

การเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักสัตว์ไฟฟ้า
ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

นายวรวิทย์ พันธ์โ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**AGEING DETERIORATION OF SILICONE RUBBER
HOUSING MATERIAL FOR LIGHTNING SURGE
ARRESTER UNDER ARTIFICIAL
ACCELERATED AGEING TEST**

Worawit Payakcho

**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 2012**

การเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า
ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรวิทย์ พยัณโช : การเสื่อมอายุของฉนวน โครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ (AGEING DETERIORATION OF SILICONE RUBBER HOUSING MATERIAL FOR LIGHTNING SURGE ARRESTER UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED AGEING TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 137 หน้า.

ปัจจุบันกับดักเสิร์จฟ้าผ่าแบบใช้ยางซิลิโคนเป็นฉนวน โครงหุ้มภายนอกถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบจำหน่าย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นกว่าฉนวน โครงหุ้มเซรามิก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางซิลิโคนเป็นวัสดุพอลิเมอร์จึงมีการเสื่อมอายุเกิดขึ้นแบบหลีกเลี่ยงไม่ได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวน โครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ด้วยการทดสอบภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 โดยเริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ จากนั้นทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุภายใต้หมอกไอเกลือประจุ 1,000 ชั่วโมง และภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย 1,000 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่าฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถเห็นร่องรอยของการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวไฟตามผิวได้อย่างชัดเจน พบมากบริเวณลำตัวฉนวนมากกว่าปีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณลำตัวฉนวนใกล้โคนปีก รวมทั้งยังพบอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า ฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จึงทำให้ปริมาณพันธะ Si – CH₃ และ Si – O ลดลงซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการสูญเสียคุณสมบัติผิวหาค้น้ำลื่นและนำไปสู่การเสื่อมอายุในที่สุด

WORAWIT PAYAKCHO : AGEING DETERIORATION OF SILICONE
RUBBER HOUSING MATERIAL FOR LIGHTNING SURGE ARRESTER
UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED AGEING TEST. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 137 PP.

AGEING OF SILICONE RUBBER/SALT FOG AGEING TEST/MULTI-STRESS
TEST/LIGHTNING SURGE ARRESTER

Presently, lightning surge arresters with silicone rubber housing are widely used in distribution system. Because, it shows better performance than the ordinary type, ceramic housing. However, ageing deterioration can't avoidable due to made of polymeric material. This thesis presents the experimental study of silicone rubber housing material for 24 kV lightning surge arrester under artificial accelerated ageing test based on IEC Publ. 61109 specifications. Firstly, salt fog ageing test chamber was designed and was constructed. Then, 1000 hrs of salt fog ageing test and 1000 hrs of multi-stress test were conducted. During artificial ageing test, dry band arc and corona discharge were observed on silicone rubber surface. After ageing test, obviously surface erosion and tracking were observed. Severely surface ageing was observed on trunk surface then on shed surface especially on the trunk surface closed the shed surface. In addition, chemical analysis results confirmed the chemical changed, oxidation and hydrolysis reaction on tested silicone rubber. The reduction of Si – CH₃ and Si – O bonds caused reduce hydrophobic properties and ageing deterioration of silicone rubber.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีต่อการดำเนินชีวิตในหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ บริษัทพีไอซ อีเลคตริก แมนูแฟกเจอร์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ เคนพะนาน ที่ได้ช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณประวิติ บุญดี และบุคลากรฝ่ายอาคารและสถานที่ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และบุคลากรฝ่ายงานพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ คุณสหัสชัย ทิพยเนตร์ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ คงมันกลาง คุณประวิตรา หมายสุข และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของผู้วิจัย

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ทำนั้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายสุรินทร์ พยัฒโซ ผู้เป็นบิดา และนางสำเนียง พยัฒโซ ผู้เป็นมารดา ที่คอยส่งเสริมทางด้านการศึษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งยังให้ความรักความห่วงใย รวมทั้งเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ จนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

วรวิทย์ พยัฒโซ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 สรุป	11
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 บทนำ	12
3.2 กัปดักเสิร์จไฟฟ้า.....	12
3.2.1 กัปดักเสิร์จไฟฟ้าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์.....	13
3.2.2 กัปดักเสิร์จไฟฟ้าชนิดออกไซด์โลหะ	13
3.3 แรงดันเกินในระบบสายส่ง	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1	แรงดันเกินฟ้าผ่า.....	17
3.3.2	แรงดันเกินสวิตชิง.....	17
3.3.3	แรงดันเกินชั่วคราว	17
3.4	หลักการทำงานของกักเก็บแรงดันฟ้าผ่า.....	17
3.5	การเลือกกับดักแรงดันฟ้าผ่าเพื่อใช้งาน.....	19
3.5.1	การแบ่งประเภทของกักเก็บแรงดันฟ้าผ่า	19
3.5.2	พิกัดแรงดันของกักเก็บแรงดันฟ้าผ่า.....	20
3.5.3	ระดับการป้องกัน	22
3.5.4	การทำงานของกักเก็บแรงดันฟ้าผ่า.....	23
3.6	ยางซิลิโคน	24
3.6.1	ยางซิลิโคนที่เกิดจากโครงสร้างการเชื่อมขวาง	26
3.7	กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำกับดักแรงดันฟ้าผ่า	
	ฉนวนพอลิเมอร์.....	27
3.7.1	การเกิดดีสชาร์จบางส่วน	28
3.7.2	ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลต.....	29
3.7.3	ปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวฉนวนยางซิลิโคน	29
3.7.4	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบนผิวฉนวนยางซิลิโคน	31
3.8	คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นจากผลของการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้า.....	32
3.9	สรุป	33
4	การออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน	
	ที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า	34
4.1	บทนำ	34
4.2	การออกแบบห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน	
	ที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า	34
4.2.1	โครงสร้างและรายละเอียดห้องทดสอบ.....	35

สารบัญ (ต่อ)

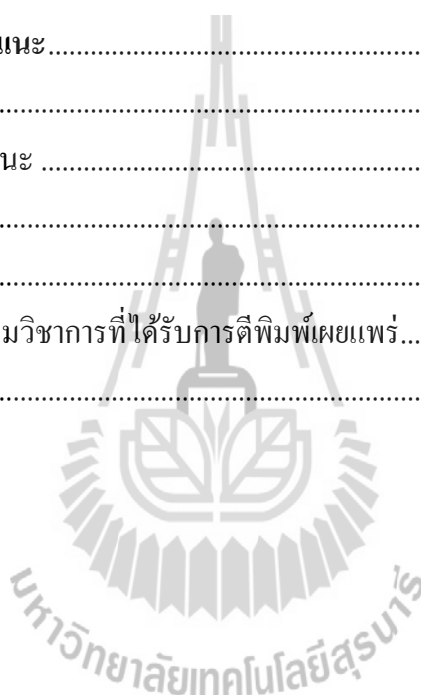
หน้า

4.2.2	โครงสร้างและรายละเอียดของชุดขาตั้งวางถังน้ำ	39
4.3	การสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักสัตว์ไฟฟ้า	40
4.3.1	ห้องทดสอบพร้อมฐานติดตั้งกับดักสัตว์ไฟฟ้า.....	41
4.3.2	เครื่องสร้างหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด พร้อมชุดขาตั้ง วางถังน้ำ	42
4.3.3	ชุดควบคุมหลอดอัลตราไวโอเลต	44
4.3.4	ฮีตเตอร์และวงจรควบคุมอุณหภูมิ	46
4.4	สรุป	50
5	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	52
5.1	บทนำ	52
5.2	มาตรฐาน IEC Publ. 61109	52
5.2.1	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	53
5.2.2	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่ หลากหลาย.....	53
5.3	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ	54
5.4	วิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ.....	55
5.5	สรุป	59
6	ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน.....	61
6.1	บทนำ	61
6.2	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ	61
6.2.1	การสังเกต	61
6.2.2	ระดับความเปราะ	66
6.2.3	คุณสมบัติผิวหยดน้ำ	69
6.2.4	การวัดความแข็ง.....	79
6.2.5	ความขรุขระของพื้นผิว	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3	การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของฉนวนยางซิลิโคน ที่ผ่านการทดสอบ.....	93
6.4	การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ.....	101
6.5	สรุป.....	120
7	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	121
7.1	สรุป.....	121
7.2	ข้อเสนอแนะ	124
	รายการอ้างอิง	125
	ภาคผนวก	129
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	129
	ประวัติผู้เขียน	137



สารบัญตาราง

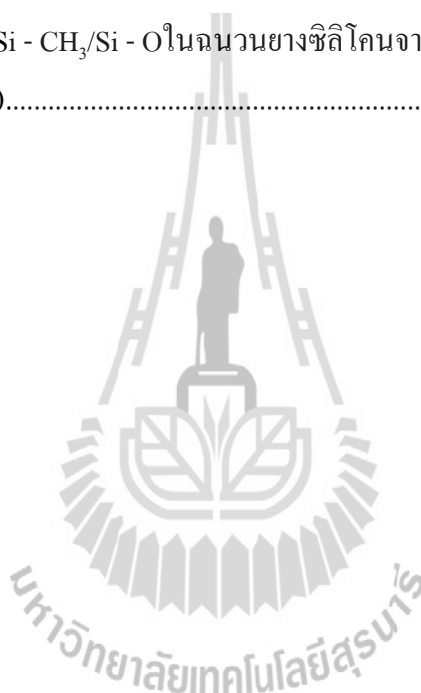
ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
3.1 พิกัด MCOV และแรงดันทำงานของกับดักเสริมฟ้าผ่า.....	20
3.2 พิกัด MCOV สำหรับระบบจำหน่าย	21
3.3 คุณสมบัติการป้องกันของกับดักเสริมฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย.....	23
4.1 รายละเอียดชุดห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ได้ออกแบบไว้	34
4.2 รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักเสริมฟ้าผ่า ฉนวนยางซิลิโคนที่ติดตั้งจริง	50
5.1 ข้อกำหนดในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยหมอกไอเกลือ	53
5.2 ข้อกำหนดในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วย การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย.....	53
5.3 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบกับดักเสริมฟ้าผ่า	56
5.4 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ	56
5.5 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลอง สภาวะความเครียดที่หลากหลาย.....	58
5.6 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน	59
6.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนฉนวนยางซิลิโคน สำหรับกับดักเสริมฟ้าผ่า	62
6.2 การแบ่งแยกระดับความเปรอะเปื้อนตามลักษณะพื้นที่.....	66
6.3 ผลการคำนวณ SDD ที่ได้จากการทดสอบ	68
6.4 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน	69
6.5 การทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝนตามมาตรฐาน STRI Guide 92/1	71
6.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝน หลังการทดสอบรอบที่ 1	73
6.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝน หลังการทดสอบรอบที่ 2.....	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น หลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)	77
6.9 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น หลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	78
6.10 ค่าเฉลี่ยความแข็งหลังการทดสอบรอบที่ 1	81
6.11 ค่าเฉลี่ยความแข็งหลังการทดสอบรอบที่ 2	82
6.12 ค่าเฉลี่ยความแข็งหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)	83
6.13 ค่าเฉลี่ยความแข็งหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	84
6.14 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 1	88
6.15 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 2	89
6.16 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)	90
6.17 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	91
6.18 ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวนยางซิลิโคน	103
6.19 ปริมาณ Si - CH ₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1	107
6.20 ปริมาณ Si - CH ₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2	108
6.21 ปริมาณ Si - CH ₃ ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)	109
6.22 ปริมาณ Si - CH ₃ ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	110
6.23 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1	111
6.24 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2	112
6.25 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)	113
6.26 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	114
6.27 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH ₃ /Si - O ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 1	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.28 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH ₃ /Si - O ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 2.....	117
6.29 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH ₃ /Si - O ในฉนวนยางซิลิโคน จากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV).....	118
6.30 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH ₃ /Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV).....	119



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

3.1	โครงสร้างและส่วนประกอบของกับดักเล็ร้งฟ้าผ่าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์	13
3.2	โครงสร้างของกับดักเล็ร้งฟ้าผ่าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์และออกไซด์โลหะ	14
3.3	โครงสร้างของกับดักเล็ร้งฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคน	14
3.4	การแบ่งระดับของแรงดันเกินในระบบจำหน่ายแบบต่าง ๆ	15
3.5	การเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวาล์วอีลีเมนต์ที่ทำจาก ซิลิคอนคาร์ไบด์และออกไซด์โลหะ	19
3.6	สายเชื่อมต่อสายไฟฟ้าและสายเชื่อมต่อสายดิน	24
3.7	โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS.....	25
3.8	กระบวนการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	27
4.1	แบบจำลองห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ที่ใช้เป็นฉนวนของกับดักเล็ร้งฟ้าผ่า.....	35
4.2	ขนาดของทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ได้ออกแบบไว้.....	36
4.3	การวางตำแหน่งของฐานสำหรับติดตั้งกับดักเล็ร้งฟ้าผ่า ตามที่ได้ออกแบบไว้ (Top View).....	37
4.4	ลักษณะการติดตั้งกับดักเล็ร้งฟ้าผ่าตามที่ได้ออกแบบไว้.....	38
4.5	ฐานสำหรับวางหม้อแปลงตามที่ได้ออกแบบไว้.....	38
4.6	โครงสร้างชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำตามที่ได้ออกแบบไว้.....	39
4.7	ถังสแตนเลสสามช่องสำหรับใส่น้ำ.....	40
4.8	ลักษณะภายนอกของห้องทดสอบ	41
4.9	ลักษณะการติดตั้งกับดักเล็ร้งฟ้าผ่าภายในของห้องทดสอบ	42
4.10	การติดตั้งท่อและเครื่องทำหมอกด้านบนของห้องทดสอบ	43
4.11	ชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำ.....	44
4.12	หลอด Xenon Arc Lamp.....	45
4.13	วงจรควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต.....	45
4.14	ชุดควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	ฮีทเตอร์อินฟราเรดพร้อมชุด โคมและเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้ง 47
4.16	อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับฮีทเตอร์ 48
4.17	ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวน ในกับดักเล็กรังสีไฟฟ้า..... 48
4.18	อุปกรณ์ด้านแรงสูงสำหรับการทดสอบ 49
5.1	กับดักเล็กรังสีไฟฟ้าสำหรับระบบ 24 kV..... 54
5.2	การติดตั้งกับดักเล็กรังสีไฟฟ้าสำหรับทดสอบ 55
5.3	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วย การจำลองสภาวะความเครียด..... 57
5.4	วงจรทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน 58
6.1	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฉนวนยางซิลิโคนหลังจากการทดสอบ..... 63
6.2	ลักษณะของผิวฉนวนยางซิลิโคนหลังจากการทดสอบ..... 64
6.3	ร่องผิวเสื่อมสภาพจากوابไฟตามผิว..... 65
6.4	ลักษณะตัวอย่างของคุณสมบัติผิวหยดน้ำ HC1 - HC6..... 70
6.5	ลักษณะของคุณสมบัติผิวหยดน้ำของฉนวนยางซิลิโคน ก่อนทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ..... 71
6.6	ลักษณะผิวหยดน้ำบนผิวฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1..... 72
6.7	ลักษณะผิวหยดน้ำบนผิวฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2..... 74
6.8	ลักษณะผิวหยดน้ำบนผิวฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3..... 76
6.9	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore A..... 80
6.10	เครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระผิว 86
6.11	ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 93
6.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM – 6400 94
6.13	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น Neosope: JCM – 5000 Benchtop..... 95
6.14	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 1 95
6.15	ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 2 97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV).....	98
6.17 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV).....	99
6.18 เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR.....	102
6.19 วิธีวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีจาก %Transmittance	103
6.20 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบรอบที่ 1.....	104
6.21 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบรอบที่ 2.....	105
6.22 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV).....	105
6.23 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา ด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ ระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่าย ไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการออกแบบอย่าง ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม ปัจจุบันระบบไฟฟ้าแรงสูงของประเทศไทยเกือบ ทั้งหมดเป็นแบบสายจึงในอากาศและใช้ฉนวนแบบท่อนแบบท่อน ซึ่งได้แก่ฉนวนท่อนพอร์ซเลน และฉนวนแบบแขวนแบบแขวนเหนียว จากข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่า เกิดการขัดข้องของสายส่งจ่าย พลังงานไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล หรือใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม เช่นการเกิด วาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะบางของฉนวนท่อนเป็นประจําหรือที่ร้ายแรงบางครั้ง ฝนอาจจะทำให้แกนของฉนวนท่อนเป็นสนิมและผุกร่อน ซึ่งอาจทำให้เกิดสายส่งหลุดร่วงจากท่อน ฉนวน ท่อนขึ้น ในบางครั้งต้องใช้เวลามากกว่าที่จะกู้ระบบนำมาสู่ที่สภาวะปกติอีกครั้ง แต่เดิมการ แก้ปัญหาก็คือการเปลี่ยนฉนวนท่อนชุดใหม่ แต่ปัญหายังเกิดเหมือนเดิม วิธีแก้ปัญหาก็ที่เหมาะสม สำหรับที่ที่มีผลก็คือ การนำฉนวนท่อนพอลิเมอร์มาใช้แทน

ข้อดีของฉนวนท่อนพอลิเมอร์หรือฉนวนท่อนพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวน ท่อนพอร์ซเลนหรือฉนวนแบบแขวนเหนียวคือ

1. ฉนวนท่อนพอลิเมอร์มีแรงตึงผิวต่ำ (Low Surface Tension Energy) จึงทำให้ผิวของ ฉนวนท่อนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติผิวหยาบคาย (Hydrophobic Surface Property) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำ ให้ฉนวนท่อนพอลิเมอร์มีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปียกชื้นและสภาวะแห้งชื้น ดีกว่าฉนวนแบบธรรมดา

2. ฉนวนท่อนพอลิเมอร์มีอัตราส่วนความทนทานแรงกดต่อน้ำหนัก (Mechanical Strength to Weight Ratios) สูงกว่าฉนวนแบบธรรมดา ซึ่งจะช่วยให้ลดราคาในการก่อสร้าง และการบำรุงรักษาสายส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบก่อสร้าง สายส่งแบบกะทัดรัดได้อีกด้วย

3. ลูกถ้วยยางซิลิโคนไม่มีปัญหาที่ปลุกถ้วยฉนวนแตกหักหรือชำรุดเสียหายที่เกิดจากกลุ่มคนที่ชอบทำลายสมบัติสาธารณะด้วยการใช้เป็นที่ลองแม่นยำ

ข้อเสียของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้วเหนียวคือ

1. เนื่องจากยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานานและมีอาร์กจากแถบแห้ง (Dry Band Arcing) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผิวฉนวน

2. พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะสกปรกเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งสามารถก่อความเสียหายแก่ลูกถ้วยฉนวนได้

3. ความเชื่อมั่นในระยะยาว (Long Term Reliability) และอายุการใช้งาน (Life Expectancy) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ยังยากที่จะประมาณค่าได้

4. ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตพร้อม ยากในการตรวจสอบ

ในปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน และสมรรถนะความทนทานของยางซิลิโคนต่อการสกปรกของพื้นผิวฉนวน และการเสียดสีจากคุณสมบัติพื้นผิวของยางซิลิโคน เป็นต้น ทั้งในสภาวะแวดล้อมจริงและสภาวะจำลองในห้องปฏิบัติการกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินค่าความเชื่อมั่นระยะยาวในการนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากยางซิลิโคนมาใช้แทนลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดาและเพื่อออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลการวิจัยดังกล่าว การที่จะออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยจึงทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้การไฟฟ้าต่าง ๆ จึงยังคงลังเลที่จะนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาด้านมลภาวะซึ่งเป็นมูลเหตุที่มาของโครงการวิจัยนี้

โครงการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนโครงหุ้มในกับดักเสิร์จไฟฟ้าของระบบจำหน่าย 24 kV ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ และการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดต่าง ๆ ในการใช้งาน ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

2. เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง

3. เพื่อทดสอบและศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเล็กรังฟ้าผ่าตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. กำหนดให้ห้องทดสอบมีขนาด 9.6 m^3
2. ใช้ อัลตราโซนิก ฮิวมิดิฟายเออร์ (Ultrasonic Humidifier) ในการสร้างหมอกไอเกลือ (Salt Fog) และหมอกไอสะอาด (Clean Fog)
3. การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาปฏิกิริยารวดเร็วและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
2. ทำการศึกษาข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็กรังฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992
3. ออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็กรังฟ้าผ่า ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992
4. ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็กรังฟ้าผ่า ประกอบด้วย
 - 4.1 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 1,000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992
 - 4.2 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 5,000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 Annex C แต่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเพียง 1,000 ชั่วโมงเท่านั้น
5. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผิวฉนวนซิลิโคนทั้งทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย
 - 5.1 การสังเกต (Visual Observation)
 - 5.2 ระดับความเปรอะเปื้อน (Salt Deposit Density: SDD)
 - 5.3 คุณสมบัติผิวหยาบคายน้ำ (Hydrophobicity)
 - 5.4 การวัดความแข็ง (Hardness Measurement)
 - 5.5 การวัดความขรุขระของผิว (Roughness Measurement)

5.6 Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy

(ATR-FTIR)

5.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับใช้เป็นฉนวนโครงหุ้มของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า
2. สามารถสร้างห้องทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนได้
3. สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนได้
4. ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในที่ประชุมวิชาการ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับโครงหุ้มของฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเส้นรีไฟฟ้ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบจาก IEC Publ. 61109-1992 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประกอบด้วฐานข้อมูลจาก IEEE IEE Scopus และ Science Direct ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่นักวิจัยหลาย ๆ ท่านทำการค้นคว้าและวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณณผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1990	S. M. de Oliveira and C. H. de Turreil	ศึกษาการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนต่างชนิดกัน โดยการจำลองสภาพแวดล้อมให้ฉนวนยางซิลิโคนสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลต พบว่ารังสีอัลตราไวโอเลตเป็นสาเหตุต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1994	Seog - Hyeon Kim, Edward Cherney, Hackam and Kenneth Rutherford	ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีบนผิวฉนวนยางซิลิโคนในบริเวณที่เกิดอาร์กแฉกแห่งพบว่าเกิดการแลกเปลี่ยนของ Si - O และเกิดออกซิเดชันของสายโซ่ข้างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS)
1998	Kohli, Zhu, Akbar, Sebo, Sakich and Zhao	ศึกษาลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเป็นฉนวนโครงหุ้มหลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุคือยางซิลิโคนและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ทำให้ทราบว่าปริมาณของ ซิลิคอน ออกซิเจน คาร์บอนและออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลต
1998	Koshino, Nakajima and Umeda	ศึกษาผลกระทบจากการเติมสารแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในฉนวนยางซิลิโคนพบว่าฉนวนยางซิลิโคนเมื่อผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีการทนต่อแรงดึงได้ดี
1998	Jeffrey Kester, David Miller, Steven Benna and Brian Steinbrecher	ทดสอบการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จไฟฟ้าผ่านฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายพบว่ากระแสรั่วไหลที่วัดได้จากกับดักเสิร์จฉนวนยางซิลิโคนมีค่าน้อยกว่าฉนวนยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและยางเอทิลีนไวไนลอะซีเตด
1999	Gutman and Harting	ศึกษาการเกิดการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย โดยใช้แรงดันกระแสตรงและกระแสสลับทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ ผลจากการทดสอบทำให้ทราบว่า การกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟเกิดขึ้นในระบบแรงดันกระแสตรงมากกว่ากระแสสลับ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	Edward A. Cherney and Shesha Jayaram	ทดสอบการเสื่อมอายุของกับดักเสริมไฟฟ้าฉนวนพอลิเมอร์ด้วยหมอกไอเกลือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนโครงหุ้มระหว่างขางซิลิโคนและขางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินพบว่าบริเวณตะเข็บของฉนวนขางซิลิโคนเกิดการกัดกร่อนมาก
2002	Rattanakhogviput, Mohammed, Ayerh, Soundarajan and Sundararajan	ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฉนวนโครงหุ้มของกับดักเสริมไฟฟ้าพบว่าฉนวนที่ทำจากขางซิลิโคน มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นดีกว่าฉนวนที่ทำจากเอทิลีนผสมซิลิโคน (EPSB)
2002	Kumagai and Yoshimura	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวนขางซิลิโคนที่มีสารเติมแต่งอลูมินาไตรไฮเดรต (ATH) ที่แตกต่างกันจากการจำลองสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริง พบว่าฝนกรด รังสีอัลตราไวโอเลต การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ และน้ำ เป็นสาเหตุต่อการเกิดการเสื่อมสภาพและการหลุดร่อนของฉนวนขางซิลิโคน
2003	Marungsri, Komiya, Aoyama, Ishikawa and Matsuoka	ได้ทำการทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานภายนอกแบ่งออกเป็นฉนวนขางซิลิโคนแท่งทรงกระบอก ลูกถ้วยฉนวนแบบปีกตรงและลูกถ้วยฉนวนแบบปีกสลับด้วยหมอกไอเกลือ ผลจากการทดสอบเกิดการกัดกร่อนบริเวณลำตัวได้ปีกฉนวนของลูกถ้วยแบบปีกตรงมากที่สุด
2004	B. Lee, Song, Kim, Lee and Kwon	ได้พัฒนาการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์สำหรับกับดักเสริมไฟฟ้า ด้วยระบบแรงดัน 22.9 kV (Y-Y) ภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายเป็นระยะเวลา 3,000 ชั่วโมง โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระแสรั่วไหล ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟตามผิวคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR และ SEM

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Kumagai and Yoshimura	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิไคเมทิลไซลอคเซนและสารเติมแต่งอลูมินาไตรไฮเดรต ของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนจากการเกิดอาร์กแฉกแห้ง พบว่าสารเติมแต่งอลูมินาไตรไฮเดรตมีผลต่อความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ การเกิดดิสชาร์จและอาร์กแฉกแห้งบนพื้นผิวของยางซิลิโคน
2006	Amin, Akbra and Matsuoka	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของลูกถ้วยพอลิเมอร์ จากการเร่งการเสื่อมอายุภายใต้การจำลองสภาพแวดล้อมต่าง ๆ พบว่าผลกระทบของแสงอัลตราไวโอเลต ความชื้น ความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และหมอกไอเกลือเป็นสาเหตุทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เสื่อมสภาพการใช้งานไวขึ้น
2006	Sundararajan, Soundarajan, Mohammed and Graces	ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักเล็จไฟฟ้าที่มีฉนวนโครงหุ้มพอลิเมอร์ภายใต้การจำลองสภาวะของชายฝั่งรัฐฟลอริดา ผลจากการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นพบว่าฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากเอทิลีนผสมซิลิโคนอยู่ในช่วง HC5 – HC6 ส่วนฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากซิลิโคนอยู่ในช่วง HC1 – HC2 แต่ฉนวนซิลิโคนมีค่าความเปราะเปื้อนและค่ากระแสรั่วไหลมากกว่า
2006	Marungsri, Shinokubo, Matsuoka and Kumagai	ศึกษาผลกระทบการเสื่อมอายุที่มีต่อยางซิลิโคนสำหรับใช้ทำลูกถ้วยพอลิเมอร์ด้วยวิธีหมอกเกลือของลูกถ้วย 3 ชนิด คือ ลูกถ้วยปีกตรง ลูกถ้วยปีกสลับ และฉนวนยางซิลิโคนแท่งทรงกระบอก พบว่ากระแสรั่วไหลที่เกิดจากการดิสชาร์จของลูกถ้วยฉนวนแบบปีกตรงมีค่าสูงสุดและยังมีการกัดกร่อนบริเวณลำตัวได้ลึกมากที่สุด สังเกตได้จากการประเมินการเสื่อมอายุด้วยคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นตามมาตรฐานของ STRI

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2007	Sundararajan, Olave, Romero and Trepanier	ปรับปรุงการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายเพื่อทดสอบลูกถ้วยฉนวนที่ผลิตจาก ยางเทอร์โมพลาสติก (TPE) ระบบ 28 kV เป็นระยะเวลา 5,000 ชั่วโมงตามมาตรฐาน IEC
2008	Salman Amin, Muhammad Amin and Raji Sundararajan	ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากยางซิลิโคนและยางเทอร์โมพลาสติก ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองด้วยสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ผลจากการศึกษาทำให้ทราบว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากยางเทอร์โมพลาสติก มีความเสียหายทางกายภาพมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากซิลิโคน
2009	Amin and Amin	ทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ภายนอกด้วยวิธีวงล้อจุ่มน้ำเกลือ และหมอกไอเกลือ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟตามผิว
2011	Venkatesulu and Thomas	ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเป็นระยะเวลา 30,000 ชั่วโมง (3.4 ปี) ใช้แรงดันทดสอบ 11 kV โดยจำลองสภาวะด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ชนิด A

จากวรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา ทำให้ทราบว่าผู้วิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิดวิเคราะห์การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถทำให้ผู้ศึกษาวิจัยทางด้านนี้มองเห็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับเสิร์จฟ้าผ่า รวมถึงแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในส่วนถัดไปจากนี้เป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ เพื่อศึกษาการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนโดยย่อ

โดยเริ่มต้นจาก Edward A. Cherney et al. (2001) ได้ทดสอบการเสื่อมอายุของกับดักเล็รจไฟฟ้าฉนวนพอลิเมอร์ด้วยหมอกไอเกลือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติฉนวน โครงหุ้มระหว่าง ยางซิลิโคน และยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีนผสมซิลิโคน (Ethylene propylene diene monomer and silicone rubber: EPDM/SiR) ในห้องทดสอบติดตั้งหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 507 โดยมีความเข้มข้นของของน้ำเกลือที่ 1 กรัมต่อลิตร เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้า 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และมีอัตราการไหลอยู่ที่ 10 $\text{l}/\text{m}^3\text{h}$ สำหรับกรณีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 มีค่าความนำไฟฟ้าที่ 16,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 0.4 $\text{l}/\text{m}^3\text{h}$ กับดักเล็รจไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดแรงดันปกติ 10 kV จึงเลือกพิกัดแรงดันทำงานอย่างต่อเนื่องสูงสุด (MCOV) 8.4 kV เพื่อใช้ในการทดสอบต่อเนื่อง 1,000 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบทำให้ทราบว่าพลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างฉนวนพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การกักตรอนที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคนมีมากกว่า โดยเฉพาะตรงแนวตะเข็บมีการกักตรอนอย่างเห็นได้ชัด

Han et al. (2002) ทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์เพื่อประเมินอายุการใช้งาน โดยใช้การจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลายภายใต้มาตรฐาน IEC Publ. 61109 Annex C ได้จำลองสถานะแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับสถานะที่ใช้งานจริง ซึ่งประกอบด้วย แสงอัลตราไวโอเลต ฝน หมอกไอเกลือ หมอกสะอาดและความร้อน โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง เพื่อศึกษากระแสรั่วไหล คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น และลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการทดสอบสรุปได้ว่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่าสูงอยู่ที่ 0.5 – 2 mA โดยบางครั้งถ้ามีการเกิดอาร์กแถบแห้งหรือดีสชาร์จขึ้นบนผิวฉนวนกระแสรั่วไหลจะมีค่าสูง 7 – 16 mA เมื่อเทียบกับฉนวนที่ยังไม่การใช้งานกระแสรั่วไหลจะมีค่าอยู่ที่ 0.1 – 0.4 mA สำหรับคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นในช่วง HC3 และผลจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำให้สามารถมองเห็นการกักตรอนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวไฟตามผิวได้อย่างชัดเจน

Marungsri et al. (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของสถานะที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วย แสงอัลตราไวโอเลตจากหลอดเมทัลฮาไลด์ และหมอกไอเกลือ โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบผลของหมอกไอเกลือจาก เครื่องพ่นหมอกอัลตราโซนิคอีวมิติฟายเออร์ และหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ซึ่งในการทดสอบทำการเปิดหมอกไอเกลือให้กับฉนวนยางซิลิโคน โดยที่ภายในเวลา 24 ชั่วโมง เปิดหมอกไอเกลือ 8 ชั่วโมง และอีก 16 ชั่วโมง หมอกไอเกลือจะถูกปิด ทำการทดสอบทั้งสิ้น 50 cycle (1 cycle เท่ากับ 24 ชั่วโมง) ผลจากการทดสอบสรุปได้ว่าสามารถใช้เครื่องพ่นหมอกความชื้นสัมพัทธ์แทนหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ได้ เนื่องจากผลจากการวัดค่าความเปราะเปื้อน

คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น ค่าประจุสะสม และการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ (EDX) มีค่าใกล้เคียงกันมาก

Kim et al. (2008) ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์สำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายประกอบด้วย แสงอัลตราไวโอเลต ความชื้น สัมผัส อนุภาคน้ำ ฝุ่น และหมอก ไอเกลือมีค่าความนำไฟฟ้า $4,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ โดยใช้แรงดัน MCOV 15.3 kV ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3,000 ชั่วโมง ซึ่งสภาพภูมิอากาศที่จำลองขึ้นได้อ้างอิงข้อมูลจริงของประเทศเกาหลี และได้นำผลที่ผ่านการทดสอบเร่งเสื่อมอายุเทียบกับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ติดตั้งภายนอกในสภาวะจริงเป็นระยะเวลา 3 ปี ผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วย FTIR ที่ความยาวคลื่น $2,916 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อวัดปริมาณสารเติมแต่ง และที่ความยาวคลื่น $1,014 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่หลัก พบว่าปัจจัยหลักที่ทำให้ฉนวนพอลิเมอร์เสื่อมสภาพลง เกิดจากความเครียดของสภาวะแวดล้อมและความเครียดทางไฟฟ้า และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายสามารถเทียบเท่ากับการใช้งานของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้งานภายนอก 6 ปี

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEE และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่า อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีฉนวนยางซิลิโคนกำลังเป็นที่สนใจ จึงทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับดักด้วยฉนวนและกับดักเสิร์จฟ้าผ่า เพราะดักด้วยฉนวนและกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่มีฉนวนพอลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้เริ่มวิจัยขึ้นเพื่อทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยหมอกไอเกลือ และการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ใด ๆ ที่ต้องทดสอบด้วยวิธีการนี้ ตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของฉนวน โครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักลึร์จฟ้าผ่าฟ้าผ่า ระบบ 24 kV จำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของกับดักลึร์จฟ้าผ่าฟ้าผ่า ในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับกับดักลึร์จฟ้าผ่าฟ้าผ่าอย่างละเอียด โดยอธิบายในเรื่องของประเภทของกับดักลึร์จฟ้าผ่าฟ้าผ่า หลักการทำงาน การเลือกกับดักลึร์จฟ้าผ่าฟ้าผ่าเพื่อใช้งาน รวมถึงการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำฉนวนโครงหุ้ม โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

3.2 กับดักลึร์จฟ้าผ่า

กับดักลึร์จฟ้าผ่า (Lightning Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินลึร์จฟ้าผ่าและแรงดันเกินลึร์จสวิตชิง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอ็กเตอร์ หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย กับดักลึร์จฟ้าผ่าจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันคือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับกราวด์ กับดักลึร์จฟ้าผ่าจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Resistors: R_{non}) กับดักลึร์จฟ้าผ่าที่ใช้ป้องกันในระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

- ประเภทมีช่องว่างอากาศ (Gap Type, Passive Gap, Active Gap) มีระบบช่วยดับอาร์ก ประกอบด้วย ช่องว่างอากาศอนุกรมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC)
- ประเภทไม่มีช่องว่างอากาศ (Gapless Type) ประกอบด้วย Non - Linear Resistor ซึ่งเป็นออกไซด์โลหะที่ทำมาจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

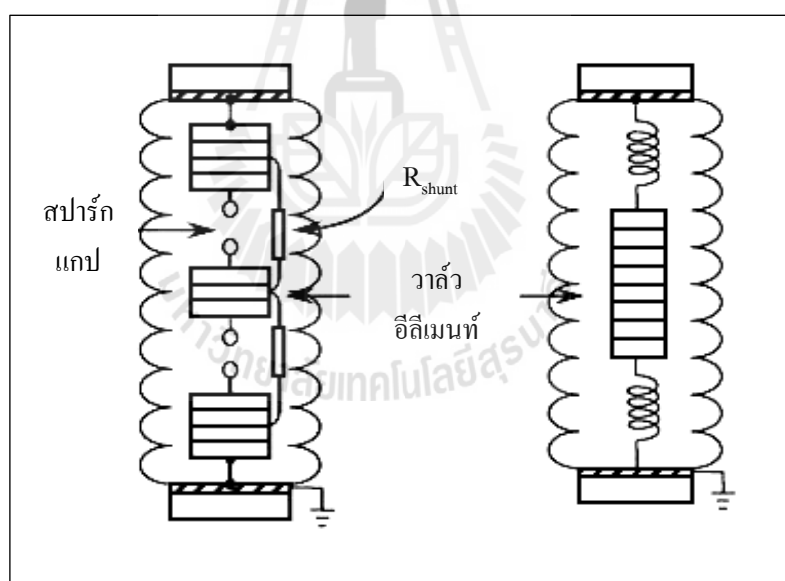
สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE Std. C62.22.1997 ได้ 3 ประเภท ดังนี้

- 1) กับดักลึร์จฟ้าผ่าแรงดันระบบจำหน่าย ใช้สำหรับระบบจำหน่ายสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ แบบใช้งานหนัก ใช้งานปกติ และใช้งานเบา
- 2) กับดักลึร์จฟ้าผ่าสำหรับระบบแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษ ใช้สำหรับในระบบระหว่าง HV และระบบ EHV

3) กับดักลျรจฟฟผสำหรับสถณไฟฟฟในระบบแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษใช้สำหรับระบบ HV และ EHV

3.2.1 กับดักลျรจฟฟผชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์

กับดักลျรจฟฟผชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคของกับดักลျรจฟฟผทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้แรงดันปกติอันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันเกินลျรจสปาร์กแกปจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้ เกิดเบรกควาน์ผ่านแกป แรงดันที่กับดักลျรจฟฟผเกิดเบรกควาน์เรียกว่าแรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover Voltage) เมื่อเกิดสปาร์กผ่านแล้วแรงดันที่คร่อมกับดักลျรจฟฟผจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักลျรจฟฟผเรียกว่าแรงดันคงค้าง (Residual Voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ



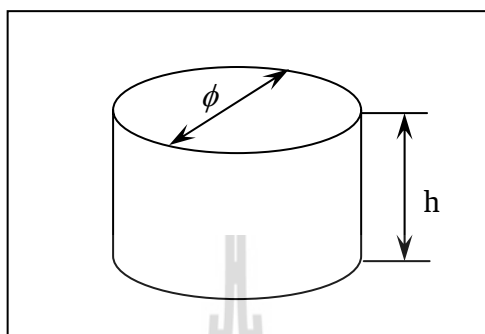
รูปที่ 3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของกับดักลျรจฟฟผชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์

(ที่มา: <http://www.powerqualityworld.com/2011/05/surge-arresters.html>)

3.2.2 กับดักลျรจฟฟผชนิดออกไซด์โลหะ

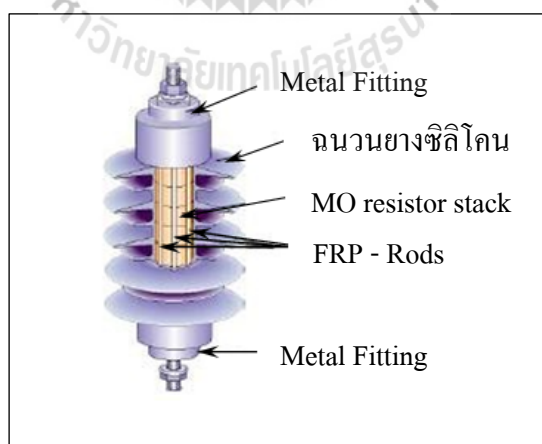
กับดักลျรจฟฟผชนิดออกไซด์โลหะ (Metal Oxide: MO) ใช้ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำจากซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอก

ฉนวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง ของแท่งซึ่งค้อออกไซด์เป็นตัวกำหนดขนาดกระแสหรือพลังงาน
 เสร็จที่ยอมให้ผ่านส่วนความสูง h เป็นตัวกำหนดแรงดัน (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547) ดังแสดงใน
 รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จไฟฟ้าผ่านชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์และออกไซด์โลหะ

โครงหุ้มติดตั้งของกั๊บดักชนิดออกไซด์โลหะนี้มักทำจากพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่
 3.3 และมีข้อได้เปรียบกว่าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ คือสามารถกำจัดกระแสตาม (Follow Current)
 ที่เกิดขึ้นหลักจากกระแสอิมพัลส์ (Impulse Current) ได้ดีกว่าอีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและทนทานต่อ
 สภาพแวดล้อมดีกว่า



