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

3.2 เคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์เป็นอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ทำหน้าที่เป็นตัวยึดและจัดระเบียบสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV เพื่อไม่ให้สายตัวนำทั้ง 3 เฟสอยู่ใกล้กันมากเกินไป โดยสายเฟสตัวนำที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์นั้น เป็นสายเคเบิลหุ้มฉนวน ทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น ช่วยลดอัตราความผิดปกติที่เกิดจากต้นไม้ กิ่งไม้หรือสิ่งต่าง ๆ ที่มาสัมผัสกับสายเฟสตัวนำ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ไฟฟ้าดับบ่อย ๆ ได้เป็นอย่างดี ระบบเคเบิลสเปเซอร์จึงมักใช้ในบริเวณที่มีป่าไม้ ต้นไม้หนาแน่น เขตชุมชนหรือบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด อีกทั้งยังใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณการส่งกระแสไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยที่ไม่ต้องรื้อสายไฟฟ้าเดิมทิ้งหรือปักเสาพาดสายใหม่ เพราะสามารถติดตั้งบนเสาไฟฟ้าเดิมได้มากกว่าหนึ่งวงจร การส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยระบบเคเบิลสเปเซอร์นี้ใช้เวลาไม่นาน มีขั้นตอนที่ง่าย สะดวก และสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการตั้งเสาเพิ่มหรือการเปลี่ยนสายไฟฟ้าใหม่ให้เป็นขนาดที่สามารถรองรับปริมาณกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากในการตั้งเสาใหม่และการเปลี่ยนสายไฟฟ้านั้น นอกจากจะต้องเปลี่ยนสายไฟฟ้าแล้ว ยังต้องเปลี่ยนอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้าใหม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นมา

3.2.1 ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้งานในประเทศไทยมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดเซรามิก และชนิดพอลิเมอร์ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก

เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก มีทั้งแบบพอร์ซเลนเคลือบเทฟลอน และพอร์ซเลนเคลือบเซรามิก จุดเด่นของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้คือ ความแข็งแรง ความคงทนต่อแสงแดด ผิวเรียบมัน ทำให้น้ำ ฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเกาะติดได้ยาก มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ข้อด้อยในเรื่องของความเครียดสนามไฟฟ้า น้ำหนักที่มากและราคาค่อนข้างสูง แสดงในรูปที่ 3.1

2) เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์

เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) เคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้มีจุดเด่นในเรื่อง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ น้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก ประมาณ 2-3 เท่า แสดงในรูปที่ 3.2

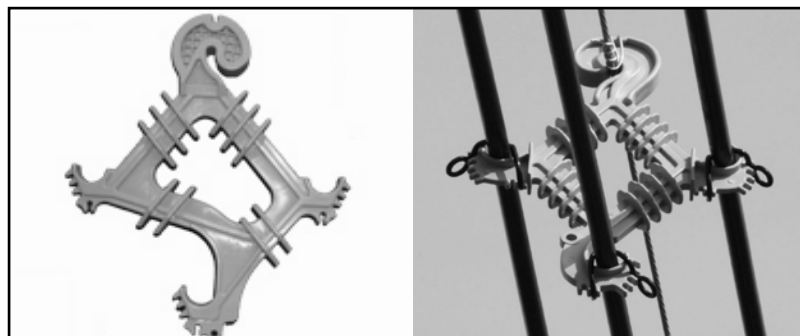


(ก) แบบพอร์ซเลนเคลือบเทฟลอน

(ข) พอร์ซเลนเคลือบเซรามิก

รูปที่ 3.1 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก

(ที่มา: <http://www.standardinsulator.com/por.html>)

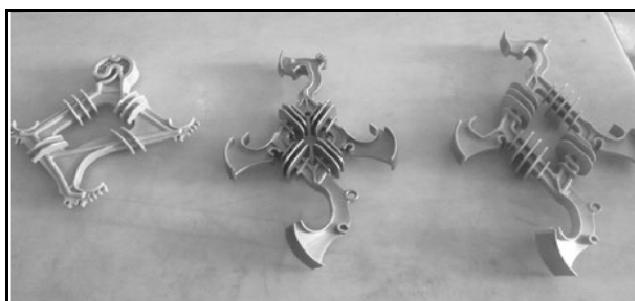


รูปที่ 3.2 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง

เคเบิลสเปเซอร์ทั้งสองชนิดถูกนำมาใช้งานในระบบจำหน่ายอย่างแพร่หลาย และปัจจุบันมีแนวโน้มว่าเคเบิลสเปเซอร์แบบพอลิเมอร์จะมาแทนที่แบบเซรามิก อันเนื่องมาจากข้อดี และข้อเสียตามข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว อย่างไรก็ตามแม้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ชเลน เคลือบเซรามิกจะมีความทนทานต่อการทดสอบทางไฟฟ้าที่สูงกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ แต่เมื่อใช้งานจริงร่วมกับสายเคเบิลก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณจุดรองรับสายเคเบิล ส่งผลให้เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ (Tracking) ขึ้นที่ผิวของสายเคเบิลจนทำให้สายเคเบิล เกิดความเสียหาย และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบเกิดความผิดปกติ

3.2.2 การออกแบบและการผลิตเคเบิลสเปเซอร์

การออกแบบเคเบิลสเปเซอร์เพื่อนำมาใช้งานจะมีลักษณะรูปแบบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละบริษัท อย่างไรก็ตามสำหรับการออกแบบจะเน้นการออกแบบให้จุดรองรับสายเคเบิลทั้งสามเฟสอยู่ในลักษณะที่สมดุลกันเหมือนรูปสามเหลี่ยมปิดเพื่อเป็นการสมดุลความต้านทานเฟส รูปแบบของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในประเทศต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในประเทศไทย อิหร่าน และอเมริกา (จากซ้าย)
(ที่มา: Design and mass production of medium voltage spacers, Tarafdar Hagh, 2013)

สำหรับการผลิตเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จะผลิตด้วยการฉีดขึ้นรูปโดยมีแบบหรือแม่พิมพ์สองชิ้นประกบกันดังรูปที่ 3.4 เมื่อได้เคเบิลสเปเซอร์แล้วก็นำไปทดสอบทั้งทางกลและทางไฟฟ้าได้แก่ ความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำ (สภาวะแห้ง/เปียก), ความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำ (สภาวะแห้ง/เปียก), แรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ (สภาวะแห้ง/เปียก), แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตชั่ววอก (สภาวะแห้ง/เปียก) และความต้านทานแรงดึง เป็นต้น ข้อมูลทางเทคนิคเปรียบเทียบคุณสมบัติของทั้งสองประเภท แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปเคเบิลสเปเซอร์

(ที่มา: Design and mass production of medium voltage spacers, Tarafdar Hagh, 2013)

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลนเคลือบเซรามิก และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

การทดสอบ	มาตรฐานกำหนด	วัสดุ	
		พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	พอร์ซเลนเคลือบเซรามิก
พิกัดแรงดัน Line to Line (kV)	33	33	33
ความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำ, สภาวะแห้ง (kV/ 1 min)	70	70	90
ความคงทนต่อแรงดันความถี่ต่ำ, สภาวะเปียก (kV/ 10 sec)	50	50	70
แรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ, สภาวะแห้ง (kV)	90	90	110

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ชเลนเคลือบเซรามิก และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ต่อ)

การทดสอบ	มาตรฐานกำหนด	วัสดุ	
		พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	พอร์ชเลนเคลือบเซรามิก
แรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำ, สภาวะเปียก (kV)	65	65	85
แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต, ขั้วบวก,สภาวะแห้ง (kV)	130	130	180
แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต, ขั้วลบ,สภาวะแห้ง (kV)	150	150	205
รับน้ำหนักได้สูงสุด (N)	8,000	8,000	9,000
ระยะห่างระหว่างเฟสต่ำสุด (mm)	≥ 240	240	240
น้ำหนักต่อชิ้น (kg)	-	1	3

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์

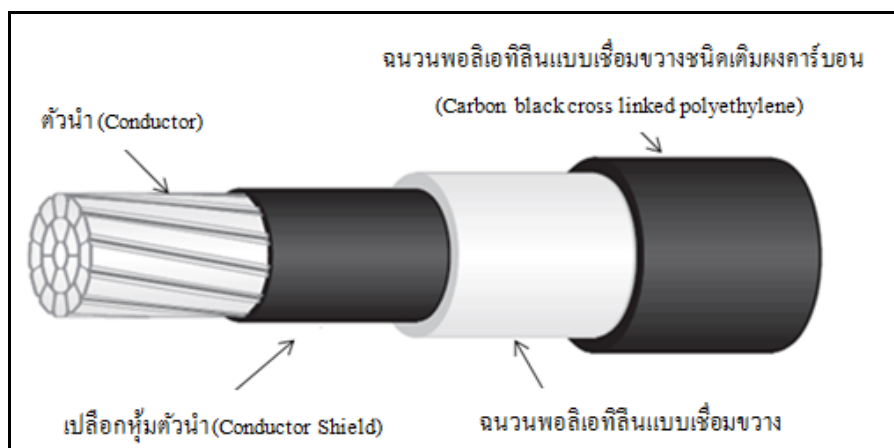
อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์ ประกอบด้วย สายตัวนำ สายดิน และตัวรัดสาย โดยอุปกรณ์ทุกอย่างมีรายละเอียดดังนี้

1) สายตัวนำ

สายตัวนำที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์ จะเป็นสายเคเบิลที่มีตัวนำเป็นอลูมิเนียมหุ้มด้วย 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นเปลือกหุ้มตัวนำ ทำจากสารกึ่งตัวนำ ชั้นที่เป็นฉนวนพอลิเอทิลีน ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หรือพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross Linked Polyethylene: XLPE) ก็ได้ และเปลือกนอกเป็นฉนวนชนิดเดียวกันแต่เติมผงคาร์บอนอย่างน้อย 2% เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟ รายละเอียดของสายเคเบิลและขนาดของสายเคเบิลที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

2) สายดิน

สายดินเป็นสายลวดเหล็กเปลือยขนาด 5 mm² โดยมีหน้าที่หลักสำหรับแขวนเคเบิลสเปเซอร์และรับน้ำหนักของสายเคเบิล เพื่อไม่ให้สายเคเบิลหย่อนจนเกินไป สายดินนี้จะเป็นตัวป้องกันหรือลดระดับความรุนแรงของแรงดันลี้รจจากฟ้าผ่าได้



รูปที่ 3.5 สายเคเบิลอากาศ
(ที่มา: อัมชรีพร เซอลินธุ์, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 3.2 ขนาดสายเคเบิลที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์

ระบบ (kV)	พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (mm ²)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ (mm)
22	50	13.5-15.5
	95	17.0-19.0
	120	19.0-21.0
	185	22.0-24.0
33	50	15.5-17.5
	95	18.5-20.5
	120	20.5-22.5
	185	24.5-26.5

3) ตัวรัดสาย

ตัวรัดสาย (Tire Wire) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดสายเคเบิลให้ติดกับเคเบิลสเปเซอร์ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ

3.1) ตัวรัดสายแบบลวดอลูมิเนียมกลม หุ้มด้วยฉนวนพอลิเอทิลีน แสดงในรูปที่ 3.6 โดยได้พัฒนามาจากเส้นลวดอลูมิเนียมเปลือย ซึ่งแต่เดิมเส้นลวดอลูมิเนียมเปลือยเวลาพันยึดสายเคเบิลหุ้มฉนวนกับเคเบิลสเปซอร์นั้น เส้นลวดสามารถแตกร้าวได้ ทำให้เกิดกระแสไหลวนและเกิดความร้อนจนสายเคเบิลหุ้มฉนวนชำรุดเสียหาย จึงได้ทำการหุ้มด้วยฉนวนพอลิเอทิลีน เพื่อลด

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่พันสาย และเพื่อให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าใกล้เคียงกับฉนวนของสายเคเบิล



รูปที่ 3.6 ตัวรัดสายแบบเส้นลวดอูมเนียมหุ้มด้วยฉนวนพอลิเอทิลีน

3.2) ตัวรัดสายแบบรัดและแบบล็อก เป็นตัวยึดสายแบบใหม่ที่เกิดขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น และเพื่อลดพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสายเคเบิลให้น้อยลง อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7



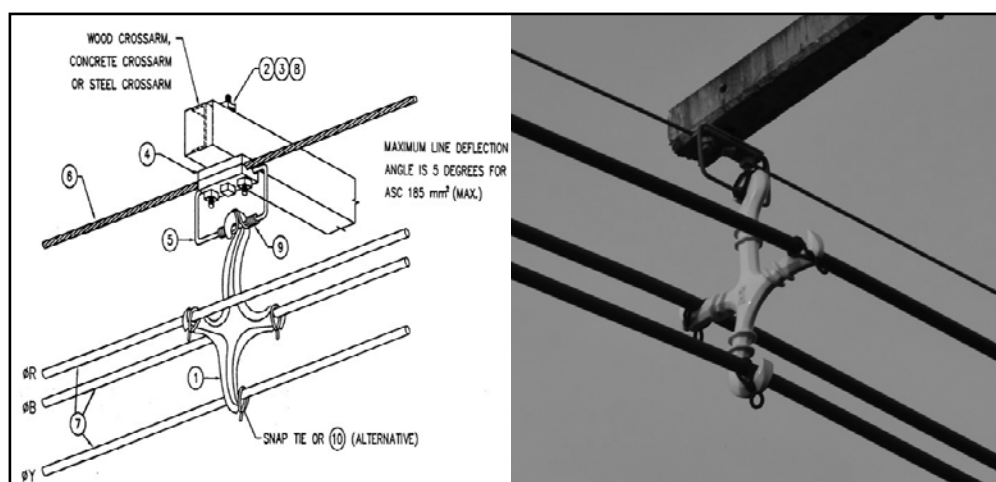
(ก) ตัวรัดสายแบบรัด

(ข) ตัวรัดสายแบบล็อก

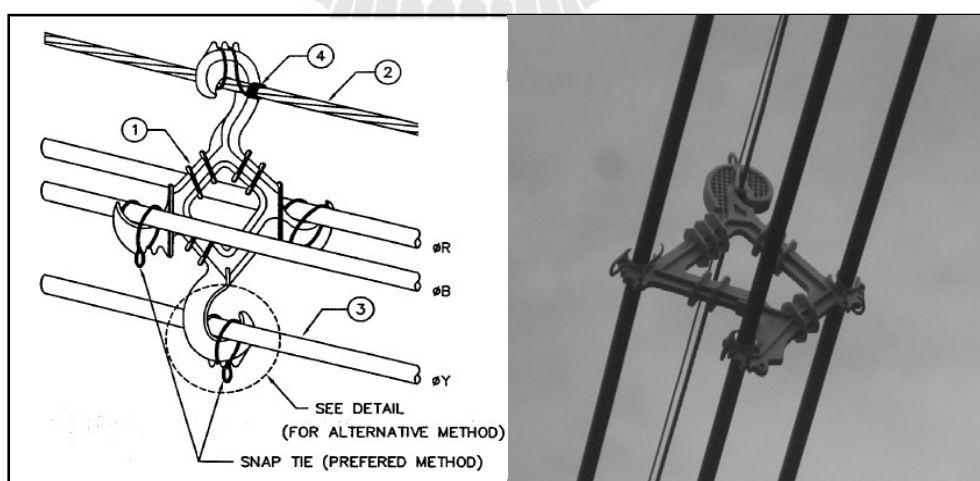
รูปที่ 3.7 ตัวรัดสายแบบรัดและแบบล็อก

3.2.4 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์แบบเซรามิกมีความแข็งแรงทางกลสูงกว่าแบบพอลิเมอร์จึงนิยมใช้สำหรับติดตั้งบริเวณจุดใกล้เสาไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดที่รับน้ำหนักของสายเคเบิลทั้งหมดดังรูปที่ 3.8 ส่วนเคเบิลสเปเซอร์แบบพอลิเมอร์ จะใช้ติดตั้งระหว่างช่วงเสาไฟฟ้า โดยมีระยะห่างในการติดตั้งประมาณ 10 เมตรดังรูปที่ 3.9 เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าเคเบิลสเปเซอร์แบบเซรามิกมาก



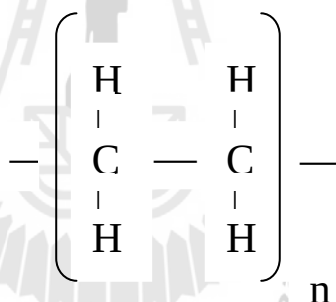
รูปที่ 3.8 ลักษณะของการติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก



รูปที่ 3.9 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

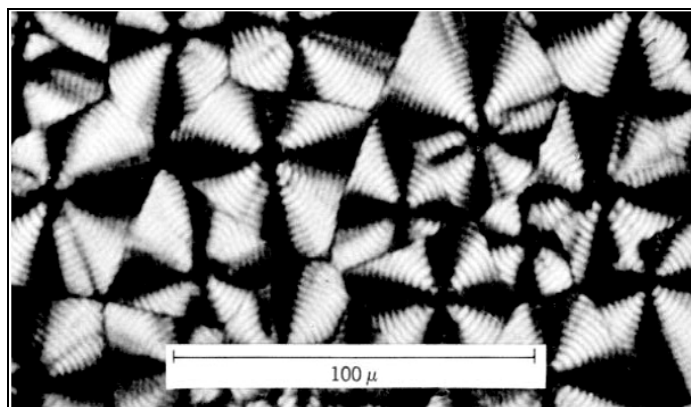
3.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ผลิตจากแก๊สเอทิลีน ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) ที่ผ่านกระบวนการเติมสาร ที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่าง ๆ เป็นสารที่ขุ่นขาว โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หย่อนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่ายมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิว นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุ พอลิเอทิลีนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ขอบเขต ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์และโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) สูตรโครงสร้างทางเคมีของ พอลิเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 3.10 พอลิเอทิลีนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง

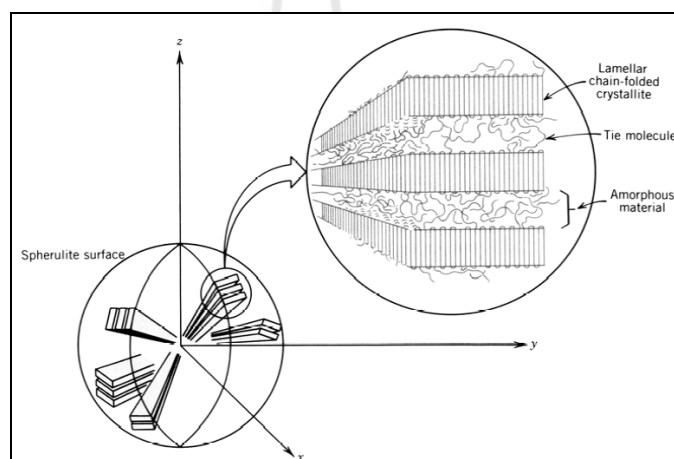


รูปที่ 3.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) เนื้อส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งแต่ละสเฟียรูไลต์ ประกอบด้วยสายโซ่แบบริบบิ้นพับ (Chain-Folded Ribbon) จำนวนมากหรือลามลาร์ (Lamellar) ที่แผ่ออกจากจุดกึ่งกลาง พื้นที่ส่วนอื่นนอกจากที่เป็นลามลาร์ เหล่านี้จะเป็นแบบอสัณฐานดังแสดงในรูปที่ 3.12 การจัดเรียงลามลาร์ จะเชื่อมด้วยสายโซ่เชื่อม (Tie Chain) ซึ่งเชื่อมผ่านตลอดบริเวณของอสัณฐานเหล่านั้น



รูปที่ 3.11 โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของพอลิเอทิลีน (ขยาย 525 เท่า)
(ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)



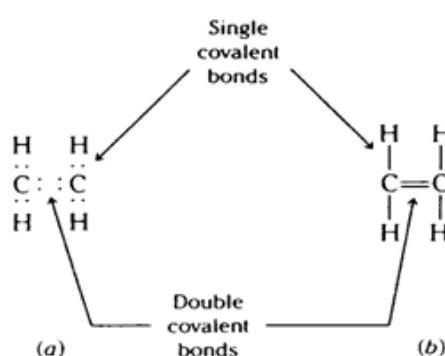
รูปที่ 3.12 ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์
(ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density Polyethylene: HDPE) มีลักษณะเฉพาะคือ มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสายตรง มีกิ่งสาขา (Branching) น้อย องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น $(CH_2)_n$ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้ผิวแตกรานได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนอุณหภูมิสูงถึง $110^{\circ}C$ และทนอุณหภูมิสูงถึง $120^{\circ}C$ ได้ในช่วงสั้น ๆ แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (Autoclave) เท่าพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และทนต่อสารเคมีมากกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene: LDPE) ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่าน

ได้ HDPE ผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการซีเกอร์ (Ziegler Process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) มีการนำไปใช้งานในปริมาณมากและหลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรง มีความคงทนสูง มีความเหนียวและทนทานต่อแรงดึงปานกลาง เหมาะสำหรับงานเป่าฟิล์ม งานเป่าแบบงานท่อน งานฉีดแบบ และงานเส้นใย ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด นิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ฉนวนไฟฟ้า ท่อน้ำ ท่อทาสารเคมี ภาชนะใส่สารเคมี ภาชนะบรรจุอาหารต่าง ๆ เป็นต้น

3.3.1 การเกิดพันธะโควาเลนต์ของโครงสร้างโมเลกุลเอทิลีน

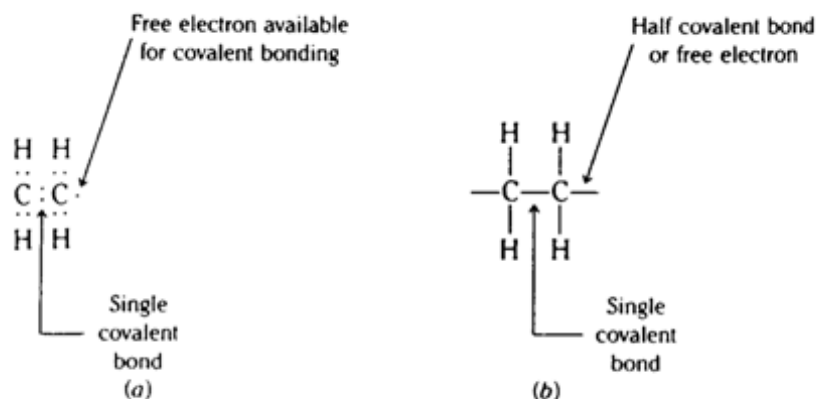
โมเลกุลเอทิลีน (C_2H_4) เกิดพันธะเคมีแบบพันธะคู่ ระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับอีก 4 พันธะเดี่ยว ของอะตอมของไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 3.13 โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน โดยมีพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งพันธะคู่ เรียกโมเลกุลนั้นว่า โมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Molecule)



รูปที่ 3.13 การเกิดพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลเอทิลีน

(ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์, 2544)

เมื่อโมเลกุลของเอทิลีนถูกกระตุ้น (Activated) จะทำให้พันธะคู่เปิดออก กลายเป็นพันธะเดี่ยว จะทำให้อะตอมของคาร์บอนมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) ซึ่งพร้อมที่จะเกิดพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่น ๆ ที่มีอิเล็กตรอนอิสระเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้เอทิลีนโมโนเมอร์จึงเกิดพันธะโควาเลนต์เป็นพอลิเมอร์หรือเกิดพอลิเมอร์เชนลูกโซ่ (Chain Polymerization) ได้ พอลิเมอร์ของเอทิลีนเรียกว่า พอลิเอทิลีน ซึ่งเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของ Activated Ethylene Molecule
(ที่มา: สมชัย อัครทิวา, 2544)

แต่ละหน่วยย่อย ๆ ในพอลิเมอร์เรียกว่า เมอร์ (mer) และเมอร์ของพอลิเอทิลีนคือ $[-CH_2-CH_2-]_n$ ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization: DP) เป็นจำนวนหน่วยย่อย หรือ เมอร์ ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ค่าเฉลี่ย DP สำหรับพอลิเอทิลีน อยู่ในช่วงประมาณ 3,500 – 25,000 เมื่อมวลโมเลกุลโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 100,000 – 700,000 กรัม/โมล

3.3.2 ขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์เชน

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพอลิเมอร์เชนแบบลูกโซ่ของเอทิลีน โมโนเมอร์ ไปเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นหรือ พอลิเอทิลีน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) กระบวนการตั้งต้น (Initiation) เป็นการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเช่นเดียวกับปฏิกิริยาทั้งหลายที่มีการใช้ตัวเร่ง (catalyst) ในกรณีของการเกิดพอลิเอทิลีน ใช้เปอร์ออกไซด์ที่สารอินทรีย์ (Organic Peroxides) เป็นตัวที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งหมายถึงกลุ่มของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่ หรืออิเล็กตรอนอิสระ (Unpaired Electron หรือ Free Electron) ทำให้สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่เช่นเดียวกันได้

2) กระบวนการขยายตัว (Propagation) เป็นกระบวนการที่พอลิเมอร์เข้าไปต่อกันเป็นหน่วยที่ใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยพันธะคู่ (Double Bond) หัวท้ายของโมเลกุลจะเปิดออกเพื่อให้อนุมูลอิสระ เข้าเกิดพันธะโควาเลนต์ต่อไปสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดพอลิเมอร์เชน ทำให้สายโซ่ยาวขึ้น และพลังงานของระบบก็ต่ำลง ทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นั่นคือ ผลรวมของพลังงานของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าผลรวมของพลังงานของโมโนเมอร์ที่ทำ

ให้เกิดพอลิเมอร์ DP ของพอลิเมอร์จะมีค่าแตกต่างกันแล้วแต่ละชนิดของพอลิเมอร์ สำหรับพอลิเอทิลีนที่ขายกันอยู่ในปัจจุบันมีค่า DP เฉลี่ยอยู่ในช่วง 3,500-25,000

3) กระบวนการสิ้นสุด (Termination) เป็นกระบวนการทำให้พอลิเมอร์โซ่สิ้นสุดลง โดยการเติมสารเจือปน (Impurities) เพื่อหยุดการเกิดอนุมูลอิสระหรือสายโซ่ของอนุมูลอิสระ

3.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วถือว่าพอลิเมอร์เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ในขณะที่โลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ในขณะที่การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพอลิเมอร์จะถูกจำกัดอยู่ภายในโมเลกุลเท่านั้น ในแง่ของการใช้งานเป็นฉนวนแล้วสมบัติที่เกี่ยวข้องที่ต้องพิจารณา ได้แก่

- 1) ความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength)
- 2) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)
- 3) แฟกเตอร์กำลังงานสูญเสีย (Dissipation Factor)
- 4) สภาพต้านทาน (Resistivity)

3.4.1 ความคงทนไดอิเล็กทริก

ความคงทนไดอิเล็กทริก หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะสามารถทนได้ ก่อนเกิดการเสียหาย (Failure) ดังนั้นความคงทนไดอิเล็กทริก จึงมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อมิลลิเมตร (ความหนา) โดยเมื่อวัสดุที่เป็นฉนวนได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดการรั่วไหล (Leakage) ของกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจากข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อยู่ในวัสดุ ซึ่งการรั่วไหลลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้มากขึ้นและส่งผลย้อนกลับทำให้ความร้อนยิ่งสูงขึ้นไปอีกและทำให้วัสดุเกิดความเสียหายในที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่า ความคงทนไดอิเล็กทริก ก็คือความคงทนของวัสดุฉนวนในการใช้งานทางไฟฟ้า และยิ่งวัสดุที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูง ก็ยิ่งเป็นฉนวนที่มีคุณภาพดี สำหรับค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของพอลิเอทิลีนมีค่าเท่ากับ 480 V/mm

การวัดค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุสามารถทำได้หลายวิธี วิธีแรกเรียกว่า Short-Times Method โดยมีชิ้นงานที่มีความหนาที่ต้องการถูกประกบด้วยอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน โดยการทดสอบต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงานอัตราคงที่ เริ่มจาก 0 โวลต์ไปจนกระทั่งชิ้นงานแตก โดยที่อัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าอาจจะเป็น 100, 500, 1000 หรือ 3000 โวลต์ โดยจุดที่ชิ้นงาน

แตกหรือเกิดเสียหาย สังเกตได้จากการเกิดฉีกขาด (Rupture) หรือการสูญเสียองค์ประกอบของชิ้นงาน sec / Volt วิธีที่ 2 ในการวัดค่าความคงทนไดอิเล็กทริก คือ Slow-Rate-of-Rise Method โดยวิธีนี้จะให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงแรกประมาณ 50% ของแรงดันเบรกดาวน์ ที่วัดไว้แล้วจาก Short Time Test จากนั้นก็เพิ่มแรงดันด้วยอัตราคงที่จนกระทั่งชิ้นงานพังหรือแตกหัก วิธีสุดท้าย คือ Step-by-Step เป็นการผ่านแรงดันในช่วงแรกประมาณ 50% ของ แรงดันเบรกดาวน์ จากนั้นจึงเพิ่มแรงดันในสัดส่วนที่เท่ากัน (Equal Increment) แล้วรักษาระดับแรงดันไฟฟ้านั้นไว้ จนกระทั่งชิ้นงานพังหรือแตกหัก โดยเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีแล้วจะถือว่า Step-by-Step Method เป็นวิธีการที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด ค่าความคงทน ไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{Dielectric strength} = \frac{\text{Voltage Breakdown (V)}}{\text{Thickness (mm)}} \quad (3.1)$$

สำหรับปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความคงทนไดอิเล็กทริกที่วัดได้คือ ความหนาของชิ้นงาน โดยทั่วไปจะอนุมานว่าความคงทนไดอิเล็กทริกจะแปรผกผันกับความหนากำลึง 0.4 นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าความคงทนไดอิเล็กทริกได้แก่รูปทรง (Geometry) ของอิเล็กโทรด อุณหภูมิ และกระบวนการ ขึ้นรูปของชิ้นงานที่ทดสอบที่อาจจะทำให้เกิดตำหนิ เช่น รอยเชื่อม โพรง หรือฟองก๊าซ เป็นต้น

3.4.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ที่มาของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เริ่มจากการที่โมเลกุลที่มีขั้วเมื่อนำมาวางในสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลดังกล่าว เกิดเป็น สนามไฟฟ้าภายใน (Internal Electric Field) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ไดโพลโพลาไรเซชัน (Dipole Polarization)” ปริมาณของประจุไฟฟ้า (Electric Charge) ที่สะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าภายใน เรียกว่าค่าความเก็บประจุ มีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวน นอกจากนั้นเมื่อนำค่าความเก็บประจุของวัสดุหนึ่ง ๆ มาหารด้วยค่าความเก็บประจุของอากาศ เรียกสัดส่วนดังกล่าวว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Dielectric constant} = \frac{\text{Capacitance, Material as dielectric}}{\text{Capacitance, Air (or Vacuum) as dielectric}} \quad (3.2)$$

หรืออาจกล่าวง่าย ๆ ได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หมายถึง ความสามารถของฉนวนในการเก็บรักษาพลังงานไฟฟ้าเอาไว้ (Electrical Energy Storage) สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิเอทิลีนมีค่าตั้งแต่ 2.2-2.6 ขึ้นอยู่กับสภาพขั้ว ซึ่งพอลิเอทิลีนถือว่าเป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เมื่อนำมาวางในสนามไฟฟ้าก็สามารถเกิดการกระจายตัวของอิเล็กตรอนได้เล็กน้อย และเกิดโพลาริเซชันได้เล็กน้อย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมากกว่า 1 เสมอ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในแง่ที่ว่าของเหลวมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงกว่าของแข็ง เนื่องจากการเรียงตัวของไดโพล ในของเหลวเกิดได้ง่ายกว่า หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงอีกครั้งตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลมีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้สูงจึงทำให้เกิดการชนกันได้มากขึ้น

3.4.3 กำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเมื่อวางโมเลกุลลงในสนามไฟฟ้า ก็ทำให้เกิดการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพขั้วของโมเลกุล และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในสนามไฟฟ้า ขณะที่โมเลกุลเกิดการเรียงตามในสนามไฟฟ้านี้ สามารถทำให้เกิดแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction) ระหว่างโมเลกุล ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นจากการเสียดสีดังกล่าวและสูญเสียออกไป ในกรณีที่ใส่สนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป เมื่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับที่ใส่เข้าไปต่ำ การสั่นหรือการเรียงตัวของโมเลกุลก็เกิดขึ้นช้าและความร้อนที่เกิดขึ้นก็มีค่าน้อย แต่ถ้าใช้ความถี่ของกระแสสลับสูง ก็ทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงและทำให้สมบัติด้านการเป็นฉนวนและสมบัติเชิงกลของวัสดุดังกล่าวเสียไป ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานสนามไฟฟ้าความถี่สูงจึงต้องมีค่ากำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำที่สุด ซึ่งค่ากำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังสมการที่ 3.3

$$P_d \propto E^2 f \varepsilon \tan \delta \quad (3.3)$$

เมื่อ P_d = กำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก

E = สนามไฟฟ้า

f = ความถี่ของกระแสไฟฟ้า

ε = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวน

$\tan \delta$ = แฟกเตอร์กำลังงานสูญเสีย

เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีไดโพลในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้เกิดความร้อนนี้เอง จึงทำให้พอลิเมอร์ที่มีขั้วสามารถนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่วิทยุได้ เช่น งานด้านการเชื่อมฟิล์ม PVC ด้วยความถี่สูง

3.4.4 แฟกเตอร์กำลังงานสูญเสีย

แฟกเตอร์กำลังงานสูญเสีย (Dissipation Factor) เป็นปริมาณบอกระดับของ Phase Lag ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลพอลิเมอร์หรือฉนวนไม่สามารถปรับตัวให้ทิศทางการเรียงตัวสอดคล้องตามความถี่ของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว ถ้าความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ โมเลกุลมีเวลานานพอในการปรับทิศทางการเรียงตัวให้สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปมาอยู่ตลอดเวลา แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีความถี่สูงมากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปได้ทัน ทำให้เกิด Phase Lag ขึ้นระหว่างไดโพลโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าแฟกเตอร์กำลังงานสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลและความถี่ของสนามไฟฟ้า โดยแฟกเตอร์กำลังงานสูญเสียหรือกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงสุดในช่วงเปลี่ยนผ่าน ซึ่งพอลิเมอร์ผ่านจากการตอบสนองได้เร็วในช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงที่ตอบสนอง (หรือเรียงตัว) ได้ช้าในช่วงที่ความถี่สูง (จุดสูงสุดคือจุดที่ความถี่ของการเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์เท่ากันกับความถี่ของสนามไฟฟ้า)

3.4.5 สภาพต้านทาน

สภาพต้านทานหรือสภาพต้านทานไฟฟ้า คือปริมาณการวัดความสามารถของวัสดุในการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot m$ ค่าสภาพต้านทานที่มากแสดงถึงความสามารถในการเป็นฉนวนที่ดีตามไปด้วย โดยหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (3.4)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น Ω

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น m^2

l คือ ความยาว มีหน่วยเป็น m

3.5 คุณสมบัติทางกล

สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ ประกอบไปด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงการล้า โดยค่าพารามิเตอร์ทางกล

ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาค่าด้วยการทดสอบแรงเค้นความเครียด คุณลักษณะทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไว้มากต่ออัตราการเสียรูป อุณหภูมิและธรรมชาติทางเคมีของสิ่งแวดล้อม เช่นในสถานะที่มีน้ำ ออกซิเจน ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น นอกจากนี้คุณลักษณะทางกลของพอลิเมอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องมากกว่าโลหะอย่างมาก เมื่อพิจารณาพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์บางชนิด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีโมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งแรงดิ่งลดลง แต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของอัตราความเครียดมีความสำคัญต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์ ซึ่งปกติการลดอัตราการเสียรูปมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดแบบเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิ คือวัสดุจะอ่อนตัวและเหนียวขึ้น คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แสดงในตารางที่ 3.3 (Modern Plastics Encyclopedia, The McGraw-Hill Companies, 1995)

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

สมบัติ	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ	0.952-0.965
โมดูลัสแรงดิ่ง(GPa (ksi))	1.06-1.09(155-158)
ความทนแรงดิ่ง (MPa (ksi))	22.1-31.0(3.2-4.5)
ความแรงคราก(MPa (ksi))	26.2-33.1(3.8-4.8)
ความยืดขณะแตกหัก (%)	10-1200

3.6 คุณสมบัติทางความร้อน

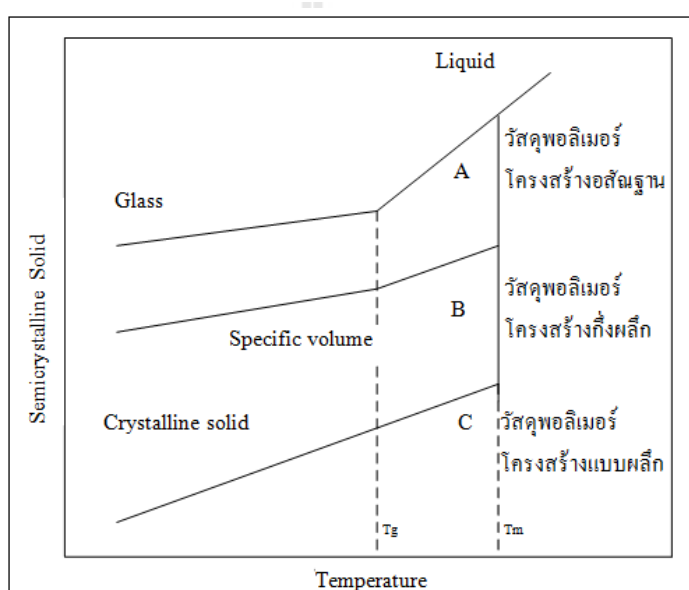
พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลใหญ่จึงมีเพียง 2 สถานะเท่านั้น คือ ของแข็งและของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ไม่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะแก๊สได้ เนื่องจากพอลิเมอร์มีจุดเดือดสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation Temperature) เมื่อให้ความร้อนสูงมาก จึงสลายตัวแทนการเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส โดยส่วนใหญ่พอลิเมอร์อยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหากพิจารณาโดยละเอียดประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก และส่วนอสัณฐาน ขึ้นกับการจัดเรียงตัวของสายโซ่ว่าเป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวและปริมาณผลึกนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของพอลิเมอร์

เนื่องจากพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว ดังนั้นการจัดเรียงตัวให้มีความเป็นระเบียบทุกบริเวณจึงทำได้ยาก พอลิเมอร์จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ 100% เหมือนสารประกอบโมเลกุลเล็ก

ทั่วไป สามารถจำแนกพอลิเมอร์ตามปริมาณผลึกได้ 2 ประเภทคือ พอลิเมอร์อสัณฐาน คือ พอลิเมอร์ที่ไม่มีบริเวณที่เป็นผลึกเลย และพอลิเมอร์กึ่งผลึก ซึ่งประกอบด้วยผลึกบางส่วน ปริมาณผลึกใน พอลิเมอร์นี้ส่งผลถึงสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting Point Temperature, T_m) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว คล้ายกับการหลอมเหลวของของแข็งชนิดอื่น และสมบัติทางความร้อนที่สำคัญอีกประการของ พอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g)

เนื่องจากพอลิเมอร์ประกอบด้วยสายโซ่ยาวที่เกิดการเกี่ยวโยงกันไปมาจำนวนมาก เมื่อให้ความร้อนจนสูงกว่า T_m สามารถทำให้สายโซ่สามารถไหลได้กลายเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลว มีความหนืดสูง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ที่สัมผัสกันในขณะเกิดการไหล แต่หากอุณหภูมิต่ำกว่านี้ สายโซ่ไม่สามารถไหลผ่านกันได้ แต่ยังมีพลังงานมากพอเคลื่อนไหวหรือเกิดการสั่นของสายโซ่เฉพาะส่วน (Segmental Movement) โดยเฉพาะบริเวณปลายสายโซ่ที่อิสระมากกว่า ส่งผลให้พอลิเมอร์อยู่ในสถานะของแข็งที่ค่อนข้างนุ่มเหมือนยาง จึงเรียกว่าพอลิเมอร์อยู่ในสถานะคล้ายยาง (Rubbery State) แต่เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่านี้ จนต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว T_g สายโซ่พอลิเมอร์ทั้งหมดเคลื่อนไหวได้น้อยมากคล้ายกับการถูกแช่แข็ง จึงอยู่ในสถานะของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว เรียกว่าสถานะคล้ายแก้ว (Glassy State) พอลิเมอร์ทุกชนิดแสดงค่า T_g แต่มีเฉพาะพอลิเมอร์กึ่งผลึกเท่านั้นที่แสดงค่า T_m โดยค่า T_g และ T_m ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ และเนื่องจากการใช้ประโยชน์พอลิเมอร์มักทำที่อุณหภูมิห้อง หากพอลิเมอร์มี T_g สูงกว่าอุณหภูมิห้องก็ทำให้อยู่ในสถานะคล้ายแก้วที่อุณหภูมิใช้งานจึงมี สมบัติแข็งเปราะ เช่น พอลิสไตรีน แต่หาก T_g ของพอลิเมอร์สูงกว่าอุณหภูมิใช้งานก็มีสมบัติคล้ายยาง เช่น พอลิเอทิลีนเป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อ T_g คือ อันตรกิริยาในสายโซ่ เช่น พอลิพรอพิลีน มีต่ำกว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากพอลิพรอพิลีน มีอันตรกิริยา แบบแรงกระจายตัว (Dispersion Force) ซึ่งแข็งแรงน้อยกว่าแรงไดโพล-ไดโพลในพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำให้สายโซ่ของพอลิไวนิลคลอไรด์ เคลื่อนไหวหรือสั่นได้ยากกว่าจึงมี T_g สูงกว่า ปัจจัยต่อมา คือ ปริมาณของผลึก หากพอลิเมอร์มีปริมาณผลึกสูงขึ้น การเกิดผลึกนี้จะช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั่นหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงทำให้ T_g สูงขึ้น นอกจากนี้ การเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) เป็นโครงสร้างร่างแห ก็ส่งผลให้ T_g ของพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกัน เนื่องจากตำแหน่งเชื่อมขวางที่ยึดสายโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกันนั้น จำกัดอิสระในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ ส่วนปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อค่า T_g ของพอลิเมอร์ คือ ลักษณะโครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี คือ ความยืดหยุ่น (Flexibility) ของสายโซ่ และการมีหมู่แทนที่ด้านข้างสายโซ่ (Side-Chain Substitution Groups) ในกรณีแรก เช่น พันธะ Si-O ในสายโซ่ของพอลิ(ไดเมทิลไซล๊อกเซน) มีความยืดหยุ่นมากกว่าพันธะ C-C ในพอลิเอทิลีน จึงทำให้