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จไฟฟ้าผ่านฉนวนยางซิลิโคน

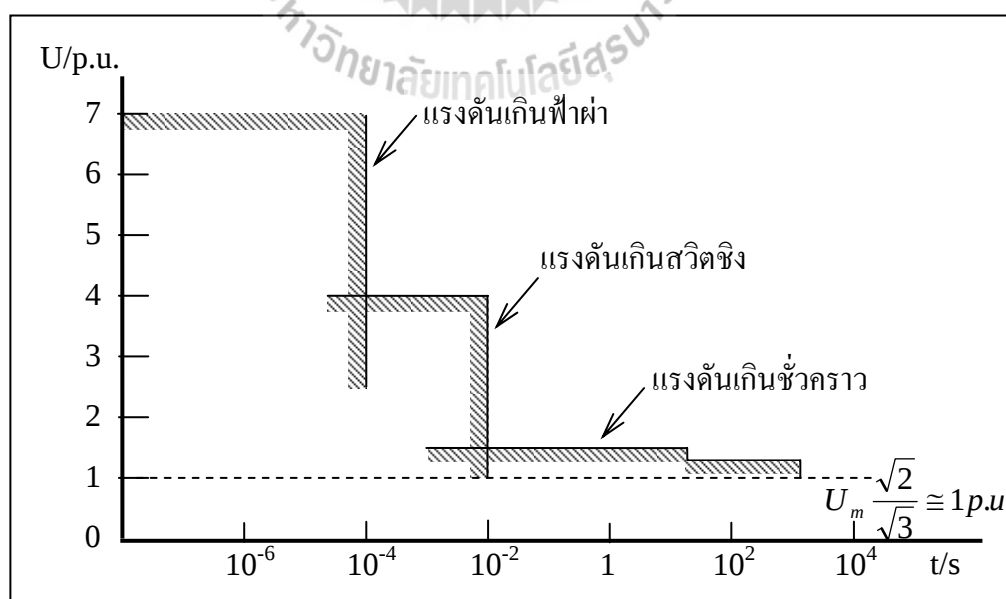
(ที่มา: <http://www.powerqualityworld.com/>

2011/05/surge-arresters.html)

3.3 แรงดันเกินในระบบสายส่ง

สายส่งในระบบจำหน่ายมีความจำเป็นอย่างมากต่อผู้ใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากถือได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจทั้งทางภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม จึงมีความจำเป็นที่ต้องป้องกันการเกิดไฟฟ้าขัดข้อง สาเหตุที่สำคัญของการเกิดไฟฟ้าขัดข้องคือ แรงดันเกินในระบบสายส่งที่มีแรงดันชั่วคราวเป็นต้นเหตุ แรงดันเกินชั่วคราว (Transient Overvoltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น คือไม่เกิน 5 ms ความเป็นไปของแรงดันชั่วคราวมีผลต่อเทคนิคการฉนวนไฟฟ้าแรงสูงอย่างมาก เนื่องจากแรงดันทรานเซียนต์เป็นต้นเหตุของการเกิดแรงดันเกินในระบบสายส่ง ส่งผลให้เกิดความเครียดทางสนามไฟฟ้า อาจมีค่าสูงกว่าความคงทนของการฉนวนและนำไปสู่การเกิดความผิดปกติในระบบได้

สาเหตุของการเกิดแรงดันเกินชั่วคราวในระบบจำหน่ายตามลักษณะการเกิดของระบบสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ (1) แรงดันเกินเนื่องจากปัจจัยภายนอก (External Overvoltage) โดยเกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Surges) และ (2) แรงดันเกินเนื่องจากปัจจัยภายใน (Internal Overvoltage) เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร เรียกว่า แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Surges) แรงดันเกินอีกชนิดหนึ่งเกิดจากความผิดปกติในระบบมีลักษณะเป็นสั้นพ้องที่มีความถี่พลังงานหรือเป็นฮาร์มอนิก เรียกว่า แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage: TOV)



รูปที่ 3.4 การแบ่งระดับของแรงดันเกินในระบบจำหน่ายแบบต่าง ๆ

การพิจารณาขนาดของแรงดันเกินโดยทั่วไปสามารถนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ายอดสูงสุดของแรงดันเฟสของระบบ โดยจะเปรียบเทียบกับค่ายอดสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันดังสมการที่ 3.1

$$U_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_M = 1p.u. \quad (3.1)$$

ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันดังรูป 3.4 เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันเกินแต่ละชนิดมีขนาดมากน้อยเพียงใด จึงเทียบขนาดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นเป็นกึ่งเท่าของแรงดันเฟสค่ายอดดังสมการที่ 3.1

3.3.1 แรงดันเกินฟ้าผ่า

ในระหว่างที่เกิดฝนฟ้าคะนอง ประจุบวกและประจุลบจะถูกแยกออกจากกันโดยกระแสลมและการขัดสีกันของเกล็ดน้ำแข็งที่อยู่ในก้อนเมฆ บนก้อนเมฆที่มีความสูงจากพื้นดินประมาณ 9-12 km จะมีชั้นประจุบวกเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่และมีประจุลบส่วนน้อยอยู่ที่ด้านล่าง ส่วนประจุลบส่วนใหญ่จะมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 0.5 – 10 km เหนือพื้นดิน โดยปกติเมฆฝนจะลอยอยู่เหนือพื้นดินประมาณ 150 m เมื่อประจุลบที่อยู่ในส่วนล่างของก้อนเมฆมีมากพอที่จะเหนี่ยวนำให้ประจุบวกที่อยู่บนพื้นดินก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน ค่าเบรกดาวนวิกฤตของสนามไฟฟ้าที่อากาศทั่วไปมีค่า 30 kV/cm ถ้าในกรณีที่มีสภาวะฝนฟ้าคะนองค่าเบรกดาวนวิกฤตของสนามไฟฟ้าขณะนั้นอาจมีค่าน้อยกว่า 30 kV/cm (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าค่าเบรกดาวนวิกฤตของสนามไฟฟ้าในอากาศ จะเกิดการดีสชาร์จประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน การดีสชาร์จจะค่อย ๆ เคลื่อนลงอย่างอิสระไม่แน่นอนจนมีการแตกกิ่งก้านสาขาเนื่องจากสนามไฟฟ้ารอบ ๆ จุดที่เกิดเบรกดาวนต่อไปมีค่าไม่สม่ำเสมอ เมื่อดีสชาร์จเคลื่อนที่มาถึงพื้นดินแล้วประจุที่ค้างอยู่บนก้อนเมฆจะถ่ายเทลงมายังจุดเดิม ซึ่งมีความเร็วกว่าฟ้าที่ผ่าลงมาครั้งแรก

แรงดันเกินฟ้าผ่าอาจทำให้เกิดการวับไฟตามผิวย้อนกลับ (Blackflashover) บนลูกถ้วยที่ยึดสายส่งได้ ถ้าแรงดันเกินมีค่าสูงกว่าระดับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (BIL) ของลูกถ้วยจนวน ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันอาจทำให้ลูกถ้วยเจาะทะลุได้ แรงดันเกินภายนอกที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจะไม่ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบ นอกจากนี้แรงดันเกินภายนอกจะมีความสำคัญน้อยลงเมื่อแรงดันของระบบสูงขึ้น แต่แรงดันเกินภายในระบบจะมีความสำคัญมากขึ้นตามระบบแรงดันระบบ

3.3.2 แรงดันเกินสวิตชิง

สาเหตุของการเกิดแรงดันเกินภายในระบบอาจมีสาเหตุมาจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อระบบโดยผู้ปฏิบัติงาน หรือเกิดความผิดปกติขึ้นในขณะที่มีการทำงานโดยอัตโนมัติ เรียกว่าแรงดันเสิร์จสวิตชิง หรือเกิดจากการลัดวงจรอันมีสาเหตุมาจากความบกพร่องของฉนวน เช่นการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนภายนอกที่มีความเปราะเปื้อน เปียกฝน ขึ้นด้วยหมอกน้ำค้าง หรือเกิดจากวงจรโซ่เนนซ์เพราะค่าเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำในสายส่ง ขนาดของแรงดันเกินสวิตชิงจะมีขนาดน้อยกว่าขนาดของแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า โดยมีขนาดประมาณ 2 - 4 เท่าของค่ายอดแรงดันเฟสของระบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังลัดวงจร และโหลดของวงจรที่อุปกรณ์ป้องกันทำงานทั้งหมด

3.3.3 แรงดันเกินชั่วคราว

เป็นแรงดันเกินที่มีช่วงเวลาก่อเกิดคงอยู่นานกว่าอาจเป็น วินาที นาฬิกา หรือชั่วโมงก็ได้ แรงดันเกินชั่วคราวมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกกับดักเสิร์จฟ้าผ่า โดยมีเงื่อนไขว่ากับดักเสิร์จฟ้าผ่าต้องไม่ทำงานที่สภาวะแรงดันเกินชั่วคราวเพราะกับดักจะทนต่อพลังงานที่เกิดขึ้นไม่ได้ ทำให้เกิดการระเบิดเนื่องจากพลังความร้อน แรงดันเกินชั่วคราวมีลักษณะการสั้นของความถี่เท่ากับความถี่พลังงานรูปคลื่นไซน์หรือใกล้เคียง เกิดจากการตัดรีแอกเตอร์ชดเชยกับค่าเก็บประจุสายส่ง หรือมีความถี่สูงกว่าความถี่พลังงานและมักมีฮาร์มอนิกซ้อนอยู่ เกิดจากกระแสหม้อแปลงที่ไม่มีโหลด ส่วนที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่พลังงานโดยเกิดคร่อมตัวเก็บประจุต่ออันดับ แรงดันเกินชั่วคราวเหล่านี้เกิดจากการปลดโหลดเต็มทีแบบเหนี่ยวนำออกไปอย่างกะทันหันแล้วเพิ่มโหลดแบบตัวเก็บประจุเข้าแทนที่ ทำให้แรงดันที่โหลดเพิ่มสูงขึ้น

3.4 หลักการทำงานของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า

กับดักเสิร์จฟ้าผ่าแบบซิลิคอนคาร์ไบด์ มีโครงสร้างประกอบด้วยช่องว่างอากาศต่ออนุกรมกับวาล์วอีลีเมนต์ (Valve Element) ซึ่งทำมาจากซิลิคอนคาร์ไบด์ ในสภาวะปกติจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกระแสไม่ให้ไหลผ่านกับดักเสิร์จฟ้าผ่าลงดิน แต่เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นและแรงดันเกินนี้มีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์ของช่องว่างอากาศ ก็จะเกิดการสปาร์กโอเวอร์ขึ้น ทำให้กระแสเสิร์จไหลลงดินได้ การไหลของกระแสเสิร์จผ่านวาล์วอีลีเมนต์นี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ซึ่งเรียกแรงดันนี้ว่าแรงดันดีสชาร์จหรือ แรงดันคงค้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของซิลิคอนคาร์ไบด์ จะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$I = kV^n \quad (3.2)$$

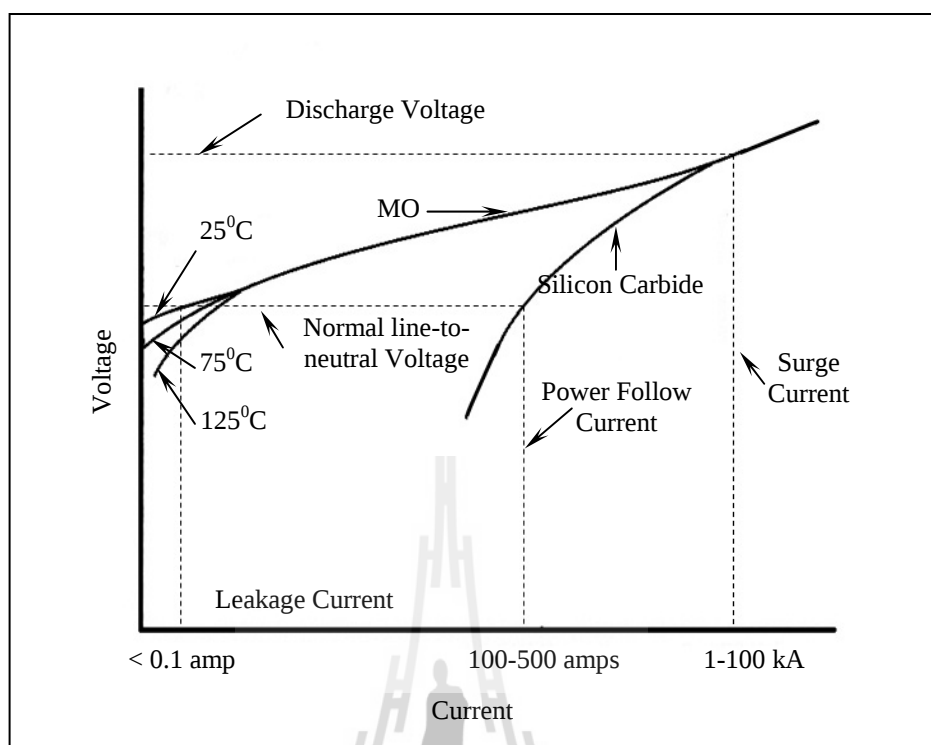
โดยที่ I	คือ กระแสที่ไหลผ่านกับดักเล็จไฟฟ้า
k	คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับพิกัดของกับดักเล็จไฟฟ้า
V	คือ แรงดัน
n	คือ ค่าคงที่ มีค่าอยู่ในช่วง 4-6

กับดักเล็จไฟฟ้าแบบออกไซด์โลหะ เป็นกับดักเล็จไฟฟ้าชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติดีกว่าแบบซิลิคอนคาร์ไบด์มาก โดยวาล์วอีลีเมนต์ของ MO ทำมาจากวัสดุที่เป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งก็คือซิงค์ออกไซด์ วัสดุชนิดนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์มาก ($I = kV^n$ โดยที่ $n=20 - 50$)

เนื่องจากกับดักเล็จไฟฟ้าแบบออกไซด์โลหะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีความสูญเสียน้อยที่แรงดันปกติ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีย่อว่างอากาศมาต่ออนุกรมกับโครงสร้างของกับดักเล็จไฟฟ้า วาล์วอีลีเมนต์จะคงทนต่อแรงดันในสภาวะปกติแต่นำกระแสจำนวนมากที่ระดับแรงดันค่าหนึ่งและจะหยุดนำกระแสเมื่อระดับแรงดันลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันข้างต้น ย่อว่างอากาศจึงไม่มีความจำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการแยกกับดักเล็จไฟฟ้าออกจากดินเนื่องจากวาล์วอีลีเมนต์จะยอมให้กระแสรั่วเพียงเล็กน้อยไหลผ่านได้ในสภาวะแรงดันปกติและย่อว่างอากาศก็ไม่จำเป็นในการนำมาใช้เพื่อขัดขวางการไหลของกระแสไหลตาม (Power Follow Current) เพราะกระแสนี้จะไม่ได้อยู่ในขณะที่ยังคงต่ำกว่าค่าแรงดันเริ่มนำกระแส

ในการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างซิลิคอนคาร์ไบด์กับออกไซด์โลหะจากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าที่ระดับกระแสในช่วง 1,000 A ขึ้นไป คุณสมบัติของทั้งสองจะคล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันอย่างมากในช่วงค่ากระแสต่ำ ที่แรงดันระบบซิลิคอนคาร์ไบด์จะนำกระแสขนาดเป็นร้อยแอมป์ส่วนออกไซด์โลหะจะนำกระแสเพียงขนาดเป็นมิลลิแอมป์เท่านั้น (วงศ์พันธ์ ทัศนางกูร, 2546) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีย่อว่างอากาศสำหรับต่ออนุกรมกับออกไซด์โลหะ

อย่างไรก็ตามข้อควรพิจารณาในการใช้กับดักเล็จไฟฟ้าแบบออกไซด์โลหะก็คือความร้อน โดยรอบ ซึ่งจะสังเกตได้จากรูปที่ 3.5 V-I Curve ของออกไซด์โลหะจะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ในช่วงค่ากระแสต่ำ ๆ เมื่ออุณหภูมิรอบกับดักเล็จไฟฟ้าหรือพลังงานที่เข้ามายังกับดักเล็จไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ลักษณะนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มขนาดขึ้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินกว่าความสามารถทางความร้อนของวาล์วอีลีเมนต์ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเสียหายด้วยความร้อน (Thermal Runaway) ขึ้นและจะทำให้กับดักเล็จไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวาล์วอีลีเมนต์ที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์และออกไซด์โลหะ (ที่มา: Anonymous (n.d.))

3.5 การเลือกกับดักเสริมฟ้าผ่าเพื่อใช้งาน

สำหรับการเลือกกับดักเสริมฟ้าผ่าที่เหมาะสมกับระบบนั้นควรพิจารณาสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ พิกัดแรงดัน คุณสมบัติการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและอิมพัลส์สวิตชิง (Protective Characteristics) ความทนทานจากแรงดันเกินชั่วขณะและเสริมจากการสับสวิตช์ (Durability) สภาวะการทำงาน (Service Conditions) และระดับการป้องกัน โดยที่การพิจารณาความทนทานและระดับการป้องกันจะเป็นสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของกับดักเสริมฟ้าผ่าเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

3.5.1 การแบ่งประเภทของกับดักเสริมฟ้าผ่า

ตามมาตรฐานของ ANSI มีการแบ่งประเภทของกับดักเสริมฟ้าผ่าออกเป็น 3 ประเภท ความแตกต่างของแต่ละประเภทอยู่ที่ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ คือ พิกัดแรงดัน คุณสมบัติการป้องกัน ความคงทนต่อการปลดปล่อยของความดัน (Pressure Relief) หรือคุณสมบัติความคงทนต่อการเกิดฟลลด์

1) กับดักเล็กรังฟ้าผ่าระบบจำหน่าย เป็นกับดักเล็กรังฟ้าผ่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีพิกัดตามมาตรฐานอยู่ที่ 1-30 kV กับดักเล็กรังฟ้าผ่าประเภทนี้มีค่าแรงดันดิสชาร์จสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ประเภทที่เหลือ

2) กับดักเล็กรังฟ้าผ่าระบบแรงดันสูงปานกลาง มีขนาดของพิกัดแรงดันตั้งแต่ 3 - 120 kV มีคุณสมบัติในการป้องกันที่ดีกว่ากับดักเล็กรังฟ้าผ่าสำหรับระบบจำหน่าย แต่ก็ยังไม่ดีเท่ากับการดักเล็กรังฟ้าผ่าสำหรับสถานีไฟฟ้า

3) กับดักเล็กรังฟ้าผ่าสถานีไฟฟ้า เป็นกับดักเล็กรังฟ้าผ่าซึ่งมีแรงดันดิสชาร์จต่ำที่สุด (ยอมให้แรงดันค่าต่ำตกคร่อมอุปกรณ์ในระบบ) ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มระดับการป้องกันให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งตามมาตรฐานกับดักเล็กรังฟ้าผ่าชนิดนี้มีพิกัดแรงดันอยู่ในระหว่าง 3 – 684 kV

3.5.2 พิกัดแรงดันของกับดักเล็กรังฟ้าผ่า

พิกัดแรงดันที่ใช้ในการเลือกกับดักเล็กรังฟ้าผ่าแบบออกไซด์โลหะจะมี 2 พิกัดแรงดันดังนี้ คือพิกัดแรงดันทำงานอย่างต่อเนื่องสูงสุด (Maximum Continuous Operating Voltage Rating: MCOV) และพิกัดแรงดันทำงาน (The Duty-Cycle Voltage Rating) ค่า MCOV คือ แรงดันสูงสุดระหว่างสายเฟสกับกราวด์ที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง (rms) ซึ่งอาจจะตกคร่อมกับดักเล็กรังฟ้าผ่าได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนค่าพิกัดแรงดันทำงานที่มีค่าเท่ากับแรงดันที่ความถี่ไฟฟ้ากำลังที่ป้อนให้กับกับดักเล็กรังฟ้าผ่าระหว่างการทดสอบการทำงาน โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของแรงดันทั้งสองได้จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std. C62.22.1997

ตารางที่ 3.1 พิกัด MCOV และแรงดันทำงานของกับดักเล็กรังฟ้าผ่า

MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)	MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)	MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)
2.55	3	42.00	54	209.0	258
5.10	6	48.00	60	212.0	264
7.65	9	57.00	72	220.0	276
8.40	10	70.00	90	230.0	288
10.20	12	76.00	96	235.0	294
12.70	15	84.00	108	245.0	312
15.30	18	98.00	120	318.0	396
17.00	21	106.0	132	335.0	420
19.50	24	115.0	144	353.0	444

ตารางที่ 3.1 พิกัด MCOV และแรงดันทำงานของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า (ต่อ)

MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)	MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)	MCOV (kV)	แรงดันทำงาน (Duty-Cycle: kV)
22.00	27	131.0	168	372.0	468
24.40	30	140.0	172	392.0	492
29.00	36	144.0	180	428.0	540
31.50	39	152.0	192	448.0	564
36.50	45	180.0	228	462.0	576
39.00	48	190.0	240	470.0	588

ตารางที่ 3.2 พิกัด MCOV สำหรับระบบจำหน่าย

แรงดันระบบ (V)		พิกัดแรงดันการใช้งานกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ตาม Duty-Cycle (MCOV) (kV _{rms})		
แรงดันระบบ ปกติ	แรงดันสูงสุด ของแรงดัน ระบบ	3 เฟส 4 สาย แบบนิวทรอลต่อ ลงดินหลายจุด	3 เฟส 3 สาย แบบค่าอิมพีแดนซ์ ต่อลงดินต่ำ	3 เฟส 3 สาย แบบค่าอิมพีแดนซ์ ต่อลงดินสูง
2400	2540			3(2.55)
4160Y/2400	4400Y/2540	3(2.55)	6(5.1)	6(5.1)
4260	4400			6(5.1)
4800	5080			6(5.1)
6900	7260			9(7.65)
8320Y/4800	8800Y/5080	6(5.1)	9(7.65)	
12000Y/6930	12700Y/7620	9(7.65)	12(10.2)	
12470Y/7200	13200Y/7620	9(7.65) หรือ 10(8.4)	15(12.7)	
13200Y/7620	13970Y/8070	10(8.4)	15(12.7)	
13800Y/7970	14520Y/8388	10(8.4) หรือ 12(10.2)	15(12.7)	
13800	14520			18(15.3)

ตารางที่ 3.2 พิกัด MCOV สำหรับระบบจำหน่าย (ต่อ)

แรงดันระบบ (V)		พิกัดแรงดันการใช้งานกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่า ตาม Duty-Cycle (MCOV) (kV_{rms})		
แรงดันระบบ ปกติ	แรงดันสูงสุด ของแรงดัน ระบบ	3 เฟส 4 สาย แบบนิวตรอลต่อ ลงดินหลายจุด	3 เฟส 3 สาย แบบค่าอิมพีแดนซ์ ต่อลงดินต่ำ	3 เฟส 3 สาย แบบค่าอิมพีแดนซ์ ต่อลงดินสูง
20780Y/12000	22000Y/12699	15(12.7)	21(17)	
22860Y/12000	22000Y/12700	15(12.7)	21(17)	
23000	24340			30(24.4)
24940Y/14400	26400Y/15240	18(15.3)	27(22)	
27600Y/15935	29255Y/16890	21(17)	30(24.4)	
34500Y/19920	36510Y/21080	27(22)	36(29)	

ในการติดตั้งกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าจะต้องเลือกค่า MCOV ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันสูงสุดของระบบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยที่แรงดัน Line - to - Ground สูงสุดของระบบควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับพิกัด MCOV ของกับดักฟ้าผ่า ในการหาค่าแรงดันสูงสุดของระบบให้นำตัวคูณ 1.05 คูณเข้าไปกับแรงดันปกติของระบบ และเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความเสียหายอย่างฉับพลันของกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าจะต้องคูณด้วยเซฟตี้ แฟกเตอร์ (Safety Factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.05 เข้าไปกับแรงดันของระบบด้วยเพื่อใช้ในการเลือกพิกัด MCOV (วงศ์พันธ์ ทัศนางกูร, 2546)

3.5.3 ระดับการป้องกัน

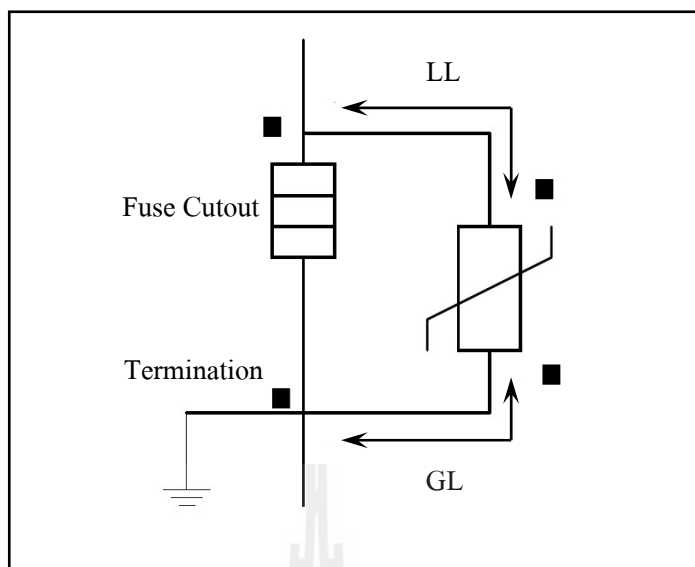
ระดับการป้องกันของกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าคือระดับแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นกับกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่า ถ้าเป็นกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าแบบไร้ช่องว่างอากาศระดับการป้องกันของกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าจะเป็นค่าแรงดันดิสชาร์จที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดกระแสดิสชาร์จ แต่ถ้าเป็นกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าที่มีช่องว่างอากาศ (ขนานหรืออนุกรม) ระดับการป้องกันของกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าจะต้องมีค่าสูงกว่าค่าแรงดัน สปาร์กโอเวอร์ของช่องว่างอากาศหรือค่าแรงดันดิสชาร์จ โดยที่การพิจารณาคุณสมบัติของกับดักลีสจิ้งฟ้าผ่าสำหรับป้องกันในระบบจำหน่ายได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ตามมาตรฐาน IEEE Std. C62.22.1997 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการป้องกันของกัปดักเสิร์จฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย

ระดับการป้องกันตามช่วงของบริษัผู้ผลิตกัปดักเสิร์จฟ้าผ่า							
พิกัด แรงดัน (kV _{rms})	MCOV (kV _{rms})	ระดับการป้องกันช่วงหน้าคลื่น (Front of Wave Protective Level)			แรงดันดิสชาร์จที่มีรูปคลื่น 8/20 μ s		
		5 kA Normal Duty	10 kA Heavy Duty	10 kA Riser Pole	5 kA Normal Duty	10 kA Heavy Duty	10 kA Riser Pole
3	2.55	11.2-17	13.5-17	10.4	10.2-16	9.1-16	8.2
6	5.1	22.3-25.5	25-27	17.4-18	20.3-24	18.2-25	16.2
9	7.65	33.5-36	26.5-35.3	22.5-36	30-33.5	21.7-31.5	20-24.9
10	8.4	36-37.2	29.4-39.2	26-36	31.5-33.8	24.5-35	22.5-26.6
12	10.2	44.7-50	35.3-50	34.8-37.5	40.6-44	32.1-44	30-32.4
15	12.7	54-58.5	42-59	39-54	50.7-52	35.9-52	33-40.2
18	15.3	63-67	51-68	47-63	58-60.9	43.4-61	40-48
21	17	73-80	57-81	52-63.1	64-75	47.8-75	44-56.1
24	19.5	89-92	68-93	63-72.5	81.1-83	57.6-83	53-64.7
27	22	94-100.5	77-102	71-81.9	87-91.1	65.1-91	60-72.1
30	24.4	107-108	85-109.5	78-85.1	94.5-99	71.8-99	66-79.5
36	29	125	99-136	91-102.8	116	83.7-125	77-96

3.5.4 การทำงานของกัปดักเสิร์จฟ้าผ่า

กัปดักเสิร์จฟ้าผ่ามีผลตอบสนองต่อแรงดันเกินของระบบ ทำหน้าที่เบี่ยงกระแส
เสิร์จลงไปยังดินและจำกัดค่าแรงดันเสิร์จบนระบบ กัปดักเสิร์จฟ้าผ่าจะสร้างแรงดันดิสชาร์จคร่อมที่
ขั้วทั้งสอง โดยที่แรงดันดังกล่าวนี้เป็นฟังก์ชันของขนาดและรูปคลื่นของกระแสดิสชาร์จรวมทั้งยัง
ขึ้นอยู่กับชนิดของกัปดักเสิร์จฟ้าผ่า การออกแบบ และพิกัดแรงดัน



รูปที่ 3.6 สายเชื่อมต่อสายไฟฟ้าและสายเชื่อมต่อสายดิน

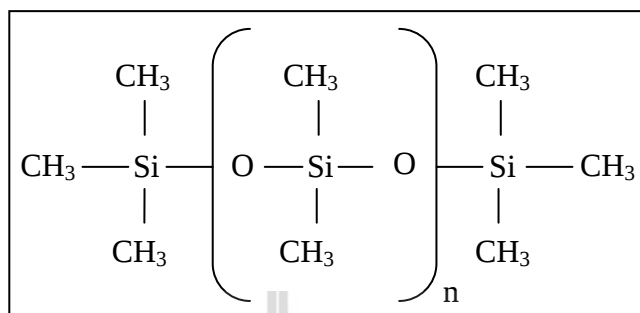
จากรูปที่ 3.6 ความยาวของสายเชื่อมต่อ (Lead Length) เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่ง โดยอยู่ภายใต้การควบคุมของผู้ใช้งาน กล่าวคือความยาวโดยรวมของสายเชื่อมต่อที่ประกอบด้วย สายเชื่อมต่อจากสายไฟฟ้าและสายเชื่อมต่อจากสายดิน ความยาวสายเชื่อมต่อจากสายไฟฟ้าคือ ระยะจากตัวนำเฟสต่อแยกมายังขั้วสายไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า ความยาวสายเชื่อมต่อจากสายดินคือ ระยะกระแสลัดที่ไหลจากขั้วดินของกับดักลัดฟ้าผ่าไปยังจุดต่อร่วมลงดินของซิลด์ โลหะสายเคเบิล

3.6 ยางซิลิโคน

โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของยางซิลิโคนสำหรับฉนวนของกับดักลัดฟ้าผ่าคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 องค์ประกอบมูลฐานในโมเลกุลของ PDMS จะประกอบด้วยสายโซ่หลักแบบอนินทรีย์ (Inorganic Backbone) จากอะตอมของ Si กับ O และมี CH_3 เป็นสายโซ่ข้าง (Side Chain) กับอะตอมของ Si

คุณสมบัติผิวหดยน้ำล้น (Hydrophobic Surface Property) ของยางซิลิโคนเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่ม CH_3 ซึ่งในสภาวะปกติจะเรียงตัวแบบช่อออกที่ผิวด้านบน จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเป็นผิวแบบหดยน้ำล้น พลังงานพันธะของ Si - O ในโมเลกุลของ PDMS มีค่าประมาณ 444 kJ/mol ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานพันธะของอินทรีย์พอลิเมอร์ (Organic Polymers)

ตัวอย่างเช่น C - C (356 kJ/mol) หรือ C - O (339 kJ/mol) ทำให้อนินทรีย์พอลิเมอร์ (Inorganic Polymers) เสถียรกว่าอินทรีย์พอลิเมอร์



รูปที่ 3.7 โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS

เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอม Si (1.8) น้อยกว่าอะตอมของ O (3.5) ทำให้พันธะ Si - O ถูกโพลาไลซ์ให้เป็นโครงสร้างแบบไอออนิก อะตอมของ Si เป็นประจุบวกและอะตอมของ O เป็นประจุลบ โดยมีความแรงของการเป็นพันธะไอออนิกประมาณ 37% และเป็นพันธะเคมีที่มีความเสถียร ด้วยโครงสร้างแบบนี้ของพันธะซิลอกเซน (Siloxane Bond) ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติคงทนต่อความร้อนและสภาวะอากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากพันธะซิลอกเซนเป็นพันธะแบบไอออนิก ก็จะมีผลจากความเสถียรจากผลกระทบของกรดและเบส

ระยะของพันธะซิลอกเซน (1.6×10^{-10} m) มีความยาวมากกว่าระยะของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (1.54×10^{-10} m) และมุมของพันธะซิลอกเซน (O - Si - O) (140°) ก็มีความมากกว่ามุมของโพลิเอทิลีน (C - C - C) (110°) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ Si - O (< 0.5 kJ/mol) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการหมุนของพันธะ C - C (15.4 kJ/mol) หรือพันธะ C - O (11.31 kJ/mol) จึงทำให้พันธะซิลอกเซนหมุนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้โครงสร้างโมเลกุลของซิลิโคนพอลิเมอร์จึงเป็นแบบเกลียว (Helical Structure) โดยประกอบด้วยพันธะ Si - O จำนวน 6 พันธะในหนึ่งรอบเกลียว ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะส่งผลให้ผิวของซิลิโคนพอลิเมอร์ปกคลุมไปด้วย CH_3 ซึ่งมีคุณสมบัติผิวหยาบและมีความแข็งแรงสูง จากโครงสร้างดังกล่าวทำให้ผิวของ PDMS มีคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย

- 1) แรงระหว่างโมเลกุลของ CH_3 ต่ำ
- 2) ความสามารถในการยืดหยุ่นของพันธะซิลอกเซน
- 3) ความแข็งแรงของพันธะซิลอกเซน

4) การมีคุณสมบัติเป็นพันธะไอออนิกบางส่วนของพันธะซิลอกเซน

ลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นของ PDMS ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านั้นประกอบด้วย

- 1) คุณสมบัติของการเป็นไดอิเล็กตริกที่ดี (Good Dielectric Properties)
- 2) มีความทนทานเป็นเยื่อต่อสภาวะอากาศ (Excellent Resistance to Weathering)
- 3) คุณสมบัติของผิวแบบหยดน้ำดี (Hydrophobic Surface Properties)
- 4) มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (High Thermal and Oxidative Stability)

3.6.1 ยางซิลิโคนที่เกิดจากโครงสร้างการเชื่อมขวาง

ยางซิลิโคน หรือ XPDMS (Crosslinked PDMS) ที่นำมาใช้เป็นฉนวนภายนอกในระบบไฟฟ้าแรงสูงสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามกระบวนการผลิต คือ HTV (High Temperature Vulcanization) และ RTV (Room Temperature Vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการอบยางโดยใช้การถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ยางซิลิโคน เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนอย่างทั่วถึงโดยอาศัยคุณสมบัติการนำความร้อนของตัวยางซิลิโคนเอง (Hillborg, 2001) เมื่อยางซิลิโคนได้รับอุณหภูมิความร้อนในเวลาที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นเรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ทำให้ยางซิลิโคนเกิดการคงรูปและมีความยืดหยุ่นสูง

นอกจากนี้แล้ว ยังมีการเติมสารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradants) และสารเติมแต่ง (Fillers) ลงไปในยางซิลิโคน เพื่อทำการเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของยางซิลิโคนให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนต่อสภาวะแวดล้อม เนื่องจากตัวยางซิลิโคนมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางซิลิโคนจึงมีความไวต่อสภาพที่ต้องสัมผัสกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจน ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้ลายางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่มียางซิลิโคนเป็นส่วนประกอบ

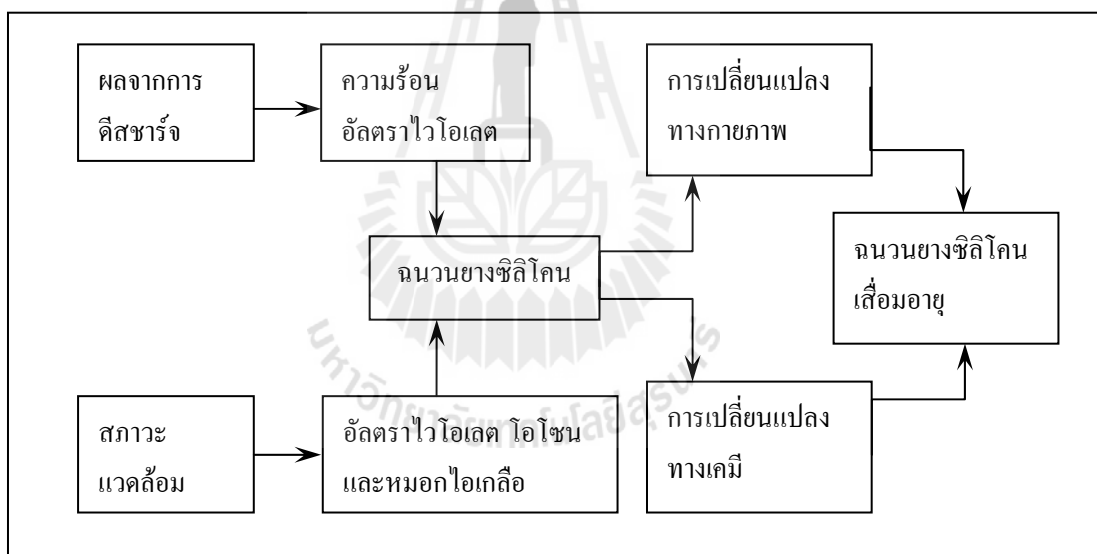
สารเติมแต่งเป็นสารที่เติมเข้าไปเสริมแรงยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดุลัส (Modulus) ค่าความต้านแรงฉีกขาด และค่าความคงทนต่อการเสียดสีของยางซิลิโคน สารเติมแต่งเป็นสารที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ตัวอย่างเช่น Fumed Silica ที่เติมเข้าไปเพื่อควบคุมสมบัติทางวิทยากระแสของไหล (Rheological) ของยางซิลิโคน อลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: ATH) ที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความทนทานต่อ Electrical Tracking และเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนไฟ โดยอลูมินาไตรไฮดรอกไซด์จะแตกตัวเป็น Al_2O_3 และ H_2O เมื่อถูกทำให้ร้อนและอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า 200°C เนื่องจากการเกิดขึ้น

ของ H_2O เป็นปฏิกิริยาแบบเอ็นโดเทอร์มิก (Endothermic) จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเย็นลง จึงทำให้อาร์กทางไฟฟ้าดับได้

สารคู่ควบ (Coupling Agents) เป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อมระหว่างสารเติมแต่งและพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer Matrix) การเชื่อมกันอย่างดีของสารเติมแต่ง และพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น

3.7 กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำฉนวนโครงหุ้มกับดักเล็จไฟฟ้า

กับดักเล็จไฟฟ้าเมื่อใช้งานเป็นเวลานานย่อมต้องเกิดการเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มเนื่องจากสภาวะอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นจากผลการดีสชาร์จทางไฟฟ้า และสภาวะแวดล้อมที่ใช้ งาน กระบวนการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กระบวนการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

เมื่อกับดักเล็จไฟฟ้าฉนวนพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมแบบต่าง ๆ เป็นเวลานาน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากกับดักเล็จไฟฟ้าฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น เกิดการกัดกร่อน เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟ เป็นต้น) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

(เช่น การเกิดตัวของพอลิเมอร์ การเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น) หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ (เช่น การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น เป็นต้น) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการลัดวงจรไฟฟ้าและทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฉนวน การเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่าการเสื่อมอายุ (Boonruang Marungsri, 2006)

ปัญหาที่เป็นกังวลมากที่สุดในการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จไฟฟ้าฉนวนพอลิเมอร์ก็คือ การเสื่อมถอยของผิวฉนวน (Surface Deterioration) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำไปยังแกนกับดักเสิร์จไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้ผลของการเสื่อมถอยของผิวฉนวนยางซิลิโคนเนื่องจากผลของดีสชาร์จและสภาวะแวดล้อม ยังเร่งให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนลดลง ส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนเปียกน้ำ และมีฟิล์มน้ำที่มีความนำไฟฟ้าสูงเกาะที่ผิว ผลที่ตามมาก็คือ จะทำให้มีกระแสรั่ว (Leakage Current) และดีสชาร์จจากแถบแห้ง (Dry Band Arc Discharge) ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปฏิกริยาทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากมีกระแสรั่วและดีสชาร์จจากแถบแห้งที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวนโดยประกอบด้วย

- 1) การเกิดการแตกตัว (Scission) และ/หรือ เกิดการแลกเปลี่ยน (Interchange) ของสายโซ่ข้าง (Si-CH_3) หรือสายโซ่หลัก (Si-O) ของ PDMS
- 2) การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสายโซ่ข้างหรือสายโซ่หลัก ของ PDMS
- 3) การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสายโซ่ข้างหรือ การเกิดเชื่อมขวางของสายโซ่หลัก ของ PDMS

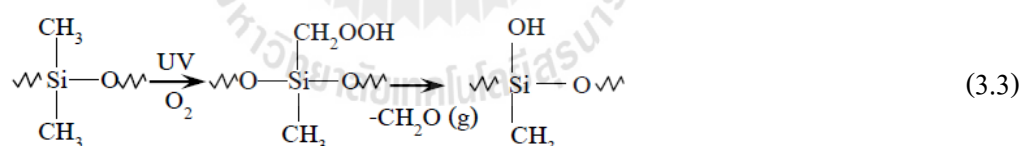
3.7.1 การเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อบริเวณพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนมีการสะสมของคราบสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนต่าง ๆ สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นจากละอองน้ำ หมอก หรือฝนที่ตกเบา ๆ จึงทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เปียกและกลายเป็นคราบสกปรกที่เกาะอยู่ตามผิวฉนวนยางซิลิโคน สิ่งปนเปื้อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นบนฉนวน ดังนั้นกระแสจึงสามารถไหลผ่านไปยังผิวฉนวนยางซิลิโคนระหว่างด้านที่ต่อกับแหล่งจ่ายแรงสูงและด้านที่ต่อลงดินเรียกว่ากระแสรั่ว เมื่อสิ่งปนเปื้อนสะสมอยู่เป็นปริมาณมาก จึงทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงเป็นสาเหตุให้กระแสรั่วที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนมีค่าสูงขึ้น เมื่อฉนวนยางซิลิโคนสูญเสียความชื้นเนื่องจากความร้อนของกระแสรั่ว ซึ่งทำให้เกิดแถบแห้งเล็ก ๆ ในหลายพื้นที่ การไหลของกระแสรั่วจึงถูกขัดขวางส่งผลให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความต้านทานที่สูงมาก เมื่อพื้นที่แถบแห้งเล็ก ๆ มีความเครียดทางไฟฟ้าสูงขึ้น บริเวณพื้นที่ดังกล่าวจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเรียกว่าปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน (Ionization) ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อพลังงานสะสมมีมากพอจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงของ

ประกายไฟขึ้นที่บริเวณแถบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนผิวฉนวน เรียกว่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) เมื่อดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคนเชื่อมต่อถึงกันจะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ตกคร่อมตลอดผิวฉนวน ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีความร้อนสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและวาบไฟตามผิวจนทำให้ฉนวนยางซิลิโคนไม่สามารถทนได้ จึงเกิดเป็นร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ (Tracking) การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟมีส่วนประกอบของคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของวาบไฟตามผิว เนื่องจากคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

3.7.2 ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลต

รังสีอัลตราไวโอเลตที่สัมผัสกับผิวฉนวนยางซิลิโคนอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเสื่อมอายุ เนื่องจากผลของรังสีอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะ C - C และ C - H กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นเหตุให้สายโซ่ขาด นอกจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีจากแสงแดดแล้วยังพบว่าผลจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ และอาร์กแถบแห้งที่ผิวฉนวนก็มีรังสีอัลตราไวโอเลตเช่นเดียวกัน สามารถนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการแตกตัวของเมทิลดั่งสมการทางเคมีที่ 3.3 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีผลโดยตรงต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนจะอยู่ในระหว่างความยาวคลื่น 270 nm – 320 nm ผลของการดูดกลืนรังสีจึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของยางซิลิโคน

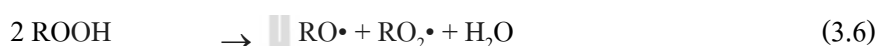
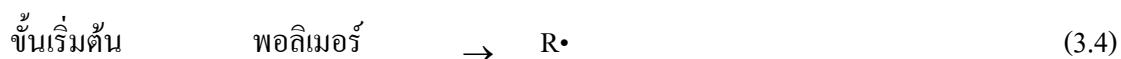


การเสื่อมสภาพของยางซิลิโคนจากรังสีอัลตราไวโอเลตขึ้นอยู่กับความเข้มและความยาวคลื่นของรังสี ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและช่วงฤดูกาลรวมถึงระดับความสูงและละติจูดที่ติดตั้งด้วย (Khan, 2006)

3.7.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวฉนวนยางซิลิโคน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวของยางซิลิโคนสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีดีสชาร์จทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน ความร้อน และแสงอัลตราไวโอเลต หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮเปอร์ออกไซด์ (Hyperoxide: ROOH) แสง อัลตราไวโอเลต และความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ประกอบด้วย

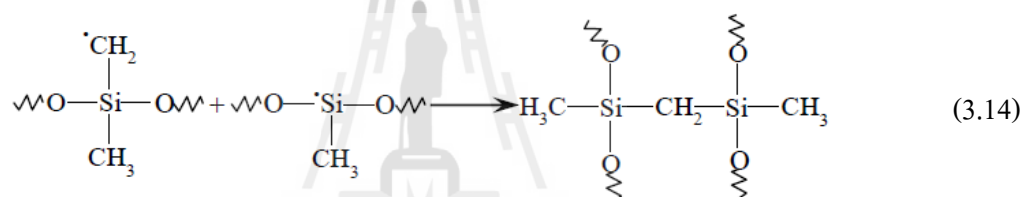
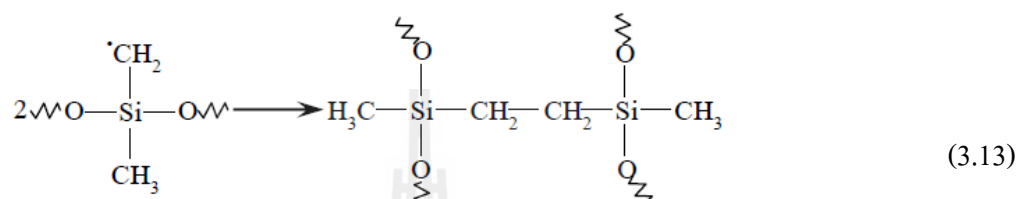
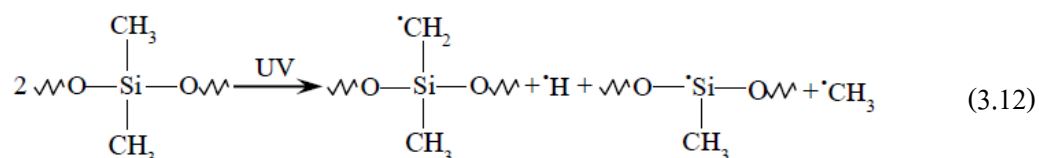
RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำต่อปฏิกิริยาที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียคุณสมบัติทางกลอย่างรวดเร็วดังแสดงในสมการที่ 3.4 ถึง 3.11 ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของธาตุมูลฐานที่ผิวของยางซิลิโคน



ในปฏิกิริยาขั้นลูกกลาม (Propagation) เกิดจากออกซิเจนทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (Peroxy Radical) ซึ่งปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากมายเกิดเป็นสารประกอบไฮเปอร์ออกไซด์ การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่สามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพลงไปเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น หรือเพื่อทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกตัวออกไปเป็นส่วนที่ไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยางซิลิโคน

ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดกลุ่มของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups: $Si - CH_2OH$) กลุ่มของเปอร์ออกไซด์ (Peroxides Groups: $Si - CH_2OOH$) กลุ่มซิลานอล (Silanol Groups: $Si - OH$) และโครงสร้างแบบคล้ายซิลิกา (Silica-like: SiO_x) ซึ่งหมายถึงอะตอมของซิลิกอนสร้างพันธะทางเคมีกับออกซิเจนมากกว่าสองอะตอม (SiO_3 และ/หรือ SiO_4) ซึ่งการเกิดขึ้นของโครงสร้างทางเคมีเหล่านี้ จะทำให้คุณสมบัติหยดน้ำของผิวยางซิลิโคนลดลงดังแสดงใน

สมการที่ 3.12 ถึงสมการที่ 3.14 จากการศึกษาของ Delman et al. พบว่าแสงอัลตราไวโอเลตจากผลของคิซาร์จที่ผิวสามารถตัดพันธะ $\text{CH}_3\text{-O}$ และจะกลายเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล



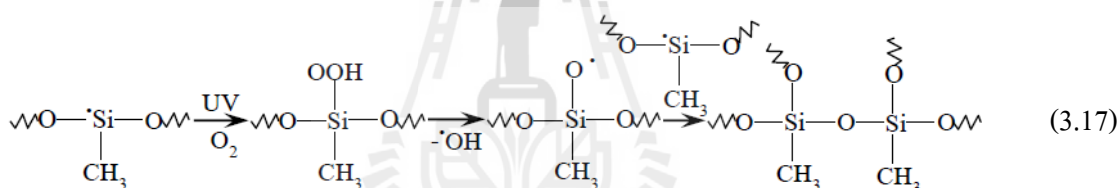
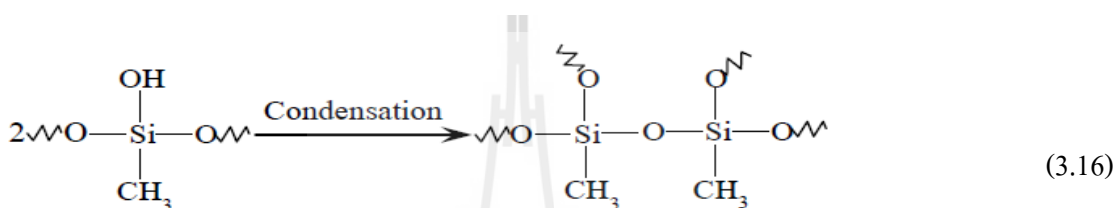
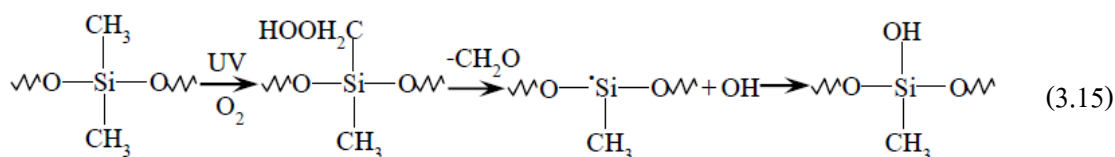
3.7.4 ปฏิริยาไฮโดรไลซิสบนผิวนวนยางซิลิโคน

ปฏิริยาไฮโดรไลซิสเป็นอีกหนึ่งปฏิริยาที่พบได้บ่อยในการสลายตัวทางเคมีของยางซิลิโคน เมื่อยางซิลิโคนอยู่ในสถานะที่มีความชื้นหรือหยดน้ำที่เกาะอยู่อัตราการเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากปฏิริยานี้มีน้ำเป็นส่วนร่วมมักถูกเร่งปฏิริยาด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion) ความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวนวนยางซิลิโคนส่วนใหญ่มีผลมาจากการเกิดโคโรนาดิซาร์จ พลาสมาดิซาร์จ (Plasma Discharge) และอาร์กแถบแห้ง ซึ่งความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนทำปฏิริยากับ PDMS ได้เร็วขึ้น โดยที่ปริมาณของน้ำก็มีผลต่อการเกิดปฏิริยานี้ด้วย

กลไกการเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสเริ่มจากไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำที่มีคุณสมบัตินิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) เข้าทำปฏิริยากับเมทิล ส่งผลให้เกิดการแตกออกของพันธะ C - O โดยอัตราเร็วในการเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน

จากสมการที่ 3.15 เป็นสมการเกี่ยวกับน้ำของกลุ่มไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นการเกิดไฮโดรไลซิสของพันธะไฮดรอกซิล โดยสามารถก่อตัวขึ้นมาได้จากปฏิริยาอื่นได้ด้วยเช่นกัน ผลลัพธ์ที่เกิดจากการรวมตัวกันแน่นของกลุ่มไฮดรอกซิลภายในเครือข่ายเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิล

ไซลอกเซน ส่งผลให้เกิดสะพานไซลานอล แสดงได้ดังสมการที่ 3.16 ถ้าน้ำที่คงอยู่ถูกระเหยกลายเป็นไอ ความร้อนที่ได้จะเกิดจากอาร์กแถบแห้ง พันธะที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อไซลอกเซนทำปฏิกิริยากับธาตุมูลฐานของซิลิโคนร่วมกับออกซิเจน แสดงได้ดังสมการที่ 3.17



3.8 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นจากผลของการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้า

คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของผิวยางซิลิโคนสามารถฟื้นกลับมาได้ ถ้าเป็นการสูญเสียแบบชั่วคราวซึ่งเป็นผลจากการเกิดดีสชาร์จแถบแห้งที่ผิว และฝนตกหนัก เป็นต้น ระดับการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดของดีสชาร์จที่ผิว ส่วนผสมของพอลิเมอร์ และเวลาที่ใช้ในการคืนตัว ยางซิลิโคนที่มีการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นจะพบว่า มีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำมันซิลิโคนเหนือชั้นคล้ายซิลิกา (SiO_x) ที่ผิว กลไกที่อาจเป็นไปได้ในการคืนตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของผิวยางซิลิโคนอาจประกอบด้วย

1. การจัดเรียงตัวกันใหม่ของกลุ่มเมทิล และ De-Oxidized Groups
2. การเคลื่อนที่ของ PDMS แบบน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW PDMS) จากเนื้อยางชั้นในไปที่ผิวชั้นนอก

พิจารณาการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นจะพบว่า ชั้นคล้ายซิลิกาที่เกิดขึ้นบนผิวเนื่องจากผลของดีสชาร์จที่ผิวสามารถต้านการเคลื่อนที่ของ LMW PDMS ไปยังผิวด้านบน แต่การแตกของชั้นคล้ายซิลิกาก็สามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อน LMW PDMS ไปยังผิวด้านบนได้

ด้วยเช่นกัน การเคลื่อนที่ของ LMW PDMS ที่ไปสู่ผิวหนังบนเชื่อว่าเป็นกลไกหลักในการฟื้นตัวของคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าจุดไหนเป็นขีดจำกัดของปริมาณ LMW PDMS ที่ผิวของยางซิลิโคน เนื่องจาก LMW PDMS เกิดจากการแตกตัวของพอลิเมอร์ (De-Polymerization) ในยางซิลิโคน

การเสื่อมถอยของผิวยางซิลิโคนในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากความร้อน เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีดีสารรั่วที่ผิว Kim et al. (1994) พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดดีสารรั่ว แถบแห้งที่ผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนอาจสูงถึง 3000°C ในระหว่างเกิดการเสื่อมถอยของผิวยางซิลิโคนเนื่องจากความร้อน จะทำให้เกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์และเชื่อมขวาง เกิดการแยกตัวของสายโซ่ข้างและเชื่อมขวางในสายโมเลกุลของ PDMS จะทำให้ผิวยางซิลิโคนสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น ส่วนการแตกตัวของพอลิเมอร์ในสายโมเลกุลของ PDMS จากความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้เกิดไซคลิกโอลิโกเมอร์ (Cyclic Oligomers) ขึ้น เมื่อมีการเสื่อมอายุทางความร้อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน เกิดการเชื่อมขวางของไซลอกเซน (Siloxane Crosslinking) จะเด่นกว่าเกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ โดย Doyle (1958) รายงานว่า การเสื่อมอายุทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ ในอากาศของยางซิลิโคน จะทำให้เกิดชั้นผิวแตกแบบเปราะ (Brittle Surface Layer) ที่ผิวเนื่องจากผลของการเชื่อมขวางของออกซิเจน (Oxidative Crosslinking)

3.9 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า อาทิเช่น โครงสร้างทั่วไปของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า การทำงานของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า การเลือกกับดักเสิร์จฟ้าผ่าเพื่อใช้งาน รวมถึงสาเหตุการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบโครงสร้างของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าและฉนวนยางซิลิโคนได้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจและทราบถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนของงานวิจัยมากที่สุด

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนพื้นผิวของยางซิลิโคน จึงมีความจำเป็นต้องจำลองสภาวะขึ้นมาเพื่อเร่งให้เกิดการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าให้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นการสร้างห้องทดสอบเพื่อจำลองสภาวะต่าง ๆ มีความจำเป็นต่อการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็น ฉนวนในกับดักเสริมไฟฟ้า

4.1 บทนำ

การสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสริมไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวoltage และการผุกร่อนบนผิวของซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวน มีขั้นตอนการออกแบบและการสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนดังนี้

4.2 การออกแบบห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวน ในกับดักเสริมไฟฟ้า

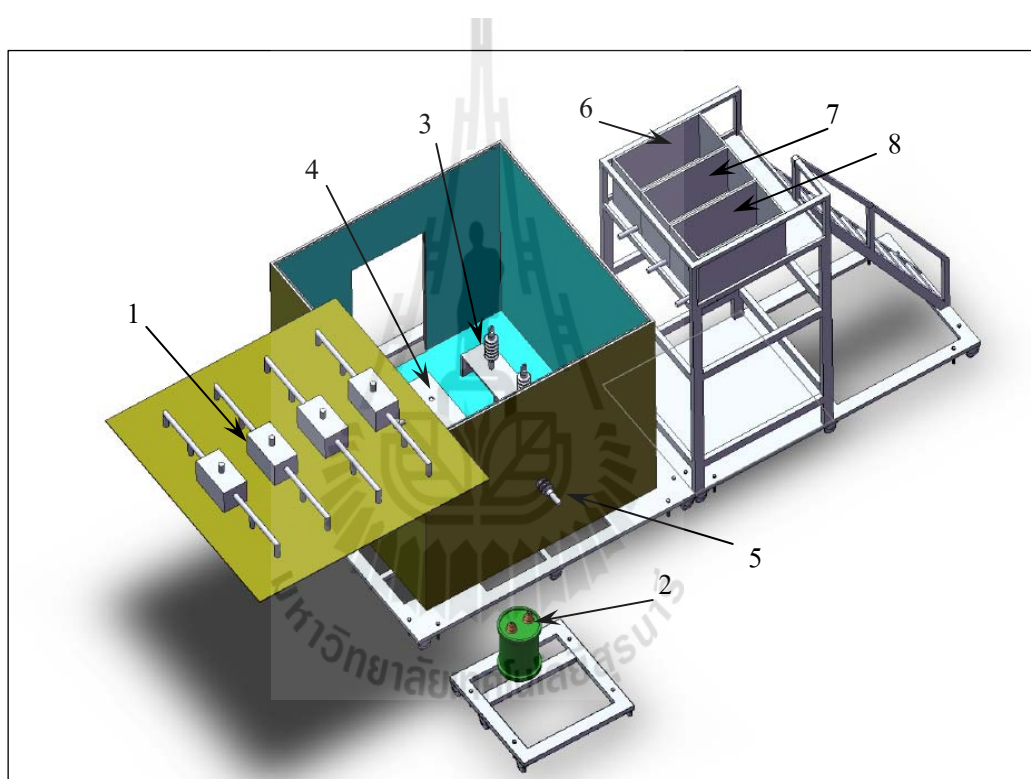
ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ออกแบบไว้ได้คำนึงถึงความแข็งแรงทางด้านโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน การนำไปใช้งานที่หลากหลายโดยสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่ทั้งนี้ห้องทดสอบต้องอ้างอิงโดยอาศัยการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 61109 จึงได้ออกแบบให้ห้องทดสอบมีปริมาตร 9.6 m³ (ในมาตรฐานระบุไว้ไม่เกิน 10 m³ สำหรับทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ) สามารถติดตั้งกับดักเสริมไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือได้สูงสุด 9 ตัว และการทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายได้สูงสุด 6 ตัว และรองรับการทดสอบกับดักเสริมไฟฟ้าระบบ 24 kV ห้องทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.1 และมีรายละเอียดห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนของกับดักเสริมไฟฟ้ามีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดชุดห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ได้ออกแบบไว้

หมายเลข	อุปกรณ์
1	อิมมิตาเตอร์สำหรับสร้างหมอก
2	หม้อแปลงไฟฟ้า
3	กับดักเสริมไฟฟ้าสำหรับระบบ 24 kV

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดชุดห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ได้ออกแบบไว้ (ต่อ)

หมายเลข	อุปกรณ์
4	ชุดฐานสำหรับติดตั้งกับดักเล็กรังไฟฟ้า
5	ปลอกฉนวนนำสายแรงดันสูง
6	ถังสำหรับใส่น้ำเกลือสำหรับสร้างหมอกไอเกลือ
7	ถังสำหรับใส่น้ำ DI สำหรับสร้างหมอกสะอาด
8	ถังสำหรับใส่น้ำสะอาดสำหรับทำฝน

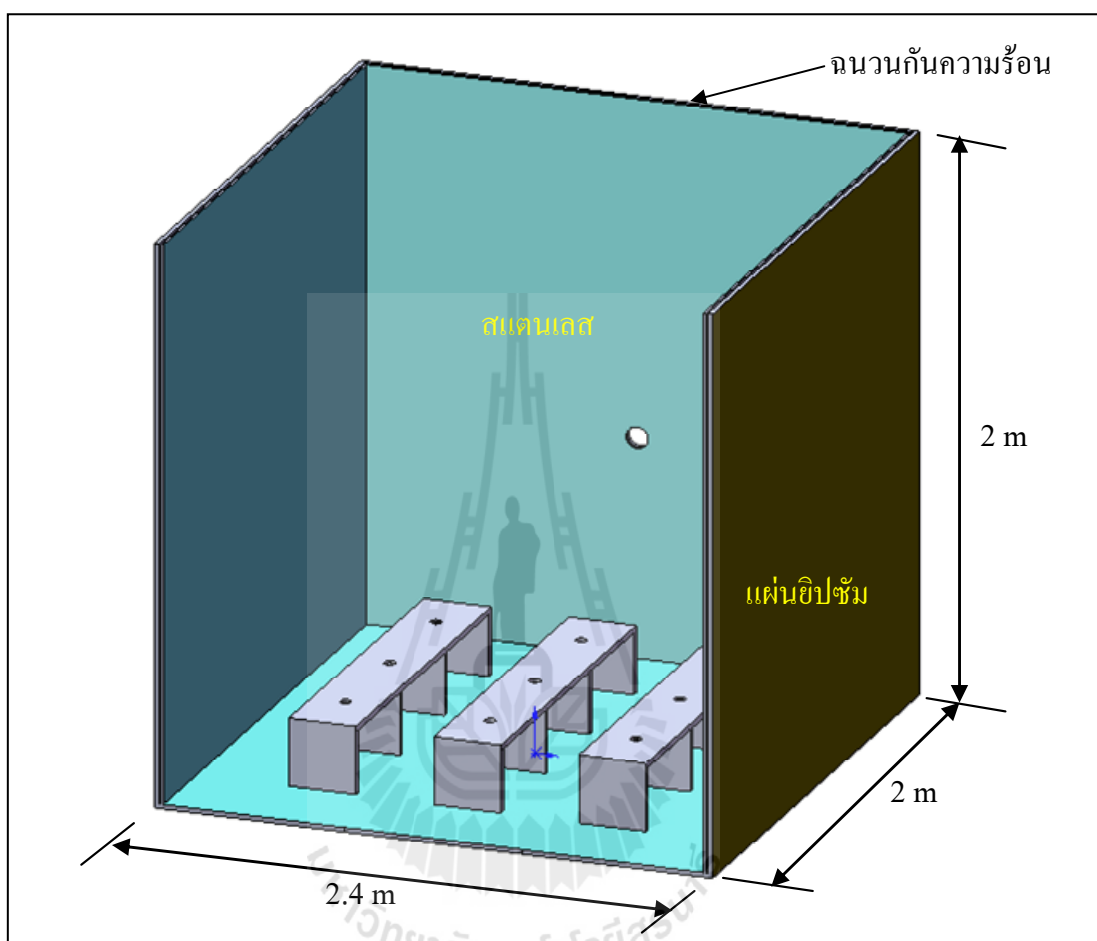


รูปที่ 4.1 แบบจำลองห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนของกับดักเล็กรังไฟฟ้า

4.2.1 โครงสร้างและรายละเอียดห้องทดสอบ

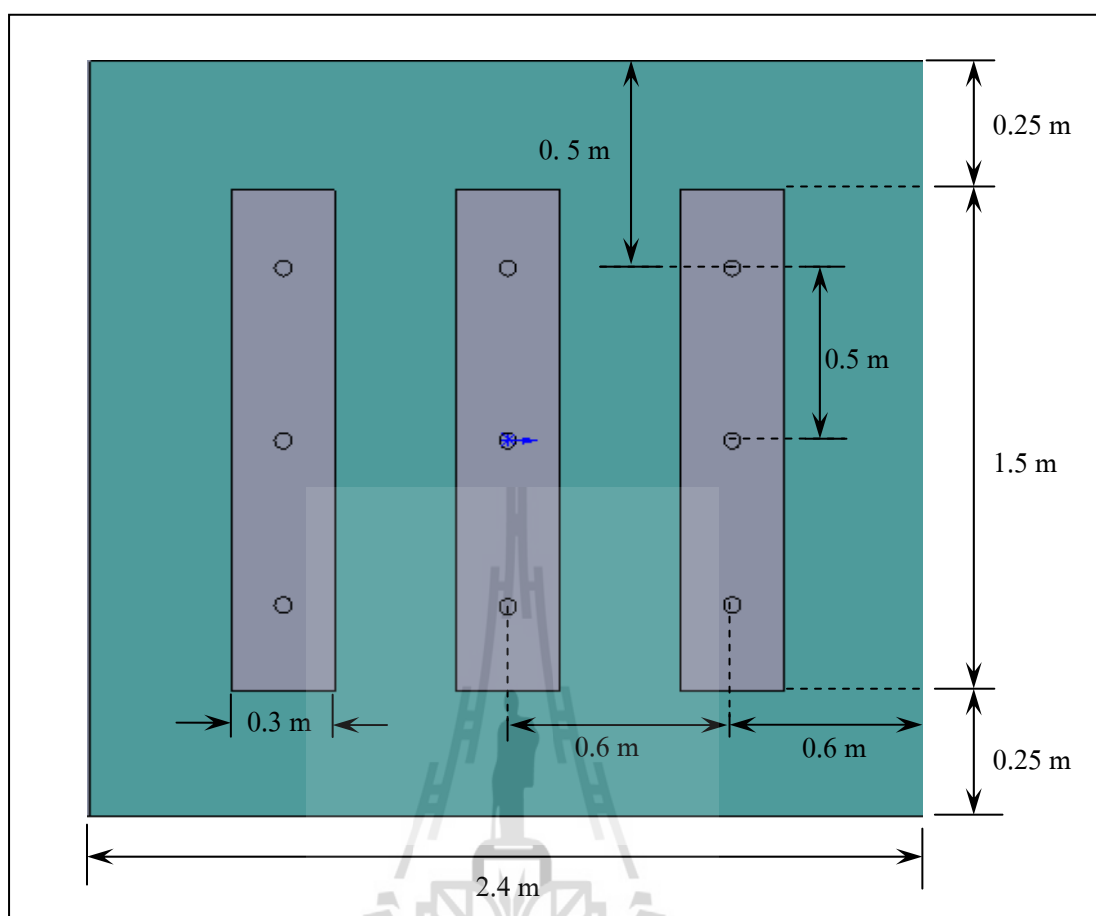
ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนจะทำการทดสอบในห้องทดสอบที่มีปริมาตร 9.6 m^3 ($2.4\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$) โดยใช้สแตนเลสหนา 3 mm สร้างขึ้นเป็นผิวชั้นใน เพื่อป้องกันการกักความร้อนจากหมอกไอเกลือที่ใช้ในการทดสอบ นำฉนวนกันความร้อนวาง

กันระหว่างแผ่นสแตนเลสและยิปซัมแผ่นเรียบ เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิขณะทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2



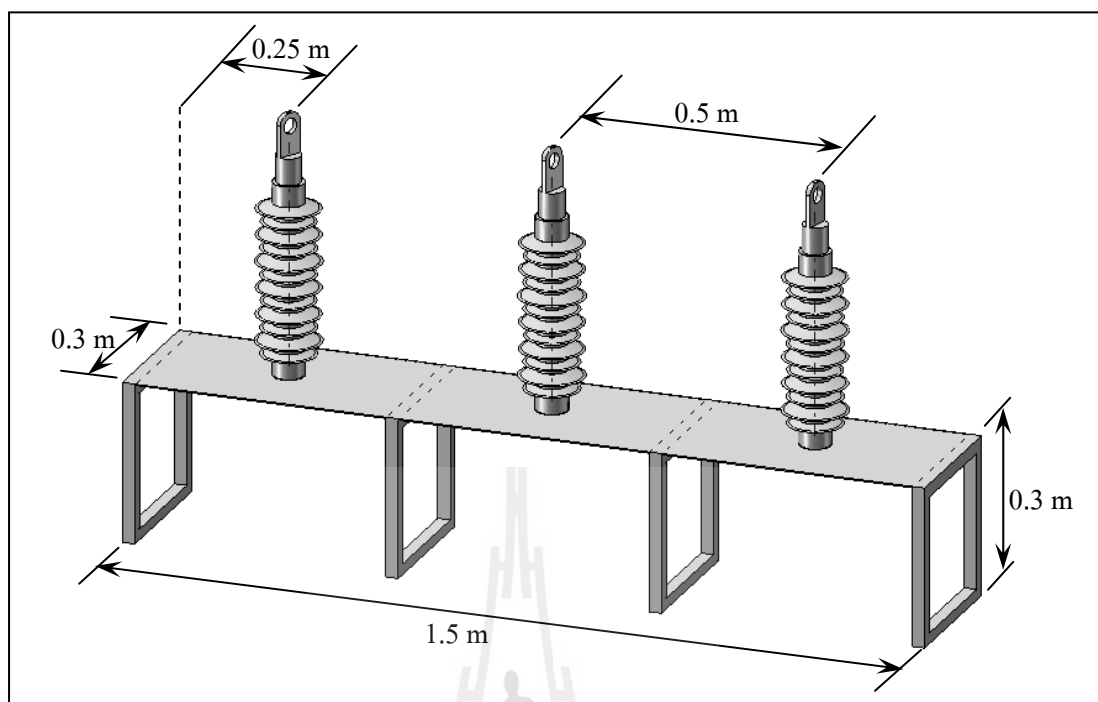
รูปที่ 4.2 ขนาดของทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ได้ออกแบบไว้

ชุดฐานสำหรับติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าทำจากสแตนเลสหนา 3 mm เช่นเดียวกัน ติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าได้ 3 ตัวต่อ 1 ฐาน ในกรณีทดสอบด้วยหมอกไอเกลือสามารถติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าได้สูงสุด 9 ตัว แต่ในกรณีทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าได้สูงสุด 6 ตัว เนื่องจากต้องติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเล็ต และฮีทเตอร์เพิ่มในห้องทดสอบรวมทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องระยะปลอดภัย (Clearance) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบเพื่อป้องกันการเกิดวาวไฟตามผิวระหว่างกับดักเสิร์จฟ้าผ่าเนื่องจากอากาศเป็นตัวนำ โดยมีระยะห่างระหว่างชุดฐานสำหรับติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าแต่ละชุดห่างกัน 60 cm จากจุดศูนย์กลางของฐานดังที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 4.3

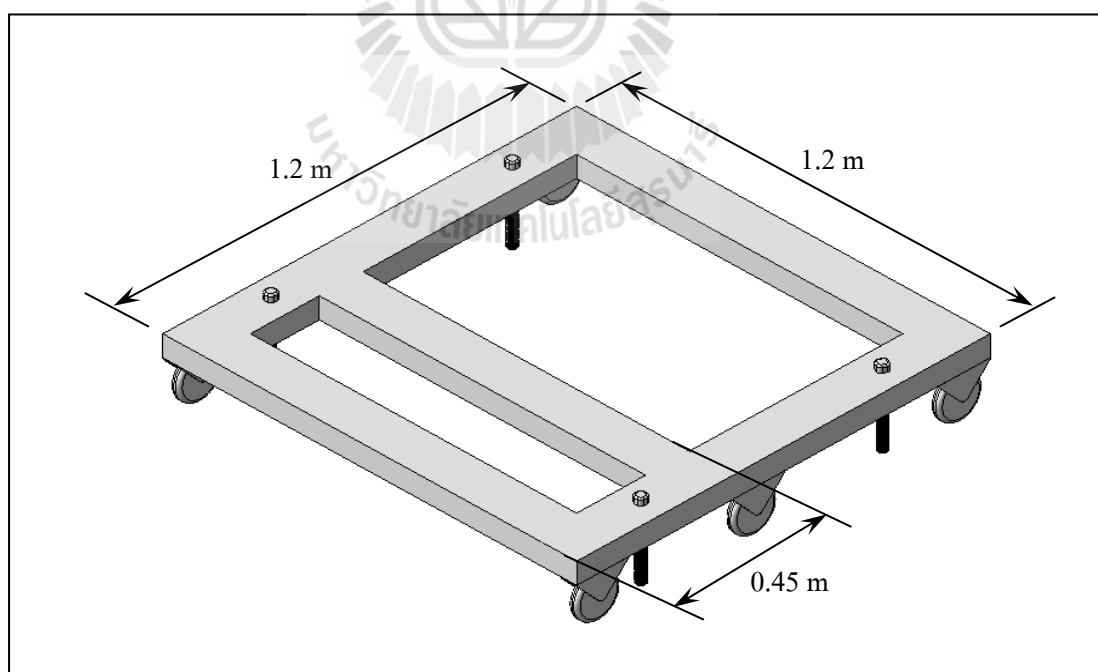


รูปที่ 4.3 การวางตำแหน่งของฐานสำหรับติดตั้งกับดักเสร็จไฟฟ้า
ตามที่ได้ออกแบบไว้ (Top View)

ความสูงของฐานที่ใช้ติดตั้งกับดักเสร็จไฟฟ้าสูงจากพื้นห้องทดสอบ 30 cm กว้าง 30 cm เช่นเดียวกัน ส่วนของขาตั้งทำจากสแตนเลสกล่องตัวสี่ขนาด 2 นิ้ว $\times$ 1 นิ้ว การติดตั้งกับดักเสร็จไฟฟ้าบนฐานให้มีระยะห่างระหว่างตัวกับดักเสร็จไฟฟ้าอยู่ที่ 50 cm จากจุดศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับฐานวางหม้อแปลงมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำจากเหล็กกล่องขนาด 5 นิ้ว $\times$ 2 นิ้ว กว้าง 1.2 m และยาว 1.2 m ทาพ่นด้วยสีกันสนิมเพื่อยืดอายุการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



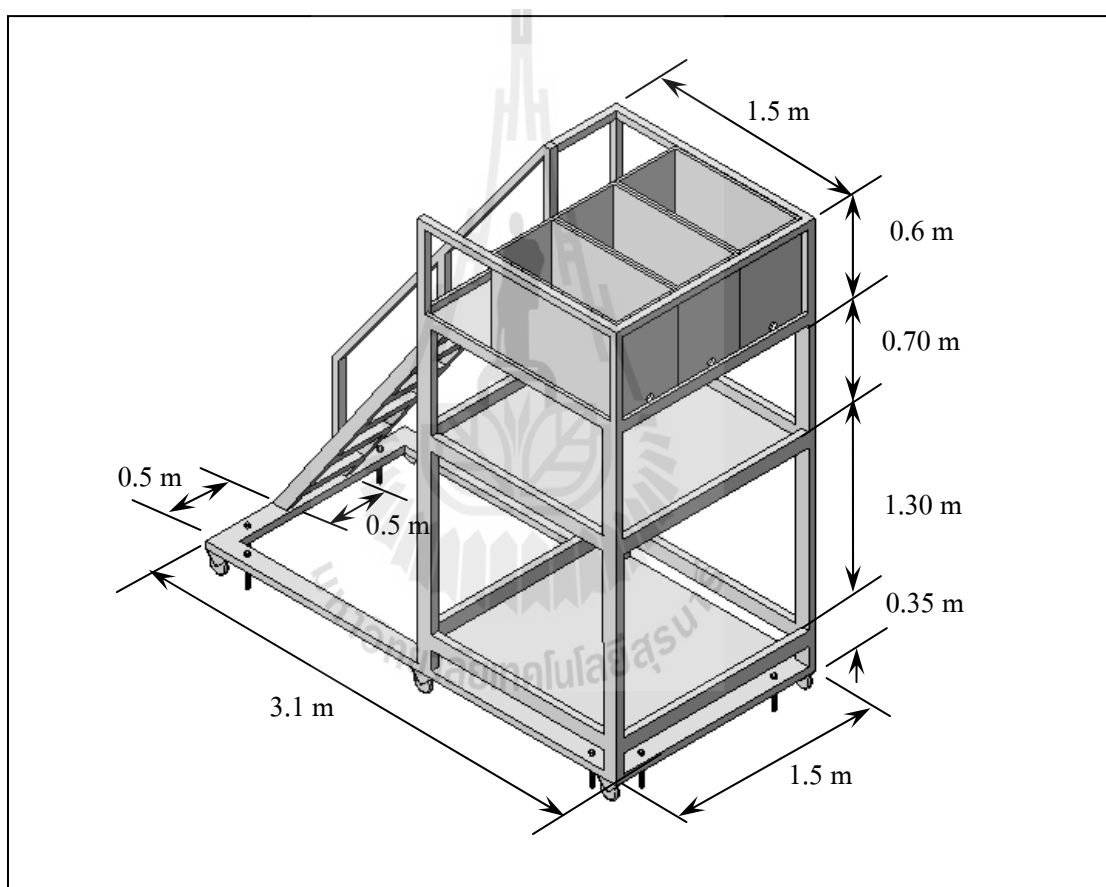
รูปที่ 4.4 ลักษณะการติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตามที่ได้ออกแบบไว้



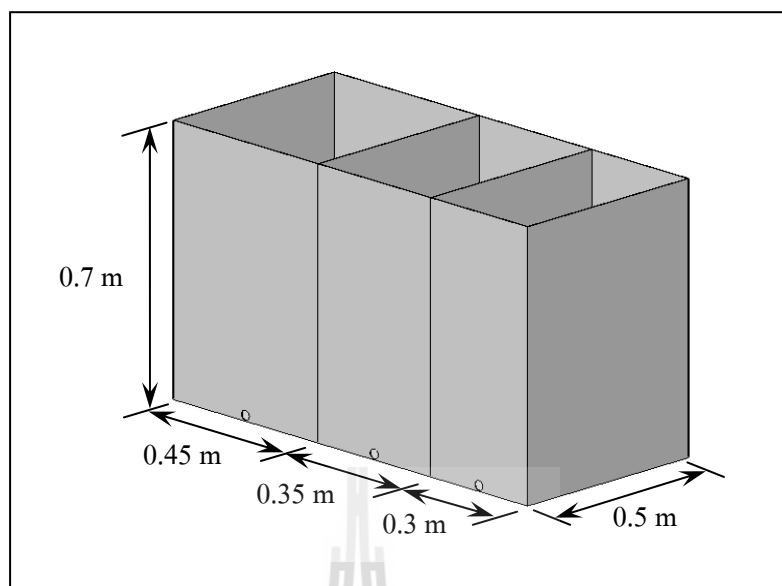
รูปที่ 4.5 ฐานสำหรับวางหม้อแปลงตามที่ได้ออกแบบไว้

4.2.2 โครงสร้างและรายละเอียดของชุดขาตั้งวางถังน้ำ

โครงสร้างส่วนใหญ่ของชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็ก กว้าง 3 นิ้ว $\times$ 3 นิ้ว กว้าง 1.5 m ยาว 3.1 m และมีความสูงจากพื้น 2.95 m ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ด้านบนสุดมีที่วางถังสำหรับบรรจุน้ำใช้ทำหมอก ขึ้นรูปด้วยแผ่นสแตนเลสหนา 3 mm แบ่งออกเป็น 3 ช่องโดยที่ช่องแรกกว้าง 0.45 m สำหรับใส่น้ำเกลือ ช่องที่สองกว้าง 0.35 m สำหรับใส่น้ำแยก ไอออน และช่องสุดท้ายกว้าง 0.3 m สำหรับใส่น้ำสะอาด เจาะรู้ด้านหน้าถึงทุกช่องมีขนาด 1 นิ้ว เพื่อต่อท่อไปยังเครื่องสร้างหมอกเทียมและท่อสำหรับทำฝนเทียมมีลักษณะดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 โครงสร้างชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.7 ถังสแตนเลสสามช่องสำหรับใส่น้ำ

จากการออกแบบโครงทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งในส่วนของห้องทดสอบ ชุดฐานสำหรับติดตั้งกับดักเล็รจไฟฟ้า ชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำต่าง ๆ รวมถึงที่สำหรับใส่น้ำเพื่อใช้ในการทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่มีบางส่วนที่ต้องปรับปรุงแก้ไขก่อนที่ใช้ทดสอบและยังได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้แก้ไขและเพิ่มเติมนั้นจะได้กล่าวอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.3 การสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเล็รจไฟฟ้า

ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนเป็นการจำลองสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนของกับดักเล็รจไฟฟ้า ใช้แหล่งจ่ายจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทำให้เกิดความเครียดทางสนามไฟฟ้าที่มากกว่าการทำงานในสภาวะปกติของกับดักเล็รจไฟฟ้าเป็นเวลานาน ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ห้องทดสอบพร้อมฐานติดตั้งกับดักเล็รจไฟฟ้า เครื่องสร้างหมอกเทียมพร้อมชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำ ชุดควบคุมหลอดอัลตราไวโอเลต และฮีเตอร์พร้อมวงจรควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

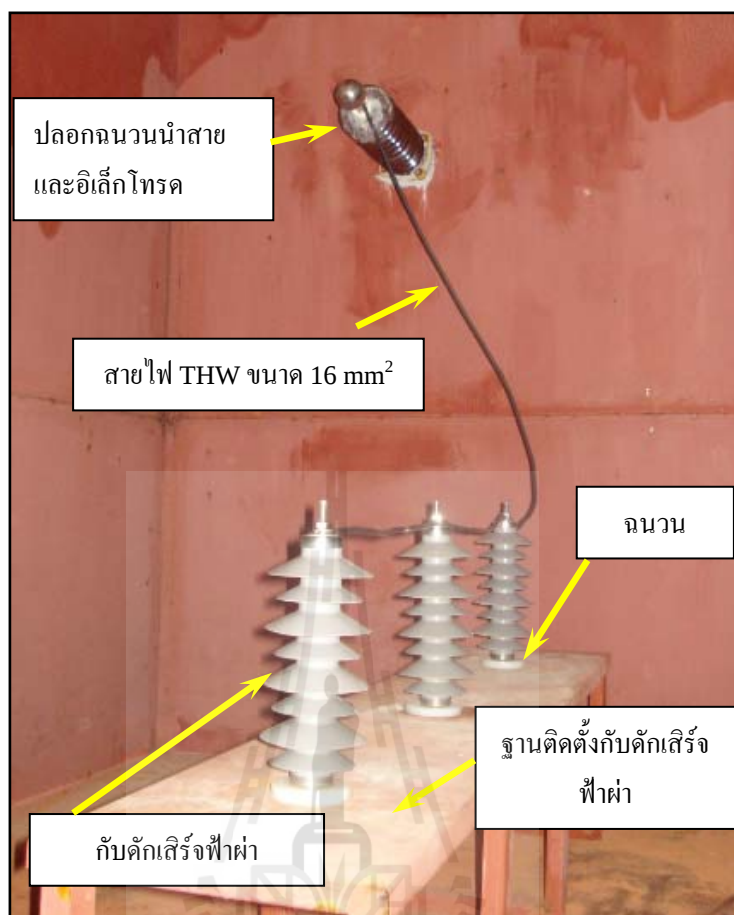
4.3.1 ห้องทดสอบพร้อมฐานติดตั้งกับดักเรย์ไฟฟ้า

โครงสร้างภายในของห้องทดสอบทำจากสแตนเลสหนา 3 mm มีปริมาตร 9.6 m³ ส่วนด้านนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแล้วปิดทับด้วยแผ่นยิปซัมรีดด้วยคานเหล็กกล่องเพื่อความแน่นหนา ประตูด้านหน้าห้องทดสอบเจาะช่องขนาด 60 cm × 60 cm ติดตั้งแผ่นอะคริลิกใสสำหรับสังเกตการเปลี่ยนแปลงภายในห้องทดสอบระหว่างการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะภายนอกของห้องทดสอบ

ฐานสำหรับติดตั้งกับดักเรย์ไฟฟ้าทำจากสแตนเลสมีความหนา 3 mm และได้ทำสีกันสนิมทับไว้อีกชั้นเพื่อยืดอายุการใช้งาน ภายในห้องทดสอบมีอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูงจากหม้อแปลง ใช้สายไฟ THW ขนาด 16 mm² เชื่อมต่อระหว่างตัวกับดักเรย์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ดังกล่าว การติดตั้งกับดักเรย์ไฟฟ้าบนฐานต้องมีฉนวนกันกระแทกไว้ระหว่างตัวกับดักและฐานเพื่อป้องกันกระแสที่เกิดจากการวาวไฟตามผิวสำหรับกรณีที่ต้องการวัดค่ากระแสรั่วดังแสดงในรูปที่ 4.9



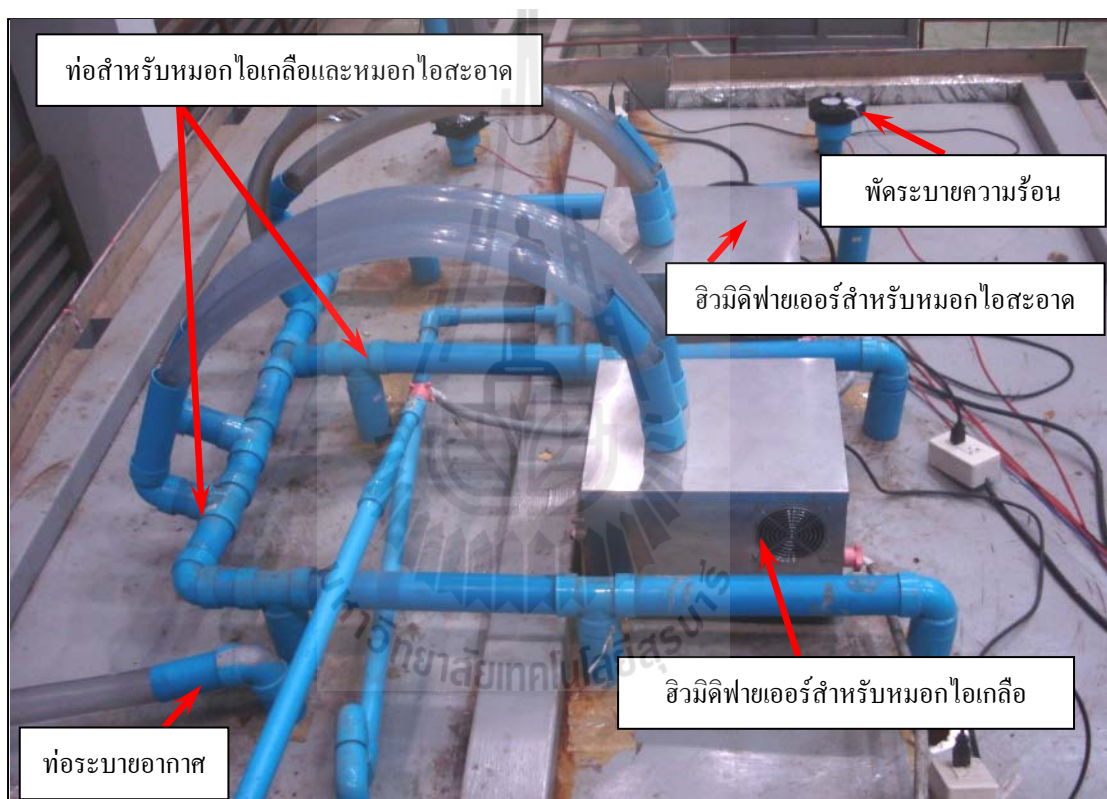
รูปที่ 4.9 ลักษณะการติดตั้งกับดักเล็กรังไฟฟ้าภายในห้องทดสอบ

4.3.2 เครื่องสร้างหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด พร้อมชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำ

หมอกไอเกลือที่ใช้ในการทดสอบถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องอัลตราโซนิกฮิวมิดิฟายเออร์ ซึ่งสามารถทำความชื้นได้มากถึง 99%RH การสร้างหมอกจากหัวอัลตราโซนิกด้วยความถี่สูงทำให้น้ำกลายเป็นละอองหมอกที่เล็กมากมีขนาดของละอองอยู่ที่ $7\ \mu\text{m}$ ละอองที่มีขนาดเล็กมากจะผสมกับอากาศได้ดี ทำให้ความชื้นในห้องทดสอบมีค่าตามที่มาตรฐานและใช้เวลาอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดไว้ กล่าวคือ ภายใน 15 นาทีความชื้นในห้องทดสอบต้องมีค่า 95%RH รวมทั้งอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ทำหมอกต้องอยู่ภายในมาตรฐาน $0.4 \pm 0.1\ \text{l/m}^3\text{h}$ น้ำเกลือที่ใช้ในการสร้างหมอกไอเกลือนั้นต้องใช้น้ำที่ผ่านการกรองแยกไอออน (De-ionize Water) ผสมกับเกลือ (NaCl) มีปริมาณอัตราส่วนของเกลือต่อน้ำคือ $10\ \text{kg/m}^3$ ($16000\ \mu\text{S/cm}$) และ $7\ \text{kg/m}^3$ ($10000\ \mu\text{S/cm}$) สำหรับการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายตามลำดับ สำหรับหมอกไอสะอาดใช้เครื่องฮิวมิดิฟายเออร์เช่นเดียวกัน น้ำที่ใช้สร้าง

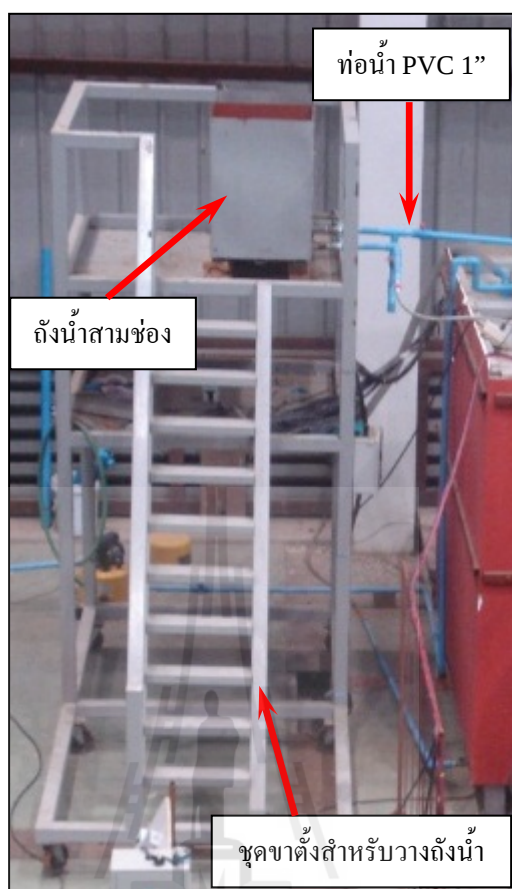
หมอกต้องผ่านการกรองแบบแยกไอออนเพื่อลดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำให้อยู่ในปริมาณที่ต่ำ (1-2 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

หลังการคำนวณของห้องทดสอบเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 12 ช่องเพื่อใช้ต่อท่อสำหรับปล่อยหมอก ท่อฝน และท่อระบายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในส่วนของท่อปล่อยหมอกสามารถใช้ช่องร่วมกันได้ เนื่องจากช่วงเวลาที่ปล่อยหมอกไอเกลือและหมอกไอสะอาดมีช่วงเวลาที่ไม่ตรงกัน และในช่วงที่ทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือใช้เครื่องชีวมิติฟายเออร์เพียงเครื่องเดียว



รูปที่ 4.10 การติดตั้งท่อและเครื่องทำหมอกด้านบนของห้องทดสอบ

ชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำได้สร้างตามทีออกแบบไว้โดยที่ถังน้ำแบ่งออกเป็นสามช่องสำหรับใส่น้ำเกลือ น้ำ D.I. และน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยต่อท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว จากตัวถังไปยังชีวมิติฟายเออร์ทั้ง 2 เครื่อง และ Rain Nozzle ดังแสดงในรูปที่ 4.11



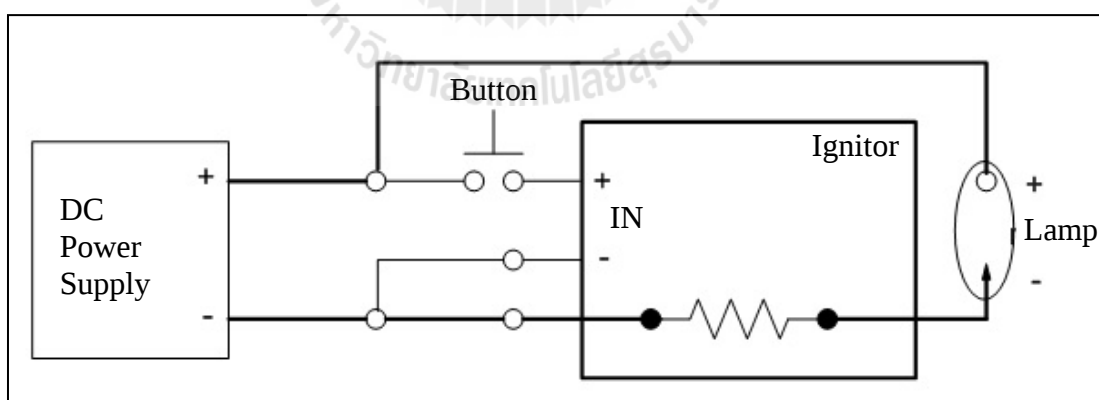
รูปที่ 4.11 ชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำ

4.3.3 ชุดควบคุมหลอดอัลตราไวโอเลต

ในการใช้งานจริงของกับดักเสริมไฟฟ้าผ่านนอกจากมลภาวะทางอากาศที่ต้องเจอแล้ว สิ่งหนึ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ก็คือรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์และที่เกิดจากการดีสชาร์จ ค่าความเข้มแสงของหลอดอัลตราไวโอเลตที่ใช้สำหรับทดสอบมีค่า 90 mW/cm^2 โดยใช้หลอด อัลตราไวโอเลตแบบ Xenon Arc Lamp ขนาด 3,000 W ครอบด้วยกระจกทนความร้อน เนื่องจาก ความร้อนจากหลอดมีอุณหภูมิสูงกว่า 300°C พร้อมทั้งต่อท่อติดตั้งพัดลมระบายความร้อนเพื่อ ป้องกันกระจกและตัวหลอดจากผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบทันทีทันใด (Thermal Shock) และยังป้องกันคราบสกปรกที่เกิดขึ้นจากการสะสมในขณะที่ทำการทดสอบ เพราะเมื่อผิว ของหลอดไฟมีความสกปรกมาก ๆ จะไม่สามารถดูดซับรังสีได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

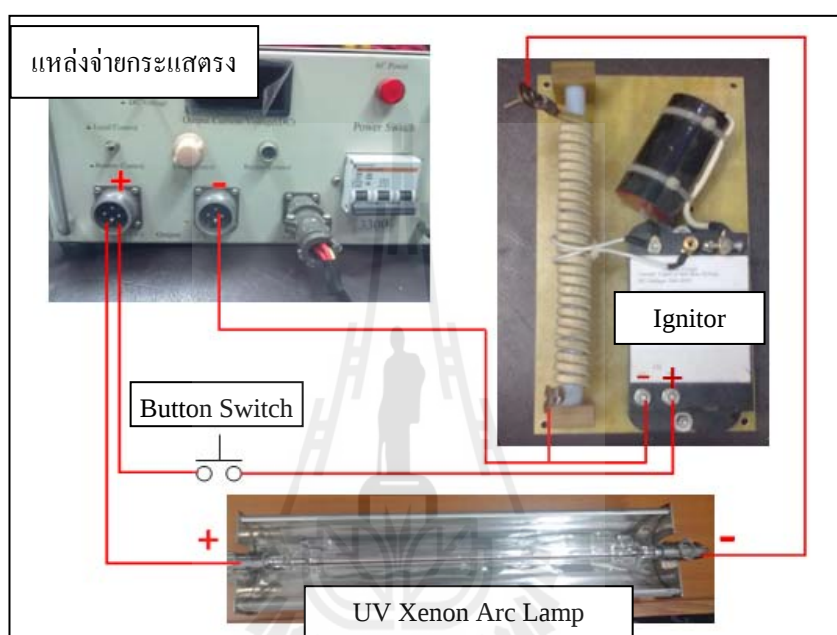


รูปที่ 4.12 หลอด Xenon Arc Lamp



รูปที่ 4.13 วงจรควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต

หลังจากเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงหลอดอัลตราไวโอเลตไม่สามารถติดได้ทันที เนื่องจากรูปทรงของท่ออาร์กที่เรียวยาว จึงต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สตาร์ทเตอร์ (Electronic Starter) ช่วยจุดหลอดเรียกว่าอิกไนเตอร์ (Ignitor) เพื่อจ่ายแรงดันสูง (High Voltage Pulse) ประมาณ 2.5-5 kV เข้าที่ตัวหลอด ทำให้แก๊สภายในเกิดการเบรกควาน์และสามารถสตาร์ทหลอดได้ โดยใช้วงจรในการควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 ชุดควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต

จากรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจุดหลอดอัลตราไวโอเลตโดยที่แหล่งจ่ายกระแสตรงมีพิกัดแรงดันอยู่ที่ 300 V_{dc}

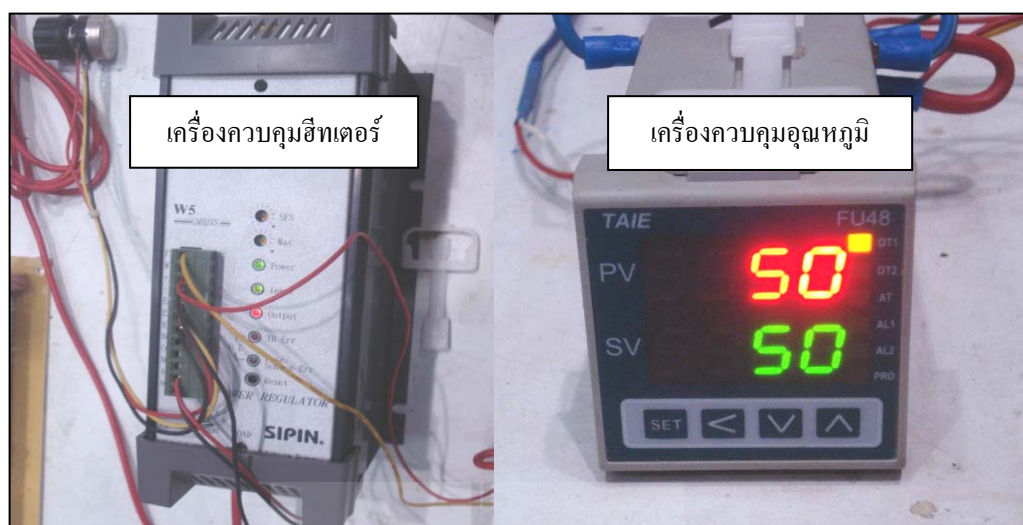
4.3.4 ฮีตเตอร์และวงจรควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบให้เป็นไปตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยใน 1 รอบการทดสอบ 24 ชั่วโมง ต้องควบคุมอุณหภูมิทั้ง 3 ช่วงให้อยู่ที่ 50 °C อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิล เครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องควบคุมฮีตเตอร์ (Thyristor Power Regulator: SCR) โดยฮีตเตอร์ทำหน้าที่ให้ความร้อนภายในห้องทดสอบเพื่อจำลองสภาวะความเครียดทางความร้อน ใช้ฮีตเตอร์ชนิดอินฟราเรดแบบเซรามิกขนาด 1,000 W ติดตั้งพร้อมชุดคอมต่อแบบขนานจำนวน 4 ชุด ที่ด้านบนของห้องทดสอบเพื่อการกระจายความร้อน

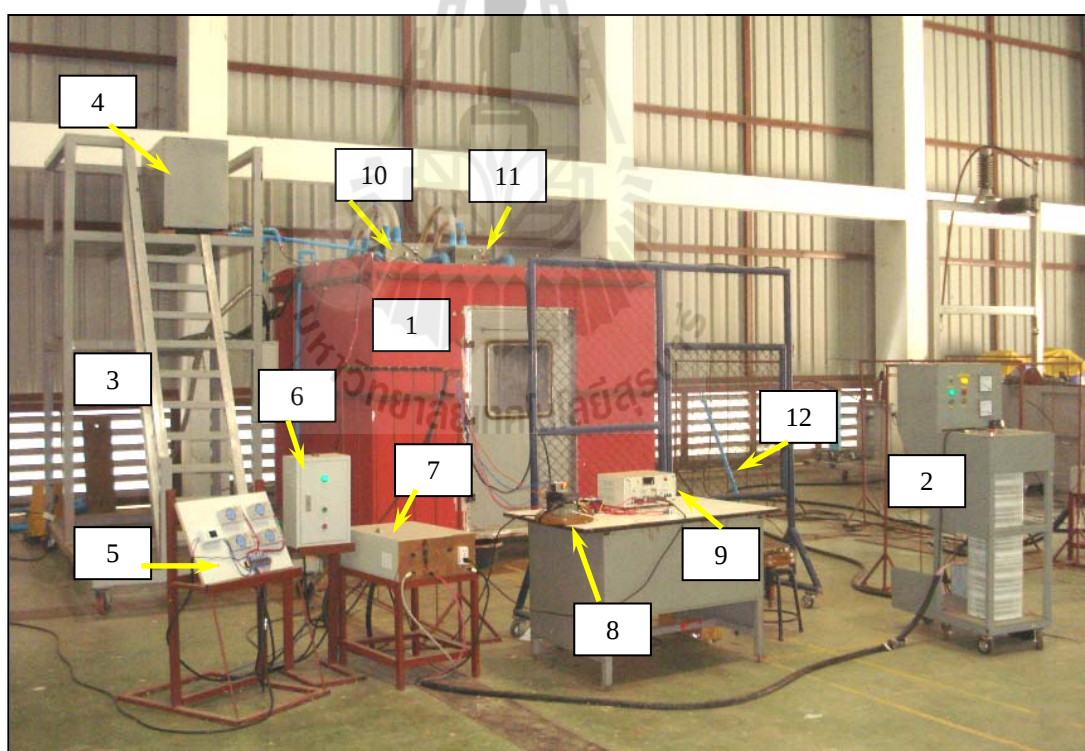
อย่างทั่วถึงโดยใช้สายไฟทนความร้อนขนาดหน้าตัด 8 mm² ร้อยผ่านท่อยางเพื่อยืดอายุการใช้งานของสายไฟอันเกิดจากการกัดกร่อนจากไอเกลือในขณะทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.15 เทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่ควบคุมวัดค่าอุณหภูมิภายในห้องทดสอบแล้วแสดงค่าของอุณหภูมิไปยังเครื่องควบคุมอุณหภูมิ การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับห้องทดสอบต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่มีความยาวแบบพิเศษทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี เมื่อเครื่องควบคุมอุณหภูมิรับสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลมาประมวลผล ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้โดยผ่านวงจรควบคุมฮีตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ฮีตเตอร์อินฟราเรดพร้อมชุดโคมและเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้ง

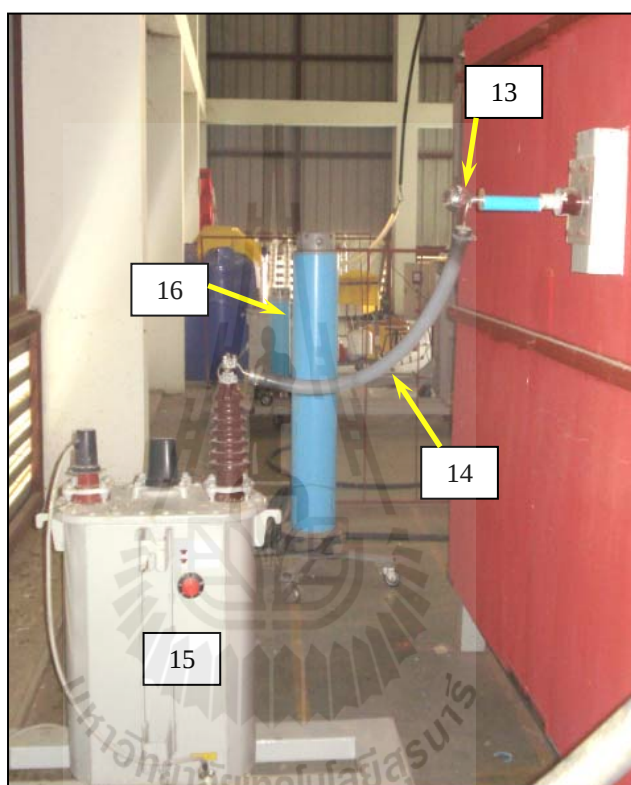


รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับฮีทเตอร์



รูปที่ 4.17 ห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสริมไฟฟ้า

หลังจากออกแบบห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนใน กับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ทำการสร้างห้องทดสอบขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำการทดสอบด้วยระบบแรงดันสูงกระแสสลับจากหม้อแปลงขนาด 24 kV และ 30 kVA และใช้ เครื่องควบคุมเวลา (Timer) ช่วยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำงานร่วมกันในขณะ ทดสอบแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.18 อุปกรณ์ด้านแรงสูงสำหรับการทดสอบ

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ชุดห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็น ฉนวนในกับดักเสิร์จฟ้าผ่ามีรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จฟ้าผ่านนวนางซิลิโคน
ที่ติดตั้งจริง

หมายเลข	อุปกรณ์
1	ห้องทดสอบขนาด 9.6 m ³
2	วาไรแอคขนาด 220 V 30 kVA
3	ชุดขาตั้งสำหรับวางถังน้ำ
4	ถังสำหรับใส่น้ำใช้ในการทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 ช่อง
5	แผงวงจรควบคุมเวลา
6	ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
7	ตู้ MCB
8	เครื่องควบคุมฮีตเตอร์
9	เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงขนาด 380 V
10	เครื่องสร้างหมอกไอเกลือ
11	เครื่องสร้างหมอกไอสะอาด
12	ตะขอกวาด
13	อิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เชื่อมต่อกับปลอกถนวนนำสายแรงสูงภายในห้องทดสอบ
14	ตัวต้านทานน้ำ
15	หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 22 kV 30 kVA
16	ตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ

ระบบวัดแรงสูงจากหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุได้ผ่านการปรับเทียบค่าความเที่ยงตรงในการวัดด้วยระบบโวลเตจไดวิเดอร์อ้างอิง (Reference Voltage Divider) ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่กับดักเสิร์จฟ้าเพื่อทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจึงมีค่าตรงตามการทดสอบที่กำหนดไว้

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสิร์จฟ้าผ่าซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบห้องทดสอบด้วยโปรแกรม

คอมพิวเตอร์ และการสร้างห้องทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบขึ้นเป็นห้องทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตามมาตรฐาน

หลังจากสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนขึ้นแล้ว ได้มีการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ และจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับจำลองสภาวะการเร่งการเสื่อมอายุโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 61109 - 1992 ซึ่งกล่าวในบทถัดไป



บทที่ 5

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

5.1 บทนำ

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสริมไฟฟ้า ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้า และการผุกร่อนบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคน การทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 - 1992 โดยมีรายละเอียดของมาตรฐานสำหรับการทดสอบ และการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบไว้ดังนี้

5.2 มาตรฐาน IEC Publ. 61109

การทดสอบแรงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้มาตรฐานการทดสอบ IEC Publ. 61109 - 1992 ถูกออกแบบให้ทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนที่มีระยะห่างตามผิวฉนวนตั้งแต่ 484 ถึง 693 mm ต้องเป็นลูกถ้วยที่มาจากกระบวนการผลิตโดยตรงและยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อน หากลูกถ้วยฉนวนจากกระบวนการผลิตที่ต้องการนำมาทดสอบมีระยะห่างตามผิวฉนวนเกินกว่าที่กำหนดไว้ จำเป็นต้องสร้างชิ้นงานแบบพิเศษเพื่อทำการทดสอบ โดยต้องตัดตัวลูกถ้วยฉนวนเพื่อให้ได้ระยะห่างตามผิวฉนวนอยู่ในระหว่างค่าที่กำหนดไว้ พร้อมทั้งติดตั้ง Metal Fitting ทั้ง 2 ด้านตามมาตรฐาน

ในการทดสอบแรงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนเป็นลักษณะการทดสอบด้วยการจำกัดเวลา ต้องทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องภายใต้หมอกไอเกลือ แรงดันทดสอบต้องคงที่ระหว่าง 14 kV ถึง 20 kV โดยที่แรงดันทดสอบสามารถคำนวณได้จากระยะห่างตามผิวฉนวนหารด้วย 34.6 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้จากหม้อแปลงแรงดันสูงที่มีความต้านทานกระแสไม่เกิน 250 mA

หมอกไอเกลือที่ใช้ทดสอบมาจากน้ำแยกไอออนผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ผ่านเข้าเครื่อง อีวีมิคิฟายเออร์เพื่อสร้างเป็นหมอก ละอองของหมอกที่ได้จากเครื่องนี้มีขนาดเล็กมากอยู่ที่ $7\ \mu\text{m}$ โดยฉีดพ่นหมอกไอเกลือวันละ 8 ชั่วโมง หลังจากเริ่มฉีดพ่นหมอกภายใน 15 นาที ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต้องมีค่าอยู่ที่ 95%

5.2.1 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยหมอกไอเกลือ (Salt Fog Ageing Test) ต้องทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ลักษณะการทดสอบ คือ ป้อนแรงดันไฟฟ้าตลอดการทดสอบพร้อมทั้งฉีดพ่นหมอกไอเกลือต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นหยุดฉีดพ่นหมอกไอเกลือ 16 ชั่วโมง จนครบ 1,000 ชั่วโมง โดยในระหว่างการทดสอบต้องเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 Clause 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยหมอกไอเกลือ

ข้อกำหนด	IEC Publ. 61109	การทดสอบจริง
ขนาดห้องทดสอบสูงสุด	10 m ³	9.6 m ³
ช่วงระยะเวลาในการทดสอบ	1,000 ชั่วโมง	1,000 ชั่วโมง
ความเครียดทางไฟฟ้า	34.6 mm/kV	34.6 mm/kV
แรงดันทดสอบอยู่ในช่วง	14 – 20 kV	18 - 19.2 kV
อัตราการไหลของน้ำในการสร้างหมอก	0.4 ± 0.1 l/m ³ h	0.5 l/m ³ h
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ	10 kg/m ³	10 kg/m ³
ขนาดของละอองหมอก	5-10 µm	7 µm
อุณหภูมิ	20 °C ± 5 K	อุณหภูมิห้อง

5.2.2 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลาย

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลาย (Multi-Stress Ageing Test) เป็นการทดสอบการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนโครงหุ้ม ลักษณะการทดสอบมีความคล้ายกับการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ สิ่งที่แตกต่างนอกจากเวลาที่ใช้ทดสอบ 5,000 ชั่วโมง ยังประกอบด้วยการจำลองสถานะความเครียดต่าง ๆ ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเลต ความร้อน ฝน และหมอกไอสะอาด ซึ่งใน 1 รอบของการทดสอบตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 Annex C ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ข้อกำหนดในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยการจำลอง
สภาวะความเครียดที่หลากหลาย

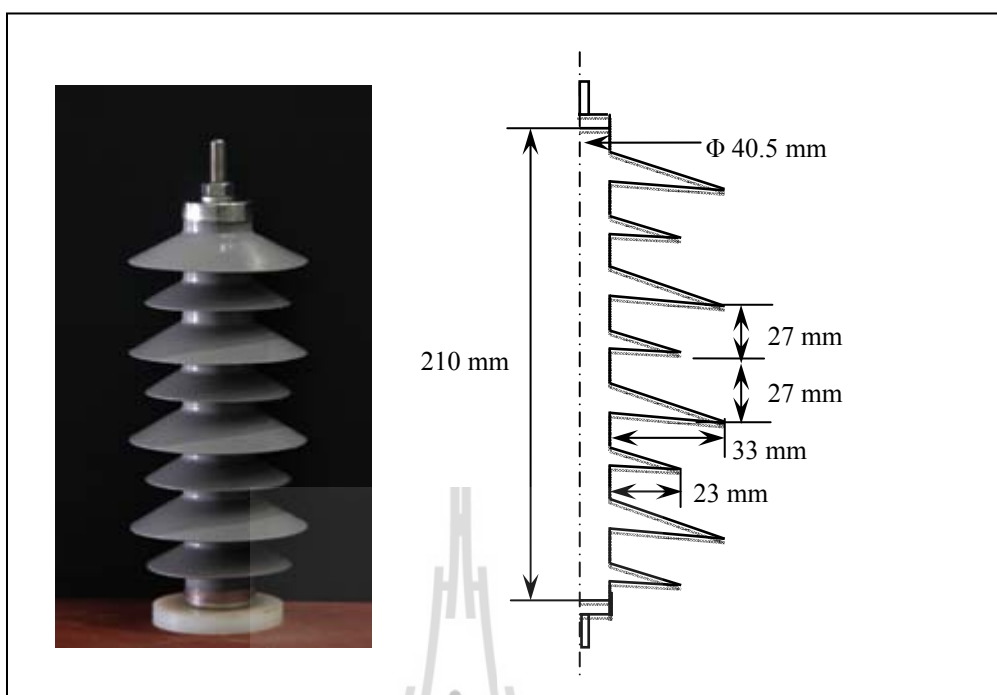
ข้อกำหนด	IEC Publ. 61109	การทดสอบจริง
ช่วงระยะเวลาในการทดสอบ	5,000 ชั่วโมง	1,000 ชั่วโมง
ความเครียดทางไฟฟ้า	34.6 mm/kV	34.6 mm/kV
ขนาดของละอองหมอก	5-10 μm	7 μm
อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ	50 °C	50 °C
อัตราการไหลของน้ำในการสร้างหมอก	0.4 $\pm$ 0.1 l/m ³ h	0.5 l/m ³ h
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ	7 kg/m ³	7 kg/m ³
อุณหภูมิปกติอยู่ในช่วง	15-25 °C	อุณหภูมิห้อง
ความเข้มแสงอัลตราไวโอเลต	90 mW/cm ²	90 mW/cm ²

5.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

ในการวิจัยนี้เป็นการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนโดยการจำลองสภาวะความเครียดของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ติดตั้งตามชายฝั่งทะเล โดยจ่ายแรงดันสูงตลอดเวลาพร้อมทั้งฉีดพ่นหมอกไอเกลือวันละ 8 ชั่วโมง โดยใช้ระยะเวลาทดสอบทั้งสิ้น 1,000 ชั่วโมง ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC Publ. 61109

ก่อนการทดสอบต้องเช็ดทำความสะอาดกับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 100 % เพื่อล้างคราบสกปรกต่าง ๆ ที่เกาะอยู่ตามผิวฉนวนยางซิลิโคน เพราะคราบของสิ่งสกปรกเหล่านี้ อาจทำให้เกิดวบไฟตามผิวฉนวนขึ้นกว่าปกติ

จากรูปที่ 5.1 แสดงถึงรายละเอียดของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ มีระยะห่างตามผิวฉนวน 625 mm เป็นกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะที่มีฉนวนโครงหุ้มเป็นยางซิลิโคนสำหรับระบบ 24 kV ของบริษัท ฟรีไซซ์ อิเลคตริก แมนูแฟกเจอร์ จำกัด



รูปที่ 5.1 กั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่าสำหรัระบบ 24 kV

5.4 วิธีทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนทั้ง 2 วิธีคือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนของกั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่า ได้ทำการทดสอบในห้องทดสอบที่มีปริมาตร 9.6 m^3

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนแต่ละรอบใช้กั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่าจำนวน 3 ตัว โดยจ่ายแรงดันด้านขั้วสัมผัส (HV - Energized) ผ่านสาย THW ขนาด 16 mm^2 จากปลอกฉนวนนำสายภายในห้องทดสอบมายังกั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่า โดยวางกั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่าทับบนฉนวนยึดติดกับชุดฐานติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.2 และจัดตำแหน่งชุดฐานให้ได้ระยะตามที่ออกแบบไว้ ห่างจากผนังหน้าและหลังด้านละ 25 cm ห่างจากผนังซ้ายและขวาด้านละ 105 cm โดยวัดจากขอบนอกสุดของชุดฐานติดตั้งกั๊บดักเสีร้งฟ้าผ่า



รูปที่ 5.2 การติดตั้งกั๊บดักเสิร์จฟ้าผ่าสำหรับทดสอบ

เมื่อทำการติดตั้งกั๊บดักฟ้าไว้บนชุดฐานเรียบร้อยแล้ว เริ่มจ่ายแรงดันทดสอบให้กับกั๊บดักเสิร์จฟ้าผ่า โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบด้วยแรงดันมาตรฐานและการทดสอบด้วยแรงดันใช้งานจริง โดยที่แรงดันทดสอบมาตรฐานอ้างอิงจากค่าความเครียดทางไฟฟ้า 34.6 mm/kV ของระยะห่างตามผิวฉนวน สำหรับการทดสอบด้วยแรงดันใช้งานจริงอยู่ที่ $0.8U_r$ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบกั๊บดักเสิร์จฟ้าผ่า

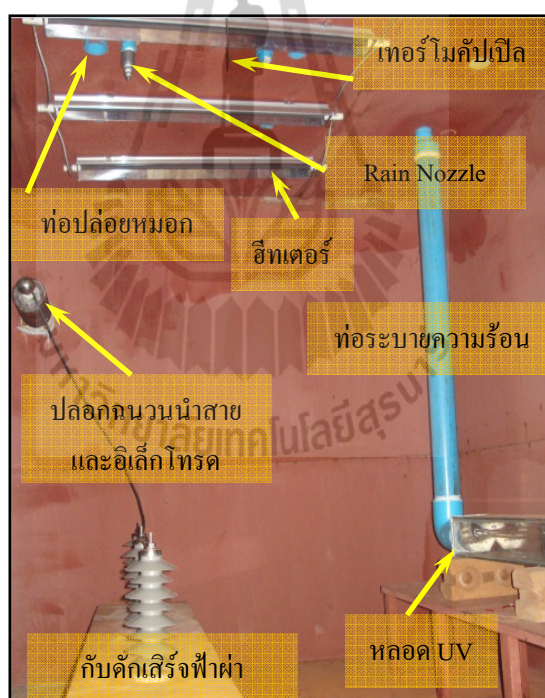
การทดสอบ	Voltage Stress	แรงดันทดสอบ
รอบที่ 1 Salt Fog Test	34.6 mm/kV	18.0 kV
รอบที่ 2 Salt Fog Test	$0.8U_r$ ($U_r = 24$ kV)	19.2 kV
รอบที่ 3 Multi-Stress Test	$0.8U_r$ ($U_r = 24$ kV)	19.2 kV

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลโคนด้วยหมอกไอเกลือใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง มีวงรอบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ

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

จากตารางที่ 5.4 ใน 1 รอบการทดสอบมี 24 ชั่วโมง โดยทำการฉีดพ่นหมอกไอเกลืออย่างต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยุดฉีดพ่นหมอก 16 ชั่วโมง จึงกลับมาฉีดพ่นหมอกอีกครั้ง การทดสอบจะดำเนินเช่นนี้ไปจนครบ 1,000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียด

สำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลโคนด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย นอกจากแรงดันทดสอบที่จ่ายอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา 19.2 kV แล้วยังประกอบด้วยหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด ความร้อน ฝน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต สภาวะแวดล้อมเหล่านี้ล้วน

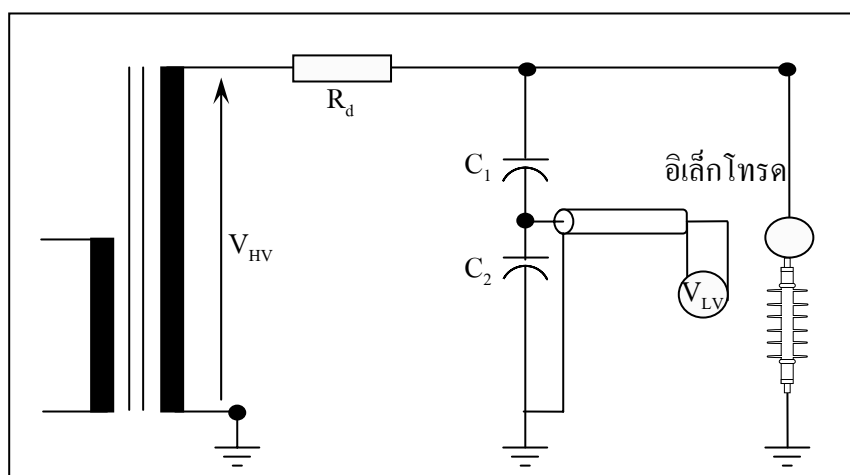
ถูกจำลองขึ้นภายใน 1 รอบการทดสอบ โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ในห้องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.3 แต่เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้การทดสอบดังกล่าวทำการทดสอบต่อเนื่องเพียงแค่ 1,000 ชั่วโมงเท่านั้น เพื่อทำการทดสอบระบบของห้องทดสอบและอุปกรณ์ที่ประกอบไว้ในห้องและยืนยันว่าห้องสอบนี้สามารถทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสร็จได้

ตารางที่ 5.5 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย

ช่วงระยะเวลา (ชั่วโมง)	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
แรงดันทดสอบ												
ฝน												
หมอกไอสะอาด												
ความร้อน												
หมอกไอเกลือ												
แสง UV												

จากตารางที่ 5.5 สามารถสรุปได้ว่า ก่อนฉีดพ่นหมอกไอเกลือต้องฉีดพ่นหมอกไอสะอาดก่อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงฉีดพ่นหมอกไอเกลือต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สำหรับฝนใช้หัว Nozzle รุ่น SSXP ฉีดวันละ 2 ชั่วโมง พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิให้ได้ 50°C และความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตอยู่ที่ 90 mW/cm^2

จากวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.4 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับให้กับดักเสร็จไฟฟ้าในขณะทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใช้วาระแอคควบคุมแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ ส่วนด้านแรงดันแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบถูกวัดด้วยชุดแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ โดยการแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันสูงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1



รูปที่ 5.4 วงจรทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

$$V_{HV} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_{LV} \quad (5.1)$$

โดยที่ C_1 คือ ตัวเก็บประจุขนาด 346 pF
 C_2 คือ ตัวเก็บประจุขนาด 347.3 nF
 V_{HV} คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)
 V_{LV} คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงถูกแบ่งเป็นแรงต่ำด้วยสมการที่ 5.1 ดังนั้นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ จึงสามารถกำหนดได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำจากการคำนวณ จากนั้นใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐานเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายเข้ากับชุดทดสอบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เป็นจริงตามที่ต้องการ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำที่ได้จากการคำนวณและปรับเทียบให้ได้ตามมาตรฐานสำหรับใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนจึงมีค่าดังที่แสดงในตาราง 5.6

ตารางที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

การทดสอบ	แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ	แรงดันต่ำที่ได้จากการแบ่งแรงดันตัวเก็บประจุ
รอบที่ 1 Salt Fog Test	18.0 kV	17.91 V
รอบที่ 2 Salt Fog Test	19.2 kV	19.11 V
รอบที่ 3 Multi-Stress Test	19.2 kV	19.11 V

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในกับดักเสริมฟ้าผ่า ซึ่งประกอบด้วยมาตรฐานการทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 61109 - 1992 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ หลังจากเตรียมการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้มีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อกับดักเสริมฟ้าผ่าที่มีฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนได้รับการทดสอบเป็นที่เรียบร้อย จึงนำฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนของกับดักเสริมฟ้าผ่าที่ผ่านการทดสอบมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมีโดยจะขอกกล่าวในบทที่ 6 ถัดไป

บทที่ 6

ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

6.1 บทนำ

จากบทที่ 5 ได้กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็รจไฟฟ้า และได้ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ เช่น การวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้น การวัดความแข็งและการวัดความขรุขระของผิวฉนวนยางซิลิโคน นอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ FTIR โดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ได้ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุและฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน หลักการตรวจสอบและผลการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็รจไฟฟ้าด้วยการจำลองหมอกไอเกลือ และการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายโดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของผิวฉนวนยางซิลิโคนที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดทางด้านวิศวกรรมเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยมีวิธีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงดังนี้