พอลิ(ไดเมททิลไซล๊อกเซน) สามารถสั้นหรือเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่าจึงมี T_g ต่ำกว่า ในขณะที่วงแหวนเบนซีน ในสายโซ่ของ พอลิ(ฟีนิลีนออกไซด์) มีความยืดหยุ่นน้อยมาก จึงมี T_g ที่สูงกว่ามากนั่นเอง ขณะที่ผลของหมู่ด้านข้างที่มีมากขึ้นหรือใหญ่ขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่เกิดขึ้นยากขึ้น ทำให้ค่า T_g สูงขึ้นตามเรื่อยๆ เช่นเดียวกัน เช่นพอลิเอทิลีน ไม่มีหมู่ด้านข้างเลย จึงมี T_g ที่ต่ำกว่า พอลิพรอพิลีนที่มีหมู่ $-CH_3$ เป็น หมู่ด้านข้าง และเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิสไตรีน ที่มีวงแหวนเบนซีนที่มีขนาดใหญ่กว่ามากเป็นหมู่ด้านข้าง ทำให้สายโซ่ยิ่งเคลื่อนไหวได้ยากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ T_g สูงขึ้นอีก ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ
(ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

นอกจากนี้สมบัติทางความร้อนที่สำคัญของพอลิเมอร์ทางอุตสาหกรรมที่ต้องพิจารณา คือ อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat Distortion Temperature, HDT) เนื่องจากการนำพอลิเมอร์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก มาใช้ประโยชน์นั้น ต้องทำการหลอมพอลิเมอร์ให้เป็นของเหลวก่อน แล้วจึงปล่อยให้ไหลเข้าในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ เมื่อพอลิเมอร์เหลวเต็มแม่พิมพ์แล้วจึงลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลงเพื่อให้พอลิเมอร์กลับสู่สถานะของแข็งและคงรูปอยู่ได้ โดยการลดอุณหภูมินี้ไม่จำเป็นต้องลดถึงอุณหภูมิห้อง เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายสูงและเสียเวลาการผลิต เพียงแต่ลดให้อุณหภูมิต่ำกว่า HDT เท่านั้น ชิ้นงานที่ขึ้นรูปไว้ก็แข็งแรงพอที่จะนำออกจากแม่พิมพ์โดยไม่เสียรูปทรง ในทางกลับกันอุณหภูมิ HDT มีความหมายคล้ายกับค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานวัสดุพอลิเมอร์ได้ (Ceiling service Temperature) โดยหากใช้งานชิ้นงานพอลิเมอร์ที่

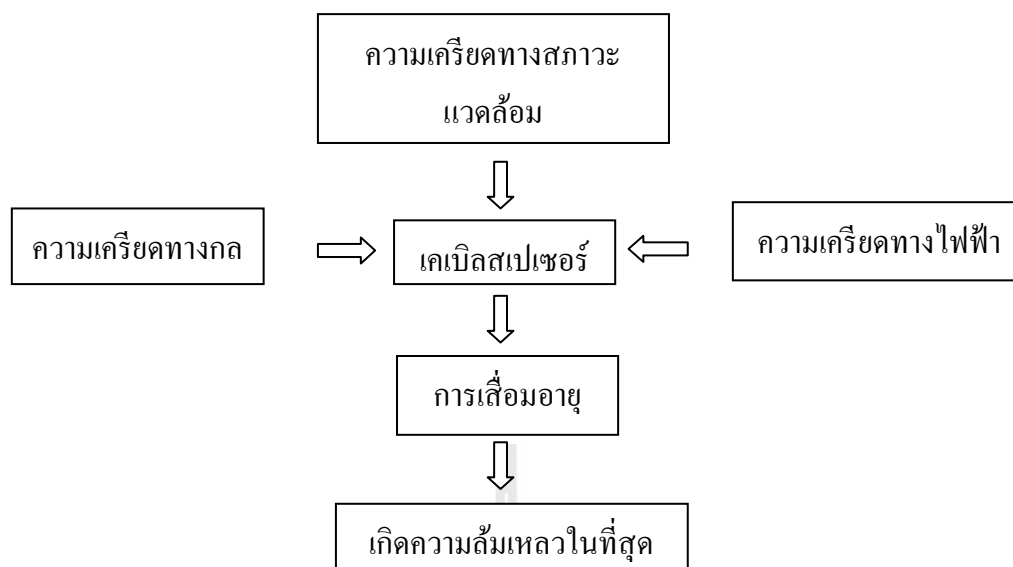
อุณหภูมิสูงเกินไปก็ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถ คงรูปร่างไว้ได้ เช่น ไม่สามารถใช้งานถุงเย็น ในการบรรจุน้ำร้อนได้เพราะเกิดการหดตัว เป็นต้น โดยค่า HDT นี้ นอกจากขึ้นกับปัจจัยทางด้าน โครงสร้างและอันตรกิริยาของพอลิเมอร์ โดยมีความสูงกว่า T_g แต่ต่ำกว่า T_m แล้วยังขึ้นกับปัจจัย รูปร่างของชิ้นงาน ตลอดจนความหนาบางของชิ้นงานด้วย ตัวอย่างค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 3.4 (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ T_g และ T_m ของพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว, T_g ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว, T_m ($^{\circ}\text{C}$)
พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง	-125	110
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	-110	115
พอลิเทระฟลูออโรเอทิลีน	-97	327
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	-90	137
พอลิพรอพิลีน	-18	175
ไนลอน 6.6	57	265
พอลิเอสเตอร์ (PET)	69	265
พีวีซี	87	212
พอลิสไตรีน	100	240

3.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์

การนำเคเบิลสเปเซอร์มาใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและความหลากหลายของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน ๆ ทำให้เคเบิลสเปเซอร์และอุปกรณ์ฉนวนต่าง ๆ ที่ใช้งานร่วมกัน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (การแตก หัก ผุกร่อน เกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดการแยกตัวของพอลิเมอร์) โดยไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้ความสามารถในการเป็นฉนวนและคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ลดลง จนนำไปสู่ปัญหาความล้มเหลวทางไฟฟ้าและทางกลในที่สุด การเปลี่ยนแปลงหรือการลดลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนนี้เรียกว่า การเสื่อมอายุ ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุมีหลายประการ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรง ได้แก่ ความเครียดทางกล ความเครียดทางไฟฟ้า และความเครียดทางสภาวะแวดล้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์

3.7.1 ความเครียดทางกล

ความเครียดทางกล ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ ปัจจัยหนึ่ง กิดจากน้ำหนักของสายเคเบิลที่เคเบิลสเปเซอร์ต้องแบกรับไว้ตลอดเวลา น้ำหนักของสายเคเบิลก่อให้เกิดความเค้นในเนื้อของพอลิเอทิลีน มีทั้งความเค้นแรงดึงและความเค้นแรงเฉือน (กรณีสายเคเบิลมีการบิดหรือไม่มีความสมดุลกันทั้งสามเฟส) เมื่อเกิดความเค้นขึ้นจึงทำให้เกิดความเครียดในเนื้อของสเปเซอร์ ประกอบกับการมีปัจจัยภายนอกมาเกี่ยวข้องเช่น ความร้อนและแสงอัลตราไวโอเลตมากระตุ้น จนทำให้เนื้อสเปเซอร์เกิดการเคลื่อนตัวตามแรงที่มากระทำ และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จนทำให้สเปเซอร์แตกหรือหักได้ ความเครียดทางกลจึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของสายเคเบิลและน้ำหนักของสเปเซอร์เป็นสำคัญ การใช้สายเคเบิลที่ใหญ่เกินไปย่อมส่งผลให้อายุการใช้งานของสเปเซอร์สั้นลง

3.7.2 ความเครียดทางไฟฟ้า

ความเครียดทางไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการฉนวนของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมากที่สุด ความผิดพร่องส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวน อันเกิดจากแรงในสนามไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า(Electric Field Stress) บางทีก็เรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่มีผลต่อการเสื่อมอายุ ดังนี้

การเกิดดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) คือปรากฏการณ์หนึ่งที่ประจุไฟฟ้าทำลายความเป็นฉนวน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในเนื้อฉนวนและภายนอกเนื้อฉนวน เป็นผลจากการที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ โดยส่งผลกระทบต่อความเสียหาย ซึ่งช่องว่างเหล่านี้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าฉนวนที่อยู่รอบ ๆ ความเสียหายจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่รุนแรงขึ้น จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown) ได้ในที่สุด

ดีสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดผลกระทบหลายอย่างเช่น แสง เสียง รั่วสี ปฏิกริยาทางเคมี และผลทางไฟฟ้า เป็นต้น ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวนทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ ดีสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- 1) โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)
- 2) ดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)
- 3) ดีสชาร์จภายใน (Internal Discharge)

โคโรนาดีสชาร์จเป็นดีสชาร์จบางส่วนประเภทหนึ่ง สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในเนื้อฉนวนและภายนอกเนื้อฉนวน เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงจากบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูงเช่นขอบแหลมคมบนตัวนำไฟฟ้า หรือแม้แต่ฉนวนไฟฟ้าก็ตาม เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดออกมาชนเข้ากับโมเลกุลของแก๊สในอากาศ ทำให้เกิดการแตกตัวและปล่อยพลังงานจากการแตกตัวออกมาบางส่วนในรูปของการเรืองแสง บางส่วนอาจเป็นเสียงซ่า โดยโมเลกุลของแก๊สที่ถูกชนจนแตกตัวนั้นจะเปลี่ยนจากสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าไปสู่สภาพขั้วและนำไฟฟ้าได้ การขยายตัวของโคโรนาดีสชาร์จส่งผลกระทบต่อความไวตามผิว (Flashover) หรืออาร์กที่ฉนวน และเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด

ร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว

ร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking หรือ Electrical Tracking) ในบางครั้งเรียกว่า ร่องผิวเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน อาจทำให้ฉนวนเสียหายเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง หรือเพราะความชื้นในบรรยากาศ ประกอบกับความเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่นและเกลือ ทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิว เกิดเป็นความร้อนทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไป ทำให้เกิดสปาร์กในช่วงที่ผิวนำไฟฟ้าขาดไป ทำให้ผิวของฉนวนเกิดความเสียหาย หรือกล่าวได้ว่า ร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิวเกิดจากดีสชาร์จที่ผิวของฉนวนที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ และเกิดความร้อนสูงขึ้น จนผิวของฉนวนไม่สามารถทนได้ เกิดเป็นร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิวขึ้น การเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว จะมีส่วนประกอบของคาร์บอนซึ่ง

เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของวาวไฟตามผิว เนื่องจากคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

กระแสรั่วตามผิว

กระแสรั่วตามผิว(Leakage Current) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดวาวไฟหรือดิสชาร์จบนผิวฉนวนได้ง่ายยิ่งขึ้น การที่ฉนวนมีกระแสรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผิวฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดเวลา ทำให้ระบบเกิดการสูญเสียพลังงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นก่อให้เกิดความร้อนขึ้นตามผิวฉนวน จนทำให้ผิวของฉนวนเกิดความเสียหายและนำไปสู่การลัดวงจรในที่สุด ดังนั้นการใช้งานงานฉนวนหรือลูกถ้วยในระบบไฟฟ้าจึงมีข้อกำหนดระยะกระแสรั่วตามผิวขึ้น เพื่อจำกัดกระแสรั่วไม่ให้มีค่าสูงหรือมีความเสี่ยงมากจนเกินไป สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีระยะกระแสรั่วประมาณ 310 มิลลิเมตร (สายเฟสถึงสายดิน) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน IEC 815 : Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Condition และลูกถ้วยแท่งก้านตรงแบบ 56/57-2 แต่ระยะรั่วดังกล่าวเพียงพอในกรณีที่ฉนวนของสายเคเบิลยังไม่ชำรุด หากสายเคเบิลชำรุดแล้วความเสี่ยงเกิดการลัดวงจรชนิดถาวร (Permanent Fault) จะมีสูงมาก

3.7.3 ความเครียดจากสภาวะแวดล้อม

การใช้งานสเปเซอร์กลางแจ้ง ทำให้สเปเซอร์ต้องเผชิญกับความเครียดจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต ความร้อน ความชื้น ฝน สิ่งเปรอะเปื้อนจาก ผุนละออง สารเคมี เกล็ด เป็นต้น ความเครียดเหล่านี้ล้วนส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวน ทำให้ฉนวนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

รังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้สเปเซอร์หรือฉนวนเกิดการเสื่อมอายุโดยการทำลายพันธะของ C - C และ C - H กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นเหตุให้สายโซ่ขาดและสั้นลงทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง นอกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีจากแสงแดดแล้วยังพบว่าผลจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ และอาร์กแถบแห้งที่ผิวฉนวนก็มีรังสีอัลตราไวโอเล็ตเช่นเดียวกัน สามารถนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความรุนแรงจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตขึ้นอยู่กับ ระยะเวลา ความเข้มและความยาวของรังสีที่ผิวฉนวนได้รับ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความแตกต่างกันไปตามช่วงของฤดูกาล ช่วงเวลาในแต่ละวัน ระดับความสูงและละติจูดที่ตั้ง

ความร้อน

ความร้อนที่เกิดขึ้นได้แก่ ความร้อนจาก คิซซาร์จทางไฟฟ้า ความร้อนจากการเสียดสีของสายเคเบิล และความร้อนจากแสงแดด ความร้อนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวฉนวนทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้ง่ายขึ้น เป็นตัวทำให้ฉนวนเกิดการละลาย เช่น ความร้อนที่เกิดจากคิซซาร์จ อีกทั้งความร้อนยังส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลโดยทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักสายเคเบิลของสเปเซอร์ลดลง จนนำไปสู่การแตหักของสเปเซอร์ได้

สิ่งเปราะเปื้อน

สิ่งเปราะเปื้อนบนพื้นผิวของฉนวนเป็นตัวย่อสำคัญที่ทำให้เกิดวาวไฟหรือคิซซาร์จ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งเปราะเปื้อนอยู่ในสภาวะที่เปียกชื้นและความต้านทานที่ผิวฉนวนมีค่าลดลง การเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนด้วย สิ่งเปราะเปื้อนแบ่งตามสภาพแวดล้อมการใช้งาน ดังนี้

สิ่งเปราะเปื้อนจากฝุ่น เป็นความเปราะเปื้อนที่ลมพัดเอาดินหรือทรายขึ้นมาแล้วเกิดการสะสม มักเกิดบริเวณเขตอุตสาหกรรมหรือชนบท

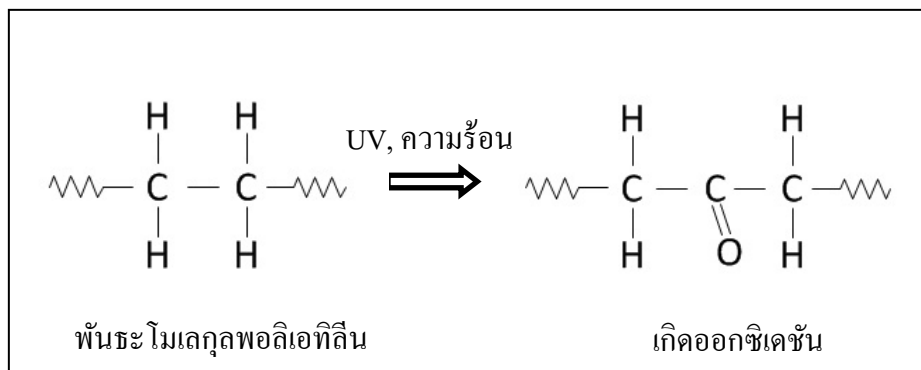
สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรม มักเกิดจากควัน เหม่า จากโรงงานอุตสาหกรรมจากไอเสียรถยนต์ การเปราะเปื้อนประเภทนี้มักยากต่อการชำระล้างด้วยน้ำฝน เพราะเนื่องจากเหม่านั้นค่อนข้างเหนียว จึงทำให้มีการสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ

สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเล คือ เกลือ ความเปราะเปื้อนชนิดนี้แบ่งได้ 2 แบบคือ

- 1) ความเปราะเปื้อนแบบธรรมดา เป็นความเปราะเปื้อนที่เกิดตามปกติจากการใช้งาน ซึ่งใช้เวลานานในการสะสม
- 2) ความเปราะเปื้อนอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นจากมีพายุพัดหอบเอาไอเกลือจากทะเลเข้ามา โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ความเปราะเปื้อนจะรุนแรงมาก

3.7.4 การเกิดออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน

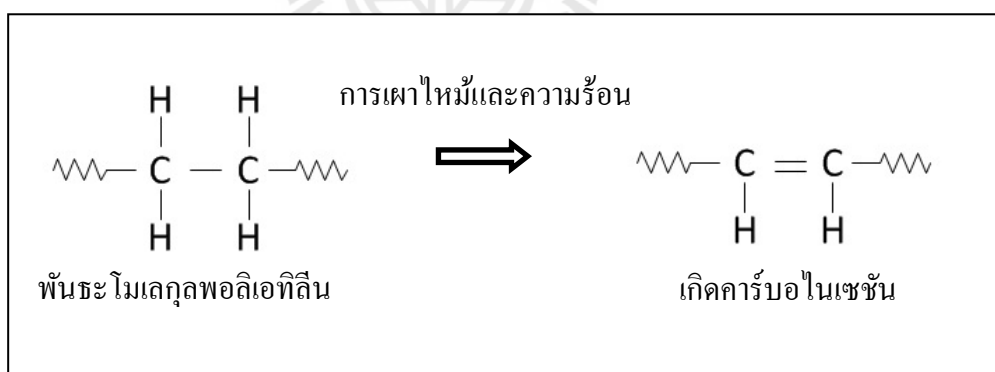
การเกิดออกซิเดชันสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีคิซซาร์จทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิว ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน ความร้อน และแสงอัลตราไวโอเลต หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮเปอร์ออกไซด์ (Hyperoxide: ROOH) แสงอัลตราไวโอเลต และความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ประกอบด้วย RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำต่อปฏิกิริยาที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวนพอลิเอทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจน ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียคุณสมบัติทางกล แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเกิดออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน

3.7.5 การเกิดคาร์บอนในเซชันของพอลิเอทิลีน

คาร์บอนในเซชัน คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัตถุต่าง ๆ ให้เป็นธาตุคาร์บอน (Carbon) การเกิดคาร์บอนในเซชันบนฉนวนพอลิเอทิลีน เกิดจากการเผาไหม้ด้วยดีเอสอาร์จากไฟฟ้าและความร้อนเป็นเวลานานเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้พันธะโมเลกุลของไฮโดรเจนในฉนวนพอลิเอทิลีน หลุดออกไปและเปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนแสดงในรูปที่ 3.18 ส่งผลให้ฉนวนพอลิเอทิลีนมีความเป็นฉนวนลดลง



รูปที่ 3.18 การเกิดคาร์บอนในเซชันของพอลิเอทิลีน

3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo Microscope: SM) เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหัวตั้งมีความชัดลึก เป็นภาพสีแบบ 3 มิติ นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายนอกของวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่ตาเปล่าไม่สามารถแยกแยะรายละเอียดได้

สามารถศึกษาได้ทั้งวัตถุโปร่งแสงและวัตถุทึบแสง วัตถุที่ศึกษาอาจเป็นสิ่งมีชีวิตหรือไม่มีชีวิตก็ได้ โดยสามารถส่องได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการเตรียมชิ้นงาน

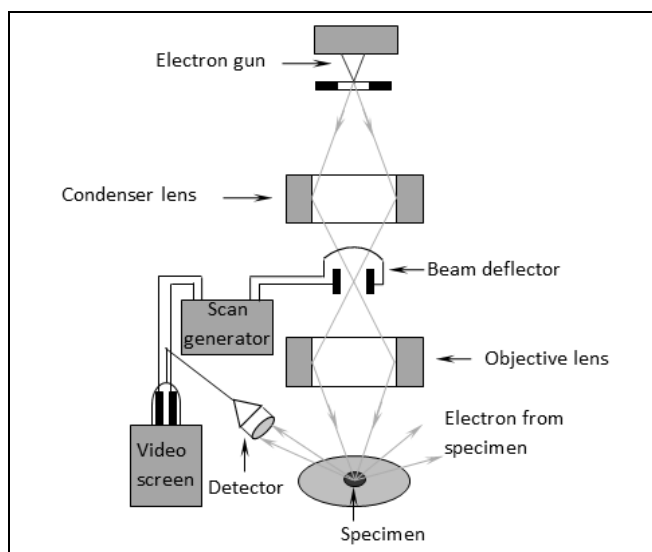
การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอสำหรับงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้ใช้กล้อง LEICA รุ่น EZ4D แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยใช้กำลังขยาย 200 เท่า ได้ภาพขนาด $5.45 \times 4.09 \text{ mm}$



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ LEICA รุ่น EZ4D

3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพที่ผิวของวัสดุ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายกราดไปยังพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ข้อมูลที่ได้เป็นภาพขาวดำ 3 มิติ หลักการทำงานของเครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอิเล็กตรอน (Electron Gun) ที่ด้านบนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน โดยสามารถปรับขนาดให้เล็กหรือใหญ่ได้ตามต้องการ เมื่อต้องการภาพที่มีความคมชัดต้องปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปยังพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดไปยังผิวชิ้นงานทดสอบจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น เมื่อสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกบันทึกจึงแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพหน้าจอคอมพิวเตอร์ต่อไปแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้กล้อง JEOL รุ่น JSM-7800F แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยก่อนการส่องผิวชิ้นงานมีกระบวนการเตรียมชิ้นงานก่อนเนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างทำมาจากพอลิเมอร์จึงต้องทำการฉาบผิวชิ้นงานด้วยทองคำ เพื่อให้ผิวชิ้นงานสามารถสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี หากมีการฉาบผิวไม่ดีพอจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้เกิดเป็นฝ้าขาวและไม่ชัดเจน เครื่องฉาบผิวชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM – 7800F



รูปที่ 3.22 เครื่องฉาบผิวชั้นงาน

3.10 เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transforms Infrared Spectroscopy: FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมี การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพันธะ สารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลมีพันธะแบบโคเวเลนต์และมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ในโมเลกุลเนื่องจากการสั่น หรือการหมุน โดยสามารถแบ่งช่วงคลื่นของอินฟราเรดได้ 3 ระดับ ดังนี้

- 1) ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared) เลขคลื่น $12,800$ ถึง $4,000\text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่แถบดูดกลืนเกิดจากโอเวอร์โทน
- 2) ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle Infrared) เลขคลื่น $4,000$ ถึง 200 cm^{-1} แบ่งเป็นช่วงความถี่ (Group Frequency) $4,000$ ถึง $1,300\text{ cm}^{-1}$ ช่วงคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ให้ฟิวดูดกลืน (Absorption Peak) และช่วงพิมพ์ลายนิ้วมือ (Finger Print) 1300 ถึง 20 cm^{-1} โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล
- 3) ช่วงไกลอินฟราเรด (Far Infrared) เลขคลื่น 200 ถึง 100 cm^{-1} ช่วงนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการแทรกซึมที่เกี่ยวกับการหมุน รวมทั้งโหมดการสั่นของโครงผลึกและโครงสร้างการสั่นของโมเลกุลขนาดใหญ่

นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจและใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลางมากกว่าช่วงอื่น คลื่นอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $4,000$ - 400 cm^{-1} ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงความถี่กลางตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง จากนั้นวัดแสงที่ส่งผ่าน

ออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่นกับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum หรือ IR Spectrum)

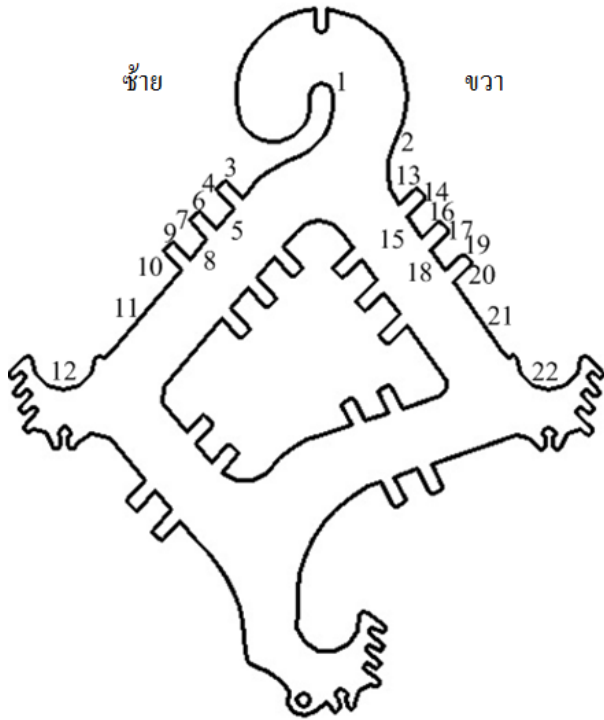
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ช่วงกลางอินฟราเรดในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเคเบิลสเปเซอร์โดยช่วงเลขคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ $4,000\text{ cm}^{-1}$ ถึง 400 cm^{-1} และเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุมีลักษณะทึบแสงจึงเลือกใช้เทคนิค Attenuated Total Reflection (ATR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการศึกษาพื้นผิวของวัตถุ และวิธีนี้สามารถใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่มีลักษณะทึบแสงหรือมีความหนาแน่นมากเกินไปที่จะวิเคราะห์ด้วยวิธีส่งผ่าน (Transmission) ได้ เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR ของบริษัท BRUKER รุ่น TENSOR 27

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค ATR-FTIR เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ โดยให้ความสนใจในตำแหน่งต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ตำแหน่ง	รายละเอียด
	1. จุดต่อลงดิน 2. ใกล้เคียงจุดต่อลงดิน 3. บนปีกบนฝั่งซ้าย 4. ใต้ปีกบนฝั่งซ้าย 5. ลำตัวระหว่างปีกบนกับกลางฝั่งซ้าย 6. บนปีกกลางฝั่งซ้าย 7. ใต้ปีกกลางฝั่งซ้าย 8. ลำตัวระหว่างปีกกลางกับล่างฝั่งซ้าย 9. บนปีกล่างฝั่งซ้าย 10. ใต้ปีกล่างฝั่งซ้าย 11. ลำตัวใกล้เคียงจุดรองรับสายเคเบิลฝั่งซ้าย 12. จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งซ้าย 13. บนปีกบนฝั่งขวา 14. ใต้ปีกบนฝั่งขวา 15. ลำตัวระหว่างปีกบนกับกลางฝั่งขวา 16. บนปีกกลางฝั่งขวา 17. ใต้ปีกกลางฝั่งขวา 18. ลำตัวระหว่างปีกกลางกับล่างฝั่งขวา 19. บนปีกล่างฝั่งขวา 20. ใต้ปีกล่างฝั่งขวา 21. ลำตัวใกล้เคียงจุดรองรับสายเคเบิลฝั่งขวา 22. จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งขวา

การวิเคราะห์ให้ความสนใจปริมาณพันธะ $C=O$, $C=C$ ที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการบอโนเซชันตามลำดับ และวิเคราะห์ปริมาณพันธะ $C-H$ และ $C-C$ ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณโซ่ข้างและโซ่หลักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบ สำหรับช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์

Wave Number (cm ⁻¹)	พันธะเคมี
2,916	C-H ใน CH ₂
1,745	C=O
1,630	C=C
717	C-C

3.11 การวัดระดับความเปรอะเปื้อน

สำหรับการใช้งานจริงของเคเบิลสเปเซอร์นั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะที่มีการเปรอะเปื้อนตามผิวได้เลย เพราะเป็นการติดตั้งใช้งานนอกอาคารหรือกลางแจ้ง จึงเป็นเรื่องปกติที่มีสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะต่าง ๆ มาเกาะตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เช่น ฝุ่น เหม่า จี๊เจ้า ไอเสีย ควั่นจากโรงงานอุตสาหกรรม เกล็ดจากทะเล หรือสิ่งอื่น ๆ ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง สิ่งเปรอะเปื้อนบางชนิดเช่น เกล็ดจากทะเล ในสภาวะแห้งอาจไม่ส่งผลมากนัก แต่เมื่อรวมตัวกับน้ำกลายเป็นสารละลายก็ทำให้ผิวเคเบิลสเปเซอร์เกิดกระแสรั่วไหลได้มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งได้ง่ายขึ้น

สำหรับหับเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเสร็จสิ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะถูกวัดค่าความเปรอะเปื้อนโดยการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเกลือ (Salt Deposit Density: SDD) อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 60507 มีวิธีการตรวจวัดและคำนวณค่าความเปรอะเปื้อนดังนี้

- 1) นำเคเบิลสเปเซอร์ออกจากห้องทดสอบหรือฐานติดตั้ง โดยระงับอย่าให้มีการสัมผัสกับผิวเคเบิลสเปเซอร์หรือสัมผัสให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้
- 2) ใช้ถ้วยตวงน้ำกลั่นปริมาตร 300 cm³ แล้วนำสำลิจุ่มลงไปใต้น้ำกลั่นแล้วบีบน้ำออกจากสำลี จากนั้นจึงนำมาเช็ดทำความสะอาดเคเบิลสเปเซอร์ให้ทั่ว ในขณะที่ทำความสะอาดนั้นต้องสวมถุงมือยางด้วย
- 3) นำสำลิล้างไปจุ่มน้ำและเขย่าเพื่อให้สิ่งเปรอะเปื้อนที่ติดอยู่หลุดออกมาแล้วบีบน้ำออกอีกครั้งก่อนนำไปเช็ดใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนผิวเคเบิลสเปเซอร์สะอาดไม่มีสิ่งเปรอะเปื้อนเหลืออยู่
- 4) คนน้ำกลั่นและสิ่งที่เจือปนให้ละลายเข้ากัน จากนั้นใช้มิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำกลั่นและจดบันทึก

เมื่อวัดค่าความนำไฟฟ้าได้แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณโดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (6.1)$$

เมื่อ	θ	คือ อุณหภูมิของสารละลาย (°C)
	σ_{θ}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ θ °C (S/m)
	σ_{20}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 °C (S/m)
	b	คือ ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิที่วัดได้ในขณะนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.2)

$$b = -3.200 \times 10^{-8} \theta^3 + 1.032 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.272 \times 10^{-4} \theta + 3.544 \times 10^{-2} \quad (6.2)$$

สามารถคำนวณ SDD ได้จากสมการ (6.3) และ (6.4)

$$S_a = (5.7 \times 10^{-4} \sigma_{20})^{1.03} \quad (6.3)$$

$$SDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (6.4)$$

เมื่อ	S_a	คือ ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (mg/cm ³)
	SDD	คือ Salt deposit density (mg/cm ³)
	V	คือ ปริมาณของสารละลายใช้ทำความสะอาด (cm ³)
	A	คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบ (cm ²)
สำหรับพื้นที่ผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ทดสอบมีค่า 2,775 cm ² (เป็นค่าโดยประมาณได้จากโปรแกรม Solidworks)		

3.12 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคเบิลสเปเซอร์ ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ก่อนที่จะทำการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุ อาทิเช่น การใช้งาน ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์ การติดตั้ง อุปกรณ์ต่างที่ใช้งานร่วมกับ เคเบิลสเปเซอร์ คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติทางกล ปัจจัยที่ส่งผล กระทบต่อการเสื่อมอายุ ได้แก่ ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล ความเครียดทางสภาวะแวดล้อม เครื่องมือการวิเคราะห์ฐานวิทยาของพื้นผิวและเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด

สเปคโตรสโกปี รวมถึงการคำนวณค่าระดับความแปรอะเปี้ยน การศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจ และทราบถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ ได้ดียิ่งขึ้น



บทที่ 4

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์

4.1 บทนำ

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ประกอบด้วยการทดสอบหลัก 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ ได้แก่ การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ ซึ่งจุดประสงค์หลักของการทดสอบทั้งหมดมีเป้าหมายเดียวกันคือ เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุ ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ และการสึกกร่อนบนพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ ในบทนี้จึงได้อธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ที่สำคัญและจำเป็นต่อการทดสอบ อาทิเช่น รายละเอียดของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมชิ้นงาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การติดตั้งชิ้นงาน และวิธีทำดำเนินการทดสอบแบบต่าง ๆ โดยรายละเอียดทั้งหมดแสดงไว้ดังนี้

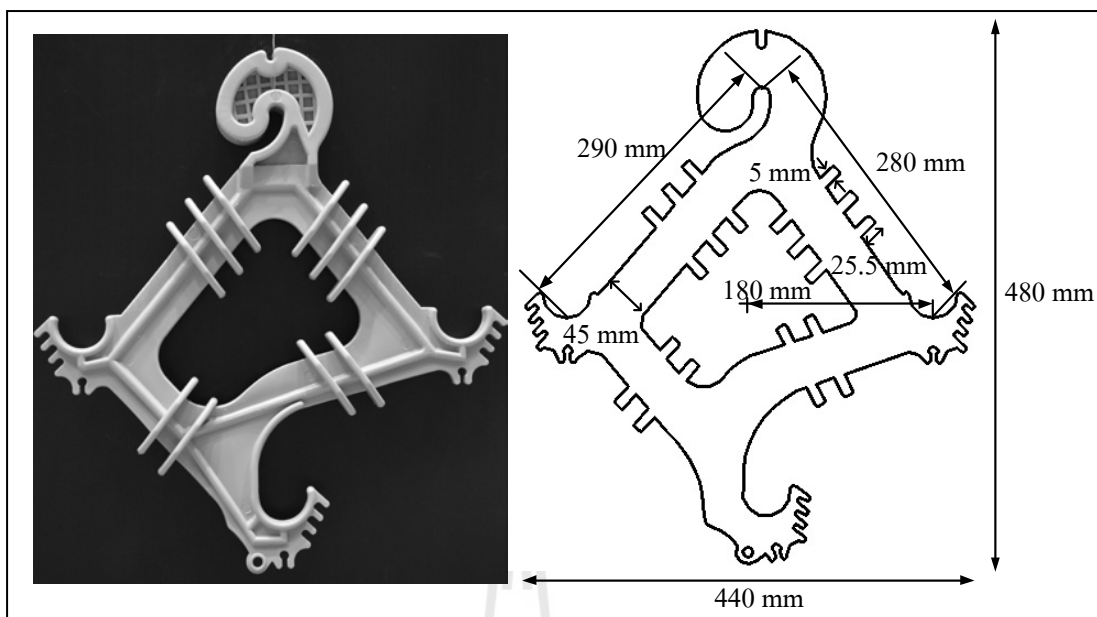
4.2 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ทำการทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ติดต่อซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัด ส.กมลเทรดดิ้ง (SKT) ซึ่งผลิตและจำหน่ายเฉพาะเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้ให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยตรง โดยเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อน มีระยะกระแสร่วมตามผิวประมาณ 310 mm รายละเอียดโครงสร้างของเคเบิลสเปเซอร์แสดงดังรูปที่ 4.1 จำนวนทั้งสิ้น 20 ตัว แบ่งออกสำหรับการทดสอบแบบต่าง ๆ คือ

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ 6 ตัว

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด 6 ตัว

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ 8 ตัว



รูปที่ 4.1 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบจะต้องทำความสะอาดสเปเซอร์ทุกครั้ง โดยใช้ผ้าเช็ดทำความสะอาดที่ผิว เพื่อให้แน่ใจว่า สเปเซอร์ที่ใช้ไม่มีฝุ่นละอองหรือสิ่งแปลกปลอมมาเกาะ เพราะฝุ่นหรือสิ่งแปลกปลอมนั้นอาจส่งผลให้เกิดความไฟเร็วขึ้นหรือส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้

4.3 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยหมอกไอเกลือ เป็นการจำลองสภาวะความเครียดที่สเปเซอร์ได้รับ เมื่อติดตั้งใช้งานในบริเวณชายฝั่งทะเล เป็นการทดสอบที่จำกัดเวลา โดยต้องทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ลักษณะการทดสอบคือ ติดตั้งสเปเซอร์ไว้ในห้องทดสอบ จากนั้นจึงป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับสเปเซอร์ตลอดการทดสอบ และมีการจำลองสภาวะอากาศที่มีหมอกไอเกลือขึ้น โดยการฉีดหมอกไอเกลือเข้าไปในห้องทดสอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ต่อเนื่อง จากนั้นก็หยุดฉีดหมอกไอเกลือเป็นเวลา 16 ชั่วโมงและกลับมาฉีดหมอกอีกครั้งหนึ่ง ทดสอบสลับไปมาอย่างนี้เรื่อย ๆ จนครบ 1,000 ชั่วโมง เงื่อนไขในการทดสอบเป็นการประยุกต์จากมาตรฐาน IEC Publ.61109 ข้อกำหนดและรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

ข้อกำหนด	มาตรฐาน IEC Publ. 61109	ค่าที่ใช้จริง
ขนาดห้องทดสอบสูงสุด (m ³)	10	9.6
ระยะเวลาในการทดสอบ (h)	1000.	1000
แรงดันทดสอบ (kV)	14-20	12.7
อัตราการไหลของน้ำ (l/m ³ h)	0.4 ± 0.1	0.5
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (kg/m ³)	10	10
ขนาดของละอองหมอก (μm)	5-10	7 (จากสเปคเครื่อง)
อุณหภูมิ	20 °C ± 5	อุณหภูมิห้องทดสอบ
ระดับการป้องกันกระแสรั่ว	1 A	1 A
จำนวนชิ้นงานต่อ 1 รอบทดสอบ	3	3

4.3.1 อุปกรณ์การทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดและหน้าที่การทำงาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.2 อุปกรณ์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

ลำดับ	อุปกรณ์	รายละเอียดและหน้าที่
1	ห้องทดสอบ	ขนาด 9.6 m ³
2	ชุดติดตั้งถังน้ำ	ใช้วางถังน้ำเกลือ
3	ถังน้ำเกลือ	ถังขนาด 100 ลิตร
4	หม้อแปลงไฟฟ้า	เป็นหม้อแปลง 1 เฟสขนาด 22 kV 30 kVA
5	วาไรแอค	ขนาด 220 V 30 kVA ใช้ปรับขนาดแรงดันเข้าสู่หม้อแปลง
6	บุชชิงแรงสูง	เป็นฉนวนป้องกันตัวนำสัมผัสกับห้องทดสอบ
7	แผงวงจรควบคุมเวลา	ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างหมอก
8	ตู้ MCB	เป็นสวิตช์ควบคุมวงจรหลัก
9	เครื่องสร้างหมอกไอเกลือ	ใช้จำลองสภาวะหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 4.2 อุปกรณ์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ (ต่อ)

10	สายเคเบิลแรงสูง	นำกระแสไฟฟ้าไปสู่เคเบิลสเปเซอร์
11	อิเล็กโทรดทรงกลม	ลดความเครียดสนามไฟฟ้า บนแท่งตัวนำที่ติดกับบูชชิงแรงสูง
12	ฉนวน	ใช้สำหรับแขวนสเปเซอร์
13	ตัวต้านทานน้ำ	จำกัดกระแสที่ออกจากหม้อแปลง
14	ตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ	ใช้แบ่งวัดแรงดันสูงในการทดสอบ
15	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	ใช้วัดแรงดันต่ำ
16	ตะขอกาวด์	ใช้ต่อเพื่อคายประจุ
17	ชุดวัดกระแสรั่ว	ใช้วัดกระแสรั่วไหลตามผิว
18	คอมพิวเตอร์	ติดตั้งโปรแกรม Lab View เพื่อบันทึกค่ากระแสที่ได้จากการวัด

ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

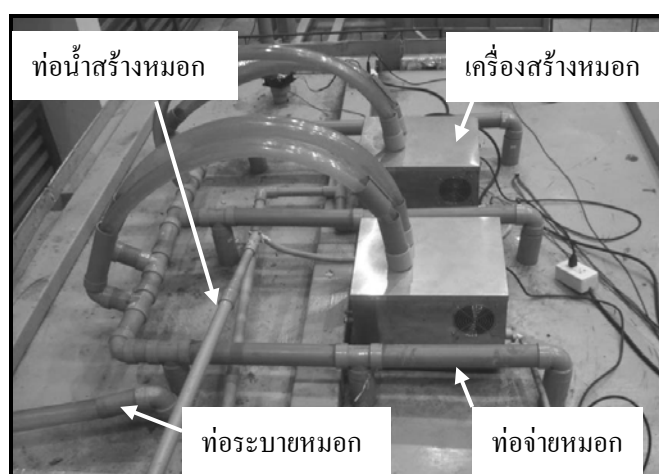
ห้องทดสอบที่ใช้เป็นห้องปิดทึบขนาด $2.4\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ (วรวิทย์ พัทม์โช, 2555) แต่ก็มีช่องระบายอากาศสำหรับกรณีหมอกมีความหนาแน่นมากเกินไป มีประตูเข้าออกประตูเดียว โดยด้านหน้าประตูก็มีช่องกระจกเพื่อให้สามารถมองเห็น และสังเกตชิ้นงานในขณะที่ทำการทดสอบได้ผนังห้องทดสอบทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 3 mm ทาทั้ด้วยสีกันสนิมเพื่อความคงทนในการใช้งาน และมีอิเล็กโทรดทรงกลมเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ด้านนอก สำหรับจ่ายไฟให้กับชุดทดสอบ ส่วนด้านนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแล้วปิดทับด้วยแผ่นยิปซัม เพื่อกันความร้อนจากการทดสอบ และโครงสร้างหลักทำจากเหล็กกล่องเพื่อความแข็งแรง ส่วนที่เป็นโลหะของห้องทดสอบถูกต่อลงดินเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการทดสอบได้ ลักษณะห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะห้องทดสอบ

เครื่องสร้างหมอก

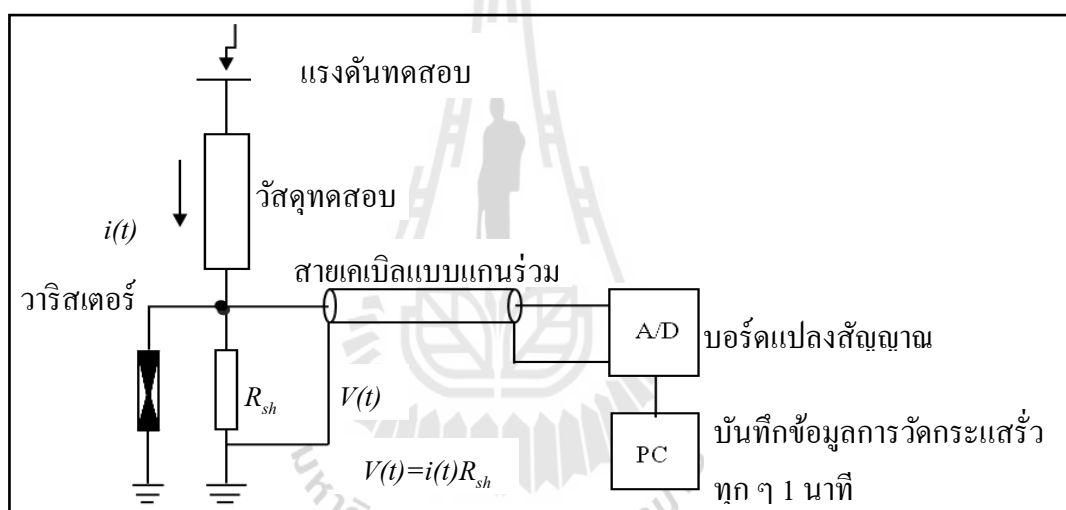
เป็นเครื่องที่ใช้ในการสร้างละอองหมอกโดยหัวอัลตราโซนิกด้วยความถี่สูงนี้ทำให้ได้ละอองหมอกที่มีขนาดเล็กขนาดเล็มากผสมกับอากาศได้ดี ทำให้ความชื้นในห้องทดสอบสูงตามมาตรฐานกำหนดไว้คือ ความชื้นในห้องทดสอบต้องมีค่า 95%RH ภายใน 15 นาที ส่วนน้ำที่ใช้สร้างหมอกเป็นน้ำที่ผ่านการกรองแยกไอออน (De-ionized Water) สำหรับหมอกไอเกลือจะผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นที่ต้องการ เครื่องนี้ตั้งไว้ด้านบนของห้องทดสอบเพื่อฉีดหมอกไอเกลือ และหมอกไอสะอาด (กรณีการทดสอบด้วยพหุความเครียด) เข้าไปในห้องทดสอบ การติดตั้งเครื่องสร้างหมอกแสดงดังรูปที่ 4.3