6.2.1 การสังเกต

การสังเกต (Visual Observation) เป็นการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนว่ามีลักษณะของการเสื่อมสภาพแบบใดเกิดขึ้นบ้างในระหว่างการทดสอบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบรวมกับการวิเคราะห์ทางกายภาพอื่น ๆ ต่อไป

ในระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในกับดักไฟฟ้าระบบ 24 kV ทั้งการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ได้มีการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น โดยแสงที่มีลักษณะเป็นเส้นสีม่วงคือโคโรนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้น และแสงสีส้มที่เกิดขึ้นคืออาร์กแถบแห้ง ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิขึ้นบนฉนวนขางซิลิโคนสำหรับกับดักเสีร็จ

		โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิขึ้นบนฉนวนขางซิลิโคนสำหรับกับดักเสีร็จไฟฟ้าระบบ 24 kV ทดสอบด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV
		โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิขึ้นบนฉนวนขางซิลิโคนสำหรับกับดักเสีร็จไฟฟ้าระบบ 24 kV ทดสอบด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV
		โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิขึ้นบนฉนวนขางซิลิโคนสำหรับกับดักเสีร็จไฟฟ้าระบบ 24 kV ทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV

จากตารางที่ 6.1 โครนาดีสชาร์จและอาร์กแถบที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคนจากทั้ง 3 การทดสอบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากความร้อนที่เกิดจากกระแสรั่วไหล เพราะอุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นบนฉนวนยางซิลิโคนจะมีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส โดยบริเวณคอคอดของตัวกับดักเสิร์จฟ้าผ่าจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของฉนวนยางซิลิโคนตรงบริเวณนั้นแห้งก่อนและมีลักษณะแห้งเป็นพื้นที่แคบ ๆ กินพื้นที่ไม่มาก มีความกว้างประมาณ 1-2 mm เรียกพื้นที่บริเวณนี้ว่าแถบแห้ง บริเวณแถบแห้งนี้มีความต้านทานสูงไม่สามารถนำกระแสได้จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมพื้นที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณนั้นมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งจะเกิดเบรกดาวนของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและโครนาดีสชาร์จขึ้น และถ้าบริเวณพื้นที่แถบแห้งหลาย ๆ ส่วนอยู่ใกล้กันแล้วโอกาสที่จะเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนยางซิลิโคนจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อกับดักเสิร์จฟ้าผ่าถูกทดสอบเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ความรุนแรงของการเกิดโครนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งจึงมีมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อฉนวนยางซิลิโคนทำให้เกิดการเปลี่ยนขึ้นบนพื้นผิวของซิลิโคนทางด้านกายภาพดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฉนวนยางซิลิโคนหลังจากการทดสอบ



ก. แรงดันทดสอบ 18 kV



ข. แรงดันทดสอบ 19.2 kV

รูปที่ 6.2 ลักษณะของฟิวजनยางซิลิโคนหลังจากการทดสอบ

จากรูปที่ 6.2 ลักษณะของการกัดกร่อน (Erosion) ที่เกิดขึ้นบริเวณคอคอดใต้ปีก และบริเวณลำตัวฉนวน (Trunk) ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าจากการทดสอบแรงเสียดทานด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบกระแสสลับ 18 kV และ 19.2 kV การกัดกร่อนบริเวณฉนวนมีสาเหตุมาจากความเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนฉนวนของซิลิโคนในระหว่างการทดสอบ จึงทำให้สภาพค่าความนำไฟฟ้าที่ฉนวนของซิลิโคนเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากขึ้น

สำหรับการทดสอบแรงการเสียดทานของฉนวนของซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายโดยการทดสอบด้วยแรงดัน 19.2 kV พบว่าเกิดการกัดกร่อนขึ้นบริเวณลำตัวฉนวนเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ แต่มีความรุนแรงไม่มาก เนื่องจากในขณะที่เกิดการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อน ก็จะมีฝนจำลองตกลงมาชะล้างทำให้การสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนน้อยลง นอกจากการกัดกร่อนแล้วยังพบว่ามีร่องรอยผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟที่เกิดขึ้นตรงบริเวณตะเข็บของตัวฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งสาเหตุของการเกิดร่องรอยผิวเสื่อมสภาพ อาจเกิดจากการเบรกดาวน์อากาศคร่อมระหว่างแถบแห้งหลาย ๆ จุด จึงทำให้เกิดการวบไฟตามผิว (Flashover) ถักร่องรอยผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟตามผิวมีความลึกมากจนถึงแกนฉนวนภายใน ก็อาจส่งผลให้กับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าทำงานผิดพลาด จนนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าได้



รูปที่ 6.3 ร่องรอยผิวเสื่อมสภาพจากวบไฟตามผิว

6.2.2 ระดับความเปื้อน

การเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของกับดักเสริมฟ้าผ่า ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากความเปื้อนบนผิวของฉนวนยางซิลิโคน เนื่องจากสิ่งเปื้อนที่อยู่บนผิวของฉนวนยางซิลิโคนนั้น อาจมีสารประกอบจากมลภาวะต่าง ๆ เช่น ฝุ่น ไขมัน เกลือจากทะเล หรือสิ่งอื่น ๆ ซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติของความเป็นฉนวนลดลง เมื่อสิ่งเปื้อนเหล่านี้อยู่ในลักษณะแห้งยังคงสภาพความเป็นฉนวนอยู่จึงไม่ทำให้เกิดการวาบไฟบนผิวฉนวนได้ แต่เมื่อสิ่งเปื้อนเหล่านี้อยู่ในลักษณะที่เปียกก็จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นตัวนำทำให้เกิดการวาบไฟตามบริเวณพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนได้

ระดับของความเปื้อน (Contamination Degree) ตามมาตรฐาน IEC 815 สามารถแบ่งออกเป็น 4 ระดับตามสภาพพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 การแบ่งแยกระดับความเปื้อนตามลักษณะพื้นที่

ระดับของความเปื้อน	พื้นที่
1. เล็กน้อย (Light)	บริเวณที่มีความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรมหรือที่อยู่อาศัยน้อย ต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกบ่อย หรือบริเวณเขตเกษตรกรรม พื้นที่เหล่านี้ต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลระหว่าง 10 – 20 km และต้องไม่ได้รับผลจากลมทะเลโดยตรง
2. ปานกลาง (Medium)	บริเวณที่เป็นเขตอุตสาหกรรมหรือเขตชุมชนหนาแน่นแต่ต้องมีลมพัดหรือฝนตกบ่อย ๆ หรืออาจเป็นบริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่านแต่ต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร
3. สูง (Heavy)	บริเวณที่เป็นเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือเขตชานเมืองที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง หรือบริเวณที่อยู่ใกล้ชายทะเลและได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรง
4. สูงมาก (Very heavy)	บริเวณที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากฝุ่นควันของโรงงานอุตสาหกรรม หรือบริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งมาก ๆ โดยรับเอาสิ่งเปื้อนที่พัดมาจากลมทะเลมีทั้งทรายและไอเกลือเข้ามา และเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก

วิธีการตรวจวัดและคำนวณค่าความเปรอะเปื้อนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ผ่านการทดสอบแล้วสามารถหาได้จากวิเคราะห์ค่าสมมูลความหนาแน่นของเกลือ (Salt Deposit Density: SDD) ตามมาตรฐาน IEC Publ. 60507 โดยมีขั้นตอนการวัดความเปรอะเปื้อนดังนี้

1) หลังจากทดสอบแรงการเสื่อมอายุของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าแล้วให้นำออกมาจากชุดฐานติดตั้ง โดยระวังอย่าให้มีการสัมผัสกับผิวฉนวนยางซิลิโคนหรือสัมผัสให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

2) ใช้ถ้วยตวงน้ำกลั่นปริมาตร 300 cm³ โดยที่น้ำกลั่นต้องมีค่าความนำไฟฟ้าน้อยกว่า 10 μs/cm นำสำลีสะอาดจุ่มลงไปใต้น้ำกลั่นแล้วบีบน้ำออกจากสำลี จากนั้นจึงนำมาทำความสะอาดฉนวนยางซิลิโคนให้ทั่ว ในขณะที่ทำความสะอาดนั้นต้องสวมถุงมืออย่างด้วย

3) นำสำลีกลับไปจุ่มน้ำและเขย่าเพื่อให้สิ่งเปรอะเปื้อนที่ติดอยู่หลุดออกมาแล้วบีบน้ำออกอีกครั้งก่อนนำไปเช็ดฉนวนยางซิลิโคน ให้ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกับดักเสิร์จฟ้าผ่าสะอาดไม่มีสิ่งเปรอะเปื้อนเหลืออยู่บนผิวฉนวนยางซิลิโคน (ยกเว้นส่วนที่เป็นโลหะไม่ต้องทำความสะอาด)

4) คนน้ำกลั่นและสิ่งที่เจือปนให้ละลายเข้ากันก่อนใช้มิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำกลั่นและจดบันทึก

เมื่อวัดค่าความนำไฟฟ้าได้แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณโดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อ θ คือ อุณหภูมิของสารละลาย (°C)
 σ_{θ} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ θ °C (S/m)
 σ_{20} คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20 °C (S/m)
 b คือ ค่าตัวประกอบแปรผันตามอุณหภูมิของสารละลาย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.2

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

จากนั้นหาค่าความเข้มข้นของเกลือจากสมการที่ 6.3 และสามารถคำนวณ SDD ได้จากสมการที่ 6.4 ดังนี้

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

เมื่อ S_a คือ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (mg/cm^3)

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

เมื่อ SDD คือ ค่าความหนาแน่นของเกลือ (mg/cm^2)

V คือ ปริมาณของสารละลายใช้ทำความสะอาด (cm^3)

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบ (cm^2)

โดยที่พื้นที่ผิวของฉนวนยางซิลิโคนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้ทดสอบมีค่า $2,354.27 \text{ cm}^2$

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของเกลือได้ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการคำนวณ SDD ที่ได้จากการทดสอบ

รูปแบบที่ใช้ในการทดสอบ	SDD (mg/cm^2)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
ทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ ใช้แรงดันทดสอบ 18 kV	0.2626	0.2636	0.2118
ทดสอบด้วยหมอกไอเกลือ ใช้แรงดันทดสอบ 19.2 kV	0.0463	0.0473	0.0473
ทดสอบด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ใช้แรงดันทดสอบ 19.2 kV	0.0435	0.0451	0.0441

ผลจากการคำนวณค่า SDD จากตารางที่ 6.3 พบว่าผลจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV มีค่าสูงกว่าการทดสอบสองรอบถัดมา เนื่องจากในระหว่างการทดสอบเกิดสนิมขึ้นภายในห้องทดสอบตรงบริเวณรอยเชื่อมระหว่างแผ่นสแตนเลสและภายในถังที่บรรจุน้ำเกลือจึงทำให้มีคราบสกปรกปนเปื้อนมากกว่าที่ควรเป็นส่งผลให้ค่า SDD สูงตามขึ้น เมื่อทราบสาเหตุของปัญหาดังกล่าวจึงทาสีกันสนิมทับในบริเวณพื้นที่นั้นก่อนทดสอบรอบต่อไป

สำหรับค่า SDD จากการทดสอบแรงการเสื่อมอายุภายใต้แรงดันทดสอบ 19.2 kV ทั้งหมดไอเกลือและการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่า SDD จากการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบในตำแหน่งเทคนิคที่ 3 เนื่องจากการทดสอบทุก ๆ วันต้องมีฝนที่จำลองจากสภาวะแวดล้อมจริงตกลงมาชะล้างสิ่งเปรอะเปื้อนตามเนื้อฉนวน แต่ก็ไม่สามารถทำให้สะอาดได้ทั้งหมดเพราะช่วงบริเวณคอคอดและพื้นที่ใต้ปีกเป็นตำแหน่งที่ละอองฝนไม่สามารถเข้าถึงจึงมีการฝังตัวของสิ่งเปรอะเปื้อนอยู่ ซึ่งบริเวณดังกล่าวสามารถพบร่องรอยของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน

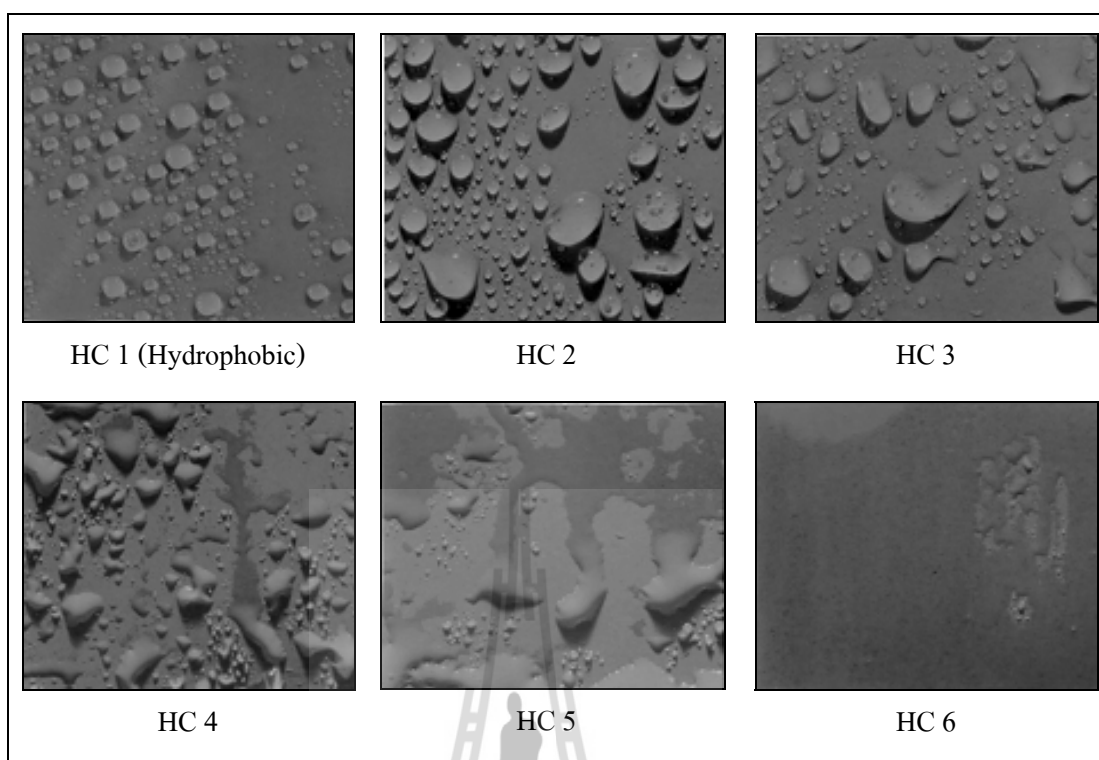
ตารางที่ 6.4 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน

ระดับของความเปรอะเปื้อน	SDD (mg/cm ²)	
	มาตรฐาน IEEE	มาตรฐาน IEC
น้อยมาก	น้อยกว่า 0.03	-
เล็กน้อย	0.03-0.06	0.03-0.06
ปานกลาง	0.06-0.10	0.10-0.20
สูง	มากกว่า 0.10	0.30-0.60
สูงมาก	-	มากกว่า 0.60

จากตารางที่ 6.4 แสดงให้เห็นถึงเกณฑ์ในการแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน โดยอ้างอิงข้อมูลการวัดค่า SDD สำหรับระบบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของประเทศไทยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE แบ่งออกเป็น 4 ระดับเรียงจากน้อยไปมากดังแสดงในตารางข้างต้น

6.2.3 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (Hydrophobic Surface Property) ของยางซิลิโคนเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่มเมทิล ซึ่งในสภาวะปกติจะเรียงตัวแบบชี้ออกที่ผิวด้านบนจึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเป็นผิวแบบหยดน้ำลื่น เมื่อพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนมีการปนเปื้อนและอยู่ภายใต้ความเครียดของสนามไฟฟ้า เป็นเหตุทำให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ และค่าความต้านทานบนพื้นผิวฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลง สาเหตุเหล่านี้เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นสามารถจำแนกออกเป็น 7 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ลักษณะตัวอย่างของคุณสมบัติผิวหยดน้ำ HC 1-HC 6 (หมายเหตุ ระดับ HC 7 มีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำทั่วบริเวณพื้นผิว)

จากรูปที่ 6.4 การจำแนกประเภทของคุณสมบัติหยดน้ำสามารถจำแนกออก เป็น 7 ประเภทตามมาตรฐาน STRI โดยระดับต่ำสุด HC 1 คือพื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างสมบูรณ์ ไปจนถึงระดับ HC 7 คือ พื้นผิวสามารถเปียกน้ำได้ง่าย โดยข้อกำหนดในการทดสอบเพื่อแบ่ง เกณฑ์คุณสมบัติผิวหยดน้ำดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 การทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำตามมาตรฐาน STRI Guide 92/1

พื้นที่ทดสอบ	50-100 cm ³
ระยะห่างของละอองน้ำ	25 ± 10 cm จากพื้นที่ทดสอบ
ลักษณะการพ่นละอองน้ำ	1-2 ครั้ง/วินาที
ระยะเวลาในการพ่นละอองน้ำ	20-30 วินาที
เวลาในการจำแนกประเภท	ภายในเวลา 10 วินาที หลังจากพ่นละอองน้ำ

หลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ผลการจำแนกคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนโดยเปรียบเทียบระหว่างฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบและยังไม่ผ่านการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 และ รูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 ลักษณะของคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นของฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

จากรูปที่ 6.6 สามารถจำแนกลักษณะของคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV ได้ดังตารางที่ 6.6 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน STRI ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ดังนี้



ตัวที่ 1



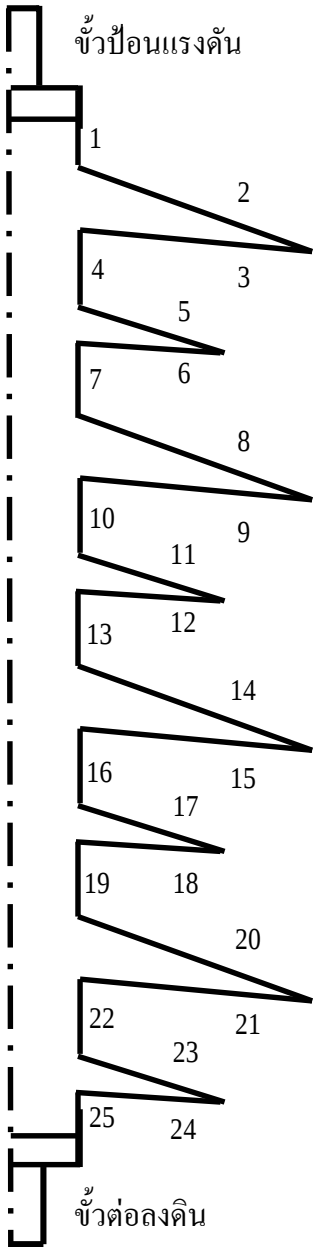
ตัวที่ 2



ตัวที่ 3

รูปที่ 6.6 ลักษณะผิวหยดน้ำส่นบนผิวฉนวนขางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1

ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหอยน้ำล้นหลังการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	ระดับผิวหอยน้ำล้น				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
2	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
3	HC 1	HC 2	HC 2	HC 2	
4	HC 1	HC 2	HC 3	HC 3	
5	HC 1	HC 2	HC 2	HC 3	
6	HC 1	HC 1	HC 1	HC 2	
7	HC 1	HC 2	HC 3	HC 2	
8	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
9	HC 1	HC 3	HC 2	HC 3	
10	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
11	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
12	HC 1	HC 1	HC 2	HC 1	
13	HC 1	HC 2	HC 3	HC 2	
14	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
15	HC 1	HC 1	HC 1	HC 2	
16	HC 1	HC 2	HC 3	HC 2	
17	HC 1	HC 2	HC 2	HC 2	
18	HC 1	HC 1	HC 1	HC 1	
19	HC 1	HC 2	HC 3	HC 3	
20	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
21	HC 1	HC 1	HC 1	HC 2	
22	HC 1	HC 2	HC 2	HC 3	
23	HC 1	HC 2	HC 2	HC 3	
24	HC 1	HC 1	HC 1	HC 2	
25	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	

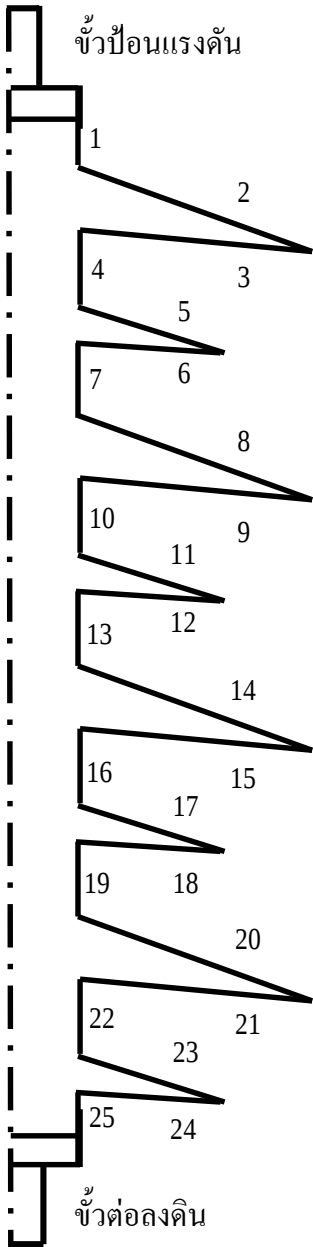
จากตารางผลการทดสอบที่ 6.6 ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นมากที่สุดคือตำแหน่งที่ 1 2 และ 25 รวมถึงช่วงระหว่างตำแหน่งที่ 8 – 11 โดยอยู่ในระหว่าง HC 3 ถึง HC 4 สำหรับบริเวณใต้ปีกใหญ่และปีกเล็กคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นยังมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักโดยอยู่ในช่วง HC 1 ถึง HC 2 จากผลการทดสอบสรุปได้ว่ากับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV เป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นหลังจากการทดสอบยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

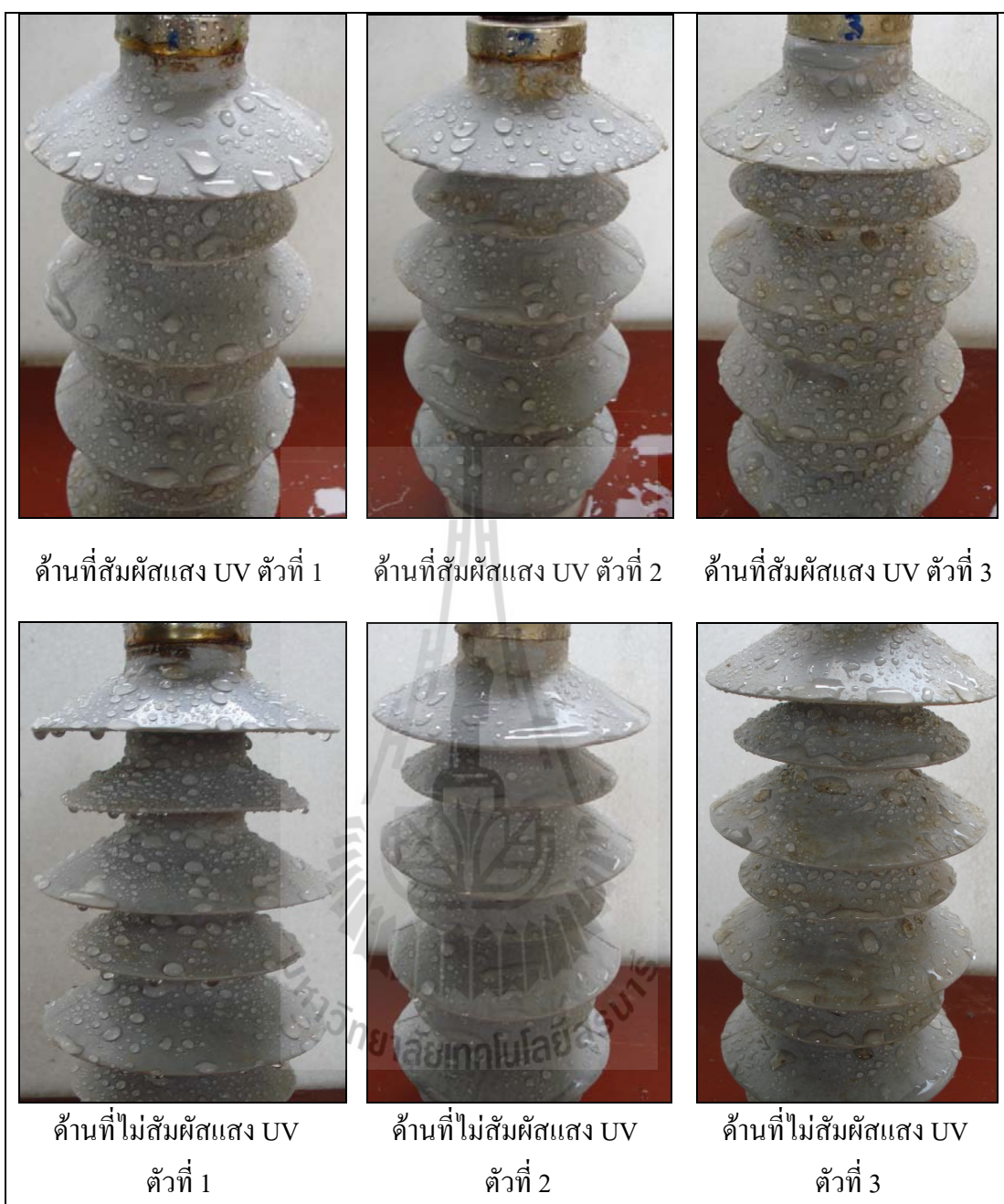


รูปที่ 6.7 ลักษณะผิวหยดน้ำขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2

จากรูปที่ 6.7 สามารถจำแนกลักษณะของคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 19.2 kV ซึ่งเป็นแรงดันสำหรับใช้งานจริงได้ดังตารางที่ 6.7 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน STRI ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 จากตารางที่ 6.7 หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแล้วพบว่าคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของฉนวนยางซิลิโคนอยู่ในช่วง CH 3 ถึง CH 5 ซึ่งบริเวณตำแหน่งลำตัวฉนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าอยู่ในระดับ CH 5 เกือบทั้งหมดและบริเวณตำแหน่งใต้ปีกใหญ่และปีกเล็ก

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหอยคนน้ำขึ้นหลังการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	ระดับผิวหอยคนน้ำขึ้น				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	HC 1	HC 4	HC 4	HC 3	
2	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
3	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
4	HC 1	HC 4	HC 4	HC 3	
5	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
6	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
7	HC 1	HC 5	HC 5	HC 3	
8	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
9	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
10	HC 1	HC 5	HC 5	HC 5	
11	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
12	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
13	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
14	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
15	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
16	HC 1	HC 5	HC 5	HC 4	
17	HC 1	HC 4	HC 5	HC 5	
18	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
19	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
20	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
21	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
22	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
23	HC 1	HC 4	HC 4	HC 3	
24	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
25	HC 1	HC 4	HC 5	HC 3	



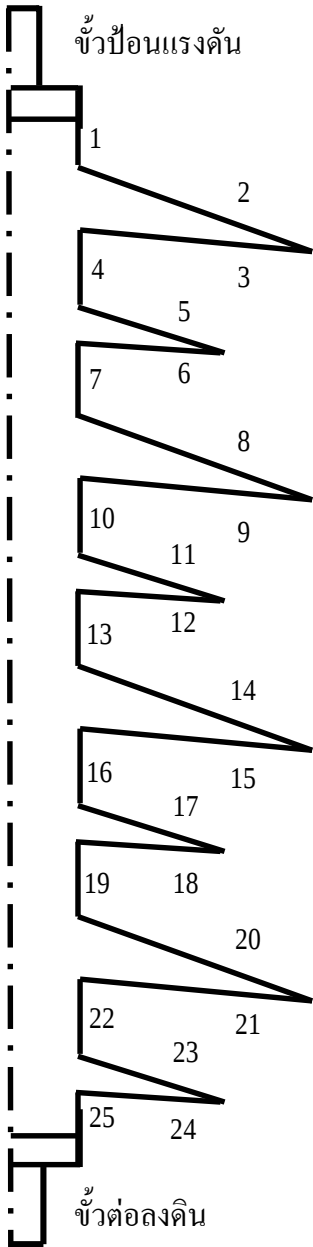
รูปที่ 6.8 ลักษณะฟิวหยดน้ำล้นบนฟิวฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3

จากรูปที่ 6.8 แสดงลักษณะของคุณสมบัติฟิวหยดน้ำล้นของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายภายใต้แรงดันทดสอบ 19.2 kV โดยได้แบ่งระดับของคุณสมบัติฟิวหยดน้ำล้นทั้งด้านที่สัมผัส และไม่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเล็ต ไว้ดังตารางที่ 6.8 และ ตารางที่ 6.9 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหอยน้ำเงินหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	ระดับผิวหอยน้ำเงิน				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
2	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
3	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
4	HC 1	HC 4	HC 4	HC 5	
5	HC 1	HC 3	HC 4	HC 3	
6	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
7	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
8	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
9	HC 1	HC 3	HC 2	HC 3	
10	HC 1	HC 5	HC 4	HC 5	
11	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
12	HC 1	HC 2	HC 3	HC 3	
13	HC 1	HC 4	HC 5	HC 5	
14	HC 1	HC 4	HC 3	HC 4	
15	HC 1	HC 4	HC 3	HC 4	
16	HC 1	HC 5	HC 4	HC 4	
17	HC 1	HC 4	HC 4	HC 5	
18	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
19	HC 1	HC 4	HC 5	HC 5	
20	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
21	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
22	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
23	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
24	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
25	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	

ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหอยน้ำเงินหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	ระดับผิวหอยน้ำเงิน				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	HC 1	HC 4	HC 4	HC 3	
2	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
3	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
4	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
5	HC 1	HC 3	HC 4	HC 3	
6	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
7	HC 1	HC 4	HC 3	HC 4	
8	HC 1	HC 4	HC 3	HC 3	
9	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
10	HC 1	HC 5	HC 5	HC 4	
11	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
12	HC 1	HC 3	HC 2	HC 3	
13	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
14	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
15	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
16	HC 1	HC 4	HC 5	HC 4	
17	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	
18	HC 1	HC 3	HC 3	HC 4	
19	HC 1	HC 5	HC 4	HC 4	
20	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
21	HC 1	HC 3	HC 4	HC 3	
22	HC 1	HC 3	HC 4	HC 4	
23	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
24	HC 1	HC 3	HC 3	HC 3	
25	HC 1	HC 4	HC 4	HC 4	

ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวหยคน้ำลื่นจากตารางที่ 6.8 และ 6.9 ของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ฉนวนยางซิลิโคนต้องโดนผลกระทบจากหมอกไอเกลือ หมอกไอสะอาด ความร้อน ฝน และแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งกับดักเสิร์จฟ้าผ่าจะสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงแค่ด้านเดียวเท่านั้นโดยอาศัยแนวตะเข็บของตัวกับดักเป็นเส้นแบ่ง พบว่าระดับของผิวหยคน้ำลื่นทั้งสองด้านอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันระหว่าง HC 3 ถึง HC 5 เพราะว่าช่วงระยะเวลาในการทดสอบใช้เพียงแค่ 1,000 ชั่วโมง ซึ่งตามปกติในมาตรฐานของการทดสอบต้องใช้เวลา 5,000 ชั่วโมง (เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าห้องทดสอบที่สร้างขึ้นมาสามารถใช้งานสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายได้)

จากการทดสอบทั้ง 3 รอบพบว่าเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นฉนวนยางซิลิโคนมีการเปลี่ยนแปลงระดับของคุณสมบัติผิวหยคน้ำลื่นที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติผิวหยคน้ำลื่นมากที่สุดดังที่ได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 6.6 ถึงตารางที่ 6.9

6.2.4 การวัดความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) คือคุณสมบัติของวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด การทดสอบความแข็งเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการแทงกดเจาะ (Penetration) ของหัวกดเจาะ (Indenter) ภายใต้สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดย่อมมีความแข็งที่แตกต่างกัน ความแข็งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างทางเคมี (ผลจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิดโครงสร้างร่างแห เป็นต้น) ลักษณะทางกายภาพ (สภาวะแก้ว สภาวะยาง เป็นต้น) และอื่น ๆ นอกจากนี้พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) เป็นต้น พอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วงกว้างโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยอันเนื่องมาจากวัสดุและปัจจัยที่ใช้ ณ สภาวะที่ทำการทดสอบ โดยส่วนใหญ่การทดสอบความแข็งเป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำด้วยวิธีการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ เรียกว่าการทดสอบความแข็งแบบรอยกด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าความแข็งสำหรับการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240 หรือโดยทั่วไปเรียกว่า ดูโรมิเตอร์ (Durometer) ใช้สำหรับการวัดความแข็งของยางซิลิโคน วัสดุประเภทโฟม อีลาสโตเมอร์ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และพลาสติกแข็งบางชนิด เครื่องทดสอบความแข็งชนิดนี้แบ่งออกเป็นแบบคือ แบบ Shore

A และ D ซึ่งทั้งสองชนิดนี้มีขั้นตอนในการทดสอบเหมือนกัน กล่าวคือเมื่อส่งแรงกระทำจากชิ้นงานทดสอบไปยังหัวกด สปริงจะส่งน้ำหนักจากหัวกดไปยังพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ การวัดค่าความแข็งจะได้จากค่าความลึกของรอยกด โดยที่ค่าความแข็งเริ่มต้นจาก 100 ที่ความลึกของรอยกดเท่ากับศูนย์ และค่าความแข็งจะมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความลึกของรอยกดอยู่ที่ 0.1 นิ้ว เนื่องจากน้ำหนักที่ตัวกระทำกับหัวกดแปรผกผันกับความลึกของรอยกด ความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของชิ้นงานทดสอบสามารถอ่านได้จากหน้าปัดของคูโรมิเตอร์ได้โดยตรง

หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ได้วัดความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แบบ Shore A ดังแสดงในรูปที่ 6.9 และผลของการวัดค่าความแข็งได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.10 - 6.13 ดังนี้



รูปที่ 6.9 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore A

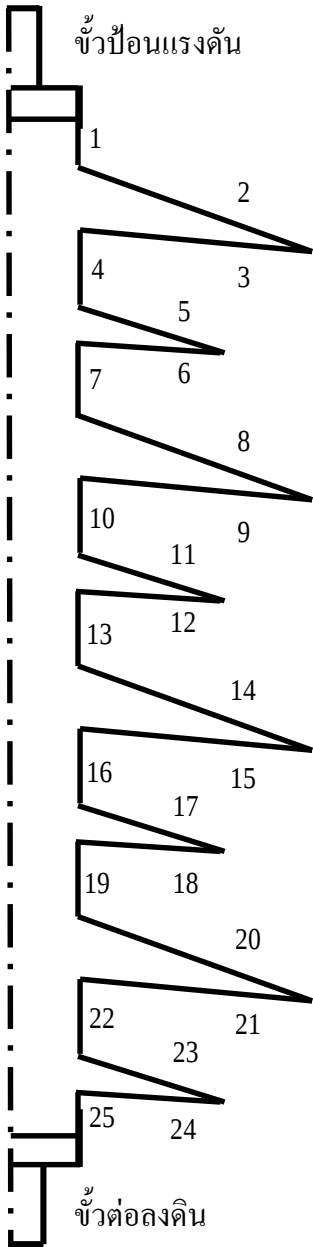
ตารางที่ 6.10 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงหลังจากการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	ระดับความแข็งแรง				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	54.32	58.32	58.8	59.84	
2		56.32	58.08	57.2	
3		56.64	57.6	56.56	
4		58.32	59.28	59.2	
5		57.52	58.32	58.48	
6		60.4	59.2	58.4	
7		56.64	57.76	59.04	
8		58.96	56.56	57.28	
9		56.64	57.28	55.52	
10		56.8	55.92	60.56	
11		59.28	57.76	58	
12		59.2	58.96	59.12	
13		57.76	53.2	60.24	
14		57.28	58.4	58.8	
15		59.2	59.2	58.48	
16		61.28	59.68	59.84	
17		56.96	58.08	58.32	
18		56.16	56.56	59.44	
19		57.6	53.44	57.92	
20		57.28	57.44	58.16	
21		57.6	58.16	58.08	
22		57.52	58.48	59.12	
23		55.52	59.04	57.12	
24		57.92	58.88	60.24	
25		60.64	60.16	60.56	

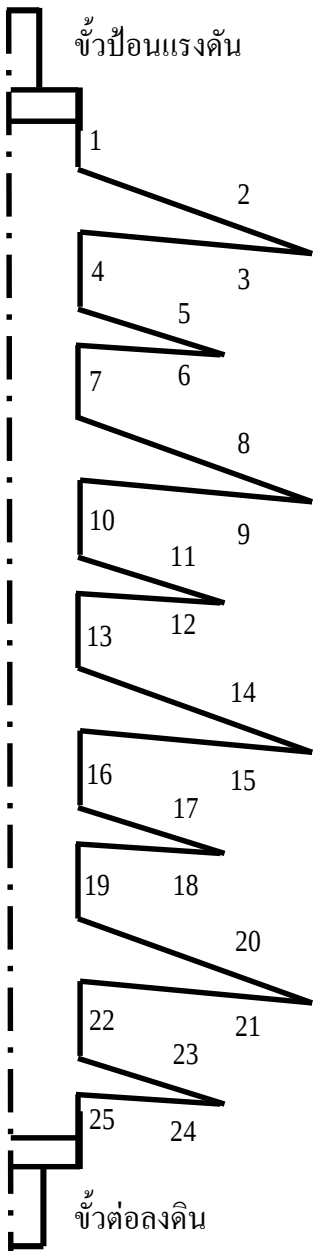
ตารางที่ 6.11 ค่าเฉลี่ยความแข็งหลังจากการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	ระดับความแข็ง				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	54.32	56.4	58.88	62.08	
2		57.76	58.64	58.8	
3		55.2	54.56	56.4	
4		55.04	56.48	59.6	
5		58.32	55.6	60.96	
6		57.44	61.12	57.76	
7		56.64	55.2	58.56	
8		59.84	59.76	58.08	
9		56.16	56.4	55.52	
10		56.16	56.08	55.12	
11		56.8	58.96	58.72	
12		56.64	56.48	55.2	
13		55.76	55.76	56.32	
14		55.2	56.96	61.52	
15		55.68	56	55.52	
16		55.6	56.16	56.56	
17		58.96	59.92	54.88	
18		55.44	56.16	60.64	
19		55.44	56.72	55.76	
20		57.36	59.12	55.2	
21		55.6	59.44	55.12	
22		55.92	58.96	56.24	
23		56	62.56	57.84	
24		60.72	55.6	55.84	
25		57.12	58.32	56.56	

ตารางที่ 6.12 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมพัทธ์แสง UV)

ตำแหน่งที่	ระดับความแข็งแรง				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 1	ตัวที่ 1	
1	54.32	55.92	56.88	54.56	
2		56.16	55.28	54.72	
3		55.2	55.68	56.16	
4		55.12	55.2	56.56	
5		57.28	55.36	56	
6		59.04	54.56	56	
7		56.8	57.36	56.48	
8		54.56	56	55.92	
9		55.6	56.16	56.8	
10		56.56	58.72	57.04	
11		57.12	55.92	55.44	
12		59.76	55.68	55.2	
13		56.08	54.8	56.48	
14		56.32	55.12	57.12	
15		55.44	55.92	55.68	
16		54.8	56.64	56.48	
17		57.2	55.52	55.68	
18		57.52	56.96	56.16	
19		56.24	56.08	59.92	
20		54.32	55.6	54.8	
21		56.72	56.24	56.16	
22		56.32	56	54.56	
23		55.44	54.48	55.52	
24		55.52	55.84	54.88	
25		55.84	55.52	55.824	

ตารางที่ 6.13 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	ระดับความแข็งแรง				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	54.32	55.28	55.2	54.8	
2		55.04	56.24	54.4	
3		55.76	54.88	55.6	
4		55.28	55.6	59.36	
5		55.28	55.2	56.48	
6		56.08	54.4	54.4	
7		55.44	55.36	54.56	
8		56.16	54.88	57.12	
9		54.88	54.56	55.36	
10		56.24	56.08	55.04	
11		55.2	55.6	55.28	
12		54.56	55.84	56.08	
13		56.96	55.92	54.24	
14		54.72	55.28	55.2	
15		54.96	55.2	55.52	
16		54.56	56.8	55.84	
17		54.8	55.92	55.76	
18		55.76	56	55.44	
19		54.08	56.16	55.28	
20		54.88	56.72	56.16	
21		55.12	55.36	55.28	
22		54.64	54.32	57.84	
23		56.72	54.48	54.96	
24		55.68	55.84	55.44	
25		56.88	55.6	56.4	

จากตารางที่ 6.10 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของฉนวนยางซิลิโคนหลังจากที่ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV เป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงของฉนวนยางซิลิโคนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ โดยที่ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบมีค่า 54.32 และเมื่อทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบตามที่กำหนดไว้แล้ว ค่าความแข็งแรงที่วัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง 54 – 62 ซึ่งที่ตำแหน่งที่ 16 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 1 มีความแข็งแรงมากที่สุด โดยค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิม 12.81 %

ผลการทดสอบความแข็งแรงของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.11 พบว่าฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 25 ตำแหน่งมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบการทดสอบรอบแรกเพียงเล็กน้อย ค่าความแข็งแรงที่วัดได้อยู่ในช่วง 54 – 63 ค่าความแข็งแรงที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 23 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 2 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิม 15.17 %