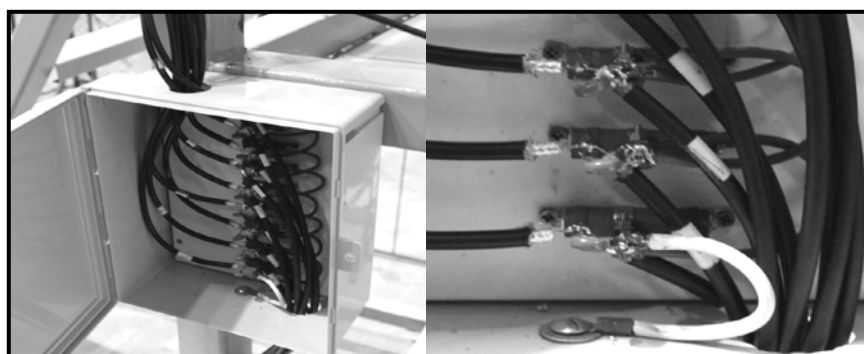
รูปที่ 4.3 การติดตั้งเครื่องสร้างหมอก

ชุดวัดกระแสรั่ว

การวัดกระแสรั่วตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ ระหว่างที่ทำการทดสอบ สามารถวัดได้โดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับเคเบิลสเปเซอร์แล้ววัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานต่ออนุกรม (R_{sh}) ลักษณะการทำงานของหลักการวัดกระแสรั่ว เริ่มต้นจากวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V(t)$ คร่อม R_{sh} ซึ่งเป็นตัวแทนของกระแสรั่วจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเคเบิลสเปเซอร์ที่ทดสอบ ผ่านมาตามสายเคเบิลแบบแกนร่วมและเข้าสู่บอร์ดแปลงสัญญาณ (DAQ Board) ทำการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เมื่อสัญญาณแรงดันเป็นดิจิทัลก็จะผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ซึ่งการวัดและบันทึกค่ากระแสรั่วตามผิวที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบใช้โปรแกรม Lab View (สุชาติ ทองอัม. 2555)



รูปที่ 4.4 วงจรการวัดกระแสรั่วตามผิว



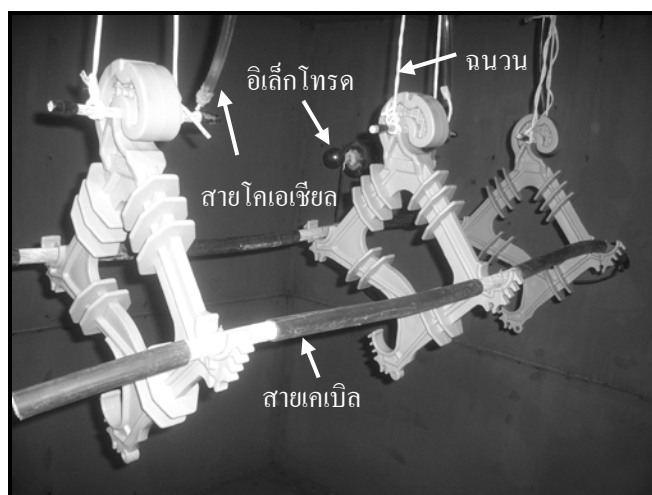
รูปที่ 4.5 ชุดวัดกระแสรั่วตามผิว



รูปที่ 4.6 บอร์ดแปลงสัญญาณ (DAQ Board)

4.3.2 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์ที่ทดสอบ ถูกติดตั้ง ในลักษณะแขวนเหมือนกับการใช้งานจริง โดยใช้สายฉนวนผูกติดกับสายดิน ส่วนอีกด้านของสายฉนวนยึดกับด้านบนห้องทดสอบ จากนั้นจึงแขวนเคเบิลสเปเซอร์ จำนวน 3 ตัว มีระยะห่างกันประมาณ 50 cm และใช้สายเคเบิลแบบเปลือย วางพาดบนจุดรองรับสายของสเปเซอร์ทั้งสองข้างเพื่อให้เกิดความสมดุลและยึดสายเคเบิลให้ติดกับสเปเซอร์โดยใช้ตัวรัดสาย จากนั้นใช้สาย THW เชื่อมระหว่างสายเคเบิลกับตัวนำที่บุชชิง และสุดท้ายต่อสายเคเบิลแกนร่วมเข้ากับสายดินทั้งของสเปเซอร์แต่ละตัวเพื่อใช้วัดกระแสรั่วตามผิวระหว่างการทดสอบ การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์สภาวะหมอกไอเกลือ

4.3.3 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือแบ่งการทดสอบรอบ 2 รอบ เพื่อยืนยันผลการทดสอบ การทดสอบแต่ละรอบใช้เคเบิลสเปเซอร์ 3 ตัว แม้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ใช้งานจริงสำหรับระบบสามเฟสร่วมกับสายเคเบิลหุ้มฉนวน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ จะป้อนแรงดันให้กับเคเบิลสเปเซอร์โดยตรงและใช้ไฟฟ้า 1 เฟส ป้อนเข้ากับจตุรกรรับสายที่มีระยะกระแสรั่วตามผิวต่ำสุด นั่นคือ จตุรกรรับสายทั้งสองข้างของเคเบิลสเปเซอร์ และไม่พิจารณาเฟสด้านล่างดังรูปที่ 4.7 ข้างต้น เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในวิธีดำเนินการทดสอบจึงแสดงเป็นลำดับดังนี้

- 1) เมื่อติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในห้องทดสอบเรียบร้อยแล้ว จึงผสมเกลือ (NaCl) กับน้ำแยกไอออน (De-Ionize Water) ลงในถังที่เตรียมไว้ ตามความเข้มข้นที่กำหนด
- 2) จ่ายแรงดันทดสอบขนาด 12.7 kV ซึ่งเป็นแรงดันเฟสของระบบ 22 kV
- 3) เปิดเครื่องสร้างหมอกไอเกลือไปพร้อมกับข้อ 2) ตั้งไทม์เมอร์ ให้ทำการควบคุมการจ่ายหมอกดังตารางที่ 4.3 และรันโปรแกรม Lab View เพื่อบันทึกค่ากระแสรั่ว
- 4) จากนั้นก็เฝ้าสังเกตการณ์ทดสอบตลอดระยะ 1,000 ชั่วโมง เช่น เติมน้ำเกลือ เปิดระบบเมื่อไฟฟ้าดับ และสังเกตการณ์เกิดวาฟไฟ เป็นต้น
- 5) เมื่อทำการทดสอบครบตามเวลาที่กำหนด จึงทำการเปลี่ยนชุดที่ 2 และดำเนินการทดสอบเหมือนเดิม นำเคเบิลสเปเซอร์ที่ทดสอบแล้วไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี

ตารางที่ 4.3 วงรอบการทดสอบสภาวะหมอกไอเกลือ

ช่วงระยะเวลา (ชั่วโมง)	0-8	8-24
หมอกไอเกลือ		
แรงดันทดสอบ		
วัดกระแสรั่ว		

4.4 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะพหุความเครียด ลักษณะการทดสอบความคล้ายกับการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ แต่มีการ จำลองสภาวะความเครียดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอีก อันได้แก่ หมอกไอสะอาด ฝน ความร้อน และแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวประยุกต์จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

ข้อกำหนด	มาตรฐานกำหนด	ค่าที่ใช้จริง
ขนาดห้องทดสอบสูงสุด (m ³)	ไม่ระบุ	9.6
ระยะเวลาในการทดสอบ (h)	5000	1000
แรงดันทดสอบ (kV)	ไม่ระบุ	12.7
อัตราการไหลของน้ำ (l/m ³ h)	0.4 ± 0.1	0.5
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (kg/m ³)	7	7
ขนาดของละอองหมอก (μm)	5-10	7
อุณหภูมิทดสอบสูงสุด (°C)	50	50
อุณหภูมิปกติ (°C)	15-20	อุณหภูมิห้องทดสอบ
ระดับการป้องกันกระแสรั่ว	1	1
จำนวนชิ้นงานต่อ 1 การทดสอบ	ไม่ระบุ	3

4.4.1 อุปกรณ์การทดสอบ

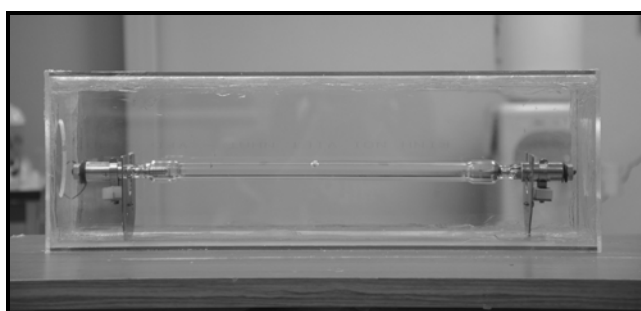
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด จะเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกันกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือทั้งหมด เพียงแต่การทดสอบนี้จะมีอุปกรณ์ในการจำลองสภาวะต่าง ๆ เพิ่มเข้ามาดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อุปกรณ์เพิ่มเติมการจำลองพหุความเครียด

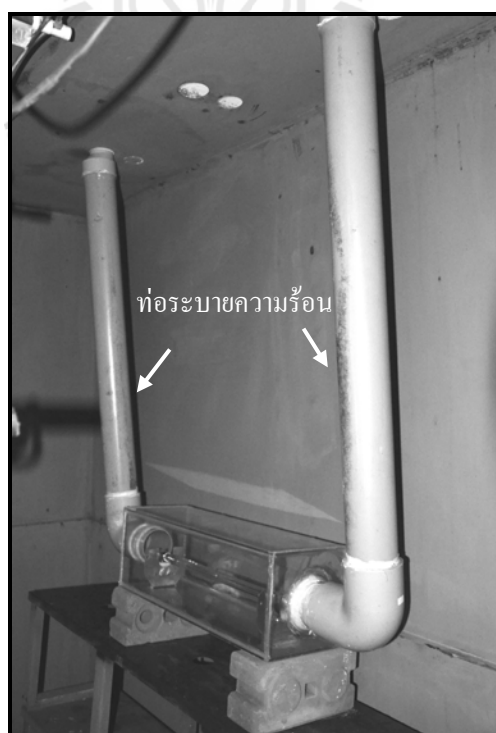
ลำดับ	อุปกรณ์	รายละเอียดและหน้าที่
1	เครื่องสร้างหมอกไอสะอาด	ใช้สร้างความชื้นในห้องทดสอบ
2	ฮีตเตอร์และชุดควบคุม	ใช้ทำความร้อนและควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่กำหนด
3	หลอดอัลตราไวโอเลตและชุดควบคุม	ใช้แทนสภาวะที่มีแสงแดด
4	Nozzle	สร้างสภาวะฝน
5	ปั๊มน้ำ	ปั๊มน้ำเข้าสู่ Nozzle
6	ถังน้ำ	ขนาด 500 ลิตร ใช้เก็บน้ำสร้างฝนเทียม
7	วงจรควบคุมเวลา	ควบคุมวงจรการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

หลอดอัลตราไวโอเลตและชุดควบคุม

ใช้หลอดอัลตราไวโอเลตแบบ Xenon Arc Lamp ขนาด 3,000 W ค่าความเข้มแสงของหลอดอัลตราไวโอเลตที่ใช้สำหรับทดสอบมีค่า 90 mW/cm^2 ครอบด้วยกระจกทนความร้อนเนื่องจากความร้อนจากหลอดมีอุณหภูมิสูงกว่า 300°C พร้อมทั้งต่อท่อติดตั้งพัดลมระบายความร้อนเพื่อป้องกันกระจกและตัวหลอด จากผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบทันทีทันใด (Thermal Shock) และยังป้องกันคราบสกปรกที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

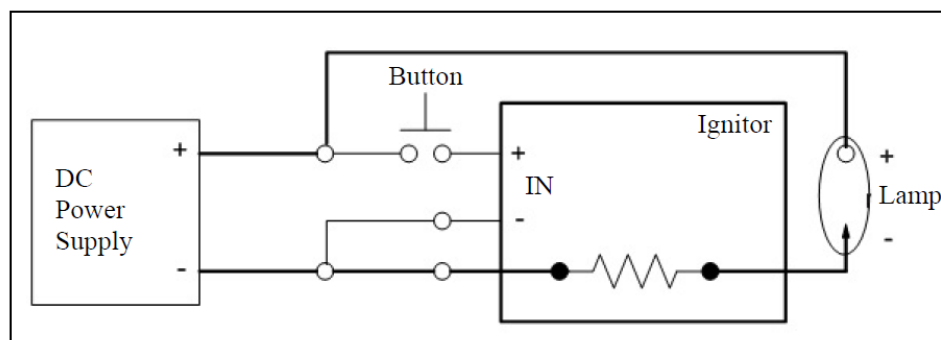


รูปที่ 4.8 หลอดอัลตราไวโอเลต

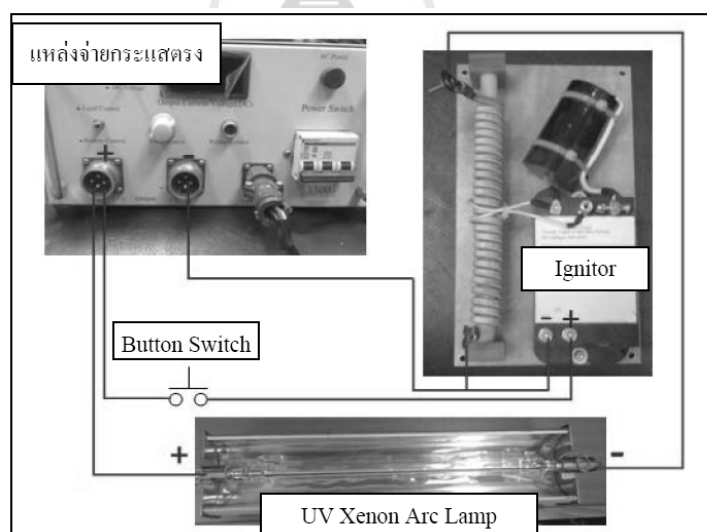


รูปที่ 4.9 การติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเลต

สำหรับการจุดหลอดจะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สตาร์ทเตอร์ (Electronic Starter) ช่วยจุดหลอดเรียกว่าอิกนิตอร์ (Ignitor) เพื่อจ่ายแรงดันสูง (High Voltage Pulse) ประมาณ 2.5-5 kV เข้าที่ตัวหลอดเพื่อให้เกิดสภาวะในการเบรกดาวนและสามารถสตาร์ทหลอดได้ วงจรควบคุมการจุดหลอดแสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 วงจรควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต

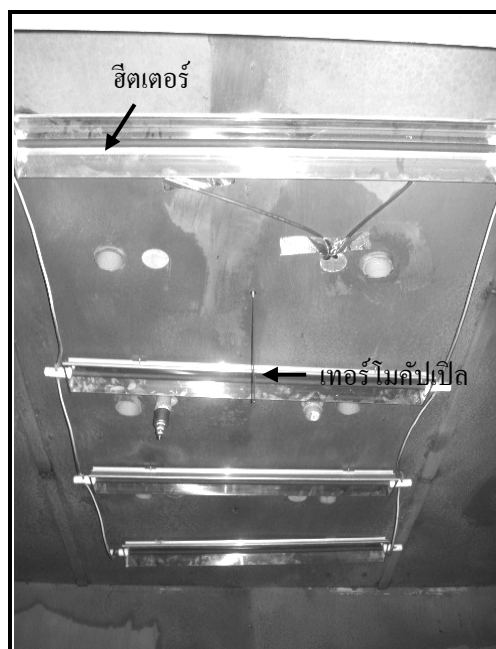


รูปที่ 4.11 ชุดควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต

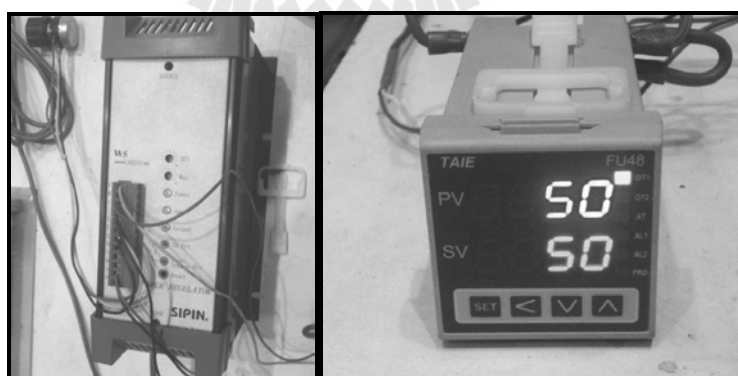
ฮีตเตอร์และวงจรควบคุมอุณหภูมิ

ฮีตเตอร์ทำหน้าที่ให้ความร้อนภายในห้องทดสอบ โดยช่วงที่เปิดฮีตเตอร์จะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 50 °C ฮีตเตอร์ที่ใช้มีขนาด 1000 W ติดตั้งพร้อมชุดควบคุมแบบขนานจำนวน 4 ชุด

ที่ด้านบนของห้องทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับฮีตเตอร์ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิล เครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องควบคุมฮีตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ฮีตเตอร์พร้อมชุดโคมและเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้ง



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับฮีตเตอร์

4.4.2 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์

การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในการทดสอบคล้ายกันกับการติดตั้งในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ เพียงแต่ให้ด้านหนึ่งได้สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลต แสดงดังรูปที่ 4.14



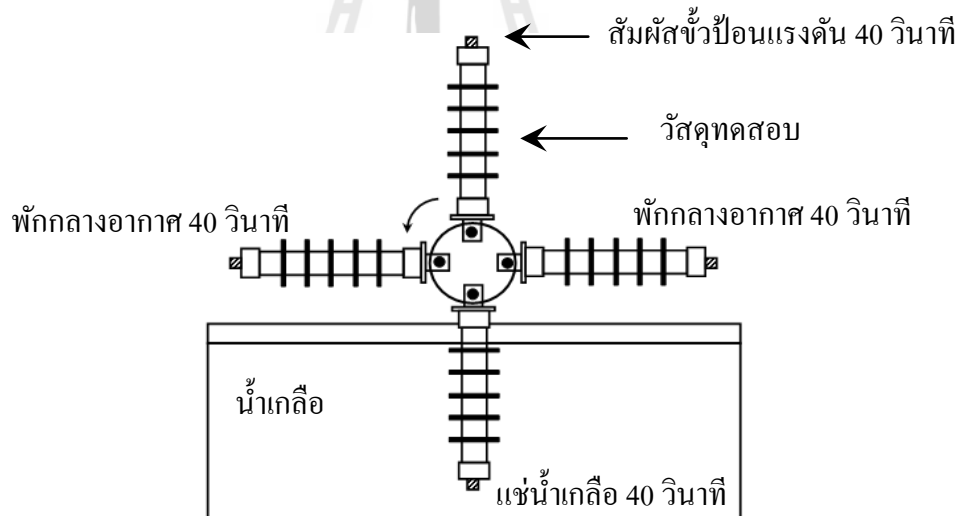
รูปที่ 4.15 ห้องทดสอบแรงการเสื่อมอายุ



รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ด้านแรงสูงสำหรับการทดสอบ

4.5 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ มีขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย การแช่เคเบิลสเปเซอร์ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 กำหนด เป็นระยะเวลา 40 วินาที จากนั้นมอเตอร์จะหมุนเพื่อให้เคเบิลสเปเซอร์ได้พักกลางอากาศเป็นเวลา 40 วินาที จากนั้นก็จะหมุนให้เคเบิลสเปเซอร์ให้สัมผัสกับข้อป้อนแรงดันอีก 40 วินาที และมอเตอร์จะหมุนให้เคเบิลสเปเซอร์ ได้พักกลางอากาศอีก 40 วินาที แล้วจึงลงไปแช่ในน้ำเกลือใหม่ ระยะเวลาในการเปลี่ยนตำแหน่ง 8 วินาที โดยรวม 1 รอบจะใช้ระยะเวลา 192 วินาที โดยเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ (1 cycle เท่ากับ 192 วินาที) ทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 30,000 cycle หรือประมาณ 1,600 ชั่วโมง ตามที่มาตรฐานกำหนด รูปที่ 17 แสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาและลักษณะการทำงานของชุดทดสอบ ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือได้ประยุกต์จากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ซึ่งเป็นมาตรฐานของการทดสอบลูกถ้วยพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 17 ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบการเสื่อมอายุแบบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

ตารางที่ 4.7 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

ข้อกำหนด	มาตรฐานกำหนด	ค่าที่ใช้จริง
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ	$1.40 \text{ kg/m}^3 \pm 0.06 \text{ kg/m}^3$	$1.40 \text{ kg/m}^3 \pm 0.1 \text{ kg/m}^3$
อุณหภูมิสภาพแวดล้อม	$20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$	อุณหภูมิห้องทดสอบ
ระยะเวลาในการทดสอบ	30,000 cycle	30,000 cycle

4.5.1 อุปกรณ์การทดสอบ

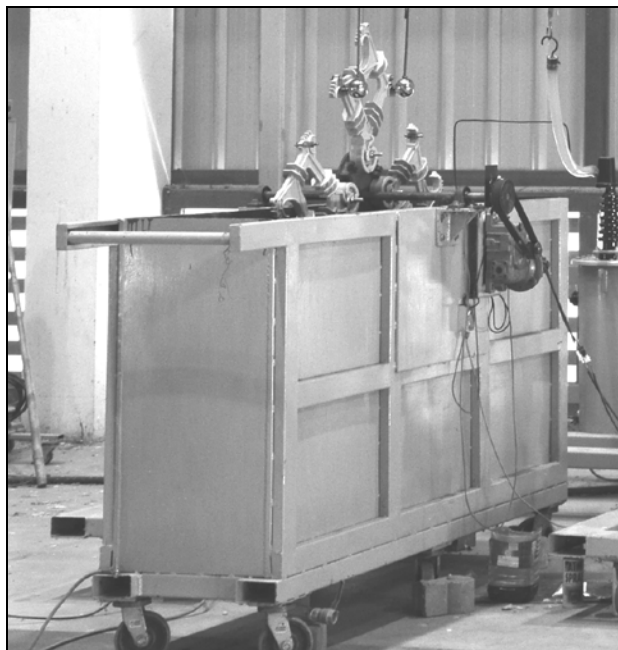
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ แสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดและหน้าที่การทำงานเพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.8 อุปกรณ์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

ลำดับ	อุปกรณ์	รายละเอียดและหน้าที่
1	ถังสแตนเลส	ใช้บรรจุน้ำเกลือปริมาตร 1000 ลิตร
2	โครงสร้างเหล็ก	สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ
3	วาไรแอค	ขนาด 220 V 30 kVA ใช้ปรับขนาดแรงดันที่เข้าสู่หม้อแปลง
4	ตู้ MCB	เป็นสวิตช์ควบคุมวงจรหลัก
5	หม้อแปลงไฟฟ้า	เป็นหม้อแปลง 1 เฟสขนาด 22 kV 30 kVA
	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	ใช้วัดแรงดันต่ำ
6	มอเตอร์	ใช้ปรับตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบ
7	ตู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์	ควบคุมการทำงานของมอเตอร์นับจำนวนรอบในการทดสอบ
8	อิเล็กทรอนิกส์	ลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ชั่วป้อนแรงดัน
9	สายเคเบิลแรงสูง	นำกระแสไฟฟ้าไปสู่ชิ้นงาน
10	บุชชิงแรงสูง	ป้องกันสายเคเบิลไม่ให้สัมผัสโครงเหล็ก
11	ตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ	ใช้แบ่งวัดแรงดันสูงในการทดสอบ
12	ตะขอกาวด์	ใช้ต่อกับตัวเก็บประจุเพื่อคายประจุ
13	เครื่องกรองน้ำแยกไอออน	ใช้กรองน้ำสำหรับการทดสอบ
14	ถังเก็บน้ำแยกไอออน	ขนาด 1000 cm ³ อย่างน้อย 2 ถัง
15	ปั้มน้ำและสายยาง	ใช้ในการเปลี่ยนน้ำทุกสัปดาห์

ถังสแตนเลส

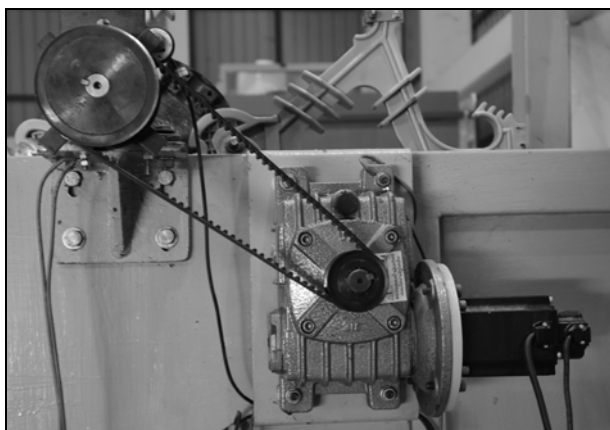
เป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.5×2×1.5 m³ เพื่อติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ ภายในถังสแตนเลสจะถูกบรรจุไว้ด้วยน้ำเกลือ และมีมอเตอร์สำหรับปรับตำแหน่งของเคเบิลสเปเซอร์ ซึ่งจะถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์แสดงในรูปที่ 4.18 (เจนจิรา กระแสโสม, 2555)



รูปที่ 4.18 ถังสแตนเลส

ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์

มีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และนับจำนวนรอบการหมุนของเคเบิลสเปเซอร์ โดยที่มีการป้อนคำสั่งความเร็วในการหมุน จำนวนรอบที่ต้องการให้หมุน รวมไปถึงการกำหนดเวลาของการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งและเวลาที่ให้มอเตอร์หยุดนิ่งด้วยชุดควบคุมมอเตอร์ มอเตอร์และชุดควบคุมการทำงานแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 มอเตอร์



รูปที่ 4.20 ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์

เครื่องกรองน้ำแยกไอออน

เครื่องกรองน้ำแยกไอออน (de-ionized) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญส่วนหนึ่งของชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ น้ำที่ใช้ในการทดสอบต้องพยายามให้มีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยที่สุด จึงใช้เครื่องกรองน้ำแยกไอออนมาใช้ในการทดสอบ เนื่องจากว่าปริมาณน้ำที่กรองได้ช้ามากจึงมีการเปิดเครื่องกรองตลอดเวลาเพื่อให้ได้น้ำแยกไอออนเพียงพอต่อการทดสอบ โดยจะเก็บน้ำแยกไอออนที่ได้ไว้ในถังขนาด 1000 ลิตร จำนวน 2 ถัง เพื่อป้องกันเหตุฉุกเฉินในกรณีน้ำไม่เพียงพอต่อการทดสอบ ชุดกรองน้ำแยกไอออนแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ชุดกรองน้ำแยกไอออน

4.5.2 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์

ในการทดสอบด้วยวงล้อย่น้ำเกลือ ติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์จำนวน 4 ตัวบนเพลาหมุน ที่ควบคุมการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยมอเตอร์ ชุดเพลานี้ยึดติดบนถังสเตนเลส แสดงดังรูปที่ 4.22 สำหรับจุดรองรับของสายของเคเบิลสเปเซอร์ ได้ติดตั้งขั้วโลหะสเตนเลสเพื่อรับแรงดันไฟฟ้าจากขั้ว ป้อนแรงดันที่ทำจากอิเล็กโทรดทรงกลม แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ลักษณะการติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์บนเพลา



รูปที่ 4.23 ลักษณะการติดตั้งขั้วรับแรงดัน

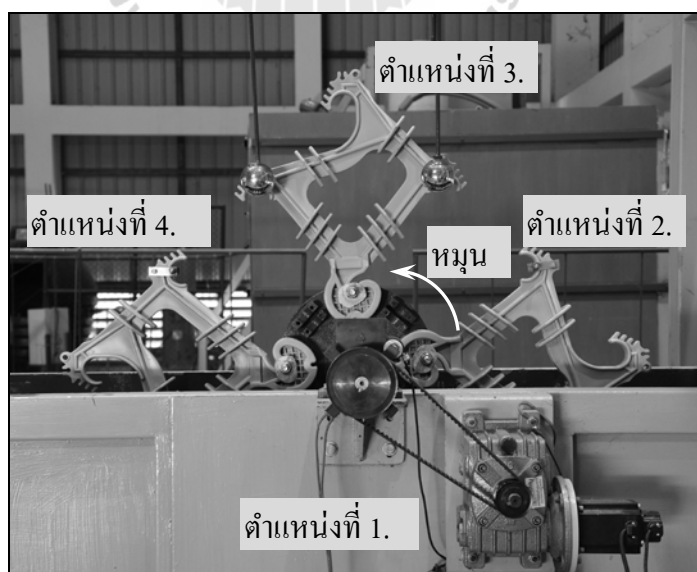
4.5.3 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.9 ด้วยการป้อนแรงดันให้กับเคเบิลสเปเซอร์โดยตรงและใช้ไฟฟ้า 1 เฟส ที่จุดรองรับสายทั้งสองข้างของเคเบิลสเปเซอร์เหมือนกับการทดสอบทั้ง 2 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.9 แรงดันทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ

ชุดการทดสอบ	จำนวนชิ้นงาน	แรงดันที่ใช้ทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ
ชุดที่ 1	4	12.7 kV	30,000 Cycle
ชุดที่ 2	4	15 kV	30,000 Cycle

โดยการทดสอบเริ่มจากแช่เคเบิลสเปเซอร์ในน้ำเกลือเป็นระยะเวลา 40 วินาที จากนั้นมอเตอร์หมุนเพื่อให้เคเบิลสเปเซอร์ได้พักกลางอากาศเป็นเวลา 40 วินาที แล้วหมุนให้เคเบิลสเปเซอร์ให้สัมผัสกับขั้วป้อนแรงดันอีก 40 วินาที และมอเตอร์หมุนให้เคเบิลสเปเซอร์ได้พักกลางอากาศอีก 40 วินาที แล้วจึงลงไปแช่ในน้ำเกลือใหม่ ระยะเวลาในการเปลี่ยนแต่ละตำแหน่งใช้เวลา 8 วินาที โดยรวม 1 รอบจะใช้ระยะเวลา 192 วินาที จนครบ 30,000 รอบ ตามที่มาตรฐานกำหนด แสดงการทดสอบดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดสอบ

ตำแหน่งที่ 1 จุ่มน้ำเกลือ 40 วินาที

ตำแหน่งที่ 2 พักกลางอากาศ 40 วินาที

ตำแหน่งที่ 3 สัมผัสขั้วป้อนแรงดัน 40 วินาที

ตำแหน่งที่ 4 พักกลางอากาศ 40 วินาที

ระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 8 วินาที สำหรับด้านที่ยึดติดกับเพลลาหรือวงล้อนี้จะถูกต่อลงดิน

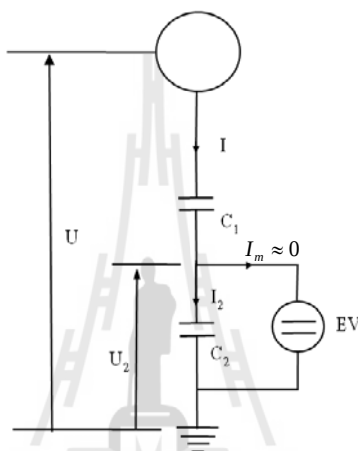
น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำแยกไอออน (de-ionized) และผสมกับเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 1.4 kg/m^3 จะต้องเปลี่ยนน้ำเกลือทุก ๆ 7 วัน เพื่อยังคงสภาพความเป็นน้ำเกลือที่ความเข้มข้นเท่าเดิม และบันทึกความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อรวบรวมข้อมูลในการนำไปวิเคราะห์ผล และมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ทดสอบไปพร้อมเสมอ ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนน้ำ การบันทึกความเปลี่ยนแปลงของเคเบิลสเปเซอร์ และตรวจสอบอุปกรณ์ใช้เวลาารวมกันไม่เกิน 1 ชั่วโมง ชุดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือแสดงดังรูปที่ 4.25



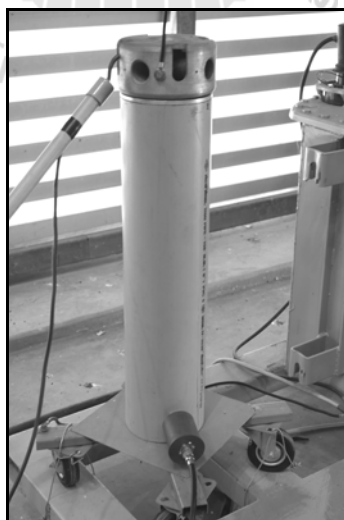
รูปที่ 4.25 ชุดทดสอบการเสื่อมอายุแบบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

4.6 การป้อนแรงดันไฟฟ้าและแบ่งวัดแรงดันสูง

การป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใช้ วาไรแอค (Variac) เป็นตัวปรับและป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบทางด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำ ส่วนด้านทุติยภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจ่ายให้วัสดุทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกจ่ายออกไปสามารถวัดได้ด้วยชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ (สำราวย สังข์สะอาด. 2547)



รูปที่ 4.27 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.26 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุประกอบด้วย ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (C_1) และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (C_2) โดยหลักการแล้ว กระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องวัด I_m นั้นต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ หรือ $I_m \approx 0$ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากัน การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ สามารถทำได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (4.1)$$

โดย C_1 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง มีขนาด 346 pF

C_2 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 347.3 nF

U คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)

U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ สามารถคำนวณได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำที่ทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากสมการข้างต้น

สำหรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดทดสอบทั้ง 3 การทดสอบนั้นสามารถสรุปและเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

การทดสอบ	ชุดการทดสอบ	จำนวนชิ้นงาน	ระยะเวลาทดสอบ (h)	แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันที่แบ่งวัด (V)
สภาวะหมอกไอเกลือ	ชุดที่ 1	3	1,000	12.7	12.64
	ชุดที่ 2	3	1,000	12.7	12.64
สภาวะพหุความเครียด	ชุดที่ 1	3	1,000	12.7	12.64
	ชุดที่ 2	3	1,000	12.7	12.64
วงล้อยุ่มน้ำเกลือ	ชุดที่ 1	4	1,600	12.7	12.64
	ชุดที่ 2	4	1,600	15	14.93

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงการทดสอบแรงการเสื่อมอายุทั้ง 3 การทดสอบ อันประกอบด้วย การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ ซึ่งการทดสอบ 2 อย่างแรกจะมีลักษณะการทดสอบคล้าย ๆ กัน ต่างกันที่มีการเพิ่มสภาวะนอกเหนือจากสภาวะหมอกไอเกลือเข้ามาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้การจำลองสภาวะพหุความเครียดมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้น สำหรับรายละเอียดของการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในบทนี้ได้แก่ อุปกรณ์ในการทดสอบต่าง ๆ การติดตั้งอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบ การเตรียมและวิธีดำเนินการทดสอบ เป็นต้น หลังจากดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้คือ การนำเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบแล้ว ไปทำการตรวจสอบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในบทถัดไป



บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์

5.1 บทนำ

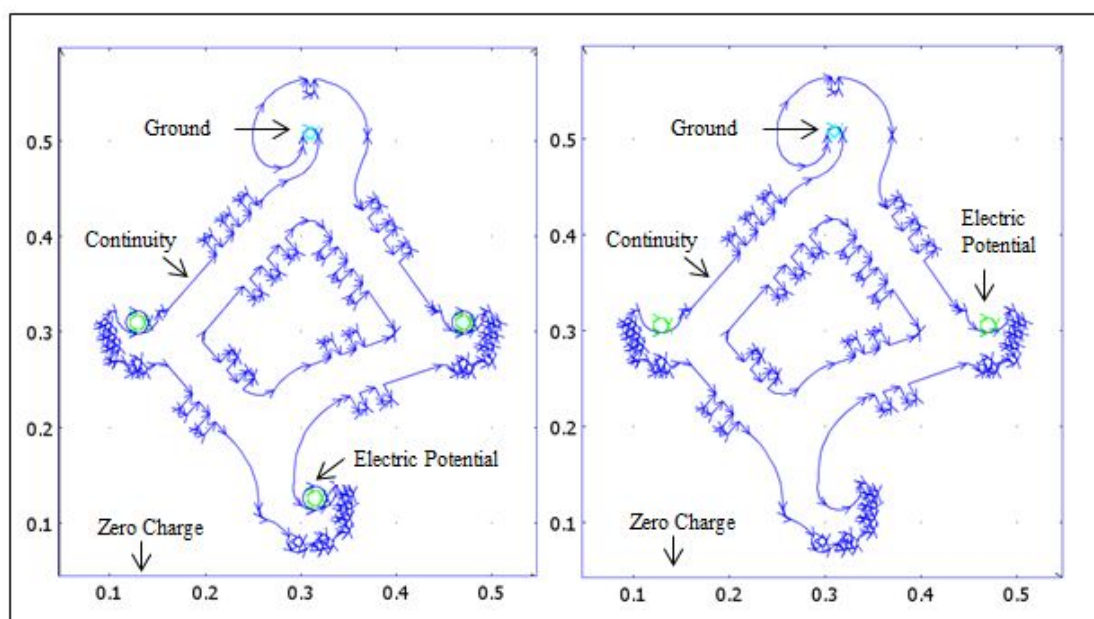
หลังจากดำเนินการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์เสร็จสิ้นตามขั้นตอนหรือวิธีการที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ การนำเสนอผลการทดสอบ ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ระดับความเปรอะเปื้อน การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR FTIR รายละเอียดผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.2 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์ฉนวนต่าง ๆ เกิดการเสื่อมอายุและเกิดความเสียหายมากที่สุด จึงได้มีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อแตกต่างของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเคเบิลสเปเซอร์ เมื่อใช้งานจริงในระบบจำหน่ายและเมื่อใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL

สำหรับการจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้กับระบบจำหน่าย 3 เฟส 22 kV จะแบ่งการจำลองเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่เกิดแรงดันเฟสสูงสุดที่เฟส A, B และ C แรงดันเฟสสูงสุดจะมีค่าแรงดันเท่ากับ $1V_p$ ส่วนเฟสที่เหลือจะมีค่าแรงดันเท่ากับ $-0.5V_p$ เมื่อ $V_p = 17.963$ kV เพื่อให้ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้นจึงกำหนดขนาดสายเคเบิลต่าง ๆ ให้ตรงกับที่ใช้งานจริง ได้แก่ สายดินขนาด 50 mm^2 สายเคเบิลขนาด 185 mm^2 ที่มีความหนาของฉนวนเท่ากับ 4.33 mm และกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกฉนวนเคเบิลมีค่าเท่ากับเคเบิลสเปเซอร์ คือ 2.3 ส่วนการจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในการทดลองใช้แหล่งจ่าย 1 เฟสต่อเข้ากับสายเคเบิลขนาด 185 mm^2 สายเปลือย และจ่ายให้กับตำแหน่งเฟส A และ B ของเคเบิล

สเปเซอร์เท่านั้น ในการจำลองจึงให้แรงดันที่เฟส A และ B เท่ากับ $1V_p$ ในการจำลองมีการกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Setting) แสดงดังรูปที่ 5.1 ส่วนตัวอย่างของ Triangular mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 5.2

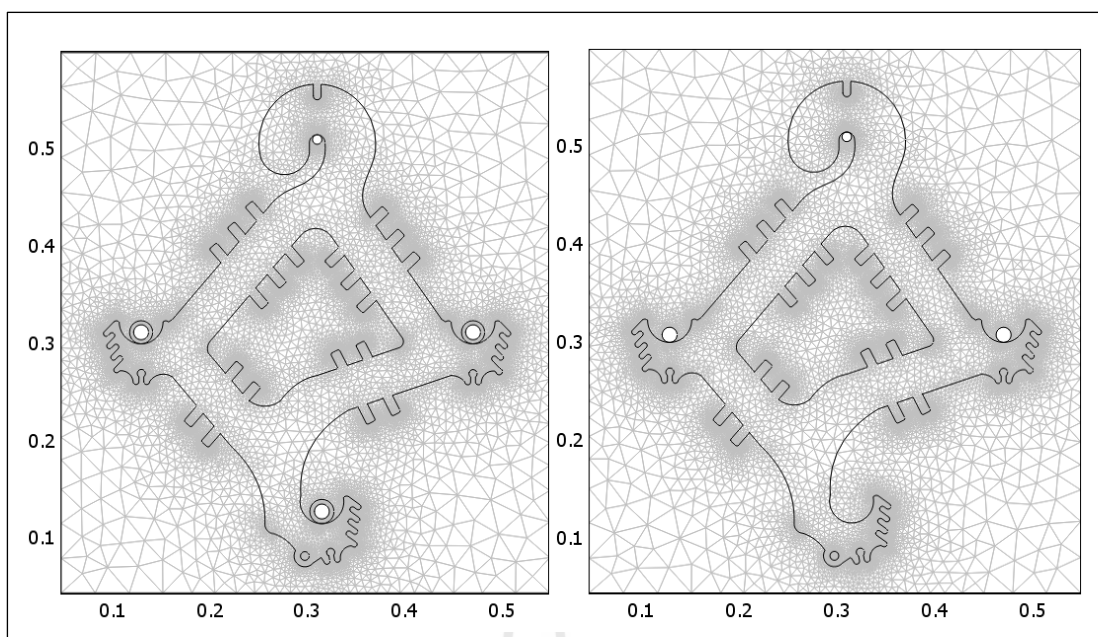


(ก) ระบบ 3 เฟส

(ข) การทดสอบในงานวิจัย

รูปที่ 5.1 การกำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

การกำหนดค่าขอบเขตนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน อธิบายดังนี้ เริ่มต้นเป็นการกำหนดขอบรอบนอก ซึ่งเป็นเส้นขอบปิดตั้งค่าเป็น Zero Charge/Symmetry ส่วนที่ 2 เลือกเส้นขอบของสายเคเบิลส่วนที่เป็นตัวนำดังเส้นสีเขียวตามรูปตั้งค่าเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential) แล้วกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ส่วนที่ 3 กำหนดเส้นขอบของลวดที่ใช้แขวนเคเบิลสเปเซอร์ดังเส้นสีฟ้าตามรูปตั้งค่าเป็นกราวด์ และส่วนสุดท้ายที่ไม่ได้กำหนดจะถูกตั้งค่าเป็น Continuity โดยอัตโนมัติ