จากตารางที่ 6.12 และ 6.13 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าภายใต้การทดสอบการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลายด้วยแรงดันใช้งานจริง 19.2 kV เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 1,000 ชั่วโมง โดยวัดความแข็งแรงเปรียบเทียบกันระหว่างด้านที่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเลต และไม่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเลต พบว่าค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีความใกล้เคียงกันมาก และยังมีค่าน้อยกว่าการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือทั้ง 2 รอบที่ผ่านมา ซึ่งค่าความแข็งแรงของทั้ง 2 ด้านที่วัดได้อยู่ในช่วง 54 – 60 โดยที่ค่าความแข็งแรงของด้านที่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเลต มีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่ง 19 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 3 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิม 10.31 % และด้านที่ไม่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเลต อยู่ที่ตำแหน่ง 4 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 3 เช่นกัน มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิม 9.28 %

ผลจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนพบว่า ฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบทั้ง 3 รอบมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในระหว่างการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนต้องอยู่ภายใต้ความเครียดของสนามไฟฟ้าเป็นระยะเวลานานถึง 1,000 ชั่วโมง และยังคงสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดิสชาร์จทางไฟฟ้า รังสีอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะ C - C และ C - H กลายเป็นอนุมูลอิสระที่มีความไม่เสถียร ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนตำแหน่งสายโซ่พอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว โดยมีอุณหภูมิและความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนเนื่องจากออกซิเจนจะทำให้ยางแข็งขึ้นเพราะโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.10 ถึง 6.13

6.2.5 ความขรุขระของพื้นผิว

ความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness) หมายถึงขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมาก ความขรุขระที่ใช้กับผิววัสดุบางครั้งอาจเรียกว่า ความเรียบ โดยที่ผลการทดสอบอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย R_a (Arithmetical Mean Roughness) ซึ่งค่าของ R_a จะได้จากเส้นค่าเฉลี่ยที่ได้จากเส้นกราฟความขรุขระของวัสดุทดสอบ เส้นค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะวางบนระบบพิกัดแกน X และการขยายทางแกน Y ค่า R_a ที่วัดออกมาจะอยู่ในหน่วยไมโครเมตร และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad \mu m \quad (6.5)$$

เมื่อ l คือ ความยาว
 $f(x)$ คือ ฟังก์ชันการอินทิกรัล



รูปที่ 6.10 เครื่องมือทดสอบวัดความหยาบผิว

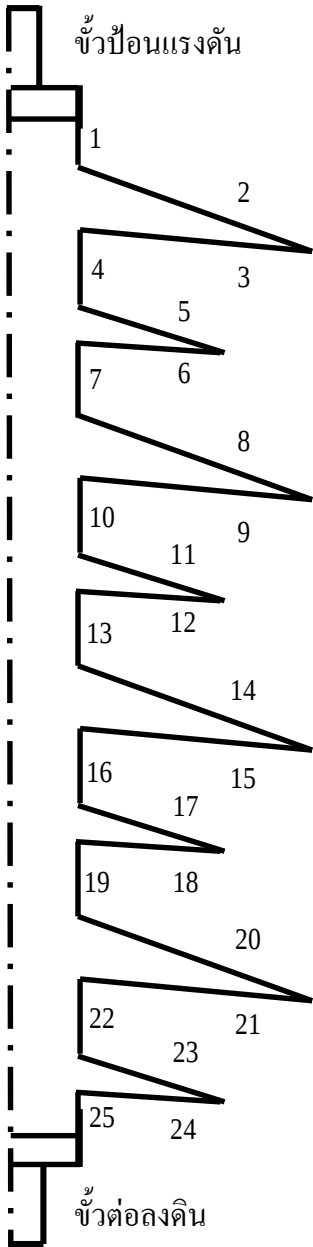
สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้วัดความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน สามารถวัดค่า R_a และแสดงผลทางหน้าจอได้เลยดังแสดงในรูปที่ 6.10 ถ้าค่า R_a ที่วัดได้มีค่ามาก

แสดงว่าฉนวนยางซิลิโคนมีความขรุขระมาก และถ้า R_u มีค่าน้อยแสดงว่าฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความขรุขระน้อยกว่า โดยสาเหตุของความขรุขระมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนจากการได้รับความเครียดทางไฟฟ้า และผลของการดีสชาร์จบนฉนวนยางซิลิโคนเป็นเวลานาน สาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดการผุกร่อนและร่องรอยต่าง ๆ ขึ้นบนผิวฉนวน ซึ่งทำให้พื้นผิวมีความเรียบไม่สม่ำเสมอสามารถสังเกตได้เมื่อสัมผัสด้วยมือเปล่า

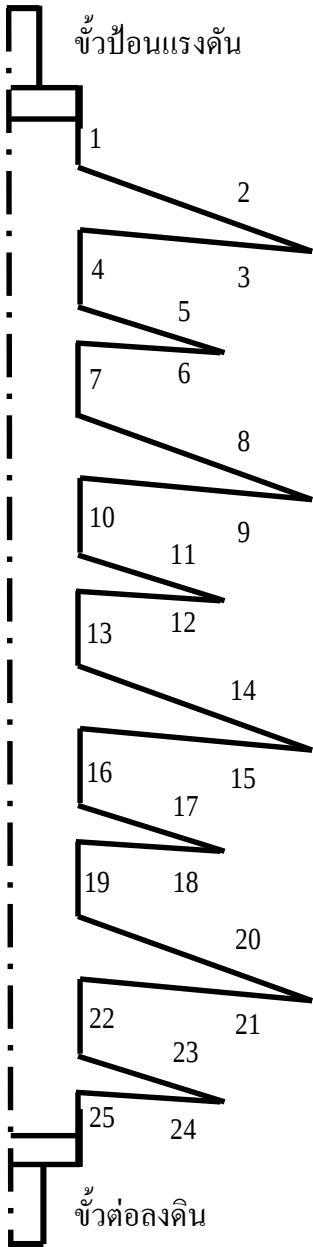
ฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบเร่งการเสื่อมอายุมีค่าความขรุขระโดยเฉลี่ยอยู่ที่ $0.28 \mu\text{m}$ และเมื่อทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ทุกตำแหน่งของฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งลำตัวของฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความขรุขระมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.14 - 6.17



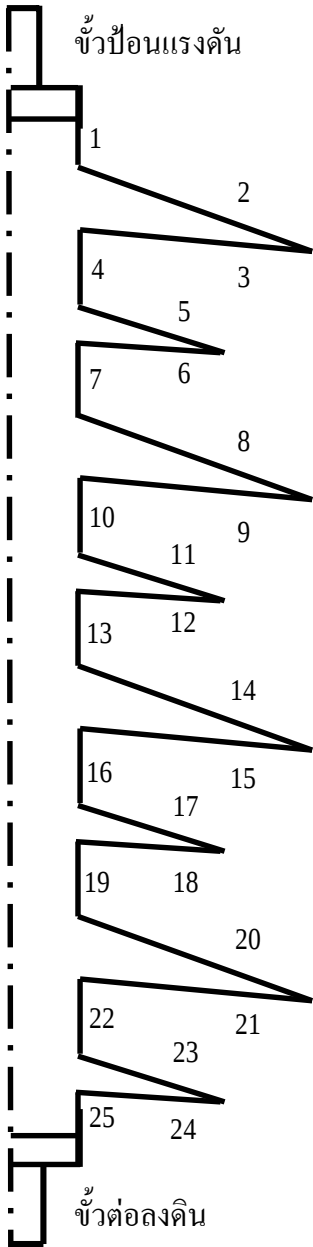
ตารางที่ 6.14 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบของถนนยางซีเมนต์ (μm)				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	0.28	1.22	1.39	1.03	
2		0.53	0.54	0.36	
3		0.55	0.52	0.55	
4		3.88	2.5	3.62	
5		0.93	0.73	0.53	
6		0.89	1.37	0.75	
7		2.47	1.54	1.66	
8		2.21	0.66	0.56	
9		2.7	1.83	1.51	
10		10.42	7.36	6.68	
11		0.62	1.35	1.49	
12		2.58	2.38	1.95	
13		1.83	1.92	2.06	
14		0.68	0.71	0.82	
15		0.92	1.05	1.23	
16		1.59	2.63	4.86	
17		1.37	1.36	1.77	
18		2.65	1.71	1.73	
19		2.72	2.52	2.55	
20		0.52	0.72	0.78	
21		0.81	0.5	2.2	
22		2.23	2.84	2.88	
23		0.55	0.84	1.06	
24		0.5	0.45	0.54	
25		1.78	1.68	1.67	

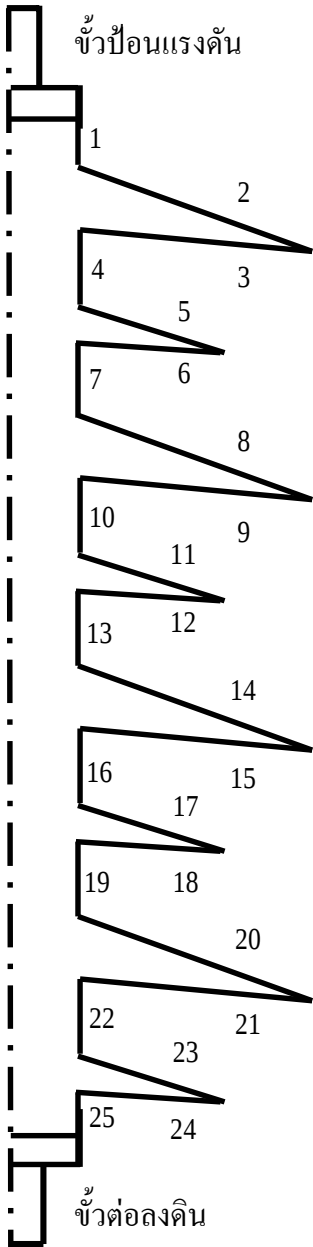
ตารางที่ 6.15 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบของถนนยางซีเมนต์ (μm)				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	0.28	1.28	0.75	3.28	
2		0.61	0.73	0.69	
3		0.45	0.69	1.23	
4		1.29	1.59	4.98	
5		0.5	0.6	1.28	
6		0.51	1.5	3.7	
7		6.73	1.67	3.04	
8		1.53	3.43	0.93	
9		1.24	1.19	0.71	
10		2.54	4.88	23.2	
11		1.37	1.23	2.76	
12		0.75	4.78	4.35	
13		6.45	2.76	3.81	
14		2.27	0.77	1.11	
15		1.76	1.62	3.72	
16		9.73	12.5	5.43	
17		1.61	1.72	2.51	
18		14.8	1.86	3.47	
19		6.74	4.83	2.01	
20		0.82	0.79	1	
21		1.15	0.74	1.36	
22		14.7	6.14	7.03	
23		1.49	1.36	1.53	
24		2.11	1.41	6.85	
25		3.2	5.07	3.58	

ตารางที่ 6.16 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมพัทธ์แสง UV)

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบของถนนยางซีเมนต์ (μm)				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	0.28	3.05	3.86	3.56	
2		0.87	0.94	1.45	
3		1.55	1.31	1.15	
4		1.58	1.98	4.39	
5		1.82	1.45	1.44	
6		0.61	1.88	1.58	
7		3.07	2.75	3.43	
8		1.17	1.36	0.99	
9		1.9	2.14	1.1	
10		5.3	5.43	2.07	
11		1.28	0.96	2.37	
12		1.65	1.15	2.57	
13		5.1	3.17	4.84	
14		1.64	1.56	2.35	
15		1.37	1.51	2.7	
16		5.09	6.85	2.76	
17		2.16	0.58	2.07	
18		3.01	2.05	2.15	
19		5.84	3.32	3.52	
20		1.71	1.27	2.58	
21		2.33	1.45	2.54	
22		2.71	4.89	3.97	
23		2.6	1.19	2.7	
24		1.91	1.44	2.26	
25		4.71	4.97	2.98	

ตารางที่ 6.17 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของผิวหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบของถนนยางซีเมนต์ (μm)				ตำแหน่งบนถนนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	0.28	2.41	3.02	2.13	
2		0.92	1.2	1.47	
3		1.55	1.31	1.1	
4		1.07	2.14	3.97	
5		1.85	1.35	1.3	
6		0.51	1.84	1.44	
7		3.06	2.96	3.1	
8		1.31	1.6	0.88	
9		1.47	1.96	1.06	
10		4.47	4.89	1.81	
11		0.76	1.06	2.23	
12		1.99	1.2	2.15	
13		4.63	3.08	4.94	
14		1.48	1.6	2.1	
15		1.43	1.5	2.05	
16		4.78	5.92	2.31	
17		1.7	0.73	1.87	
18		2.51	1.76	1.98	
19		5.21	3.65	3.01	
20		1.55	1.19	2.69	
21		1.92	1.37	2.14	
22		2.66	4.07	3.14	
23		2.57	1.2	2.14	
24		1.92	1.27	2.07	
25		4.61	4.49	2.7	

จากตารางที่ 6.14 หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV เป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าความขรุขระของผิวฉนวนยางซิลิโคนมีค่าเพิ่มขึ้นโดยความขรุขระบริเวณปีกฉนวนมีค่าน้อยกว่าบริเวณลำตัวอย่างมาก เนื่องจากบริเวณลำตัวใกล้คอคอดเป็นพื้นที่ที่เกิดอาร์กแถบแก๊สอยู่บ่อย ๆ จึงทำให้มีการกัดกร่อนมากกว่าบริเวณอื่นค่าความขรุขระที่วัดได้จึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ค่าความขรุขระผิวฉนวนยางซิลิโคนที่วัดได้มีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 10 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าทั้ง 3 ตัว ส่วนบริเวณบนปีกและใต้ปีกฉนวนมีค่าความขรุขระอยู่ในช่วง $0.36 - 2.7 \mu\text{m}$

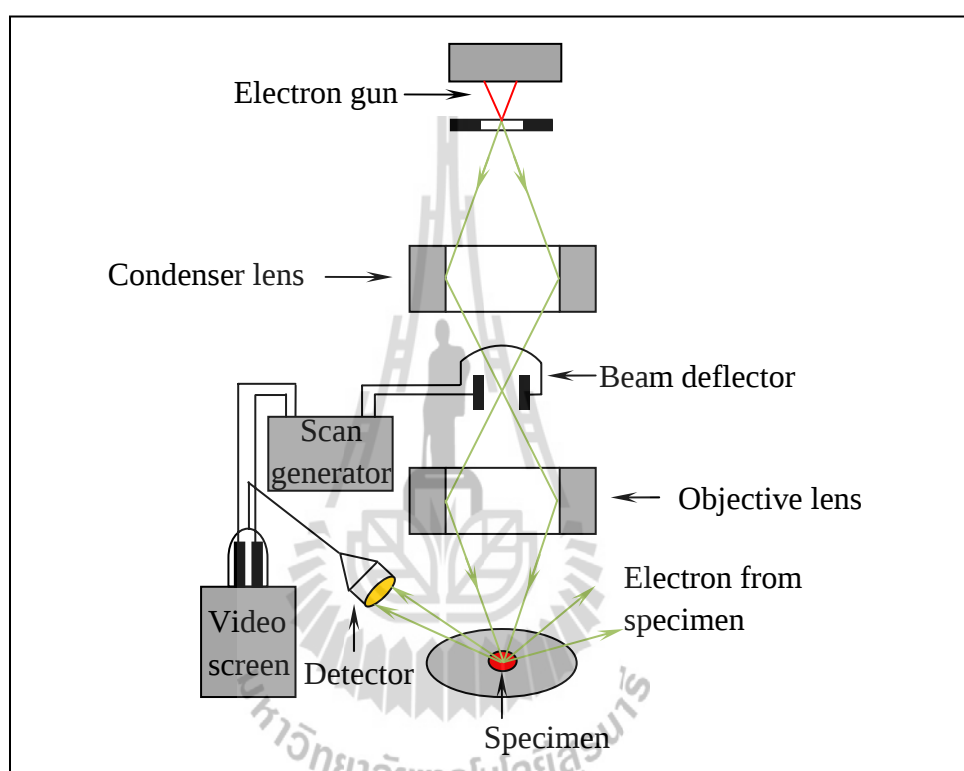
สำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV ค่าความขรุขระของผิวฉนวนยางซิลิโคนได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.15 พบว่าบริเวณลำตัวมีค่าความขรุขระมากกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยที่ค่าความขรุขระของผิวฉนวนสูงสุดมีค่า $23.2 \mu\text{m}$ ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 3 ตำแหน่งที่ 10 สำหรับปีกฉนวนมีค่าความขรุขระอยู่ในช่วง $0.45 - 6.85 \mu\text{m}$ แต่ตำแหน่งที่ 18 บริเวณปีกฉนวนด้านล่างของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 1 มีค่าความขรุขระ $14.8 \mu\text{m}$ ซึ่งค่าที่วัดได้สูงกว่ากับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวอื่นเมื่อเทียบในตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้คอคอดที่เป็นพื้นที่ที่แถบแก๊ส ทำให้มีร่องรอยของการกัดกร่อนจากวาบไฟตามผิวในระดับที่ใกล้เคียงกับลำตัวฉนวน

ผลจากการทดสอบความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายด้วยแรงดันใช้งานจริง 19.2 kV พบว่าค่าความขรุขระของผิวฉนวนทั้งด้านที่สัมผัสและไม่สัมผัสแสงอัลตราไวโอเลตมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.16 และ 6.17 บริเวณลำตัวมีค่าความขรุขระมากกว่าบริเวณปีกฉนวนทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยที่ค่าความขรุขระของปีกฉนวนอยู่ในระหว่าง $0.5 - 3 \mu\text{m}$ และค่าความขรุขระของลำตัวฉนวนอยู่ในระหว่าง $1.07 - 6.85 \mu\text{m}$ ตำแหน่งที่มีค่าความขรุขระของผิวฉนวนสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 16 ของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าตัวที่ 2 วัดค่าความหยาบได้ $6.85 \mu\text{m}$ และ $5.92 \mu\text{m}$ ของด้านที่สัมผัสและไม่สัมผัสแสง UV ตามลำดับ

จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าระบบ 24 kV พบว่าความขรุขระของผิวฉนวนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ โดยเฉพาะบริเวณลำตัวฉนวนใกล้คอคอดเป็นตำแหน่งที่เกิดอาร์กแถบแก๊ส มีลักษณะขรุขระเป็นร่องรอยที่เกิดจากการกัดกร่อนสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน และเมื่อวัดความขรุขระผิวบริเวณดังกล่าวจึงทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าสูงตามไปด้วย

6.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพที่ผิวของวัสดุ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายกราดไปยังพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ข้อมูลที่ได้เป็นภาพถ่ายกำลังขยายแบบ 3 มิติ



รูปที่ 6.11 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 6.11 หลักการทำงานของเครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอิเล็กตรอน (Electron Gun) ที่ด้านบนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนโดยสามารถปรับขนาดให้เล็กหรือใหญ่ได้ตามต้องการ เมื่อต้องการภาพที่มีความคมชัดต้องปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปยังพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดไปยังผิวชิ้นงานทดสอบจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น เมื่อสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกบันทึกจึงแปลง

ไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ต่อไป ซึ่งภาพดังกล่าวสามารถบันทึกได้เลย

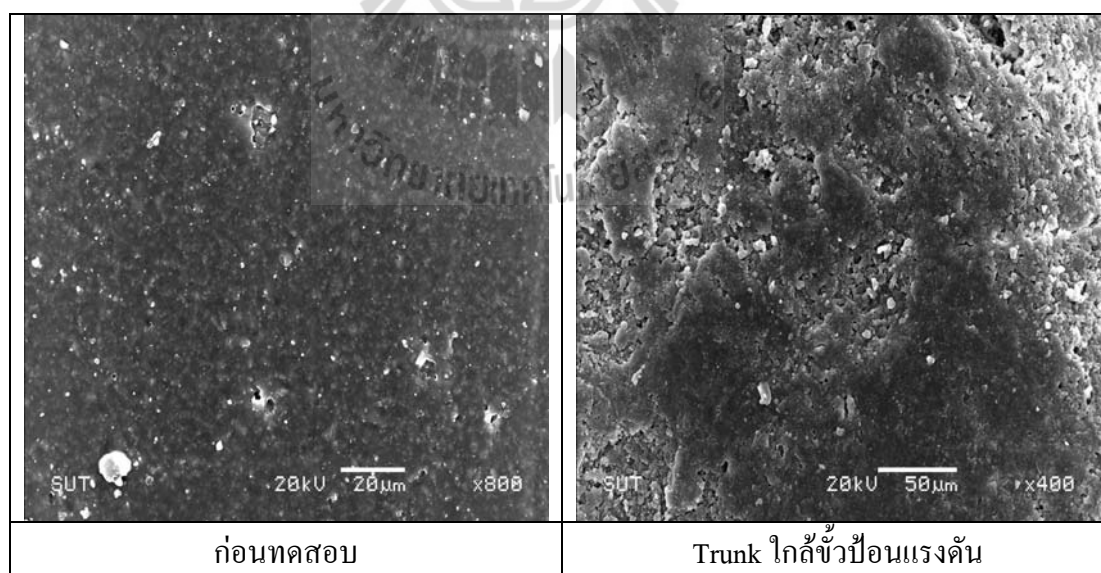
การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต้องนำตัวอย่างฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่อเป็นตัวอย่างสำหรับเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 6.14 – 6.17 โดยรูปที่ 6.14 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM – 6400 SEM และรูปที่ 6.15 – 6.17 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น Neosope: JCM – 5000 Benchtop SEM ดังแสดงในรูปที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ



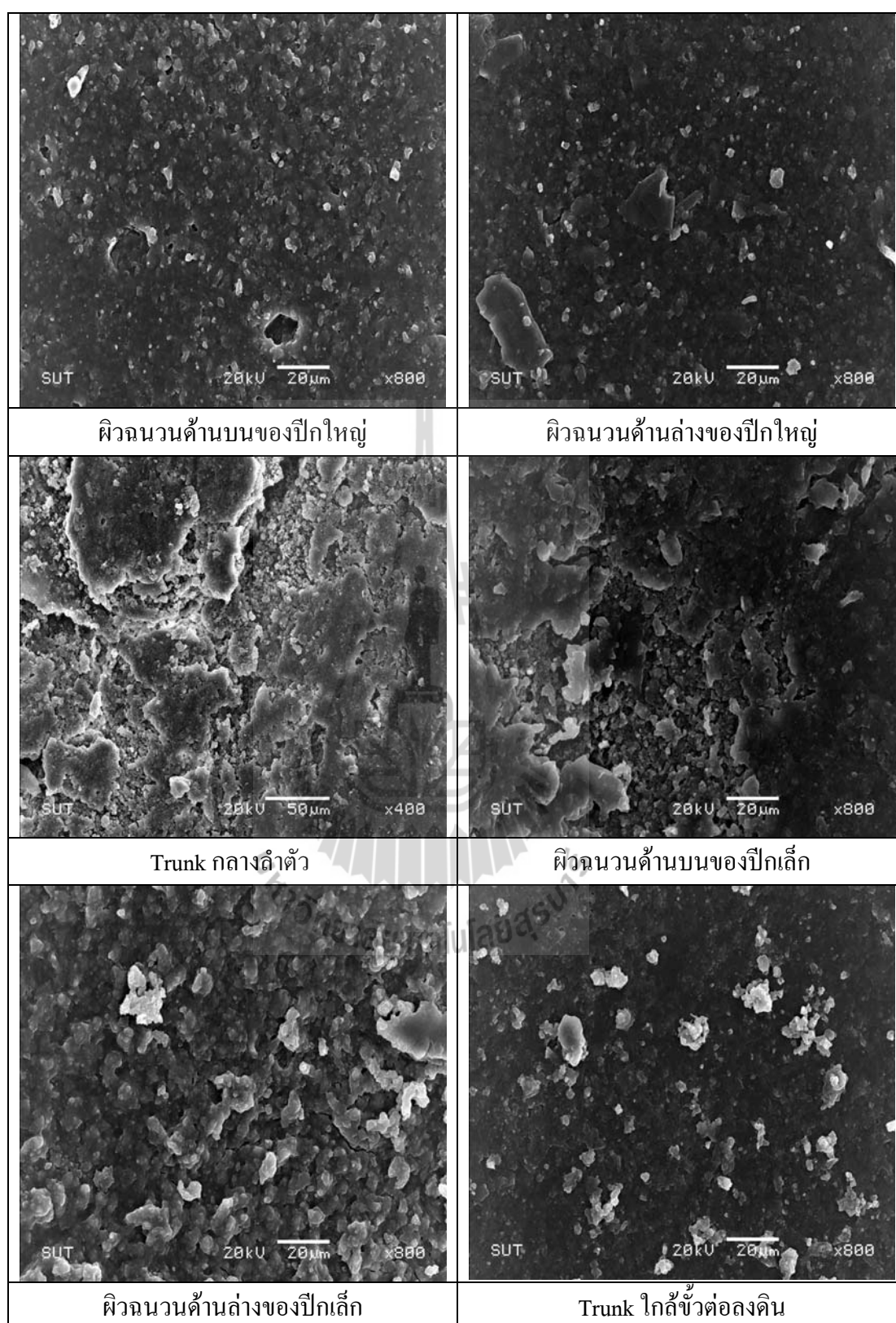
รูปที่ 6.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM – 6400



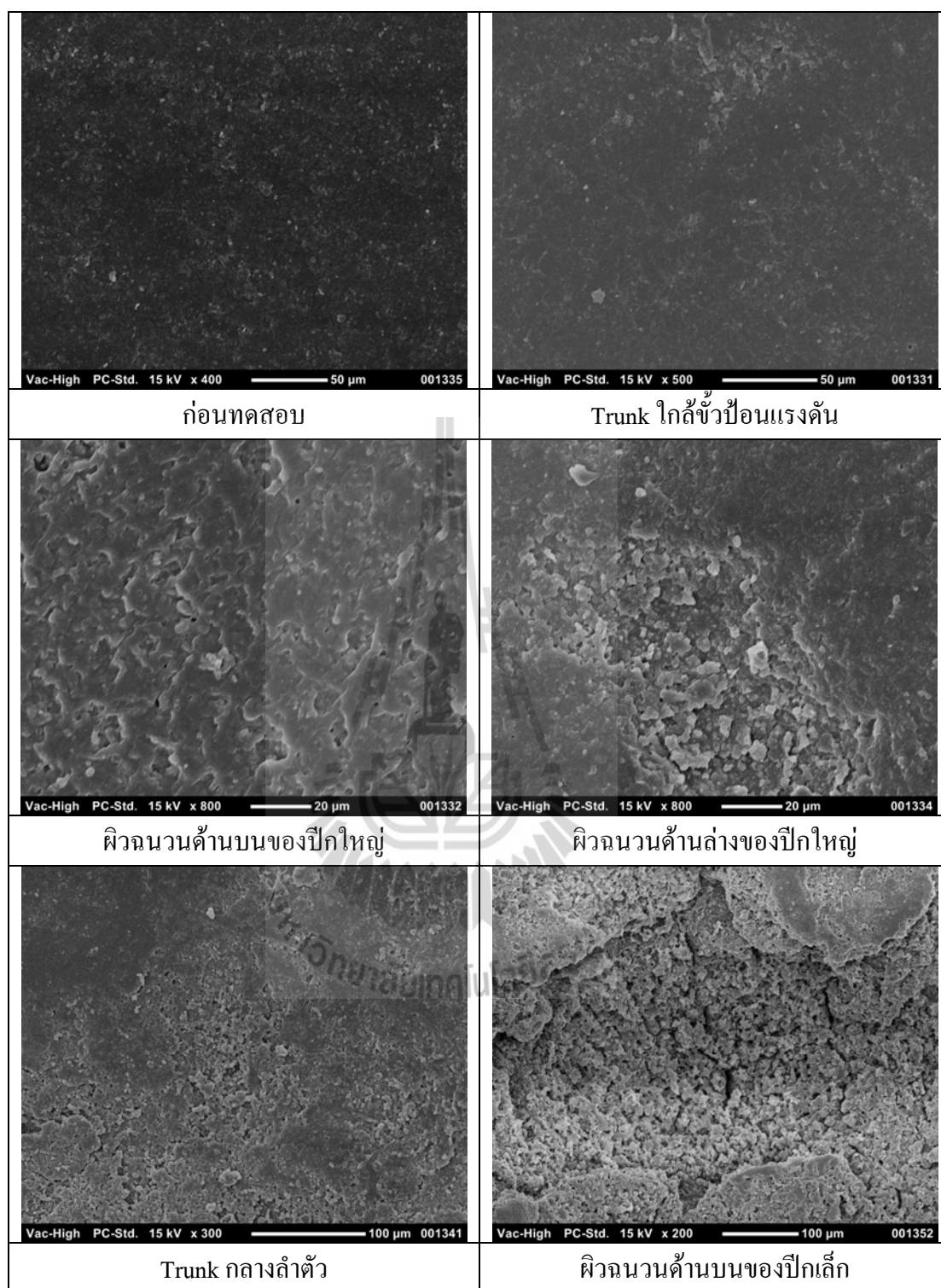
รูปที่ 6.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น Neosope: JCM – 5000 Benchtop



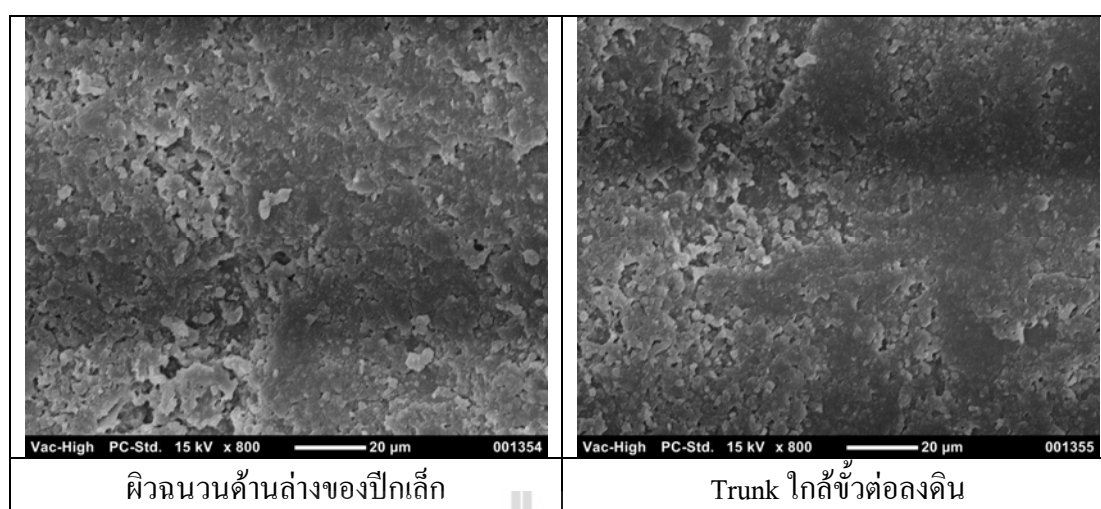
รูปที่ 6.14 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 1



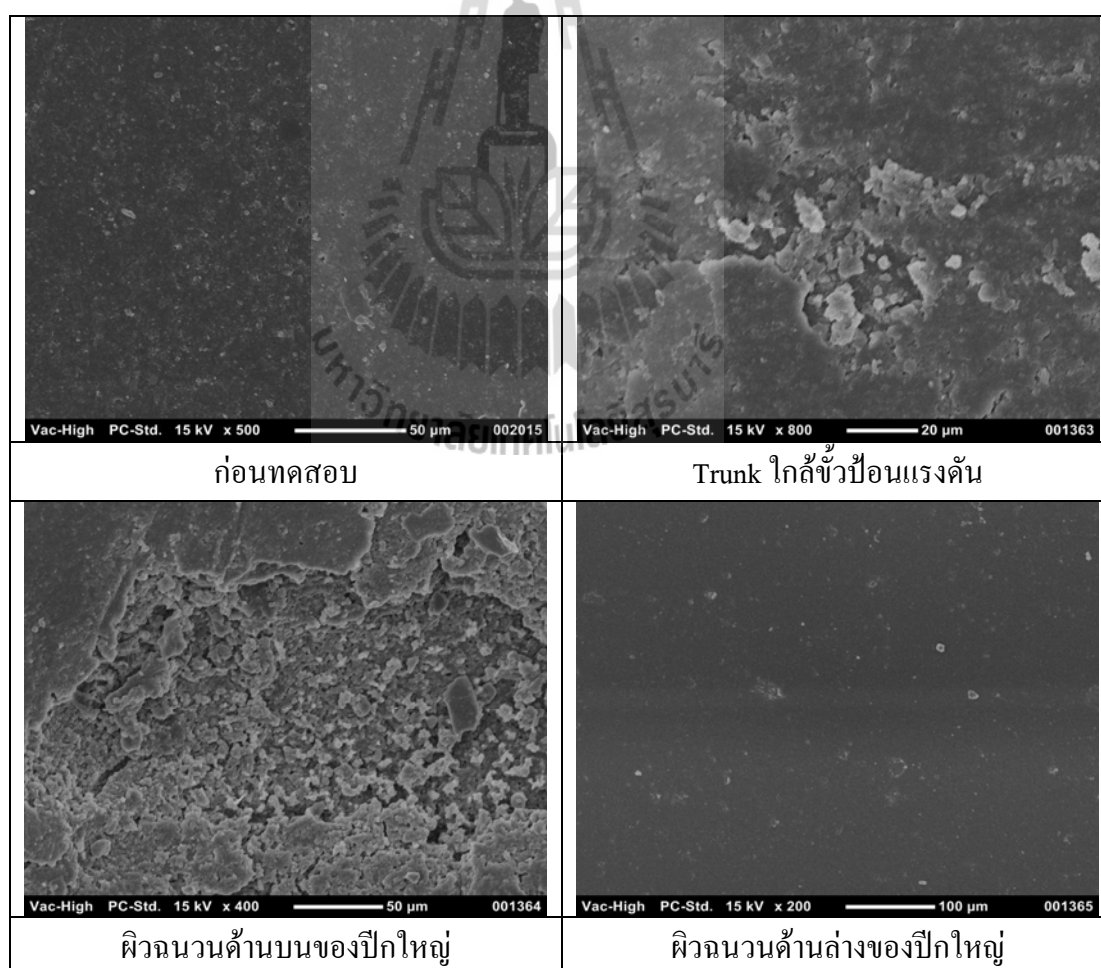
รูปที่ 6.14 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 1 (ต่อ)



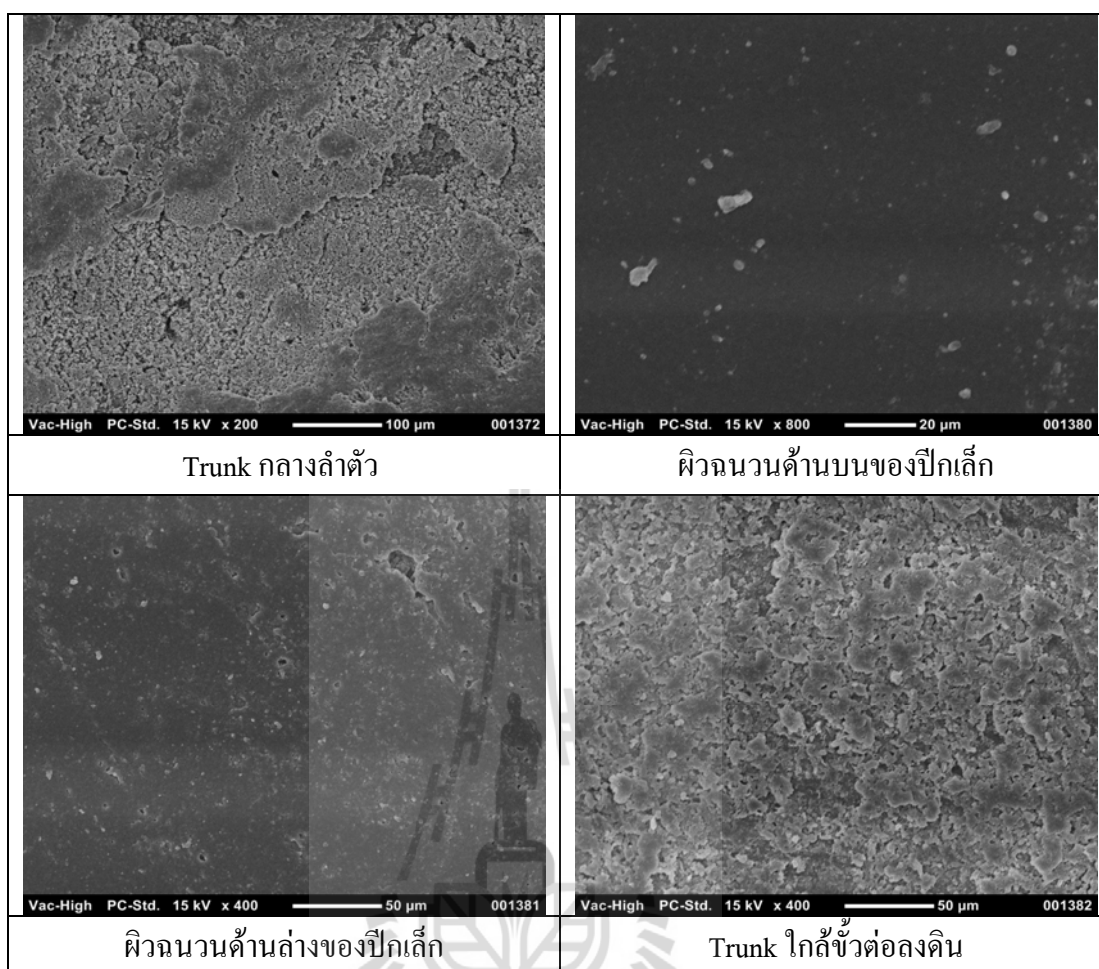
รูปที่ 6.15 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 2



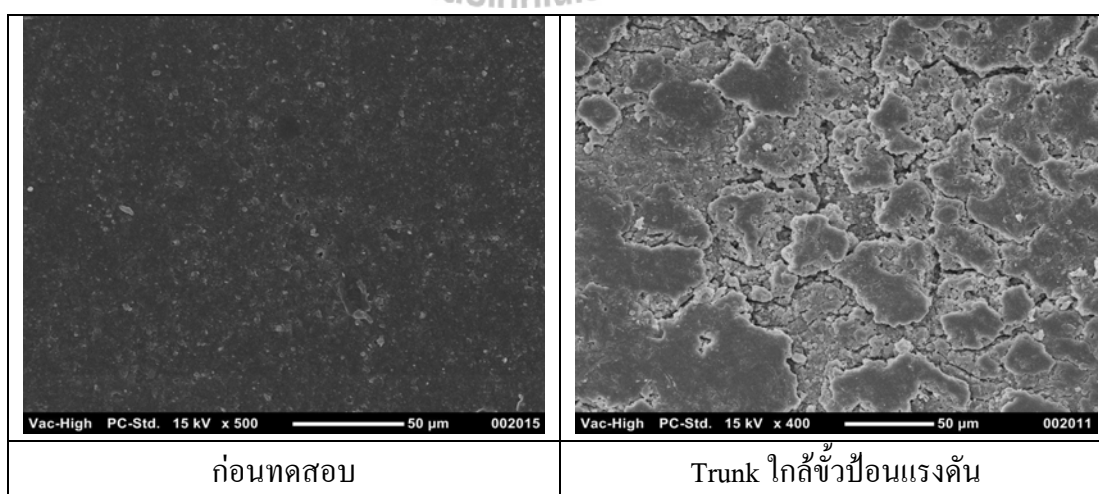
รูปที่ 6.15 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 2 (ต่อ)



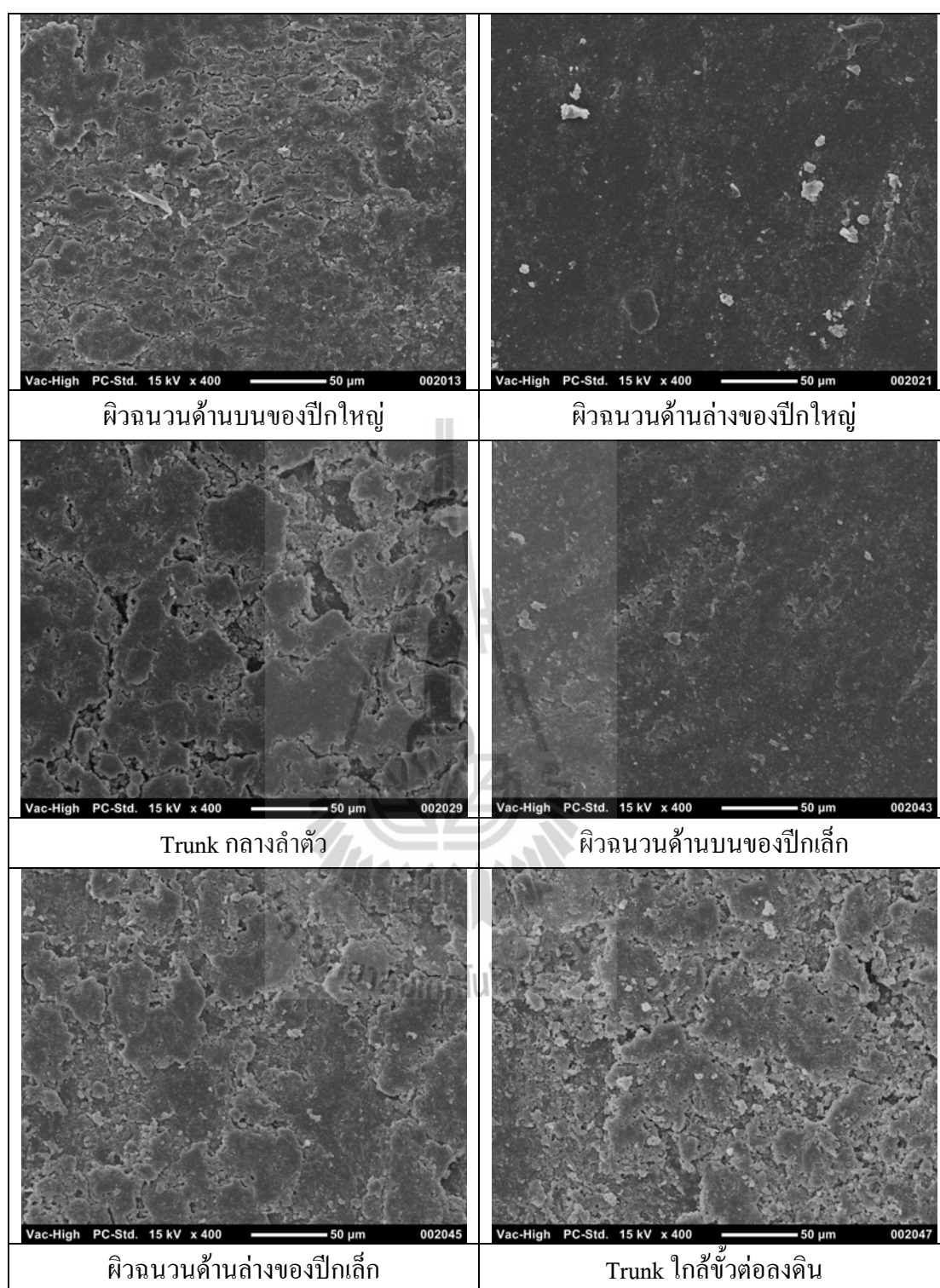
รูปที่ 6.16 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)