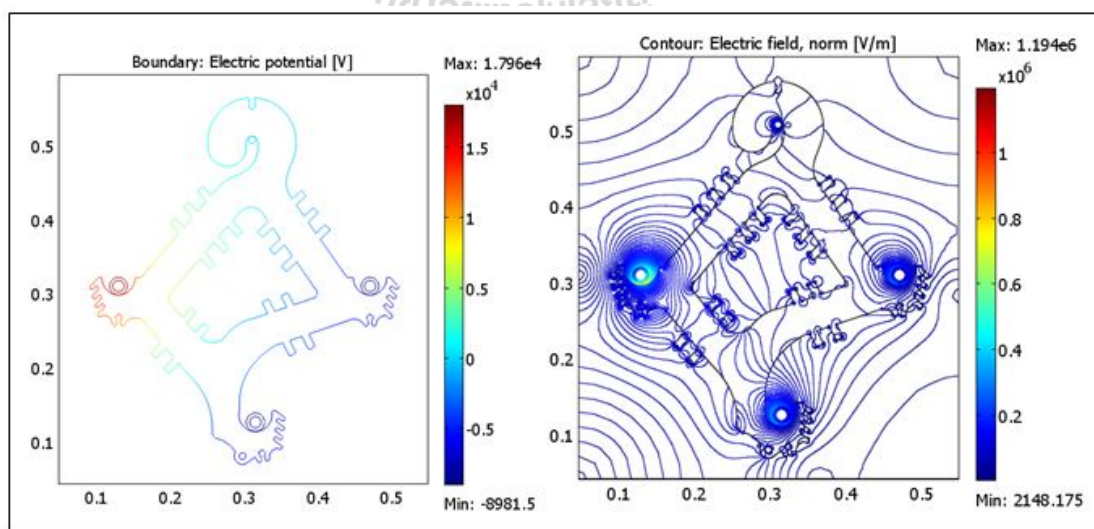


(ก) 20,311 จุด 40,429 เอลิเมนต์

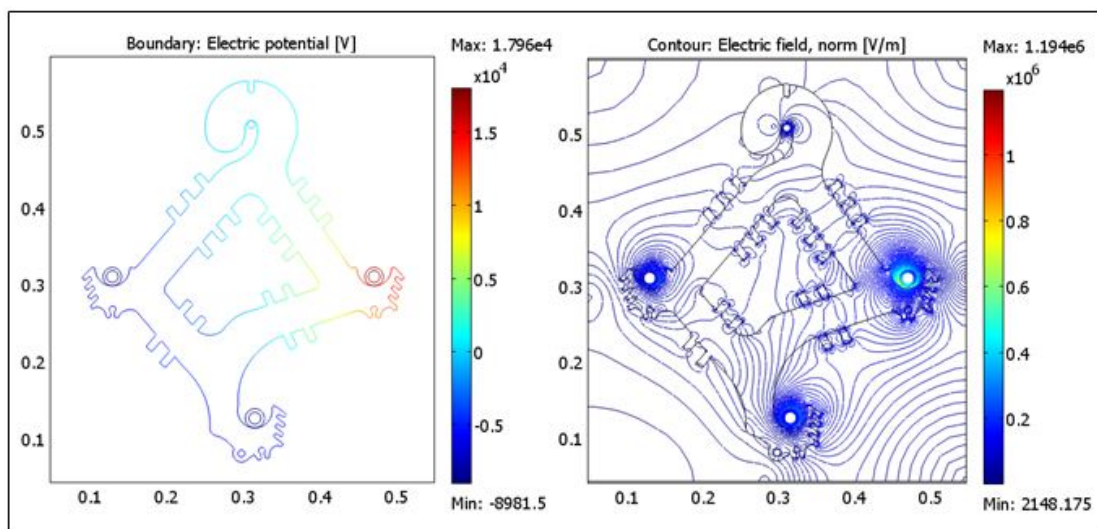
(ข) 20,105 จุด 40,033 เอลิเมนต์

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างของ Triangular mesh

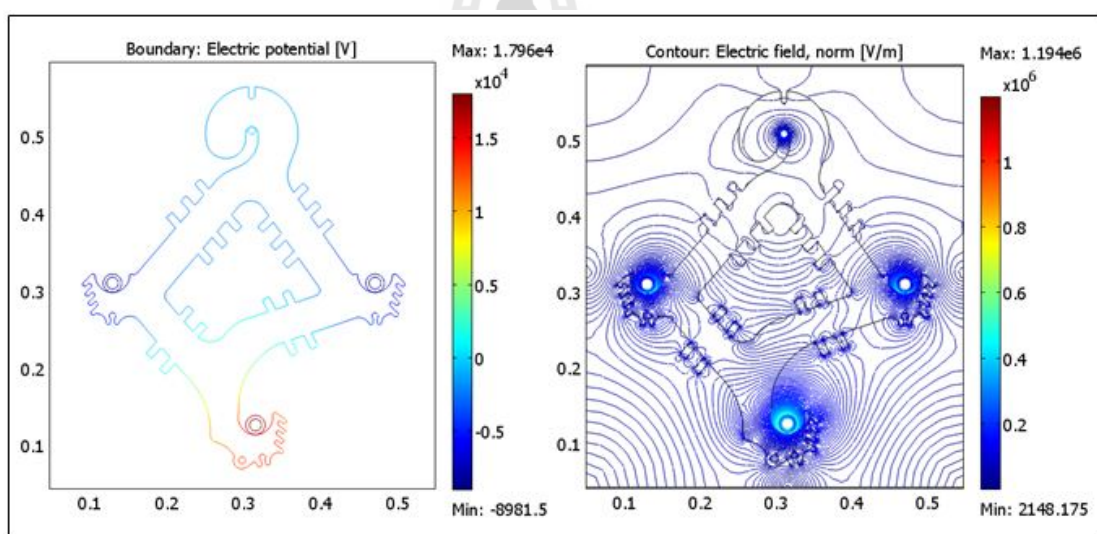
ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของเคเบิลสเปเซอร์สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV แสดงดังรูปที่ 5.3 (ก), (ข) และ (ค) ส่วนการจำลองกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 5.3 (ง)



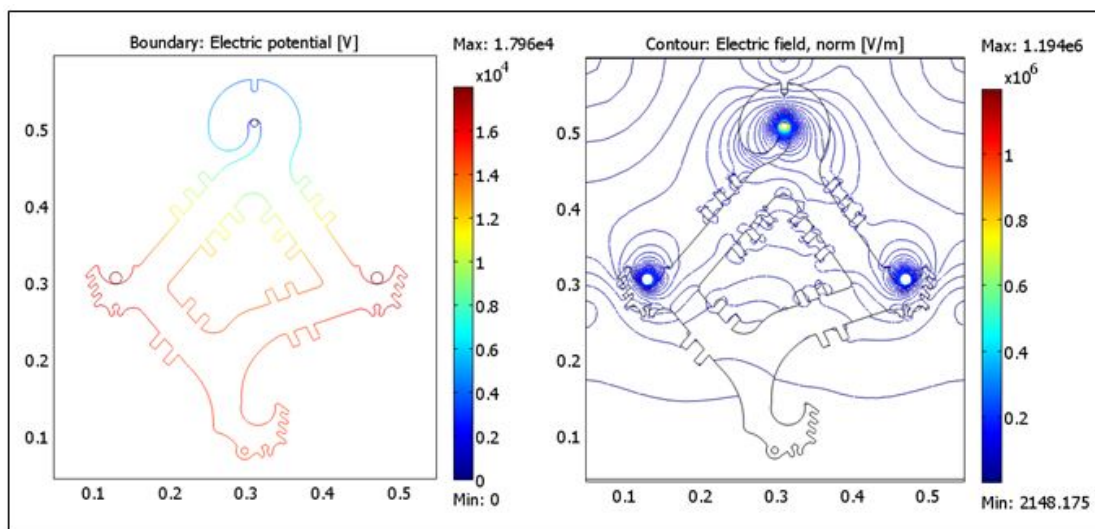
(ก) กรณิเฟส A มีค่าแรงดันสูงสุด



(ข) กรณิเฟส B มีค่าแรงดันสูงสุด



(ค) กรณิเฟส C มีค่าแรงดันสูงสุด



(ง) กรณีทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ (เฟส A = เฟส B = V_p)
 รูปที่ 5.3 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

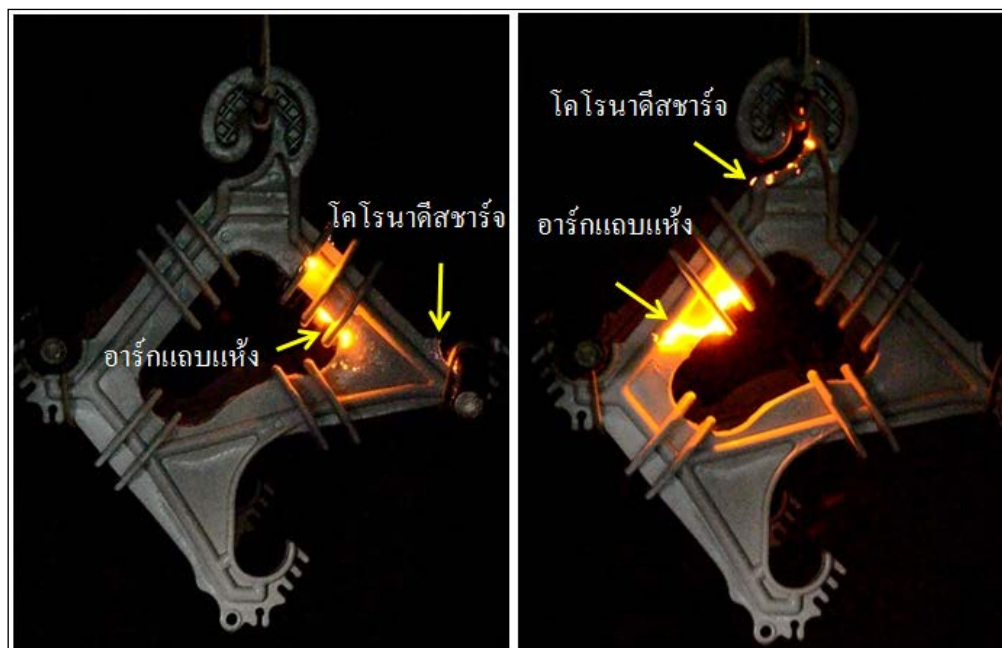
จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า บริเวณที่เป็นจุดรองรับสายเคเบิลหรือสายดินนั้นจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นสำหรับการจำลองระบบ 3 เฟส 22 kV ที่ตำแหน่งจุดรองรับสายเฟส A = 8.00 kV/cm, B = 8.041 kV/cm, C = 6.146 kV/cm และ ตำแหน่งกราวด์ = 3.061 kV/cm ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเฟส C ที่แตกต่างจากเฟส A และ B เกิดจากตำแหน่งของเฟส C อยู่ห่างจากตำแหน่งกราวด์มากกว่าทั้งสองเฟส จึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่เฟส C มีค่าน้อยกว่า ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่เฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากระยะห่างของเฟสทั้งสองเทียบกับตำแหน่งกราวด์มีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ในงานวิจัยจะเห็นว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกราวด์ เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4 เท่า คือ 11.94 kV/cm ส่วนตำแหน่งจุดรองรับสายเฟส A และ B กลับมีค่าลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง การเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ แสดงดังตารางที่ 5.1 การที่ตำแหน่งต่าง ๆ เหล่านี้ของเคเบิลสเปเซอร์มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงนั้นถือว่าเป็นผลเสีย เพราะจะทำให้เคเบิลสเปเซอร์หรือสายเคเบิลเกิดการเสื่อมอายุเร็วกว่าบริเวณอื่น ๆ จากกรณีศึกษาของการไฟฟ้านครหลวงพบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกมีค่าสูงถึง 18.21 kV/cm (การไฟฟ้านครหลวง, 2008) ซึ่งสูงกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ถึง 2.3 เท่า

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ

	ค่าแรงดันที่กำหนด ($V_p = 17.963 \text{ kV}$)			ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)				ตำแหน่ง ความเครียด สนามไฟฟ้าสูงสุด
ตำแหน่ง	A	B	C	A	B	C	Ground	
ระบบ 3 เฟส 22 kV	$1V_p$	$-0.5V_p$	$-0.5V_p$	8.000	2.874	3.184	1.612	เฟส A
	$-0.5V_p$	$1V_p$	$-0.5V_p$	2.828	8.041	3.120	1.938	เฟส B
	$-0.5V_p$	$-0.5V_p$	$1V_p$	4.994	5.082	6.146	3.061	เฟส C
งานวิจัย	$1V_p$	$1V_p$	-	4.073	4.352	-	11.94	Ground

5.3 ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดพบว่ามีความสอดคล้องกันคือ ในช่วงที่อยู่ระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 1000 ชั่วโมง เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น ซึ่งโคโรนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้นเป็นลำแสงหรือแถบแสงสีน้ำเงินหรือม่วง ส่วนอาร์กแถบแห้งนั้นก็เป็นลำแสงหรือแถบแสงสีส้ม ในการทดสอบช่วงแรก ๆ นั้น โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งจะไม่เกิดบ่อยและรุนแรงมากนัก แต่เมื่อระยะเวลาการทดสอบมากขึ้น จะเกิดบ่อยและรุนแรงมากโดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งของจุดต่อลงดินในช่วงเวลาที่มีการจ่ายหมอกไอเกลือ ผลจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบ่อย ๆ และรุนแรงนั้น ทำให้พื้นที่ผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการกัดกร่อน ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ และเสื่อมสภาพการเป็นฉนวน ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวเคเบิลสเปเซอร์

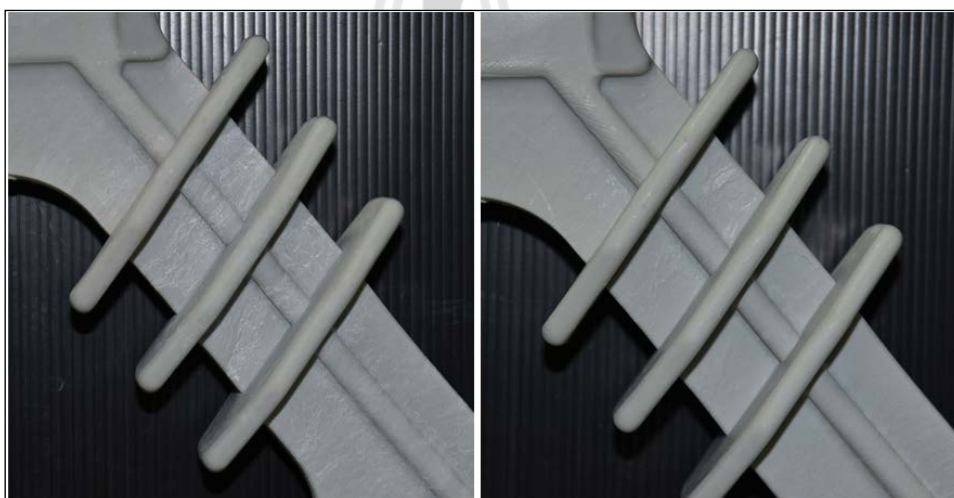
การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวของเคเบิลสเปเซอร์ในระหว่างการทดสอบ มีสาเหตุมาจากกระแสรั่วไหลตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เมื่อความหนาแน่นของกระแสตามผิวแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นตามผิวแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากันด้วย จึงเกิดเป็นพื้นที่แห้งไม่พร้อมกัน ซึ่งเป็นพื้นที่แคบ ๆ ความกว้างประมาณ 1-2 mm เรียกพื้นที่บริเวณนี้ว่า แถบแห้ง บริเวณแถบแห้งนี้มีความต้านทานสูง ไม่สามารถนำกระแสได้ จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมพื้นที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณนั้นมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งจะเกิดเบรกดาวนจ์ของอากาศรอบแถบแห้งขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จขึ้น เมื่อระยะเวลาของการทดสอบเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งก็จะบ่อย ๆ และรุนแรงมากขึ้นด้วย โดยมักจะสังเกตได้ง่ายในช่วงที่เป็นเวลาจ่ายหมอกเกลื่อนนั้นแสดงให้เห็นว่าหมอกไอเกลือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อผิวของเคเบิลสเปเซอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นตามพื้นผิวและคุณสมบัติการเป็นฉนวนมีค่าลดลง



(ก) ก่อนทำความสะอาด

(ข) หลังทำความสะอาด

รูปที่ 5.5 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ



(ก) ก่อนทำความสะอาด

(ข) หลังทำความสะอาด

รูปที่ 5.6 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

หลังจากทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จึงทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงบนบนพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ อันเนื่องมาจากโคโรนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้ง โดยก่อนการตรวจสอบต้องวัดค่าระดับความเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์แต่ละตัวก่อน จากนั้นจึงทำความสะอาดคราบเกลือและสิ่งสกปรกที่สะสมตามผิวออกด้วยน้ำเปล่าจนสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.5-5.6 ซึ่งพบว่าเกิดการผุ

กร่อนขึ้นอย่างชัดเจนบริเวณจุดต่อลงดินตามผิวเคเบิลสเปเซอร์ และพบบริเวณอื่นบ้างเช่น ลำตัว ปีก และจุดรับแรงดัน การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนี้ สาเหตุมาจากความเปราะเปื้อนของเกลือที่สะสมอยู่บนผิวจึงทำให้สภาพค่าความนำไฟฟ้าที่ผิวเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลมากขึ้น จึงทำให้อาร์กแถบแห้ง และโคโรนาดีสชาร์จ่ายิ่งขึ้นด้วย อีกทั้งยังเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ ซึ่งพบได้มากและชัดเจนบริเวณ ลำตัวและปีกของเคเบิลสเปเซอร์ ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยหมอกไอเกลือและพหุความเครียด แสดงดังตารางที่ 5.2-5.5

จากผลการทดสอบกรณีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดนั้นจะเห็นได้ว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงตามพื้นผิวคล้ายกันกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือเพียงแต่ ความรุนแรงของการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟที่เกิดขึ้นนั้นมีน้อยกว่า อันเนื่องมาจากว่า สภาพะพหุความเครียดมีสถานะฝนที่ช่วยชำระล้างและทำความสะอาดพื้นผิวของสเปเซอร์อยู่ทุก ๆ วัน ทำให้ปริมาณเกลือหรือสิ่งสกปรกที่มาเกาะนั้นมีปริมาณที่เบาบางกว่า ส่งผลให้ สภาพพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดมีสภาพ ดีกว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในแต่ละรอบพบว่า ผลการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ ในรอบที่ 1 และ รอบที่ 2 มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพและการกัดกร่อนในการทดสอบรอบที่ 2 มีปริมาณน้อยกว่าการทดสอบในรอบแรก ซึ่งเกิดจากความสามารถ ในการสร้างหมอกของฮีมิดีไฟเออร์มีค่าลดลงทำให้ความหนาแน่นของหมอกไอเกลือที่ฉีดเข้าไป ในห้องทดสอบลดลงด้วย ดังนั้นจึงยึดผลการทดสอบของการทดสอบในรอบที่ 1 เป็นหลัก ส่วนผลการทดสอบด้วยพหุความเครียดทั้งสองรอบการทดสอบมีลักษณะใกล้เคียงกัน

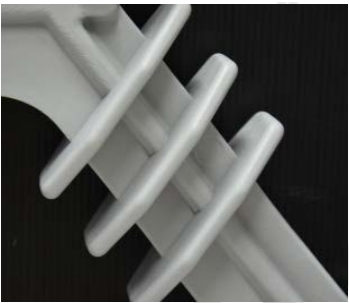
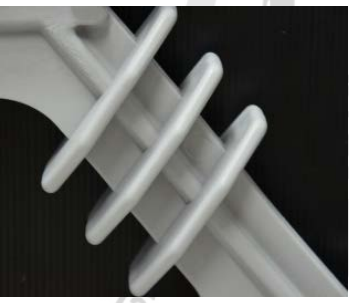
ตารางที่ 5.2 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือรอบที่ 1

ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				

ตารางที่ 5.3 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือรอบที่ 2

ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				

ตารางที่ 5.4 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดรอบที่ 1

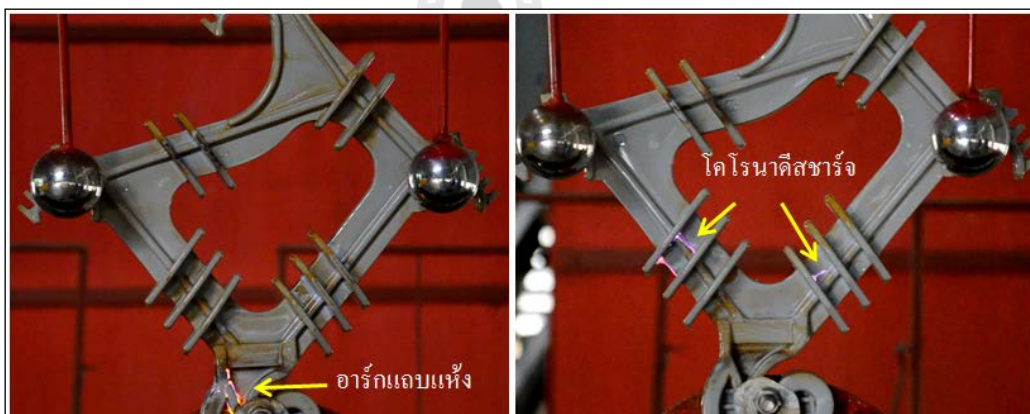
ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				

ตารางที่ 5.5 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดรอบที่ 2

ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				

5.4 ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากการสังเกตในช่วงระหว่างที่ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ 30,000 รอบ พบว่า มีการเกิด โครนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เช่นเดียวกันกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งสองแบบข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการเกิด โครนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้ง เกิดรุนแรงในช่วงแรก ๆ ที่เคเบิลสเปเซอร์จุ่มน้ำเกลือขึ้นมา แล้วมาสัมผัสกับขั้วป้อนแรงดัน จากนั้นเมื่อผิวของเคเบิลสเปเซอร์เริ่มแห้งการเกิด โครนา ดีสซาร์จ และ อาร์กแถบแห้งก็ลดลงจนแทบไม่เห็นการเกิดเลย และเมื่อจำนวน cycle ของการทดสอบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนใกล้ครบกำหนดมากขึ้นความรุนแรงของการเกิด โครนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้งก็จะมี ความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจุดที่เกิดรุนแรงสุดอยู่ใกล้บริเวณขั้วต่อลงดิน ซึ่งเกิดรุนแรง และบ่อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ลักษณะของ โครนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบน พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ลักษณะของโครนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้ง

หลังจากทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือครบ 30,000 รอบ แล้ว จึงทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงบนบนพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ อันเนื่องมาจาก โครนาดีสซาร์จ และอาร์กแถบแห้ง โดยก่อนการตรวจสอบต้องวัดค่าระดับความเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์แต่ละตัวก่อนเช่นเดียวกับการทดสอบอื่น ๆ จากนั้นจึงทำความสะอาดเกลือและสิ่งสกปรกที่สะสมตามผิวออกด้วยน้ำเปล่าจนสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ได้ โดยส่วนใหญ่แล้วสิ่งสกปรกที่เกาะตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ในการทดสอบนี้มีคราบเกลือมาเกาะเหมือนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด นอกจากนี้ยังมีคราบสิ่งสกปรกสีส้มตามผิว อาจเป็นคราบของสนิมจาก

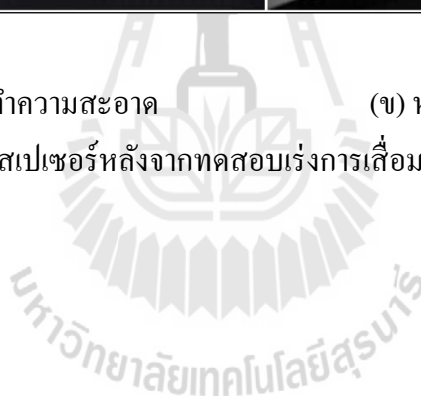
ส่วนของวงล้อที่ทำมาจากเหล็ก โดยทราบนี้ก็สามารถเช็คทำความสะอาดออกได้ในระดับหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 5.8 หลังจากการทำความสะอาดก็พบว่า เกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างชัดเจนบริเวณ ตำแหน่งกราวด์ของเคเบิลสเปเซอร์ แต่บริเวณอื่น ๆ ก็ไม่ค่อยพบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวมากนัก และยังคงมีสภาพดีเหมือนสภาพก่อนที่จะทำการทดสอบ ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อ จุ่มน้ำเกลือ 30,000 cycle แสดงดังตารางที่ 5.6-5.7



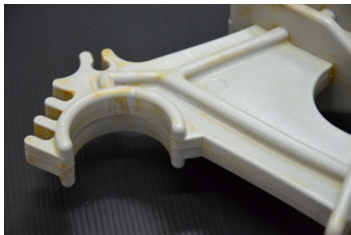
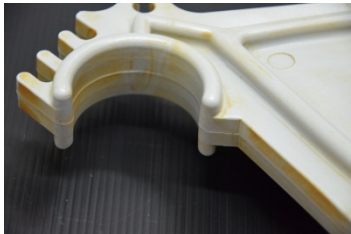
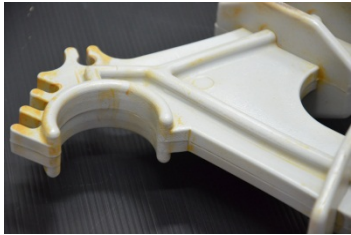
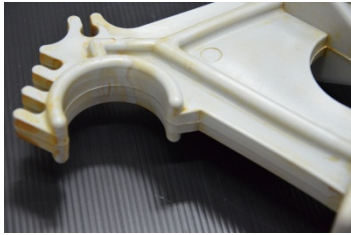
(ก) ก่อนทำความสะอาด

(ข) หลังทำความสะอาด

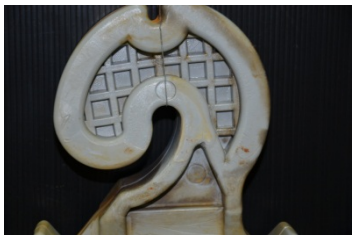
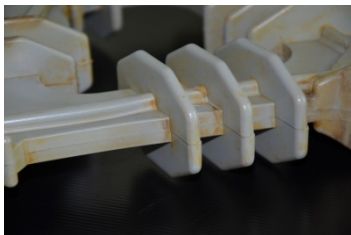
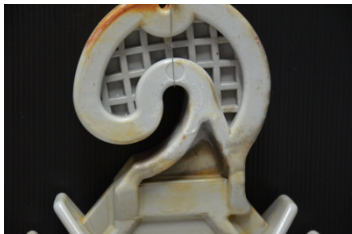
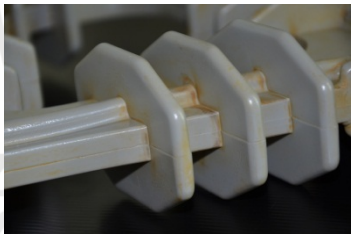
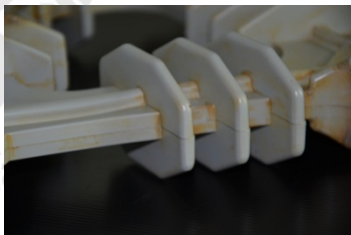
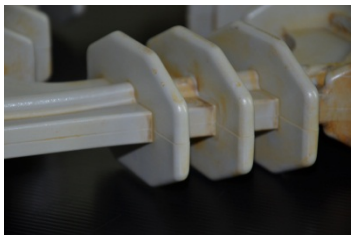
รูปที่ 5.8 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ



ตารางที่ 5.6 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือรอบที่ 1

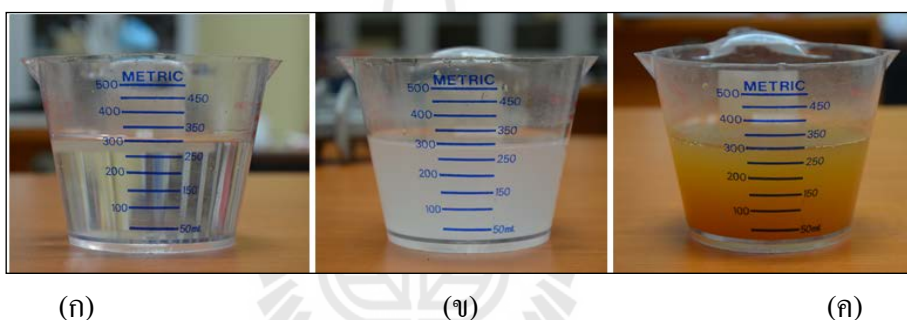
ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				
ตัวที่ 4				

ตารางที่ 5.7 เคเบิลสเปเซอร์หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือรอบที่ 2

ตำแหน่ง	กราวด์	ลำตัว	ปีก	จุดรองรับสายเคเบิล
ตัวที่ 1				
ตัวที่ 2				
ตัวที่ 3				
ตัวที่ 4				

5.5 ผลการวัดระดับความเปรอะเปื้อน

จากการเช็คทำความสะอาดเคเบิลสเปเซอร์หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและพหุความเครียดที่มีความเปรอะเปื้อนส่วนใหญ่จากเกลือจึงได้สารละลายสีขาวขุ่น ส่วนความเปรอะเปื้อนจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือนั้น มีสนิมมาปนเนื่องจากโครงสร้างหลักที่ใช้ในการยึดเคเบิลสเปเซอร์เป็นหลัก ประกอบกับสภาวะแวดล้อมในการทดสอบมีทั้งความชื้น อากาศ โครมาดิสซาร์จและอาร์กแฉกแห้งจึงทำให้เกิดสนิมขึ้นและปะปนอยู่ในน้ำที่ทำการทดสอบ เมื่อจำนวนรอบ ในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นทำให้สังเกตเห็นคราบสนิมที่เกาะตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ได้ชัดเจนขึ้น ทำให้สารละลายที่ได้มีสีส้มหรือน้ำตาลส้ม ตัวอย่างสารละลายที่ได้จากการทดสอบและผลการคำนวณระดับความเปรอะเปื้อนจากความหนาแน่นของเกลือ แสดงดังรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.8 ตามลำดับ



(ก) น้ำกลั่น

(ข) สภาวะหมอกไอเกลือและพหุความเครียด

(ค) วงล้อจุ่มน้ำเกลือ

รูปที่ 5.9 ตัวอย่างสารละลายจากความเปรอะเปื้อนของการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณ SDD ที่ได้จากการทดสอบ

การทดสอบ		SDD (mg/cm ²)			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
หมอกไอเกลือ	รอบที่ 1	0.0962	0.1066	0.0935	-
	รอบที่ 2	0.2569	0.3044	0.2787	-
พหุความเครียด	รอบที่ 1	0.1024	0.0472	0.1226	-
	รอบที่ 2	0.0940	0.0430	0.1112	-
วงล้อจุ่มน้ำเกลือ แรงดันทดสอบ 13 kV		0.0180	0.0173	0.0174	0.0153
วงล้อจุ่มน้ำเกลือ แรงดันทดสอบ 15 kV		0.0130	0.0139	0.0143	0.0130

5.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะฐานวิทยาของเคเบิลสเปเซอร์

จากการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยวิธีการสังเกตด้วยตาเปล่าตามผลการทดสอบข้างต้นนั้น ทำให้พบกับการผุกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น แต่การสังเกตรายละเอียดด้วยตาเปล่านั้นอาจมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถมองเห็นรายละเอียดที่เล็ก ๆ ในเชิงลึกได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำอุปกรณ์เข้ามาช่วยให้สามารถมองเห็นรายละเอียดหรือการเปลี่ยนแปลงตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบได้ดีและมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

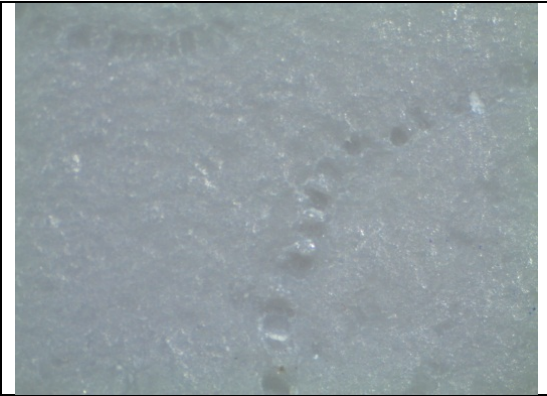
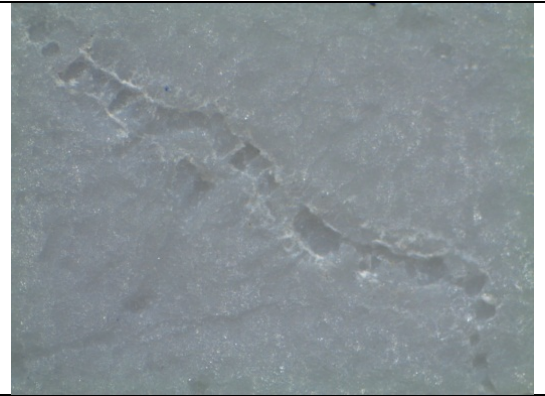
5.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

1) เคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือและพหุความเครียด

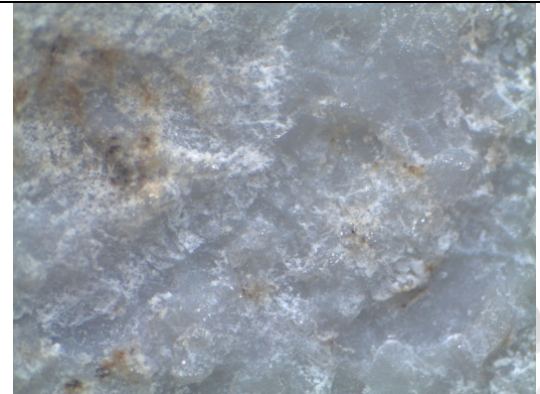
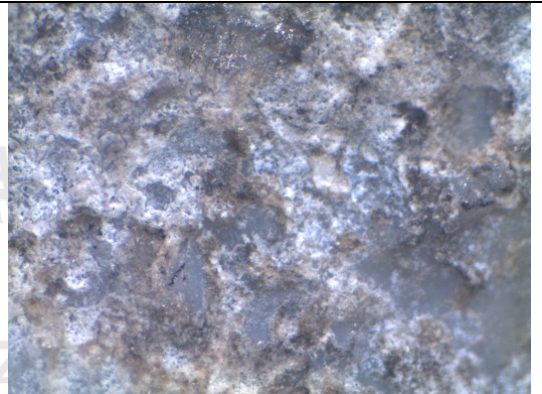
สำหรับผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะหมอกไอเกลือและสภาวะพหุความเครียดพบว่าบริเวณตำแหน่งกราวด์หรือจุดต่อลงดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวมากที่สุด สังเกตได้จากร่องรอยสีดำที่เกิดจากการไหม้และการผุกร่อนอันเนื่องมาจากอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จ อีกทั้งยังมีความความขรุขระของพื้นผิวสูงมาก ทำให้เป็นแหล่งสะสมคราบเกลือและสิ่งประอะเป็นอื่น ๆ ส่วนบริเวณลำตัว บริเวณปีกและบริเวณอื่น ๆ เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ ซึ่งร่องที่เกิดขึ้นนั้นเป็นลักษณะของหลุมเล็ก ๆ วางต่อ ๆ กัน หลุมที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากความร้อนที่มากับอาร์กแถบแห้งหรือโคโรนาดีสชาร์จทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์ละลายและเกิดเป็นหลุมขึ้น และเกิดต่อ ๆ กันจนมีลักษณะเป็นเส้นขึ้นอีกทั้งยังขยายขนาดได้อีกด้วย การที่พื้นผิวเกิดร่องมากมายยิ่งทำให้คราบเกลือหรือสิ่งสกปรกอื่นเกิดการสะสมได้ง่ายมากขึ้น ทำความสะอาดได้ยากขึ้น ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะหมอกไอเกลือและสภาวะพหุความเครียดแสดงดังตารางที่

5.9

ตารางที่ 5.9 ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเรียงตามระดับความรุนแรง (กำลังขยาย 200 เท่า)

	
1. เกิดหลุมเล็ก ๆ เรียงต่อกัน	2. เห็นเป็นร่องมากขึ้น

ตารางที่ 5.9 ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเรียงตามระดับความรุนแรง (ต่อ)

	
3. ร่องขยายใหญ่ขึ้นและยาวขึ้น	4. บริเวณใกล้เคียงเกิดร่องมากขึ้น
	
5. เกิดหลุมไม่เป็นระเบียบ	6. เกิดรอยไหม้เป็นหลุมมากขึ้น

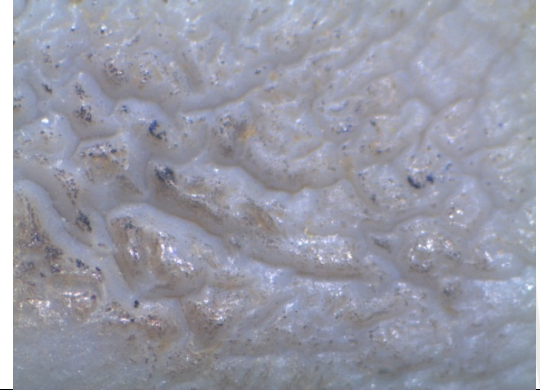
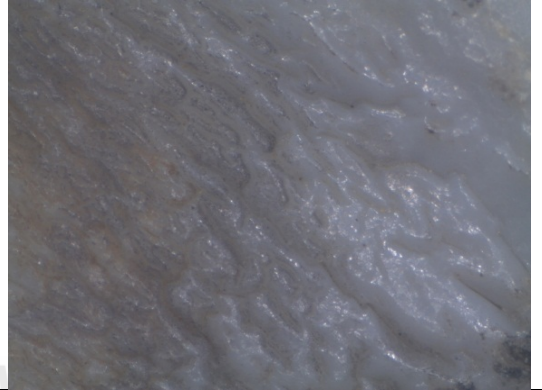
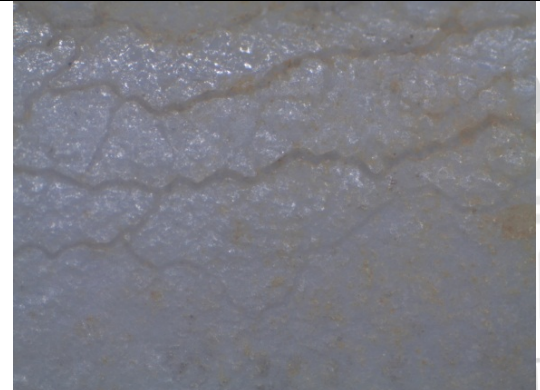
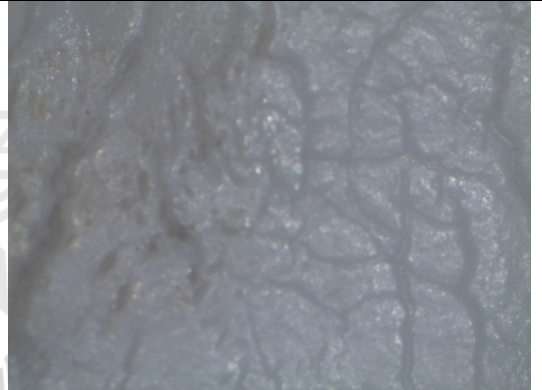
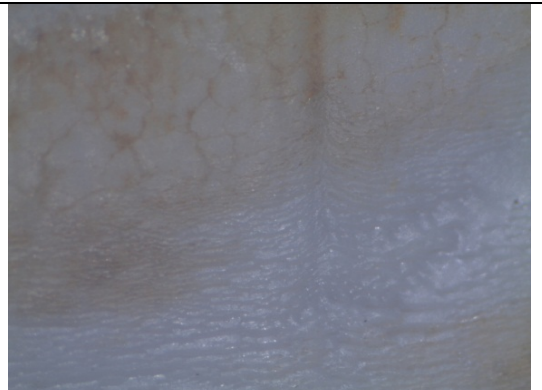
ความรุนแรงทั้ง 6 ระดับจากตารางที่ 5.9 นี้สามารถตรวจพบได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ คือ จากผลการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ ความรุนแรงระดับ 6 และ 5 จะสามารถพบได้บริเวณเดียวกันเท่านั้นคือ ตำแหน่งของจุดต่อลงดิน ความรุนแรงระดับ 4 พบได้ทั้งบริเวณจุดต่อลงดินและในบริเวณใกล้เคียงกัน ส่วนระดับความรุนแรงสามลำดับสุดท้าย คือ 3, 2 และ 1 นั้น สามารถตรวจพบได้ทั่วทั้งลำตัว บริเวณปีกและจุดรองรับสายของเคเบิลสเปเซอร์ ส่วนเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบด้วยพหุความเครียดนั้นระดับความรุนแรงสูงสุดที่พบ คือ ระดับ 3 เท่านั้น ซึ่งตรวจพบบริเวณจุดต่อลงดิน ส่วนตามพื้นผิวที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะตรวจพบความรุนแรงอยู่ในระดับ 1 และ 2 เท่านั้น ดังสาเหตุที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

2) เคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากการตรวจสอบพื้นผิวเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือทั้ง 2 รอบการทดสอบพบว่า การทดสอบรอบแรก (แรงดันทดสอบ 13 kV) เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนบริเวณตำแหน่งกราวด์ แต่พื้นที่ผิวบริเวณอื่นนั้นยังคงมีสภาพใกล้เคียงกับ

ช่วงก่อนทำการทดสอบ ส่วนผลการทดสอบรอบที่ 2 (แรงดันทดสอบ 15 kV) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเหมือนการทดสอบในรอบแรก แต่พบการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพชัดเจนมากขึ้นเช่น บริเวณใกล้ตำแหน่งกราวด์ ลำตัว และจุดรองรับสายเคเบิล แสดงดังตารางที่ 5.10

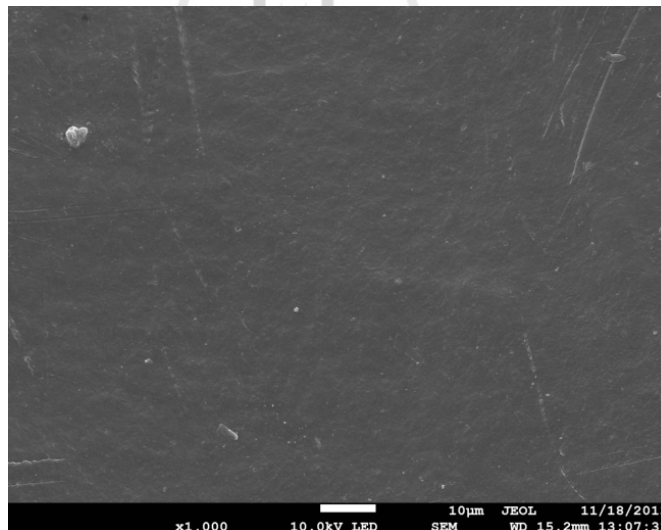
ตารางที่ 5.10 ลักษณะร่องผิวเสื่อมสภาพที่ตรวจพบตามตำแหน่งต่าง ๆ (กำลังขยาย 200 เท่า)

	
บริเวณจุดต่อลงดิน	
	
บริเวณใกล้จุดต่อลงดิน	
	
บริเวณลำตัวระหว่างปีก	บริเวณจุดรองรับสายเคเบิล

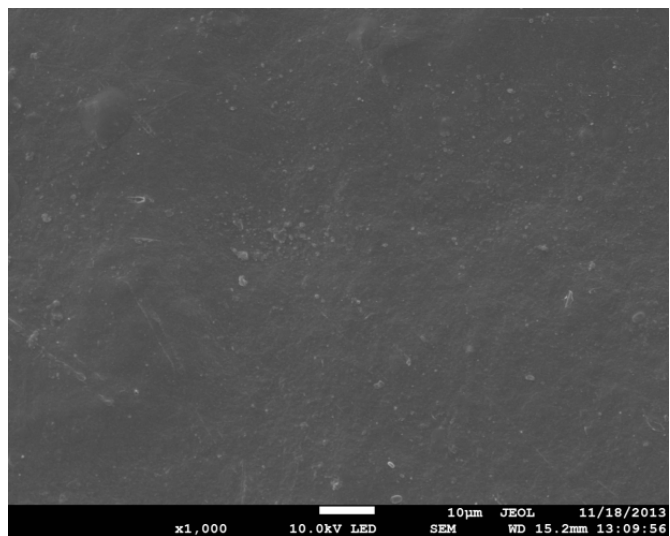
การเกิดขึ้นดังกล่าวเป็นเพราะแรงดันทดสอบที่มีค่าสูงขึ้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้เกิดโคโนติสชาร์จ์และอาร์กแถบแห้งที่ง่ายกว่าเดิมและส่งผลให้พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการเสื่อมสภาพง่ายตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบด้วยวงล้อยุ่มน้ำเกลือ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะหมอกไอเกลือและสภาวะพายุความเครียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพมากที่สุดคือตำแหน่งกราวด์

5.6.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

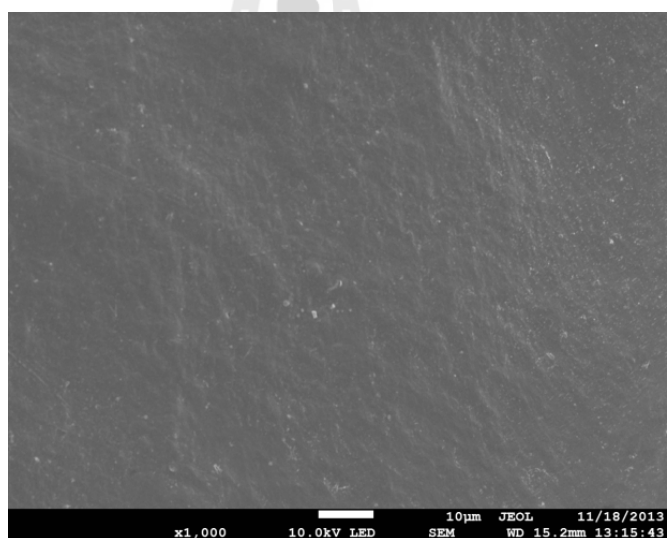
สำหรับผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ทำการตรวจสอบทั้งชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 3 แบบ ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10 และภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแบบต่าง ๆ แสดงตารางที่ 5.11-5.14



ก) บริเวณจุดต่อลงดิน



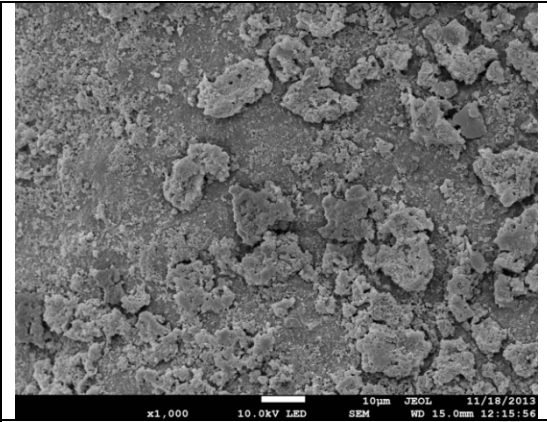
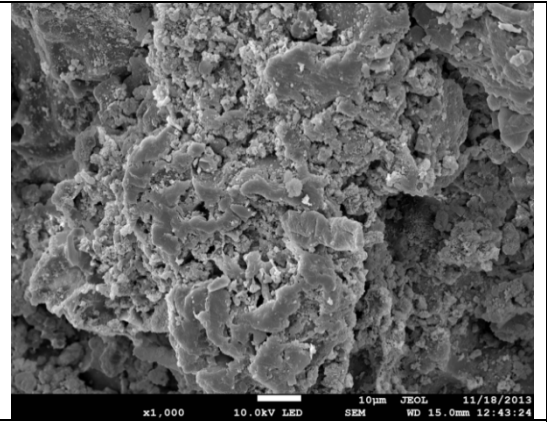
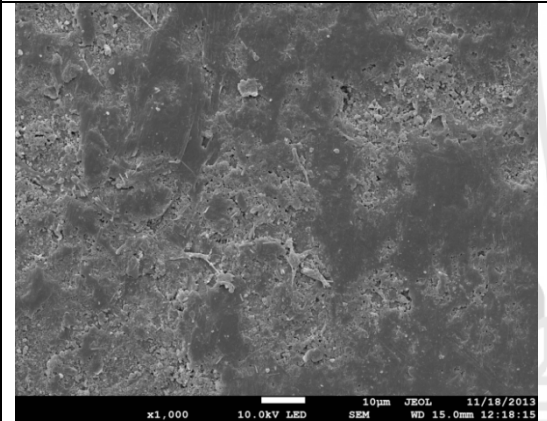
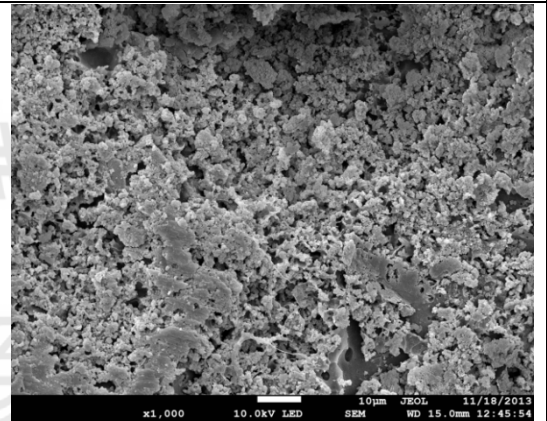
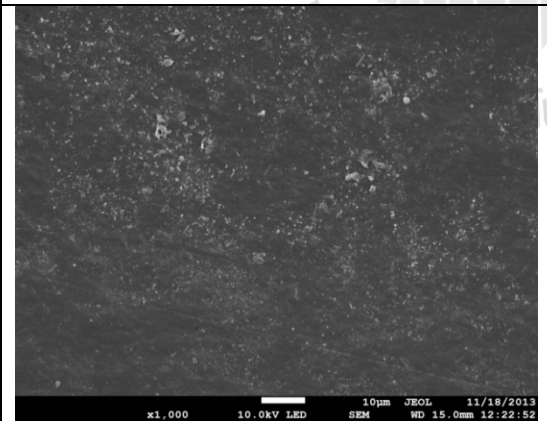
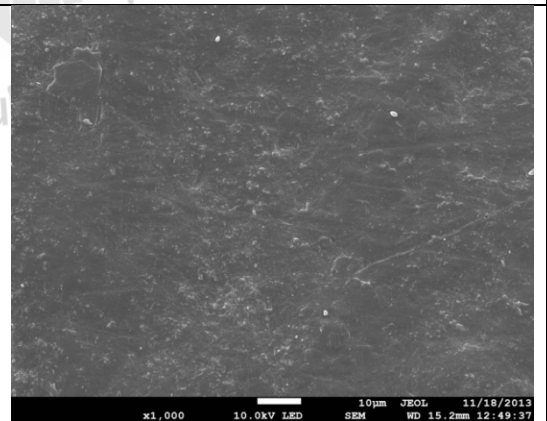
ข) บริเวณลำตัวระหว่างปีก



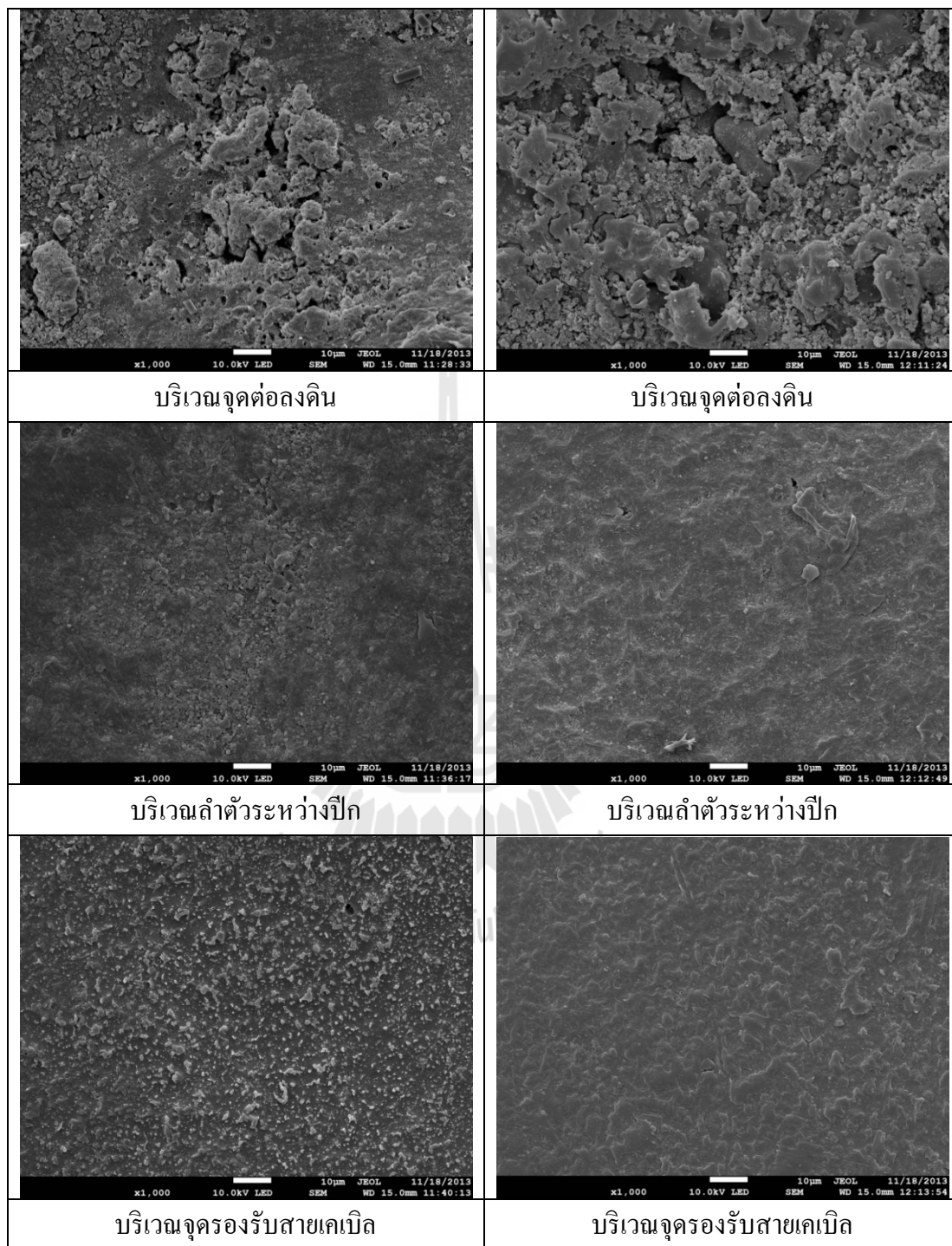
ค) บริเวณจุดรองรับสายเคเบิล

รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ

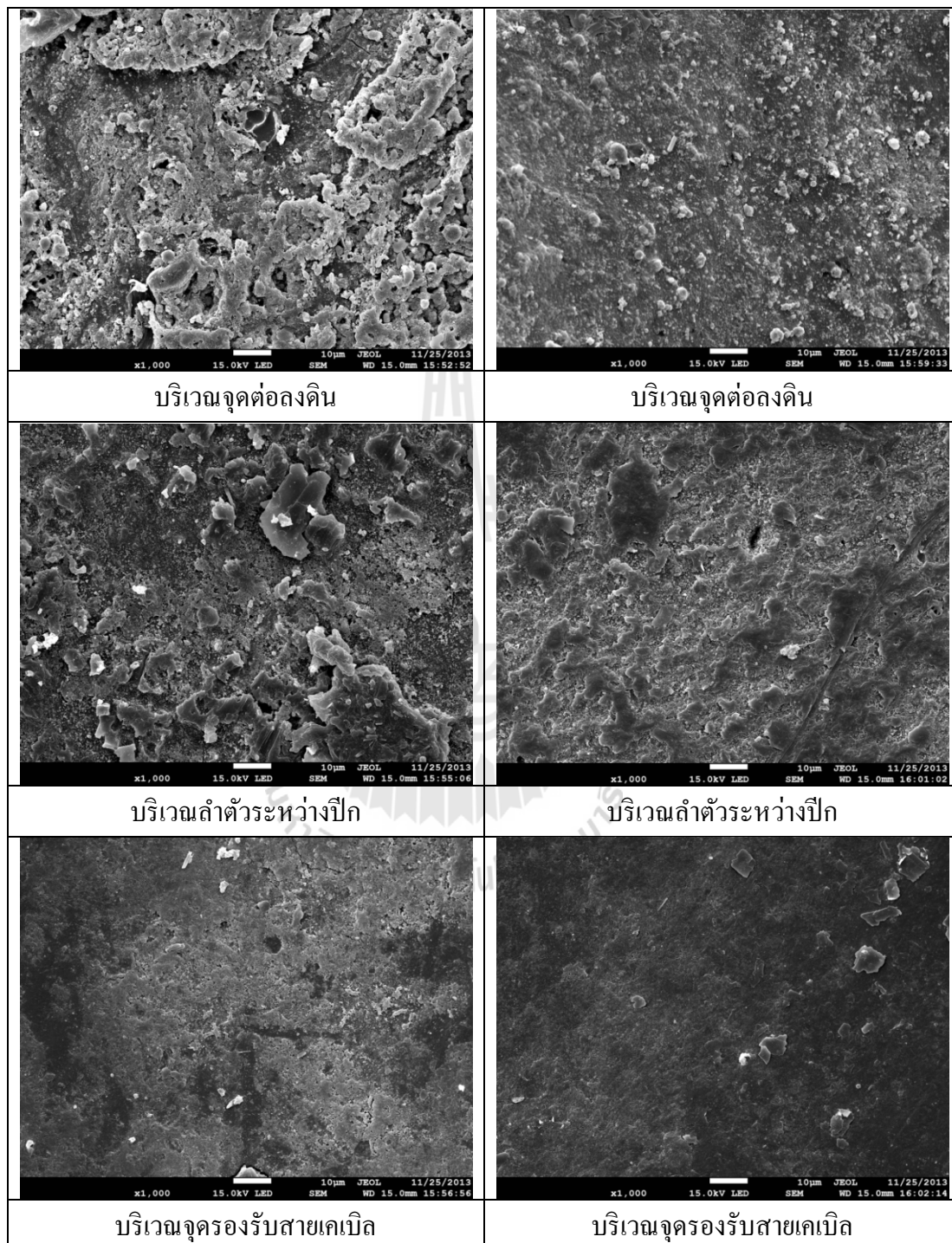
ตารางที่ 5.11 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

	
บริเวณจุดต่อลงดิน	บริเวณจุดต่อลงดิน
	
บริเวณลำตัวระหว่างปีก	บริเวณลำตัวระหว่างปีก
	
บริเวณจุดรองรับสายเคเบิล	บริเวณจุดรองรับสายเคเบิล

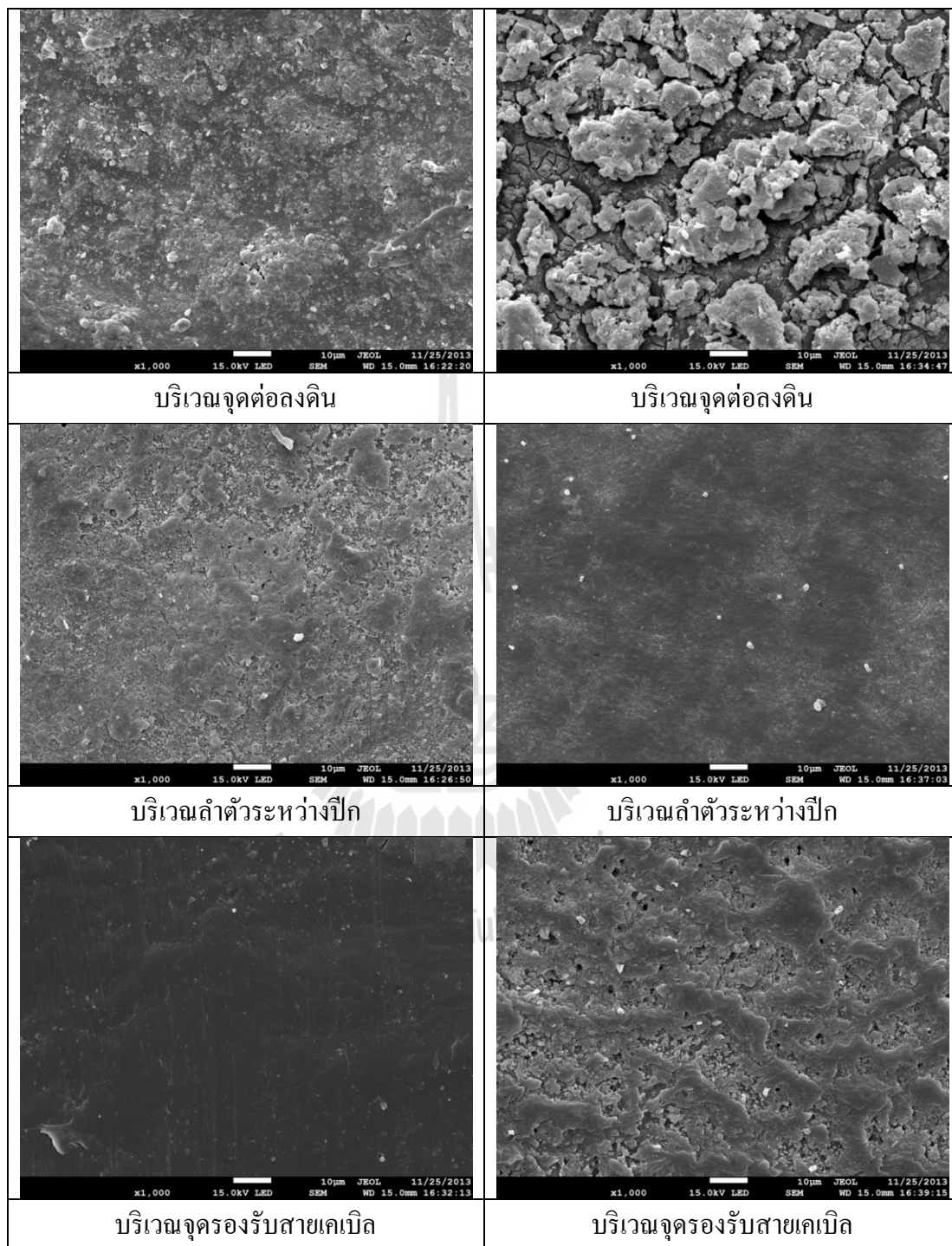
ตารางที่ 5.12 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด



ตารางที่ 5.13 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (12.7kV)



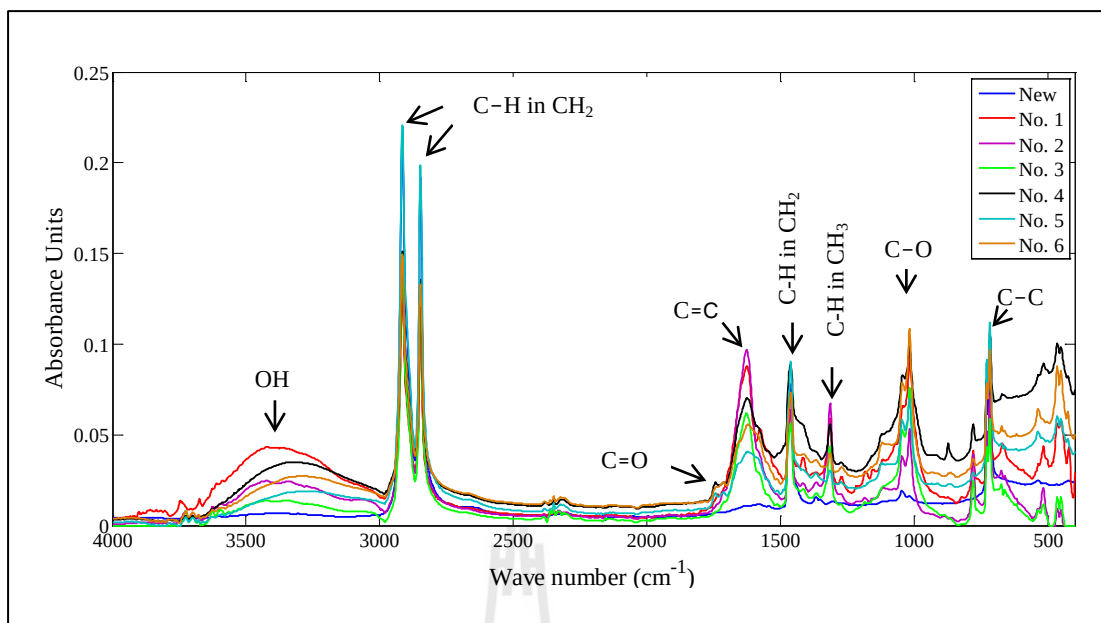
ตารางที่ 5.14 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (15kV)



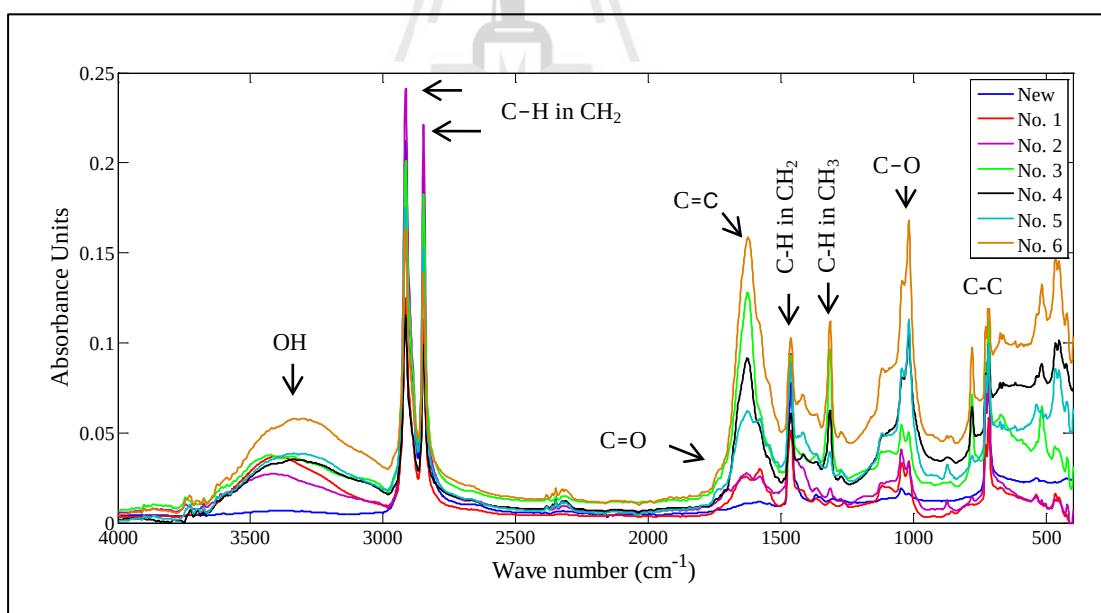
จากรูปที่ 5.11 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเคเบิลสเปเซอร์ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานใด ๆ พบว่าพื้นผิวค่อนข้างเรียบไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งใดก็ตาม แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ ตามตารางที่ 5.11-5.14 พบว่า เกิดการผุกร่อนขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดต่อลงดินเกิดการผุกร่อนขึ้นมากและชัดเจนกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งผลจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็ให้ผลตรงกันกับผลจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และเมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดก็จะเห็นได้ว่า การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือจะเกิดการผุกร่อนบนพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่มากกว่า แม้ว่าการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดจะมีสภาวะความร้อนและแสงอัลตราไวโอเลตเป็นตัวเร่งการเสื่อมอายุเพิ่มขึ้นมาก็ตาม แต่ก็ยังมีผลกระทบต่อพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์น้อยกว่าสภาวะหมอกไอเกลือ นั่นคือสภาวะหมอกไอเกลือในการทดสอบทั้งสองนั้นมีผลต่อการเกิดเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์อย่างมาก

5.7 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเคเบิลสเปเซอร์

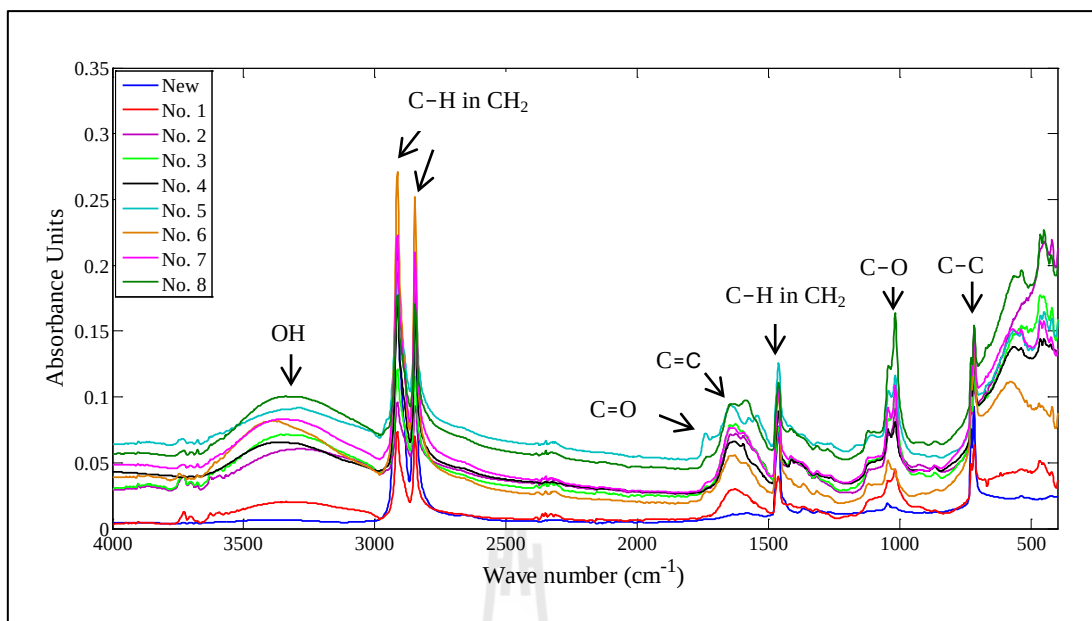
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ทำการตรวจสอบทั้งชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 3 แบบ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยเคเบิลสเปเซอร์แต่ละตัวจะมีการตรวจสอบ 22 ตำแหน่งตามรายละเอียดที่ได้ไว้ในบทที่ 3 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.11-5.13 ซึ่งการทดสอบทั้งสองรอบของการทดสอบแต่ละประเภทถูกนำเสนอในรูปเดียวกันโดยให้ความหมายของสเปกตรัมแต่ละเส้นคือ เช่น การทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ มีสเปกตรัม 6 เส้น No.1 – No. 3 หมายถึงเคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ของการทดสอบรอบที่ 1 ส่วน No.4 – No.5 หมายถึงเคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ของการทดสอบรอบที่ 2 เป็นต้น โดยอินฟราเรดสเปกตรัมที่แสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างของชิ้นงานตำแหน่งที่ 2 ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ และมีการวัดซ้ำที่ตำแหน่งเดิม ทั้งหมด 3 ครั้งและเฉลี่ยค่าที่ได้ เพื่อให้แน่ใจว่าการวัดมีความถูกต้องที่สุด



รูปที่ 5.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

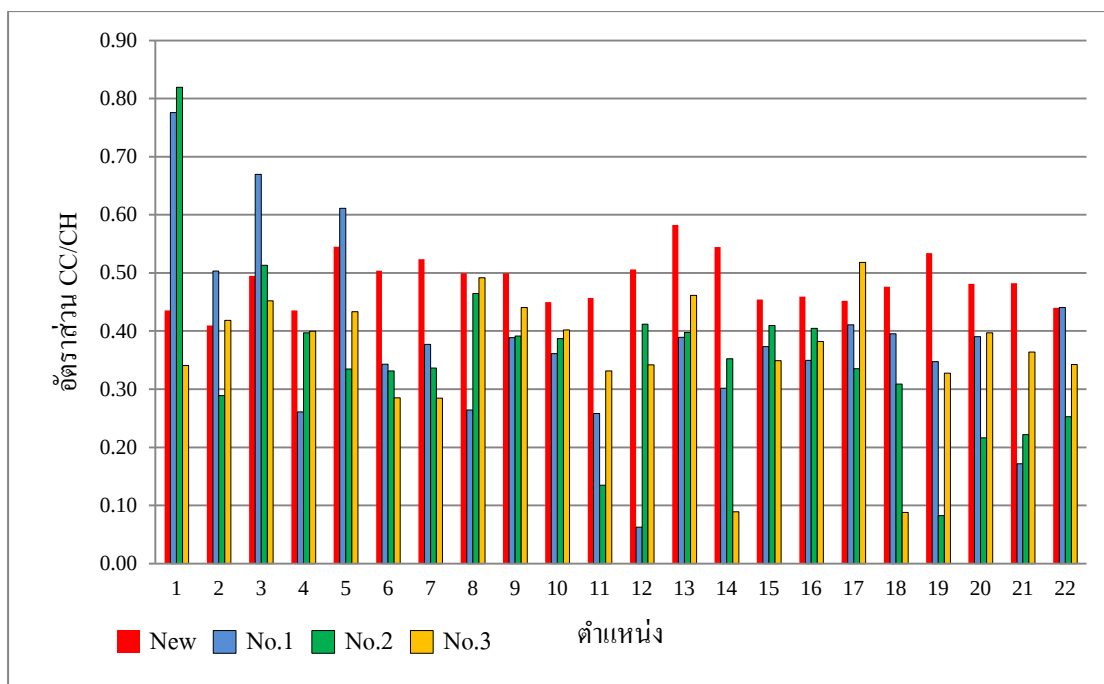


รูปที่ 5.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

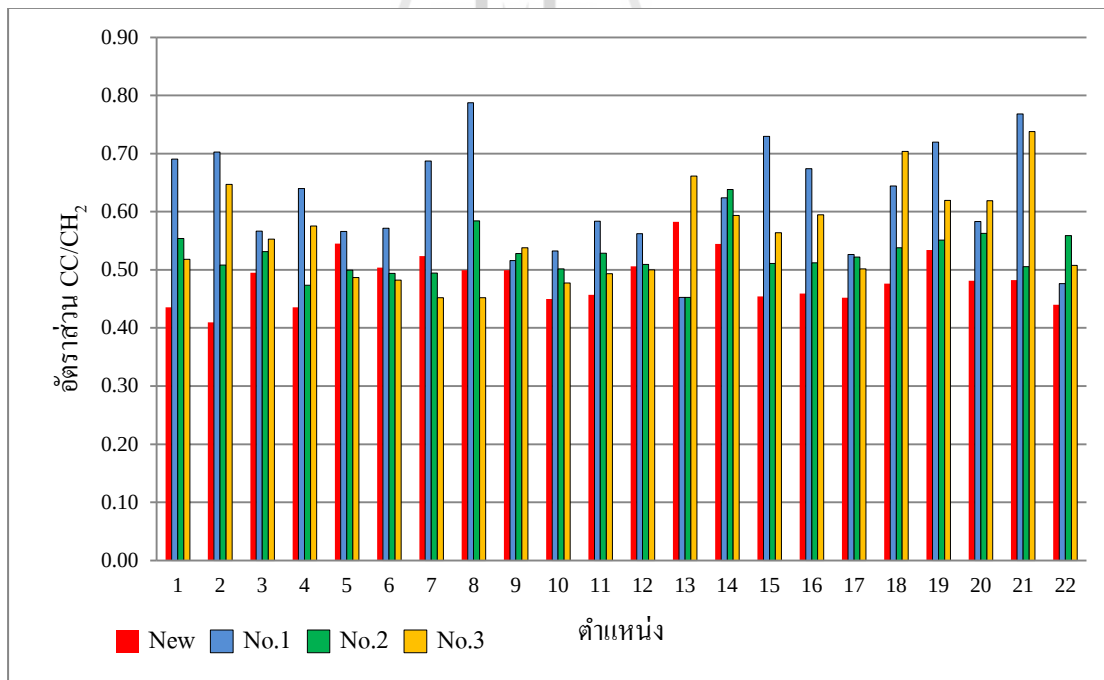


รูปที่ 5.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากกราฟรูปที่ 5.11-5.13 แสดงตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เป็นชิ้นงานใหม่และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ ตามลำดับ ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ CH_2 (เลขคลื่น 2916, 2849, และ 1462 cm^{-1}) และ C-C (เลขคลื่น 717 cm^{-1}) (สเปกตรัมของชิ้นงานใหม่จะพบ 4 พีคนี้) อีกทั้งยังพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณ OH (ความถี่ เลขคลื่น $3,377 \text{ cm}^{-1}$) CH_3 (เลขคลื่น $1,317 \text{ cm}^{-1}$) C-O (เลขคลื่น $1,018 \text{ cm}^{-1}$) C=O (เลขคลื่น 1745 cm^{-1}) และ C=C (เลขคลื่น 1630 cm^{-1}) การเพิ่มขึ้นของปริมาณพันธะต่าง ๆ เหล่านี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป แต่อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้จะพิจารณาในส่วนของปริมาณ C=O และ C=C ที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้ยืนยันการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเพื่อให้การวิเคราะห์ปริมาณของพันธะมีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดจากเครื่องมือวัด สภาพแวดล้อม ความสม่ำเสมอของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน หรือแม้กระทั่งตัวผู้วัดเอง จึงแสดงผลการวิเคราะห์เป็นอัตราส่วนซึ่งได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ใน CH_2 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C และอัตราส่วนระหว่าง C=O ต่อ C-C แสดงดังรูปที่ 5.14-5.22

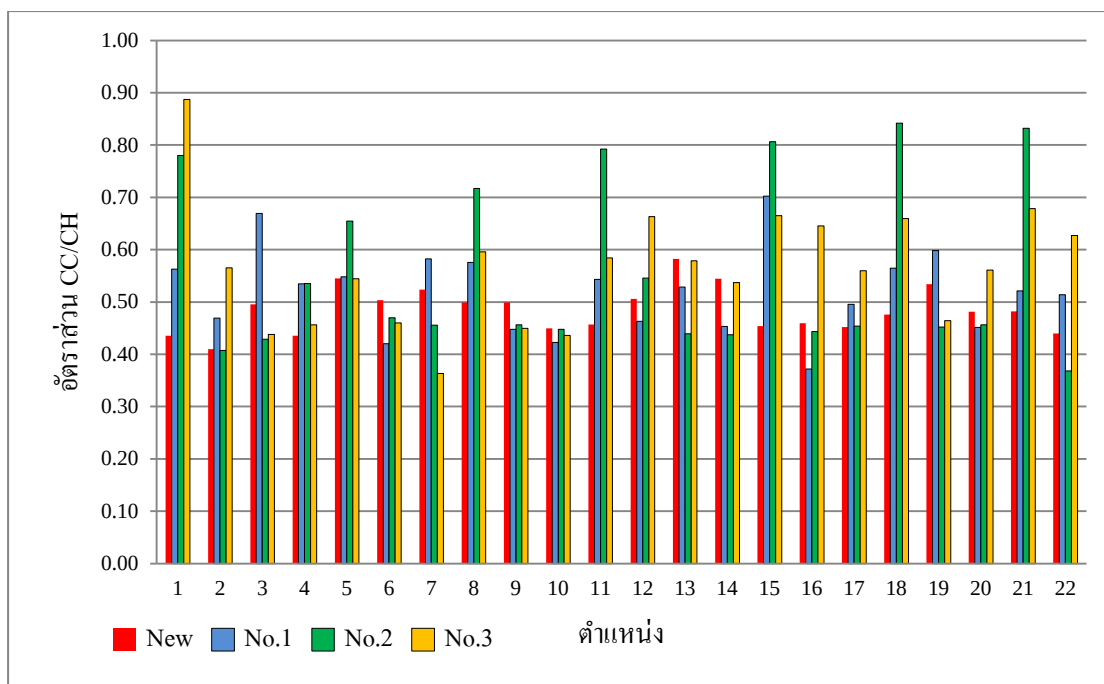


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

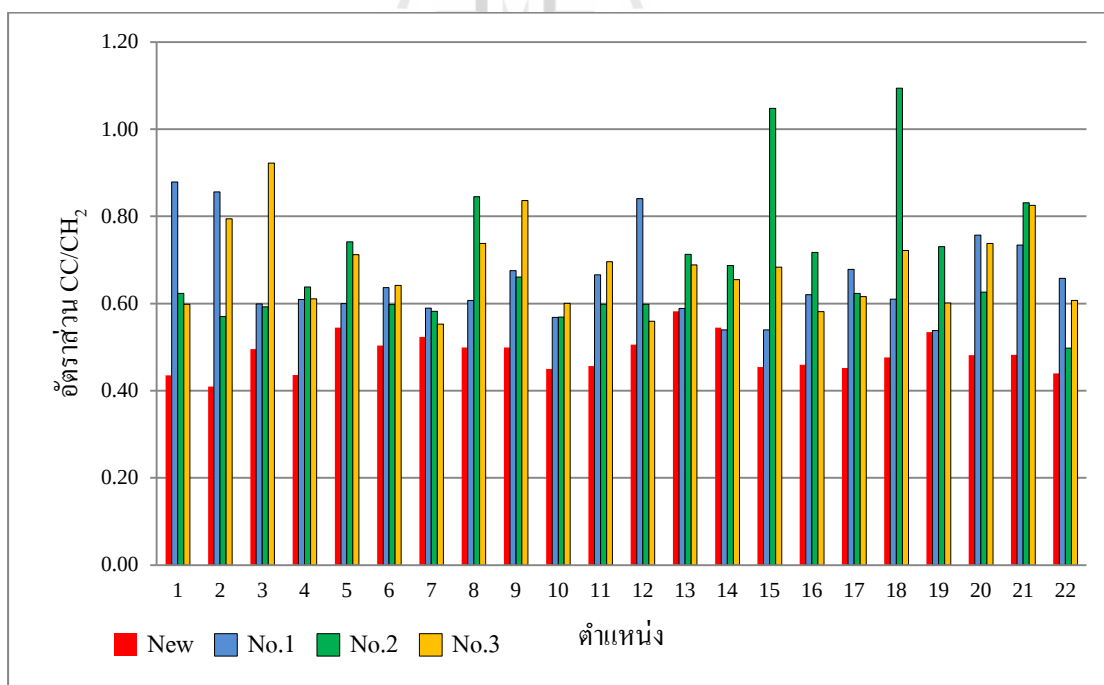


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.14 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ

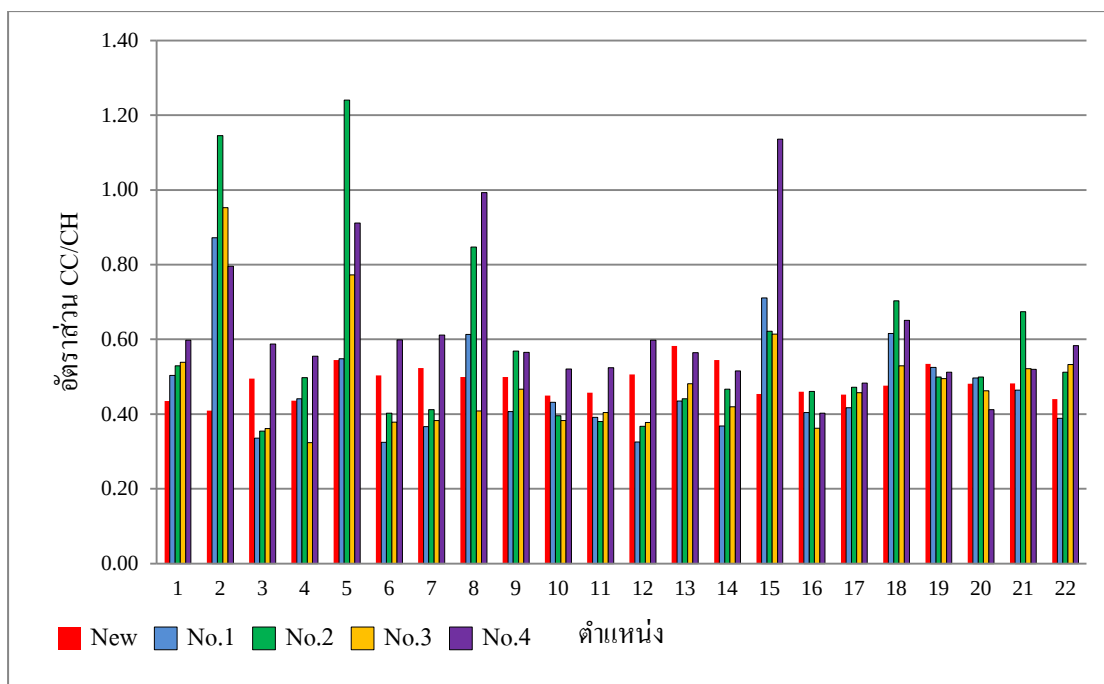


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

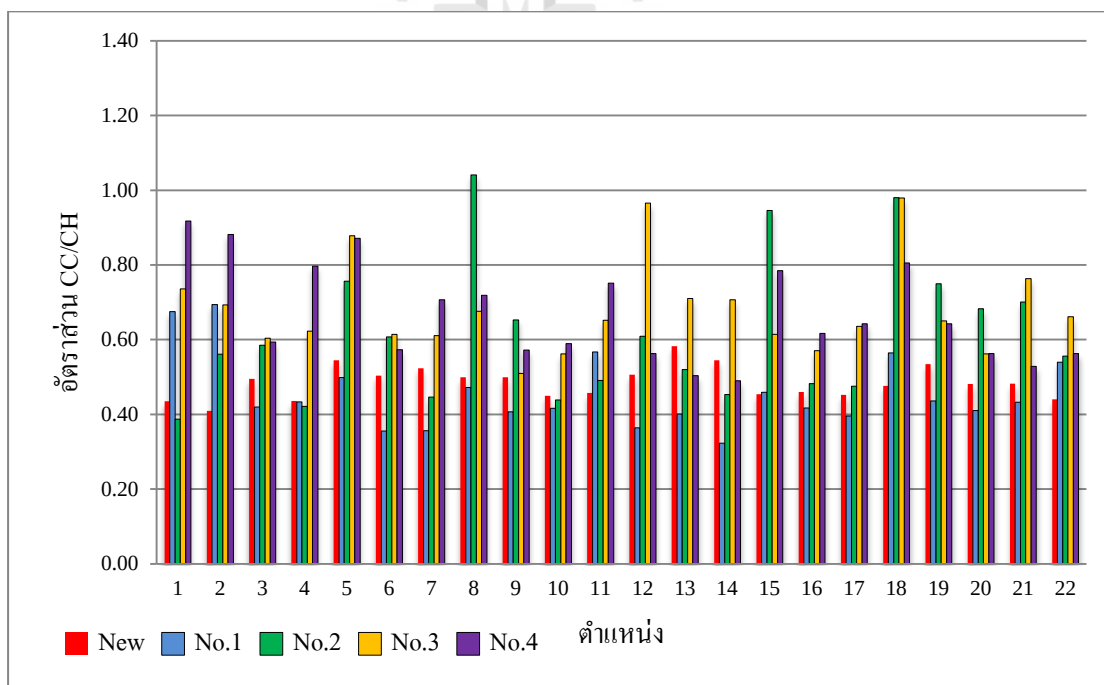


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.15 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบด้วยพหุความเครียด