รูปที่ 6.16 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV) (ต่อ)



รูปที่ 6.17 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)



รูปที่ 6.17 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM หลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV) (ต่อ)

จากรูปที่ 6.14 และ 6.15 เป็นภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือใช้แรงดันทดสอบ 18 kV และแรงดันใช้งานจริง 19.2 kV เป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมงตามลำดับ สำหรับรูปที่ 6.16 และ 6.17 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฉนวนยางซิลิโคนใหม่และที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลายภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 1,000 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดระหว่างฉนวนยางซิลิโคนใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานใด ๆ กับฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแล้วพบว่า ฉนวนยางซิลิโคนใหม่มีพื้นผิวที่ไม่เรียบสังเกตได้จากจุดเล็ก ๆ ที่มีสีขาวบนผิวฉนวนอย่างทั่วถึง เรียกว่าสารเติมแต่ง ซึ่งเป็นสารที่เติมเข้าไปเสริมแรงของฉนวนยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มค่า ความต้านทานของแรงดึง แรงฉีกขาด และค่าความต้านทานการกัดกร่อนของฉนวนยางซิลิโคน ในทางตรงกันข้ามฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแล้วพบว่าสารเติมแต่งได้ลดลงและยังมีรอยของการผุกร่อนบนผิวฉนวนเกิดขึ้นดังที่ได้แสดงไว้ในตารางดังกล่าว ผลของภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่าลักษณะของการกัดกร่อนบนผิวฉนวนยางซิลิโคนที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจากการทนต่อสถานะความเครียดทางไฟฟ้าและการเกิดดีสชาร์จอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเฉพาะบริเวณแถบแห้งจะเห็นร่องรอยของการเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนได้เป็นอย่างดี เช่น บริเวณผิวฉนวนลำตัวของกับดักเสิร์จฟ้าผ่า ผิวฉนวนด้านล่างของปีกเล็ก เป็นต้น

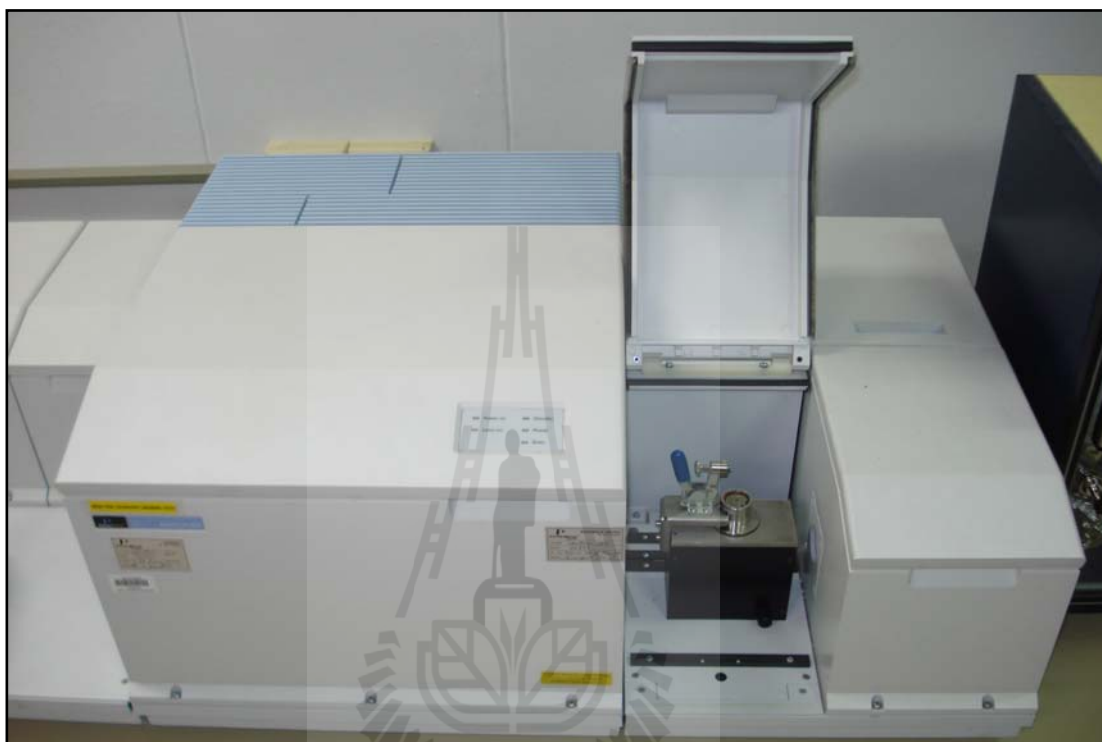
6.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transforms Infrared Spectroscopy: FTIR) เพื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโครงสร้างและพันธะของสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลมีพันธะแบบโคเวเลนต์และมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ในโมเลกุลเนื่องจากการสั่น (Vibration) หรือการหมุน (Rotation) โดยสามารถแบ่งช่วงคลื่นของอินฟราเรดได้ 3 ระดับ (แม้น อมรสิทธิ์, 2534) ดังนี้

1) ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared) เลขคลื่น 12,800 ถึง 4,000 cm^{-1} เป็นช่วงที่แถบดูดกลืนเกิดจากโอเวอร์โทน

2) ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle Infrared) เลขคลื่น 4,000 ถึง 200 cm^{-1} แบ่งเป็นช่วงความถี่ (Group Frequency) 4,000 ถึง 1,300 cm^{-1} ช่วงคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ให้ค่ายอดดูดกลืน (Absorption Peak) และช่วงพิมพ์ลายนิ้วมือ (Finger Print) 1300 ถึง 20 cm^{-1} โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล

3) ช่วงไกลอินฟราเรด (Far Infrared) เลขคลื่น 200 ถึง 10 cm^{-1} ช่วงนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการแปรผันที่เกี่ยวกับการหมุน รวมทั้งโหมดการสั่นของโครงผลึกและโครงสร้างการสั่นของโมเลกุลขนาดใหญ่



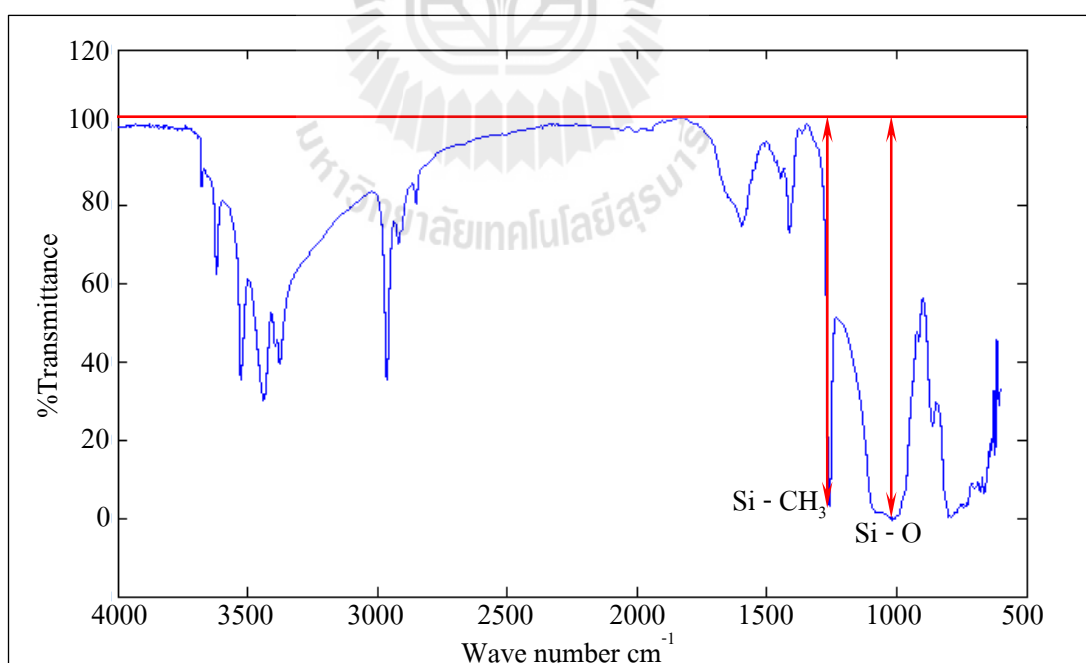
รูปที่ 6.18 เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR

สำหรับงานวิจัยนี้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน ใช้ช่วงกลางอินฟราเรดในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยางซิลิโคนโดยช่วงเลขคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ $4,000\text{ cm}^{-1}$ ถึง 600 cm^{-1} ดังแสดงในตารางที่ 6.18 ซึ่งการวิเคราะห์ช่วงกลางอินฟราเรดเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งเช่น พลาสติก โพลีเมอร์ เส้นใยนาโน แสง ยาง เป็นต้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นยางซิลิโคนจึงเลือกใช้เทคนิค Attenuated Total Reflection (ATR) ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิว ซึ่งในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้วิเคราะห์เพียงสายโซ่ข้าง ($\text{Si} - \text{CH}_3$) และสายโซ่หลัก ($\text{Si} - \text{O}$) เท่านั้น เพราะเป็นพันธะที่สำคัญของ PDMS

ตารางที่ 6.18 ช่วงคลื่นอินฟราเรดของฉนวนยางซิลิโคน

หมู่ธาตุ	ช่วงคลื่น (cm^{-1})	รายละเอียด
OH	3,600 - 3,200	เป็นการสั่นโมเลกุลแบบสมมาตร เป็นพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในอลูมินาไตรไฮดรต
C - H in Methyl	3,300 - 2,850	เป็นการสั่นโมเลกุลแบบสมมาตร แสดงปริมาณโมเลกุลของสารอินทรีย์
Si - CH_3	1,270 - 1,255	แสดงถึงความผิดปกติของสายโซ่ข้าง
Si - O - Si	1,110 - 1,000	แสดงถึงปริมาณของสายโซ่หลัก

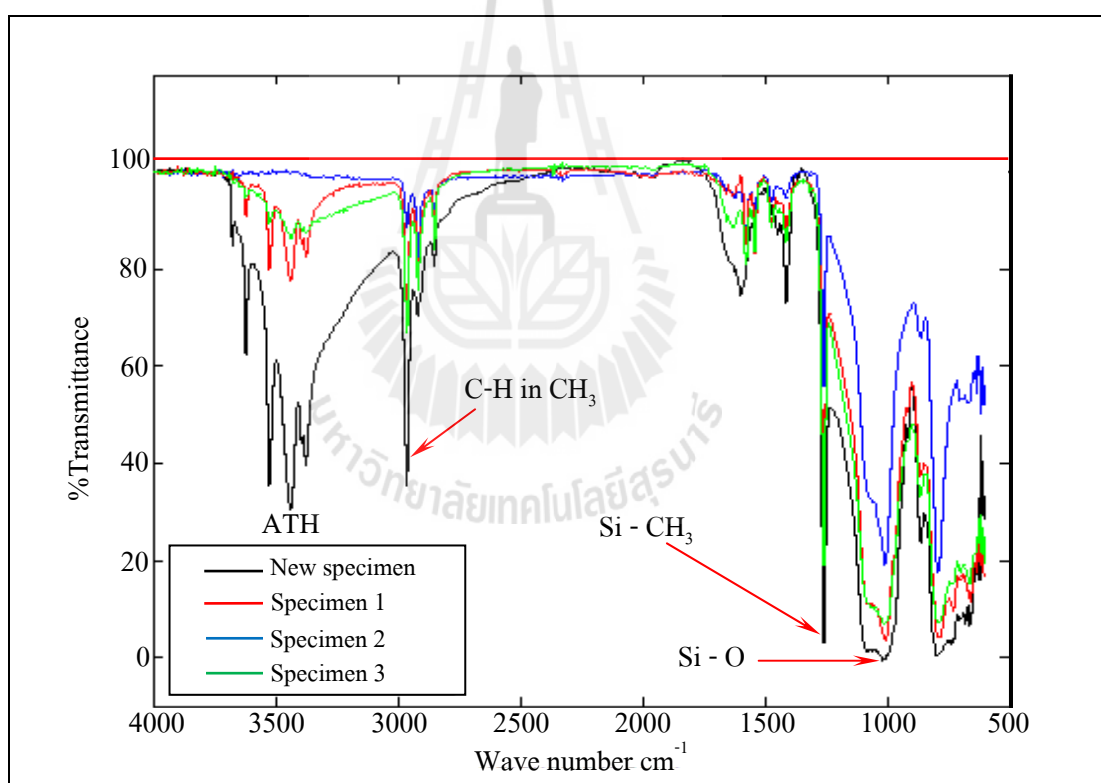
การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ อยู่ในช่วงกลางอินฟราเรดของการวิเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงของพันธะสายโซ่ข้างเป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ Si - CH_3 ในการวิเคราะห์ และการเปลี่ยนแปลงของพันธะสายโซ่หลักเป็นตัวบ่งชี้ถึงการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งในที่นี้ใช้ Si - O เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง



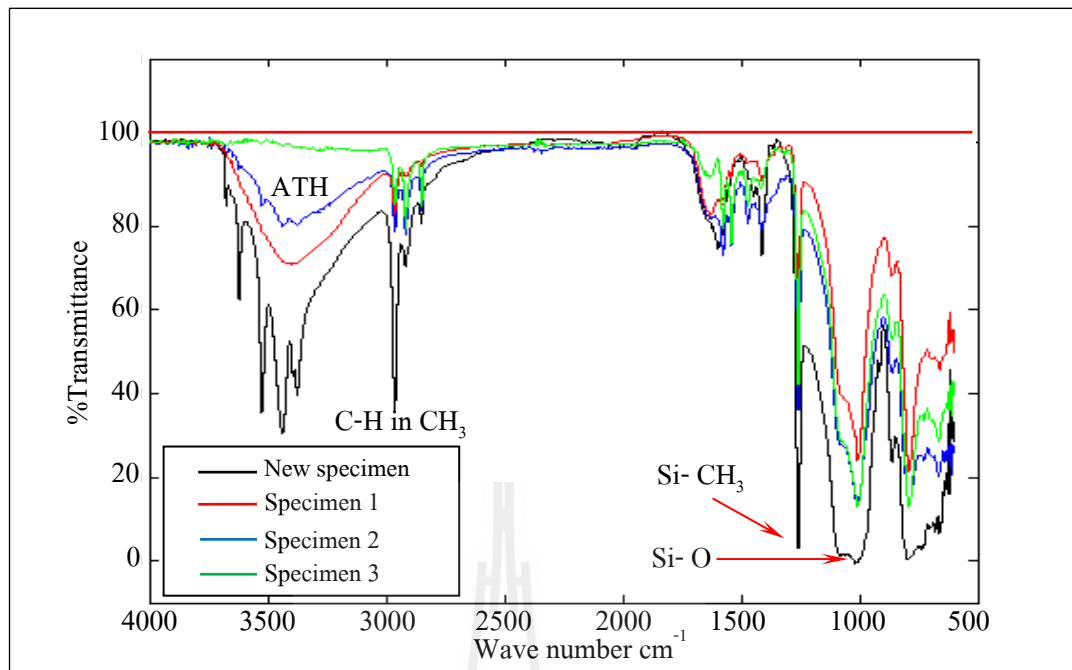
รูปที่ 6.19 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีจาก %Transmittance

จากรูปที่ 6.19 เป็นวิธีการหาค่า %Transmittance ของฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ โดยใช้แกน Y เป็นแกนอ้างอิง โดยหาความสูงของ Si-CH₃ จากกราฟที่ตำแหน่ง 1,260 cm⁻¹ จากนั้นจึงนำไปเทียบบัญญัติไตรยางค์กับค่าความสูง %Transmittance ของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ปรับให้เป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อง่ายต่อการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพันธะ สำหรับ Si-O อ่านจากกราฟที่ตำแหน่ง 1,011 cm⁻¹ ทำเช่นเดียวกับ Si-CH₃

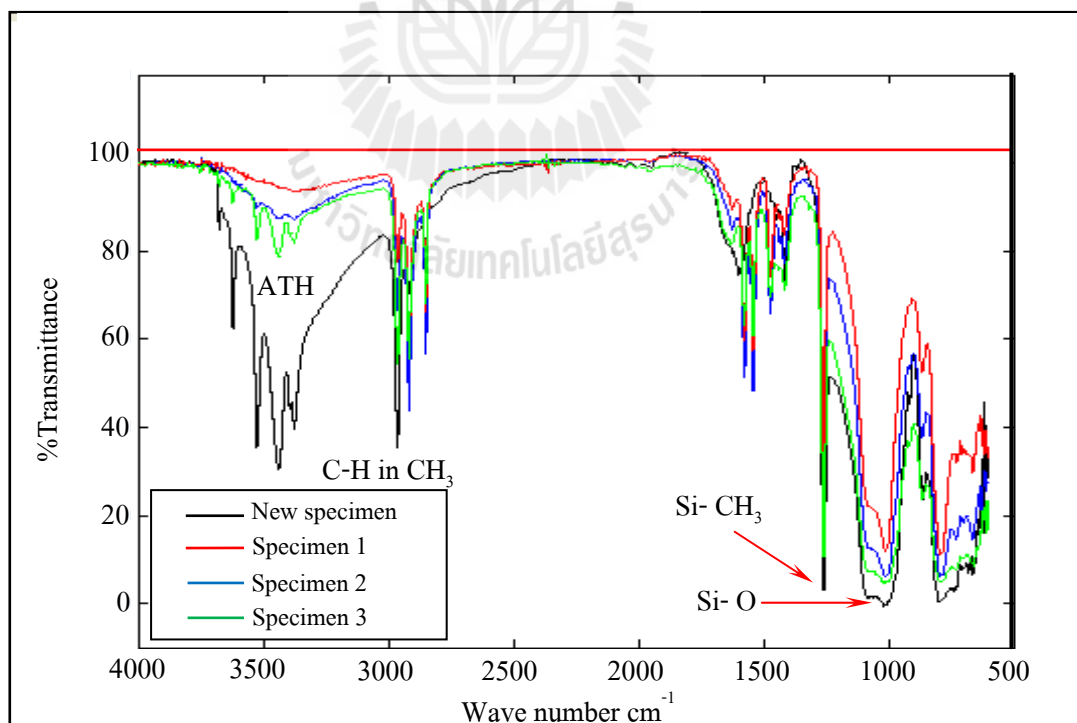
หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าระบบ 24 kV ด้วยหมอกไอเกลือและการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโซ่ข้าง และกระดูกสันหลังด้วยเทคนิค ATR-FTIR ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 6.20 ถึง 6.23 ดังนี้



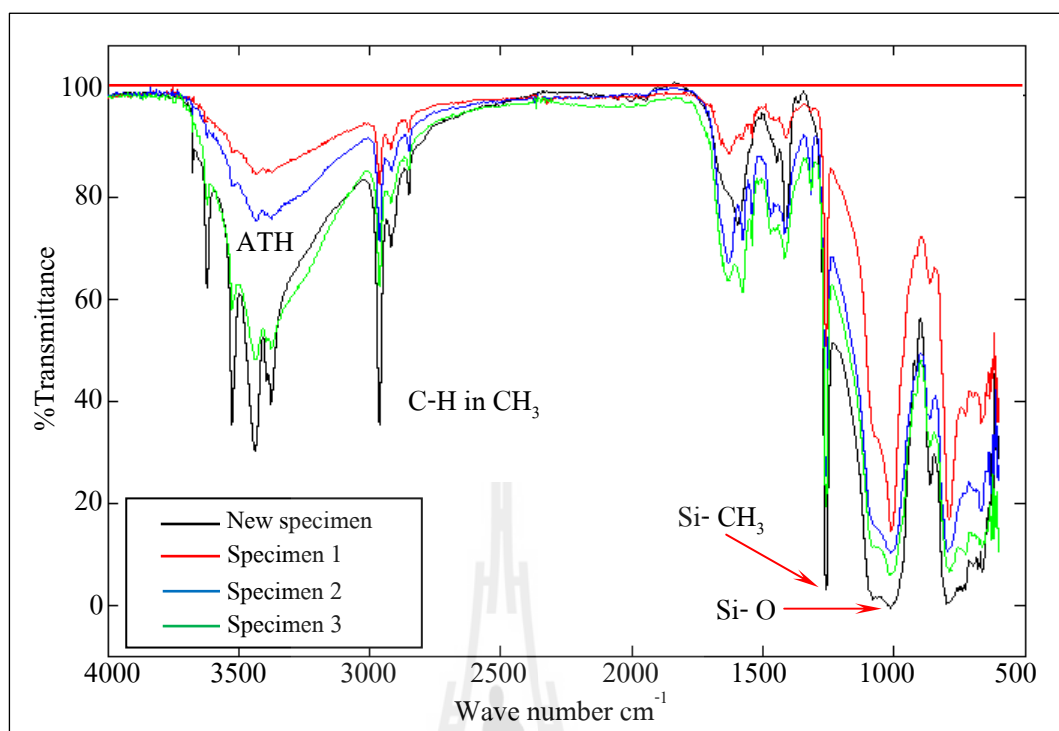
รูปที่ 6.20 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบรอบที่ 1



รูปที่ 6.21 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบรอบที่ 2



รูปที่ 6.22 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)



รูปที่ 6.23 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

จากรูปที่ 6.20 ถึง 6.19 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR เห็นได้ว่าปริมาณของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนมีสาเหตุมาจากการดีสซาร์จทางไฟฟ้า นอกจากนี้พบว่าสารเติมแต่งสำหรับเพิ่มคุณสมบัติของฉนวนยางซิลิโคนมีปริมาณลดลง และเมทิลที่เป็นส่วนประกอบมูลฐานของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีปริมาณที่ลดลงด้วยเช่นกัน การลดลงของ Si - CH₃ ในฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ แสดงและการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายได้ในตารางที่ 6.19 ถึงตารางที่ 6.22 สำหรับการลดลงของ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ แสดงและการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายแสดงได้ในตารางที่ 6.23 ถึงตารางที่ 6.26 ตามลำดับ

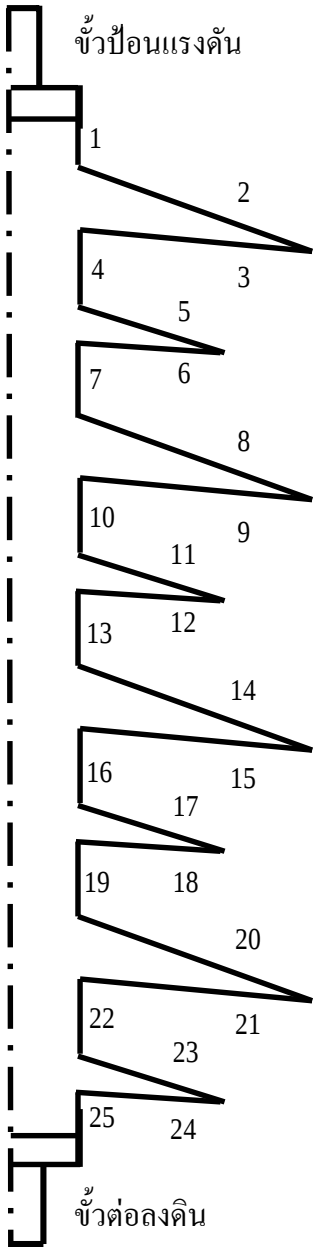
ตารางที่ 6.19 ปริมาณ Si - CH₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	Si - CH ₃ ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	61.98	55.79	74.21	
2		57.1	18.57	94.63	
3		41.92	21.48	66.27	
4		51.47	39.89	14.18	
5		66.75	94.89	71.04	
6		36.45	66.06	69.98	
7		28.66	72.15	30.24	
8		82.76	91.17	27.83	
9		50.42	78.61	22.28	
10		21.41	18.45	16.09	
11		49.64	64.76	27.71	
12		35.63	43.86	40.77	
13		15.42	25.58	14.87	
14		47.07	81.96	76.76	
15		56.25	86.71	70.05	
16		45.92	27.75	9.68	
17		42.35	89.49	34.79	
18		24.42	96.29	28.39	
19		64.16	7.166	5.34	
20		75.99	82.55	55.01	
21		89.44	94.08	63.12	
22		31.35	14.35	9.83	
23		64.32	93.79	51.38	
24		68.07	63.03	43.56	
25		35.94	3.92	37.72	

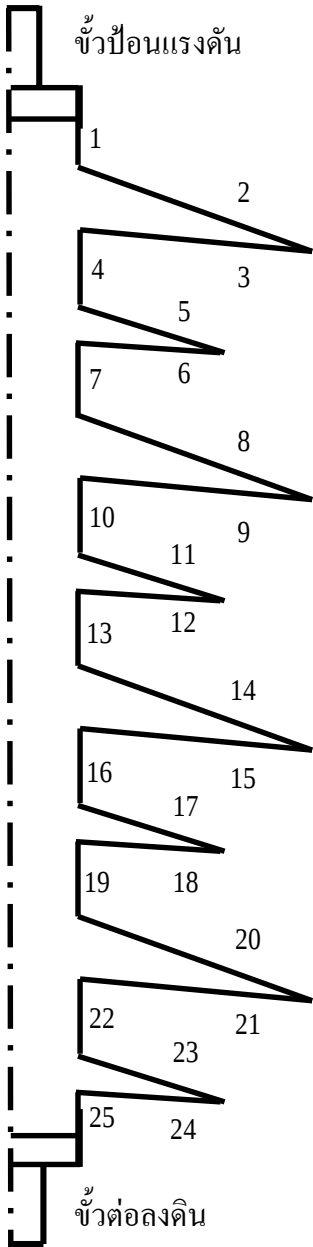
ตารางที่ 6.20 ปริมาณ Si - CH₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	Si - CH ₃ ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	70.69	53.25	64.09	
2		91.82	90.42	98.43	
3		83.57	98.03	94.44	
4		88.81	43.46	63.34	
5		88.69	94.59	80.38	
6		82.66	88.89	74.10	
7		31.55	57.32	35.98	
8		90.91	77.61	98.71	
9		86.59	82.40	86.46	
10		68.61	15.85	46.02	
11		76.1	69.56	66.99	
12		21.75	83.37	54.81	
13		78.65	32.01	34.31	
14		12.48	71.99	70.14	
15		17.55	59.64	85	
16		32.68	34.79	49.18	
17		80.32	24.83	67.26	
18		25.62	48.36	61.34	
19		9.92	29.76	38.05	
20		89.93	95.53	44.44	
21		49.08	87.84	89.73	
22		39.06	43.57	43.78	
23		51.56	84.87	90.27	
24		49.43	77.07	82.03	
25		47.92	55.11	89	

ตารางที่ 6.21 ปริมาณ Si - CH₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	Si - CH ₃ ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	83.12	62.86	33.95	
2		83.41	91.16	86.36	
3		83.25	74.82	89.78	
4		59.05	49.69	40.17	
5		95.42	85.50	91.24	
6		89.84	90.35	85.17	
7		33.61	68.69	23.11	
8		71.27	55.97	82.89	
9		60.2	82.78	70.24	
10		48.05	68.05	10.35	
11		81.73	83.85	83.64	
12		64.62	75.47	69.42	
13		3.743	50.38	29.07	
14		90.38	89.07	89.12	
15		60.19	41.71	58.27	
16		12.45	10.63	42.8	
17		77.22	90.67	91.08	
18		72.54	62.83	65.31	
19		25.13	14.54	26.197	
20		88.25	44.81	94.33	
21		84.65	83.29	80.55	
22		87.86	16	49.07	
23		89.09	95.92	84.34	
24		87.67	79.76	79.23	
25		43.17	18.8	29.22	

ตารางที่ 6.22 ปริมาณ Si - CH₃ ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	Si - CH ₃ ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	52.16	78.95	21.97	
2		67.61	50.57	85.34	
3		90.56	85.95	92.08	
4		33.06	28.12	22.69	
5		90.63	98.27	89.16	
6		17.34	99.24	88.51	
7		45.48	55.39	9.778	
8		40.95	70.84	88.34	
9		87.81	49.79	82.49	
10		40.95	49.47	24.75	
11		89.27	91.15	90.39	
12		88.12	79.58	61.72	
13		34.45	28.46	1.86	
14		84.27	79.49	81.56	
15		54.89	18.37	50.7	
16		8.714	15.07	26.61	
17		85.07	86.91	82.58	
18		74.05	6.24	79.14	
19		26.95	31.26	53.87	
20		79.46	35.2	56.17	
21		84.61	76.02	89.26	
22		66.86	23.16	68.31	
23		86.35	99.72	89.89	
24		89.61	82.48	77.14	
25		59.12	57.58	26.38	

ตารางที่ 6.23 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	Si - O ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	81.94	79.92	88.55	
2		57.71	23.61	94.92	
3		44.35	32.41	83.64	
4		78.97	61.64	29.27	
5		81.5	99.28	81.32	
6		54.92	89.64	82.55	
7		45.77	91.98	58.21	
8		98.84	98.33	54.09	
9		96.38	96.6	34.94	
10		25.4	99.02	25.09	
11		75.43	97.12	56.69	
12		55.82	74.13	73.82	
13		15.75	37.52	42.16	
14		70.48	91.74	81.94	
15		85.45	99.25	82.57	
16		74.87	33.36	21.99	
17		68.52	91.67	68.57	
18		25.16	97.77	60.84	
19		92.76	30.17	23.23	
20		95	86.76	80.32	
21		106.11	95.81	82.29	
22		45.05	35.26	28.05	
23		66.02	96.44	79.28	
24		85.11	76.28	75.98	
25		65.61	16.86	69.41	

ตารางที่ 6.24 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	Si - O ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	89.81	78.21	90.02	
2		99.19	90.63	98.52	
3		96.07	98.09	97.94	
4		99.86	75.74	81.42	
5		98.07	96.88	95.57	
6		98.87	93.42	94.68	
7		63.09	86.78	67.46	
8		97.71	91.73	99.2	
9		98.62	96.13	98.19	
10		93.4	22.31	80.15	
11		99.06	92.21	96.72	
12		45.08	96.06	91.78	
13		91.54	68.12	73.32	
14		20.64	92.84	90.97	
15		38.04	92.21	96.34	
16		61.08	67.83	80.86	
17		96.41	53.24	93.66	
18		54.11	86.15	90.68	
19		19.33	60.43	73.76	
20		99.98	97.2	47.34	
21		83.96	99.14	96.64	
22		67.67	79.24	77.41	
23		80.34	94.21	97.44	
24		85.77	93.56	98.63	
25		85.09	82.87	96.93	

ตารางที่ 6.25 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	Si - O ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	91.98	89.70	78.77	
2		96.47	96.06	87.02	
3		99.73	99.09	93.04	
4		91.61	88.8	83.99	
5		96.23	93.29	95.42	
6		97.84	99.56	98.24	
7		68.47	93.56	67.15	
8		93.39	77.45	93.55	
9		88.13	91.31	83.81	
10		90.61	88.8	44.67	
11		96.57	92.99	90.15	
12		92.17	94.68	94.32	
13		36.52	89.2	69.07	
14		90.41	90.97	90.65	
15		90.05	85.62	94.71	
16		53.58	49.09	87.81	
17		88.56	97.17	95.06	
18		95.62	94.91	91.15	
19		70.06	56.31	73.65	
20		90.73	75.64	94.72	
21		90.91	93.62	92.57	
22		96.83	45.47	86.86	
23		97.42	98.68	89.12	
24		94.69	97.99	91.04	
25		83.48	62.35	65.66	

ตารางที่ 6.26 ปริมาณ Si - O ในฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

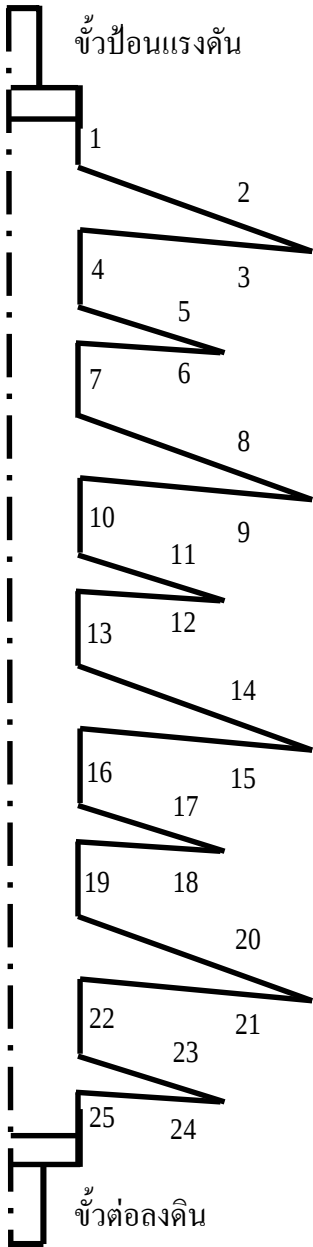
ตำแหน่งที่	Si - O ที่ลดลง (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	87.15	91.58	57.64	ขั้วป้อนแรงดัน
2		90.81	76.56	95.59	
3		95.58	95.37	94.73	
4		65.22	77.01	70.2	
5		97.81	99.29	94.91	
6		34.18	99.46	95.84	
7		75.42	74.59	37.69	
8		84.03	72.42	95.91	
9		98.89	64.25	99.57	
10		84.03	62.43	56.65	
11		89.83	97.93	95.61	
12		98.4	94.41	93.88	
13		78.51	78.07	20.76	
14		99.76	96.77	98.62	
15		90.71	71.81	90.73	
16		42.55	54.55	79.14	
17		96.04	95.27	90.39	
18		94.25	38.23	95.3	
19		71.36	79.33	92.82	
20		93.81	57.86	74.02	
21		93.54	94.91	92.89	
22		94.81	71.07	96.81	
23		95.93	99.35	94.48	
24		95.11	93.92	91.84	
25		92.61	89.76	63.53	
					ขั้วต่อลงดิน

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR – FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จไฟฟ้าระบบ 24 kV ที่ผ่านทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ พบว่าปริมาณของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักมีการลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณลำตัวฉนวนยางซิลิโคนมีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟที่รุนแรง การลดลงของ Si - CH₃ และ Si - O เป็นสาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลต่อการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นเพราะกับดักเสิร์จไฟฟ้าทำหน้าที่ลดแรงดันเกินให้ต่ำลง คือค่าความต้านทานจะน้อยลงเมื่อกระแสไหลผ่านมากขึ้นจึงทำให้แรงดันเกินถูกตัดให้มีค่าต่ำลงมาก ๆ และกับดักเสิร์จไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นฉนวนเมื่ออยู่ในสภาวะปกติ ด้วยเหตุดังกล่าวเมื่อยางซิลิโคนเสื่อมสภาพจึงทำให้การเป็นฉนวนลดลงตามไปด้วย

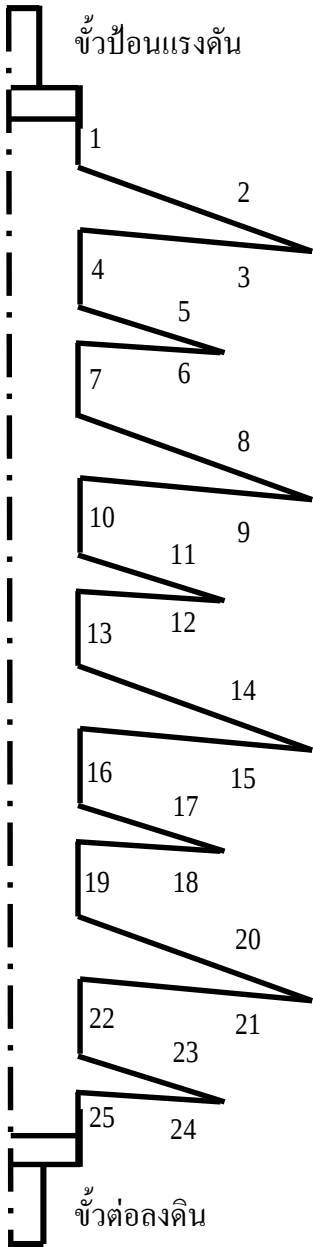
จากการวิเคราะห์ปริมาณการลดลงของ Si - CH₃ และ Si - O สามารถแสดงความสัมพันธ์โดยใช้อัตราส่วนของ Si - CH₃/Si - O เพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของการดูดกลืนแสงระหว่างฉนวนยางซิลิโคนใหม่และฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ดังแสดงในตารางที่ 6.27 ถึง ตารางที่ 6.30



ตารางที่ 6.27 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH₃/Si - O จากการทดสอบรอบที่ 1

ตำแหน่งที่	Ratio (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	75.64	69.81	83.81	
2		98.95	78.66	99.69	
3		94.52	66.28	79.23	
4		65.17	64.71	48.46	
5		81.89	95.58	87.36	
6		66.38	73.69	84.78	
7		62.62	78.44	51.95	
8		83.73	92.72	51.46	
9		52.31	81.37	63.77	
10		84.26	18.63	64.13	
11		65.81	66.68	48.87	
12		63.83	59.16	55.24	
13		97.89	68.17	35.26	
14		66.79	89.38	93.68	
15		65.83	87.36	84.83	
16		61.33	83.18	44.04	
17		61.8	97.62	50.74	
18		97.04	98.48	46.66	
19		69.16	23.76	22.97	
20		79.99	95.14	68.49	
21		84.29	98.19	76.72	
22		69.61	40.69	35.06	
23		97.43	97.25	64.8	
24		79.98	82.63	57.33	
25		54.77	23.26	54.34	

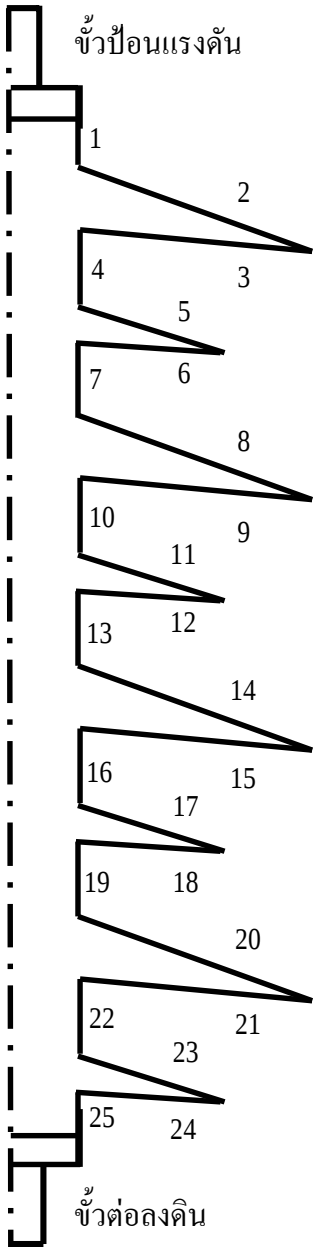
ตารางที่ 6.28 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH₃/Si - O จากการทดสอบรอบที่ 2

ตำแหน่งที่	Ratio (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	78.71	68.09	71.19	
2		92.57	99.77	99.91	
3		86.99	99.94	96.42	
4		88.93	57.38	77.79	
5		90.44	97.65	84.10	
6		83.60	95.11	78.26	
7		50	66.05	53.34	
8		93.04	84.6	99.5	
9		87.79	85.72	88.05	
10		73.46	71.03	57.42	
11		76.82	75.44	69.26	
12		48.24	86.78	59.72	
13		85.91	46.99	46.79	
14		60.46	77.54	77.11	
15		46.14	64.68	88.23	
16		53.5	51.29	60.81	
17		83.31	46.64	71.81	
18		47.35	56.14	67.64	
19		51.3	49.25	51.59	
20		89.95	98.28	93.87	
21		58.45	88.61	92.85	
22		57.71	54.99	56.56	
23		64.17	90.08	92.64	
24		57.62	82.38	83.17	
25		56.32	66.5	91.82	