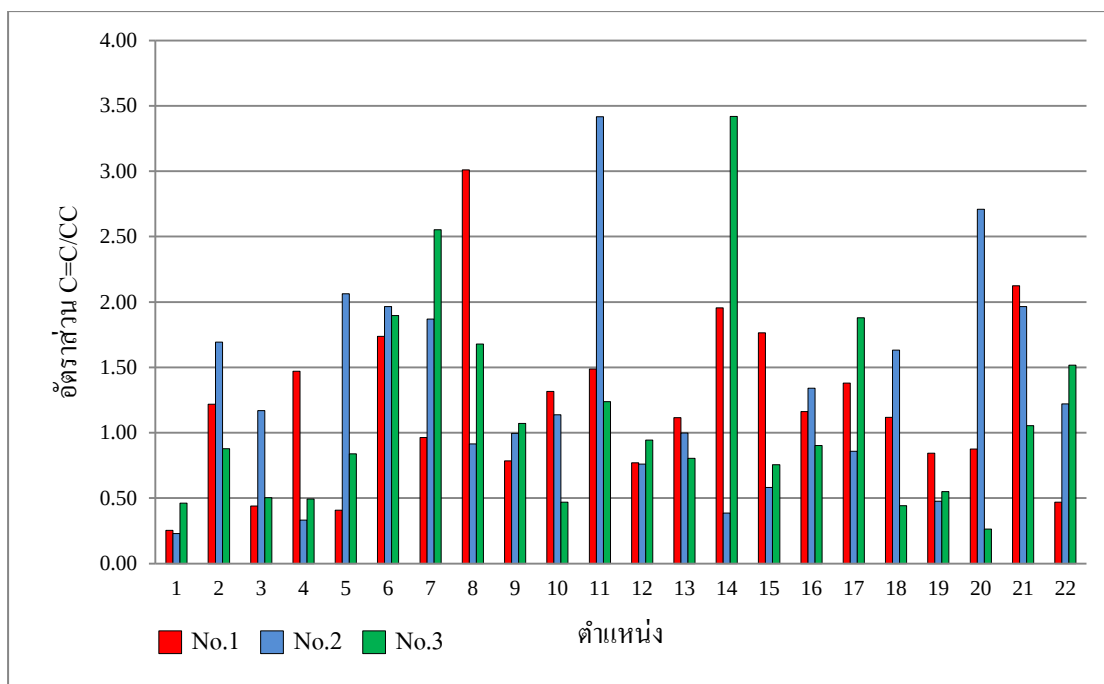
(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1



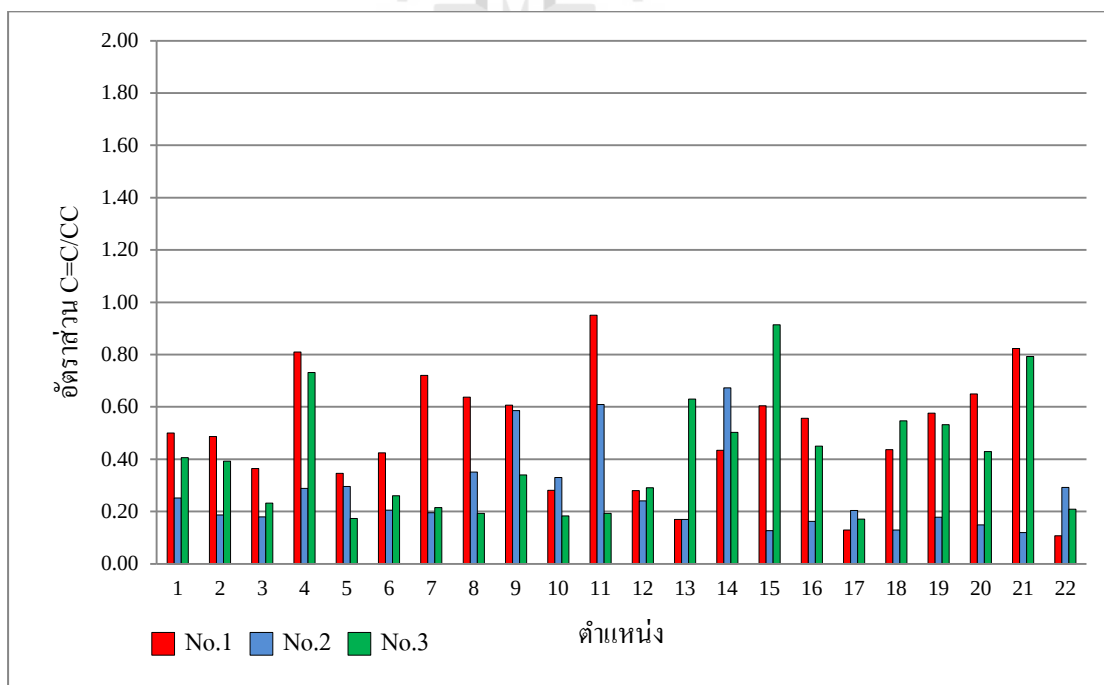
(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.16 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากรูปที่ 5.14-5.16 แสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาณพันธะ C-C ต่อ C-H จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ จะมีค่าทั้งมากกว่าและน้อยกว่าอัตราส่วนของเคเบิลสเปเซอร์ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบใด ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนถูกตัดขาด หรืออะตอมของ H เกิดการขาดหรือหลุดมากขึ้น โดยจากอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่แสดงก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่า เมื่อเคเบิลสเปเซอร์ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุปริมาณพันธะ C-C และ C-H ใน CH_2 มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าลดลง กรณีอัตราส่วนระหว่าง C-C ต่อ C-H มีค่าสูงกว่าชิ้นงานก่อนการทดสอบ หมายถึง ปริมาณพันธะ C-H ใน CH_2 ถูกทำลายมากกว่าหรือมีการลดลงมากกว่า C-C นั่นเอง ส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าความยาวของสายโซ่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยและการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่คืออะตอมของ H หลุดออกจากอะตอมของ C ส่วนในกรณีที่ค่าอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานก่อนการทดสอบก็หมายถึงสายโซ่มีการถูกตัดขาดให้สั้นลงมากกว่าปกติ เกิดจากได้รับพลังงานสูงกว่า (เกิดอาร์กหรือโคโรนาที่รุนแรงกว่า) ดังรูปที่ 5.14 ที่แสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ (ยึดผลตามการทดสอบรอบแรกเป็นหลักตามเหตุผลที่กล่าวมาก่อนหน้านี้) พบว่าบริเวณพื้นผิวของของเคเบิลสเปเซอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ หลังการทดสอบมีค่าอัตราส่วน C-C ต่อ C-H ที่ต่ำกว่าชิ้นงานใหม่ นั่นคือ ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือมีการเกิดอาร์กหรือโคโรนาที่รุนแรงกว่าการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดและการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือที่มีผลของอัตราส่วน C-C ต่อ C-H น้อยกว่าของชิ้นงานใหม่ และจากการลดลงของปริมาณพันธะ C-C และ C-H ก็ส่งผลไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเกิดพันธะ $\text{C}=\text{C}$ และ $\text{C}=\text{O}$ เมื่อพิจารณาตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมของการทดสอบทั้ง 3 การทดสอบข้างต้น เห็นได้ว่า ส่วนใหญ่แล้วจะพบการเพิ่มขึ้นของ $\text{C}=\text{C}$ มากกว่า $\text{C}=\text{O}$ และค่อนข้างแตกต่างกันมาก ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

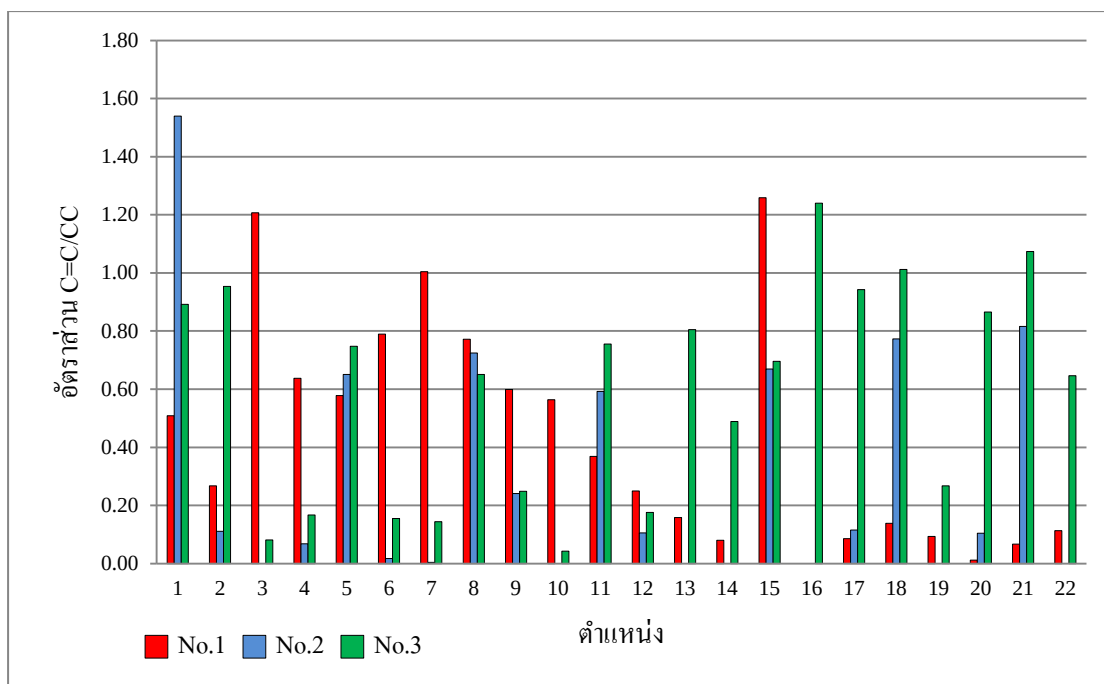


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

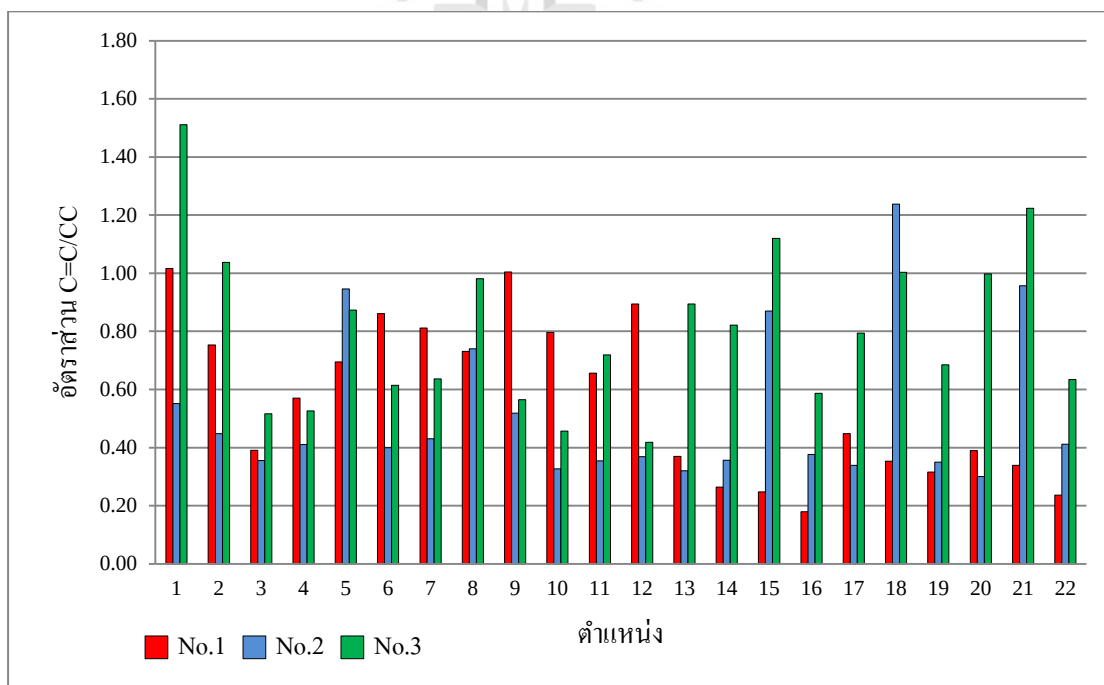


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.17 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ

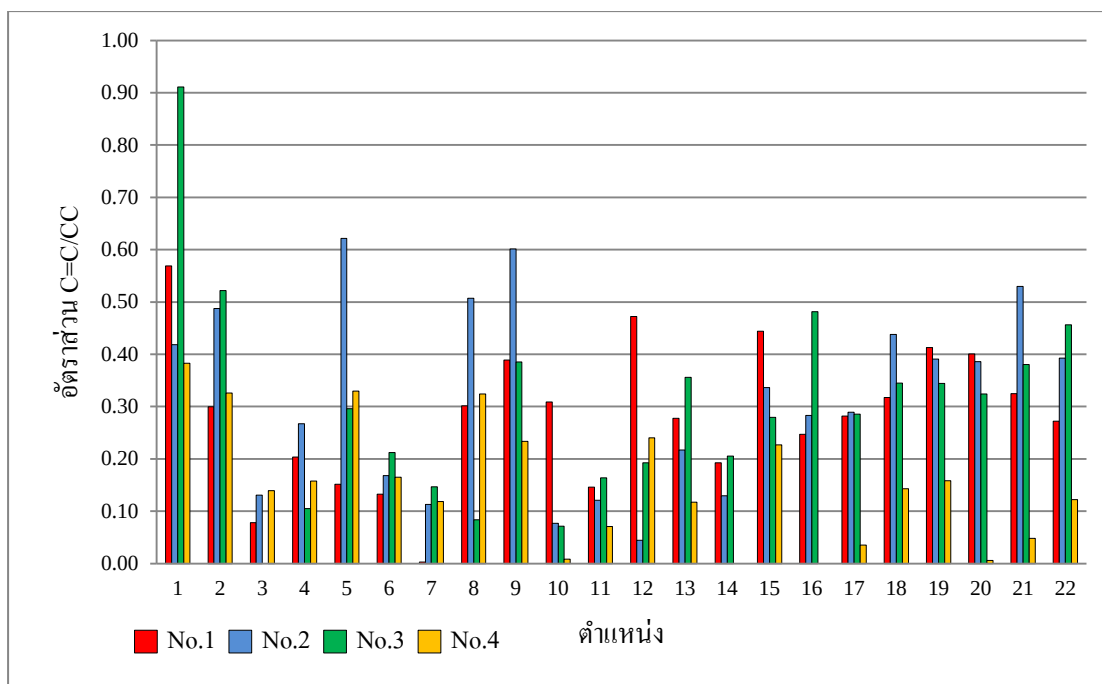


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

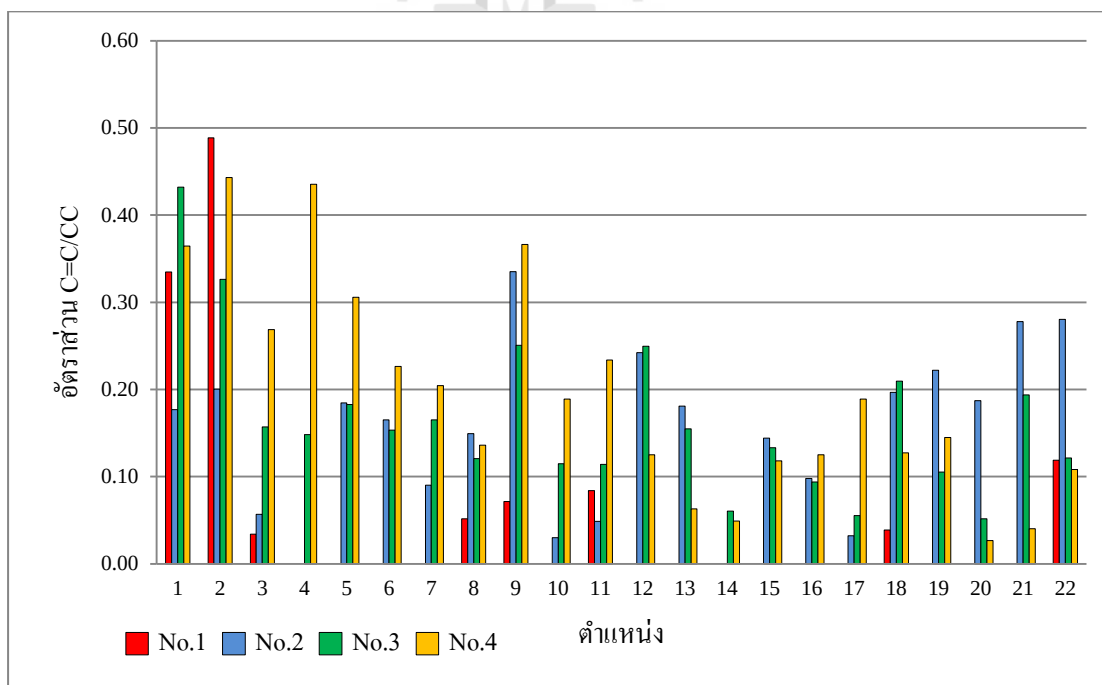


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.18 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยพหุความเครียด

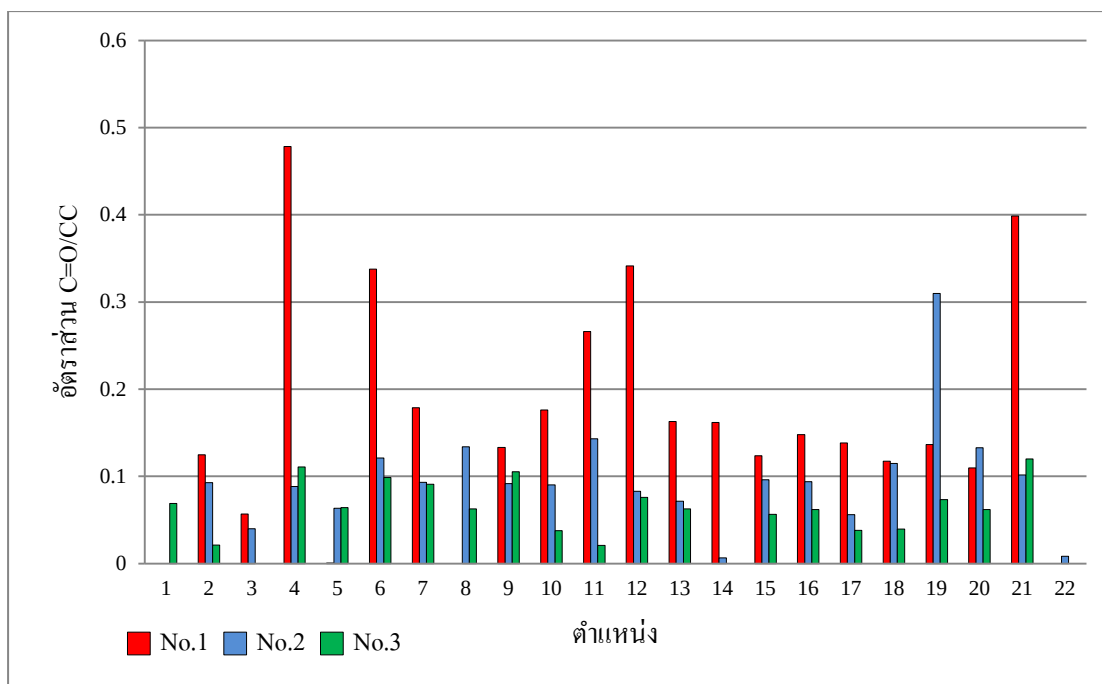


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

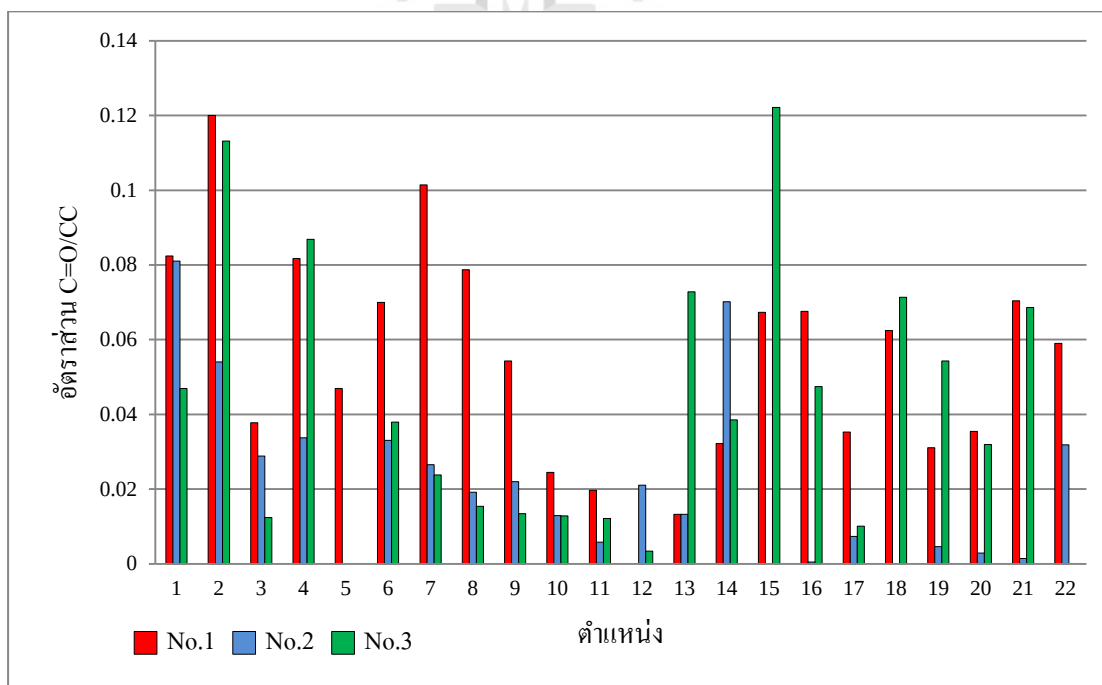


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.19 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

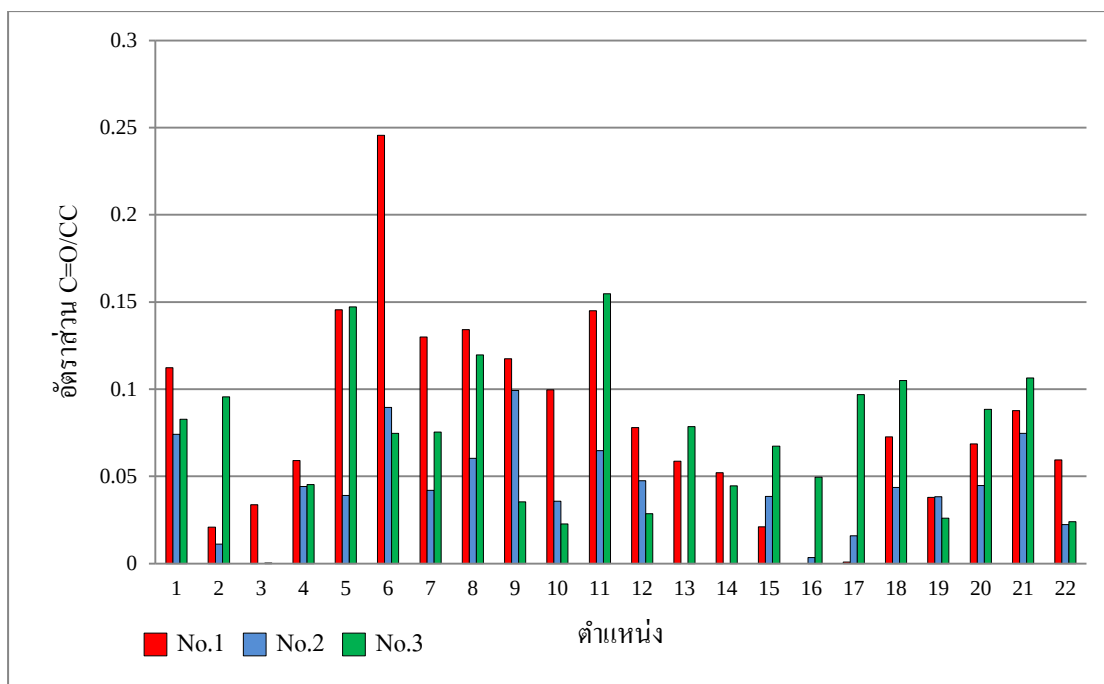


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

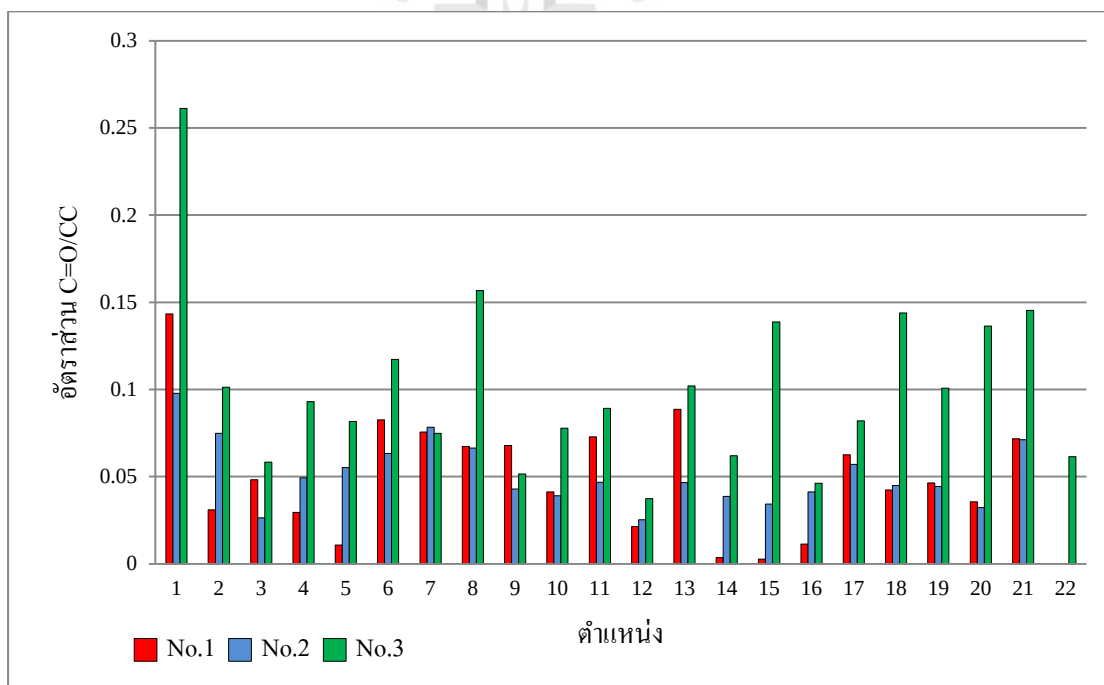


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.20 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ

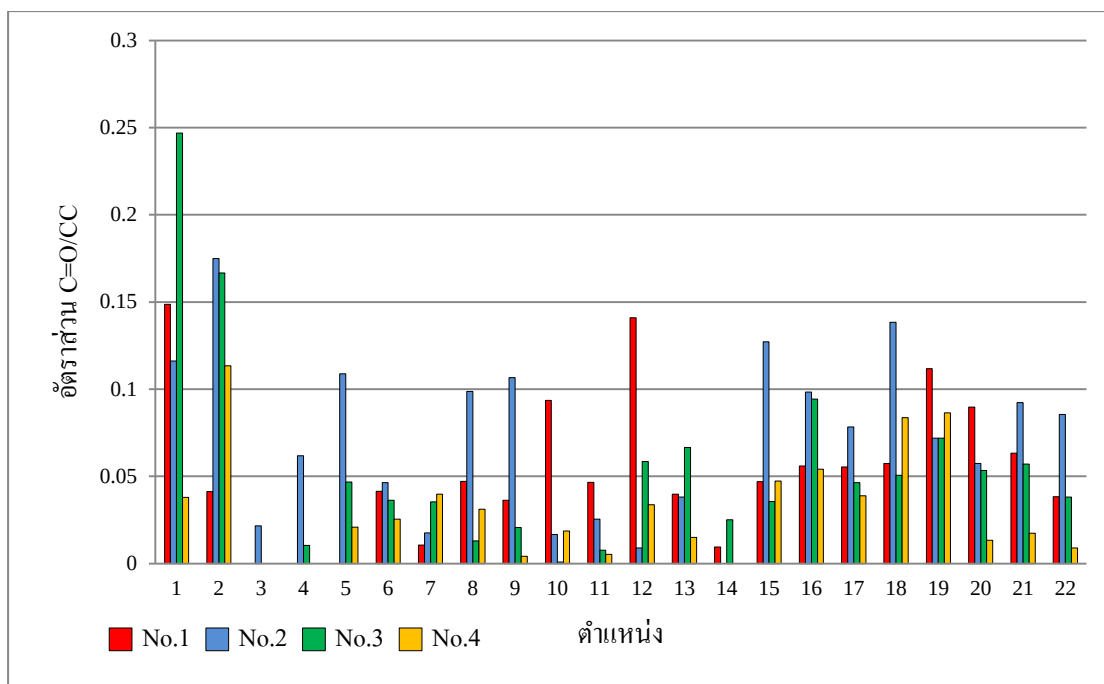


(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1

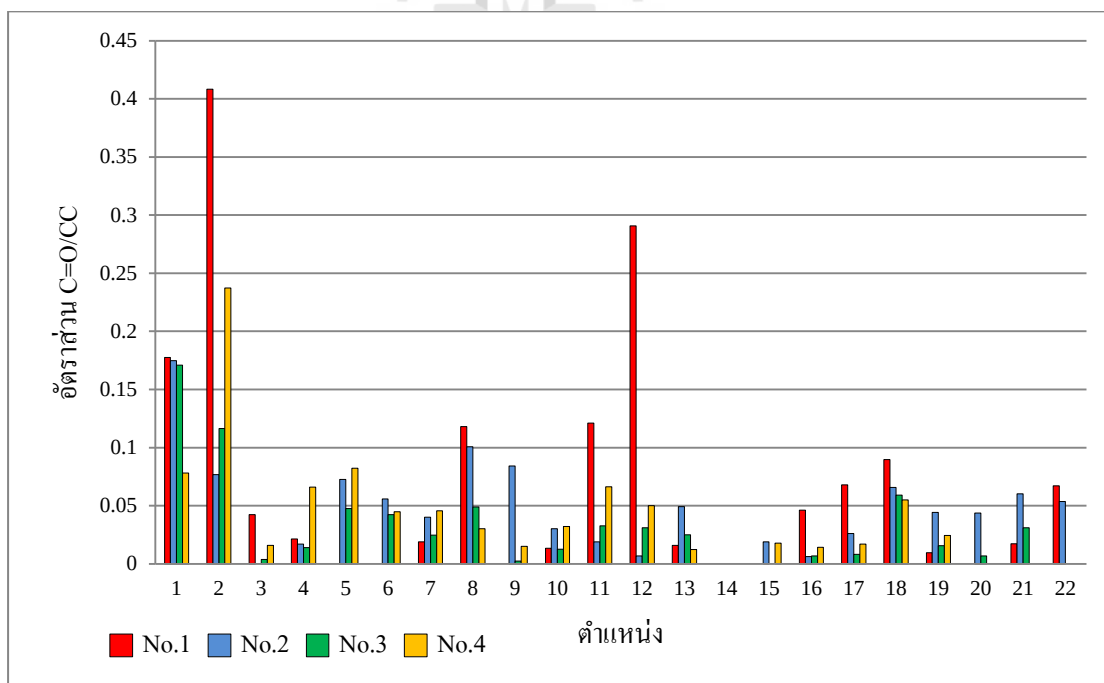


(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.21 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยพหุความถี่



(ก) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 1



(ข) การทดสอบแรงการเสื่อมอายุรอบที่ 2

รูปที่ 5.22 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

สำหรับการแสดงผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณพันธะ C=C ต่อ C-C และอัตราส่วนระหว่างปริมาณพันธะ C=O ต่อ C-C เป็นผลที่เกิดจากการนำค่าอัตราส่วนของชิ้นงานใหม่มาหักกับค่าอัตราส่วนของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแล้ว ทำให้ไม่มีค่าอัตราส่วนของ C=C ต่อ C-C และ C=O ต่อ C-C แสดงในกราฟหรือมีค่าเป็น 0 นั่นเอง (เนื่องจากในชิ้นงานใหม่ตรวจพบปริมาณพันธะ C=C และ C=O น้อยมาก) ทำให้ค่าที่แสดงในกราฟแต่ละตำแหน่งเป็นค่าที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากผลของการทดสอบเท่านั้น จากกราฟแสดงผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณพันธะ C=C ต่อ C-C ที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ผิวของเคเบิลสเปเซอร์จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งหมด พบว่า การทดสอบแต่ละการทดสอบเกิดการเผาไหม้ที่ต่างกัน โดยการทดสอบที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงสุดคือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ รองลงมาคือการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือที่พบการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้น้อยสุด นอกจากนี้ยังพบว่าในการทดสอบเดียวกันทั้ง 22 ตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่างกันด้วย จากผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 3 การทดสอบที่ทราบว่าบริเวณที่เกิดการเสื่อมอายุมากที่สุดคือ ตำแหน่งกราวด์ และบริเวณใกล้กราวด์ (หัวข้อ 5.3-5.5) ซึ่งเทียบได้กับตำแหน่งของการวิเคราะห์ด้วย FTIR ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงสุด ทั้งการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ แต่กรณีของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือที่เป็นการทดสอบที่ทำให้พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ส่วนนี้เกิดการกัดกร่อนมากที่สุดและมากกว่าการทดสอบทั้งสองการทดสอบที่ได้กล่าวมา กลับพบว่าเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่น้อย ทั้งนี้เป็นเพราะพื้นผิวของชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือส่วนนี้มีความไม่สม่ำเสมอสูง หรือมีความขรุขระมาก ซึ่งเป็นข้อบกพร่องของเทคนิค ATR-FTIR จึงทำให้การวิเคราะห์เกิดความผิดเพี้ยนไป สำหรับการวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็ให้ผลลัพธ์เดียวกันกับการวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุด รองลงมาคือการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือตามลำดับ และยังพบว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดอีกด้วย หากเปรียบเทียบระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันค่อนข้างมาก เนื่องจากว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงทนความร้อนได้ไม่สูงนัก เมื่อเกิดอาร์กหรือโคโรนาดีสชาร์จที่ความร้อนสูง อาจ

สูงถึง 3,000 °C (Kim . 1999) จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวได้ง่ายมากและส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณพันธะ C=C นั่นเอง

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR – FTIR ทำให้พบการเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ (คาร์บอนในเซชัน) และ C=O จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน C-C ต่อ C-H ที่บ่งบอกถึงสายโซ่เกิดการขาดสั้นลง หรืออะตอมของไฮโดรเจนหลุดออกจากโซ่หลักมากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงสามารถยืนยันได้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ นั้นเกิดการเสื่อมอายุขึ้นจริง อีกทั้งยังพบว่าบริเวณตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพมากจะตรวจพบการเพิ่มเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C และ C=O มากขึ้นด้วยเช่นกัน ยกเว้นชิ้นงานที่มีความไม่สม่ำเสมอที่ผิวสูงเกินไปทำให้เทคนิคนี้เกิดความผิดพลาดได้

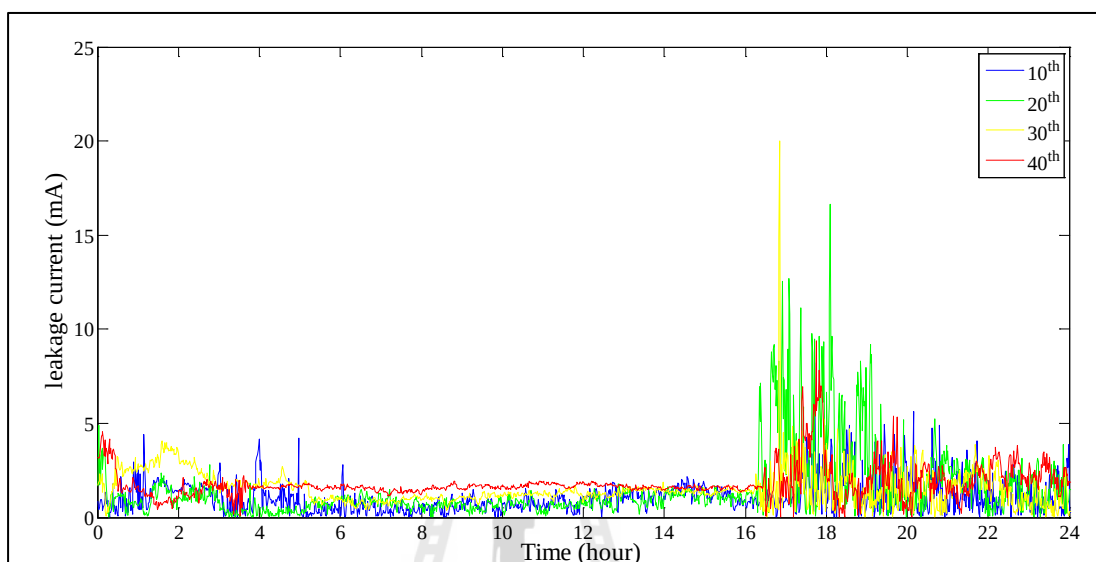
5.8 การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว

กระแสรั่วตามผิว (Leakage Current) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฉนวนไหม้หรือฉนวนชำรุดจนใช้งานได้ดียิ่งขึ้น การที่ฉนวนมีกระแสรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ผิวฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดเวลา ทำให้ระบบเกิดการสูญเสียพลังงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็น ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นตามผิวฉนวน จนทำให้ผิวของฉนวนเกิดความเสียหายและนำไปสู่การฉีกฉนวนในที่สุด เหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วตามผิว เพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาการเสื่อมอายุของฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์ การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวจำเป็นต้องมีการบันทึกค่าตลอดเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง (42 วันโดยประมาณ) ซึ่งรายละเอียดชุดวัดกระแสรั่วได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 สำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวนี้นี้จะมีการวิเคราะห์ในส่วนของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ (ชุดที่ 1) และพหุความเครียด (ชุดที่ 1) เท่านั้น และเพื่อให้การวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดกระแสรั่วได้ชัดเจนขึ้น จึงยกตัวอย่างผลของค่ากระแสรั่วในวันที่ 10, 20, 30 และ 40 ของการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน

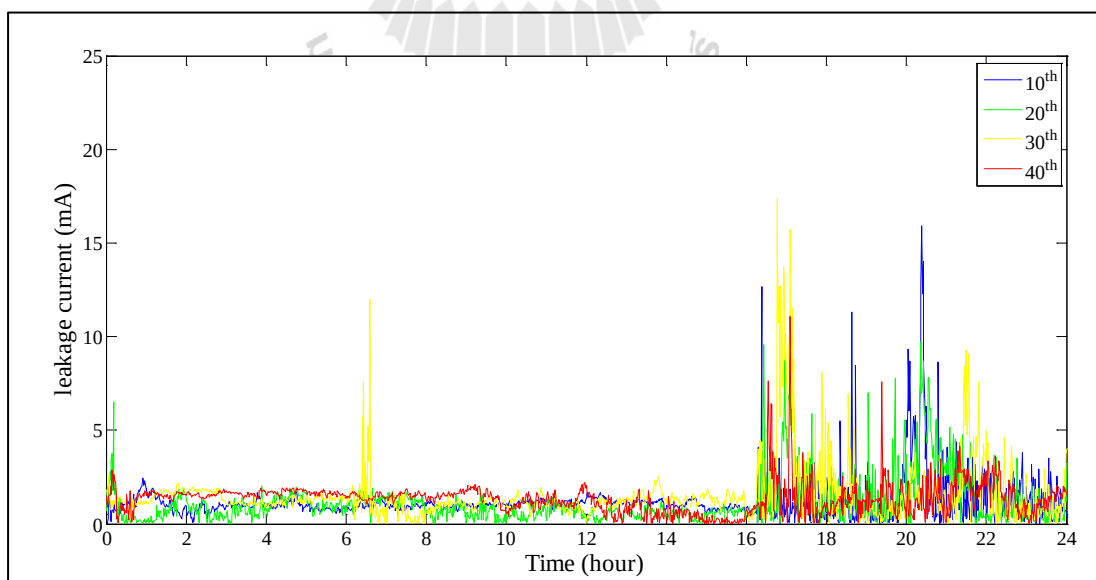
จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือพบว่า ขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยและค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ยังไม่มีการจ่ายหมอก แต่ในช่วงที่มีการจ่ายหมอกนั้นขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากและมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นสูงต่ำอยู่ตลอดเวลา และเมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นขนาดของกระแสรั่วก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 5.23

สำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดก็พบว่า ขนาดของกระแสรั่วมีค่าสูงอยู่ในช่วงที่มีการจ่ายหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด และสภาวะฝน โดยที่สภาวะฝนนั้นทำให้เกิด

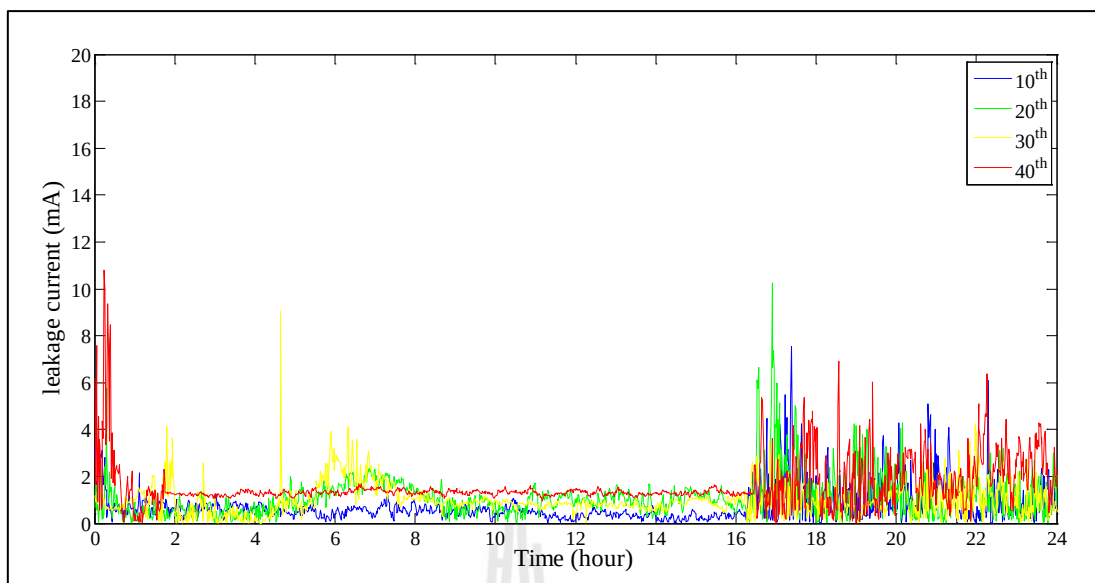
ค่ากระแสรั่วสูงสุด ส่วนในช่วงสภาวะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลตนั้น ขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ทำการทดสอบก็จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่าไรนัก แสดงดังรูปที่ 5.24



(ก) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 1

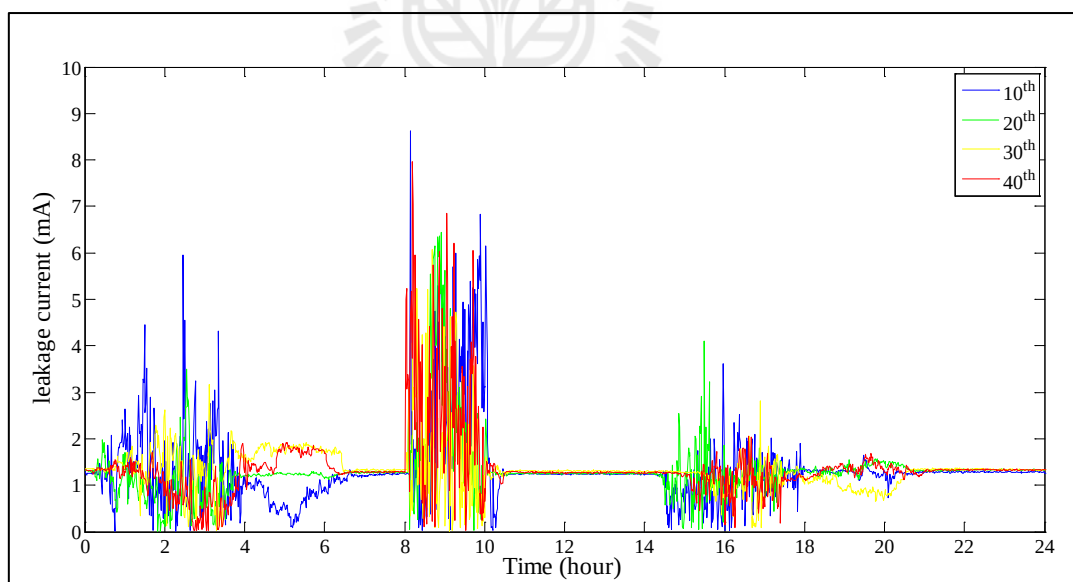


(ข) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 2

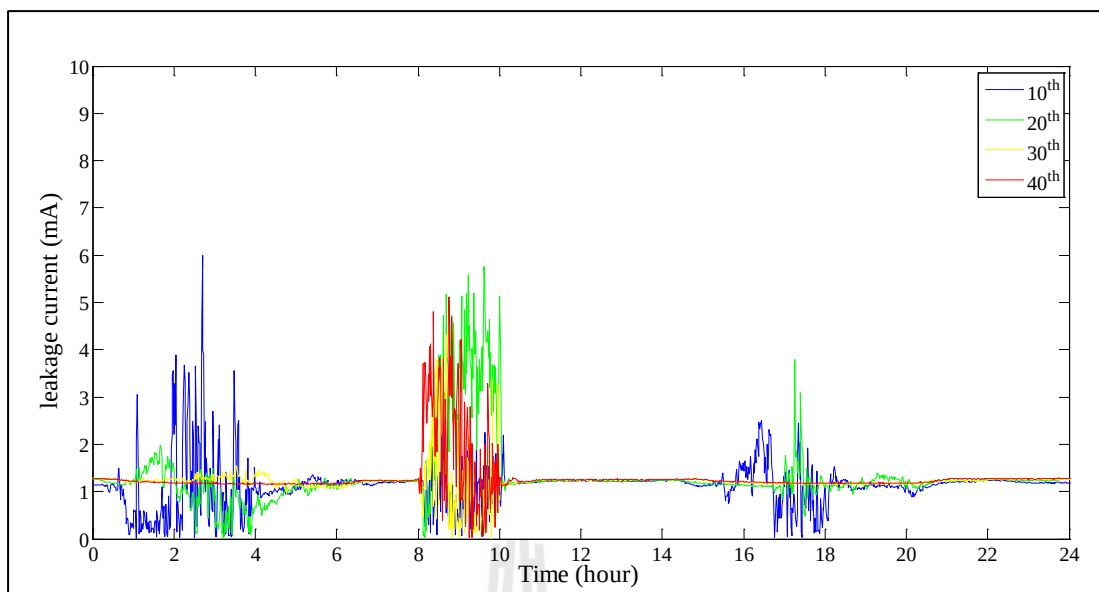


(ค) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 3

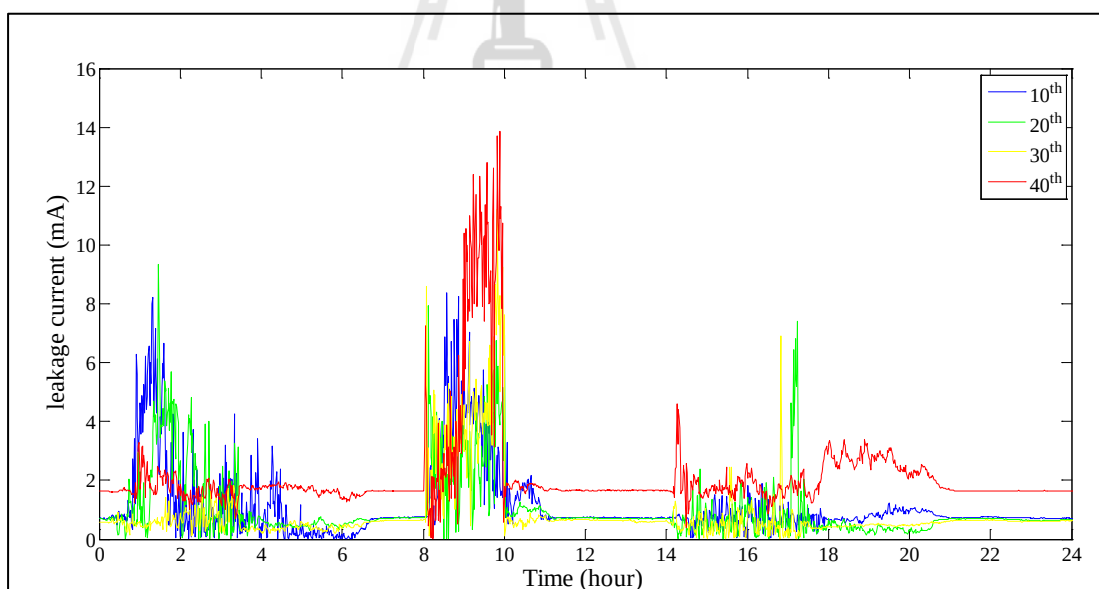
รูปที่ 5.23 ขนาดกระแสรั่วจากการทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ



(ก) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 1



(ข) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 2



(ค) เคเบิลสเปเซอร์ตัวที่ 3

รูปที่ 5.24 ขนาดกระแสจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด

พิจารณารูปกราฟกระแสรูปที่ 5.24 ในช่วงชั่วโมงที่ 0-4 ที่ทำการฉีดหมอกไอเกลือ ค่ากระแสจะมีค่าสูงมาก แต่หลังจากหยุดฉีดหมอกไอเกลือแล้ว ช่วงเวลาที่ 4-6 ชั่วโมงเป็นช่วง

ของสภาวะที่เป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ค่ากระแสรั่วเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนที่มากับรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วยลดความหนาแน่นของหมอกที่ยังคงมีค้างอยู่ในห้องทดสอบให้น้อยลง จนถึงช่วงเวลา 6-8 ชั่วโมงที่มีสภาวะความร้อนเพิ่มขึ้นมาด้วยทำให้พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์แห้งสนิทและยากต่อการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งได้ ค่ากระแสรั่วจึงมีค่าน้อยมากและคงที่ แต่เมื่อถึงชั่วโมงที่ 8-10 เป็นสภาวะฝนเพิ่มเข้ามา จึงทำให้ผิวของสเปเซอร์เปียกและมีน้ำไหลผ่านผิวต่อเนื่องตลอดเวลา ค่ากระแสรั่วจึงเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ ส่วนช่วงชั่วโมงที่ 10-14 ที่กลับสู่สภาวะความร้อนค่ากระแสรั่วก็มีค่าลดลงตามเดิม และเมื่อสังเกตค่ากระแสรั่วในชั่วโมงที่ 14-18 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการฉีดหมอกไอเกลือรอบที่ 2 ก็พบว่ามีความสูงเช่นกัน แต่เมื่อเทียบกับการฉีดหมอกไอเกลือในแรก (ชั่วโมงที่ 0-4) กลับมีค่าน้อยกว่า สาเหตุเป็นเพราะว่า ความเปรอะเปื้อนที่สะสมตามพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ก่อนจะทำการฉีดหมอกไอเกลือในรอบที่ 2 ถูกชำระล้างด้วยสภาวะฝนไปแล้ว ทำให้ค่ากระแสรั่วที่วัดได้ในชั่วโมงที่ 14-18 มีค่าน้อยกว่า เพราะเป็นความเปรอะเปื้อนที่เพิ่งเกิดขึ้นใหม่จากการฉีดหมอกไอเกลือเข้าไป และหลังจากชั่วโมงที่ 18-24 ก็ไม่มีสภาวะฝนมาชำระล้างความเปรอะเปื้อนจากหมอกไอเกลือ จึงทำให้เกิดความเปรอะเปื้อนสะสมมากขึ้นอีกเมื่อกลับไปสู่ชั่วโมงที่ 0-4 ดังนั้นค่ากระแสรั่วในช่วงแรกของการฉีดหมอกไอเกลือนี้ จึงมีค่าสูงกว่าในการฉีดหมอกไอเกลือในช่วงหลัง

จากผลการวิเคราะห์ขนาดของค่ากระแสรั่วไหลตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า สภาวะหมอกไอเกลือ และสภาวะฝนมีผลอย่างมากต่อค่ากระแสรั่วไหลตามผิวที่ส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จหรืออาร์กแถบแห้งมากขึ้น และการสะสมของคราบเกลือที่เพิ่มขึ้นตามวันเวลาที่ทำการทดสอบก็ส่งผลให้ขนาดของกระแสรั่วมีค่าสูงขึ้นได้เช่นกัน

5.9 สรุป

ในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ภายใต้การทดสอบต่าง ๆ คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ รวมถึงผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมี จากการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าพบว่า บริเวณที่เป็นจุดรองรับสายเคเบิลและตำแหน่งกราวด์จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ในงานวิจัยก็พบว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกราวด์ เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4 เท่า ส่วนตำแหน่งจุ่มรองรับสายเฟส A และ B มีค่าลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง

สำหรับผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพขึ้นทั่วทั้งตัวของเคเบิลสเปเซอร์ และเกิดการผุกร่อนอย่างชัดเจนบริเวณตำแหน่งกราวด์ เช่นนี้บอกได้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้ทนต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพและการผุกร่อนได้ไม่ดีนัก อีกทั้งยังมีระดับความเปราะเปื้อนที่สูงกว่าการทดสอบอื่น ๆ ด้วย ส่วนการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลตามผิวก็พบว่า ขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยและค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ยังไม่มีการจ่ายหมอก แต่ในช่วงที่มีการจ่ายหมอกนั้นขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากและมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นสูงต่ำอยู่ตลอดเวลา และเมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นขนาดของกระแสรั่วก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

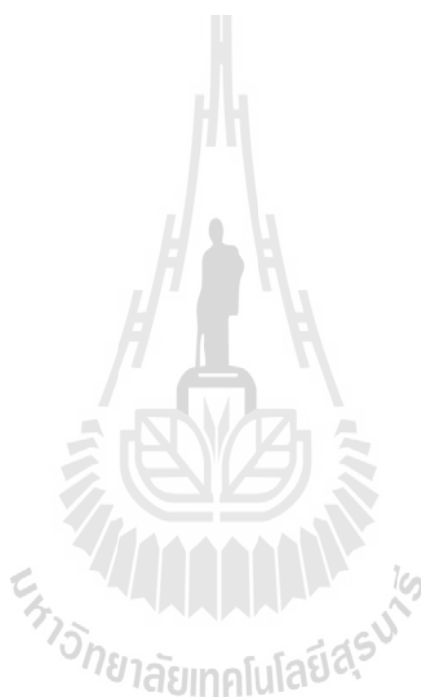
สำหรับผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่า พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพและการผุกร่อนเช่นเดียวกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือแต่มีความรุนแรงน้อยกว่า ระดับความเปราะเปื้อนน้อยกว่า อันเนื่องมาจากสถานะฝนช่วยชำระล้างคราบเกลือบนตัวสเปเซอร์ได้ ส่วนการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลตามผิวก็พบว่า ขนาดของกระแสรั่วมีค่าสูงอยู่ในช่วงที่มีการจ่ายหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด และสถานะฝน โดยที่สถานะฝนนั้นทำให้เกิดค่ากระแสรั่วสูงที่สุด ส่วนในช่วงสถานะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลตนั้น ขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ทำการทดสอบก็จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่าไรนัก

สำหรับผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือเป็นจำนวน 30,000 cycle พบว่าการทดสอบด้วยแรงดัน 13 kV เคเบิลสเปเซอร์เกิดการผุกร่อนอย่างชัดเจนบริเวณตำแหน่งกราวด์ ส่วนบริเวณทั่วไปก็เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพแค่เล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มแรงดันในการทดสอบสำหรับรอบที่ 2 เป็น 15 kV ก็พบการเกิดร่องผิวที่มากขึ้น สาเหตุเพราะความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายขึ้นนั่นเอง

การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบว่า พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งหมด มีลักษณะขรุขระมากขึ้นแม้ว่าการมองด้วยตาเปล่าจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงก็ตาม

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR – FTIR ช่วยในการยืนยันได้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ เกิดการเสื่อมอายุขึ้นจริง สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน C-C ต่อ C-H ที่บ่งบอกถึงสายโซ่เกิดการขาดสั้นลง หรืออะตอมของไฮโดรเจนหลุดออก

จากโซ่หลักมากขึ้น มีการเพิ่มขึ้นของพันธะ $C=C$ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ และ $C=O$ จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโมเลกุล จึงทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์มีค่าลดลง หรือเกิดการเสื่อมอายุนั่นเอง



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ในระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ อันได้แก่ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล่อจุ่มน้ำเกลือ เพื่อประเมินว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้สามารถทนต่อผลกระทบจากความเครียดทางไฟฟ้า ผลกระทบจากดิสชาร์จทางไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดจากการจำลองสภาวะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุได้ การดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา โดยกล่าวถึงการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ซึ่งมีสภาวะแวดล้อมที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดความผิดปกติได้ เนื้อหาในบทนี้ยังรวมถึงวัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ด้วย

บทที่ 2 ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยที่เคยมีการดำเนินการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 3 ได้นำเสนอความรู้เกี่ยวกับการใช้งานเคเบิลสเปเซอร์อย่างละเอียด เช่น ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์ การติดตั้ง อุปกรณ์ต่างที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์ คุณสมบัติของพอลิเมอร์ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมอายุคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล ความเครียดทางสภาวะแวดล้อม และปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 3 การทดสอบ อันประกอบด้วย การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ มีการอธิบายรายละเอียดของการทดสอบต่าง ๆ ได้แก่ อุปกรณ์ในการทดสอบต่าง ๆ การติดตั้งอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบ การเตรียมและวิธีดำเนินการทดสอบ เป็นต้น

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ภายใต้การทดสอบต่าง ๆ คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียด และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ รวมถึงผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าพบว่า บริเวณที่เป็นจุดรองรับสายเคเบิลและตำแหน่งกราวด์จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ในงานวิจัยก็พบว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกราวด์ เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4 เท่า ส่วนตำแหน่งจุดรองรับสายเฟส A และ B มีค่าลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง

สำหรับผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งหมดก็มีความสอดคล้องกันคือบริเวณที่มีการเสื่อมสภาพมากที่สุดคือ ตำแหน่งกราวด์ซึ่งตรงกับผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพและการผุกร่อนขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนทั่วทั้งตัวของเคเบิลสเปเซอร์ จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ และการเร่งการเสื่อมอายุด้วยพหุความเครียดที่เกิดการเสื่อมสภาพรองลงมา ส่วนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือนั้นพบการเปลี่ยนแปลงตามผิวที่น้อยกว่ามาก และจากการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวก็พบว่า หมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด และน้ำฝน เป็นตัวทำให้เกิดกระแสรั่วที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ อีกทั้งยังทำให้เกิดอาร์กหรือโคโรนาได้ง่ายขึ้นด้วยการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบว่า พื้นผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งหมด มีลักษณะขรุขระมากขึ้นแม้ว่าการมองด้วยตาเปล่าจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงก็ตาม และการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR – FTIR ช่วยในการยืนยันได้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ เกิดการเสื่อมอายุขึ้นจริง สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน C-C ต่อ C-H ที่บ่งบอกถึงสายโซ่เกิดการขาดสั้นลง หรืออะตอมของไฮโดรเจนหลุดออกจากโซ่หลักมากขึ้น มีการเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ และ C=O จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้เป็นตัวบ่งชี้ให้

ทราบถึงการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโมเลกุล จึงทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์มีค่าลดลงหรือเกิดการเสื่อมอายุ

จากผลการทดสอบและบทสรุปข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์มีสาเหตุมาจากการได้รับผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้า จากสถานะแวดล้อม จากการเกิดดีสชาร์จเป็นเวลานาน อีกทั้งยังสามารถยืนยันได้ด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีอีกด้วย จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) ควรติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยในการระบายความร้อนแก่อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น วาไรแอค เครื่องสร้างหมอก เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้เมื่อใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนขึ้นมากอาจทำให้เกิดความเสียหายได้
- 2) ในระหว่างช่วงที่มีการทดสอบหากเกิดไฟตกหรือไฟดับขึ้นได้ จึงควรมีการวัดแรงดันที่ใช้ทดสอบทุกครั้งเพื่อให้แรงดันทดสอบคลาดเคลื่อนได้น้อยที่สุด
- 3) สำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ ควรทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องแอร์ เป็นต้น เนื่องจากว่าในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาในระดับอุณหภูมิไม่มีความสม่ำเสมอ ส่งผลต่อความความชื้นในอากาศ และปริมาณฝุ่นที่กระจายมีผลต่อความเปรอะเปื้อนที่เกาะบนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ทำให้ค่าความเปรอะเปื้อนที่ได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์โดยการแยกสถานะต่าง ๆ แยกกัน เช่น ลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์จากความร้อน จากรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นต้น เพื่อจะจำกัดขอบเขตและเข้าใจลักษณะการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์จากสถานะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น
- 2) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ในสถานะการใช้งานจริง เปรียบเทียบกับสถานะการทดสอบต่าง ๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันอย่างไร

รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้านครหลวง. (2008). การปรับปรุงตัวแยกสายไฟฟ้าชนิดเซรามิกเพื่อลดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า. กรมศึกษาคุณภาพไฟฟ้า.
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์.(ม.ป.ป.) เอกสารประกอบการสอน. การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโคปี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- เจนจิรา กระแสโสม. (2555). การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนวัสดุโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากการทดสอบด้วยวงล้อย่น้ำเกลือ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- แมน อมรสิทธิ์. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.
- วรวิทย์ พยัมโซ. (2555). การเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุชาติ ทองอัม. (2555). ลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ที่ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิสรั. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ตำรวจ สังข์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).
- Bouford, J. D. (2008). Spacer cable reduces tree caused customer interruptions. **IEEE**. 1-3.
- Champion, J. V., Dodd, S. J., Vaughan, A. S., Zhao, Y. and Sutton, S. J. (2000). The Effect of Voltage, Temperature and Morphology on Electrical Treeing in polyethylene Blends, **Dielectric Materials, Measurements and Applications Conference Publication**. 35-40.
- Dao, N. L., Lewin, P. L., Hosier I. L., and Swingler S. G. (2010) A comparison between LDPE and HDPE cable insulation properties following lightning impulse ageing. **International Conference on Solid Dielectrics**. Germany. 1-4.
- Gill J. G., STYS, R. D., and SEELY, R. U. (1967). Impulse characteristics of aerial spacer cable, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. pas-86(3): 369-373.

- Grasaesom J. Thong-om, S., Payakcho, W., and Marungsri, B. (2011). Ageing deterioration of silicone rubber polymer insulator under salt water dip wheel test. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 211-217.
- Gutman, I., Harting, R., Matsuoka, R., and Kondo, K. (1997). Experience with IEC 1109 1000h salt fog ageing test for composite insulators. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 13(3): 36-39.
- IEC 60507. (1991). **Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a. c. system**.
- IEC 61109. (1992). **Composite insulators for a.c. overhead line with a nominal voltage greater than 1000 V- Definitions**, Test methods and acceptance criteria.
- IEC 62217. (2002). **Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage > 1000 V**. Ed. 1.0, Committed Draft.
- Isaias, R-V., and Fermin, P. E-C., (2012). Electric-field analysis of spacer cable systems for compact overhead distribution lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 27(4): 2312-2317.
- Khan, M. A. and Hackam, R. (1998). Recovery of Hydrophobicity in High Density Polyethylene, **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. 351-354.
- Kanashiro, A. G., Pinheiro, W., and Burani, G. F. (2005). **Evaluation of Distribution Line Spacers through the Leakage Current Monitoring**. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China. 1-5.
- Kim, J., and Chaudhury, M. K. (1999). **Corona-discharges-induced hydrophobicity loss and recovery of silicones**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 703-706.
- Marungsri, B., Komiya, H., Aoyama, I., Ishikawa, A., and Matsuoka, R. (2003). Salt fog ageing test results of silicone rubber for outdoor polymer insulators. **Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. 2(24): 393-396.
- Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S. (2006). Effect of specimen configuration on deterioration of silicone rubber for polymer insulators in salt fog ageing test. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 13(1): 129-138.

- Marungsri, B., Onchantuek, W., and Oonsivilai, A. (2009). Electric field and potential distributions along surface of silicone rubber polymer insulators using finite element method. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering**. 2(2): 92-96.
- Marungsri, B., Onchantuek, W., Oonsivilai, A. and Kulworawanichpong, T. (2009). Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 1353-1363
- Mergos, J. A., Athanassopoulou, M. D., Argyropoulos, T. G., and Dervos, C. T. (2010). The effect of accelerated UV-Ageing on the dielectric properties of PVC, PTFE and HDPE. **International Conference on Solid Dielectrics**. Germany. 1-4.
- Payakcho, W., Grasaesom, J., Thong-om, S. and Marungsri, B. (2011). Artificial accelerated ageing test of silicone rubber housing material for lightning arrester, **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 650-655.
- Pinheiro, W., Arnaldo, G. K., and Geraldo, F. B. (2008). Evaluation of distribution line spacers located near the coast. **WSEAS Transactions on Systems**. September. 12(7): 1371-1380.
- Pinheiro, W., Arnaldo, G. K., and Geraldo, F. B. (2008). Leakage Current Monitoring of Distribution Line Spacers. **WSEAS International Conference on Power Systems**. 252-257.
- Powell, R. W., Thwaites, H. L., and Stys, R. D. (1965). Estimating Lightning Performance of Spacer-Cable Systems. **IEEE**. 315-319
- Rajini, V., Kanchana, K., Gowdshree, V., and Udayakumar, K. (2004). Comparison of surface tracking in polymeric insulating materials **International Conference on Power System Technofogy**. Singapore. 1513-1517.
- Rocha, R. C. C., Roberto, C. B., Renato, A. O. B., Edmilson, M. G., Fumitaka, N., Liliane, D. C., and Maurício, R. S. (2002). New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 17(2): 562-568.

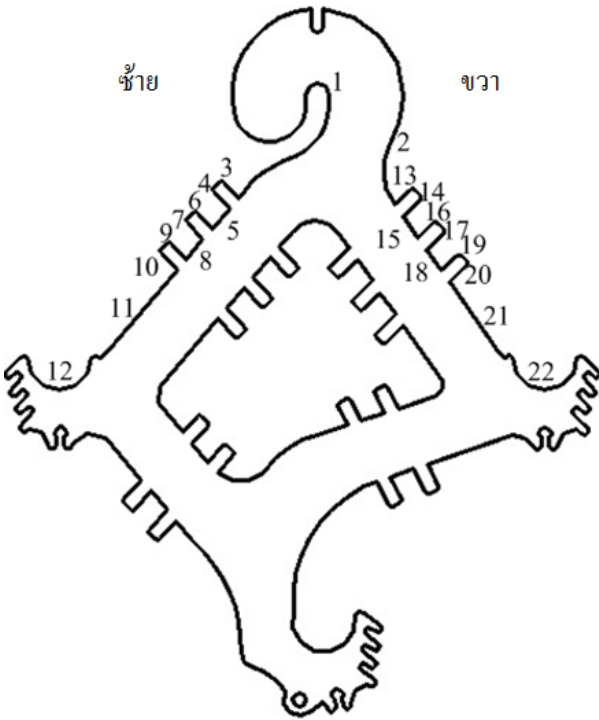
- Saithongin, V., and Techaumnat, B. (2011). Numerical Analysis of Electric Field at the Contact Point Between a Spacer Aerial Cable and a Spacer. **International Conference on Electrical Engineering and Informatics**. Indonesia.
- Schwantes, D. and Zanin, M. (2004). Study of pigment influence in High Density Polyethylene Electrical Strength, Department of Materials Engineering, Federal University of Sao Carlos. 239-242.
- Smith, N. A. (1969). Design Considerations of Spacers for Aerial Spacer Cable. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 4(1): 12-17
- Thong-om, S., Payakcho, W., Grasaesom, J., and Marungsri, B. (2011). Study of ageing deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulators. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 534-539.
- Ueki, M. M., and Zanin, M. (1999). Influence of additives on the dielectric strength of high-density polyethylene. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 6(6): 876-881.
- Wu, S., Sang, H., Liu, Z. and Shen, J. (2004). Effect of Ultraviolet Irradiation on Structure and Properties of HDPE and HDPE/STC Blends, **Journal of Macromolecular Science**. 1311-1319.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ



ตารางที่ ก.1 ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ตำแหน่ง	รายละเอียด
	1. จุดต่อลงดิน
	2. โกลัจุดต่อลงดิน
	3. บนปีกบนฝั่งซ้าย
	4. ใต้ปีกบนฝั่งซ้าย
	5. ลำตัวระหว่างปีกบนกับกลางฝั่งซ้าย
	6. บนปีกกลางฝั่งซ้าย
	7. ใต้ปีกกลางฝั่งซ้าย
	8. ลำตัวระหว่างปีกกลางกับล่างฝั่งซ้าย
	9. บนปีกล่างฝั่งซ้าย
	10. ใต้ปีกล่างฝั่งซ้าย
	11. ลำตัวใกล้จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งซ้าย
	12. จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งซ้าย
	13. บนปีกบนฝั่งขวา
	14. ใต้ปีกบนฝั่งขวา
	15. ลำตัวระหว่างปีกบนกับกลางฝั่งขวา
	16. บนปีกกลางฝั่งขวา
	17. ใต้ปีกกลางฝั่งขวา
	18. ลำตัวระหว่างปีกกลางกับล่างฝั่งขวา
	19. บนปีกล่างฝั่งขวา
	20. ใต้ปีกล่างฝั่งขวา
	21. ลำตัวใกล้จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งขวา
	22. จุดรองรับสายเคเบิลฝั่งขวา

ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C-C/C-H						
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0.4352	0.7760	0.8196	0.3407	0.6905	0.5541	0.5181
2	0.4096	0.5030	0.2891	0.4186	0.7028	0.5082	0.6472
3	0.4952	0.6696	0.5134	0.4520	0.5665	0.5315	0.5529
4	0.4357	0.2609	0.3968	0.3997	0.6400	0.4733	0.5751
5	0.5449	0.6114	0.3348	0.4333	0.5661	0.4992	0.4865
6	0.5036	0.3431	0.3313	0.2850	0.5717	0.4939	0.4826
7	0.5236	0.3769	0.3363	0.2843	0.6872	0.4946	0.4519
8	0.4992	0.2641	0.4649	0.4914	0.7875	0.5839	0.4519
9	0.4992	0.3888	0.3914	0.4406	0.5156	0.5279	0.5381
10	0.4499	0.3610	0.3871	0.4019	0.5325	0.5015	0.4775
11	0.4569	0.2583	0.1347	0.3314	0.5839	0.5286	0.4935
12	0.5059	0.0627	0.4117	0.3416	0.5621	0.5094	0.5002
13	0.5823	0.3890	0.3972	0.4612	0.4527	0.4527	0.6611
14	0.5447	0.3016	0.3526	0.0888	0.6236	0.6379	0.5936
15	0.4541	0.3732	0.4097	0.3488	0.7298	0.5109	0.5637
16	0.4594	0.3495	0.4044	0.3820	0.6741	0.5121	0.5944
17	0.4519	0.4106	0.3355	0.5180	0.5265	0.5217	0.5018
18	0.4760	0.3953	0.3091	0.0878	0.6444	0.5378	0.7039
19	0.5342	0.3471	0.0826	0.3273	0.7197	0.5509	0.6195
20	0.4814	0.3903	0.2161	0.3972	0.5831	0.5627	0.6191
21	0.4822	0.1719	0.2219	0.3640	0.7681	0.5055	0.7379
22	0.4398	0.4406	0.2523	0.3425	0.4762	0.5586	0.5079
ค่าเฉลี่ย	0.4848	0.3839	0.3542	0.3608	0.6184	0.5253	0.5581

ตารางที่ ก.3 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วย
พหุความเครียด

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C-C/C-H						
	ก่อน ทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0.4352	0.5626	0.7802	0.8872	0.8787	0.6233	0.5979
2	0.4096	0.4693	0.4073	0.5653	0.8559	0.5705	0.7945
3	0.4952	0.6690	0.4287	0.4380	0.5989	0.5924	0.9222
4	0.4357	0.5344	0.5352	0.4566	0.6096	0.6379	0.6105
5	0.5449	0.5483	0.6548	0.5444	0.5999	0.7417	0.7118
6	0.5036	0.4200	0.4696	0.4601	0.6361	0.5978	0.6416
7	0.5236	0.5823	0.4555	0.3631	0.5893	0.5819	0.5526
8	0.4992	0.5754	0.7173	0.5959	0.6072	0.8447	0.7381
9	0.4992	0.4478	0.4560	0.4496	0.6750	0.6610	0.8364
10	0.4499	0.4228	0.4477	0.4359	0.5684	0.5685	0.6002
11	0.4569	0.5433	0.7924	0.5842	0.6661	0.5984	0.6958
12	0.5059	0.4633	0.5456	0.6631	0.8403	0.5981	0.5592
13	0.5823	0.5288	0.4390	0.5789	0.5889	0.7130	0.6885
14	0.5447	0.4532	0.4376	0.5370	0.5395	0.6870	0.6546
15	0.4541	0.7023	0.8062	0.6650	0.5395	1.0481	0.6834
16	0.4594	0.3721	0.4432	0.6455	0.6206	0.7176	0.5811
17	0.4519	0.4953	0.4539	0.5600	0.6781	0.6235	0.6156
18	0.4760	0.5645	0.8418	0.6598	0.6097	1.0940	0.7215
19	0.5342	0.5981	0.4518	0.4643	0.5382	0.7308	0.6010
20	0.4814	0.4513	0.4561	0.5607	0.7569	0.6260	0.7381
21	0.4822	0.5210	0.8324	0.6784	0.7343	0.8308	0.8251
22	0.4398	0.5137	0.3679	0.6268	0.6578	0.4973	0.6069
ค่าเฉลี่ย	0.4848	0.5199	0.5555	0.5645	0.6540	0.6902	0.6808

ตารางที่ ก.4 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C-C/C-H				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0.4352	0.5034	0.5289	0.5389	0.5974
2	0.4096	0.8723	1.1448	0.9522	0.7956
3	0.4952	0.3358	0.3540	0.3616	0.5878
4	0.4357	0.4409	0.4974	0.3234	0.5550
5	0.5449	0.5480	1.2406	0.7721	0.9115
6	0.5036	0.3245	0.4025	0.3785	0.5985
7	0.5236	0.3665	0.4115	0.3824	0.6113
8	0.4992	0.6132	0.8471	0.4085	0.9927
9	0.4992	0.4070	0.5684	0.4662	0.5654
10	0.4499	0.4313	0.3958	0.3829	0.5202
11	0.4569	0.3913	0.3803	0.4038	0.5240
12	0.5059	0.3255	0.3674	0.3779	0.5977
13	0.5823	0.4351	0.4408	0.4809	0.5644
14	0.5447	0.3678	0.4667	0.4197	0.5153
15	0.4541	0.7110	0.6220	0.6144	1.1355
16	0.4594	0.4040	0.4608	0.3621	0.4027
17	0.4519	0.4171	0.4720	0.4575	0.4826
18	0.4760	0.6156	0.7028	0.5294	0.6505
19	0.5342	0.5246	0.4995	0.4951	0.5117
20	0.4814	0.4962	0.4988	0.4625	0.4116
21	0.4822	0.4638	0.6740	0.5215	0.5196
22	0.4398	0.3888	0.5122	0.5329	0.5828
ค่าเฉลี่ย	0.4848	0.4720	0.5677	0.4829	0.6197

ตารางที่ ก.4 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C-C ต่อ C-H ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (ต่อ)

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C-C/C-H				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0.4352	0.6747	0.3869	0.7357	0.9169
2	0.4096	0.6934	0.5613	0.6930	0.8816
3	0.4952	0.4196	0.5852	0.6033	0.5932
4	0.4357	0.4334	0.4216	0.6224	0.7961
5	0.5449	0.4983	0.7559	0.8783	0.8710
6	0.5036	0.3553	0.6071	0.6140	0.5732
7	0.5236	0.3560	0.4464	0.6107	0.7067
8	0.4992	0.4719	1.0410	0.6756	0.7185
9	0.4992	0.4066	0.6526	0.5099	0.5724
10	0.4499	0.4165	0.4385	0.5613	0.5892
11	0.4569	0.5668	0.4905	0.6515	0.7508
12	0.5059	0.3639	0.6089	0.9649	0.5625
13	0.5823	0.4008	0.5195	0.7101	0.5035
14	0.5447	0.3230	0.4529	0.7065	0.4901
15	0.4541	0.4587	0.9459	0.6142	0.7846
16	0.4594	0.4166	0.4818	0.5699	0.6162
17	0.4519	0.3955	0.4749	0.6355	0.6426
18	0.4760	0.5647	0.9798	0.9794	0.8055
19	0.5342	0.4360	0.7495	0.6500	0.6423
20	0.4814	0.4101	0.6822	0.5617	0.5629
21	0.4822	0.4328	0.7008	0.7635	0.5284
22	0.4398	0.5393	0.5556	0.6611	0.5624
ค่าเฉลี่ย	0.4848	0.4561	0.6154	0.6806	0.6668

ตารางที่ ก.5 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=C/C-C						
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0	0.2527	0.2300	0.4627	0.4998	0.2514	0.4063
2		1.2179	1.6930	0.8775	0.4863	0.1866	0.3929
3		0.4390	1.1693	0.5022	0.3648	0.1791	0.2319
4		1.4693	0.3327	0.4927	0.8093	0.2889	0.7317
5		0.4070	2.0625	0.8388	0.3458	0.2953	0.1739
6		1.7361	1.9643	1.8966	0.4246	0.2054	0.2597
7		0.9633	1.8688	2.5526	0.7200	0.1959	0.2143
8		3.0105	0.9152	1.6796	0.6372	0.3503	0.1932
9		0.7843	0.9959	1.0703	0.6063	0.5854	0.3399
10		1.3162	1.1379	0.4690	0.2812	0.3300	0.1831
11		1.4886	3.4164	1.2370	0.9501	0.6092	0.1934
12		0.7700	0.7602	0.9436	0.2797	0.2409	0.2912
13		1.1144	0.9978	0.8050	0.1699	0.1699	0.6303
14		1.9556	0.3853	3.4201	0.4338	0.6728	0.5024
15		1.7638	0.5817	0.7558	0.6038	0.1268	0.9135
16		1.1610	1.3409	0.9031	0.5562	0.1629	0.4505
17		1.3799	0.8579	1.8783	0.1295	0.2037	0.1711
18		1.1178	1.6330	0.4431	0.4364	0.1293	0.5466
19		0.8448	0.4773	0.5508	0.5765	0.1787	0.5324
20		0.8756	2.7083	0.2626	0.6496	0.1485	0.4286
21		2.1233	1.9653	1.0551	0.8230	0.1194	0.7924
22		0.4695	1.2218	1.5176	0.1072	0.2924	0.2085
ค่าเฉลี่ย		1.2118	1.3053	1.1188	0.4951	0.2692	0.3995

ตารางที่ ก.6 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วย
พหุความเครียด

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=C/C-C						
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0	0.5081	1.5392	0.8915	1.0167	0.5520	1.5112
2		0.2678	0.1110	0.9531	0.7530	0.4483	1.0378
3		1.2066	0.0000	0.0809	0.3905	0.3557	0.5158
4		0.6375	0.0676	0.1665	0.5705	0.4105	0.5260
5		0.5774	0.6501	0.7480	0.6949	0.9456	0.8735
6		0.7891	0.0173	0.1544	0.8605	0.3996	0.6139
7		1.0038	0.0035	0.1437	0.8118	0.4302	0.6365
8		0.7722	0.7244	0.6501	0.7315	0.7401	0.9808
9		0.5989	0.2404	0.2489	1.0043	0.5189	0.5647
10		0.5631	0.0000	0.0421	0.7965	0.3266	0.4563
11		0.3684	0.5924	0.7550	0.6562	0.3543	0.7185
12		0.2494	0.1052	0.1753	0.8943	0.3684	0.4186
13		0.1583	0.0000	0.8047	0.3698	0.3198	0.8939
14		0.0795	0.0000	0.4888	0.2637	0.3562	0.8212
15		1.2583	0.6692	0.6960	0.2469	0.8701	1.1201
16		0.0000	0.0000	1.2405	0.1790	0.3761	0.5866
17		0.0854	0.1156	0.9424	0.4482	0.3388	0.7942
18		0.1383	0.7726	1.0116	0.3536	1.2375	1.0031
19		0.0928	0.0000	0.2670	0.3155	0.3500	0.6849
20		0.0115	0.1042	0.8654	0.3896	0.3007	0.9978
21		0.0671	0.8155	1.0733	0.3393	0.9564	1.2237
22		0.1127	0.0000	0.6457	0.2369	0.4114	0.6342
ค่าเฉลี่ย		0.4339	0.2967	0.5930	0.5601	0.5167	0.8006

ตารางที่ ก.7 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อ
จุ่มน้ำเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=C/C-C				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0	0.5691	0.4185	0.9109	0.3826
2		0.2996	0.4875	0.5217	0.3258
3		0.0780	0.1305	0.0000	0.1390
4		0.2037	0.2669	0.1050	0.1576
5		0.1518	0.6213	0.2959	0.3294
6		0.1325	0.1679	0.2120	0.1648
7		0.0030	0.1131	0.1465	0.1187
8		0.3014	0.5072	0.0837	0.3243
9		0.3889	0.6015	0.3853	0.2337
10		0.3090	0.0768	0.0711	0.0082
11		0.1460	0.1207	0.1637	0.0706
12		0.4723	0.0444	0.1924	0.2401
13		0.2777	0.2171	0.3562	0.1171
14		0.1926	0.1293	0.2051	0.0000
15		0.4443	0.3364	0.2792	0.2266
16		0.2468	0.2832	0.4813	0.0000
17		0.2822	0.2890	0.2858	0.0355
18		0.3172	0.4380	0.3450	0.1428
19		0.4131	0.3910	0.3443	0.1582
20		0.4008	0.3860	0.3242	0.0058
21		0.3247	0.5295	0.3804	0.0482
22		0.2723	0.3926	0.4563	0.1220
ค่าเฉลี่ย		0.2830	0.3158	0.2975	0.1523

ตารางที่ ก.7 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=C ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อ
จุ่มน้ำเกลือ (ต่อ)

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=C/C-C				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 2			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0	0.3346	0.1767	0.4321	0.3646
2		0.4885	0.2004	0.3265	0.4432
3		0.0342	0.0567	0.1569	0.2687
4		0.0000	0.0000	0.1482	0.4352
5		0.0000	0.1844	0.1828	0.3058
6		0.0000	0.1651	0.1532	0.2264
7		0.0000	0.0900	0.1652	0.2045
8		0.0516	0.1494	0.1206	0.1361
9		0.0714	0.3352	0.2506	0.3662
10		0.0000	0.0298	0.1147	0.1890
11		0.0838	0.0485	0.1140	0.2339
12		0.0000	0.2420	0.2496	0.1249
13		0.0000	0.1811	0.1547	0.0630
14		0.0000	0.0000	0.0606	0.0489
15		0.0000	0.1441	0.1330	0.1179
16		0.0000	0.0978	0.0939	0.1249
17		0.0000	0.0320	0.0551	0.1888
18		0.0388	0.1965	0.2097	0.1274
19		0.0000	0.2220	0.1053	0.1448
20		0.0000	0.1870	0.0515	0.0268
21		0.0000	0.2780	0.1938	0.0404
22		0.1188	0.2805	0.1213	0.1080
ค่าเฉลี่ย		0.0555	0.1499	0.1633	0.1950

ตารางที่ ก.8 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=O/C-C						
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0	0.0000	0.0000	0.0690	0.0824	0.0810	0.0469
2		0.1249	0.0929	0.0211	0.1200	0.0540	0.1131
3		0.0567	0.0398	0.0000	0.0377	0.0288	0.0124
4		0.4782	0.0882	0.1107	0.0817	0.0338	0.0869
5		0.0005	0.0634	0.0642	0.0469	0.0000	0.0000
6		0.3378	0.1209	0.0988	0.0699	0.0330	0.0379
7		0.1787	0.0930	0.0910	0.1014	0.0265	0.0238
8		0.0000	0.1338	0.0625	0.0787	0.0192	0.0154
9		0.1333	0.0916	0.1052	0.0543	0.0220	0.0134
10		0.1763	0.0902	0.0378	0.0244	0.0129	0.0128
11		0.2660	0.1430	0.0209	0.0196	0.0058	0.0121
12		0.3415	0.0830	0.0759	0.0000	0.0211	0.0034
13		0.1628	0.0715	0.0627	0.0133	0.0133	0.0728
14		0.1619	0.0066	0.0000	0.0322	0.0701	0.0385
15		0.1235	0.0961	0.0563	0.0673	0.0000	0.1222
16		0.1478	0.0938	0.0620	0.0676	0.0005	0.0474
17		0.1384	0.0560	0.0380	0.0353	0.0073	0.0100
18		0.1173	0.1149	0.0396	0.0624	0.0000	0.0713
19		0.1364	0.3098	0.0734	0.0311	0.0046	0.0543
20		0.1097	0.1329	0.0619	0.0354	0.0029	0.0319
21		0.3986	0.1016	0.1200	0.0704	0.0014	0.0686
22		0.0000	0.0085	0.0000	0.0590	0.0318	0.0000
ค่าเฉลี่ย		0.1632	0.0923	0.0578	0.0541	0.0214	0.0407

ตารางที่ ก.9 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วย
พหุความเครียด

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=O/C-C						
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			หลังทดสอบชุดที่ 2		
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0	0.1124	0.0740	0.0827	0.1432	0.0978	0.2612
2		0.0209	0.0112	0.0956	0.0309	0.0747	0.1013
3		0.0336	0.0000	0.0003	0.0482	0.0263	0.0583
4		0.0590	0.0442	0.0452	0.0294	0.0493	0.0931
5		0.1455	0.0390	0.1472	0.0107	0.0552	0.0817
6		0.2456	0.0894	0.0747	0.0825	0.0632	0.1172
7		0.1299	0.0421	0.0753	0.0756	0.0783	0.0749
8		0.1341	0.0604	0.1196	0.0673	0.0665	0.1567
9		0.1174	0.0993	0.0353	0.0678	0.0428	0.0516
10		0.0996	0.0357	0.0227	0.0412	0.0390	0.0778
11		0.1451	0.0648	0.1547	0.0729	0.0468	0.0891
12		0.0780	0.0474	0.0285	0.0215	0.0252	0.0373
13		0.0586	0.0000	0.0785	0.0886	0.0467	0.1020
14		0.0522	0.0000	0.0445	0.0035	0.0386	0.0620
15		0.0210	0.0385	0.0674	0.0027	0.0343	0.1387
16		0.0000	0.0035	0.0496	0.0113	0.0412	0.0462
17		0.0008	0.0158	0.0968	0.0625	0.0571	0.0821
18		0.0726	0.0436	0.1050	0.0424	0.0449	0.1439
19		0.0379	0.0383	0.0260	0.0463	0.0443	0.1007
20		0.0686	0.0448	0.0885	0.0355	0.0323	0.1363
21		0.0877	0.0746	0.1063	0.0718	0.0712	0.1453
22		0.0595	0.0223	0.0239	0.0000	0.0000	0.0614
ค่าเฉลี่ย		0.0809	0.0404	0.0713	0.0480	0.0489	0.1008

ตารางที่ ก.10 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อ
จุ่มน้ำเกลือ

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=O/C-C				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0	0.1486	0.1161	0.2469	0.0379
2		0.0413	0.1749	0.1666	0.1134
3		0.0000	0.0216	0.0000	0.0000
4		0.0000	0.0619	0.0105	0.0000
5		0.0000	0.1088	0.0468	0.0209
6		0.0415	0.0464	0.0362	0.0254
7		0.0106	0.0175	0.0353	0.0398
8		0.0472	0.0988	0.0130	0.0311
9		0.0363	0.1066	0.0206	0.0041
10		0.0936	0.0166	0.0008	0.0186
11		0.0465	0.0254	0.0075	0.0053
12		0.1408	0.0089	0.0586	0.0337
13		0.0398	0.0380	0.0666	0.0150
14		0.0095	0.0000	0.0250	0.0000
15		0.0469	0.1271	0.0355	0.0473
16		0.0559	0.0983	0.0943	0.0541
17		0.0553	0.0783	0.0463	0.0389
18		0.0573	0.1384	0.0506	0.0836
19		0.1117	0.0718	0.0719	0.0863
20		0.0898	0.0574	0.0534	0.0133
21		0.0632	0.0922	0.0569	0.0174
22		0.0383	0.0855	0.0382	0.0090
ค่าเฉลี่ย		0.0534	0.0723	0.0537	0.0316

ตารางที่ ก.10 อัตราส่วนระหว่างปริมาณ C=O ต่อ C-C ของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อ
จุ่มน้ำเกลือ (ต่อ)

ตำแหน่ง	อัตราส่วน C=O/C-C				
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบชุดที่ 1			
		ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4
1	0	0.1777	0.1747	0.1708	0.0780
2		0.4083	0.0767	0.1164	0.2372
3		0.0422	0.0000	0.0037	0.0158
4		0.0215	0.0170	0.0138	0.0661
5		0.0000	0.0726	0.0476	0.0821
6		0.0000	0.0557	0.0424	0.0449
7		0.0189	0.0402	0.0246	0.0456
8		0.1181	0.1007	0.0488	0.0301
9		0.0000	0.0841	0.0023	0.0150
10		0.0134	0.0301	0.0126	0.0321
11		0.1211	0.0189	0.0325	0.0663
12		0.2907	0.0068	0.0311	0.0499
13		0.0159	0.0491	0.0250	0.0123
14		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15		0.0000	0.0189	0.0000	0.0178
16		0.0462	0.0062	0.0067	0.0142
17		0.0680	0.0259	0.0080	0.0169
18		0.0898	0.0658	0.0592	0.0551
19		0.0094	0.0441	0.0157	0.0243
20		0.0000	0.0436	0.0068	0.0000
21		0.0172	0.0601	0.0311	0.0000
22		0.0672	0.0535	0.0000	0.0000
ค่าเฉลี่ย		0.0693	0.0475	0.0318	0.0411

ภาคผนวก ข

มาตรฐานเกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์



- 1 -

Invitation to Bid No. :

Specification No. : RINS-001/2549

**C Material, equipment, and specifications for HIGH-DENSITY
POLYETHYLENE CABLE SPACER**

C1 General material and packing instructions

Additional to the general instructions, the following shall be observed :

1a Scope

These specifications cover cable spacer for use with aluminium spaced aerial cables.

1b Standard

The cable spacers shall be tested in accordance with the latest ANSI Standard, ASTM, IEC, or equivalent; unless otherwise specified in these specifications.

1c Principal requirement

1c.1 General

The cable spacer shall be made of track-resistant high-density polyethylene which suitable for using in the tropical climatic area.

Each cable spacer shall be furnished with snap ties or other ties and accessories for securing cables.

The snap ties shall be made of ultra-violet resistant polyurethane material or better which suitable for exposure to sunlight.

Form No. 04-5.1/11.05

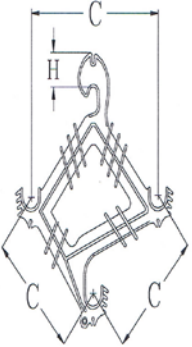
Page 1 of 8

II

- 2 -

The cable spacer shall have the following ratings in Table 1.

Table 1

Rated voltage, line to line		kV	33
Low-frequency withstand voltage	dry	kV/1 min	70
	wet	kV/10 sec	50
Low-frequency flashover voltage	dry	kV	90
	wet	kV	65
Critical impulse flashover voltage	Pos.	kV	130
	Neg.	kV	150
Ultimate mechanical strength		N	8,000
Phase to phase spacing "C"		mm	≥ 240
Dimension "H"		mm	≤ 75

- 3 -

1c.2 Marking

Each cable spacer shall be marked legibly and durably, as follows :

- (1) Manufacturer's name and/or Trade-mark.
- (2) Month and Year of manufacture.
- (3) PEA's trade-mark, as the figure shown.



- (4) Others according to manufacturer's design.

Each snap tie shall be marked legibly and durably, as follows :

- (1) Manufacturer's name and/or Trade-mark.
- (2) Month and Year of manufacture.

1c.3 Tests and test reports

The cable spacers shall have successfully passed the tests in accordance with the applicable standards, as follows :

- 1c.3.1 The design tests for the cable spacer shall be performed in accordance with the following
 - Ultimate mechanical-strength test.
 - Low-frequency dry withstand voltage test.
 - Low-frequency wet withstand voltage test.
 - Low-frequency dry flashover voltage test.
 - Low-frequency wet flashover voltage test.
 - Critical impulse flashover voltage tests, positive and negative.
- 1c.3.2 The snap ties shall have successfully passed test by independent testing Laboratories in accordance with the applicable standards. All test shall be consisted of at least the following items:
 - hardness
 - density
 - tensile strength
 - tear strength
 - elongation at break
 - compression set

Form No. 04-5.1/11.05

Page 3 of 8

II

- 4 -

1c.3.3 Quality conformance tests

- Low-frequency dry flashover voltage test.
- Low-frequency wet flashover voltage test.
- Ultimate mechanical-strength test.

1c.3.4 Routine tests

According to manufacturer's standard.

The cost of all tests and test reports shall be borne by the Contractor.

1c.3.5 Acceptance tests

- Visual and dimensional tests.
- Low-frequency dry flashover voltage test.
- Ultimate mechanical-strength test.
- Snap tie securing.
- Long term dead weight test.

1d Packing

One (1) piece of cable spacer and three (3) pieces of snap ties (or other ties) shall be packed in a transparent plastic bag.

One hundred (100) bags shall be packed in a suitable crate or wooden case.

Each crate or wooden case shall have the following dimensions :

- Length : 90 cm, approximately
- Width : 120 cm, approximately
- Height : 90 cm, approximately

The crate or wooden case shall be designed to be movable by a forklift truck in such a manner that the truck's forks can be inserted at any side of the bottom of the crate or wooden case.

If the crate or wooden case is made of rubber wood (Yang-para or Heavea brasiliensis) the wooden parts shall be treated with wood preservative.

Form No. 04-5.1/11.05

Page 4 of 8

II

- 5 -

C2 Material and packing data to be given by bidder

For each item offered, the following details shall be submitted.

2a Cable spacer & Accessories details

2a.1 Cable spacer

Manufacturer's name and/or trade-mark.

Type or Catalogue No. .

Drawing with dimensions, in mm .

Kind of material.

Suggested voltage application, in kV .

Ultimate mechanical-strength, in N .

Low-frequency dry withstand voltage, in kV.

Low-frequency wet withstand voltage, in kV.

Low-frequency dry flashover voltage, in kV .

Low-frequency wet flashover voltage, in kV .

Critical impulse flashover voltage positive, in kV .

Critical impulse flashover voltage negative, in kV .

2a.2 Snap ties (or other ties)

Type or Catalogue No. .

Drawing with dimensions, in mm .

Kind of material.

Ultimate mechanical-strength, in N.

2a.3 Marking method

Form No. 04-5.1/11.05

Page 5 of 8

II

- 6 -

2b Packing details

Packing method.

Number of cable spacers in one package.

Dimensions of each package, in cm .

Gross weight of each package, in kg .

Net weight of each package in, kg .

Number of packages.

If several packages are contained in one big case, further details are required :

Number of packages in each case.

Dimensions of each case, in cm .

Volume of each case, in m³ .

Gross weight of each case, in kg .

Number of cases.

- 7 -

Notes : Conditions for documentation and consideration

1. The Bidders have to submit, the sufficient references describing the previous experience of the manufacture (e.g. list of supply of equipment and/or materials having the same or similar design as proposed, field experience, the registration of TISI, the copies of license, and/or the inspection to supplier's factory by PEA's inspectors, etc.) to the satisfaction of PEA.
2. Tests, test reports, and samples.
 - 2.1 Design tests.
 - 2.1.1 The design tests of high-density polyethylene cable spacers shall be conducted at the acknowledged independent testing laboratory.
 - 2.1.2 Bidders, who have never submitted the design test reports, have to submit the test reports either prior to receipt of bids or within fifteen (15) calendar days of the bid closing date, for saving bid consideration time. The Item offered without submitting the tests reports may be rejected.
 - 2.1.3 The above design tests may be omitted if a record of tests made on identical ones can be supplied.
 - 2.2 Quality conformance tests reports and Routine test reports shall be submitted at the time of delivery.
 - 2.3 The Bidders who have never supplied the cable spacers and snap ties to PEA, should supply five (5) sets of the cable spacers and snap ties for each Item to PEA either prior to receipt of bids or within fifteen (15) days counted from the bid closing date, otherwise the Item offered without submitting the samples may be rejected. The samples shall not be returned, unless otherwise specified in **C3 Schedule of detailed requirement.**
 - 2.4 PEA reserves the right to have the test(s) on the samples which shall be performed by the third party, in Bangkok; and the costs of all test(s) and reports shall be borne by the Bidders.

Form No. 04-5.1/11.05

Page 7 of 8

II

- 8 -

3. Guarantee

3.1 The Bidders who offer the cable spacers and snap ties have to guarantee the quality for five (5) years from the date of issuance of the notice of acceptance (in case of purchase under JBIC conditions) or five (5) years commencing from the date PEA receive the above-mentioned cable spacers and snap ties (in case of purchase under PEA conditions).

The cable spacer and snap ties which were manufactured and kept for more than six (6) months shall not be delivered to PEA; otherwise they shall be rejected.

3.2 During the guarantee period, the Contractor shall replace the defective cable spacers and snap ties for free of charge or shall pay an amount equal to the exact purchasing value for the defective quantity of the cable spacers and snap ties, and the contractor shall pay for cost of installation of new cable spacer at 70 Bahts per set, within 30 days from the date of receiving notice from PEA.

4. Qualification of the bidder

The Bidders can offer the cable spacers of high-density polyethylene type only the ones which already prior approve of **Long Term Dead Weight Test** (see the attached sheet) from PEA, if not, they shall be rejected.

Long Term Dead Weight Test
for high-density polyethylene cable spacer

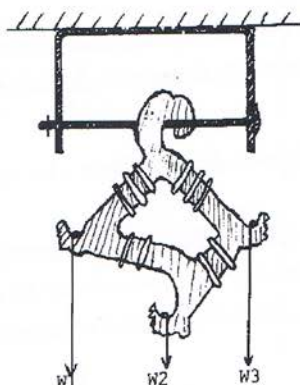
1. Test procedure

Two (2) cable spacers (samples) will be installed similar to the actual circumstance in open air.

Each phase of samples is hung with weight of 72-79 kg.

The sum of total weight in hanging is equal to 227 kg (500 lbs) $\pm$ 5%.

The diagram of installing is shown below.



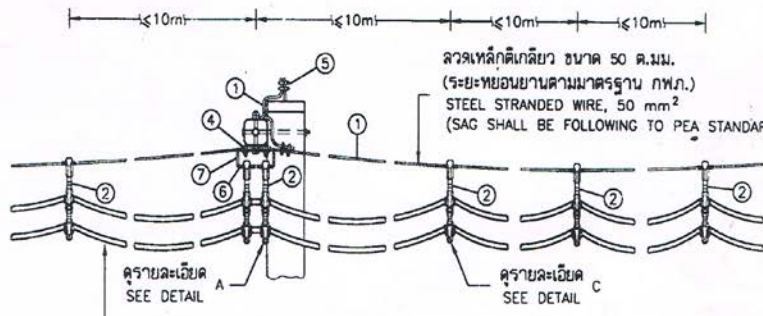
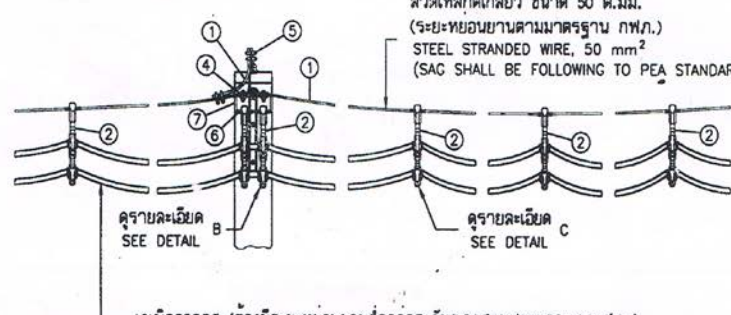
$$W_1, W_2, \text{ and } W_3 = 72-79 \text{ kg (159-174 lb)}$$

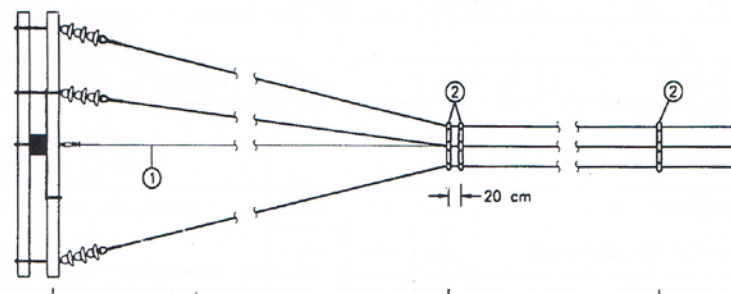
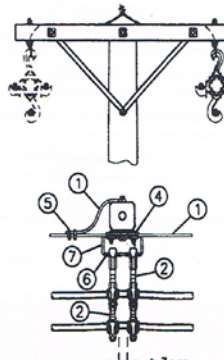
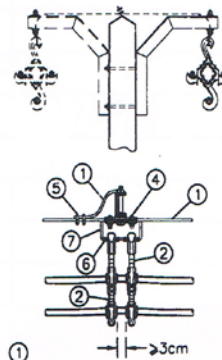
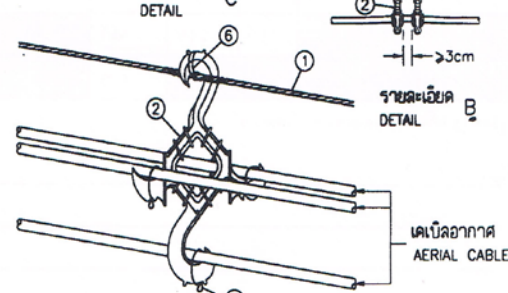
$$W_1 + W_2 + W_3 = 227 \text{ kg (500 lb)} \pm 5\%$$

The test shall be done for a period of sixty (60) days.

2. Test evaluation

The samples shall be considered to have passed the test if there is no sign of crack or breakage as the result of the test .

การประกอบเลขที่ 2324 ASSEMBLY NO. 3913		
1 การติดตั้งเคเบิลสเปซอร์ชนิดโพลีเอทิลีนกับคอนสาย POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION WITH CROSSARM  ลวดเหล็กตีเกลียว ขนาด 50 ค.ม.ม. (ระยะหย่อนยานตามมาตรฐาน กฟภ.) STEEL STRANDED WIRE, 50 mm² (SAG SHALL BE FOLLOWING TO PEA STANDARD) ดูรายละเอียด A SEE DETAIL ดูรายละเอียด C SEE DETAIL เคเบิลอากาศ (ต้องมียะพียงยานต่ำกว่าระดับสายประมาณ 20 ซม.) AERIAL CABLE (THE SAG SHALL BE LOWER THAN SUPPORTING LEVEL ~20 cm) ระยะห่างในการประกอบติดตั้งเคเบิลสเปซอร์ ทุกระยะ 10 ม. INTERVAL BETWEEN EACH CABLE SPACER SHALL BE 10 m		
2 การติดตั้งเคเบิลสเปซอร์ชนิดโพลีเอทิลีนกับเหล็กคาน/เคเบิลอากาศ POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION WITH BRACKET FOR AERIAL CABLE  ลวดเหล็กตีเกลียว ขนาด 50 ค.ม.ม. (ระยะหย่อนยานตามมาตรฐาน กฟภ.) STEEL STRANDED WIRE, 50 mm² (SAG SHALL BE FOLLOWING TO PEA STANDARD) ดูรายละเอียด A SEE DETAIL ดูรายละเอียด C SEE DETAIL เคเบิลอากาศ (ต้องมียะพียงยานต่ำกว่าระดับสายประมาณ 20 ซม.) AERIAL CABLE (THE SAG SHALL BE LOWER THAN SUPPORTING LEVEL ~20 cm) ระยะห่างในการประกอบติดตั้งเคเบิลสเปซอร์ ทุกระยะ 10 ม. INTERVAL BETWEEN EACH CABLE SPACER SHALL BE 10 m		
กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย ผู้เขียน: Supphakul Boonreung ผู้สำรวจ: ... วิศวกร: ... หัวหน้าแผนก: ... ผู้อำนวยการกอง: ... ผู้อำนวยการฝ่าย: ... รองผู้อำนวยการวางแผน และพัฒนาระบบไฟฟ้า	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ว่าการ: ... การติดตั้งเคเบิลสเปซอร์ชนิดโพลีเอทิลีน	ใช้แทนแบบ ถูกแทนโดยแบบ เขียนเสร็จวันที่ 2 มี.ค. 2547 แก้ไขวันที่ มีมติเป็น มาตรฐาน แบบเลขที่ SA2-015/46017 แผ่นที่ 1 ของจำนวน 3 แผ่น

การประกอบเลขที่ 2324 ASSEMBLY NO. 3913		
3 การติดตั้งเคเบิลสเปซเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีน กับเสาต้นสุดท้าย POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION AT DEADEND POLE  ระยะห่างระหว่างเคเบิลสเปซเซอร์ตัวแรก กับเสาต้นสุดท้ายไม่เกิน 20 ม. THE DISTANCE FROM THE FIRST CABLE SPACER TO DEADEND POLE SHALL NOT EXCEED 20 m		
1 การติดตั้งเคเบิลสเปซเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีนกับคอนสาย POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION WITH CROSSARM  รายละเอียด A DETAIL	2 การติดตั้งเคเบิลสเปซเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีนกับเหล็กคานเคเบิลอากาศ POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION WITH BRACKET FOR AERIAL CABLE  รายละเอียด B DETAIL	
 รายละเอียด C DETAIL เคเบิลอากาศ AERIAL CABLE		
กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย ผู้เขียน: <i>Upphakol Boonkrueang</i> ผู้สำรวจ: วิศวกร: หัวหน้าแผนก: ผู้อำนวยการกอง: ผู้อำนวยการฝ่าย:	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ว่าการ: <i>สมชาย งาม</i> การติดตั้งเคเบิลสเปซเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีน POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION	ใช้แทนแบบ ถูกแทนโดยแบบ เขียนเสร็จวันที่ 2 มี.ค. 2547 ฉบับวันที่ มีดัดแปลง เมตร มาตรฐาน แบบเลขที่ SA2-015/4601.7 แผ่นที่ 2 ของจำนวน 3 แผ่น

การประกอบเลขที่ 2324 ASSEMBLY NO. 3913		
ลำดับที่ ITEM	รายละเอียดวัสดุ DESCRIPTION OF MATERIAL	วัสดุเลขที่ MAT. NO.
1	ลวดเหล็กตีเกลียว 50/7 ต.มม. มอก. 404 WIRE, STEEL STRANDED 50/7 mm ² TIS 404	01100004
2	เคเบิลสเปเซอร์ ชนิดโพลีเอทิลีน CABLE SPACER, POLYETHYLENE	02440000
3	ห่วงรัดสายเคเบิลสำหรับเคเบิลสเปเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีน SNAP TIE, FOR ATTACHMENT CABLE ON POLYETHYLENE CABLE SPACER	02440106
4	กายแคลมป์สลัก 3 ตัว CLAMP, GUY, TRIPLE BOLT	02440102
5	ยูแคลมป์ สลักเกลียว M 8 CLAMP, SINGLE U-BOLT M 8	01230000
6	ลวดอะลูมิเนียมกลม 4 มม. TIE WIRE, AL 4 mm	02200002
7	ห่วงแขวนเคเบิลสเปเซอร์ LINK, CABLE SPACER	02440103

แบบอ้างอิง REFERENCE DRAWING	แบบเลขที่ DWG. No.	การประกอบเลขที่ -ASSEMBLY No.
1 การติดตั้งเคเบิลอากาศ ระบบ 22-33 kV 1-2 วงจร (กับเสา คอ. ขนาด 12.20 เมตร) 22-33 kV AERIAL CABLE INSTALLATION, 1-2 CIRCUIT (FOR CONCRETE POLE 12.20 m)	SA4-015/40018	2323 3909
2 โครงสร้างเสาแบบจำหน่าย 22-33 kV 1-2 วงจร สำหรับแขวนเคเบิลอากาศ 22-33 kV DISTRIBUTION POLE STRUCTURE 1-2 CIRCUIT FOR AERIAL CABLE STRINGING	IB2-015/40009	8253
3 การพ้อยนยานของลวดเหล็กตีเกลียว 50 ต.มม. แขนงสายเคเบิลอากาศ SAG-CURVES OF STEEL STRANDED WIRE 50 mm ² CARRYING AERIAL CABLE	S02-015/19171 S02-015/19172 SA1-015/34001 SA1-015/34002 SA1-015/34003 SA1-015/34004	9424 9425 9429 9430 9431 9432

การใช้งาน :

ใช้ในกรณีฉุกเฉินแกว่งสายไฟ : พอร์ชเลน ซาดแคลน

APPLICATION :

USE IN CASE POCELAINE CABLE SPACER ARE TEMPORARILY OUT OF STOCKS.

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	ใช้แทนแบบ ถูกแทนโดยแบบ
ผู้เขียน <i>Suphakul Boonrueng</i> ผู้สำรวจ วิศวกร หัวหน้าแผนก ผู้อำนวยการกอง ผู้อำนวยการฝ่าย	ผู้ว่าการ การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ชนิดโพลีเอทิลีน	เขียนเสร็จวันที่ 2 มี.ค. 2547 พิมพ์วันที่ มีติเป็น มาตรฐาน
รองผู้ว่าการวางแผน และพัฒนาระบบไฟฟ้า	POLYETHYLENE CABLE SPACER INSTALLATION	แบบเลขที่ SA2-015/40017 แผ่นที่ 3 ของจำนวน 3 แผ่น

17 มี.ค. 2547

① ลูกถ้วยแยกสายไฟฟ้า : พอร์ชเลน

② เคเบิลสเปซอร์ ชนิดไฟลิ่งที่สั้น

หมายเหตุ ใช้สำหรับระบบจำหน่ายที่พาดเคเบิลอากาศ บนเคเบิลสเปซอร์ อนุโลมให้นำสายเคเบิลอากาศ 185 มม. ที่เหลือเป็นเศษสายมาปอกด้วยเครื่องปอก (นวัตกรรม "ลิ้นขีวเกลียววัด") แล้วนำจำนวนสายเคเบิลอากาศที่ได้จากการปอก (ลิ้นขีวเกลียววัด รหัสเลขที่ 1020440118) มาผูกยึดแทนห่วงรัดสาย (SNAP TIE) ได้ โดยนำมาผูกติดกับเคเบิลอากาศ ขนาด 50 มม. ถึง 185 มม.

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า	ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
วินิจฉัย วันที่ 27 พ.ค. 2551 ภาพสเก็ตช์ การติดตั้งเคเบิลอากาศ กับเคเบิลสเปซอร์ด้วยลิ้นขีวเกลียววัด แบบเลขที่ SA2-015/51012 แผ่นที่ 1 ของจำนวน 1 แผ่น		

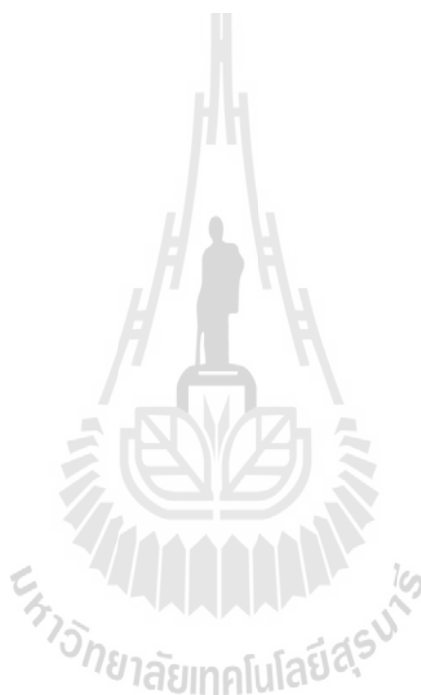
ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Kaewchanthuek, P., Rawonghad, R., Marungsri, B. (2014). **Ageing Deterioration of High-Density Polyethylene Cable Spacer under Salt Water Dip Wheel Test**, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. Vol. 8, pp. 731-734.



Ageing Deterioration of High-Density Polyethylene Cable Spacer under Salt Water Dip Wheel Test

P. Kaewchanthuek, R. Rawonghad, B. Marungsri

Abstract—This paper presents the experimental results of high-density polyethylene cable spacers for 22 kV distribution systems under salt water dip wheel test based on IEC 62217. The strength of anti-tracking and anti-erosion of cable spacer surface was studied in this study. During the test, dry band arc and corona discharge were observed on cable spacer surface. After 30,000 cycles of salt water dip wheel test, obviously surface erosion and tracking were observed especially on the ground end. Chemical analysis results by fourier transforms infrared spectroscopy showed chemical changed from oxidation and carbonization reaction on tested cable spacer. Increasing of C=O and C=C bonds confirmed occurrence of these reactions.

Keywords—Cable spacer, HDPE, ageing of cable spacer, salt water dip wheel test.

I. INTRODUCTION

RESENTLY, high-density polyethylene (HDPE) cable spacer has been widely used in power transmission and distribution system. HDPE cable spacers have advantages of low cost, light weight and low electric field stress when comparing with the ceramic type. After long time in service, surface of HDPE cable spacer became inferior and dust was accumulated. Cable spacer would be cleaned by rain difficultly. As a result, leakage current was undesirably increased and electrical insulation characteristics of cable spacer were decreased. There were several reasons for cable spacer deteriorations such as manufacturing processes, material selections, and product designs. Another important factor was the service environment such as tropical climate and high UV intensity [1]-[4].

Basically, the problem of high electric-field concentration on the contact points between the covered conductor and spacer or ties cannot be controlled. This problem has been studied by [5]-[7]. Performances of cable space have been evaluated by many researchers [4], [8]-[10].

Numbers of HDPE cable spacer were use in distribution system of Provincial Electricity Authority of Thailand (PEA) and Metropolitan Electricity Authority of Thailand (MEA). Damaged cable spacers during service were reported by these electric utilities [3]. However, no ageing characteristic of HDPE cable spacer were studied in Thailand. By this reason, this paper reports the experimental study on ageing deterioration of high-density polyethylene cable spacer for 22

kV PEA distribution system in Thailand under salt water dip wheel test.

II. TEST ARRANGEMENTS

A. Specimen

Polymer cable spacers made of high-density polyethylene by injection molding for 22 kV PEA distribution system were used in this study. Configuration and dimension of specimen are illustrated in Fig. 1. As illustrated in Fig. 1, leakage distance between phase A to ground and between phase B to ground is approximately 310mm.

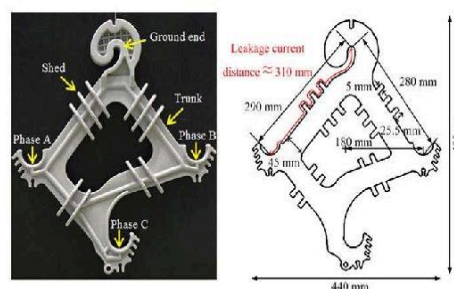


Fig. 1 Configuration and dimensions of specimen

B. Test Arrangement

Four items of cable spacers were installed on the wheel as shown in Fig. 2. Only two phases near ground end were energized. Voltage was energized via stainless rods and stainless sphere as shown in Fig. 3

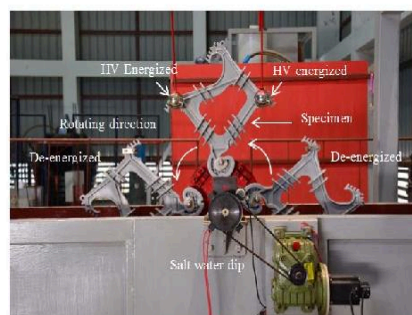


Fig. 2 Specimen installation

P. Kaewchanthuek and R. Rawonghad are graduate student in Suvarnaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

B. Marungsri is with Suvarnaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. (Corresponding author, phone: +66 4422 4366; fax: +66 4422 4601; email: bmshee@sut.ac.th).



Fig. 3 Voltage Energized via Stainless Rod and Stainless Sphere

C. Test Method

Test methods for salt water dip wheel test were based on IEC 62217 [11]. Test was conducted continuously for 30,000 cycles. As illustrated in Fig. 2, one test cycle takes time 192 second and includes 4 test positions, energized, de-energized, salt water dip and de-energized, respectively. For each position, test specimen remains stationary for about 40 second and takes 8 second for rotate to the next position. Salt water was re-newed every week and re-newing time must less than 1 hour.

D. Test Conditions

Test was conducted based on test conditions in IEC 62217, as illustrated in Table I. Test voltage was generated from 22 kV, 30 kVA single phase transformer.

TABLE I
TEST CONDITIONS

Test Voltage	AC 15 kV continuously applied
Voltage stress	48.4 V/mm
NaCl content of de-ionized water	1.4 kg/m ³ ± 0.06 kg/m ³
Test duration (1 cycle = 192 second)	30,000 cycles

III. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

A. Visual Observation

During test, many discharge activities were observed. Dry band arc and corona discharge were often observed on the ground end, trunk and energized end. Especially on the ground end was observed severe arcing. Yellow light paths indicate dry band arcing and purple light indicate corona discharges [12] as show in Fig. 4. This phenomenon caused ageing deterioration on surface of HDPE cable spacer.

After 30,000 tests cycles, damaged surface of tested cable spacers was observed. Tracking and erosion occurred on tested specimen surface. Severe surface erosion was observed on the ground end portion, near ground end and trunk between sheds near ground end, as illustrated in Fig. 5.

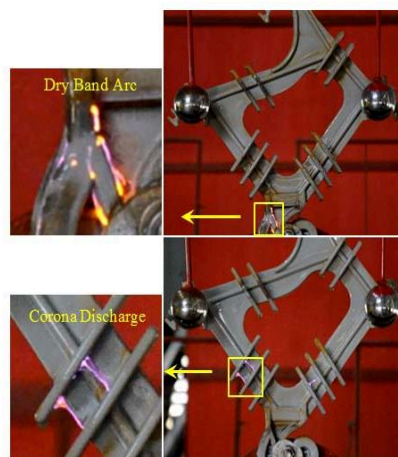


Fig. 4 Discharge Activities

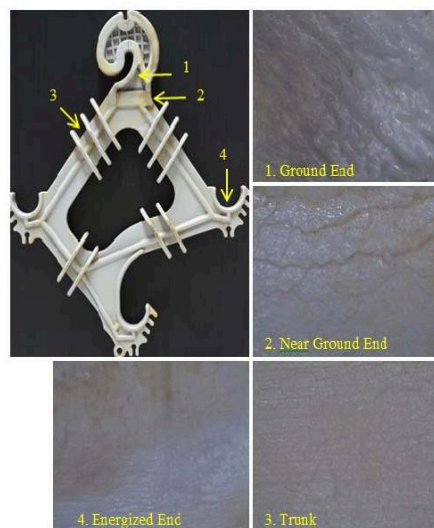


Fig. 5 Tracking and Erosion After Tested [Specimen 4]

B. Contamination Degree

Contamination degree was determined by measuring salt deposit density (SDD). The measurement procedures were based on IEC 60507 [13]. After 30,000 tests cycles, SDD measurement results on the whole surface of each specimen as shown in Table II. No difference contamination degree was measured.

TABLE II
SDD AFTER 30,000 TEST CYCLES

SDD, mg/cm ²			
Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
0.0130	0.0139	0.0143	0.0130

C.ATR-FTIR Analysis Result

In order to confirmed surface ageing, chemical analysis by ATR-FTIR (attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy) was conducted to evaluate any chemical change on tested specimen. For HDPE, C-H bonds at wave number 2916, 2847 and 1462 cm^{-1} indicate side chain and C-C bonds at wave number 720 cm^{-1} indicates back bone of polyethylene molecule [14]-[15]. Position on tested specimen surface for chemical analysis is shown in Fig. 6.

Appearance of C=O bond at wave number 1,745 cm^{-1} and C=C bond at wave number 1,630 cm^{-1} indicates the occurrence of Oxidation and Carbonization, respectively. As illustrated in Fig. 7, reduction in C-H bond and C-C bond were observed on all tested specimens when comparing with new specimen. In contrast, increasing in C=O bond and C=C bond were observed on all tested specimens. Ratio of C=O bond and C-C bond is illustrated in Fig. 8. And ratio of C=C bond and C-C bond is illustrated in Fig. 9

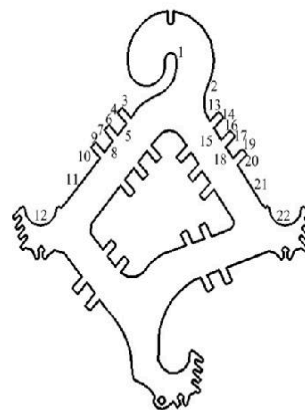


Fig. 6 Position for ATR-FTIR analysis

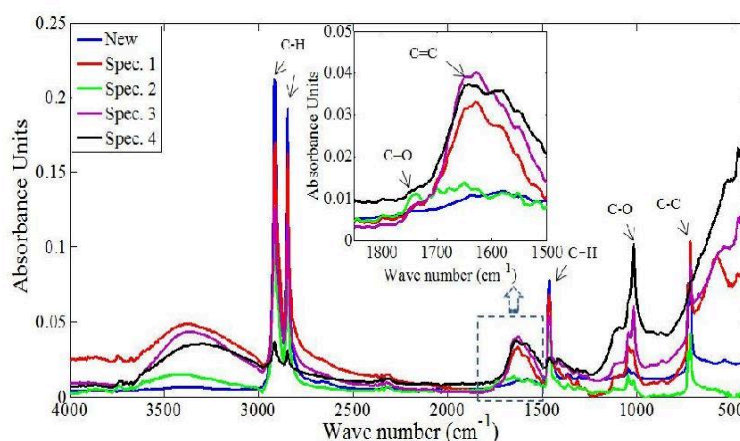


Fig. 7 ATR-FTIR analysis result [Position 1]

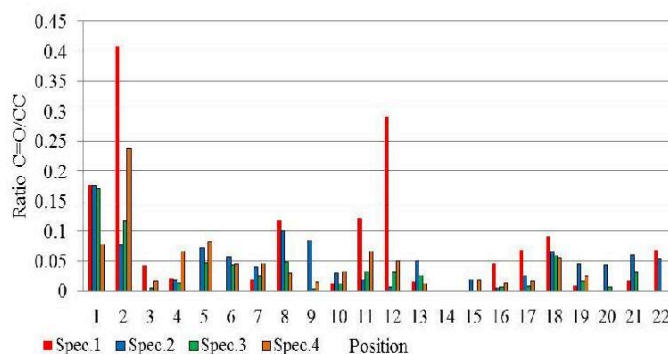


Fig. 8 Ratio of C=O/C-C

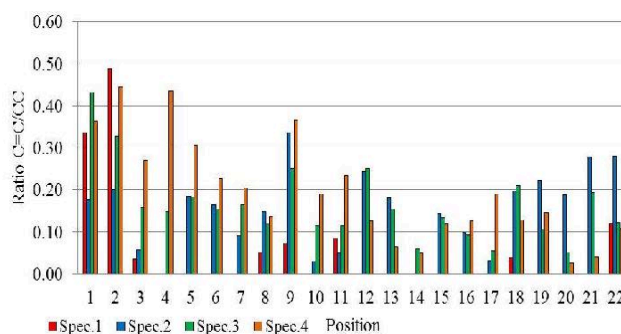


Fig. 9 Ratio of C=C/C-C

IV. CONCLUSION

Ageing deterioration of high-density polyethylene cable spacer under salt water dip wheel test based on IEC 62217 have been studied. After 30,000 test cycles, surface tracking and ground end erosion were observed on the specimen surface. Dry band arc discharge and corona discharge caused surface damaging of the tested specimen surface. Salt deposit density of tested specimen surface less than 0.02 mg/cm^2 was measured. ATR-FTIR analysis results confirm the difference in degree of surface deterioration of HDPE cable spacer under the salt water dip wheel test.

ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like to thank you Suranaree University of Technology for kind financial support.

REFERENCES

- [1] R. C. C. Rocha, R.C. Berrêdo, R. A. O. Bernis, E. M. Gomes and F. Nishimura, "New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, pp. 562-568, April 2002.
- [2] J. D. Bouford, "Spacer cable reduces tree caused customer interruptions," *IEEE*, 2008.
- [3] Metropolitan Electricity Authority, "Ceramic cable spacer improvement for power quality problem mitigation," *Power Quality Case Study*, Thailand, 2008.
- [4] W. Pinheiro, A. G. Kanashiro and G. F. Burani, "Evaluation of distribution line spacers located near the coast," *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 7, pp. 1371-1380, December 2008.
- [5] I. Ramirez-Vazquez, and F.P. Espino-Cortes, "Electric-Field Analysis of Spacer Cable Systems for Compact Overhead Distribution Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 4, pp. 2312 – 2317, October 2012.
- [6] F.P. Espino-Cortes, and I.R. Vazquez, "Three dimensional electric field analysis in spacer cable systems", *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 174 – 177, October 2012.
- [7] V. Saithongin, and B. Techaumnat, "Numerical analysis of electric field at the contact point between a spacer aerial cable and a spacer", *International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, pp. 1-5, July 2011.
- [8] M.R. Soares, F.R. Brito, F. Nishimura, and L.D. Cicarelli, "Spacer cable and ABC distribution lines. Long-term analysis", *Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference*, pp. 219-224, September 1996.
- [9] R.T. Harrold, and T.W. Dakin, "On predicting the life of polyethylene spacer-cable eroded by surface discharges in wet weather",

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 95, No. 3 Part 1, pp. 821-828, May 1976.

- [10] J.D. Bouford, "Spacer cable reduces tree caused customer interruptions", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-3, April 2008.
- [11] IEC 62217, Committed Draft, September, Ed. 1.0, 2002.
- [12] J. Grasesom, S.Thong-Om, W. Payakcho and B. Marungsri, "Ageing deterioration of silicone rubber polymer insulator under salt water dip wheel test," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 211-217, 2011.
- [13] IEC 60507, Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems, Ed. 2 b, 1991.
- [14] A.E. Davies and D.A. Hodgson, "Electrical ageing effects in polyethylene," University of Southampton, U.K., pp. 254-257.
- [15] J. A. Mergos, M. D.Athanassopoulou, T. G. Argyropoulos and C. T. Dervos, "The effect of accelerated UV-Ageing on the dielectric properties of PVC, PTFE and HDPE," *International Conference on Solid Dielectrics*, Germany, 2010.



Pratya Kaewchanthuek was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1988. He received B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2010. He is currently a master degree student in School of Electrical Engineering, Institute of Engineering at same the University. His research topics interesting are high voltage technology application, high voltage insulation technology and power system technology.



Ratchaphon Rawonghad was born in Chachoengsao province, eastern of Thailand, in 1989. She received B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2010. Currently, she is a master degree student in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology. Her research topic interesting is High voltage insulation technology.



Boonruang Marungsri was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are high voltage insulation technologies and electrical power system.

ประวัติผู้เขียน

นายปรัชญา แก้วจันทิก เกิดเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา เริ่มศึกษาระดับอนุบาลและระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนเซนต์โยเซฟศึกษา อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนห้วยลึกผดุงวิทยา อำเภอสีคิ้ว จังหวัด นครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสีคิ้วสวัสดิ์ผดุงวิทยา อำเภอสีคิ้ว จังหวัด นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาในปี 2554 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงานสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสภาวะจ่ายโหลด การหาโวลเตจเรกูเลชัน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยวิธีซิงโครไนส์อิมพีแดนซ์ ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสและ การสร้างและวัดแรงดันสูง กระแสตรง เป็นต้น ในปี 2557 ได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จัดขึ้นโดย World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) ณ กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และยัง ได้รับการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในหัวข้อ “Ageing Deterioration of High-Density Polyethylene Cable Spacer under Salt Water Dip Wheel Test” จำนวน 4 หน้า