ตารางที่ 6.29 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH₃/Si - O จากการทดสอบรอบที่ 3 (สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	Ratio (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	90.37	70.08	43.10	
2		86.46	94.91	99.23	
3		83.47	75.51	96.49	
4		64.46	55.96	47.83	
5		98.96	91.65	95.62	
6		91.83	90.76	86.69	
7		49.08	73.42	34.42	
8		76.32	72.27	88.61	
9		68.31	90.66	83.82	
10		53.03	76.63	23.18	
11		84.63	90.17	92.78	
12		70.12	79.71	73.59	
13		10.25	56.48	42.08	
14		99.97	97.91	98.32	
15		66.84	48.71	61.52	
16		23.25	21.66	48.76	
17		87.19	93.31	95.81	
18		75.86	66.19	71.65	
19		35.86	25.82	35.57	
20		97.26	59.23	99.59	
21		93.11	88.97	87.01	
22		90.75	35.19	56.49	
23		91.45	97.2	94.63	
24		92.58	81.39	87.03	
25		51.71	30.15	44.49	

ตารางที่ 6.30 ปริมาณอัตราส่วน Si - CH₃/Si - O จากการทดสอบรอบที่ 3 (ไม่สัมผัสแสง UV)

ตำแหน่งที่	Ratio (%)				ตำแหน่งบนฉนวนที่ทดสอบ
	ก่อนทดสอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	
1	100	59.85	86.21	38.12	
2		74.46	66.05	89.28	
3		94.75	90.12	97.21	
4		50.68	36.51	32.33	
5		92.67	98.98	93.95	
6		50.71	99.78	92.35	
7		60.34	74.26	25.94	
8		48.74	97.82	92.11	
9		88.79	77.49	82.85	
10		48.74	79.25	43.69	
11		99.38	93.07	94.55	
12		89.55	84.30	65.74	
13		43.88	36.45	8.939	
14		84.47	82.15	82.69	
15		60.51	25.58	55.88	
16		20.48	27.62	33.62	
17		88.58	91.22	91.36	
18		78.57	16.33	83.04	
19		37.76	39.4	58.04	
20		84.71	60.84	75.88	
21		90.46	80.1	96.08	
22		70.52	32.59	70.56	
23		90.02	99.31	95.14	
24		94.24	87.84	83.99	
25		63.84	64.14	41.54	

อัตราส่วนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Si - CH₃ และ Si - O แสดงให้เห็นถึงการลดลงของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงการสลายตัวของโครงสร้างทางโมเลกุล การลดลงของพันธะทั้งสองส่งผลให้ยางซิลิโคนมีความสามารถในการทนต่อสภาวะอากาศต่าง ๆ ที่ประกอบไปด้วย โอโซน แสงอัลตราไวโอเลต และความร้อนได้น้อยลง ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพและนำไปสู่การเกิดความเสียหายต่อแกนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าได้ ส่งผลให้การป้องกันแรงดันเกินในระบบผิดพลาด

6.5 สรุป

ในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน เพื่อยืนยันความถูกต้องจากการสร้างห้องทดสอบและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าระบบ 24 kV โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ได้ดังนี้

เมื่อฉนวนยางซิลิโคนผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าพื้นผิวฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากสังเกตได้จาก สีของยางซิลิโคนที่เปลี่ยนแปลง ความแข็งและความขรุขระของยางซิลิโคนที่เพิ่มมากขึ้น ร่องผิวเสื่อมสภาพจากوابไฟ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติผิวหยาบน้ำลื่น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเหล่านี้เป็นผลมาจากฉนวนยางซิลิโคนได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นเป็นเวลานาน และสิ่งสกปรกที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน สาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลให้โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนเปลี่ยนแปลง

การทดสอบคุณสมบัติผิวหยาบน้ำลื่น การวัดค่าความแข็งและความขรุขระของพื้นผิวเป็นการยืนยันว่าฉนวนยางซิลิโคนมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพได้เป็นอย่างดี สำหรับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมีได้ใช้ ATR - FTIR วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง Si - CH₃ และ Si - O เพราะการลดลงของพันธะทั้งสองเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนดังที่ได้แสดงไว้ตารางที่ 6.27 – 6.30

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ทำการตรวจสอบพื้นผิวทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคนเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสารเติมแต่งและลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนที่เกิดขึ้น สรุปได้ว่าฉนวนยางซิลิโคนที่ได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลานาน จะปรากฏลักษณะการกัดกร่อนขึ้นบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีและนับเป็นจุดเริ่มต้นของการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนตามมา

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่า เพื่อประเมินว่ากับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นโดยมีฉนวน โครงหุ้มทำมาจากยางซิลิโคนสามารถทนต่อผลกระทบที่เกิดจากการจำลองสภาวะต่าง ๆ ผลกระทบจากความเครียดทางไฟฟ้า และผลกระทบจากดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุได้ การดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่เกิดจากปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมจากการใช้งานจริงและความเครียดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนขึ้น เพื่อศึกษาถึงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้ทำการศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนดังที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าที่มีฉนวน โครงหุ้มทำมาจากยางซิลิโคน โดยกล่าวถึงชนิด โครงสร้างส่วนประกอบและการเลือกกับดักเสิร์จฟ้าผ่าไปใช้งาน รวมถึงกลไกการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างของฉนวนยางซิลิโคนอย่างละเอียด และได้นำเสนอปัจจัยต่าง ๆ และปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีผลโดยตรงต่อการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบที่เกิดจากการสูญเสียคุณสมบัติผิวหดย่นน้ำขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน โดยอธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในส่วนห้องทดสอบชุดฯ สำหรับวางถังน้ำ ชุดฐานสำหรับติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่า รวมถึงฐานวางหม้อแปลงที่ใช้สำหรับทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ห้องทดสอบที่ได้จากการออกแบบมีความแข็งแรง ทนทาน สามารถรองรับการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาอันยาวนานเมื่อต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีหมอกไอเกลือ ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลตได้ นอกจากนี้ยังได้อธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ วงจรสำหรับควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต และชุดควบคุมการจุดหลอดอัลตราไวโอเลต เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวมีขั้นตอนที่ยุ่งยากมากกว่าการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือเพียงอย่างเดียว และเพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนได้อย่างละเอียด

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอขั้นตอนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเล็กรังฟ้าผ่า ได้อธิบายถึงมาตรฐาน IEC Publ. 61109 - 1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือโดยแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบคือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือและการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้กับดักเล็กรังฟ้าผ่าระบบ 24 kV นำมาทดสอบ โดยทดสอบ 3 รอบ ใช้กับดักเล็กรังฟ้าผ่ารอบละ 3 ตัว แบ่งการทดสอบออกได้ดังนี้ 1) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันทดสอบ 18 kV 2) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV และ 3) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายภายใต้แรงดันใช้งานจริง 19.2 kV ซึ่งทั้ง 3 การทดสอบใช้ระยะเวลาในการทดสอบเท่ากันคือ 1,000 ชั่วโมง

บทที่ 6 เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบหรือใช้งาน ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพเป็นการสังเกตลักษณะภายนอกของฉนวนยางซิลิโคนว่ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นบ้าง ทั้งในระหว่างการทดสอบและหลังจากทดสอบเสร็จแล้ว จากการสังเกตพบว่าในระหว่างการทดสอบทั้ง 3 การทดสอบมีอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นสามารถเห็นได้ชัดเจน โดยที่อาร์กแถบแห้งเป็นแสงไฟสีเหลืองส่วนโคโรนาดีสชาร์จเป็นแสงไฟสีม่วง เมื่อทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 1,000 ชั่วโมง พบว่าผิวฉนวนยางซิลิโคนมีคราบเกลือและสิ่งสกปรกปนเปื้อนอยู่มาก โดยเฉพาะบริเวณลำตัวของฉนวนช่วงคอคอดได้ปีก เมื่อทำความสะอาดและวัดค่าความเปราะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC Publ. 60507 ปรากฏว่าบนผิวฉนวนยางซิลิโคนมีร่องรอยที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยเฉพาะบริเวณลำตัวของฉนวน จากนั้นทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นโดยอ้างอิงจากคู่มือ STRI พบว่ามีการลดลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ เพราะจากการทดสอบยังไม่เป็นฟิล์มน้ำ จากการสัมผัสด้วยมือเปล่าพบว่าฉนวนยางซิลิโคนมีความแข็งและขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ จึงทำการวัดค่าความแข็งด้วย Shore A โดยใช้ Durometer และวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวเพื่อยืนยันว่าฉนวนยางซิลิโคนมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพขึ้นจริง จากนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า

ปริมาณสารเติมแต่งที่ใส่ไปในยางซิลิโคนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติมีปริมาณลดลงตามไปด้วยและสามารถยืนยันได้ด้วยกราฟจากการทดสอบ ATR - FTIR สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย ATR - FTIR เพื่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si - CH₃ และ Si - O ซึ่งทั้งสองพันธะมีผลต่อการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนโดยตรง ผลจากการทดสอบพบว่าปริมาณพันธะทั้งสองมีค่าลดลง

จากบทสรุปข้างต้นที่กล่าวไว้สามารถยืนยันได้ว่าการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนมีสาเหตุมาจากการได้รับผลกระทบจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากการดีสชาร์จเป็นเวลานาน ซึ่งผลจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าทั้ง 3 รอบ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ผลที่ได้เป็นที่น่าสนใจและสามารถยืนยันได้ด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน

จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1) ในการจ่ายแรงดันให้กับชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ควรใช้เครื่องปรับแรงดันด้วยระบบดิจิทัลแทนที่ระบบควบคุมด้วยมนุษย์ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการจ่ายแรงดันให้แก่ฉนวนยางซิลิโคน

2) การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลายเป็นการทดสอบที่ใช้เวลานาน เนื่องจากในมาตรฐานได้กำหนดให้ใช้เวลาทดสอบต่อเนื่อง 5,000 ชั่วโมง อาจทำให้เครื่องสร้างหมอกมีปัญหาในระหว่างการทดสอบ จึงควรมีเครื่องสำรองอย่างน้อย 2 เครื่อง

3) หลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการทดสอบเป็นหลอดซินอนอาร์กที่มีความร้อนสูงมาก ชุดโคมที่ใช้ควรทำด้วยกระจกทนความร้อนสูงเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวหลอดเอง อันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างทันทีทันใดในระหว่างการทดสอบด้วยการจำลองสถานะความเครียดที่หลากหลาย

4) ควรแยกเซอร์กิตเบรกเกอร์ของชุดควบคุมต่าง ๆ ออกจากกันเพื่อป้องกันการเปิดวงจรในกรณีที่มีกระแสไหลผ่านเกินกว่าค่าที่กำหนด เพราะชุดควบคุมอุณหภูมิและชุดควบคุมหลอดอัลตราไวโอเล็ตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กระแสเริ่มต้นสูง

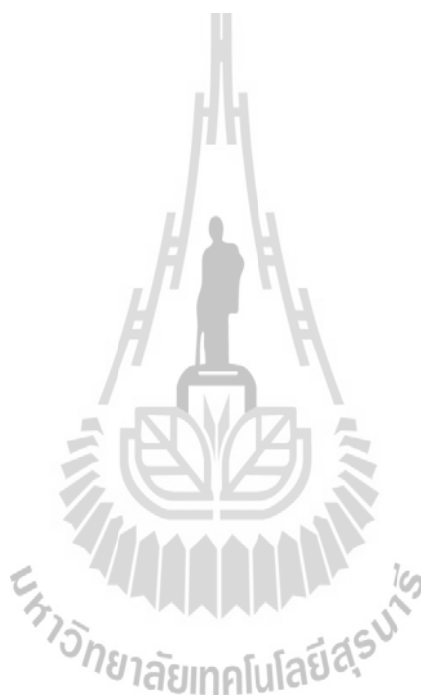
5) ถังใส่น้ำบนชุดฐาน ปลอกฉนวนนำสายแรงสูง รวมถึงภายในห้องทดสอบควรปรับปรุงและซ่อมแซมทุกครั้งที่ทดสอบเสร็จ 1 รอบเพื่อป้องกันสนิมเกิดขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1) สามารถนำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนไปใช้กับอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายชนิดอื่น ๆ เพื่อหาความคงทนของเนื้อสารได้

2) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะอื่น ๆ เช่นการศึกษาเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะแวดล้อมใช้งานจริงตามภูมิภาคต่าง ๆ ที่ต้องการติดตั้งการศึกษาการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในความเครียดทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- แม่น อมรสิทธิ์. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.
- วงศ์พันธ์ ทศนางกูร. (2546). การวิเคราะห์การติดตั้งกับดักเล็รจและการต่อลงดินของซีลด์ของสายเคเบิลใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 11-37.
- สำรวย สังข์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).
- Amin, M., Akbar, M., and Matsuoka, R. (2006). Effect of UV-radiation, temperature and salt fog on polymeric insulators. **Conference on Properties and applications of Dielectric Materials**. 8: 611-614.
- Amin, S., and Amin, M. (2009). Natural aging of SiR insulators in Pakistan. **Conference on Emerging Technologies**. 114-117.
- Amin, S., Amin, M., and Sundrarajan, R. (2008). Comparative multi stress aging of thermoplastic elastomeric and silicone rubber insulators in Pakistan. **Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena**. 293-296.
- Anonymous. (n.d.). **Insulation and Surge Arrester Characteristics and General Application Factors**. McGraw-Edison.
- Cherney, E.A., and Jayaram, S. (2001). Salt fog testing of polymer housed surge arrester. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 16(2): 252-258.
- Cho, H-G., Han, S-W., and Lee, U-Y. (2002). Multi-aging test technology for estimating long time performance of polymer insulators. **Conference on Properties and Applications of Dielectric Phenomena**. 232-236.
- Cho, H-G., Han, S-W., Lee, U-Y., Kim, S-S., and Lim, K-j. (2000). Multi-aging test technology for estimating long time performance of polymer insulators. **Conference on Properties and Applications of Dielectric Phenomena**. 375-378.
- De Oliveira, S. M., and de Turreil, C. H. (1900). Aging of distribution composite insulators under environmental and electrical stress. **IEEE Transaction on Electrical and Insulation**. 5(2): 1074-1077.

- Delman, A. D., Landy, M., and Simms, B. B. (1969). Photodecomposition of Polydimethylsiloxane. **J. Polym.Sci.** 7: 3375-3386.
- Doyle, C. D. (1958). Logarithmic Thermal Degradation of Silicone Rubber in Air. **J. Polym. Sci.** 31: 95-104.
- Gutman, I., and Hartings, R. (1999). Single stress and multistress AC/DC tracking and erosion tests for composite insulators. **Proceedings of the Nordic Insulation Symposium**. Copenhagen, Denmark. 271-278.
- Hillborg, H. C. (2001). **Loss and recovery of Hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges**. Royal Institute of Technology.
- 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**.
- ISO 686. (1985). **Plastic and ebonite-Determination of indentation hardness by means of a durometer (shore hardness)**.
- Kester, J. J., Miller, D. R., Benna, S. J., and Steinbrecher, B. T. (1998). Multistress aging tests of polymer housed surge arresters. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 13(2): 446-452.
- Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H., and Qureshi, M. I. (2006). **Effect of thermo-electrical stresses and ultra-violet radiation on polymeric insulators**. King Saud University.
- Kim, J., Park, C., Jung, Y., and Song, I. (2008). An investigation of aging characteristics of polymer housed distribution surge arrester by accelerated aging test. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 280-283.
- Kim, S-H., Cherney, E. A., Hackam, R., and Rutherford, K. G. (1994). Chemical changes at the surface of RTV silicone rubber coatings on insulators during dry-band arcing. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 1(1): 106-123.
- Kohli, A., Zhu, W., Akbar, S.A., Sebo, S.A., Sakich, J.D., and Zhao, T. (1998). Characterization of polymeric housing materials of non-ceramic insulators after aging test. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. 343-346.
- Koshino, Y., Nakagima, I., and Umeda, I. (1998). Effect on the electrical properties of fillers in silicone rubber for outdoor insulation. **Conference on Electrical Insulation material**. 465-468.

- Koshino, Y., Umeda, I., and Ishiwari, M. (1998). Deterioration of silicone rubber for polymer insulators by corona discharge and effect of fillers. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 1: 72-79.
- Kumagai, S., and Yoshimura, N. (2002). Tracking and erosion resistance stability of highly filled silicone and alloy materials against electrical and environmental stress. **IEE Transmission and distribution**. 150(4): 392-398.
- Kumagai, S., and Yoshimura, N. (2004) Polydimethylsiloxane and aluminatrichydrate system subject to dry-band discharges or high temperature part II: electrical stress. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 11(4): 701-707.
- Lee, J.B., Song, I.K., Kim, J.Y., Lee, B.S., and Kwon, T.H. (2004). Aging characteristics of polymer lightning arrester by multi-stress accelerated aging test. **Conference on Solid Dielectric**. 3-6.
- Marungsri, B. (2006). **Fundamental investigation on salt fog ageing test of silicone rubber housing materials for outdoor polymer insulators**. Doctoral thesis, Chubu University.
- 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., Watanabe, S., Gautum, B. K., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S. (2004). Effect of test conditions on ageing deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulators. **Conference on Solid Dielectric**. 324-327.
- Rattanakhogviput, C., Mohammed, A., Ayerh, C., Soundarajan, E., and Sundararajan, R. (2002). Surface analysis of polymeric surge arrester under coastal florida conditions. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 311-314.
- STRI Guide. (1992). **Hydrophobicity classification guide**.
- Sundararajan, R., Olave, C., Romero, E., and Trepanier, B. (2007). Modified IEC 5000-h multistress aging of 28-kV thermoplastic elastomeric insulators. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 22(2): 1079-1085.

Sundararajan, R., Soundarajan, E., Mohammed, A., and Graves, J. (2006). Multistress accelerated aging of polymer housed surge arrester under simulated coastal Florida conditions. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 13(1): 211-226.

The Institute of Electrical and Electronics Engineering Committee. (1997). **IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems**. IEEE Std. C62.22-1997.

Venkatesulu, B., and Thomas, M.J. (2011). Long-term accelerated weathering of outdoor silicone rubber insulators. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 18(2): 418-424.





ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 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. Vol. 80, pp. 650-655.
- Thong-om, S., Payakcho, W., Grasaesom, J. and Marungsri, B. (2011) **Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulators in Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test.** World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 60, pp. 410-419.
- Thong-om, S., Payakcho, W., Grasaesom, J. and Marungsri, B. (2011) **Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Material for Outdoor Polymer Insulators.** World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 60, pp. 1435-1442.
- 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. Vol. 80, pp. 533-539.
- Grasaesom, J., Thong-om, S., Payakcho, W., Oonsivilai, A. and Marungsri, B. (2011) **Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test.** World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 60, pp. 156-163.
- 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. Vol. 80, pp. 211-217.

Artificial Accelerated Ageing Test of Silicone Rubber Housing Material for Lightning Arrester

W. Payakcho, J. Grasaesom, S. Thong-om and B. Marungsri*

Abstract This paper presents the experimental results of silicone rubber housing material for 24kV lightning arrester under artificial accelerated ageing test based on IEC 61109 specifications. Specimens having inclined and alternated shed made of HTV silicone rubber with ATH content and having leakage distance 625 mm were tested continuously 1000 hrs in artificial salt fog chamber. After 1000 hrs of salt fog ageing test, obviously surface erosion was observed on trunk between the upper large shed and the lower small shed near the energized end. Decreasing in hydrophobicity and increasing in hardness were measured on tested specimen comparing with new specimen. Chemical analysis by ATR-FTIR confirmed the observation results.

Keywords Accelerated ageing test, Silicone rubber housing material, salt fog test, Lightning Arrester, Ageing

I. INTRODUCTION

LIGHTNING arrester or surge arrester is generally connected between phases-ground in the substations or transmission system or distribution system in order to protect the insulation system from voltage surge such as lightning surge or switching surge. These voltage surges affect to the insulation performances in the system [1].

Presently, silicone rubber (SiR) is an insulating material widely using for lightning arrester housing. SiR offers for good resistance to extreme temperature, tensile strength, elongation, tear strength and compression.

Sundararajan et al. [2] tested the accelerated ageing test of silicone rubber housing material for lightning arrester in multi-stress test. After tested found that arresters sustained the stresses without any major breakdown, just as any polymeric arrester performing well in the field for several years. No flashover, major surface cracking, or erosion was observed.

Marungsri et al. [3] studied the salt fog ageing test result of silicone rubber for outdoor polymer insulators. This studied found that tracking occurred on the surface of RTV (Room Temperature Vulcanized) SiR rod.

Cho et al. [4] found that the hydrophobicity level of tested specimens is bad after 1000hrs ageing test because of local discharges.

Ageing deterioration is major problem of silicone rubber housing material for lightning arrester due to it is polymeric

material. Physical changes (such as erosion tracking), chemical change (depolymerization) or changes in the physicochemical (such as hydrophobic) affect to ageing of polymeric housing materials [5] - [8].

This paper reports the experimental results on salt fog testing of silicone rubber housing material for lightning arrester. Details of the experimental and the results are explained and discussed in the follow sections.

II. TEST ARRANGEMENT

A. Specimen

Insulation housing made of silicone rubber with ATH (Alumina trihydrate) content for 24kV system lightning arrester was used in this experimental. Alternated and inclined shed is configuration of tested specimen. Dimensions of tested specimen are illustrated in Fig. 1.

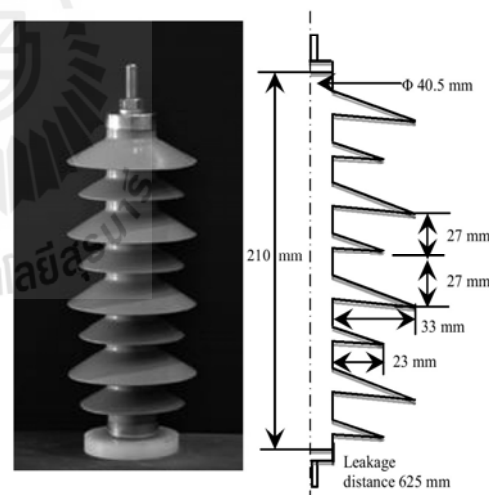


Fig. 1 Configuration and dimensions of specimen.

B. Test Method

All specimens were placed in the test chamber having volume 9.6 m^3 ($2 \times 2 \times 2.4 \text{ m}^3$). Test chamber made from stainless steel sheet in order to prevent corrosion from salt fog. Salt fog was generated by using ultrasonic humidifier. Test arrangements are shown in Fig. 2 and test chamber is shown in Fig. 3, respectively.

W. Payakcho, J. Grasaesom and S. Thong-om are with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND.

*B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, 30000, THAILAND (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmshevee@ sut.ac.th).

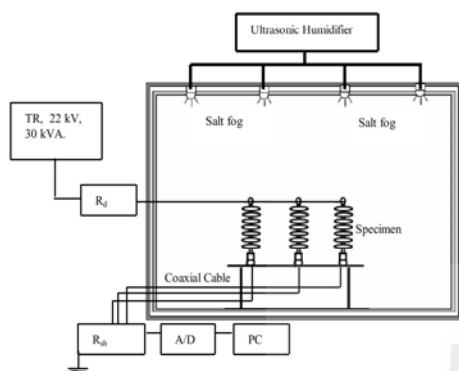


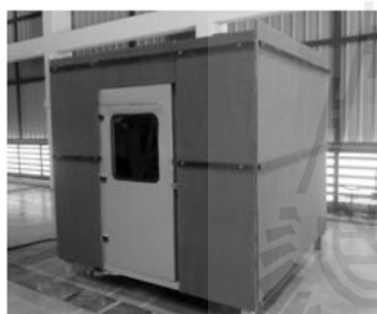
Fig.2 Test arrangement.

TABLE I
TEST CONDITIONS.

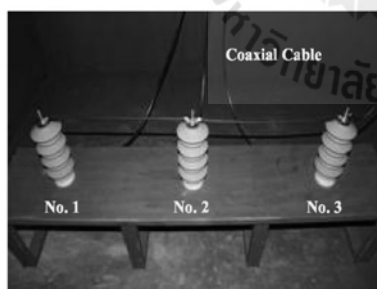
Test Chamber	9.6 m ³
Test Voltage	AC 18 kV Continuously Applied
Voltage Stress	34.6 mm/kV.
Salt fog Generation	Ultrasonic Humidifier
Salt fog Injection Rate	0.5 l/hr/m ³
Salt fog Salinity	10 kg/m ³ (16000 μS/cm)
Test sequence in 24 hours.	Salt fog injected for 8 hours and stopped for 16 hours.

TABLE II
TEST CYCLE.

Aging period (hr)	0-8	8-24
Voltage		
Salt fog		



(a) Test chamber



(b) Specimen installation

Fig. 3 Illustration of test chamber.

C. Test Conditions

Test was conducted continuously for 1000 hrs based on IEC 61109 [9]. The cyclic salt fog ageing test was conducted by injecting salt fog for 8 hours and stopping it for 16 hours every day under AC 18 kV, tested together under the conditions show in Table I and test cycle shown in Table II, respectively.

III. TEST RESULTS AND DISCUSSIONS

Silicone rubber housing material for lightning arrester was tested base on IEC 61109 in order to elucidate degree of surface ageing. The analyzing by physical method and chemical method such as visual observation, surface contamination degree, loss of hydrophobicity, hardness measurement and ATR-FTIR analysis were conducted on tested specimen after 1000 hrs salt fog test.

A. Visual Observation

During artificial salt fog ageing test, discharge activities as shown in Fig. 4 were observed. As shown in Fig. 4, yellow light for dry band arcing was observed. Such discharge indicated that large dry band arc discharge occurred on the specimen surface near the energized end. Low power discharge or corona discharge was also observed.

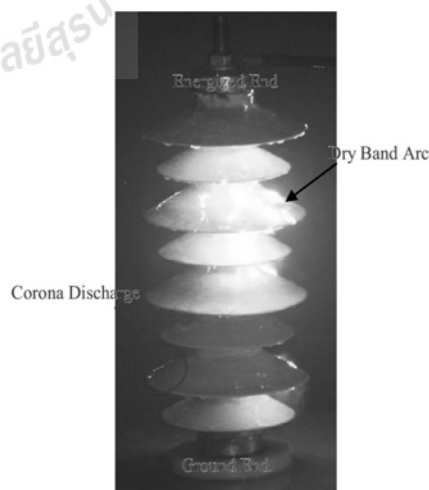


Fig. 4 Discharge Activities

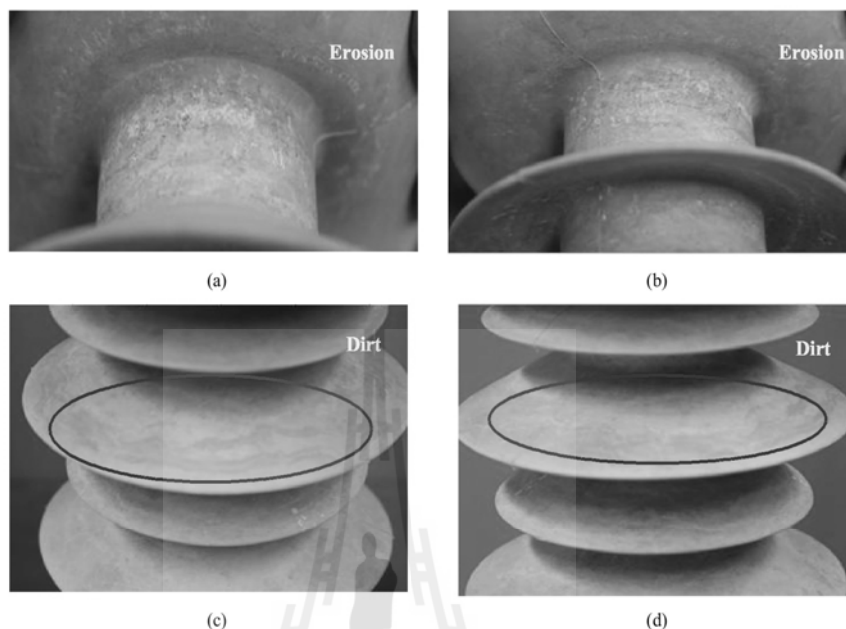


Fig. 5 Visual observation on the surface for lightning arrester.

After 1000 hrs salt fog ageing test, obviously surface erosion was observed on the trunk surface between small and large shed near the energized end of all specimen, as shown in Figure 5 (a) and (b). Slightly surface erosion was also observed on the other trunk portion along the specimen surface. Also, slightly erosion was observed on all shed surface. As shown in Fig. 5 (a), erosion zone on trunk surface occurred close to shed surface and erosion zone on shed surface occurred close to trunk surface. The explanation for such occurring is shown in Fig. 6. In border of wetting zone, dry band arcing easily occurred due to easier formation of dry band than drying and wetting zone. This explanation is supported by no erosion surface on drying and wetting zone.

As shown in Figure 5 (c) and (d), no erosion was observed on the upper shed surface. However, dirt was only observed on such portion.

B. Contamination Degree

Surface contamination degree was determined by measuring salt deposit density (SDD). The measurement procedures were based on IEC 60507 [10]. On the tested specimens, more contaminations were observed on the trunk surface than on the shed surface. Contamination degree measurement result on specimen surface after 1000 hrs ageing test is shown in Table III. The formulas for SDD calculation are as follows.

$$SDD = \frac{S_a}{A} \quad (1)$$

$$S_a = (5.7 \times 10^{-4} \sigma_{20})^{1.03} \quad (2)$$

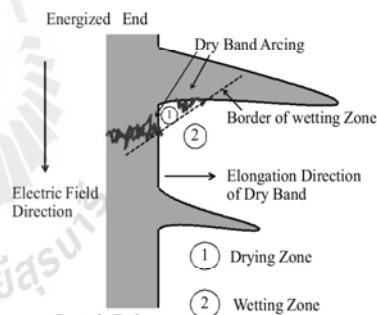


Fig. 6 Explanation of surface erosion

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (3)$$

where

θ is solution temperature ($^{\circ}\text{C}$),

σ_{θ} is the volume conductivity at temperature of θ $^{\circ}\text{C}$ (S/m),

σ_{20} is the volume conductivity at temperature of 20 $^{\circ}\text{C}$ (S/m),

b is the factor depending on temperature of θ $^{\circ}\text{C}$,

S_a is Salinity (mg/cm^3),

SDD is salt deposit density (mg/cm^2),

V is volume of distilled water (cm^3),

A is area of the specimen surface for collecting contaminations (cm^2).

Significant different in contamination degree was not measured.

TABLE III
CONTAMINATION DEGREE

Specimen No.	Sa (mg/cm ³)	SDD (mg/cm ²)
1	2.061	0.2626
2	2.0688	0.2636
3	1.6622	0.2118

C. Hydrophobicity

Loss of hydrophobicity on specimen surface after 1000 hrs ageing test was evaluated by STRI guide [11], as show in Fig. 7. Decreasing in hydrophobicity on surface of tested specimen near energized end was obtained from the measuring results. The measurement results are shown in Table IV.

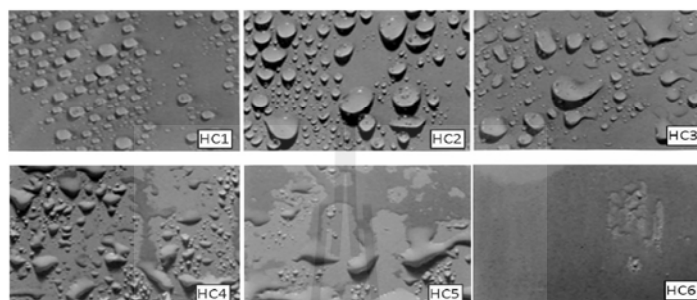


Fig. 7 Characteristics of the sample surface HC1-HC6 [11].

TABLE IV
HYDROPHOBICITY BY STRI CRITERIA

Position	Specimen			Position
	No. 1	No. 2	No. 3	
1	HC 3	HC 3	HC 4	
2	HC 3	HC 4	HC 4	
3	HC 2	HC 2	HC 2	
4	HC 2	HC 3	HC 3	
5	HC 2	HC 2	HC 3	
6	HC 1	HC 1	HC 2	
7	HC 2	HC 3	HC 2	
8	HC 3	HC 4	HC 4	
9	HC 3	HC 2	HC 3	
10	HC 3	HC 3	HC 3	
11	HC 3	HC 3	HC 3	
12	HC 1	HC 2	HC 1	
13	HC 2	HC 3	HC 2	
14	HC 3	HC 3	HC 3	
15	HC 1	HC 1	HC 2	
16	HC 2	HC 3	HC 2	
17	HC 2	HC 2	HC 2	
18	HC 1	HC 1	HC 1	
19	HC 2	HC 3	HC 3	
20	HC 3	HC 3	HC 3	
21	HC 1	HC 1	HC 2	
22	HC 2	HC 2	HC 3	
23	HC 2	HC 2	HC 3	
24	HC 1	HC 1	HC 2	
25	HC 3	HC 3	HC 3	

D. Chemical analysis by ATR FTIR

In order to confirmed surface ageing, chemical analysis by ATR-FTIR (attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy) was conducted to evaluate the chemical changed on tested specimen surface. Decreasing in Si - CH₃ bonds (wave number 1260 cm⁻¹) indicate that side chains are cleaved. Decreasing of Si - O bonds (wave number 1011 cm⁻¹) indicate that back bones are broken or depolymerization.

For comparison ATR-FTIR analysis result of new specimen is defined as 100% and is used to comparing with tested specimen. ATR -FTIR analysis results of position 2 are shown in Fig. 8. ATR - FTIR analysis results for all portion of tested specimen are shown in Table V. Decreasing of side chain and back bonds confirmed surface ageing.

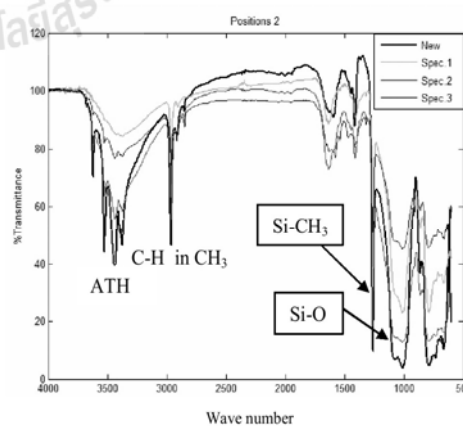


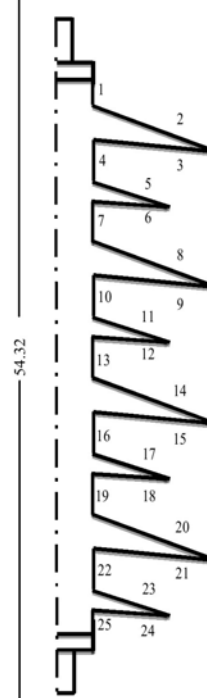
Fig. 8 ATR - FTIR analysis result (Position 2).

TABLE V
SURFACE ANALYSIS RESULTS BY ATR – FTIR

Position	Specimen							
	%Transmittance (Si-CH ₃)				%Transmittance (Si-O)			
	new	1	2	3	new	1	2	3
1	61.975	55.791	74.207		60.783	79.922	88.545	
2	47.887	63.694	94.543		75.561	83.713	94.922	
3	81.313	64.092	66.27		87.017	89.742	83.644	
4	55.012	56.881	14.185		78.971	61.644	29.272	
5	34.241	12.175	71.043		81.503	27.675	81.317	
6	81.453	60.978	69.988		54.917	89.641	82.551	
7	56.698	60.072	30.238		45.772	78.046	58.207	
8	17.983	25.954	86.879		13.198	55.031	82.6	
9	78.253	78.611	88.923		92.967	78.093	86.818	
10	67.474	76.325	16.091		25.401	82.081	25.09	
11	15.837	13.811	27.71		3.387	23.721	56.696	
12	55.588	23.784	40.774		91.821	53.602	73.817	
13	37.648	34.997	14.866		70.089	69.789	42.156	
14	21.954	81.995	82.753		35.472	39.856	82.002	
15	70.379	71.029	84.49		85.447	77.527	83.611	
16	74.422	27.75	9.6887		74.873	79.049	21.999	
17	23.819	8.316	34.793		68.521	20.799	68.571	
18	76.811	29.864	28.391		25.164	64.829	60.843	
19	87.093	24.369	5.336		92.762	57.523	23.229	
20	6.151	82.55	55.014		95.004	21.961	80.319	
21	70.855	98.516	63.138		106.11	75.936	82.297	
22	84.559	54.193	9.8343		45.045	77.806	28.051	
23	12.316	8.441	51.376		66.021	96.443	79.282	
24	80.502	44.097	43.557		85.114	74.956	75.98	
25	35.936	37.386	37.719		72.118	71.834	69.412	

TABLE VI
HARDNESS MEASUREMENT RESULTS

Position	Specimen No.				Position
	1	2	3	New	
1	58.32	58.8	59.84		
2	56.32	58.08	57.2		
3	56.64	57.6	56.56		
4	58.32	59.28	59.2		
5	57.52	58.32	58.48		
6	60.4	59.2	58.4		
7	56.64	57.76	59.04		
8	58.96	56.56	57.28		
9	56.64	57.28	55.52		
10	56.8	55.92	60.56		
11	59.28	57.76	58		
12	59.2	58.96	59.12		
13	57.76	53.2	60.24		
14	57.28	58.4	58.8		
15	59.2	59.2	58.48		
16	61.28	59.68	59.84		
17	56.96	58.08	58.32		
18	56.16	56.56	59.44		
19	57.6	53.44	57.92		
20	57.28	57.44	58.16		
21	57.6	58.16	58.08		
22	57.52	58.48	59.12		
23	55.52	59.04	57.12		
24	57.92	58.88	60.24		
25	60.64	60.16	60.56		



E. Hardness

After 1000 hrs salt fog test, hardness was measured on tested specimen surface comparing with new specimen surface. Measurement methods were based on the ISO 868 – Shore Hardness [12]. The measurement results are shown in Table VI. Increasing in surface hardness was measured on tested specimen comparing with new specimen. The measurement results showed the oxidation crosslink of silicone rubber or polydimethylsiloxane. However, no significant different in hardness was observed.

IV. CONCLUSION

In this study, salt fog ageing based on IEC 61109 is carried out in order to investigate ageing of silicone rubber housing material for distribution type lightning arrester. The following conclusions were given.

(1) Surface erosion was observed on the trunk surface between the upper large shed and the lower small shed more than on the trunk surface between the upper small shed and the lower large shed.

(2) According to STRI Guide, no significant decreasing in hydrophobicity was measured.

(3) Chemical analysis by ATR – FTIR also confirmed surface deterioration of silicone rubber housing material for lightning arrester in the salt fog ageing test.

ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like to thank you Suranaree University of Technology and Precise Electric Manufacturing CO., LTD. for kind financial support.

REFERENCES

- [1] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, January 1992, pp. 302-309.
- [2] R. Sundararajan, E. Soundarajan, "Multistress Accelerated Aging of Polymer Housed Surge Arresters Under Simulated Coastal Florida Conditions", in Proc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, 2006, pp. 211-226.

- [3] B. Marungsri, H. Komiya, I. Aoyama, A. Ishikawa and R. Matsuoka, "Salt fog Ageing Test Results of Silicone Rubber for Outdoor Polymer Insulators", in Proc. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 7th, June 1-5, 2003, pp. 393-396.
- [4] Han-Goo Cho, Se-Won Han and Un-Yong Lee, "Multi-Aging Test Technology for Estimating Long Time Performance of Polymer Insulators", in Proc. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 2006, pp. 232-2236.
- [5] Y. Ono, "Silicone - Fields of Application and Technological Trends", Shin-Etsu Chemical Co.Ltd., Japan, 2003.
- [6] S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam and K. G. Rutherford, "Chemical Changes at the Surface of RTV Silicone Rubber Coatings on Insulators during Dry Band Arcing", IEEE Transaction on Dielectrics and Electric Insulation, Vol. 1, No. 1, 1994, pp. 106-123.
- [7] Salman Amin, Muhammad Amin, and Raji Sundarajan, "Comparative Multi Stress Aging of Thermoplastic Elastomeric and Silicone Rubber Insulators in Pakistan", in Proc. of IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectrics and Phenomena, 2008, pp. 293-296.
- [8] B. Marungsri, H. Shinokubo, and R. Matsuoka, "Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test", in Proc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 1, 2006, pp. 129-138.
- [9] IEC 61109, 1992, "Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria".
- [10] IEC 60507 Ed. 2 b: 1991, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems".
- [11] STRI Guide, "Hydrophobicity Classification Guide", 92/1, 1992.
- [12] ISO 868, "Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)".

professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are high voltage insulation technologies and electrical power system.



Worawit Payakcho was born in Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand, in 1986. He received his B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2007. He is currently a graduated student in school of Electrical Engineering, institute of Engineering at same the University.

His interesting areas High voltage Technology applications, High Voltage Insulation Technology and Power System Technology.



Janejira Grasaesom was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1986. She received B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2007. She is currently a master degree student in School of Electrical Engineering, Institute of Engineering at same the University. Her research topics interesting are high voltage technology application, high voltage insulation technology and power system technology.



Suchart Thong-om was born in Surin province, northeastern of THAILAND, in 1987. He received B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology. His 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

ประวัติผู้เขียน

นายวรวิทย์ พัทธโช เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่อำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เริ่มศึกษาระดับอนุบาล ถึงประถมศึกษาชั้นที่ 1 ที่โรงเรียนวัดโคกช้าง อำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และศึกษาต่อระดับประถมศึกษาชั้นที่ 2 จนถึงระดับประถมศึกษาชั้นที่ 6 ที่โรงเรียนประจักษ์ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เมื่อ พ.ศ. 2546 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2550 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลัง และพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการจักรกลไฟฟ้า 2 และ (4) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง