

ลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
ที่ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุ
ด้วยหมอกไอเกลือประติษฐ์

นายสุชาติ ทองอัม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**AGEING CHARACTERISTICS OF SILICONE RUBBER
HOUSING MATERIAL FOR OUTDOOR POLYMER
INSULATOR UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED
SALT FOG AGEING TEST**

Suchart Thong-om

**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**

ลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
ที่ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประติษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุชาติ ทองอัม : ลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวน
พอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิสรัฐ
(AGEING CHARACTERISTICS OF SILICONE RUBBER HOUSING MATERIAL FOR
OUTDOOR POLYMER INSULATOR UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED SALT FOG
AGEING TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 202 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอผลการศึกษาการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำฉนวน
โครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคาร โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ
การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัฐที่ 1000 ชั่วโมง ภายใต้
ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 โดยใช้ห้องทดสอบที่ออกแบบสร้างขึ้นและ
การทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติเป็นเวลา 2 ปี โดยไม่ม
ีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ในการทดสอบทำจากยางซิลิโคนแบบวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงแล
มีอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารตัวเติม รูปลักษณะของวัสดุทดสอบมี 2 แบบ คือ แผ่นฉนวนยาง
ซิลิโคนและลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ 1000
ชั่วโมง พบว่า พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเกิดการกัดกร่อนและเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ
จากวابلอยอย่างชัดเจนที่บริเวณลำตัวมากกว่าบริเวณปีก สำหรับแผ่นฉนวนยางซิลิโคนพบการ
กัดกร่อนเพียงเล็กน้อยที่บริเวณด้านข้อต่อแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งพบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ
อาร์กแถบแห้งในระหว่างการทดสอบและกระแสดำเนินผิวของฉนวนยางซิลิโคนที่วัดได้ มีขนาด
สูงขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น ส่วนวัสดุทดสอบที่ติดตั้งภายนอกอาคารโดยไม่ได้รับ
แรงดันไฟฟ้านั้น ไม่ปรากฏร่องรอยการเสื่อมสภาพอย่างเห็นได้ชัด เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี
ของผิวฉนวนยางซิลิโคนที่เสื่อมสภาพหลังการทดสอบยังพบว่า โครงสร้างพื้นฐานทางเคมี ได้แก่
พันธะ Si-CH₃ และ Si-O มีปริมาณลดลง เนื่องจากได้รับความเครียดทั้งทางไฟฟ้า สภาวะแวดล้อม
และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ฉนวน
ยางซิลิโคนสูญเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวนและสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุ
ของการเกิดกระแสดำเนินผิว อาร์กแถบแห้งและเกิดดีสชาร์จที่รุนแรงมากขึ้น นำไปสู่การเสื่อมอายุ
ของฉนวนยางซิลิโคน อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยพบว่า ระดับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี
ขึ้นกับระดับการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SUCHART THONG-OM : AGEING CHARACTERISTICS OF SILICONE
RUBBER HOUSING MATERIAL FOR OUTDOOR POLYMER INSULATOR
UNDER ARTIFICIAL ACCELERATED SALT FOG AGEING TEST. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D.Eng., 202 PP.

AGEING OF SILICONE RUBBER/SALT FOG AGEING TEST/LEAKAGE
CURRENT

This thesis presents the experimental results on ageing deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulator. The study was divided to two parts: the artificial accelerated salt fog ageing test 1000 hrs based on IEC Publ. 61109-1992 specification by using the designed and developed test chamber and the outdoor exposed ageing test (specimens hung vertically without energized). Tested specimens were made of high temperature vulcanized silicone rubber with alumina tri-hydrate contents as filler. Two types of specimen, sheets and insulator types, were used. After 1000 hrs of salt fog ageing test, obviously erosions and trackings were observed on trunk between sheds surface more than on the shed surfaces of insulator type specimen and slightly erosion was observed on surface near the energized end of sheet type specimen. Furthermore during the test, corona and dry band arc discharge was observed on specimens surface and magnitudes of the leakage current increased gradually as the number of the test cycles increased. In case of outdoor exposed test specimens, no obviously surface deterioration was not observed. In addition, by chemical analysis results, significant reduction in Si-CH₃ bonds and Si-O bonds was measured on ageing surface of tested specimen. Oxidation and hydrolysis reactions due to electrical and environmental stresses may caused the reduction chemical bonds.

chemical bonds. Resulting, silicone rubber losses its dielectric and hydrophobic properties. Then, severely many discharge activities occurred due to high magnitude of leakage current and lead to surface deterioration of silicone rubber insulator. As the results, degree of chemical change depends on degree of surface deterioration.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดีและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงการเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ เคนพะนาน ที่ช่วยติดต่อ ประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ และให้ความช่วยเหลือกับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณประวิติ บุญดี และบุคลากรฝ่ายอาคารและสถานที่ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และบุคลากรฝ่ายงานพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ คุณสหสชัย ทิพนเอนทร์ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการ วิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ รวมทั้งให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ คงมันกลาง คุณประวิตรา หมายสุข และบุคลากรศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของผู้วิจัย และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งใน อดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายพินัย ทองอัม ผู้เป็นบิดา และนางสยัน ทองอัม ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างเปี่ยมล้น จนทำให้ ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

สุชาติ ทองอัม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญาและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 สรุป.....	12
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 กล่าวนำ.....	14
3.2 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า.....	14
3.3 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....	15
3.4 โครงสร้างพื้นฐานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....	16
3.5 การวัดคาบในเซชัน.....	20
3.6 ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.1	การเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต	21
3.6.2	การเสื่อมสภาพจากการดีสชาร์จและการวาบไฟตามผิว	22
3.6.3	การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฉนวนยางซิลิโคน	23
3.6.4	การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฉนวนยางซิลิโคน	24
3.7	ลักษณะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนยางซิลิโคน	24
3.8	การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์	27
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
3.10	การทดสอบความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน	29
3.11	การทดสอบความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน	30
3.12	คุณสมบัติผิวหยดน้ำ	33
3.13	กระแสรั่วตามผิว	35
3.14	การหาค่าความเปราะ	36
3.15	โปรแกรม Lab VIEW	37
3.16	สรุป	46
4	การออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	47
4.1	กล่าวนำ	47
4.2	มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992	47
4.3	ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบ	48
4.3.1	ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์	48
4.3.2	ชุดทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ	64
4.4	สรุป	67
5	การทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	68
5.1	กล่าวนำ	68
5.2	การเตรียมวัสดุทดสอบ	68
5.2.1	การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธี หมอกไอเกลือประคิษฐ์	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้ สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ.....	73
5.3 การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธี หมอกไอเกลือประคิษฐ์.....	74
5.4 การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้ สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ.....	78
5.5 สรุป	79
6 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ.....	80
6.1 กล่าวนำ.....	80
6.2 การวิเคราะห์ทางกายภาพ.....	80
6.2.1 การสังเกตฉนวนยางซิลิโคนด้วยสายตา	80
6.2.2 ระดับความเปราะ.....	103
6.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหดย่นน้ำ.....	105
6.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	117
6.2.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง	141
6.2.6 การวิเคราะห์ค่าความขรุขระ.....	146
6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....	151
6.3.1 การใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี	151
6.4 การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวและประจุไฟฟ้าสะสม.....	172
6.5 สรุป	182
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	185
7.1 สรุป	185
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	188
รายการอ้างอิง	189
ภาคผนวก	193
ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่.....	193
ประวัติผู้เขียน.....	202

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 วิวัฒนาการและการพัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....	15
3.2 เกณฑ์สำหรับแยกประเภทความไม่ชอบน้ำ (HC1-HC7).....	34
3.3 การเปรียบเทียบค่าศัพท์ที่ใช้ในโปรแกรม Lab VIEW กับโปรแกรมพื้นฐาน ทั่ว ๆ ไป.....	40
4.1 อธิบายชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์ที่สร้างเสร็จ	54
5.1 ลักษณะของฉนวนยางซิลิโคนแบบ HTV ที่ใช้ในงานวิจัย	71
5.2 เงื่อนไขการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์.....	75
5.3 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์ (24 ชั่วโมง)	75
5.4 ตำแหน่งต่าง ๆ บนวงจรการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์	77
5.5 ช่วงเวลาการนำแผ่นฉนวนยางซิลิโคนไปวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุ.....	79
6.1 พื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน	104
6.2 ค่า SDD ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ	104
6.3 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกตรง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	106
6.4 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกสลับ หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	107
6.5 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	108
6.6 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	109
6.7 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	110
6.8 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	112
6.9 คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.10 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังได้รับแสงแดด 2 ปี	114
6.11 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังได้รับแสงแดด 2 ปี	115
6.12 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	116
6.13 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	142
6.14 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	142
6.15 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	143
6.16 ค่าความแข็งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	143
6.17 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	144
6.18 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	144
6.19 ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	145
6.20 ค่าความแข็งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	145
6.21 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	147
6.22 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	148
6.23 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	148
6.24 ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	149
6.25 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	149
6.26 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	150
6.27 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	150
6.28 ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	151
6.29 ช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคน	152
6.30 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	159
6.31 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	159

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.32 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	160
6.33 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	160
6.34 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังได้รับแสงแดด 2 ปี	165
6.35 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังได้รับแสงแดด 2 ปี	166
6.36 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกปีกสลับ-เอียง หลังได้รับแสงแดด 2 ปี	166
6.37 อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	172
6.38 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	174
6.39 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบของแผ่น ฉนวนยางซิลิโคน	176

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	17
3.2 โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS.....	18
3.3 การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	21
3.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	24
3.5 การเกิดไฮโดรไลซิสของยางซิลิโคน	25
3.6 ลักษณะผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	29
3.7 ลักษณะพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนที่วิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM	30
3.8 เครื่องทดสอบคูโรมิเตอร์แบบ Shore	32
3.9 หัวทดสอบคูโรมิเตอร์แบบ Shore A และ Shore D	32
3.10 ลักษณะกราฟจากการทดสอบความขรุขระของวัสดุ.....	33
3.11 มุมสัมผัสของหยดน้ำ.....	34
3.12 นิยามของมุมประชิด	35
3.13 ลักษณะตัวอย่างโดยทั่วไปของพื้นผิว HC1-HC6.....	35
3.14 ลักษณะของฟรอนต์พาแนลในโปรแกรม Lab VIEW	38
3.15 ลักษณะของบล็อกไดอะแกรมใน โปรแกรม Lab VIEW.....	39
3.16 ลักษณะของไอคอนและคอนเน็กเตอร์ในโปรแกรม Lab VIEW	39
3.17 ลักษณะของแถบเครื่องมือของโปรแกรม Lab VIEW.....	41
3.18 ลักษณะของ While Loop	42
3.19 ไโคะแกรมการวัดสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	43
3.20 NI USB-6009 หรือ DAQ Board ที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.21 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	44
3.22 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	45
3.23 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	45
4.1 แบบร่างห้องทดสอบ	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	แบบร่างฐานแขวนวัสดุทดสอบ 50
4.3	แบบร่างฐานวางถังน้ำเกลือและเครื่องอัลตราโซนิก ฮิวมิดิฟายเออร์ 51
4.4	แบบร่างการวางถังน้ำเกลือและอัลตราโซนิก ฮิวมิดิฟายเออร์ 52
4.5	แบบร่างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์ 53
4.6	ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์ที่สร้างเสร็จ 53
4.7	แผนภาพวงจรการวัดกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยางซิลิโคน 56
4.8	หลักการงานซอฟต์แวร์สำหรับวัดกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยางซิลิโคน 56
4.9	กระบวนการแยกสัญญาณจากกระแสรั่วตามผิวฉนวนยางซิลิโคน 58
4.10	ตัวอย่างโปรแกรมวัดกระแสรั่วช่องสัญญาณเดียว 59
4.11	บล็อกของ DAQ Assistant 60
4.12	การแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า 60
4.13	การกรองความถี่ 61
4.14	บล็อกการแยกช่องสัญญาณ 62
4.15	การอินทิเกรตหาประจุไฟฟ้า 62
4.16	บล็อกการบันทึกข้อมูล 62
4.17	ลักษณะบล็อกโคอะแกรมที่ใช้ในการวัดค่ากระแสรั่วตามผิวทั้ง 4 ช่องสัญญาณ 63
4.18	ลักษณะฟอร์มต์พาแนลที่ใช้ในการวัดค่ากระแสรั่วตามผิวทั้ง 4 ช่องสัญญาณ 64
4.19	แบบร่างชุดทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ 65
4.20	ฐานสี่เหลี่ยมสำหรับยึดตัวโครงหลักกับพื้นปูน 66
4.21	ชุดทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติที่สร้างเสร็จ 66
5.1	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรง 69
5.2	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ 70
5.3	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง 70
5.4	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน 71
5.5	แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบ 72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	ลักษณะการยี่ค้อเล็กโตรดกับแผ่นฉนวนยางซิลิโคน 72
5.7	การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ 73
5.8	การติดตั้งแผ่นฉนวนยางซิลิโคน 74
5.9	วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ 76
5.10	วงจรการทดสอบแรงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน 77
6.1	การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ 82
6.2	การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน 84
6.3	พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ 86
6.4	พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ 89
6.5	ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังทดสอบหมอกไอเกลือ 92
6.6	ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ 94
6.7	ลักษณะความเสื่อมสภาพบนผิวฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ 97
6.8	กราฟสกรปรกบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์หลังได้รับแสงแดด 2 ปี 100
6.9	กราฟสกรปรกบนพื้นผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี 102
6.10	ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ 106
6.11	ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังทดสอบหมอกไอเกลือ 107
6.12	ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เอียงชนิดอ่อนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ 108
6.13	ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เอียงชนิดอ่อนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ 109
6.14	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบ หมอกไอเกลือ 110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	112
6.16 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	113
6.17 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เอียงชนิดอ่อนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	114
6.18 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เอียงชนิดแข็งหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	115
6.19 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	116
6.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JSM-6400	117
6.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น NeoScope JCM-5000.....	117
6.22 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	119
6.23 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	121
6.24 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	122
6.25 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ	123
6.26 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เอียงชนิดอ่อนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	125
6.27 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี	128
6.28 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	130
6.29 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	133
6.30 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	135

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.31 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	137
6.32 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด F หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	138
6.33 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	139
6.34 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด H หลังได้รับแสงแดด 2 ปี.....	140
6.35 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน.....	141
6.36 ลักษณะของเครื่องวัดค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน.....	146
6.37 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคนด้วยเทคนิค ATR-FTIR.....	152
6.38 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด E หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	153
6.39 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด F หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	154
6.40 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด G หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	154
6.41 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด H หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	155
6.42 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	156
6.43 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	156
6.44 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	157
6.45 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังทดสอบหมอกไอเกลือ.....	157
6.46 วิธีการหา % Transmittance พันธะ Si-CH ₃ และพันธะ Si-O ของฉนวนยางซิลิโคน.....	158

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.47 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงฝั่งได้รับแสงแดด ตอนเช้า 2 ปี	161
6.48 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงฝั่ง ได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี.....	162
6.49 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับฝั่ง ได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี	162
6.50 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับฝั่ง ได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี.....	163
6.51 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เฉียงชนิดแข็งฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี	163
6.52 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เฉียงชนิดแข็งฝั่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี.....	164
6.53 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เฉียงชนิดอ่อนฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี	164
6.54 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ- เฉียงชนิดอ่อนฝั่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี.....	165
6.55 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E ฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า	168
6.56 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E ฝั่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย	168
6.57 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด F ฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า	169
6.58 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด F ฝั่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย	169
6.59 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G ฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า	170

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.60 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G ผึ่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย	170
6.61 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด H ผึ่งได้รับแสงแดดตอนเช้า	171
6.62 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด H ผึ่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย	171
6.63 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากกระแสความนำไฟฟ้า ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	179
6.64 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้ง ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	179
6.65 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	180
6.66 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากกระแสความนำไฟฟ้า ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน	181
6.67 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้ง ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน	181
6.68 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน	182

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา ด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ ระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่าย ไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการ ออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ปัจจุบันระบบไฟฟ้าแรงสูงของประเทศไทย เกือบทั้งหมดเป็นแบบสายจึงในอากาศและใช้ลูกถ้วยฉนวนแบบทั่วไป ซึ่งได้แก่ ลูกถ้วยฉนวน พอร์ซเลนและลูกถ้วยฉนวนแบบแก้วเหนียว จากข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่า เกิดการขัดข้องของสาย ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลหรือใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การเกิดวาปไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนเป็นประจำหรือที่ร้ายแรง บางครั้งมลภาวะอาจทำให้แกนของลูกถ้วยเป็นสนิมและผุกร่อน ซึ่งทำให้เกิดความผิพร้องขึ้นใน บางครั้งต้องใช้เวลานานกว่าที่จะกู้ระบบนำมาสู่ที่สภาวะปกติอีกครั้ง แต่เดิมการแก้ปัญหาถือ การเปลี่ยนลูกถ้วยฉนวนชุดใหม่ แต่ปัญหายังเกิดเหมือนเดิม วิธีแก้ปัญหที่เหมาะสมสำหรับ บริเวณที่มีมลภาวะก็คือ การนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานข้อดีของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน หรือลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยฉนวนแก้ว เหนียวคือ (Marungsri, B. 2006)

1. ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนมีแรงตึงผิวดำ (Low Surface Tension Energy) จึงทำให้ผิว ของลูกถ้วยฉนวนมีคุณสมบัติผิวหัดน้ำลิ้น (Hydrophobic Surface Property) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนมีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนและสภาวะเปียกชื้น ดีกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดา

2. ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนมีอัตราส่วนความทนทานแรงกลต่อน้ำหนัก (Mechanical Strength to Weight Ratios) สูงกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดา ซึ่งจะทำให้ลดราคาในการก่อสร้าง และการบำรุงรักษาสายส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบก่อสร้าง สายส่งแบบกะทัดรัดได้อีกด้วย

3. ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนไม่มีปัญหาที่ปูกถ้วยฉนวนแตกหักหรือชำรุดเสียหายที่เกิดจากกลุ่มคนที่ชอบทำลายสมบัติสาธารณะด้วยการใช้เป็นที่ลองแม่นปืน

ข้อเสียของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยฉนวนแบบแก้วเหนียว คือ

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

2. พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะสุกกรอบเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งสามารถก่อความเสียหายแก่ลูกถ้วยฉนวนได้

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

4. ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผิดพร่องยากในการตรวจสอบ

ในปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน สมรรถนะความทนทานของยางซิลิโคนต่อการสุกกรอบของพื้นผิวฉนวนและการเสถียรภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคน ทั้งในสภาวะแวดล้อมจริงและสภาวะจำลองในห้องปฏิบัติการกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินค่าความเชื่อมั่นระยะยาวในการนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิลิโคนมาใช้แทนลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดาและเพื่อออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน เนื่องจากสภาวะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ การที่จะออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของประเทศ ไทยจึงทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ การไฟฟ้าต่าง ๆ จึงยังคงลังเลที่จะนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาด้านมลภาวะ ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์ โดยการจำลองสภาวะที่มีหมอกไอเกลือที่ใช้งานตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992 และการทดสอบเสื่อมอายุของยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ สำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประคิษฐ์ ตามมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992
- 3) เพื่อทดสอบและศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนในลูกถ้วยฉนวนตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992
- 4) เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนและแผ่นยางซิลิโคนที่ทดสอบการเสื่อมอายุ
- 5) เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวขณะทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) กำหนดให้ห้องทดสอบมีขนาด 4 m³
- 2) ใช้อัลตราโซนิค ฮิวมิดิฟายเออร์ (Ultrasonic Humidifier) ในการสร้างหมอกไอเกลือ
- 3) การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวของยางซิลิโคนด้วยโปรแกรม Lab view[®]
- 4) การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ทำการศึกษาปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
- 2) ทำการศึกษาข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนตามมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992
- 3) ออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992
- 4) พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวของยางซิลิโคนด้วยโปรแกรม Lab view[®] ขณะทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

5) ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 1000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992

6) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพิกนนวนยางซิลิโคนทั้งทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย

- การวิเคราะห์ด้วยสายตา (Visual Observation)
- การวิเคราะห์ปริมาณการสะสมของสิ่งประอะเปื้อน (Salt Deposit Density : SDD)
- การวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (Hydrophobicity)
- การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron

Microscope : SEM)

- การวัดค่าความแข็ง (Hardness Measurement)
- การวัดค่าความขรุขระ (Roughness Measurement)
- การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated

Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectrometer) หรือ ATR-FTIR

7) การวิเคราะห์กระแสรั่ว (Leakage Current) ตามผิวและประจุรั่วสะสม (Cumulative Charge)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยพิกนนวนยางซิลิโคน
- 2) สามารถสร้างชุดทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยพิกนนวนยางซิลิโคนได้
- 3) สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินการเสื่อมอายุของลูกถ้วยพิกนนวนยางซิลิโคนได้
- 4) สามารถพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วตามผิวของลูกถ้วยพิกนนวนยางซิลิโคนได้
- 5) ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยพิกนนวนยางซิลิโคนในที่ประชุมวิชาการ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้ง

แนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์และการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์และการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประคิษฐ์และภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาตินั้น หลังการทดสอบยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยหลาย ๆ ท่านตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าว จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากเรื่องลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดลำดับการเรียบเรียงผลงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1999	Kim and Chaudhury	ศึกษาผลของการสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นและการฟุ้งคืนสู่สภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของฉนวนยางซิลิโคนหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ พบว่า การฟุ้งคืนสภาพความเป็นผิวหยดน้ำลื่นเกิดจากการแพร่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
1999	Fernando and Gubanski	ศึกษารูปแบบกระแสรั่วตามผิวของยางซิลิโคนบนพื้นผิวที่มีความเปราะเปื้อน จากการศึกษาพบว่า ขนาดกระแสรั่วตามผิวมีค่าต่ำมากเมื่อสภาพพื้นผิวเป็นแบบไม่ชอบน้ำ แต่เมื่อสภาพพื้นผิวที่เป็นแบบชอบน้ำ ขนาดกระแสรั่วตามผิวก็มีค่าเพิ่มขึ้น รูปคลื่นมียอดที่แหลมซึ่งเกิดจากการดีสชาร์จและมีฮาร์มอนิกสูงขึ้นด้วย
1999	Yoshimura, Kumagai and Nishimura	ศึกษาการเสื่อมอายุจากความเครียดทางไฟฟ้าและทางสภาพแวดล้อมของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้งานภายนอกอาคาร โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต โคโรนาดีสชาร์จ ฝนกรดและการเกิดอาร์กแฉกแห้งเป็นตัวทำให้เกิดการเสื่อมอายุ จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพพบว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการเชื่อมขวาง การแยกตัว การเปลี่ยนแปลงและการก่อตัวของกลุ่มไซทานอลเป็นปฏิกิริยาที่โดดเด่นที่สุดระหว่างการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน รวมทั้งการฟุ้งคืนสภาพผิวหยดน้ำลื่น ซึ่งยางซิลิโคนสามารถฟุ้งคืนสภาพผิวหยดน้ำลื่นได้โดยการเคลื่อนที่ของกลุ่มมวลโมเลกุลต่ำ
2001	Otsubo, Hashiguchi, Yamashita, Anami and Honda	ศึกษาการเกิดดีสชาร์จและการแผ่สเปกตรัมบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือ (Salt Fog Aging Test) โดยศึกษาภาพจากกล้องความเร็วสูงของการเกิดโคโรนา การดีสชาร์จและอาร์กแฉกแห้ง พบว่า การปล่อยสเปกตรัมของการดีสชาร์จบางส่วนคือรังสีเหนือม่วง ส่วนการเกิดอาร์กแฉกแห้งประกอบด้วยช่วงแถบสีเหลืองไปยังสีแดงของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2001	Kim, Song, Lee and Park	ศึกษากระแสรั่วตามผิวและการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีระนาบเอียง ผลแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการดีสชาร์จและขนาดของกระแสรั่วตามผิวมีความสอดคล้องกันกับกระบวนการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน และยังได้แบ่งยางซิลิโคนเป็น 2 ส่วน คือ ด้านบน(ด้านป้อนแรงดันไฟฟ้า)และด้านล่าง พบว่า ส่วนของด้านบนของยางซิลิโคนจะมีสายโซ่พอลิเมอร์สั้นกว่าด้านล่าง เนื่องจากการดีสชาร์จ ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเกิดการสูญเสียหรือเสียดสภาพของสารตัวเติมที่ด้านบนด้วย
2001	Kumagai and Yoshimura	ได้ทำการทดสอบและตรวจสอบการเกิดการกัดกร่อน (Erosion) และการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ (Tracking) ของยางซิลิโคนแบบ HTV Silicone ที่มีสารตัวเติม(ATH) ผสมอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 60% โดยน้ำหนัก ด้วยการทดสอบแบบระนาบเอียงตามมาตรฐาน IEC 587 ผลการทดสอบพบว่า ยางซิลิโคนที่มี ATH มากกว่า 40% โดยน้ำหนักจะเกิดการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟที่อุณหภูมิสูงถึง 400 °C
2001	Lopes, Jayaram, and Chemey	ได้ศึกษาพัฒนาการของกระแสรั่วตามผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนจากดีสชาร์จบางส่วนในห้องทดสอบหมอกไอเกลือ พร้อมกับการวัดระดับค่ากระแสรั่วตามผิวและการดีสชาร์จบางส่วนบนลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนที่ทดสอบการเสื่อมอายุ โดยใช้เทคนิคการบันทึกสัญญาณข้อมูลการดีสชาร์จบางส่วน
2003	Marungsri, Komiya, Aoyama, Ishikawa and Matsuoka	ตรวจสอบผลกระทบจากการเสื่อมอายุของโครงสร้างภายนอกของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จากการทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 15 kV จ่ายหมอกไอเกลือเป็นเวลานาน 8 ชั่วโมงและหยุดจ่ายหมอกไอเกลือเป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่า เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และบนแท่งฉนวนยางซิลิโคน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2003	Zhu, Yamashita, Anami, Otsubo, Honda, Hashimoto and Hashimoto	ศึกษาการวิเคราะห์กระแสรั่วและการประมาณค่าสนามไฟฟ้าจากการทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบหมอกไอเกลือ ปัจจัยจากหยดน้ำที่มีผลกระทบของการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งพบว่า หยดน้ำที่เกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อาจทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดการดีสชาร์จได้
2005	Zhu, Otsubo, Honda and Ohno	ได้อธิบายผลของสารตัวเติม (ATH) ที่ใช้เดิมในยางซิลิโคนที่ปริมาณ 0-50% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ป้องกันการกัดกร่อนจากการเกิดอาร์กแฉบแห้ง พบว่า สารตัวเติมที่อยู่ในยางซิลิโคนสามารถช่วยยับยั้งหรือป้องกันการเกิดอาร์กแฉบแห้งได้และสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมลงไป ในยางซิลิโคน แต่ยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมกลับเกิดการสูญเสีย น้ำหนักหรือเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว
2006	Sundararajan , Soundarajan, Mohammed and Graves	ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าภายใต้การจำลองด้วยสภาวะความเครียดต่าง ๆ จากการใช้งานจริง โดยเน้นการจำแนกว่า เนื้อของฉนวนซิลิโคนที่มีส่วนผสมของเอทิลีน, โพรพิลีน และยางซิลิโคนหลังจากการทดสอบแล้วมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้นอยู่กับระดับใด
2006	Homma, Takahashi, Kuroyagi, Miyauchi, matsuno, Saito, Mori, Matsuura and Fujii	ได้คำนวณอายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบจำหน่าย ด้วยวิธีการนำลูกถ้วยฉนวนไปทดสอบการเสื่อมอายุในสภาวะที่ใช้งานจริงและการทดสอบสภาวะจำลองด้วยวิธีหมอกไอเกลือ เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานระยะยาวของฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการประเมินค่าโดยเปรียบเทียบจากประจุสะสมของกระแสรั่วในระหว่างการทดสอบที่สภาวะใช้งานจริงและการทดสอบแบบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2007	Zhao, Xiong, Wang, Zhang and Bi	ได้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะเปียกด้วยการทดสอบแบบหมอกสะอาดเป็นระยะเวลานานๆ พบว่า ต้องใช้เวลา 8 ถึง 14 ชั่วโมงขึ้นไป จึงจะทำให้เกิดฉาบไฟตามผิวภายใต้การป้อนแรงดันสูง เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นลดลงและมีสภาพเปียกน้ำจากหมอกที่จ่ายเข้าไป
2008	Li, Huang and Zhao	ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่มีความประอะเปื้อน โดยการใช้วิธีการพ่นน้ำไปยังลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อแบ่งประเภทผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC 62073 และ STRI ซึ่งสามารถแบ่งประเภทคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นออกเป็น 7 ประเภท
2008	Amin, Amin and Sundrarajan	ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากยางซิลิโคนและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ภายใต้การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยการจำลองสภาวะความเครียดต่างๆ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 10 kV พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความเสียหายทางกายภาพมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิลิโคน สังเกตได้จากคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นที่จำแนกตามมาตรฐานของ STRI
2010	Venkatesulu and Thomas	ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากฉาบไฟของยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมและยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติม (เติมอะลูมินาและอนุภาคของซิลิกา) พบว่า ประสิทธิภาพของยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมชนิดอะลูมินามีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากฉาบไฟที่ดีกว่ายางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมแบบซิลิกาและดีกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติม

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่ามีความรู้ได้มากขึ้นและมีการนำเสนอวิธีการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุของการเสื่อมอายุที่แท้จริงและการหาวิธีแก้ปัญหาดังกล่าว ตลอดจนเป็นแนวทางการตัดสินใจในการเลือกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานบนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้ค้นคว้ามาสามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

Kim et al. (1999) ได้ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของยางซิลิโคนจากความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ไปสู่สภาพที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสกับการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและกลับมาฟื้นคืนสภาพความเป็นฉนวนอีกครั้งหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จสิ้นสุดลง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การฟื้นคืนสภาพความเป็นฉนวนของยางซิลิโคนเป็นไปได้มากกว่าเกิดจากการแพร่ของพอลิไดเมทิลไซลีนออกเซนมวลโมเลกุลต่ำที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของยางซิลิโคน และในปีเดียวกัน Fernando et al. (1999) ได้อธิบายว่าขนาดของกระแสรั่วตามผิวมีค่าต่ำเมื่อพื้นผิวมีสภาพแบบไม่ชอบน้ำ แต่เมื่อพื้นผิวของยางซิลิโคนเริ่มชอบน้ำกระแสรั่วตามผิวก็เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดดีสชาร์จตามผิว นอกจากนี้ Yoshimura et al. (1999) พบว่า รังสีอัลตราไวโอเลต โคโรนาดีสชาร์จ ฝนกรดและการเกิดอาร์กแฉกยังเป็นตัวทำให้เกิดการเสื่อมอายุ เนื่องจากยางซิลิโคนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการเชื่อมขวาง การแยกตัว การเปลี่ยนแปลงและการก่อตัวของกลุ่มไซลีนอล

Otsubo et al. (2001) ได้ศึกษาการดีสชาร์จและการแผ่แถบรังสีบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือ โดยศึกษาการเกิดโคโรนา การดีสชาร์จและอาร์กแฉกจากกล้องความเร็วสูง ซึ่งยืนยันได้ว่า การปล่อยแถบรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดีสชาร์จบางส่วนคือรังสีเหนือม่วงและอาร์กแฉกแฉกจะเป็นช่วงแถบรังสีสีเหลืองไปยังสีแดง และในปีเดียวกัน Lopes et al. (2001) ได้เสนอการตรวจสอบการดีสชาร์จบางส่วน โดยศึกษาพัฒนาการของกระแสรั่วตามผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนในห้องทดสอบหมอกไอเกลือ พร้อมกับวัดระดับค่ากระแสรั่วตามผิวและการดีสชาร์จบางส่วนบนลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน โดยการประมวลผลจากเทคนิคการบันทึกสัญญาณข้อมูลการดีสชาร์จบางส่วน ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่า การดีสชาร์จบางส่วนและอาร์กแฉกเป็นขั้นตอนของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

Marungsri et al. (2003) ได้ตรวจสอบผลการเสื่อมอายุของโครงสร้างภายนอกของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จากการทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือโดยป้อนแรงดัน AC ที่ 15 kV จ่ายหมอกไอเกลือเป็นเวลานาน 8 ชั่วโมงและหยุดจ่ายหมอกไอเกลือเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากการทดสอบที่ 50 รอบ (1000 ชั่วโมง) พบว่า เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และบนแท่งฉนวนยางซิลิโคน และในปีเดียวกัน Zhu et al. (2003)

ได้ศึกษาการวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวและการประมาณค่าสนามไฟฟ้าจากการทดสอบการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบหมอกไอเกลือ ปัจจัยที่มีผลให้เกิดการเสื่อมอายุจากหยดน้ำจะถูกวิเคราะห์โดยการประมาณค่าสนามไฟฟ้าและการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งหยดน้ำที่เกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อาจทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและเกิดดีสชาร์จได้

Homma et al. (2006) ได้คำนวณการใช้งานระยะยาวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในระบบจำหน่าย โดยนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ไปทำการทดสอบการเสื่อมอายุในสภาวะที่ใช้งานจริง และการทดสอบแบบจำลองสภาวะการทดสอบขึ้นเองด้วยวิธีหมอกไอเกลือ เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานระยะยาวของฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการประเมินค่าโดยเปรียบเทียบจากประจุสะสมของกระแสรั่วในระหว่างการทดสอบที่สภาวะใช้งานจริงและการทดสอบแบบหมอกไอเกลือ ผลที่ได้คือ อายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ประมาณมากกว่า 30 ปี เมื่อใช้งานบริเวณที่มีความเปรอะเปื้อนรุนแรง

Li et al. (2008) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ภาพบนพื้นผิวคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่มีความเปรอะเปื้อน โดยใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำไปยังลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อแบ่งประเภทคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC 62073 และ STRI ซึ่งจากการทดสอบสามารถแบ่งประเภทคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำออกเป็น 7 ประเภท และในปีเดียวกัน Amin et al. (2008) พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความเสียหายทางกายภาพมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิลิโคน สังเกตได้จากคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นที่จำแนกตามมาตรฐานของ STRI

Venkatesulu et al. (2010) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาล์วไฟของยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมและยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติม (เติมอะลูมินาและอนุภาคของซิลิกา) พบว่า ประสิทธิภาพของยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมชนิดอะลูมินา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่ายางซิลิโคนมีสารตัวเติมแบบซิลิกาและดีกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติม เนื่องจากวัสดุที่มีส่วนผสมของอะลูมินาสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าชนิดอื่น ๆ

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEE IEEE ScienceDirect และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานที่ได้ดำเนินการวิจัย จุดประสงค์ และแนวทางการวิจัยของคณะผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์และ

วรรณกรรมแสดงให้เห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคารกำลังเป็นที่สนใจเกี่ยวกับการวิจัยลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เริ่มมีการใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้น จึงได้ทำการวิจัยขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะ การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคาร สำหรับเป็นแนวทางในการตัดสินใจที่จะนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ไปใช้งานกับระบบสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยให้มากขึ้น



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

เมื่อสภาวะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลการวิจัยที่เพียงพอสำหรับประเมินการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และการเลือกใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่เหมาะสม มีเพียงแต่ผลการศึกษาเบื้องต้นว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีค่าแรงดันวับไฟตามผิวในสภาวะเปรอะเปื้อนสูงกว่าลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ด้วยเหตุผลนี้จึงนำมาซึ่งแนวทางในการศึกษาและจัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ไปใช้งานสำหรับการไฟฟ้าต่อไป

3.2 ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Electrical Insulator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับสายไฟ ทำหน้าที่เป็นฉนวนและป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินหรือลัดวงจรลงดิน เพราะถ้าปริมาณกระแสที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งก็จะตัดวงจรออกทำให้การจ่ายไฟหยุดชะงัก ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญตราบใดที่ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน (Overhead Line) ทั้งระบบสายส่งแรงสูงและสายส่งระบบจำหน่าย โดยทั่วไปแล้ววัสดุฉนวนแรงสูงจะถูกออกแบบให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านผิวของฉนวน (Flash Voltage) ต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ารั่วไหลทะลุผ่านฉนวน (Puncture Voltage) เพื่อลดความเสียหายของฉนวน โดยยอมให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผิวฉนวนก่อนได้ในระดับหนึ่ง ก่อนที่ตัวฉนวนจะพังเมื่อระดับแรงดันสูงขึ้นเกินค่าวิกฤต ฝุ่นละอองมลภาวะ ไอเกลือและหยดน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วและลัดวงจรผ่านผิวของลูกถ้วยฉนวนหรือเกิดวับไฟ (Flashover) การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยออกแบบให้มีพื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนในลักษณะเป็นชั้น ๆ ที่มีรูปร่างเป็นทรงจานคว่ำ (หรือปีกลูกถ้วยฉนวน) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายร่มคอยป้องกันส่วนที่อยู่ใต้ปีกลูกถ้วยฉนวนให้แห้งอยู่เสมอเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปียกชื้น ระยะความยาวพื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวน (Creepage Distance) ที่ต่ำที่สุดคือ 20-25 mm/kV แต่ต้องเพิ่มสูงขึ้นอีกในสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งบริเวณที่มีมลภาวะสูงหรือบริเวณชายทะเล

การใช้งานของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบฉนวนและโครงสร้างการรับน้ำหนักเป็นหลัก ประสิทธิภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ภายนอกอาคารนั้นขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ระดับมลพิษ ระดับความชื้นของสภาพแวดล้อม ซึ่งบางครั้งสายส่งพลังงานไฟฟ้าเหล่านั้นจะถูกพาดผ่านบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางหรือบริเวณที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล บริเวณเขตอุตสาหกรรม เป็นต้น

3.3 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

นักวิจัยได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยมาเป็นเวลานานหลายทศวรรษเกี่ยวกับการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ โดยมีการเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานและเหมาะสมที่สุดสำหรับทำเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เพื่อการใช้งานในหลากหลายพื้นที่ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร รวมทั้งการพัฒนาเพื่อการใช้งานในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ๆ ด้วย พัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการและพัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Hall, J. F. 1993)

ปี	พัฒนาการของลูกถ้วยพอลิเมอร์
1940	เริ่มมีการใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่ทำจากไซโคลอะลิฟาติกอีพ็อกซีเรซิน (Cycloaliphatic Epoxy : CE) มาผลิตเป็นฉนวนเพื่อใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงภายในอาคาร
1950	ค้นพบว่าการใช้งานลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ภายนอกอาคาร โดยลูกถ้วยพอลิเมอร์ดังกล่าวมีการเติมสารตัวเติมหรืออะลูมินาไตรไฮเดรต (ATH) เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Erosion) และการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ (Traking)
1960	ลูกถ้วยฉนวนที่ทำจากไซโคลอะลิฟาติกอีพ็อกซีเรซินถูกผลิตขึ้นเพื่อการพาณิชย์ครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อ CEPOL แต่มีปัญหาเนื่องจากการเสื่อมสภาพและการเจาะทะลุของวัสดุดังกล่าว
1964	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกพัฒนาให้ใช้ในระบบสายส่งกลางแรงในเยอรมนี
1970	ประเทศอังกฤษได้มีการนำฉนวนพอลิเมอร์มาติดตั้งในสถานีไฟฟ้า โดยใช้เป็นปลอกฉนวนหุ้มสายระบบแรงดันไฟฟ้า 115 kV และ 500 kV รวมทั้งทำเป็นลูกถ้วยแขวน นอกจากนี้ ผู้ผลิตประเทศอื่น ๆ ได้เริ่มผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์ด้วย

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการและพัฒนากาของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (ต่อ)

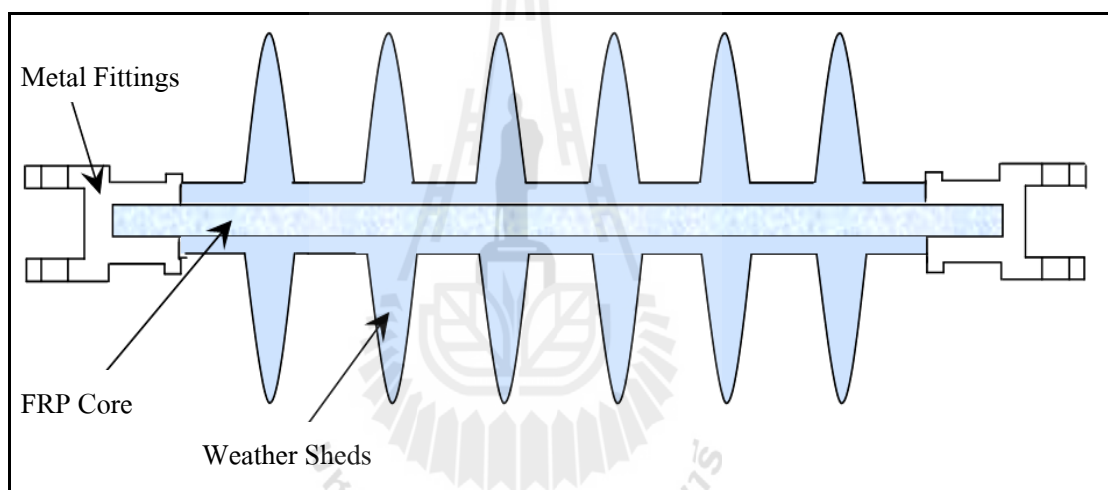
ปี	พัฒนาการของลูกถ้วยพอลิเมอร์
1975	ประเทศฝรั่งเศสเลือกใช้อย่างเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene Propylene Rubber: EPR) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Ceraver
1976	ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้อย่างเอทิลีนโพรพิลีน ในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Ohio Brass
1976	ประเทศเยอรมนีเลือกใช้อย่างซิลิโคน (Silicone Rubber : SiR) ในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Rosenthal
1977	ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้อย่างเอทิลีนโพรพิลีน ในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Sediver
1977	ประเทศอังกฤษเลือกใช้ไซโคลอะลิฟาติกอีพ็อกซีเรซินในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Transmission Development Limited หรือ TDL
1980	ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้อย่างเอทิลีนโพรพิลีน ในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Lapp
1983	ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้อย่างซิลิโคน ในการผลิตโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และใช้ในระบบสายส่ง โดยบริษัทผู้ผลิตคือ Reliable

จากการวิจัยและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์พบว่า ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เนื่องจากยางซิลิโคนมีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น ประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนสูงเมื่อใช้งานบริเวณที่มีมลภาวะและสิ่งเปรอะเปื้อนสูง ๆ ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์หรือลูกถ้วยฉนวนที่ทำจากยางซิลิโคน เริ่มมีการนำมาใช้แทนที่ลูกถ้วยฉนวนที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น โดยถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายจากปี 1980 และมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปลายปี 1990 จนถึงปัจจุบัน

3.4 โครงสร้างพื้นฐานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

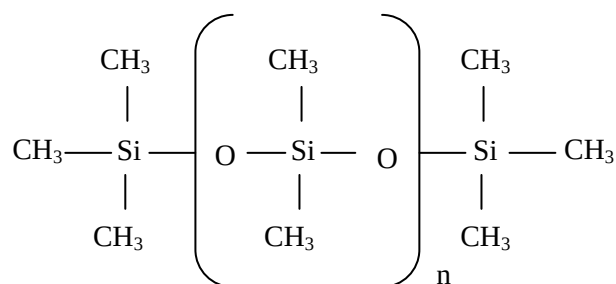
โครงสร้างพื้นฐานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) แกนลูกถ้วย (Fiber Reinforced Plastic (FRP) Core) เพื่อความแข็งแรงเชิงกล ประกอบกับ (2) โลหะยึด (Metal Fittings) ทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก และ (3) ปีกลูกถ้วย (Weather Sheds) ดังแสดง

ในรูปที่ 3.1 ถ้าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีเพียงแกนลูกถ้วยและโลหะยึดที่ปลายเท่านั้น ความเครียดทางไฟฟ้าที่เสริมกันกับการเกิดขึ้นของหยดน้ำและไอหมอกต่าง ๆ ในสภาวะเปราะ-เปื้อนจะทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนหรือดีสชาร์จเฉพาะส่วน (Local Discharges) ซึ่งส่งผลให้สารเคมีที่ใช้ทำแกนลูกถ้วยฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพ อย่างเช่น เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ และการกัดกร่อนเป็นต้น ปีกลูกถ้วยฉนวนจึงได้รับการออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ป้องกันแกนของลูกถ้วยฉนวนหรือ FRP Core จากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และเพื่อสร้างระยะกระแสรั่วให้ได้ความยาวตรงตามข้อกำหนดของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการใช้งานในสภาวะเปียกและแห้ง และยางซิลิโคนก็ถูกนำมาใช้ทำเป็นวัสดุโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวน (Housing Material) สำหรับทำปีกและลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Marungsri, B. 2006)

องค์ประกอบพื้นฐานของยางซิลิโคนคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane : PDMS) องค์ประกอบพื้นฐานในโมเลกุลของ PDMS ประกอบด้วยสายโซ่หลักแบบอนินทรีย์ (Inorganic Backbone) ที่เป็นพันธะของอะตอมซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O) และมีเมทิล (CH_3) เป็นหมู่ข้างเคียง (Side Group) กับอะตอมของซิลิกอน (Si) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS (Marungsri, B. 2006)

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่มเมทิล ซึ่งในสภาวะปกติจะเรียงตัวแบบช่อออกที่ผิวด้านบน จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนมีลักษณะเป็นผิวแบบหยดน้ำลื่น พลังงานพันธะของ Si-O ในโมเลกุลของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน มีค่าประมาณ 444 kJ/mol ซึ่งมีความมากกว่าพลังงานพันธะของอินทรีย์พอลิเมอร์ (Organic Polymers) ตัวอย่างเช่น พันธะ C-C (356 kJ/mol) หรือพันธะ C-O (339 kJ/mol) ทำให้อินทรีย์พอลิเมอร์ (Inorganic Polymers) เสถียรกว่าอินทรีย์พอลิเมอร์ เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมซิลิกอน (1.8) น้อยกว่าอะตอมของออกซิเจน (3.5) ทำให้พันธะ Si-O ถูกโพลาไรซ์ให้เป็นโครงสร้างแบบไอออนิก อะตอมของซิลิกอนเป็นประจุบวกและอะตอมของออกซิเจนเป็นประจุลบ โดยมีประมาณ 37% ของพันธะไอออนิก และเป็นพันธะเคมีที่มีความเสถียร ด้วยโครงสร้างแบบนี้ของพันธะไซล๊อกเซน (Siloxane Bond) จึงทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนและสภาวะอากาศ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพันธะไซล๊อกเซนเป็นพันธะแบบไอออนิกก็จะมีความเสี่ยงจากผลกระทบของกรดและเบส

พันธะไซล๊อกเซน (1.64×10^{-10} m) มีความยาวมากกว่าพันธะ C-C (1.54×10^{-10} m) และมุมของพันธะไซล๊อกเซน (O-Si-O) (140°) ก็มีความมากกว่ามุมของพอลิเอทิลีน (C-C-C) (109°) (Marungsri, B. 2006) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ Si-O (<0.5 kJ/mol) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการหมุนของพันธะ C-C (15.1 kJ/mol) หรือพันธะ C-O (11.31 kJ/mol) จึงทำให้พันธะไซล๊อกเซนหมุนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้โครงสร้างโมเลกุลของยางซิลิโคนจึงเป็นแบบเกลียว (Helical Structure) โดยประกอบด้วยพันธะ Si-O จำนวน 6 พันธะในหนึ่งรอบเกลียว โครงสร้างแบบนี้จะส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนครอบคลุมไปด้วยเมทิล ซึ่งมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นและมีพลังงานแรงตึงผิวต่ำ (Surface Tension Energy) จากโครงสร้างดังกล่าวทำให้ผิวของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนมีคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย

- 1) แรงระหว่างโมเลกุลของเมทิลหรือ CH_3 ต่ำ
- 2) ความสามารถในการยืดหยุ่นของพันธะซิลิอกเซน
- 3) ความแข็งแรงของพันธะซิลิอกเซน
- 4) การมีคุณสมบัติเป็นพันธะไอออนิกบางส่วน of พันธะซิลิอกเซน

ลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นของพอลิไดเมทิลซิลิอกเซนเป็นส่วนที่ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านั้นประกอบด้วย (Clarson, S. J. et al. 1993)

- 1) คุณสมบัติของการเป็นไดอิเล็กตริกที่ดี (Good Dielectric Properties)
- 2) มีความทนทานดีเยี่ยมต่อสภาวะอากาศ (Excellent Resistance to Weathering)
- 3) คุณสมบัติของผิวแบบหัดน้ำ (Hydrophobic Surface Properties)
- 4) เสถียรภาพสูงต่อความร้อนและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (High Thermal and Oxidative Stability)

ฉนวนยางซิลิโคนที่นำมาใช้เป็นฉนวนภายนอกในระบบไฟฟ้าแรงสูงสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามกระบวนการผลิต คือ กระบวนการขึ้นรูปฉนวนยางซิลิโคนที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Vulcanization Silicone Rubber: HTV SiR) และกระบวนการขึ้นรูปฉนวนยางซิลิโคนที่อุณหภูมิห้อง (Room Temperature Vulcanization Silicone Rubber: RTV SiR) นอกจากนี้แล้วยังมีการเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ (Additives) และสารตัวเติม (Fillers) ลงไปในยางซิลิโคนเพื่อทำการเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของยางซิลิโคนให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ด้วย

สารตัวเติม เป็นสารที่เติมเข้าไปเสริมแรงยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Modulus) ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) และค่าความต้านทานการเสียดสี (Abrasion Resistance) ของยางซิลิโคน ตัวอย่างเช่น ผงฝุ่นซิลิกา (Fumed Silica) ที่เติมเข้าไปเพื่อควบคุมเกี่ยวกับการไหล (Rheology) ของยางซิลิโคน อะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: ATH) ที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟและเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนความร้อน โดยอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์จะแตกตัวเป็น Al_2O_3 และน้ำ (H_2O) เมื่อถูกให้ความร้อนและอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า 200°C เนื่องจากการเกิดขึ้นของน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน จึงทำให้อากาศบริเวณรอบนอกยางซิลิโคนเย็นลง สาเหตุนี้ทำให้เกิดอาร์กทางไฟฟ้าได้ ส่วนสารก่อกวนเป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อมระหว่างสารตัวเติมและเนื้อของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) การเชื่อมกันอย่างดีของสารตัวเติมและเนื้อของพอลิเมอร์จะทำให้

ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีและทำให้ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มมากขึ้น (Marungsri, B. 2006)

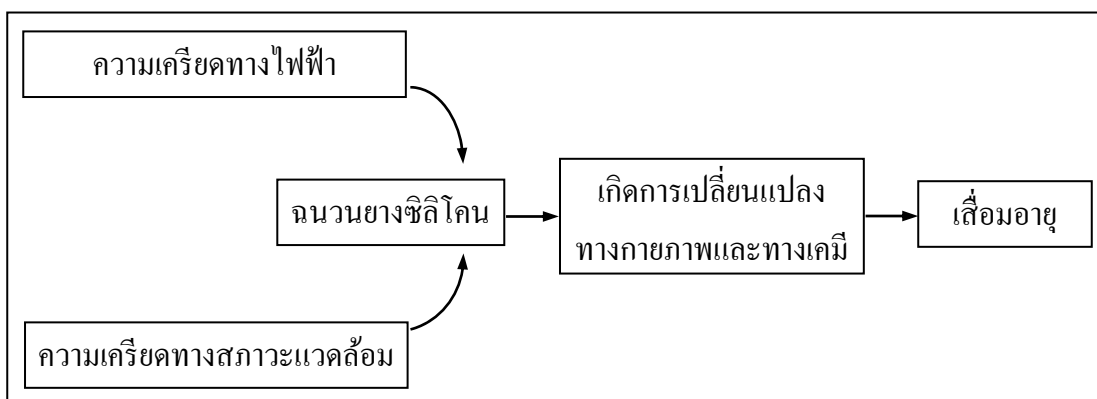
3.5 การวัลคาไนเซชัน

วัลคาไนเซชัน คือ กระบวนการทางเคมีที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางซิลิโคน โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent) เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติหรือโครงสร้างแบบร่างแห (Cross Linking) ตรงตำแหน่งที่วงวโคต่อปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ยางซิลิโคนคงรูป มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น มีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น มีความทนทานต่อความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต (รังสี UV) เพิ่มขึ้น สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญได้แก่ กำมะถันและสารเปอร์ออกไซด์

3.6 ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

เมื่อลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและความหลากหลายของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ อาจจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น การผุกร่อน การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวไฟ เป็นต้น) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เกิดการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ (Depolymerization) หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี (Physicochemical) เช่น การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการล้มเหลวทางไฟฟ้าและทางกลของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า **การเสื่อมอายุ (Ageing)**

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุมีหลายประการ ได้แก่ ความเครียดทางไฟฟ้า เช่น การดีสชาร์จ การเกิดวไฟตามผิว เป็นต้น ความเครียดทางสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงแดด ฝน หมอก ความเปรอะเปื้อน เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งเป็นผลให้อายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เสื่อมลง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

3.6.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต

จากการใช้งานลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากลางแจ้ง พบว่าแสงแดดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุ เนื่องจากผลของรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะเคมีของยางซิลิโคน นอกจากนี้แล้ว ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้งานกลางแจ้งไม่เพียงแต่สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงแดดเท่านั้น แต่ยังมีจากโคโรนาและอาร์กแถบแห้งอีกด้วย ความคงทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดอายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ พลังงานจากแสงแดดที่เป็นอันตรายกับพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่าง 320 nm และ 270 nm ผลการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตของโครงสร้างพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางกลและทางเคมี ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนของโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้

ระดับการเสื่อมอายุจากรังสีอัลตราไวโอเลตจะขึ้นอยู่กับความเข้มและความยาวคลื่นของรังสี ปัจจัยเหล่านี้จะมีความแตกต่างไปตามช่วงของฤดูกาล ช่วงเวลาในแต่ละวัน ระดับความสูงและละติจูดที่ตั้ง สำหรับความชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีส่วนทำให้การเสื่อมอายุเกิดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ความร้อนเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพได้ เช่น การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของส่วนเชื่อมขวางและการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส สำหรับการใช้งานจริงลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ต้องสัมผัสกับออกซิเจนและความร้อน ซึ่งความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้นและทำให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้นด้วย ดังนั้น ควรมีการประเมินผลกระทบที่เกิดจากรังสีอัลตราไวโอเลตและความชื้นของสารประกอบในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่นำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งด้วย

3.6.2 การเสื่อมสภาพจากการดิสชาร์จและการวาวไฟตามผิว

ปัจจุบันการไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ใกล้กับชายฝั่งทะเลและบริเวณโรงงานได้ประสบปัญหายุ่งยากในระบบจำหน่ายคือ การเกิดวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่เปราะเปื้อน สิ่งเปราะเปื้อนที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน อาจมีสารประกอบของเกลือจากทะเล ฝุ่นหรือสิ่งอื่น ๆ ซึ่งมีผลให้คุณสมบัติของฉนวนเสื่อมลง ในสถานะแห้งสิ่งเปราะเปื้อนจะมีสภาพเป็นฉนวนอยู่ จึงไม่ทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวน แต่สถานะเปียกสิ่งเปราะเปื้อนจะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นตัวนำและทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวได้ (อนงค์พันธุ์ แม้นอ้ม และ วินัย พุทธิยะวัน. 2553)

บริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกต่าง ๆ สิ่งสกปรกเหล่านี้จะดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบหรืออาจได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบา ๆ ทำให้เกิดเป็นชั้นที่เปียกบาง ๆ ทำให้เกิดเป็นคราบสกปรกเกาะอยู่ตามพื้นผิวลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดบริเวณที่นำไฟฟ้าหรือเกิดกระแสรั่วตามผิวขึ้น ดังนั้น เมื่อกระแสรั่วบนผิวฉนวนมีค่าสูงมากขึ้น อาจทำลายพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนได้ ความร้อนของกระแสรั่วตามผิวสามารถทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนและนำไปสู่การสร้างพื้นที่แห้งเล็ก ๆ บนพื้นผิวในบริเวณต่าง ๆ ทำให้การไหลของกระแสรั่วถูกขัดขวาง ส่งผลให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงบริเวณพื้นที่แห้งดังกล่าว เมื่อค่าความเครียดสูงจนทำให้เกิดปรากฏการณ์ไอออนในเซชันหรืออากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนจะส่งผลให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ ด้วยสาเหตุนี้จะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น เมื่อดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนเกิดการเชื่อมถึงกันก็จะทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวนขึ้น (ตำรวจ สังข์สะอาด. 2547) ส่งผลให้ความร้อนสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งทำให้ผิวลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนได้ ผลดังกล่าวจะทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟและเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ผิวฉนวนซึ่งร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟและการกัดกร่อนนี้มีส่วนประกอบของคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยไหม้มากยิ่งขึ้น เพราะคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าจึงเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหาย

ปัญหาที่กังวลมากที่สุดในการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ก็คือการเสื่อมสภาพของผิวลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำไปยังแกนของลูกถ้วยฉนวนลดลง นอกจากนี้ผลของการเสื่อมสภาพของผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากสถานะแวดล้อมที่เปราะเปื้อนและการดิสชาร์จ ยังเร่งให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำที่ผิวยางซิลิโคนลดลง ส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนเปียกน้ำและมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำที่มีความนำไฟฟ้าสูง ผลที่ตามมาก็คือ ทำให้มีกระแสรั่วตามผิว ส่งผลให้เกิดดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นบนผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

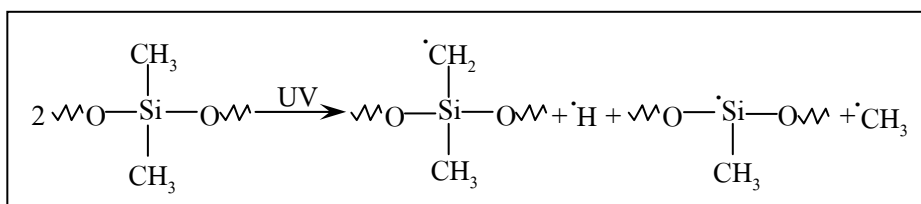
จากผลของกระแสรั่ว ดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Kim, S. H., et al. 1992) โดยประกอบด้วย

1. การแยกตัว (Scission) และการแลกเปลี่ยนของสายโซ่ข้าง (CH_3) หรือสายโซ่หลัก (Si-O) ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน
2. การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสายโซ่ข้างหรือสายโซ่หลักของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน
3. การเกิดออกซิเดชันของสายโซ่ข้างหรือการเกิดเชื่อมขวาง (Crosslinking) ของสายโซ่หลักของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน

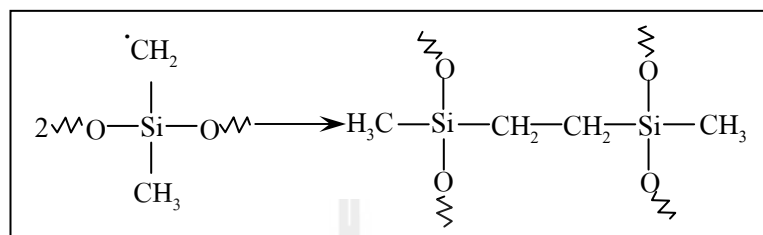
3.6.3 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฉนวนยางซิลิโคน

การเกิดออกซิเดชันบนผิวของฉนวนยางซิลิโคนหรือพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนเป็นปฏิกิริยาที่มีผลต่อการสลายตัวทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีดีสชาร์จทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน ซึ่งออกซิเจนในอากาศเป็นตัวสำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ความร้อน รังสีอัลตราไวโอเลต เป็นต้น พันธะในโครงสร้างของฉนวนยางซิลิโคนที่สามารถแตกตัวเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่ได้ ได้แก่ พันธะโค-วาเลนต์ (Covalent Bond) ระหว่างไฮโดรเจนและอะตอมอื่น ๆ เช่น คาร์บอนและออกซิเจน ถ้าฉนวนยางซิลิโคนมีโครงสร้างทางเคมีที่ส่งผลต่อการแตกตัวได้ง่าย ยางซิลิโคนนั้นก็สามารถสลายตัวทางเคมีจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายเช่นกัน

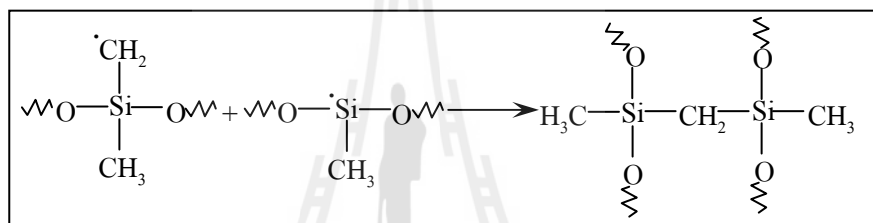
ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) หรือ $\text{Si-CH}_2\text{OH}$ กลุ่มเปอร์ออกไซด์ (Peroxides Groups) หรือ $\text{Si-CH}_2\text{OOH}$ กลุ่มซิลานอล (Silanol Groups) หรือ Si-OH และโครงสร้างแบบคล้ายซิลิกา (Silica-Like Structure) หรือ SiO_x ซึ่งหมายถึงอะตอมของซิลิกอนสร้างพันธะทางเคมีกับออกซิเจนมากกว่าสองอะตอม (SiO_3 และ/หรือ SiO_4) (Bognar, A., et al. 1993) การเกิดขึ้นของโครงสร้างทางเคมีเหล่านี้ จะทำให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนลดลง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Kamyar, F-A., 2004)

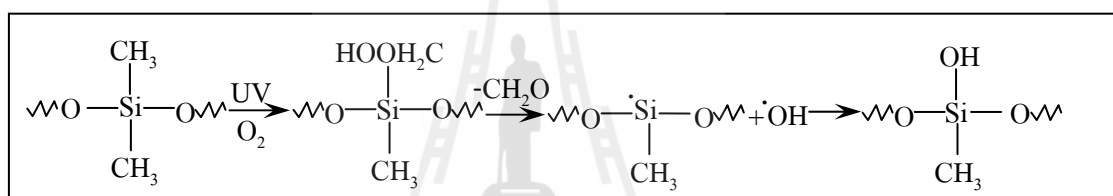
จากรูปที่ 3.4 เป็นสมการของกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) กับกลุ่มซิลานอล (Silanol Group) ของเมทิลีน (Methylene) และออกซิเจน บางปฏิกิริยาถูกแทนที่ด้วยพลังงานที่สูง เช่น จากการเกิดโคโรนา ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถถูกดูดซึมได้ด้วยยางซิลิโคนจึงไม่ใช่สาเหตุของการย่อยสลาย อย่างไรก็ตาม รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีพลังงานสูงได้ถูกสร้างร่วมกับปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่ได้จากโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จ เช่น ไอออน อิเล็กตรอน และอนุมูลอิสระ รังสีอัลตราไวโอเล็ตแสดงให้เห็นถึงแหล่งพลังงานที่ต้องการการโต้ตอบจากอนุมูลอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) รูปที่ 3.4 (ข) และรูปที่ 3.4 (ค) เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันอีกครั้งและเกิดการรั่วไหลของกลุ่มเมทิลีน

3.6.4 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฉนวนยางซิลิโคน

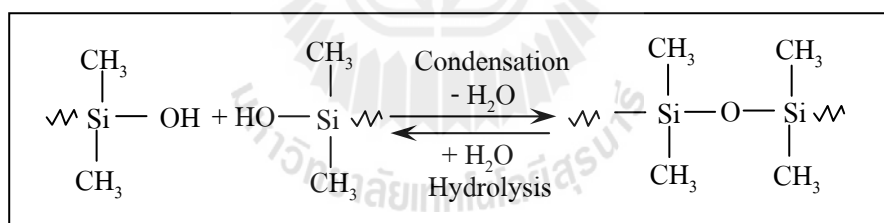
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นอีกหนึ่งปฏิกิริยาที่พบได้บ่อยในการสลายตัวทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคนที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของฉนวนยางซิลิโคนเมื่อมีน้ำอยู่ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับยางซิลิโคนที่อยู่ในสถานะที่มีความชื้นหรือมีหยดน้ำเกาะอยู่ตามผิว อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นอยู่กับนุณหภูมิ เนื่องจากปฏิกิริยาที่มีน้ำรวมอยู่ด้วยนั้นมักจะถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion) และปริมาณของน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเริ่มจากไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำเข้าทำปฏิกิริยาแล้วส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะคาร์บอนกับออกซิเจน นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ยังขึ้นอยู่กับการโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนอีกด้วย

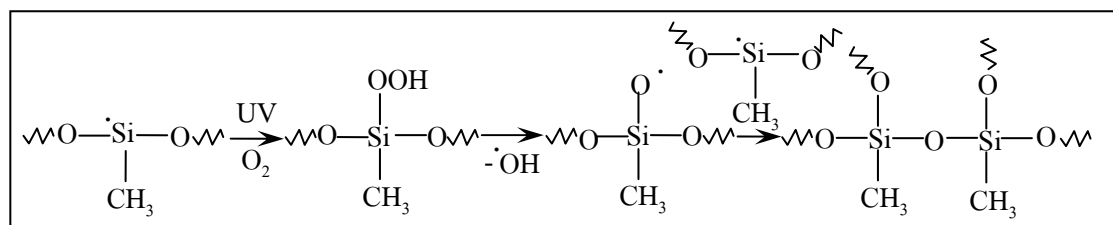
จากรูปที่ 3.5(ก) เป็นสมการเกี่ยวกับกลุ่มไซลานอล ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพันธะไซลิลอกเซน ผลลัพธ์ที่เกิดจากการรวมตัวกันแน่นของกลุ่มไซลานอลภายในเครือข่ายเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิลไซลิลอกเซน ส่งผลให้เกิดสะพานไซลานอล ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) และพันธะที่เกิดการเชื่อมต่อกับไซลิลอกเซนจะทำปฏิกิริยากับธาตุมูลฐานของฉนวนยางซิลิโคนร่วมกับออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.5 การเกิดไฮโดรไลซิสของยางซิลิโคน (Hillborg, H. C., 2001)

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนสามารถฟื้นกลับมาได้ ถ้าเป็นการสูญเสียแบบชั่วคราว ซึ่งเป็นผลจากการเกิดดีสซาร์จแถบแข็งที่ผิวขณะที่ฝนตกหนัก เป็นต้น ระดับการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นขึ้นอยู่กับขนาดของการดีสซาร์จที่ผิว ส่วนผสมของพอลิเมอร์ และเวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนด้วยยางซิลิโคนที่มีการฟื้นตัวของคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น จะพบว่า มีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำมันซิลิโคนเหนือชั้นโครงสร้างคล้ายซิลิกาที่ผิว กลไกที่อาจเป็นไปได้ในการฟื้นคืนตัวของคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนอาจประกอบด้วย

1. การจัดเรียงตัวกันใหม่ของกลุ่มเมทิลและกลุ่มไดออกซิไดซ์ (De-Oxidized Groups)

2. การเคลื่อนที่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนแบบมวลโมเลกุลต่ำ (LMW PDMS) จากเนื้อยางชั้นในไปที่ผิวชั้นนอก

พิจารณาการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น จะพบว่า ชั้นโครงสร้างคล้ายซิลิกาเกิดขึ้นบนผิว เนื่องจากผลของดีสซาร์จที่ผิวสามารถต้านการเคลื่อนที่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนแบบมวลโมเลกุลต่ำไปยังผิวด้านบน แต่การแตกของชั้นโครงสร้างคล้ายซิลิกาก็สามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนแบบมวลโมเลกุลต่ำไปยังผิวด้านบนได้ด้วยเช่นกัน การเคลื่อนที่ดังกล่าวเชื่อว่า เป็นกลไกหลักในการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น

การเสื่อมสภาพของผิวยางซิลิโคนในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากความร้อนเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีดีสซาร์จที่ผิว โดย Kim et al. (1999) พบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดดีสซาร์จที่ผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนอาจสูงถึง 3000 °C ในระหว่างเกิดการเสื่อมสภาพของผิวฉนวนยางซิลิโคนเนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ การแยกตัวของสายโซ่ข้างและเกิดการเชื่อมขวาง สำหรับการแยกตัวของโซ่ข้าง และการเกิดเชื่อมขวางในสายโมเลกุลของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนจะทำให้ผิวฉนวนยางซิลิโคนสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น ส่วนการแตกตัวของพอลิเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้เกิดไซคลิก โอลิโกเมอร์ (Cyclic Oligomers) (Cherney, E. A. 1996, Kim, J., and Chaudhury, M. K. 1999) เมื่อมีการเสื่อมอายุทางความร้อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน การเกิดเชื่อมขวางของไซล๊อกเซนจะเด่นกว่าการเกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ (Hackam, R. 1999) นอกจากนี้ Tomas ได้รายงานว่าการเสื่อมอายุทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ ในอากาศของฉนวนยางซิลิโคนจะทำให้เกิดชั้นเปราะบางที่ผิว เนื่องจากผลของการเชื่อมขวางจากออกซิเจน (Oxidative Crosslinking) อีกด้วย

3.7 ลักษณะของสิ่งประอะเปื้อนบนผิวฉนวนยางซิลิโคน

การเกิดวาวไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากผิวประอะเปื้อน จะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งประอะเปื้อนเหล่านั้นอยู่ในสภาวะที่เปียกชื้นและความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนลดลง ดังนั้นการเกิดวาวไฟตามผิวเนื่องจากความประอะเปื้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งประอะเปื้อน

สิ่งประอะเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทสารละลายน้ำได้และนำไฟฟ้ากับประเภทสารที่ไม่ละลายน้ำและไม่นำไฟฟ้า ประเภทของสิ่งประอะเปื้อนแบ่งตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนเหล่านั้นใช้งานอยู่ได้ดังนี้ (อนงค์พันธุ์ แม่น้อม และ วินัย พฤกษ์วัน, 2553)

สิ่งประอะเปื้อนจากทะเล

สิ่งประอะเปื้อนจากทะเล ได้แก่ เกลือ ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานริมชายฝั่งทะเลและบริเวณใกล้เคียง ความประอะเปื้อนชนิดนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ

1) ความประอะเปื้อนแบบธรรมดา (Ordinary Pollution) เป็นความประอะเปื้อนตามปกติในการใช้งาน ซึ่งใช้เวลานานในการสะสม ผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนจะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งประอะเปื้อนเปียกชื้นในขณะที่ยังมีลมพัด แต่ถ้าฝนตกหนักก็เป็นการล้างทำความสะอาดผิวลูกถ้วยฉนวนเองตามธรรมชาติ สภาพของฉนวนก็จะคืนสู่สภาพปกติได้

2) ความประอะเปื้อนก่อตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid Pollution) เกิดขึ้นเนื่องจากมีพายุขนาดใหญ่พัดหอบเอาไอเกลือจากทะเลเข้ามา โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่อยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ความประอะเปื้อนแบบนี้จะรุนแรงมาก

สิ่งประอะเปื้อนจากอุตสาหกรรม

ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณเขตอุตสาหกรรมมีความประอะเปื้อนจากควันและเขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องไอเสีย แต่ในปัจจุบันระดับของเขม่าควัน ถูกควบคุมด้วยกฎหมายควบคุมมลพิษและสภาพแวดล้อม ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณนี้ จึงไม่ค่อยมีปัญหาหนัก เขม่าจากปล่องไอเสียนั้นค่อนข้างเหนียว ซึ่งสารดังกล่าวเมื่อมาเกาะที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะทำให้การชำระล้างโดยฝนเป็นไปได้ยากและทำให้มีการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

สิ่งประอะเปื้อนจากฝุ่น

ในบริเวณที่ห่างไกลจากทะเลหรือโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ชนบท ลูกถ้วยฉนวนอาจจะประอะเปื้อนด้วยทรายหรือดินที่ลมพัดหอบขึ้นมา ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบของความประอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และเกลือ สัดส่วนของสารดังกล่าวจะเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิประเทศ

3.8 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transforms Infrared Spectrometer: FTIR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร หรือวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และสารประกอบ อินทรีย์บางประเภทรวมถึงหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง เช่น อินทรีย์วัตถุ สี โลหะ โพลีเมอร์ พลาสติก เรซิน สารเคลือบ ยา ยาฆ่าแมลง หรือสารปนเปื้อน เป็นต้น เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโคปีชนิดหนึ่งที่ใช้ศึกษาการดูดกลืนแสงของสสารในย่านความถี่ของแสง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ต่างกันและมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว เทคนิคนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสารที่อยู่ในยางซิลิโคน และให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดการสั่น (Vibration) ซึ่งอินฟราเรดจะเกิดการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานพอดีกับการสั่นของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นแบบยืดหรือโค้งงอ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible Region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็นช่วง ๆ คือ

ช่วง Wave Number $4,000-12,800\text{ cm}^{-1}$ ($2.5-0.78\text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared Region)

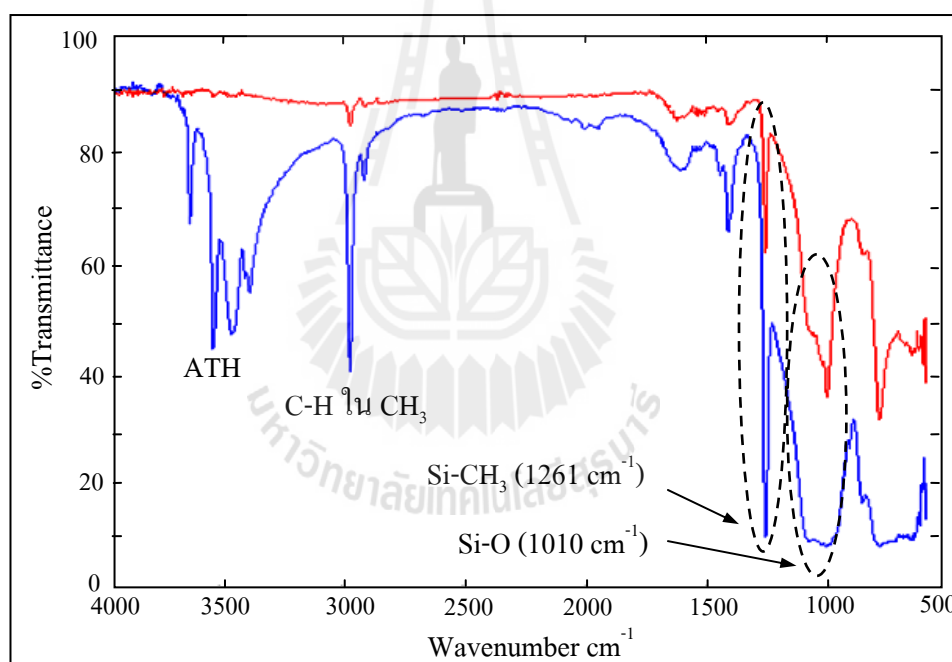
ช่วง Wave Number $200-4,000\text{ cm}^{-1}$ ($50-2.5\text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared Region)

ช่วง Wave Number $10-200\text{ cm}^{-1}$ ($1,000-50\text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far Infrared Region)

นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจและใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง มากกว่าช่วงอื่น คลื่นอินฟราเรดในช่วง Wave Number $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงความถี่กลาง ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์คู่ขั้วของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง จากนั้นวัดแสงที่ส่งผ่านออกมาจะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum หรือ IR Spectrum)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การวิเคราะห์ FTIR จะทำการวิเคราะห์พันธะ Si-O ซึ่งจะเกิดขึ้นในขอบเขตของสเปกตรัมที่ $1000-1130\text{ cm}^{-1}$ การเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-O นั้นหมายถึงการแยกตัวของสายโซ่หลัก และพันธะของ Si-CH₃ จะเกิดขึ้นในขอบเขตของสเปกตรัมที่

$1270-1255\text{ cm}^{-1}$ หมายถึงการแยกตัวของสายโซ่ข้างของพันธะพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซน ซึ่งเป็นโครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะใช้เวลาน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณาเปรียบเทียบจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐาน (ตัวอย่างก่อนการทดสอบ) กับตัวอย่างหลังการทดสอบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันของค่ายอดต่อค่ายอด ซึ่งสเปกตรัมของตัวอย่างหลังการทดสอบหรือเสื่อมสภาพจะมีค่ายอดสั้นกว่าตัวอย่างก่อนการทดสอบ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.6 โดยเส้นสีแดง คือ สเปกตรัมของยางซิลิโคนที่เสื่อมอายุ (Ageing) และเส้นสีน้ำเงินคือ สเปกตรัมของยางซิลิโคนที่บริสุทธิ์หรือยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (New)



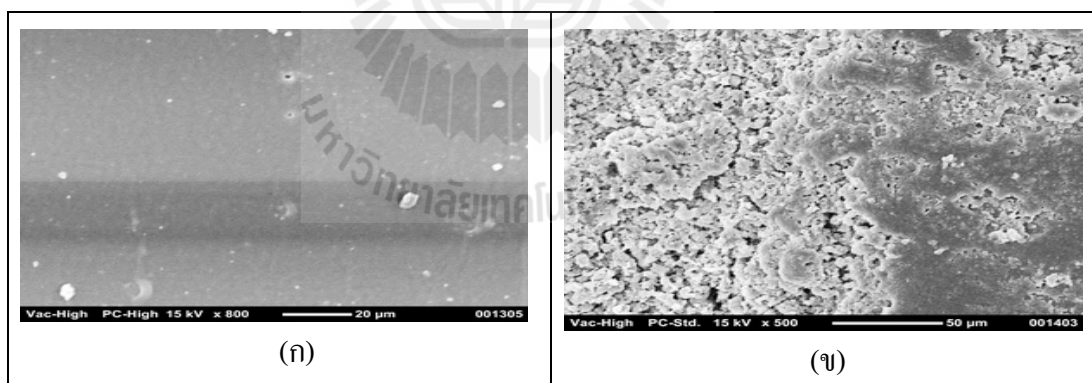
รูปที่ 3.6 ลักษณะผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นเครื่องมือสำหรับถ่ายภาพอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอน เพื่อบ่งบอกถึงขนาด รูปร่าง ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอนุภาคภายในชิ้นงาน ช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหาย ซึ่งใช้วิธีการถ่ายภาพพื้น

ผิวชิ้นงานที่กำลังขยายสูงโดยมีกำลังขยาย 35-200,000 เท่า หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary Electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับหรือสัญญาณเอกซ์เรย์ โดยแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดและแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นจึงแปลเป็นภาพขึ้นบนจอมอนิเตอร์ (แมน อมร ลิทธี. 2534) โดยสามารถที่จะเลือกบริเวณที่จะศึกษาได้อย่างสะดวก

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำได้โดยนำตัวอย่างยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างหลังการทดสอบ) และหลังการทดสอบไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน ลักษณะพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน เช่น เกิดการกัดกร่อน รอยแตกจากการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ลักษณะพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.7



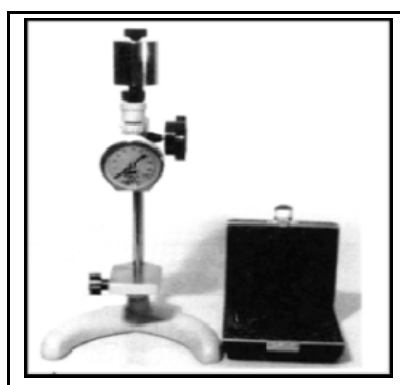
รูปที่ 3.7 ลักษณะพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนที่วิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM ตัวอย่างฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (ก) ตัวอย่างฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ (ข)

3.10 การทดสอบความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน

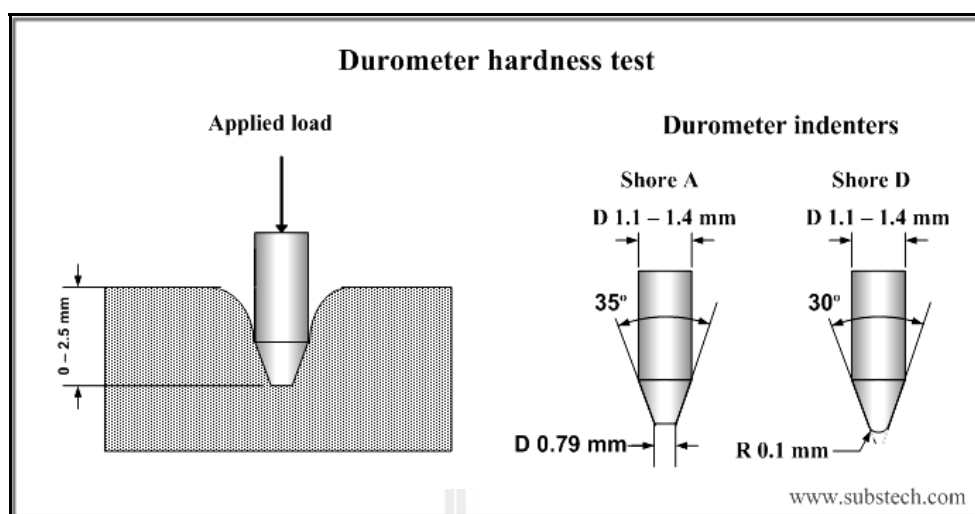
ความแข็ง (Hardness) เป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว (ISO 868. 1985) กระบวนการทดสอบความแข็งมีหลายแบบ เช่น ความแข็งแบบ

รอยกด แบบกระดอน แบบขีดข่วน แบบสึกหรอ โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ความแข็งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างทางเคมี (ผลจากระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิดโครงสร้างร่างแห เป็นต้น) ลักษณะทางกายภาพ (สภาวะแก้ว สภาวะยาง เป็นต้น) และอื่น ๆ นอกจากนี้ พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าความแข็ง เป็นเครื่องมือที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM D2240 หรือโดยทั่วไปเรียกว่า ดูโรมิเตอร์ (Durometer) สำหรับดูโรมิเตอร์ แบบ Shore เป็นเครื่องทดสอบด้วยมือที่ออกแบบให้ใช้ในการทดสอบความแข็งกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติก และวัสดุประกอบต่าง ๆ เครื่องทดสอบ ดูโรมิเตอร์ แบบ Shore ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และหัวทดสอบดูโรมิเตอร์ แบบ Shore A และ Shore D แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีสองชนิดพื้นฐานได้แก่ Shore A กับ D ทั้งสองชนิดนี้มีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกันคือ สปริงจะส่งน้ำหนักไปยังหัวกดและกดลงบนพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ ความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวตัวอย่างทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัดดูโรมิเตอร์ โดยแบบ A จะมีสปริงที่ให้น้ำหนักกดระหว่าง 56-822 กรัม ส่วนแบบ D น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 0-10 lb ทั้งสองแบบนี้อ่านค่าความแข็งได้จาก 0-100 กล่าวคือ วัสดุที่อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมากหรือมีความต้านทานต่อการเกิดรอยกดได้สูง ส่วนการแสดงผลหน่วยจะขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้เช่น 50A หรือ A50 เป็นต้น ค่าความแข็ง Shore A คือ ค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยางหรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Shore A ดูโรมิเตอร์ ซึ่งใช้ทดสอบวัสดุประเภทยาง หนังเทียมหรือวัสดุกลุ่มอีลาสโตเมอร์ที่อ่อนนุ่ม



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบดูโรมิเตอร์แบบ Shore (ที่มา: [http://www.e-book.ram.edu/e-book/m/MY318 \(51\)/MY318-7.pdf](http://www.e-book.ram.edu/e-book/m/MY318 (51)/MY318-7.pdf))



รูปที่ 3.9 หัวทดสอบดูโรมิเตอร์แบบ Shore A และ Shore D (ที่มา: <http://www.substech.com>)

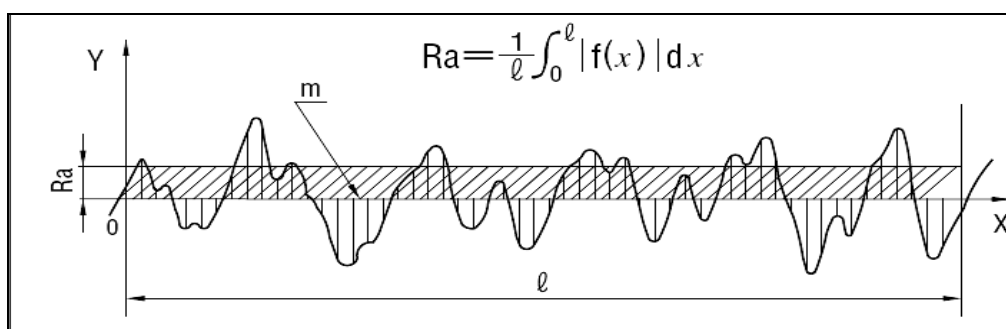
3.11 การทดสอบความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน

การทดสอบความขรุขระ (Roughness) เป็นการทดสอบความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน ผลของการทดสอบจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย R_a (Arithmetical Mean Roughness) ซึ่งค่าของ R_a จะได้จากเส้นค่าเฉลี่ยที่ได้จากเส้นกราฟความขรุขระของวัสดุทดสอบ เส้นค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะวางบนระบบพิกัดแกน X และการขยายทางแกน Y ค่า R_a ที่วัดออกมาจะอยู่ในหน่วยไมโครเมตรและสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (3.1)$$

เมื่อ l คือความยาว
 $f(x)$ คือฟังก์ชันการอินทิกรัล

แต่ในทางปฏิบัติ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความขรุขระของวัสดุนี้ จะทำการคำนวณค่า R_a และสามารถอ่านค่าจากจอแสดงผลได้เลย พร้อมทั้งสามารถพิมพ์รูปกราฟที่ได้จากการวัดออกมาให้โดยละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยค่า R_a ที่วัดได้ ถ้ามีค่ามากจะบ่งบอกถึงตัวอย่างทดสอบมีความขรุขระมาก (เกิดการกัดกร่อนจากการทดสอบ) และถ้า R_a มีค่าน้อย แสดงว่าตัวอย่างทดสอบมีความขรุขระน้อย (เกิดการกัดกร่อนน้อยหรือเสื่อมสภาพน้อยกว่า)



รูปที่ 3.10 ลักษณะกราฟจากการทดสอบความขรุขระของวัสดุ (ที่มา: http://th.misumi-ec.com/contents/mech/campaign/email20120206/surface_roughness.html)

3.12 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (Hydrophobicity) ของวัสดุ มีลักษณะเป็นความต้านทานในการไหลของน้ำบนพื้นผิววัสดุ คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นสามารถอธิบายในรูปของมุมสัมผัสบนพื้นผิววัสดุ θ_c หยดน้ำจะมีลักษณะเป็นจุดเมื่อมาเกาะอยู่ที่ผิววัสดุ ซึ่งมีมุม θ_c เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น โดยจะพบว่าวัสดุที่ชอบน้ำ เมื่อมีหยดน้ำมาเกาะอยู่ที่พื้นผิว จะมีมุมสัมผัสน้อยกว่า 90° ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) ส่วนวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ หยดน้ำที่มาเกาะที่พื้นผิวจะมีพื้นที่สัมผัสน้อย และมีมุมสัมผัสมากกว่า 90° ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก)



รูปที่ 3.11 มุมสัมผัสของหยดน้ำ

ประสิทธิภาพของสารประกอบของฉนวนทางไฟฟ้าและฉนวนที่เคลือบผิวด้วยสารชนิดหยดน้ำลื่น จะมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับเวลา สภาพแวดล้อม และคิสารข้างส่วนหรือโคโรนา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคือ ขวดฟั่นละอองน้ำธรรมดา ซึ่งสามารถผลิตหมอกละอองน้ำได้ดี ในขวดฟั่นละอองน้ำนั้นเป็นน้ำสะอาดที่ไม่ได้ผสมสารเคมีใด ๆ ลงไป ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยฉีดฟั่นละอองน้ำ 1-2 ครั้งต่อวินาทีเป็นระยะเวลา

20-30 วินาที จากระยะ 25 ± 10 cm การพิจารณาระดับของความไม่ชอบน้ำจะกระทำภายในเวลา 10 วินาทีหลังจากพ่นละอองน้ำเสร็จ

คุณสมบัติผิวหยดน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท (HC1- HC7) โดย HC1 มีสภาพพื้นผิวที่มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำดีอย่างสมบูรณ์ และ HC7 พื้นผิวสามารถเปียกน้ำได้โดยง่าย ทั้ง 7 ประเภทนี้เป็นการจำแนกสถานะเปียกแบบคร่าว ๆ และเหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 นิยามของมุมประชิดแสดงในรูปที่ 3.12 และตัวอย่างโดยทั่วไปของลักษณะหยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวที่ระดับ HC1- HC6 ดังแสดงในรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์สำหรับแยกประเภทความไม่ชอบน้ำ (HC1-HC7) (STRI Guide. 1992)

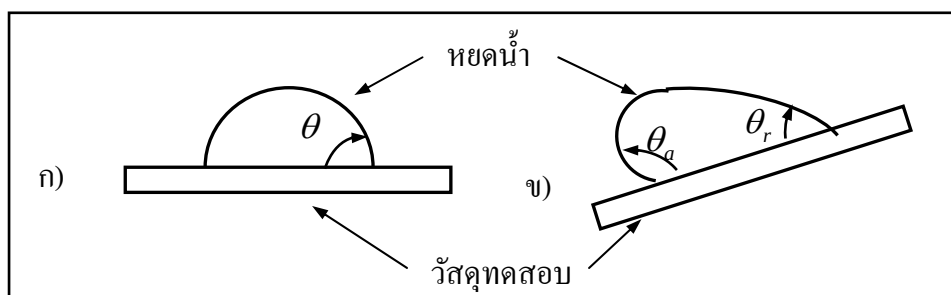
HC	คำอธิบาย
1	รูปแบบหยดน้ำเล็ก ๆ แยกออกจากกันเมื่อ $\theta_r \approx 80^\circ$ หรือมากกว่า
2	รูปแบบหยดน้ำเล็ก ๆ แยกออกจากกันเมื่อ $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$
3	$20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ โดยปกติจะไม่เป็นวงกลม
4	ทั้งหยดน้ำเล็ก ๆ ที่แยกออกจากกันและรอยน้ำ $\theta_r = 0$ มีพื้นที่ที่เปียกน้ำอย่างสมบูรณ์น้อยกว่า 2 cm^2 หรือครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90%
5	มีพื้นผิวที่เปียกบางส่วนมากกว่า 2 cm^2 หรือครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90%
6	มีพื้นผิวที่เปียกครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 90%
7	มีฟิล์มน้ำต่อเนื่องทั้งหมดบนพื้นผิวที่ทดสอบ

หมายเหตุ : ก คือระนาบแนวนอน

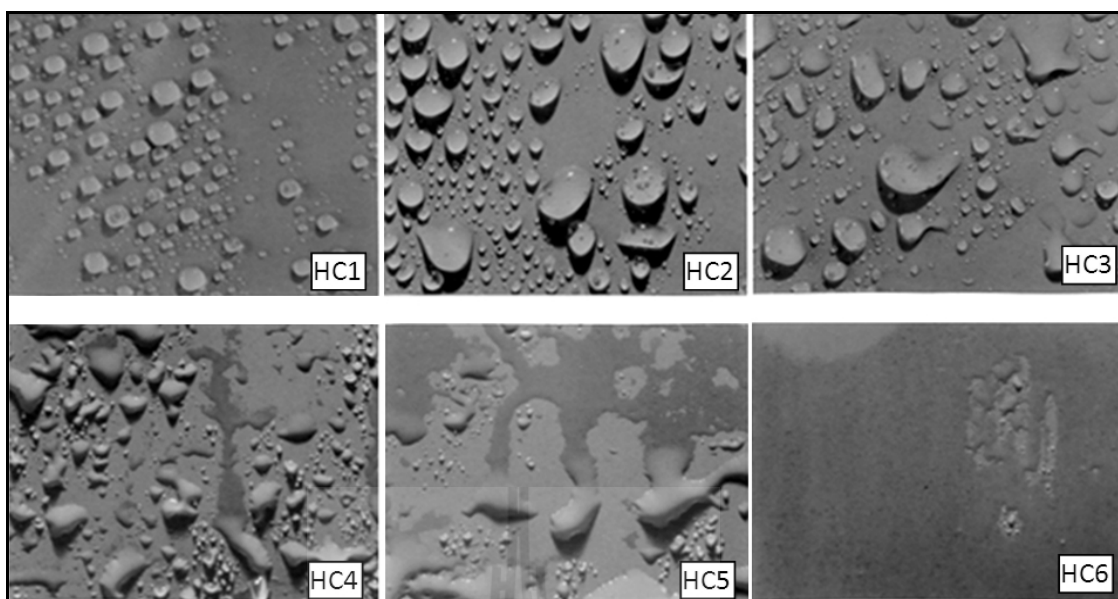
ข คือระนาบเอียง

θ_a คือ Advancing Angle มุมด้านหน้า

θ_r คือ Receding Angle มุมด้านหลัง



รูปที่ 3.12 นิยามของมุมประชิด (STRI Guide. 1992)



รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างโดยทั่วไปของพื้นผิว HC1-HC6 (STRI Guide, 1992)

HC7 มีฟิล์มน้ำต่อเนื่องทั้งหมดบนพื้นที่ทดสอบ

3.13 กระแสรั่วตามผิว

กระแสรั่วตามผิวถูกถ้วยฉนวนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการใช้งานถูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน กระแสรั่วเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการรวบไฟตามผิวของถูกถ้วยฉนวนง่ายขึ้น การที่ถูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วไหลอยู่ต่อเนื่อง จะทำให้ผิวของถูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนได้รับความเสียหาย เป็นผลให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงและทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าตามผิวของถูกถ้วยฉนวนเปลี่ยนแปลงไป กระแสรั่วตามผิวที่เกิดขึ้นทำให้มีพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่อร่วมกับถูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้นด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสรั่วบนผิวถูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ประกอบด้วย

- คุณสมบัติผิวหยดน้ำพื้นของวัสดุที่ใช้ทำถูกถ้วยฉนวน ซึ่งระยะแรกของการติดตั้งใช้งานถูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน คุณสมบัติผิวหยดน้ำพื้นของถูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนจะมีค่าคงที่ในทุกสภาพประะเปื้อน

- ปริมาณของสิ่งประะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวถูกถ้วยฉนวน ในกรณีที่เป็นสิ่งประะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้ เมื่อสิ่งประะเปื้อนดังกล่าวเปียกขึ้น ความต้านทานที่ผิวของถูกถ้วยฉนวนจะลดลงและทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้น สิ่งประะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำไม่ได้เป็นสาเหตุให้เกิดกระแสรั่วไหลมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่จะช่วยให้สิ่งประะเปื้อนประเภทละลายน้ำได้ เกาะอยู่ตามผิวของถูกถ้วยฉนวน

- ลักษณะแวดล้อมของสถานที่ติดตั้งใช้งาน เช่น ความชื้นและการเกิดฝนตก สภาพหมอก เป็นต้น

เมื่อคุณสมบัติผิวหยาบน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนลดลง น้ำหรือไอหมอกที่มากเกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดลักษณะเป็นฟิล์มน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดบริเวณที่นำไฟฟ้าขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวน ดังนั้น กระแสจึงสามารถวิ่งไหลผ่านไปบนผิวลูกถ้วยฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดินหรือกราวด์ได้ หรือเรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage Current) และก่อให้เกิดการรวบไฟหรือเกิดดีสชาร์จตามผิวขึ้น ซึ่งผลจากการเกิดกระแสรั่วทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้ ดังนั้น ในระหว่างการทดสอบจึงต้องมีการวัดกระแสรั่วตามผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

3.14 การหาค่าความเปรอะเปื้อน

ค่า SDD (Salt Deposit Density) คือ ปริมาณการสะสมโซเดียมคลอไรด์ที่เปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวนเป็น mg/cm^2 (IEC 60507, 1991) ซึ่งจะหาค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำเอาสิ่งเปรอะเปื้อนมาละลายน้ำ ค่า SDD สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3.1

$$SDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่	SDD	คือ Salt Deposit Density มีหน่วยเป็น mg/cm^2
	$S_a = (5.7 \times \sigma_{20})^{1.03}$	คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือ มีหน่วยเป็น Kg / m^3
	V	คือ ปริมาตรสารละลาย มีหน่วยเป็น cm^3
	A	คือ พื้นที่ผิวลูกถ้วยฉนวน มีหน่วยเป็น cm^2

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta [1 - b(\theta - 20)] \quad (3.2)$$

เมื่อ	σ_θ	คือ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ θ °C มีหน่วยเป็น S/m
	σ_{20}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 °C มีหน่วยเป็น S/m
	b	คือ ค่าตัวประกอบแปรตามอุณหภูมิของสารละลาย สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.3)
	θ	คือ อุณหภูมิของสารละลาย มีหน่วยเป็น °C

$$b = -3.200 \times 100^{-8} \theta^3 + 1.032 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.272 \times 10^{-4} \theta + 3.544 \times 10^{-2} \quad (3.3)$$

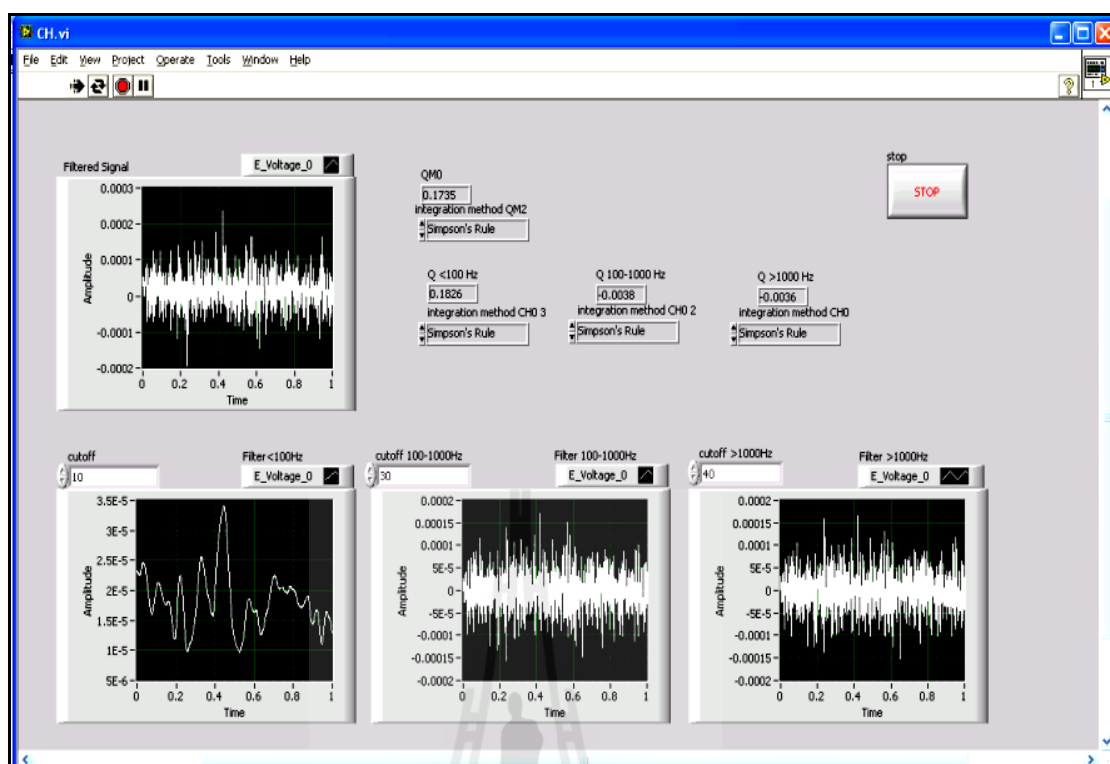
3.15 โปรแกรม Lab VIEW

Lab VIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม Lab VIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้น จุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ก็คือการจัดการในการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพและในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ช่วยในการวัดมากมาย สิ่งที่ Lab VIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นอย่างเห็นได้ชัดที่สุดคือ Lab VIEW นี้เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphical User Interface) โดยสมบูรณ์ นั่นคือไม่จำเป็นต้องเขียนคำสั่ง (Code) ใด ๆ ทั้งสิ้นและที่สำคัญลักษณะภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้จะเรียกว่าเป็น ภาษารูปภาพหรือ Graphical Language (กนต์ธร ชำนิประศาสน์. LabVIEW Tutorial.)

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย Lab VIEW จะเรียกว่า **Virtual Instrument (VI)** เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรมในขณะเดียวกัน หลังจากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของฟังก์ชันโปรแกรมย่อย (Subroutines) และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI หนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ฟรอนต์พาแนล

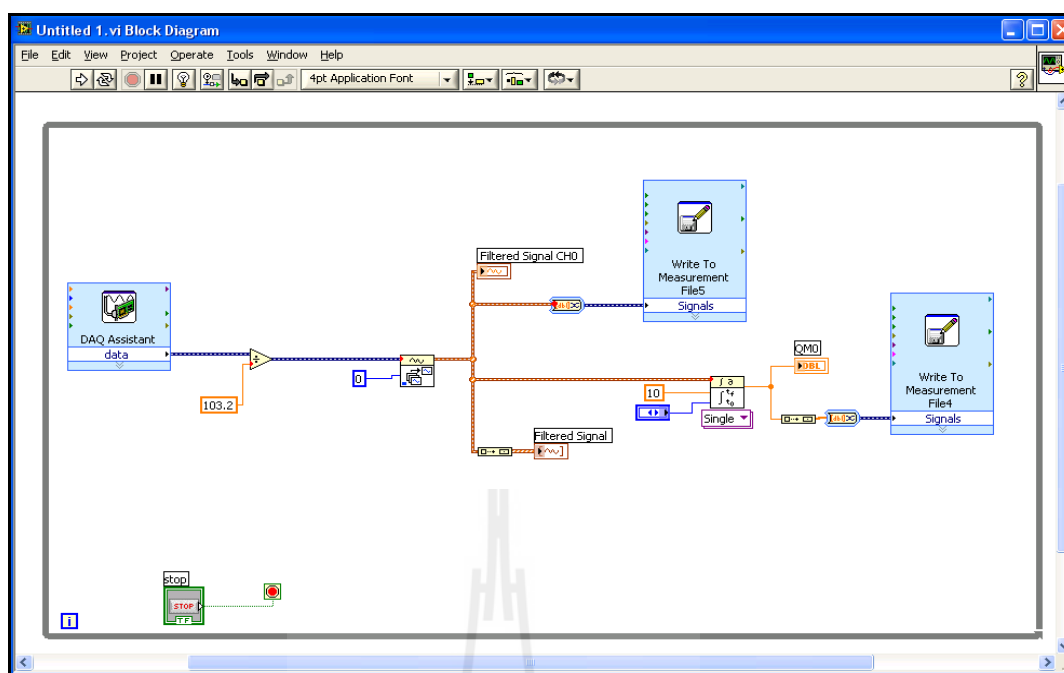
หน้าปัทม์ (Front Panel) เป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับตัวโปรแกรม (นิยมเรียกว่า User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดทั่วไป เช่น สวิตช์ปิด – เปิด ปุ่มกด จอแสดงผล เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะของฟรอนต์พาแนลในโปรแกรม Lab VIEW

2. บล็อกไดอะแกรม

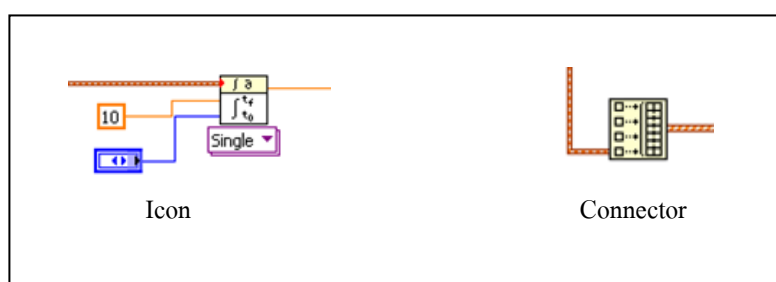
ส่วนนี้เป็นเสมือนกับซอสโค้ดหรือโปรแกรมของ Lab VIEW ประกอบด้วย ฟังก์ชัน คำคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง แต่ละส่วนจะปรากฏในรูปของบล็อก และ จะได้รับการต่อสายที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง บล็อก เหล่านั้น ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะของบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรม Lab VIEW

3. ไอคอนและคอนเน็กเตอร์

เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อยในโปรแกรมทั่ว ๆ ไป โดยไอคอนจะหมายถึงบล็อกไดอะแกรมตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทางคอนเน็กเตอร์ ซึ่งใน Lab VIEW เรียกโปรแกรมย่อยนี้ว่า **sub VI** สำหรับลักษณะทั่วไปของไอคอนและคอนเน็กเตอร์แสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งรูปของคอนเน็กเตอร์พบว่า มีช่องเชื่อมต่อข้อมูลที่เรียกว่า เทอร์มินอลอยู่ด้วย



รูปที่ 3.16 ลักษณะของไอคอนและคอนเน็กเตอร์ในโปรแกรม Lab VIEW

คำศัพท์ที่ใช้ในโปรแกรม Lab VIEW จะแตกต่างจากที่ใช้กันในภาษาการเขียนโปรแกรมทั่วไป ดังนั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการใช้โปรแกรม จึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงคำศัพท์ที่สำคัญต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบคำศัพท์ที่ใช้ในโปรแกรม Lab VIEW กับโปรแกรมพื้นฐานทั่วไป

Lab VIEW	โปรแกรมพื้นฐาน	หน้าที่
VI	Program	ตัวโปรแกรมหลัก
Function	Function	โปรแกรมสำเร็จรูปที่สร้างขึ้นมากับโปรแกรมนั้น
Sub VI	Subroutine	โปรแกรมย่อยที่ถูกเรียกใช้โดยโปรแกรมหลัก
Front Panel	User Interface	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้
Blok Diagram	Program Code	การเขียนเป็นขั้นตอนของแต่ละโปรแกรมกำหนดขึ้น

นอกจากนี้โปรแกรม Lab View สามารถส่งผ่านข้อมูลผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อได้หลายชนิด เช่น DAQ (Data Acquisition) GPIB (General Purpose Interface Bus) พอร์ตอนุกรม (Serial Port) เป็นต้น รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้บรรจุฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกหลายประการ เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ตัวกรองสัญญาณ (Filters) สถิติ พีชคณิตและคณิตศาสตร์อื่น ๆ โปรแกรม Lab View จึงทำให้การวัดและการใช้เครื่องมือวัดกลายเป็นเรื่องง่ายสำหรับการนำไปใช้งาน

ในงานด้านการวัดและเครื่องมือวัดทางวิศวกรรม จะประกอบด้วยขั้นตอนหรือกระบวนการวัดหลัก ๆ ตามลำดับดังนี้

1) Sensor-Transducer ทำหน้าที่เปลี่ยนปรากฏการณ์ทางธรรมชาติหรือปริมาณต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับได้ ไม่ว่าจะเป็น กระแส ความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้า

2) Signal Conditioner ทำหน้าที่ปรับแต่งปริมาณสัญญาณที่ได้จากขั้นที่ 1 ให้มีขนาดปริมาณหรือลักษณะที่เหมาะสม เพราะสัญญาณที่ได้นั้นอาจมีขนาดไม่เหมาะสมหรือมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปที่จะนำไปวิเคราะห์ได้ในทันที

3) Data Acquisition ทำหน้าที่ประมวลผลความหมายหรือเปลี่ยนสัญญาณในลักษณะ อนาล็อก (Analog Signal) ให้มาอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) เพื่อใช้ประโยชน์ในการตีความหมายและใช้ในการควบคุมหน้าที่ของ DAQ Boards

การติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และทรานสดิวเซอร์ จึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับคอมพิวเตอร์ โดยปกติแล้วสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกได้โดยการผ่าน Input/Output Board หรือ (I/O Board) ซึ่ง I/O Board นี้จะมีหลายแบบ แต่แบบที่สำคัญและสามารถเชื่อมต่อโดยผ่านคำสั่งของ Lab VIEW ได้ทันทีคือ DAQ board, GPIB Board และ Serial Interface ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีการติดต่ออุปกรณ์ภายนอกกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ DAQ Board ในการส่งผ่านข้อมูลที่ได้จากการวัดค่ากระแสรั่วบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ขณะทดสอบไปยังโปรแกรม Lab VIEW ในเครื่องคอมพิวเตอร์

3.15.1 โครงสร้างและรูปแบบที่สำคัญสำหรับใช้งานใน Lab VIEW

1) แถบเครื่องมือ

บนแถบเครื่องมือของ Lab VIEW จะคล้ายกับแถบเครื่องมือของโปรแกรมต่าง ๆ ทั่วไป คือเป็นการรวบรวมคำสั่งที่ใช้อยู่ประจำให้อยู่ในลักษณะของปุ่มกดเพื่อสะดวกในการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ลักษณะแถบเครื่องมือของโปรแกรม Lab VIEW

▶ ปุ่มคำสั่งการทำงาน (Run Button) มีลักษณะเป็นลูกศร ใช้สั่งการให้ VI ทำงาน เมื่อกดปุ่มนี้ลักษณะของปุ่มคำสั่งการทำงานจะเปลี่ยนไปตามการทำงานของ VI ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกศรวิ่ง ▶ แสดงถึงโปรแกรมกำลังทำงาน และถ้าหากว่าปุ่มคำสั่งการทำงานปรากฏเป็นรูปลูกศรขาด ▶ แสดงว่า VI นั้นยังไม่พร้อมทำงานหรือมีข้อผิดพลาดอยู่ใน VI

▶ ปุ่มคำสั่งการทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Run Button) มีลักษณะเป็นลูกศรวน เนื่องจากการทำงานของข้อมูล (Data Flow) จะเริ่มต้นเมื่อได้รับข้อมูลและสิ้นสุดลงเมื่อเสร็จสิ้นการประเมินผลข้อมูล อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เรากำลังต้องการให้ VI ทำงานซ้ำต่อไปเรื่อย ๆ นั่นคือ เมื่อจบการทำงานในครั้งแรกก็ให้กลับไปเริ่มต้นทำใหม่ไปเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถใช้ปุ่มนี้เป็นเครื่องมือทำคำสั่งนี้ได้ และเมื่อ VI ทำงานอย่างต่อเนื่องปุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นลูกศรวนสีดำ ▶

⊗ หรือ ⊗ ปุ่มยกเลิกการทำงาน (Abort Button) มีลักษณะเป็นเครื่องหมายจราจรให้หยุด โดยก่อนสั่งให้ VI ทำงานปุ่มนี้จะใช้งานไม่ได้ (จะเป็นสีเทา) แต่เมื่อเราให้โปรแกรม

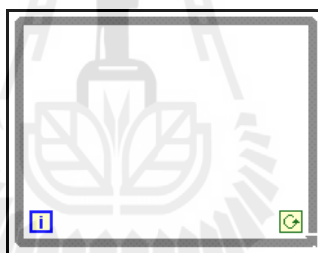
ทำงานด้วยปุ่ม Run หรือ Continuous Run ปุ่มนี้จะปรากฏให้ใช้งานได้ (เป็นสีแดง) หากกดปุ่มนี้จะเป็นการยกเลิกการทำงานของ VI

 ปุ่มหยุดการทำงานชั่วคราว (Pause Button) เป็นคำสั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงานชั่วคราว เพื่อเราสามารถแก้ไขโปรแกรมได้

 Execution Highlighting Button จะสั่งให้ VI ทำการเน้นหรือแสดงการไหลผ่านของข้อมูลเมื่อผ่านไปบนส่วนต่าง ๆ ของไคอะแกรม และจะเห็นว่าการแสดงค่าของข้อมูลเมื่อผ่านส่วนต่าง ๆ ในขณะนั้นไปด้วย

2) While loop

While Loop เป็นการทำงานของโปรแกรมซ้ำกันไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะยกเลิกสภาพตามที่กำหนด การกำหนดสภาพจะใช้บูลีน (Boolean) ที่เชื่อมต่อเข้ากับ Conditional Terminal ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปลูกศรวนอยู่ การทำงานของ While loop จะดำเนินการทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าสภาพบูลีนที่กำหนดให้กับ Conditional Terminal จะเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.18



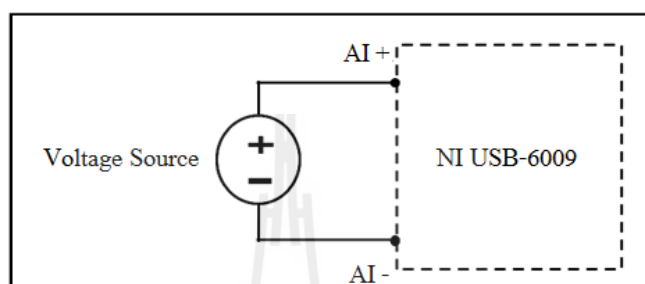
รูปที่ 3.18 ลักษณะของ While Loop

3) DAQ Board

DAQ Board เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นระบบตรวจวัดสัญญาณที่มีพอร์ต USB ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ โดยสามารถรับและส่งสัญญาณร่วมกับเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อวัดสัญญาณที่ต้องการ เช่น สัญญาณทางสัญญาณไฟฟ้า ความถี่ เป็นต้น การเชื่อมต่อสัญญาณจากการวัดกระแสแล้วจะส่งผ่านตามสายเคเบิลแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) ไปยังชุดเทอร์มินอลบล็อก ก่อนเข้าสู่ DAQ Board และส่งสัญญาณที่ได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์ หลักการวัดสัญญาณสามารถทำได้ 3 ลักษณะ คือ

- (1) ดิฟเฟอเรนเชียล (Differential)
- (2) ซิงเกิล-เอนด์แบบเทียบกราวด์ (Reference Single-Ended : RSE)
- (3) ซิงเกิล-เอนด์แบบไม่เทียบกราวด์ (Nonreference Single-Ended : NRSE)

ในที่นี้ จะกล่าวถึงหลักการวัดสัญญาณแบบ ดิฟเฟอเรนเชียล การวัดแบบนี้จะนำปลายสายทั้งสองข้างของสายสัญญาณต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของอุปกรณ์ DAQ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ในส่วน AI หมายถึง อนาล็อกอินพุต ซึ่งการเชื่อมต่อในลักษณะนี้จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากสัญญาณอินพุตแต่ละช่องไม่มีจุดสัญญาณร่วมกัน สำหรับลักษณะของ NI USB-6009 หรือ DAQ Board ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 ไดอะแกรมการวัดสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 3.20 NI USB-6009 หรือ DAQ Board ที่ใช้ในงานวิจัย

4) การสุ่มสัญญาณ (Data Sampling)

การแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลจะถูกสุ่มค่าจากสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ้าสุ่มจำนวนที่เหมาะสมพอดี สัญญาณดิจิทัลที่ได้จะมีความสมบูรณ์และ

มีรายละเอียดที่ครบถ้วนตามต้องการ แต่หากสุ่มน้อยเกินไป สัญญาณที่ได้จะเกิดความคลาดเคลื่อน ทำให้สัญญาณที่ออกมาเกิดคลาดเคลื่อนตามไปด้วย แต่ถ้าสุ่มจำนวนมากเกินไป แม้จะได้สัญญาณที่มีรายละเอียดต่าง ๆ สมบูรณ์เหมือนสัญญาณต้นแบบ แต่จะทำให้เวลาที่ใช้ในการประมวลผลมากเกินไป ซึ่งความถี่ที่ใช้สุ่มข้อมูล (Sampling Frequency) ที่เหมาะสมเรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความถี่สัญญาณอินพุต

Nyquist เป็นผู้ที่น่าเสนอทฤษฎีด้านการเก็บตัวอย่างนี้ ซึ่งต่อมานิยมเรียก Nyquist's Theorem ซึ่งกล่าวว่า “เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสัญญาณที่ไม่ถูกต้อง (Aliasing) ในการเก็บสัญญาณ อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของความถี่สูงสุด ($2f_{\max}$) ที่บรรจุอยู่ในสัญญาณที่จะทำการเก็บ”

5) การกรองสัญญาณความถี่

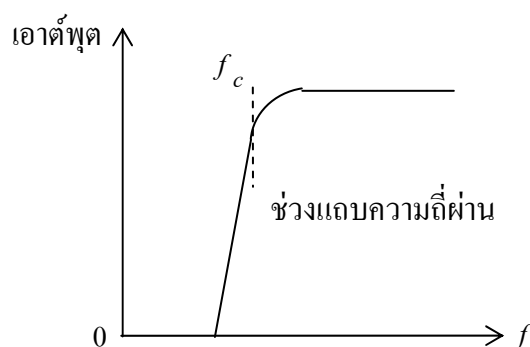
วงจรกรองความถี่ (Filters) เป็นวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการ หรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนด้วย การกรองความถี่แบ่งได้ดังนี้

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ (Low Pass Filter) ลักษณะการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อได้รับสัญญาณอินพุต วงจรจะทำหน้าที่กรองสัญญาณหรือความถี่เฉพาะที่ความถี่ต่ำ คือ ตั้งแต่ความถี่ 0 Hz ถึง ความถี่ f_c เท่านั้นที่สามารถผ่านออกมาทางเอาต์พุตได้ ส่วนสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า f_c จะไม่ผ่านไปยังเอาต์พุตได้ ดังนั้นเอาต์พุตที่ออกมาจะมีเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ต่ำเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่สูงผ่านได้ (High Pass Filter) เป็นวงจรที่ไม่ยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึง ความถี่ f_c ผ่านได้ แต่จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ f_c เท่านั้นผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านได้ (Band Pass Filter) เป็นวงจรที่ยอมให้เฉพาะช่วงความถี่ที่กำหนด คือ f_{c1} ถึง ความถี่ f_{c2} ให้ผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานอยู่ทั่วไป มักนิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และอุปกรณ์กึ่งตัวนำ เช่น ออปแอมป์ ข้อดีคือสามารถออกแบบได้ง่าย ราคาถูก แต่ข้อเสียก็คือวงจรขาดเสถียรภาพ ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ในปัจจุบันได้นิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลกันมากขึ้น เพราะมีเสถียรภาพดีกว่าและความถี่ที่ต้องการยังมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าด้วย แต่ข้อเสียของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลก็คือ การออกแบบทำได้ยากและมีราคาสูงกว่า

3.16 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ ได้กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและเป็นแนวทางในการทำการทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของยางชิลิโคน ซึ่งเนื้อหาโดยส่วนใหญ่เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างทางกายภาพ ทางเคมี ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมอายุของยางชิลิโคน รวมถึงหลักการและวิธีการสำหรับใช้วิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของยางชิลิโคนเพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นในการทำงานวิจัย เมื่อเกิดความเข้าใจแล้วจึงสามารถทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดสอบได้ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบจะถูกกล่าวในบทถัดไป



บทที่ 4

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงสิ่งที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบ โดยเริ่มจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยของคณะผู้วิจัยที่เคยทำมาแล้วรวมทั้งมาตรฐานที่ใช้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์พร้อมกับทำความเข้าใจกับข้อมูลที่ได้มา เมื่อศึกษาจนเกิดความเข้าใจแล้ว จึงได้ลงมือออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบในงานวิจัย ซึ่งการทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั (ทำในห้องทดสอบ) และการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (แขวนไว้ในอาคารโดยไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้า)

4.2 มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992

มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับทำโครงหุ้มฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั ระยะเวลาการทดสอบอยู่ที่ 1000 ชั่วโมง โดยมีข้อกำหนดการทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- อัตราการไหลของน้ำ (Water Flow Rate) $(0.4 \pm 0.1) \text{ l/(m}^2 \times \text{h)}$
- ความเข้มข้นของน้ำเกลือ 10 kg/m^3
- ใช้อัลตราโซนิก ฮิวมิดิไฟเออร์สำหรับการสร้างหมอกไอเกลือมีขนาด $5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$
- ช่วงระยะเวลาในการทดสอบ 1000 ชั่วโมง
- ปริมาตรสูงสุดของห้องทดสอบ 10 m^3
- ระยะห่างตามผิวของฉนวน 20 mm/kV
- แรงดันทดสอบอยู่ในช่วง $14\text{--}20 \text{ kV}$
- แรงดันตกสูงสุด 5% สำหรับกระแส $250 \text{ mA}_{\text{rms}}$
- อุณหภูมิขณะทดสอบ $20^\circ\text{C} \pm 5 \text{ K}$

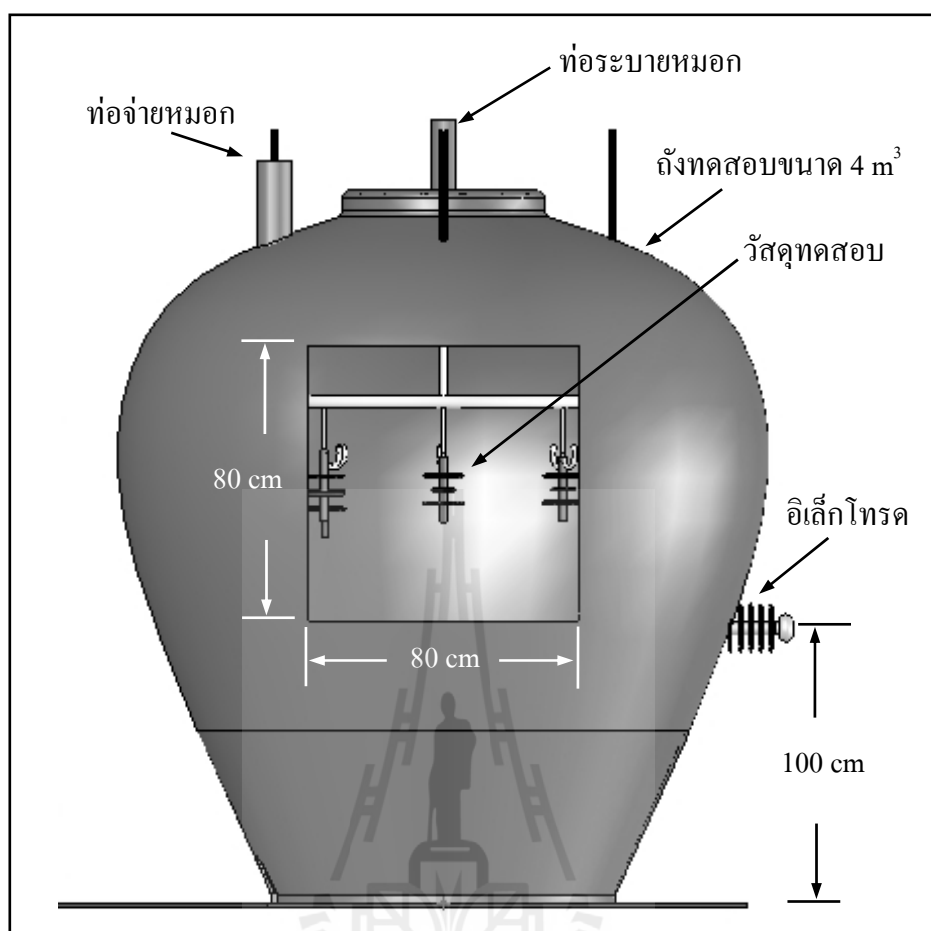
4.3 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบ

การสร้างอุปกรณ์การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์และชุดทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

4.3.1 ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์

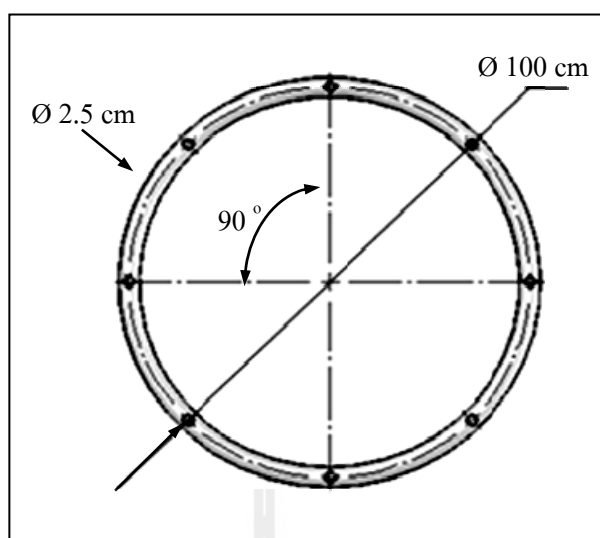
ชุดการทดสอบนี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นยางซิลิโคน เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ลักษณะของห้องทดสอบจะเป็นแบบห้องปิด การสร้างห้องทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้อ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 ขั้นตอนการสร้างชุดอุปกรณ์ทดสอบดังกล่าวประกอบด้วย

1) **ห้องทดสอบ** ห้องทดสอบมีลักษณะเป็นห้องปิด และมีรูระบายหมอกไอเกลือด้านบน โดยห้องทดสอบจะเป็นถังไฟเบอร์ (มีปริมาตร 4 m³) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากไอน้ำเกลือระหว่างการทดสอบ (การกำหนดขนาดของห้องทดสอบสามารถได้ตามมาตรฐานการทดสอบหัวในข้อที่ 4.2) ห้องทดสอบจะถูกเจาะรูด้านข้างเพื่อยึดปลอกฉนวนนำสายสำหรับเป็นทางป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง และเจาะรูด้านหน้าเป็นประตูเพื่อเข้าไปติดตั้งวัสดุทดสอบได้ ซึ่งภายในห้องทดสอบจะติดตั้งฐานแขวนวัสดุทดสอบและแขวนวัสดุทดสอบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

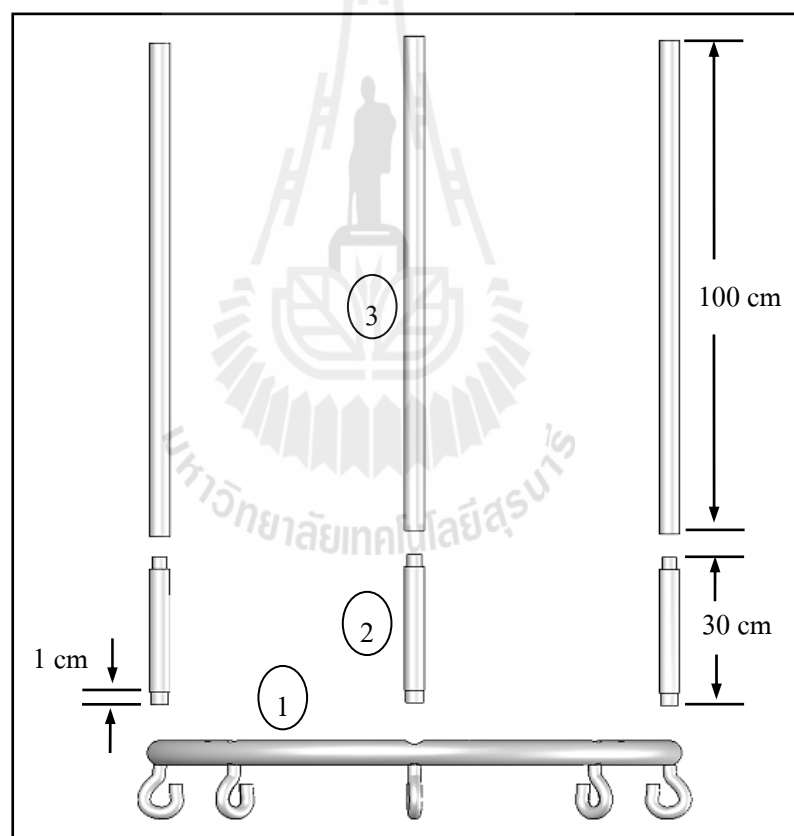


รูปที่ 4.1 แบบร่างห้องทดสอบ

2) **ฐานแขวนวัสดุทดสอบ** ฐานแขวนวัสดุทดสอบจะยึดอยู่ภายในห้องทดสอบ โดยสร้างจากเหล็กท่อกกลมขนาด 1 นิ้ว คัดเป็นวงกลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และมีตะขอที่สร้างจากเหล็กเส้นหนา 1 เซนติเมตร สำหรับแขวนวัสดุทดสอบ มีเหล็กแท่งสั้น (หมายเลข 2) เชื่อมติดกับฐานวงกลมไว้ เมื่อนำไปติดตั้งภายในห้องทดสอบ ฐานแขวนวงกลมจะถูกยึดด้วยเหล็กแท่งยาว (หมายเลข 3) เพื่อยึดฐานแขวนวัสดุทดสอบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) ฐานแขวนวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นจะทาสีกันสนิมเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากหมอกไอเกลือ



(ก) แบบร่างฐานแขวนวงกลม

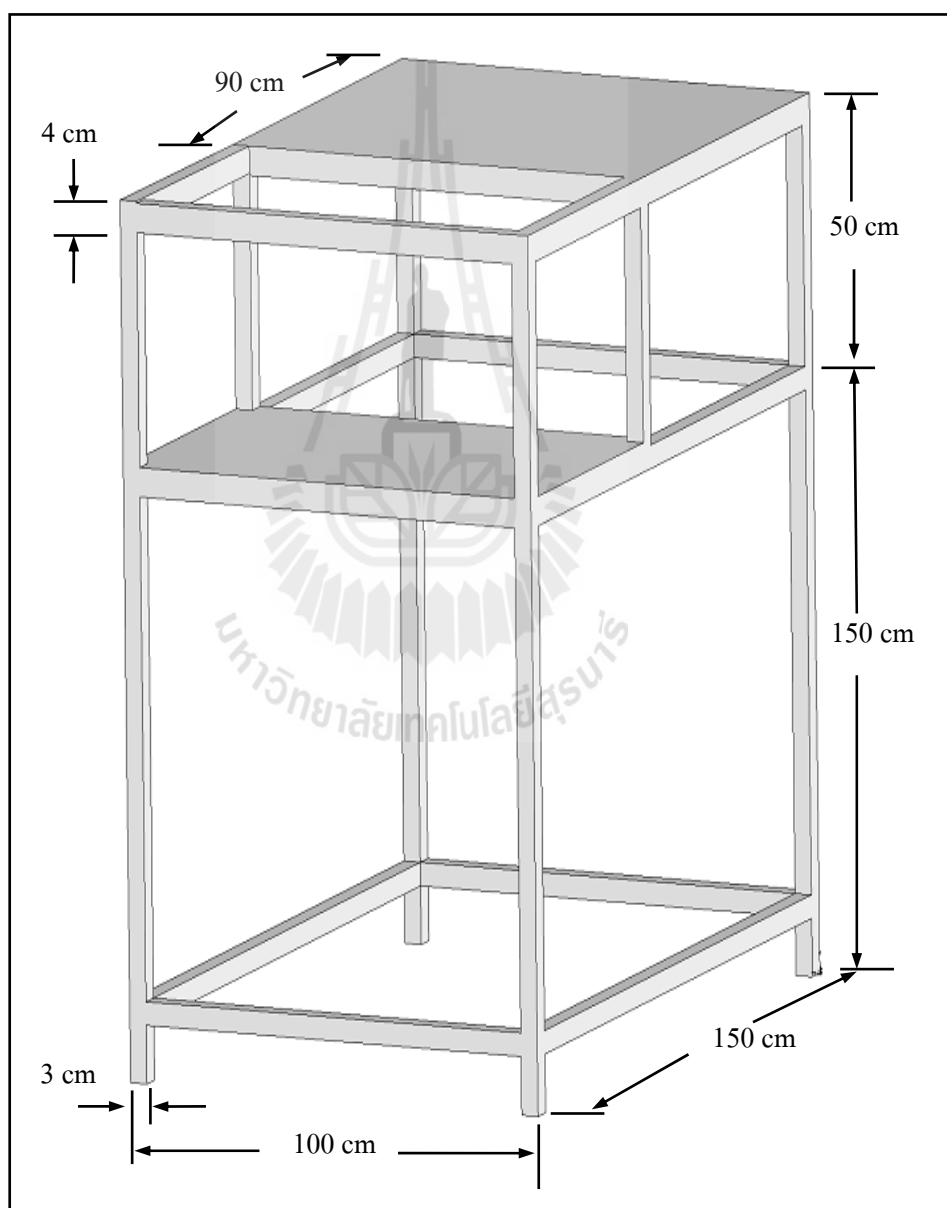


(ข) แบบร่างการประกอบฐานแขวนวัสดุทดสอบ

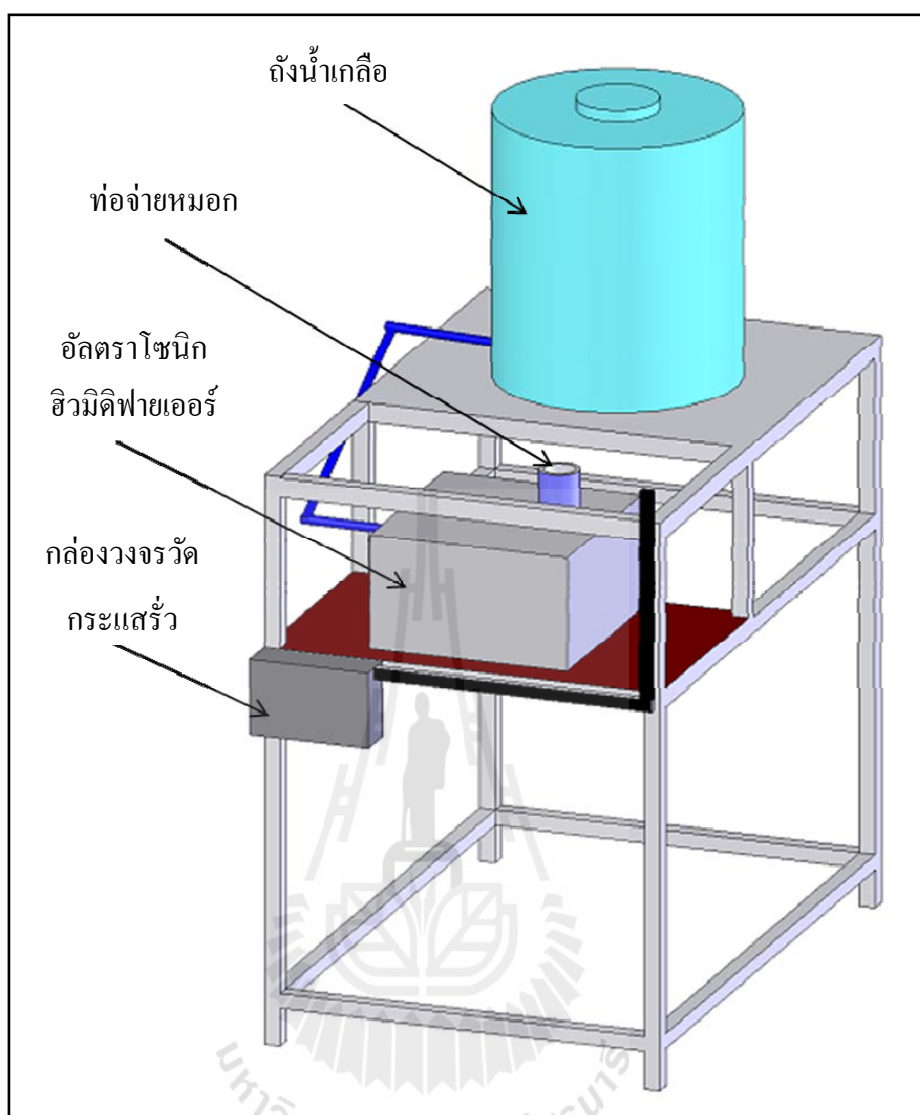
รูปที่ 4.2 แบบร่างฐานแขวนวัสดุทดสอบ

3) ฐานวางถังน้ำเกลือและเครื่องอัลตราโซนิก อิวมิติฟายเออร์

สำหรับวางถังน้ำเกลือขนาด 100 L วางเครื่องสร้างหมอกหรือเครื่องอัลตราโซนิก อิวมิติฟายเออร์และติดตั้งกล่องวงจรวัดค่ากระแสรั่ว ลักษณะของโครงสร้างและขนาดแสดงในรูปที่ 4.3 จะสร้างจากเหล็กเพื่อความแข็งแรงและทาสีเพื่อป้องกันสนิม โดยนำถังน้ำเกลือเครื่องสร้างหมอกและกล่องวงจรวัดกระแสรั่วมาติดตั้งและวางถังน้ำเกลือไว้สูงกว่าเครื่องสร้างหมอก เพื่อให้ น้ำเกลือไหลลงสู่เครื่องสร้างหมอกเองได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

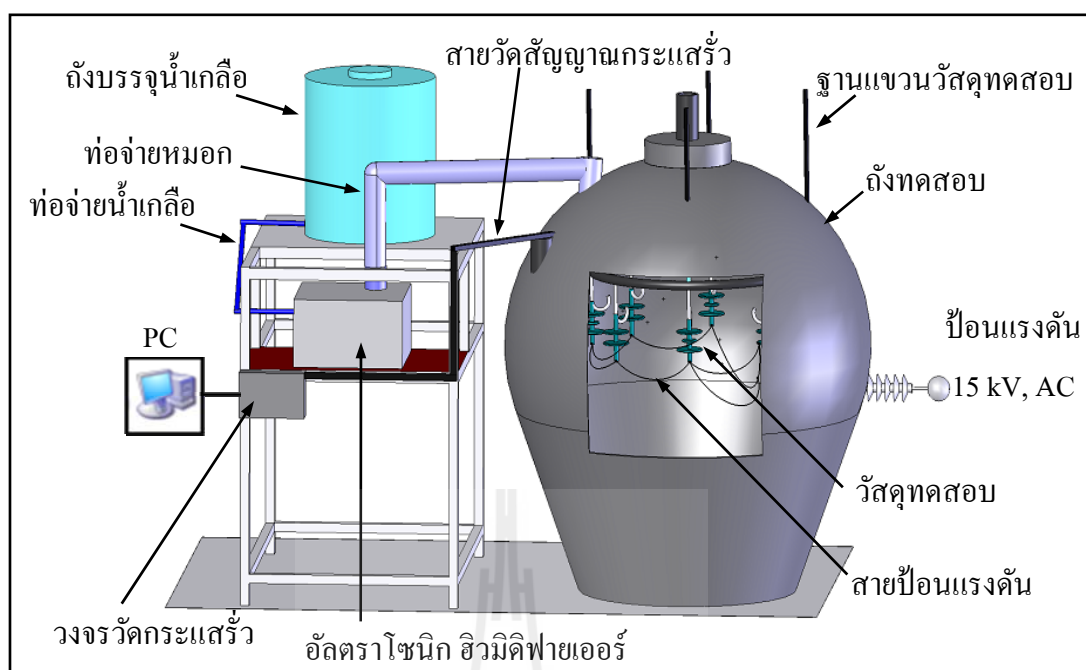


รูปที่ 4.3 แบบร่างฐานวางถังน้ำเกลือและเครื่องอัลตราโซนิก อิวมิติฟายเออร์

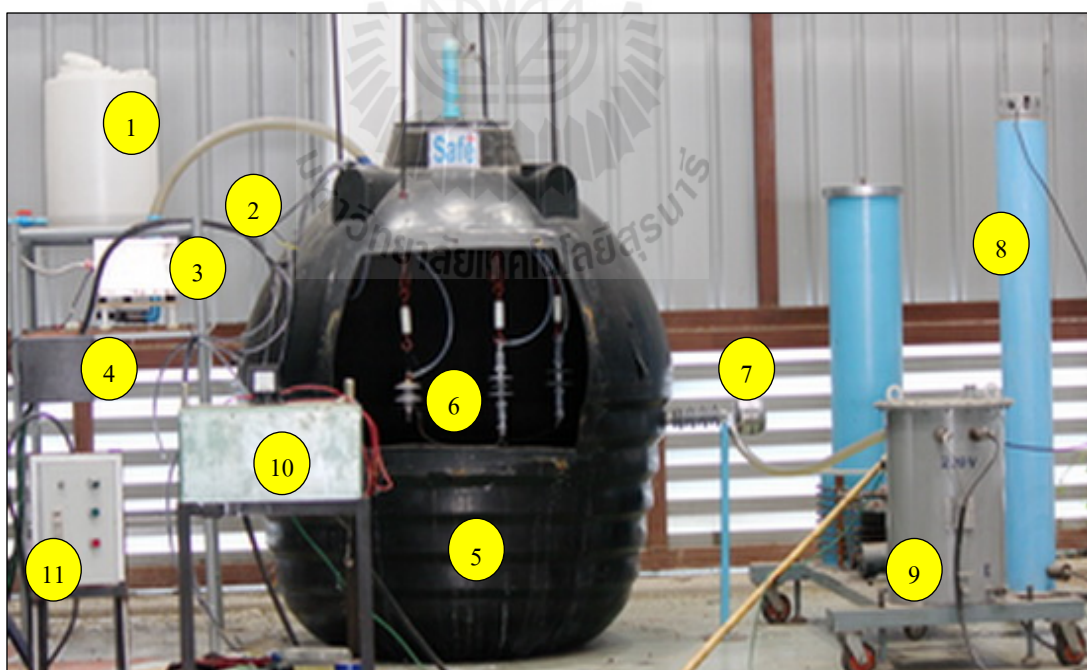


รูปที่ 4.4 แบบร่างการวางถังน้ำเกลือและอัลตราโซนิก สิวมิติฟายเออร์

ในรูปที่ 4.5 เป็นการนำอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นมาประกอบเป็นชุดทดสอบ โดยวัสดุทดสอบจะถูกติดตั้งไว้ในและเชื่อมต่อกับสายวัดสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) จากวงจรวัดเข้าด้านบนของวัสดุทดสอบแต่ละตัว สัญญาณกระแสรั่วที่วัดจะถูกส่งผ่านทางสายวัดสัญญาณแบบแกนร่วมไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่ากระแสรั่วตลอดการทดสอบ สำหรับด้านล่างของวัสดุทดสอบทุกตัวจะถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 15 kV ที่ป้อนมาจากหม้อแปลงทดสอบขนาด 20 kV 5 kVA และติดตั้งท่อจ่ายหมอกไอเกลือจากเครื่องสร้างหมอกไปยังห้องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1 เป็นคำอธิบายรายละเอียดของชุดทดสอบ



รูปที่ 4.5 แบบร่างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์



รูปที่ 4.6 ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์ที่สร้างเสร็จ

ตารางที่ 4.1 อธิบายชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุแบบหมอกไอเกลือประดิษฐ์ที่สร้างเสร็จ

ลำดับ	คำอธิบาย
1	ถังบรรจุน้ำเกลือ
2	สายวัดสัญญาณกระแส
3	อัลตราโซนิก ฮิวมิดิไฟเออร์
4	วงจรวัดสัญญาณกระแส
5	ถังทดสอบ
6	วัสดุทดสอบ
7	อิเล็กทรอนิกส์
8	ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน
9	หม้อแปลงทดสอบ
10	วาไรเอเบิลปรับแรงดันทดสอบ
11	ผู้ควบคุมการจ่ายหมอกไอเกลือ

4) ชุดจ่ายแรงดันทดสอบ ประกอบด้วย

- (1) หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ 1 Φ 20 kV, 5 kVA
- (2) ตัวปรับขนาดแรงดันไฟฟ้า (Variac) 220 V/ 0 – 220 V 50 Hz, 5 kV
- (3) วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุ
- (4) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM) สำหรับวัดแรงดันต่ำ
- (5) ตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_{damp})

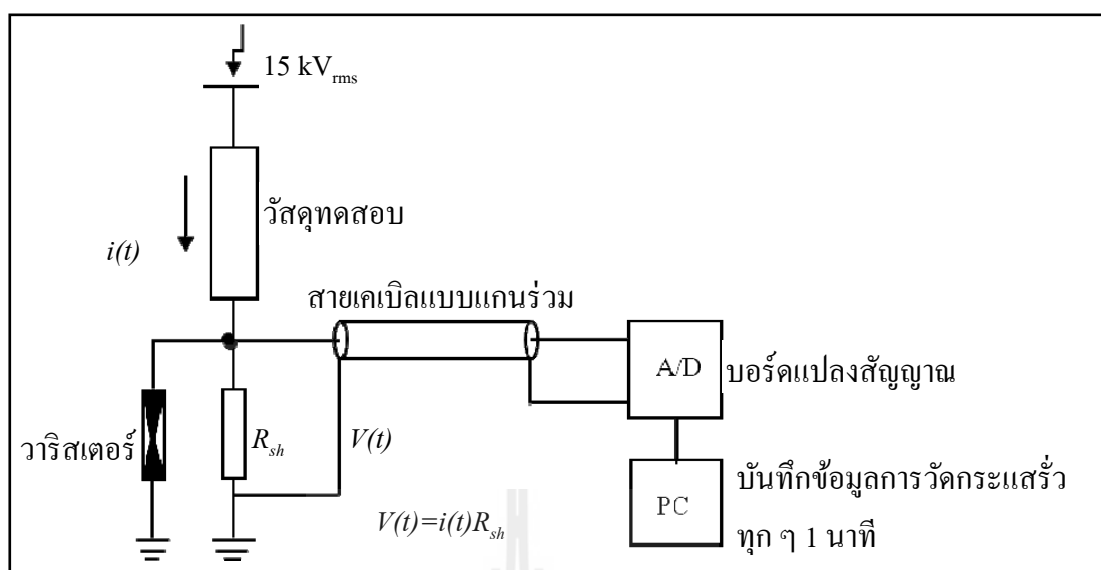
5) วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างหมอก

เครื่องสร้างหมอกใช้สำหรับสร้างหมอกไอเกลือเพื่อจ่ายเข้าถังทดสอบ จำเป็นต้องมีวงจรสำหรับควบคุมการทำงาน เนื่องจากต้องจ่ายหมอกทุกวัน ๆ ละ 8 ชั่วโมง ช่วงเวลาการจ่ายหมอกคือ 09.00-17.00 น. โดยประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเวลา (Timer) เพื่อควบคุมการปิด-เปิดเครื่องอัลตราโซนิก ฮิวมิดิไฟเออร์และมีวงจรควบคุมตัวควบคุมเวลาอีกทีเพื่อป้องกันการเกิดกระแสเกินจากการทดสอบ

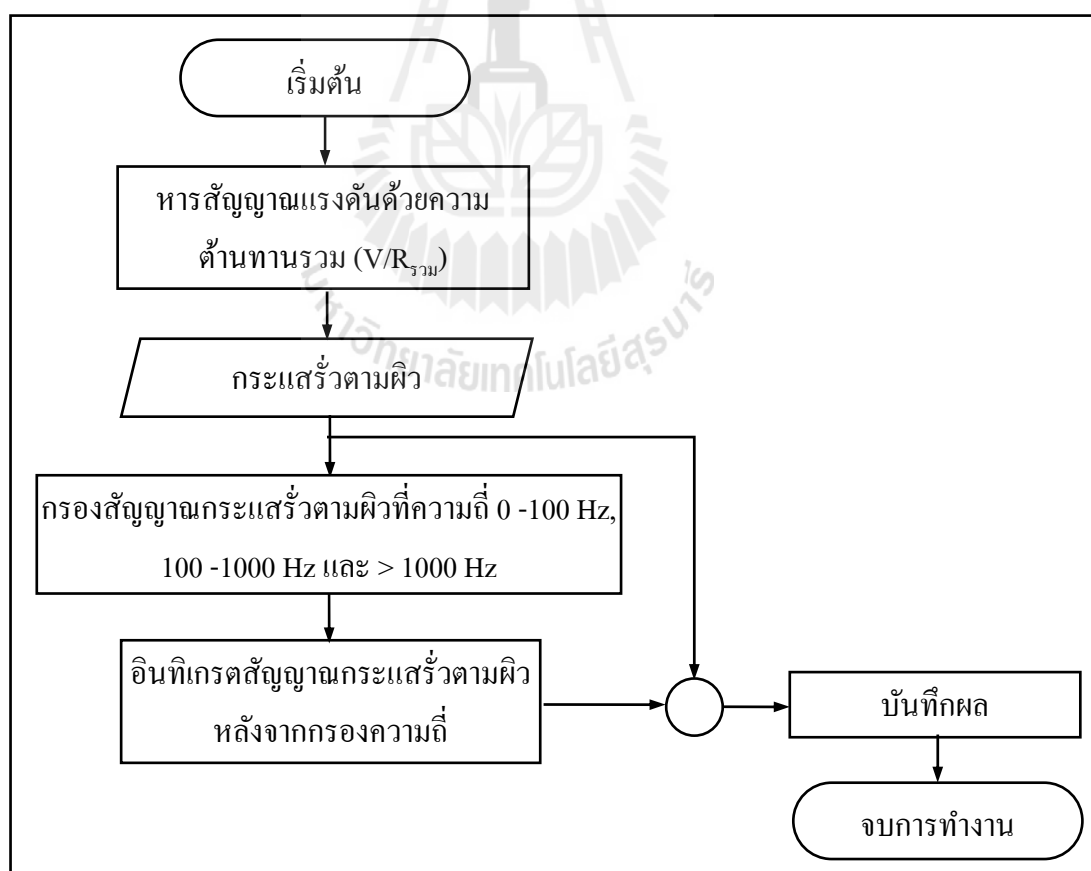
6) การออกแบบและประยุกต์ใช้โปรแกรม Lab VIEW

การออกแบบและประยุกต์ใช้โปรแกรม Lab VIEW เพื่อวัดและบันทึกการเกิดกระแสรั่วตามผิวฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนลดลง น้ำหรือหมอกต่าง ๆ ที่มาเกาะบนผิวลูกถ้วยฉนวนเกิดลักษณะเป็นฟิล์มน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดบริเวณที่นำไฟฟ้าขึ้นบนผิวฉนวน ดังนั้น กระแสจึงสามารถวิ่งไหลผ่านไปบนผิวของลูกถ้วยฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังด้านที่ต่อลงดินได้ หรือเรียกว่ากระแสรั่ว ก่อให้เกิดการวาบไฟหรือเกิดดีสชาร์จตามผิวขึ้น ในระหว่างการทดสอบจึงต้องมีการวัดกระแสรั่วตามผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน เพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาของการเสื่อมอายุของซิลิโคน โดยการประยุกต์จากโปรแกรม Lab VIEW เพื่อใช้ในการวัดและบันทึกค่ากระแสรั่วที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนค่ากระแสรั่วเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมโดยใช้วิธีการอินทิเกรต

การวัดกระแสรั่วตามผิววัสดุทดสอบระหว่างที่ทำการทดสอบ สามารถวัดได้โดยใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบแล้ววัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานต่ออนุกรม (R_{sh}) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งการวัดและบันทึกค่ากระแสรั่วตามผิวที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบจะใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น โดยการนำเอาโปรแกรม Lab VIEW มาประยุกต์ใช้ ลักษณะการทำงานของหลักการวัดกระแสรั่ว จะเริ่มจากวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V(t)$ คร่อม R_{sh} ซึ่งเป็นตัวแทนของกระแสรั่วจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวนยางซิลิโคนที่ทดสอบ ผ่านมาตามสายเคเบิลแบบแกนร่วมและเข้าสู่บอร์ดแปลงสัญญาณ (DAQ Board) ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เมื่อสัญญาณแรงดันเป็นดิจิทัลก็จะผ่านไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทำการบันทึกค่าไว้ หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แผนภาพวงจรการวัดกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยางซิลิโคน (Marungsri, B. 2006)

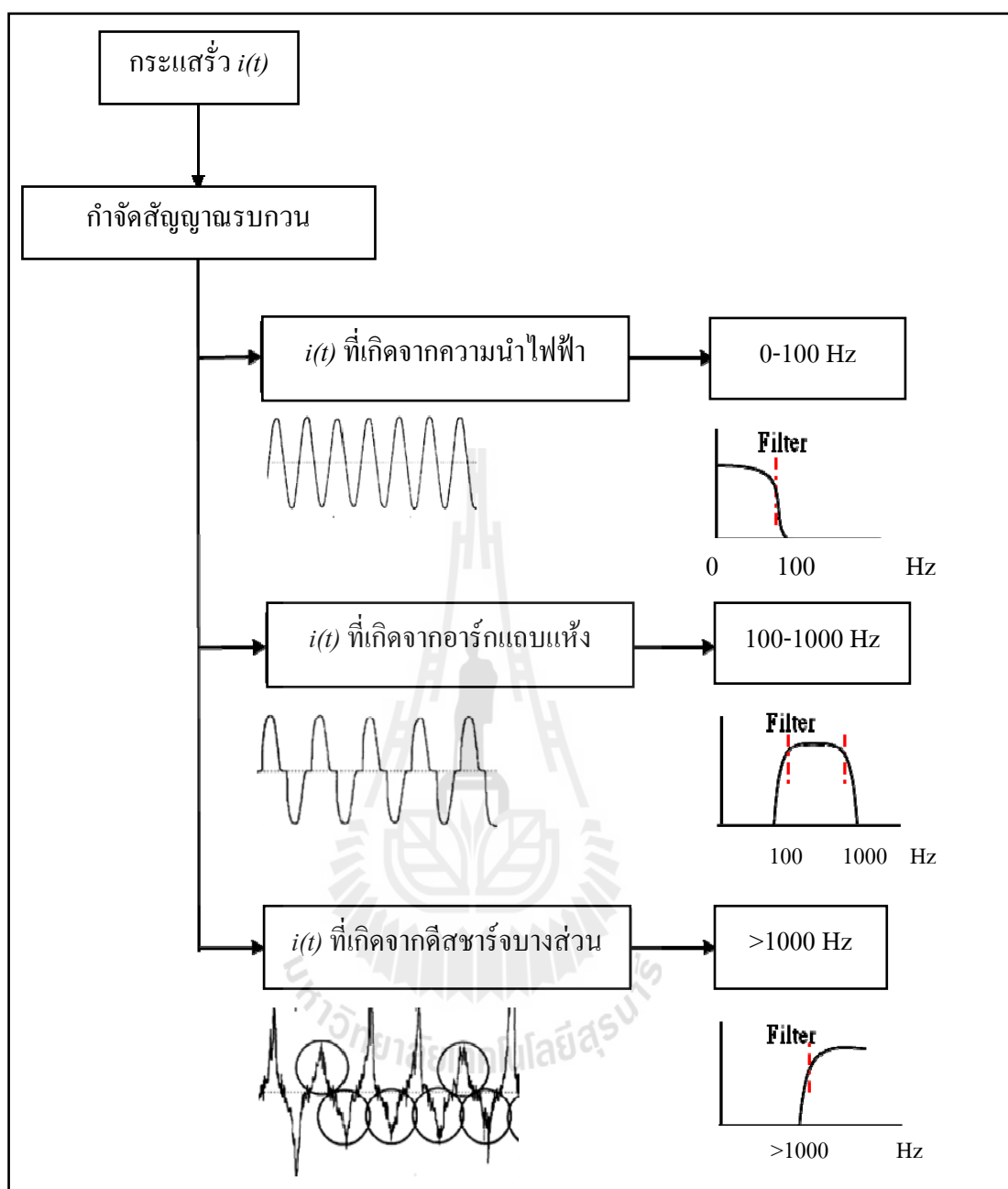


รูปที่ 4.8 หลักการทำงานซอฟต์แวร์สำหรับวัดกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยางซิลิโคน

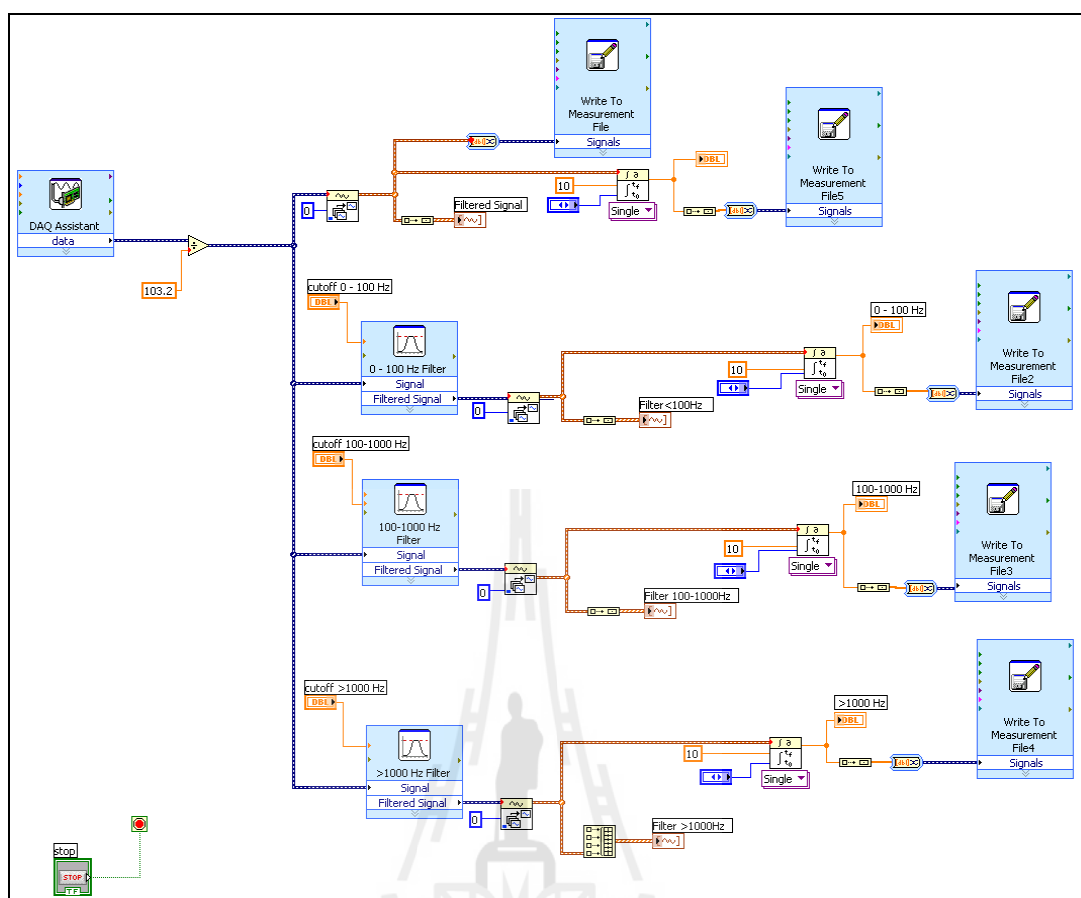
จากรูปที่ 4.8 อธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามา (เป็นดิจิทัล) แล้วผ่านบล็อกที่หารด้วยความต้านทาน R_{sh} เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V(t)$ ให้เป็นกระแสไฟฟ้า $i(t)$ (พร้อมทั้งบันทึกค่าสัญญาณ) และผ่านการกรองความถี่ที่ความถี่ต่าง ๆ จากนั้นสัญญาณที่กรองความถี่แล้วจะถูกอินทิเกรตเพื่อให้เป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสม (q) พร้อมบันทึกค่าดังกล่าวด้วย ซึ่งค่าที่ได้จากการวัดจะนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนต่อไป

สัญญาณกระแส $i(t)$ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบที่แปลงมาจากสัญญาณแรงดัน $V(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) ที่มีรูปร่างที่บิดเบี้ยวจากกระแสตามผิวของวัสดุทดสอบ สัญญาณกระแสที่ผ่านเข้ามาจะถูกกรองสัญญาณ โดยการแยกสัญญาณที่ความถี่ต่างกัน โดยแบ่งเป็นความถี่ 0-100 Hz เป็นสัญญาณกระแสที่เกิดจากความนำ (Conductive Current) ความถี่ 100-1000 Hz เป็นสัญญาณกระแสที่เกิดจากอาร์กแถบแห้ง (Dry Band Arc Current) และที่ความถี่มากกว่า 1000 Hz ขึ้นไปจะเป็นสัญญาณกระแสที่เกิดจากดีสชาร์จบางส่วน (PD Current) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และลักษณะโปรแกรมวัดกระแสที่ประยุกต์จาก Lab VIEW ดังแสดงในรูปที่ 4.10





รูปที่ 4.9 กระบวนการแยกสัญญาณจากกระแสรั่วตามพิพจน์ทางซิลิโคน

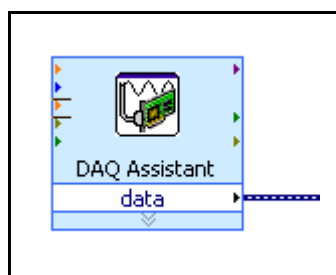


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างโปรแกรมวัดกระแสรั่วของสัญญาณเดียว

โดยสามารถอธิบายการทำงานของโปรแกรมที่ใช้วัดกระแสรั่วตามผิวที่ประยุกต์จากโปรแกรม Lab VIEW ดังนี้

ส่วนที่ 1 DAQ Assistant

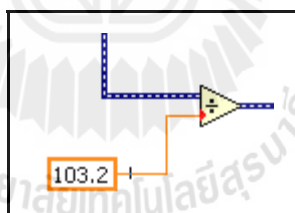
ในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณที่เป็นดิจิทัล ซึ่งถูกแปลงจาก DAQ Board โดยสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจากการวัดของวัสดุทดสอบแต่ละตัวจะเป็นสัญญาณแรงดัน โดย DAQ Assistant นี้ สามารถทำการเลือกได้ว่าต้องการวัดสัญญาณในลักษณะใดและสามารถเลือกช่องการเชื่อมต่อสัญญาณได้ (ในงานวิจัยนี้จะวัดสัญญาณในลักษณะดิฟเฟอเรนเชียล) ในการทดสอบจะมีทั้งหมด 3 สัญญาณ ซึ่งมาจากวัสดุทดสอบแต่ละตัว ลักษณะของ DAQ Assistant แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 บล็อกของ DAQ Assistant

ส่วนที่ 2 การแปลงสัญญาณจากแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

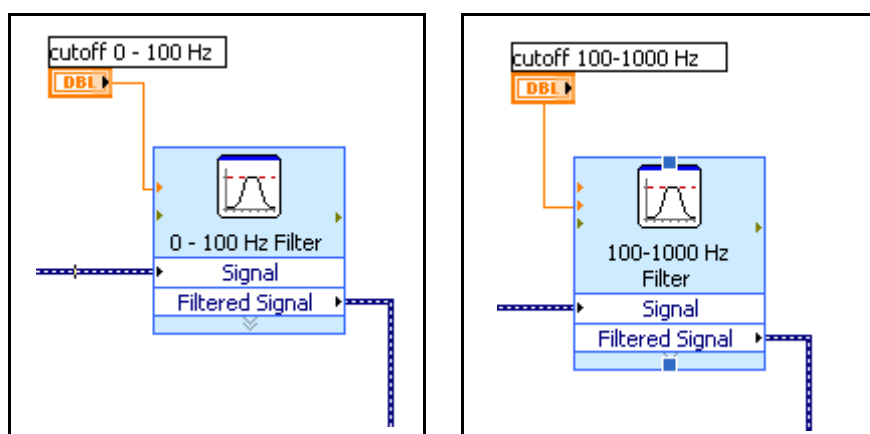
ส่วนนี้จะใช้บล็อกการหารด้วยความต้านทานรวมขนาด $103.2\ \Omega$ มาจากทั้งความต้านทานชั้นและความต้านทานจากสายวัดสัญญาณแบบแกนร่วม ซึ่งสามารถป้อนค่าความต้านทานได้โดยการดับเบิลคลิกสัญลักษณ์ที่เป็นตัวเลขและป้อนค่าได้ตามต้องการ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่บล็อกนี้ จะถูกส่งมาจากบล็อกของ DAQ Assistant และสัญญาณดังกล่าวจะถูกหารด้วยความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เพื่อให้ได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าและเพื่อง่ายต่อการคำนวณค่าประจุไฟฟ้า การหารดังกล่าวเป็นไปตามสูตร $I = V/R$ เมื่อ $R = 103.2\ \Omega$



รูปที่ 4.12 การแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า

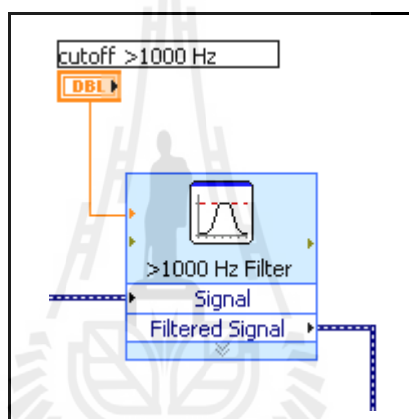
ส่วนที่ 3 การกรองสัญญาณความถี่

ทำหน้าที่ในการกรองความถี่ที่ได้จากการวัด ซึ่งแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ (1) ความถี่ 0-100 Hz เป็นสัญญาณกระแสรั่วที่เกิดจากความนำ (Conductive Current) (2) ความถี่ 100-1000 Hz เป็นสัญญาณกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้ง (Dry Band Arc Current) และ (3) ความถี่มากกว่า 1000 Hz ขึ้นไปจะเป็นสัญญาณกระแสรั่วที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน (PD Current) ดังแสดงในรูปที่ 1.13 (ก), รูปที่ 1.13 (ข) และรูปที่ 1.13 (ค) ตามลำดับ



(ก) การกรองความถี่ 0-100 Hz

(ข) การกรองความถี่ 100-1000 Hz

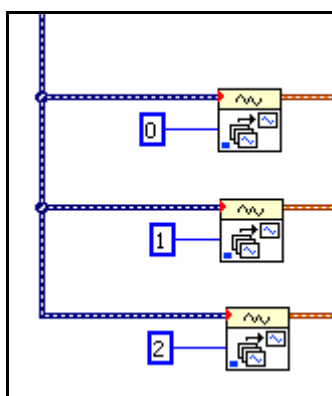


(ค) การกรองความถี่ 1000 Hz ขึ้นไป

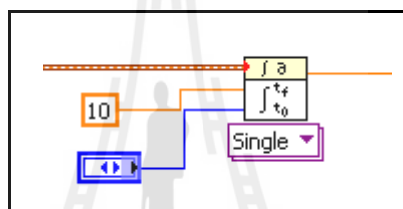
รูปที่ 4.13 การกรองความถี่

ส่วนที่ 4 การแยกช่องสัญญาณและการคำนวณหาประจุไฟฟ้า

เนื่องจากการทดสอบในแต่ละรอบจะมีวัสดุทดสอบอยู่ 3 ตัว สัญญาณอินพุตที่เข้ามาจึงมี 3 ช่องสัญญาณ และก่อนที่จะนำสัญญาณไปทำการคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าได้ จำเป็นต้องมีการแยกสัญญาณในแต่ละช่องเสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อแยกสัญญาณได้แล้ว จากนั้นจะเข้าสู่การคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้า โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้า เมื่อผ่านการอินทิเกรตเทียบกับเวลา จะได้เป็นค่าประจุไฟฟ้า โดยใช้วิธีการอินทิเกรตแบบกฎซิมป์สัน (Simpson's Rule) ดังแสดงในรูปที่ 4.15



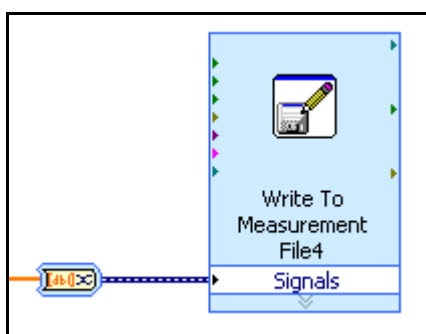
รูปที่ 4.14 บล็อกการแยกช่องสัญญาณ



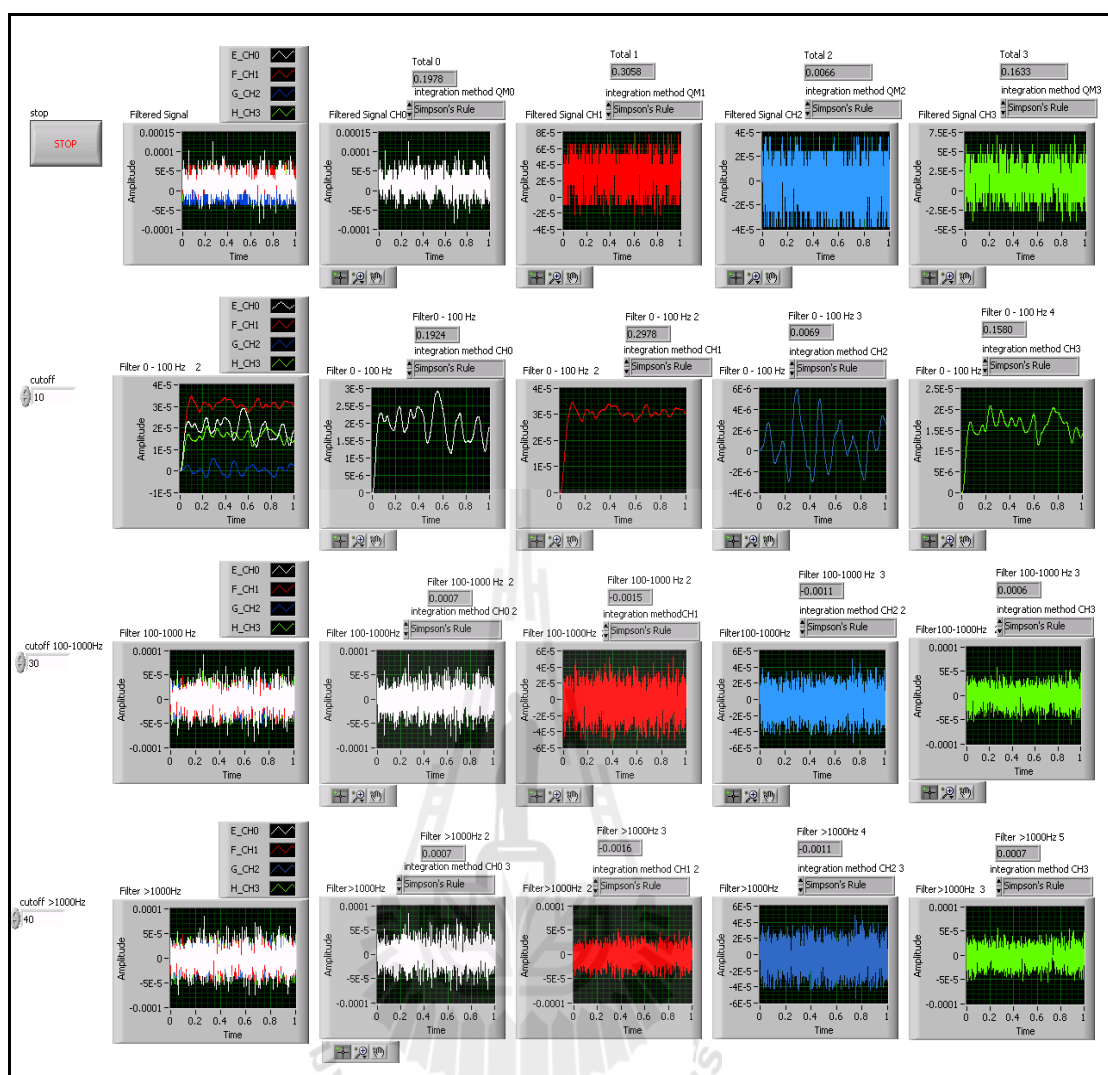
รูปที่ 4.15 การอินทิเกรตหาประจุไฟฟ้า

ส่วนที่ 5 การบันทึกข้อมูล

สัญญาณกระแสที่ได้จากการหารด้วยความต้านทาน รวมทั้งสัญญาณที่ผ่านการอินทิเกรตแล้ว จะถูกนำเข้าสู่บล็อกการบันทึกเพื่อเก็บค่าไว้สำหรับนำไปวิเคราะห์ผล ลักษณะบล็อกการบันทึกข้อมูลดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.16 โดยบันทึกไว้ทุก ๆ 1 นาที ในรูปแบบของไฟล์ข้อมูล



รูปที่ 4.16 บล็อกการบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4.18 ลักษณะฟรอนต์พลาแนลที่ใช้ในการวัดค่ากระแสรั่วตามผิวทั้ง 4 ช่องสัญญาณ

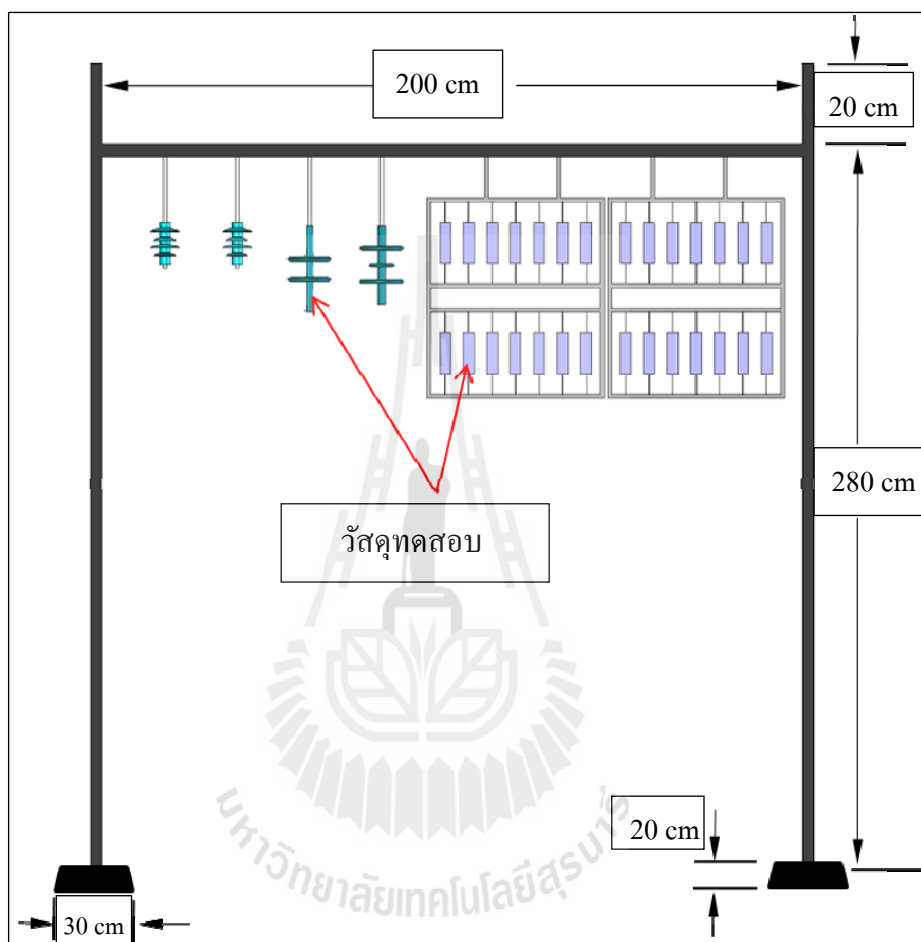
4.3.2 ชุดทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

เนื่องจากการทดสอบนี้ต้องนำวัสดุทดสอบไปแขวนไว้บริเวณภายนอกอาคารเป็นเวลาต่อเนื่อง 2 ปี การสร้างชุดทดสอบจึงต้องมีความแข็งแรง ทนทาน และอุปกรณ์ต้องไม่เกิดสนิม เพราะต้องสัมผัสกับแสงแดด ฝนตก ซึ่งมีผลต่อการติดตั้งวัสดุทดสอบได้ การสร้างชุดทดสอบนี้ประกอบด้วย

1) ฐานหลักติดตั้งวัสดุทดสอบ

แบบร่างชุดทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ จะใช้เหล็กทอสี่เหลี่ยมขนาดท่อ 3×3 cm หนา 1 cm สูง 3 m จำนวน 2 ชั้นเป็นฐาน และยาว 2 m จำนวน 1 ชั้นเป็นคานสำหรับติดตั้งวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยด้านล่างของโครงเหล็กนี้จะมีฐาน

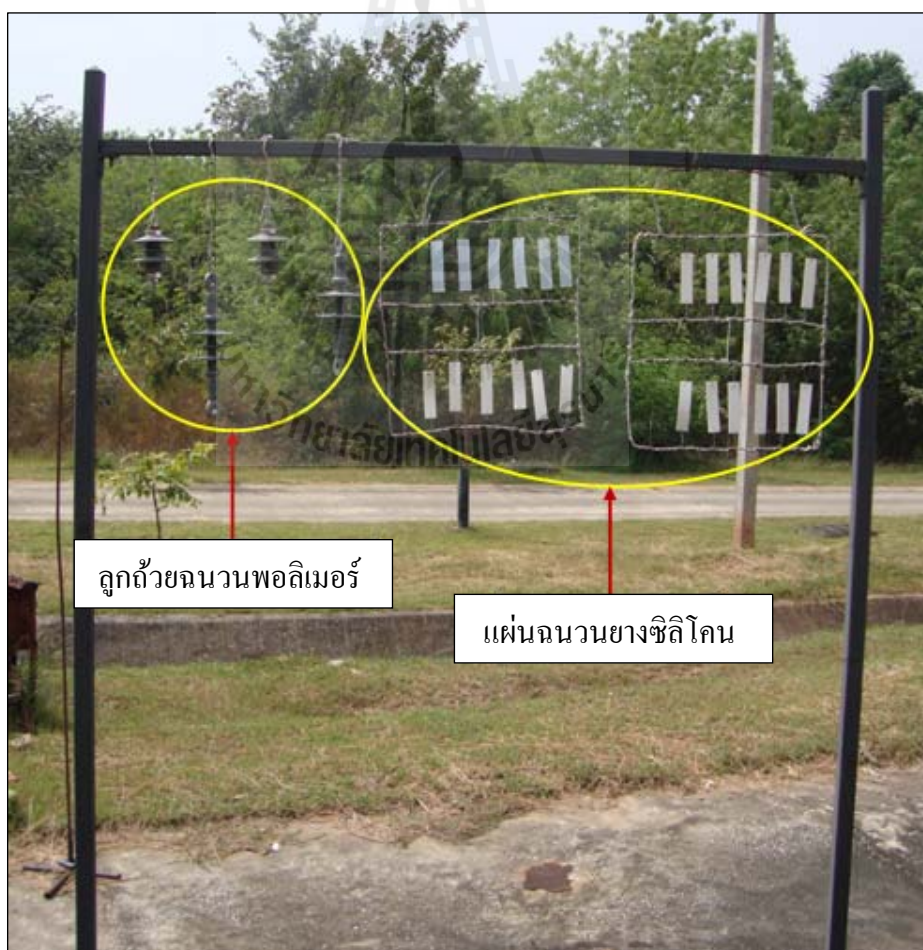
สี่เหลี่ยมสำหรับยึดตัวโครงเหล็กกับพื้นปูนด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อสร้างชุดทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติเสร็จแล้ว วัสดุจะถูกแขวนไว้บนคานเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.19 แบบร่างชุดทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ



รูปที่ 4.20 ฐานสี่เหลี่ยมสำหรับยึดตัว โครงเหล็กกับพื้นปูน



รูปที่ 4.21 ชุดทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติที่สร้างเสร็จ

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ ได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์ ซึ่งวิธีนี้จะรวมถึงการพัฒนาโปรแกรมที่ประยุกต์จากโปรแกรม Lab VIEW เพื่อใช้วัดกระแสรั่วตามผิวและคำนวณค่าประจุไฟฟ้าจากกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยางซิลิโคนด้วย และอีกชุดการทดสอบหนึ่งคือ การทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ชุดการทดสอบทั้งสองแบบถูกสร้างขึ้นและสามารถทดสอบได้จริง และหลังจากที่ได้สร้างชุดทดสอบดังกล่าวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมวัสดุทดสอบและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดสอบ โดยจะอธิบายรายละเอียดในบทที่ 5



บทที่ 5

การทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

5.1 กล่าวนำ

การทดสอบในงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน 2 ลักษณะด้วยกันคือ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนและลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งแผ่นยางซิลิโคนจะมีปริมาณสารตัวเติมที่แตกต่างกัน สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะมีโครงสร้างทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั และการทดสอบเสื่อมอายุของยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั (ทดสอบในห้องทดสอบ) เป็นการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ซึ่งการทดสอบนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 เพื่อเป็นการจำลองสภาวะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานจริงใกล้บริเวณชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่มีความเปราะเปื้อน ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมากต่ออายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยทดสอบภายในห้องทดสอบพร้อมทั้งจ่ายหมอกไอเกลือเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวันและป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตลอดการทดสอบ หลังจากทดสอบ วัสดุทดสอบจะถูกนำไปศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุ สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ทำได้โดยการนำฉนวนยางซิลิโคนไปแขวนไว้กลางแจ้งตลอดระยะเวลา 2 ปี โดยไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบจากแสงแดดและสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ โดยรายละเอียดการเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบและการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

5.2 การเตรียมวัสดุทดสอบ

การเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภทการทดสอบ คือ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั และการทดสอบเสื่อมอายุของยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

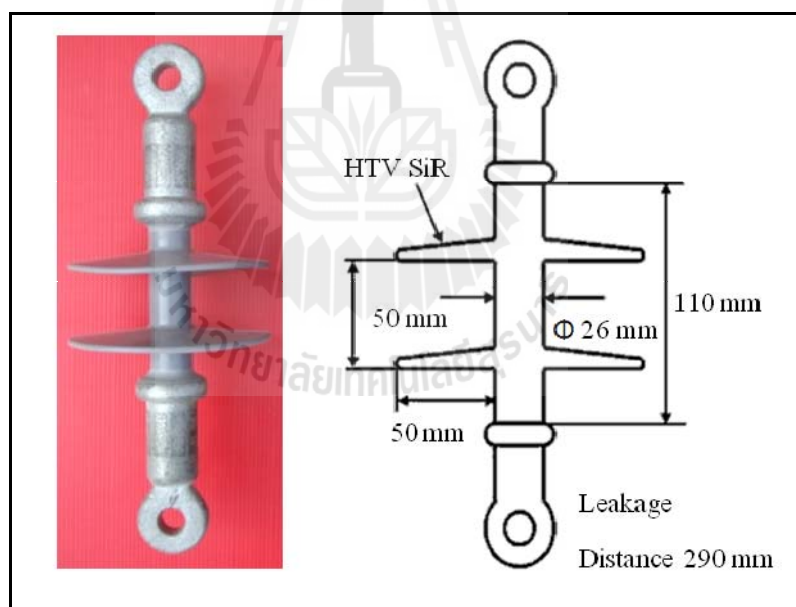
5.2.1 การทดสอบแรงเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์

วัสดุทดสอบที่ใช้ทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

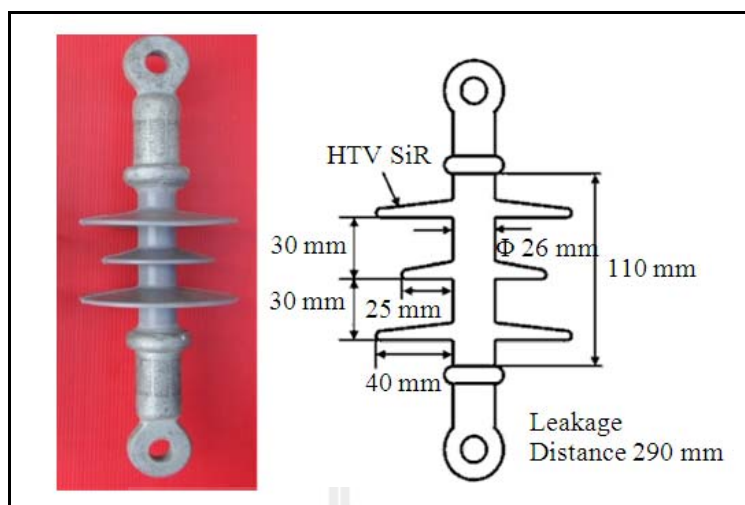
1) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นฉนวนยางซิลิโคนที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Vulcanizing: HTV) มี 4 แบบ ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรง แบบปีกสลับ แบบปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง และแบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน

ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรงและแบบปีกสลับ ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนทั้งสองประเภทนี้ จะมีระยะที่สั้นที่สุดระหว่างอเล็กโทรดหรือเรียกว่า ระยะรั่ว (Leakage Distance) ตามผิวเท่ากันคือ 290 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำตัวเท่ากันคือ 26 mm แต่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้งสองแตกต่างกันที่มีขนาดและจำนวนของปีกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2

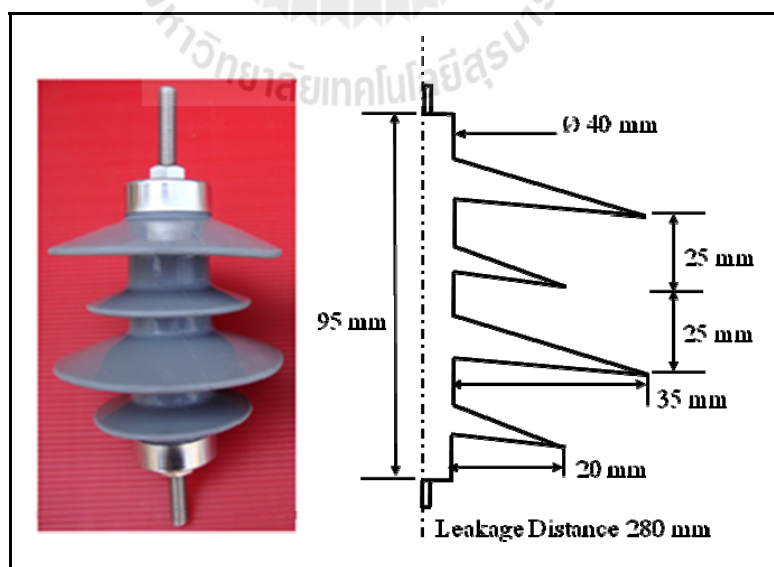


รูปที่ 5.1 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรง

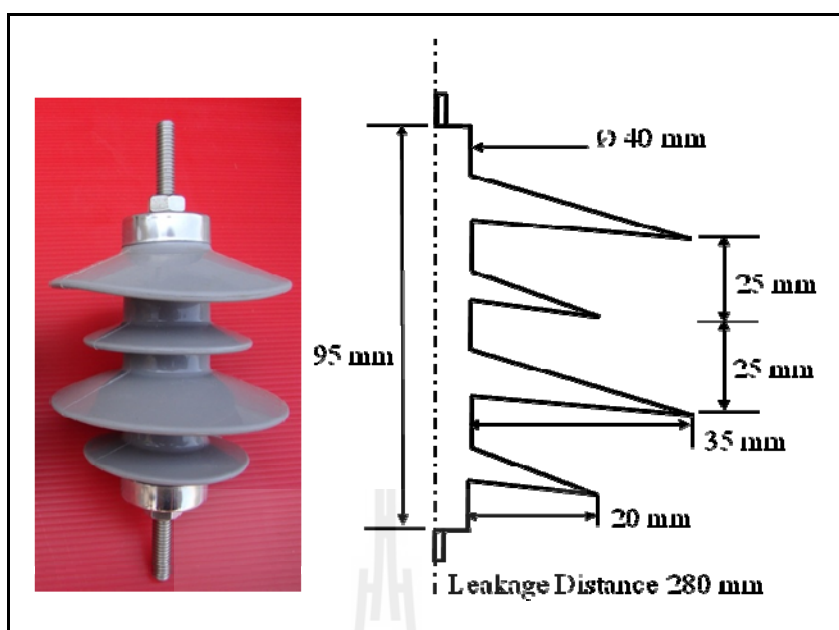


รูปที่ 5.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลั

ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลั-เอียงชนิดแข็ง และแบบปีกสลั-เอียงชนิดอ่อน จะมีระยะรั้วตามผิวเท่ากันคือ 280 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำตัวเท่ากันคือ 40 mm ลักษณะรูปร่างของปีกจะมีปีกใหญ่สลักับเล็กเหมือนกัน แต่แตกต่างกันทางกายภาพคือ ความแข็งและอ่อนของฉนวนยางซิลิโคน ลักษณะโครงสร้างและขนาดของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลั-เอียงชนิดแข็ง



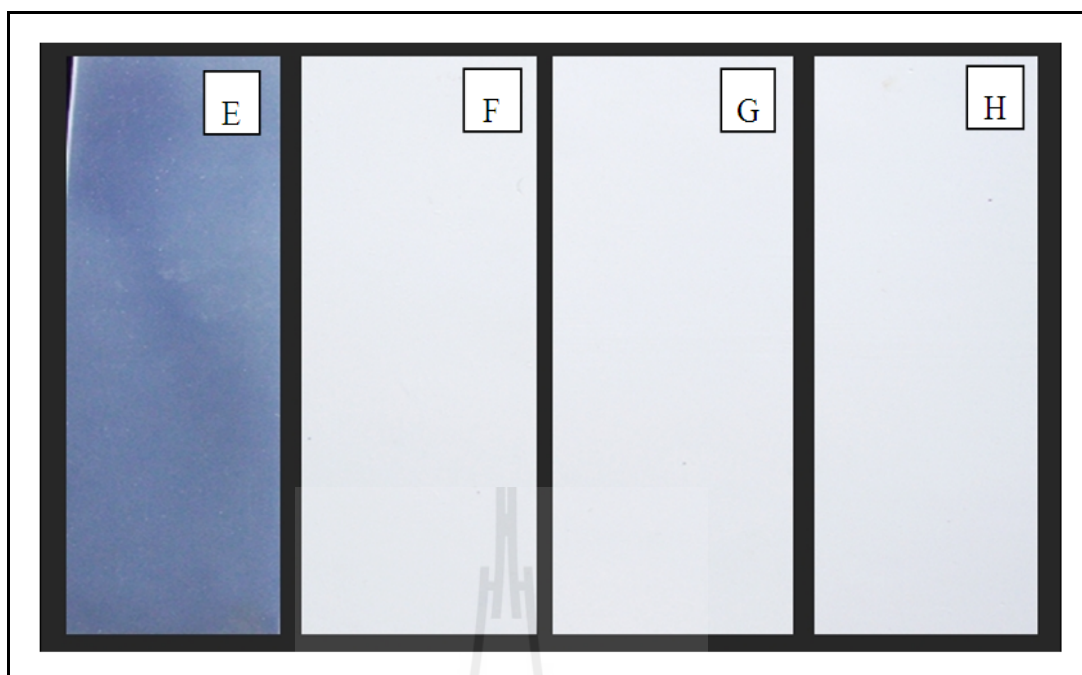
รูปที่ 5.4 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน

2) แผ่นฉนวนยางซิลิโคน

แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทดสอบเป็นฉนวนยางซิลิโคนที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยแผ่นยางซิลิโคนจะมีการทรีตเมนต์ด้วยไอซิลิกา (Silica Fume) และมีปริมาณสารตัวเติม (ATH: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ที่แตกต่างกัน ซึ่งปริมาณสารตัวเติมในแผ่นยางซิลิโคนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบโดยน้ำหนัก (% weight หรือ % wt) สามารถแบ่งได้เป็น ชนิด E (0 % wt) ชนิด F (50 % wt) ชนิด G (100 % wt) และชนิด H (150 % wt) รายละเอียดของแผ่นยางซิลิโคนดังแสดงในตารางที่ 5.1 และลักษณะของแผ่นยางซิลิโคนดังแสดงในรูปที่ 5.5

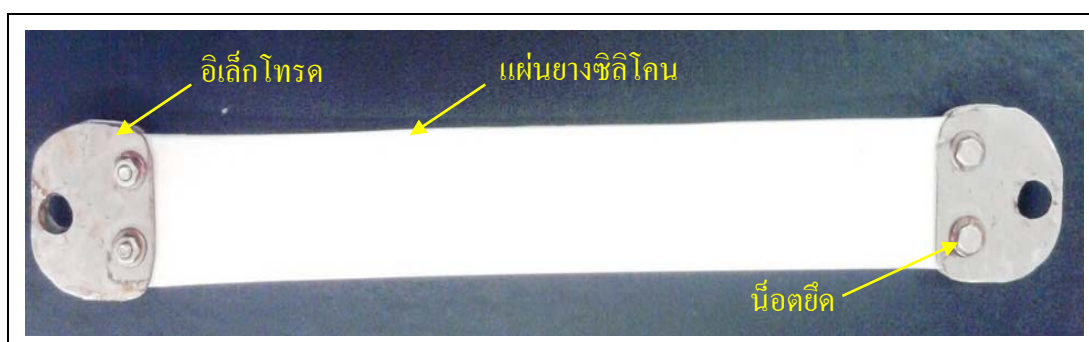
ตารางที่ 5.1 ลักษณะของฉนวนยางซิลิโคนแบบ HTV ที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของฉนวนยางซิลิโคน	การทรีตเมนต์ผิวด้วยไอซิลิกา	ปริมาณ ATH (%wt)
E	✓	0
F	✓	50
G	✓	100
H	✓	150



รูปที่ 5.5 แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทดสอบมีความหนา 2 mm และตัดให้มีขนาด 3×20 cm ที่ปลายทั้งสองด้านของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนถูกยึดด้วยอเล็กโทรด ซึ่งทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันสนิม และเจาะรูฝั่งละสองรู สำหรับใส่น็อตเพื่อยึดระหว่างอเล็กโทรดกับแผ่นฉนวนยางซิลิโคนติดกันดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ลักษณะการยึดอเล็กโทรดกับแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

5.2.2 การทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

วัสดุทดสอบเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์ นั่นคือ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

1) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

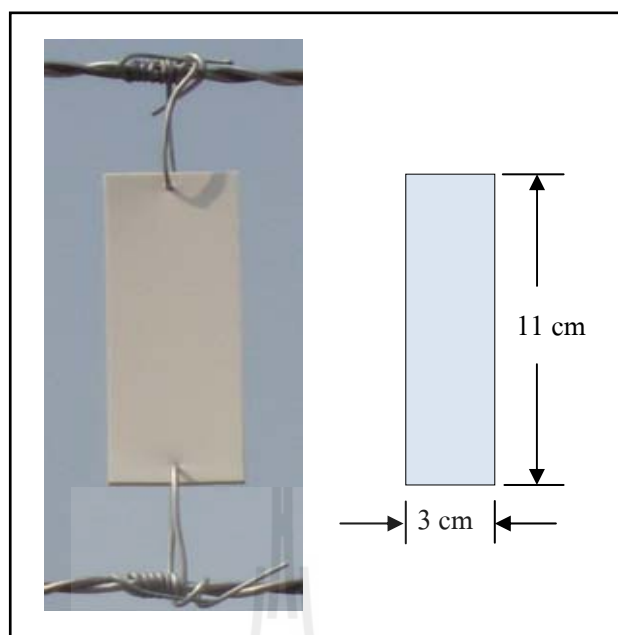
ประเภทและลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบ สามารถดูได้จากหัวข้อ 5.2.1 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะใช้ลวดอะลูมิเนียมยึดไว้กับคานเหล็กติดตั้งวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

2) แผ่นฉนวนยางซิลิโคน

แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทดสอบ สามารถดูได้จากหัวข้อ 5.2.1 แต่แผ่นยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้จะมีขนาด 3×11 cm และหนา 2 mm เจาะรูที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อใช้ลวดอะลูมิเนียมร้อยและยึดไว้กับโครงเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 การติดตั้งแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

5.3 การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์ จะทดสอบภายใต้มาตรฐาน IEC 61109-1992 เป็นการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โดยจำลองสภาวะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้งานจริงบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่มีความเปรอะเปื้อนสูง ๆ เมื่อนำวัสดุทดสอบไปติดตั้งภายในห้องทดสอบแล้ว ด้านล่างของวัสดุทดสอบจะถูกเชื่อมต่อกับสายไฟสำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ ส่วนด้านบนของวัสดุทดสอบจะเชื่อมต่อกับสายวัดสัญญาณกระแสรั่วไปยังวงจรวัดที่อยู่ด้านนอกห้องทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบในเวลา 1000 ชั่วโมง วัสดุทดสอบจะถูกป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับ 15 kV ตลอดการทดสอบ จำหน่ายหมอกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และหยุดจำหน่ายหมอกเป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน (ใน 24 ชั่วโมง) ซึ่งจำหน่ายหมอกไอเกลือโดยใช้อัลตราโซนิก ฮิวมิดิไฟเออร์ ซึ่งมีขนาดของละอองน้ำอยู่ที่ $7\ \mu\text{m}$ ทำการฉีดพ่นเข้าไปในห้องทดสอบ สำหรับการเติมน้ำเกลือในถังใส่น้ำเกลือแต่ละครั้งควรหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้าก่อนเพื่อความปลอดภัยและการหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้าในแต่ละครั้งควรใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที สภาวะการทดสอบและวงจรการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 ตามลำดับ

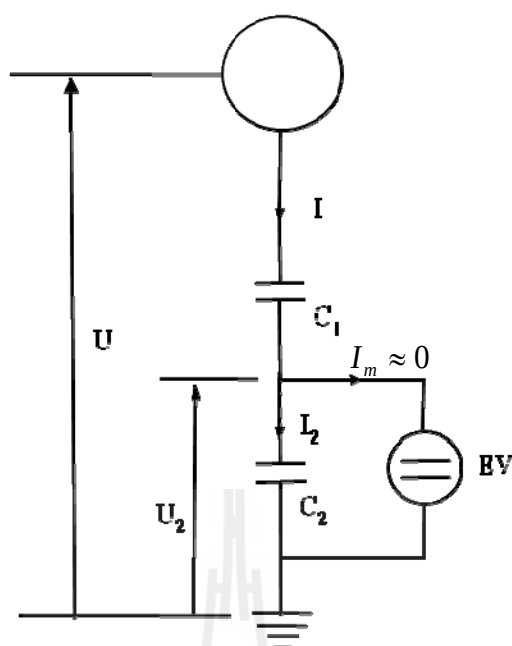
ตารางที่ 5.2 สภาพการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประติษฐ์ที่ทดสอบจริง

ห้องทดสอบ (Test Chamber)	4 m ³
แรงดันทดสอบ (Test Voltage)	AC 15 kV (ป้องกันลัดวงจรทดสอบ)
ความคงทนแรงดัน (Voltage Stress)	ใช้ตามข้อจำกัดของระยะห่างตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่ 20 mm/kV
หมอกไอเกลือ	ใช้อัตราโซนิค ฮิวมิดิไฟเออร์ มีขนาดหมอกไอเกลือ อยู่ที่ 7 μm มีอัตราการไหลของน้ำเกลือ 0.5 l/hr/m ³
รอบการทดสอบ (1000 ชั่วโมง)	จ่ายหมอกไอเกลือ 8 ชั่วโมง และหยุดจ่ายหมอกไอเกลือ 16 ชั่วโมง
อุณหภูมิ	อุณหภูมิของห้องทดสอบ
ระยะเวลาการทดสอบ	1000 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.3 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประติษฐ์ (24 ชั่วโมง)

รอบการทดสอบ (ชั่วโมง)	0-8			8-24					
ป้อนแรงดันทดสอบ									
จ่ายหมอกไอเกลือ									
วัดกระแสรั่วตามผิว									

ก่อนการป้อนแรงดันทดสอบต้องทำการทดสอบปรับเทียบหม้อแปลงทดสอบเสียก่อน เพื่อความถูกต้อง การปรับเทียบหม้อแปลงทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐาน โดยเครื่องมือดังกล่าวจะทำให้ทราบค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการปรับคูณค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบ การป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจะใช้ วาไรแอค (Variac) เป็นตัวปรับและป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบทางด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ ส่วนด้านทุติยภูมิหรือด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจ่ายให้วัสดุทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกจ่ายออกไปสามารถวัดได้ด้วยชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



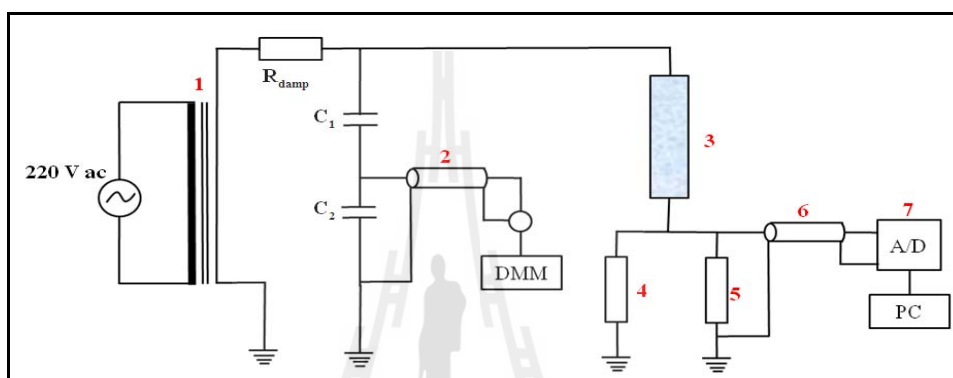
รูปที่ 5.9 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547)

จากรูปที่ 5.9 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุประกอบด้วย ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (C_1) และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ (C_2) โดยหลักการแล้ว กระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องวัด I_m นั้น ต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ หรือ $I_m \approx 0$ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากัน การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ สามารถทำได้จากสมการ ดังนี้

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (5.1)$$

โดย C_1 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง มีขนาด 210 pF
 C_2 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 110 nF
 U คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)
 U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

จากสมการที่ 5.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (U) จะถูกแบ่งให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (U_2) ดังนั้น การกำหนดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับวัสดุทดสอบ สามารถกำหนดได้จากการปรับค่าที่แรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำตามที่ทำการคำนวณโดยวิธีการแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุได้ จากนั้นนำมาปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีความเที่ยงตรงขึ้น จากค่าปรับจนที่ได้จากเครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐาน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ถูกต้อง สำหรับวงจรการทดสอบเรงการเสื่อมอายุแสดงในรูปที่ 5.10 และตำแหน่งต่าง ๆ สามารถอธิบายดังแสดงในตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.10 วงจรการทดสอบเรงการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งต่าง ๆ บนวงจรการทดสอบเรงการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือประคิษฐ์

ตำแหน่ง	ความหมาย
1	หม้อแปลงทดสอบแบบแปลงเป็นแรงดันสูง
2	สายวัดสัญญาณแบบแกนร่วมสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ
3	วัสดุทดสอบ
4	วารีเตอร์สำหรับป้องกันอุปกรณ์วัดเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสเกิน
5	ตัวต้านทาน (R_{sh}) สำหรับป้องกันกระแสเกินที่จะไหลเข้าสู่อุปกรณ์การวัด
6	สายวัดสัญญาณแบบแกนร่วมสำหรับวัดกระแสรั่ว
7	A/D บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณจากอนุาล็อกสู่ดิจิตอล
R_{damp}	ตัวต้านทานจำกัดกระแส
C_1	ตัวเก็บประจุด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
C_2	ตัวเก็บประจุด้านแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ
DMM	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ

สำหรับการวัดค่ากระแสรั่วจะวัดและบันทึกตลอดการทดสอบ 1000 ชั่วโมง แผนภาพวงจรการวัดกระแสรั่วและหลักการทำงานของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับวัดกระแสรั่ว (สามารถดูได้ในหัวข้อการออกแบบและประยุกต์ใช้โปรแกรม Lab VIEW ในบทที่ 4) ค่ากระแสรั่วที่วัดได้จะผ่านการอินทิเกรตเทียบกับเวลา เมื่อกระแสที่ผ่านการอินทิเกรตเทียบกับเวลาแล้ว ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าสะสม (Cumulative Charge) ของแต่ละวินาทีนั้น ๆ และทำการบันทึกทุก ๆ 1 นาที จากนั้นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่ได้ จะถูกนำไปพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม MAT LAB โดยนำค่าประจุไฟฟ้าสะสมในแต่ละวินาทีไปบวกกันตั้งแต่วินาทีแรกจนถึงสุดท้าย จากนั้นผลลัพธ์ดังกล่าวถูกนำไปพล็อตกราฟเป็นประจุไฟฟ้าสะสมทั้งหมด เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุต่อไป

หลังจากทดสอบครบ 1000 ชั่วโมง วัสดุทดสอบทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีเพื่อตรวจสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบกับฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ โดยการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีจะกล่าวในบทถัดไป

5.4 การทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การทดสอบเสื่อมอายุของยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปแขวนไว้บริเวณกลางแจ้งแบบไม่มีการป้องกันแรงดันไฟฟ้า โดยติดตั้งวัสดุทดสอบให้พื้นผิวสัมผัสตามแนวของแสงแดด คือแนวระหว่างทิศตะวันออกและทิศตะวันตก เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่สัมผัสแสงแดดทั้งสองด้าน วัสดุทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์ทุก ๆ 3 เดือน (เฉพาะแผ่นยางซิลิโคน) สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะวิเคราะห์ครั้งเดียวเมื่อทดสอบครบ 2 ปี วัสดุทดสอบทั้งหมด จะถูกวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีด้วยวิธีเดียวกับการวิเคราะห์วัสดุทดสอบที่ทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติษฐ์ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบกับฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ ช่วงเวลาการนำแผ่นยางซิลิโคนไปวิเคราะห์การเสื่อมอายุจะทำทุก ๆ 3 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ช่วงเวลาการนำแผ่นฉนวนยางซิลิโคนไปวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุ

วิเคราะห์ผล (ครั้งที่)	เวลา (เดือน)						
	6	9	12	15	18	21	24
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ ได้กล่าวถึงรายละเอียดการเตรียมการทดสอบและการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ด้วยการทดสอบทั้งสองวิธี ได้แก่ การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์ที่ 1000 ชั่วโมงและการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติเป็นเวลา 2 ปี โดยการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์ จะทดสอบตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นฉนวนยางซิลิโคนที่ขึ้นรูปเป็นฉนวนโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแบบแผ่นฉนวนยางซิลิโคน หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นลง วัสดุทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุทั้งทางกายภาพและทางเคมี การวิเคราะห์วัสดุทดสอบนี้สามารถอธิบายได้ในบทถัดไป

บทที่ 6

การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ

6.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 5 ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนทั้งชนิดที่เป็นแผ่นฉนวนยางซิลิโคนและลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อนำข้อมูลและผลจากการทดสอบไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ การวิเคราะห์ผลหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนมีด้วยกันหลายวิธี เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย การวิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคนด้วยสายตา การวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยาบน้ำลื่น การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบความแข็ง การทดสอบความขรุขระ การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวและการแปลงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ หลักการและผลการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

การวิเคราะห์ทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคน สามารถทำได้หลายวิธีเพื่อตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิวของยางซิลิโคน การวิเคราะห์ทางกายภาพสามารถทำได้ทั้งในระหว่างการทดสอบและหลังการทดสอบ โดยการสังเกตด้วยสายตาหรืออาจใช้เครื่องมือเข้าช่วยเพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2.1 การสังเกตฉนวนยางซิลิโคนด้วยสายตา

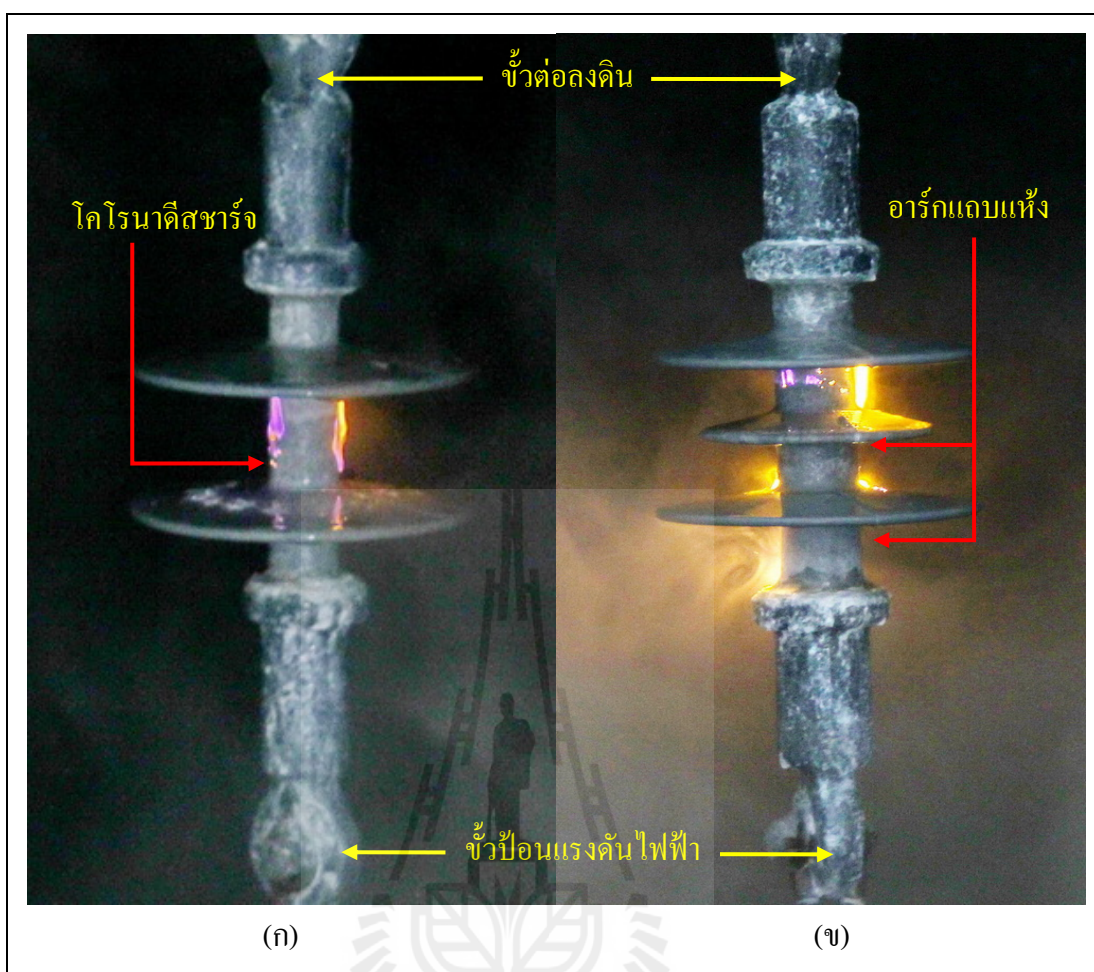
การสังเกตด้วยสายตา เป็นวิธีการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของยางซิลิโคนโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า ทั้งในระหว่างการทดสอบและหลังจากการทดสอบ ซึ่งในระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นยางซิลิโคนได้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จสังเกตได้จากแสงสีม่วง ส่วนอาร์กแถบแห้งจะปรากฏเป็นแสงสีเหลือง

- การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

กรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงและปีกสลับ แสดงในรูปที่ 6.1 (ก) และรูปที่ 6.1 (ข) ตามลำดับ ซึ่งระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 1000 ชั่วโมง พบว่า มีแสงสีม่วงที่เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จและแสงสีเหลืองจากอาร์กแถบแห้งขึ้นบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งสอง โดยระหว่างการทดสอบในช่วงแรก (ภายใน 24 ชั่วโมงแรก) จะเกิดไม่รุนแรงและไม่บ่อยมากนัก แต่เมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นลูกถ้วยฉนวนจะเริ่มเสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้ทั้งโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งเกิดบ่อยครั้งและมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวมักเกิดบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนมากกว่าบริเวณปีก

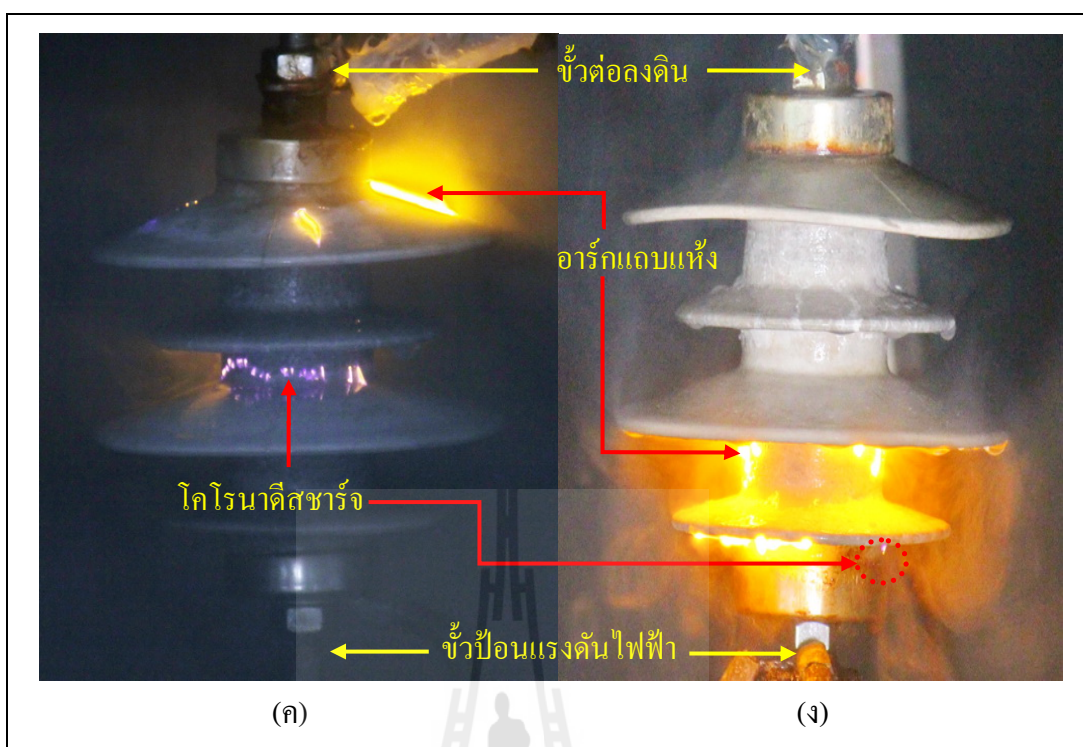
กรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียงชนิดแข็งและชนิดอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 (ค) และรูปที่ 6.1 (ง) ตามลำดับ ในระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ 1000 ชั่วโมง พบว่า เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรงและแบบปีกสลับ แต่โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียง พบได้ทั้งบนลำตัวและปีกของลูกถ้วยฉนวนทั้งสอง โดยจะเกิดบ่อย รุนแรงและมีขนาดใหญ่เรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น

กรณีการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยพอลิเมอร์ทั้ง 4 แบบนั้น ส่วนใหญ่เกิดในช่วงเวลาที่ทำการจ่ายหมอกไอเกลือ ซึ่งในช่วงแรกของการทดสอบลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อช่วงระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทดสอบเริ่มมีการเสื่อมสภาพลงประกอบกับอยู่ในสภาวะที่เปียกชื้นจากหมอกไอเกลือ สาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การเกิดอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จที่ปรากฏชัดเจนและบ่อยขึ้น รวมทั้งมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย สำหรับช่วงเวลาที่ไม่ได้จ่ายหมอกไอเกลือ พบว่า เกิดอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จเช่นกัน แต่จำนวนครั้งการเกิดจะน้อยกว่า



(ก) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง (ข) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ

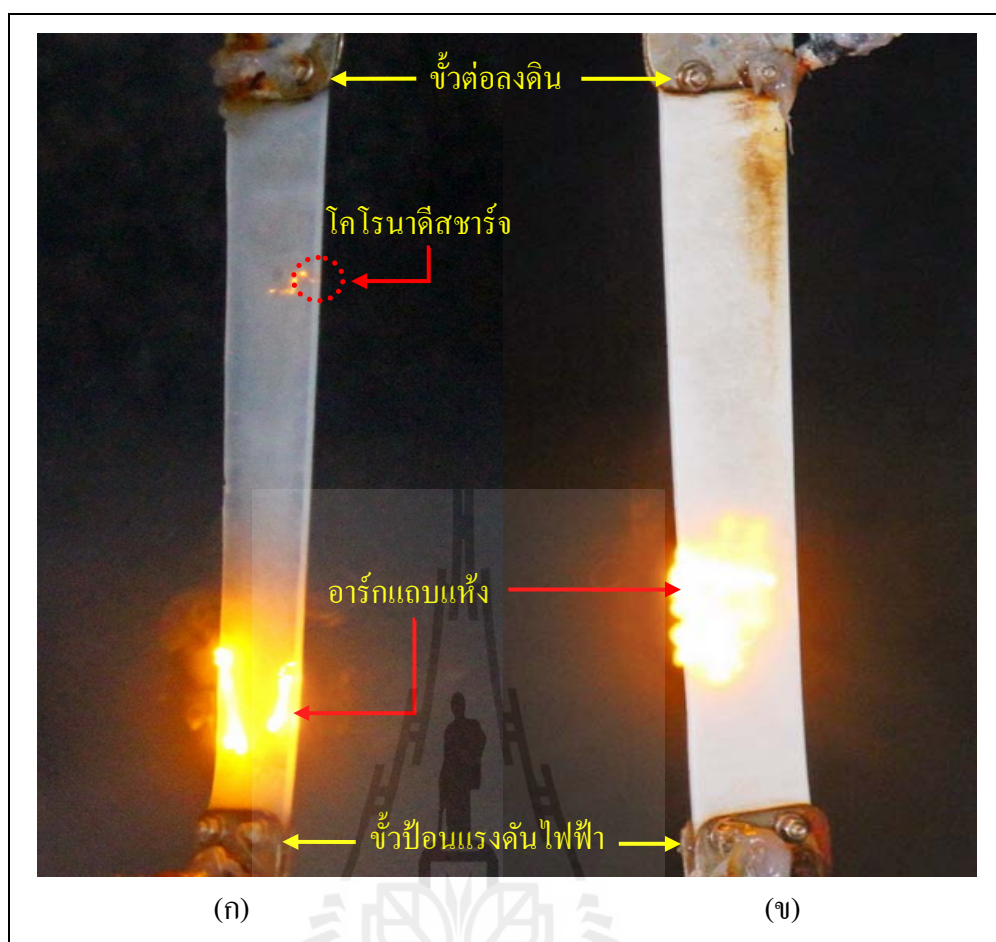
รูปที่ 6.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



(ข) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน (ง) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง

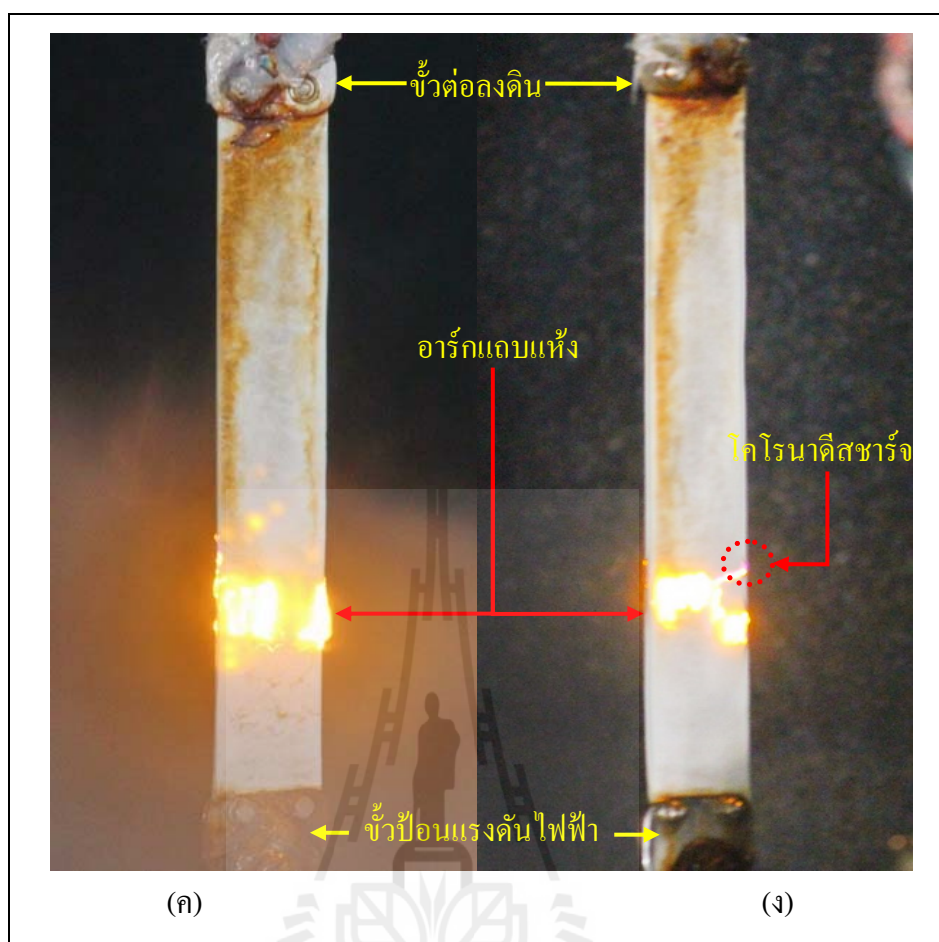
รูปที่ 6.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (ต่อ)

กรณีการทดสอบเร่งเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิดฐ์ที่ 1000 ชั่วโมง ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด พบว่า ปรากฏแสงสีม่วงที่เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จ แต่ไม่ชัดเจนมากนักและมีแสงสีเหลืองที่เกิดจากอาร์กแถบแห้งบนผิวฉนวนเหมือนกันทั้ง 4 ชนิด นั่นคือ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E ชนิด F ชนิด G และชนิด H ดังแสดงในรูปที่ 6.2 (ก) รูปที่ 6.2 (ข) รูปที่ 6.2 (ค) และรูปที่ 6.2 (ง) ตามลำดับ โดยในระยะแรก ๆ จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและเกิดในช่วงเวลาที่จ่ายหมอกไอเกลือเช่นเดียวกับกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จากนั้นจะปรากฏชัดเจนและบ่อยขึ้นเมื่อเวลาการทดสอบนานขึ้น รวมทั้งมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ส่วนช่วงเวลาที่ไม่มีกรจ่ายหมอกไอเกลือ โคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งจะเกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับจุดที่เกิดบ่อยที่สุดส่วนใหญ่เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและมีสภาวะที่เปียกชื้นจากหมอกไอเกลือ



(ก) ฉนวนยางซิลิโคนชนิด E (ข) ฉนวนยางซิลิโคนชนิด F

รูปที่ 6.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน



(ค) ฉนวนยางซิลิโคนชนิด G (ง) ฉนวนยางซิลิโคนชนิด H

รูปที่ 6.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน (ต่อ)

หลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัที่ 1000 ชั่วโมง ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิว เนื่องจากผลของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้ง อาจทำให้วัสดุทดสอบดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยถูกตรวจสอบบริเวณพื้นผิวทั้งก่อนล่างและหลังล่างคราบเกลือ รวมทั้งสิ่งสกปรกออก ลักษณะพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์หลังจากการทดสอบดังแสดงรูปที่ 6.3 ถึงรูปที่ 6.6 สำหรับแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 6.7

รูปที่ 6.3 แสดงลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังจากการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง หลังจากทดสอบพบว่า มีคราบเกลือที่เกิดจากหมอกไอเกลือเกาะอยู่บนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน นอกจากคราบเกลือแล้วยังมีฝุ่นผงสีขาวที่เกิดจากการกัดกร่อนบนพื้นผิวฉนวนอีกด้วย คราบดังกล่าวมีลักษณะเป็นคราบสีขาวสามารถสังเกตได้จาก

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ก่อนล้างทำความสะอาดและหลังล้างทำความสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (ก)

ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ร่องรอยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฉนวนจะเกิดจากอาร์กแฉกแห้งและดีสารจทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน นอกจากเกิดการกัดกร่อนแล้ว ยังเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟด้วย ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกแนวยาวบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนและเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟ ส่วนใหญ่ปรากฏชัดเจนบนลำตัวมากกว่าบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (ข) และรูปที่ 6.3 (ค)



(ก) ลักษณะลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังการทดสอบ

รูปที่ 6.3 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ



ก่อนล้างทำความสะอาด



หลังล้างทำความสะอาด

(ข) ลักษณะการกัดกร่อนบริเวณใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.3 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

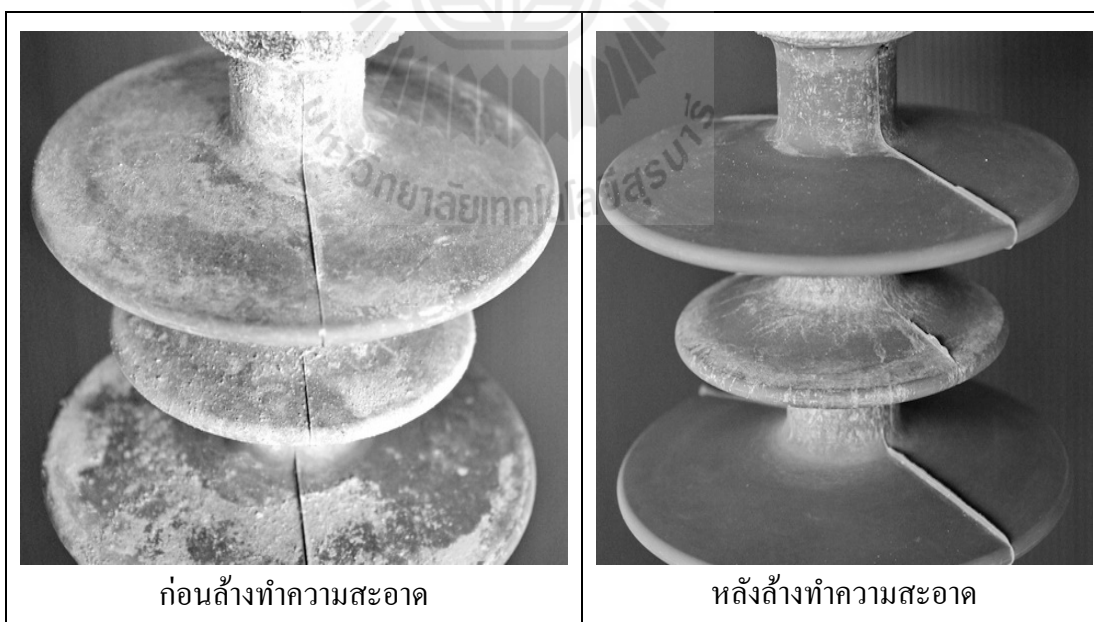


(ค) การกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟบนผิวบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.3 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

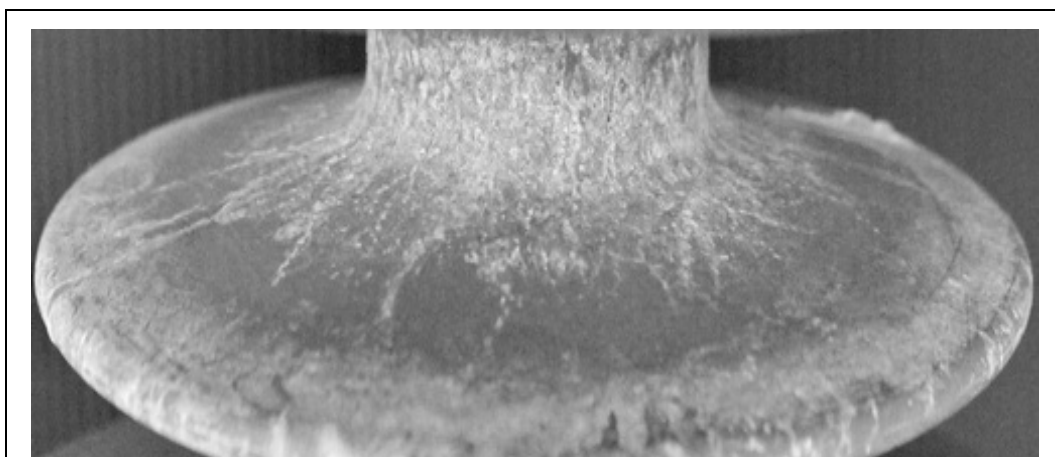
รูปที่ 6.4 แสดงลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังจากการทดสอบด้วยวิธีหมอก ไอเกลือประดิษฐ์เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง หลังจากทดสอบพบว่า มีคราบเกลือที่เกิดจากหมอก ไอเกลือและมีฝุ่นผงสีขาวที่เกิดจากการกัดกร่อนเกาะอยู่บนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนเช่นเดียวกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง ดังแสดงในรูปที่ 6.4 (ก) ซึ่งการกัดกร่อนดังกล่าวมาจากการดีสชาร์จ หรือวาวไฟตามผิว เนื่องจากอยู่ในสภาวะเปียกและต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อยู่ตลอดเวลาการทดสอบ

หลังจากล้างทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เมื่อนำมาวิเคราะห์พบว่า เกิดการกัดกร่อนและเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ บริเวณที่ชัดเจนที่สุดจะเป็นส่วนลำตัวและ บริเวณของปีกเล็กตรงกลางของลูกถ้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 6.4 (ข) รูปที่ 6.4 (ค) นอกจากนี้ยังพบว่า บริเวณลำตัวระหว่างปีกเล็กและปีกใหญ่ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ ถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรงเมื่อเทียบกับบริเวณลำตัวด้านบน (ด้านข้างต่อลงดิน) ทั้งนี้อาจเนื่องจากลำตัว บริเวณตรงกลางมีความเครียดสนามไฟฟ้ามากกว่า ซึ่งผลของความเครียดสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิด ดีสชาร์จหรือวาวไฟบ่อยและรุนแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดความเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่น ๆ สำหรับในส่วนด้านล่าง (ด้านข้างป้อนแรงดันไฟฟ้า) พบว่า เกิดการกัดกร่อนเป็นร่องลึก ดังแสดงใน รูปที่ 6.4 (ง)

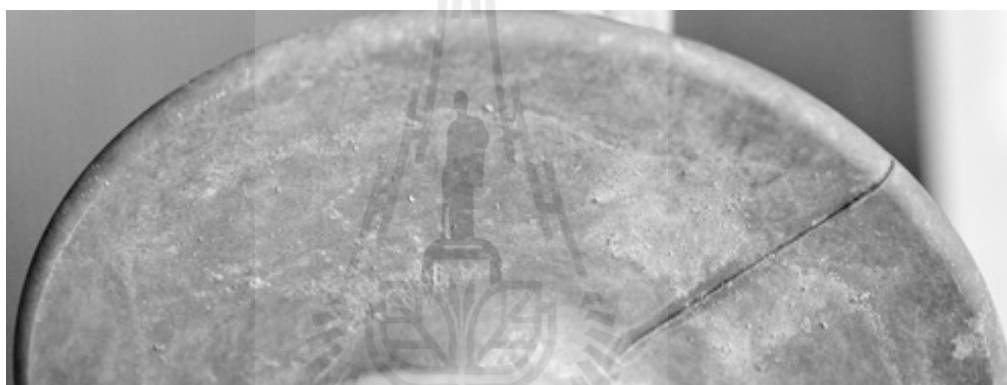


(ก) ลักษณะลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังการทดสอบ

รูปที่ 6.4 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ



(ข) การกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้าบริเวณปีกกลางของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



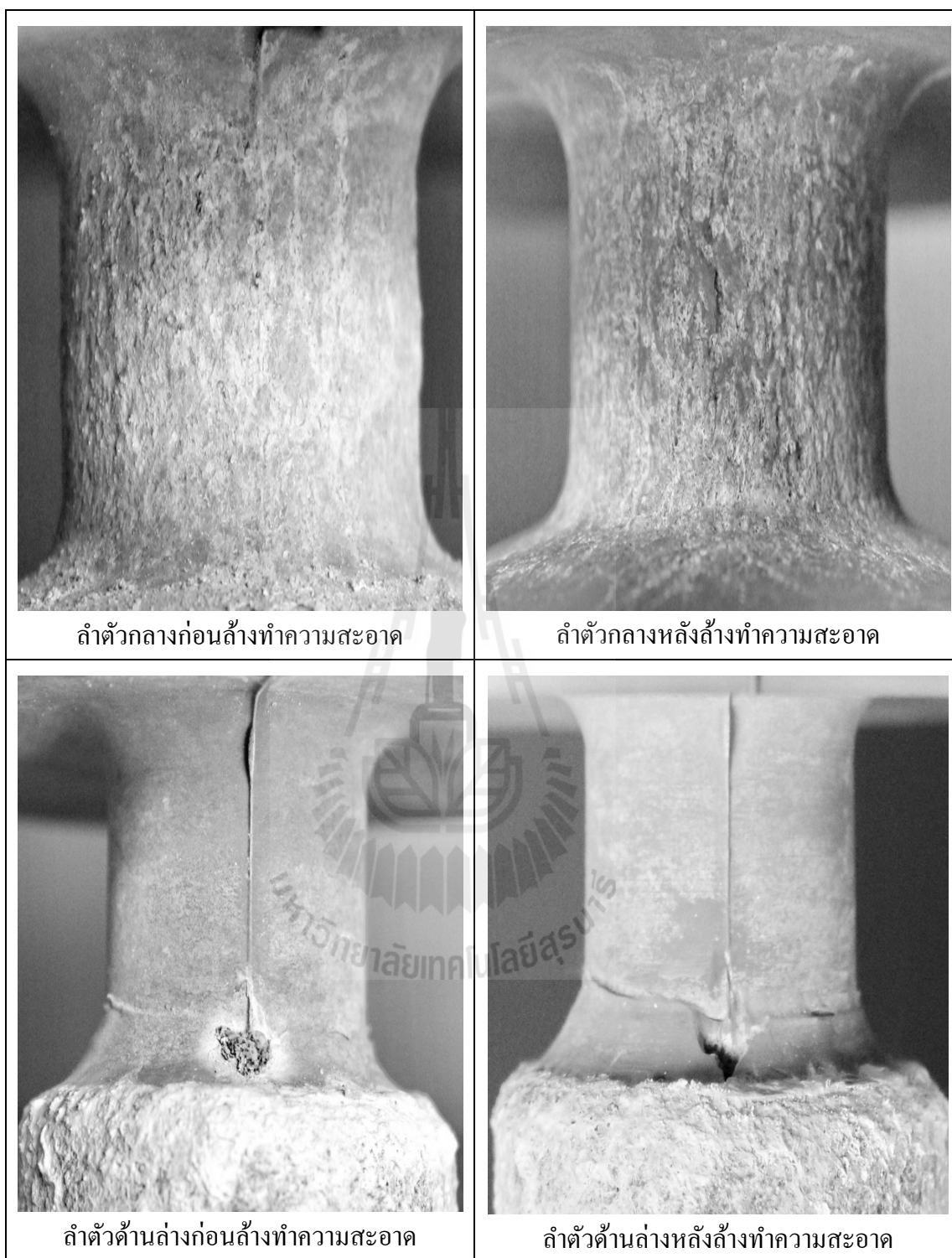
ก่อนล้างทำความสะอาด



หลังล้างทำความสะอาด

(ค) การกัดกร่อนบริเวณใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

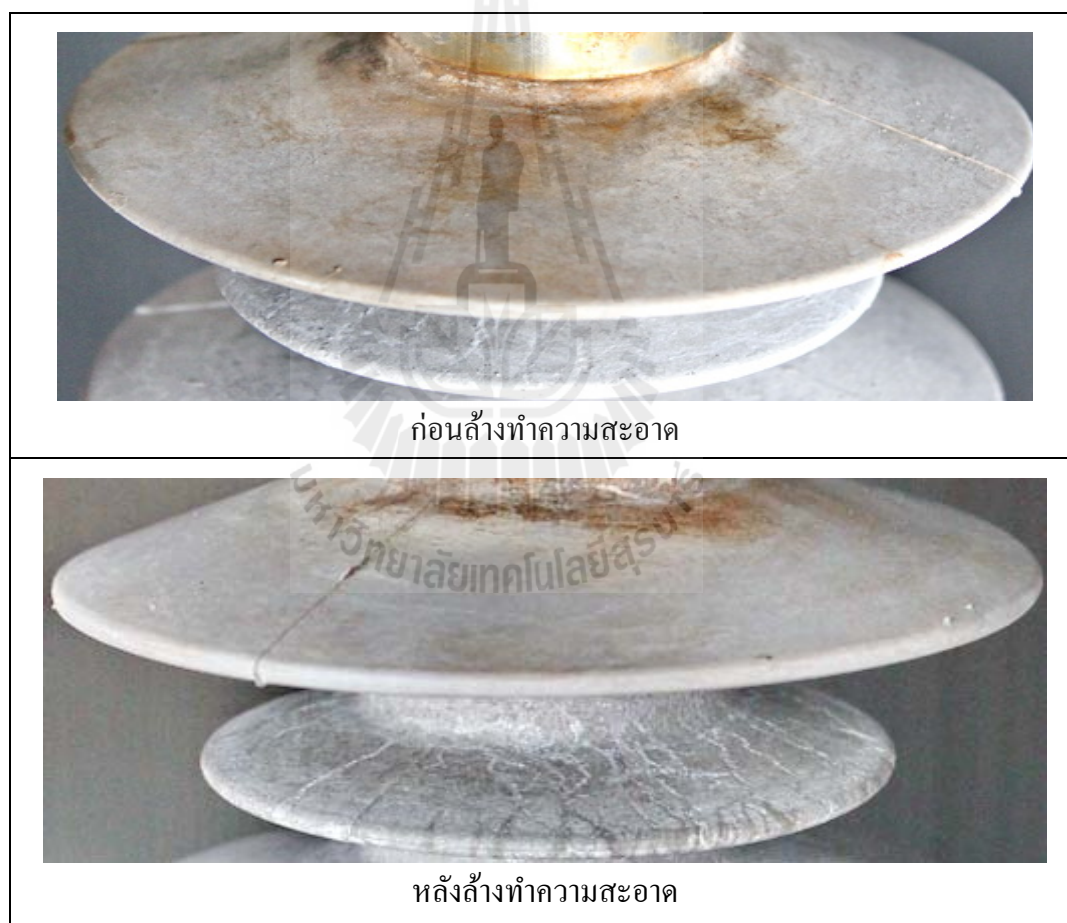
รูปที่ 6.4 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



(ง) การกัดกร่อนเป็นร่องลึกบนผิวบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.4 พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกลับหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

รูปที่ 6.5 แสดงลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังจากการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติฐ์เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง โดยส่วนใหญ่จะพบคราบเกลือที่เกิดจากหมอกไอเกลือและมีฝุ่นผงสีขาวที่เกิดจากการกัดกร่อนเกาะอยู่บนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เช่นเดียวกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เมื่อสังเกตที่พื้นผิวพบว่า เกิดความเสื่อมสภาพเมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนก่อนการทดสอบ เมื่อนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ล้างทำความสะอาดจะเห็นร่องรอยบนผิวชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะบริเวณลำตัวและปีกเล็กตรงกลางระหว่างปีกใหญ่ ซึ่งเกิดความเสื่อมสภาพมากเนื่องจากการดิสซาร์จและอาร์กแถบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก) และ 6.5 (ข) สำหรับพื้นผิวบริเวณปีกใหญ่ของลูกถ้วยฉนวนพบการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ค)



(ก) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.5 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังการทดสอบหมอกไอเกลือ



(ข) การกักร้อนบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



(ค) การกักร้อนบริเวณปีกใหญ่ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.5 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

รูปที่ 6.6 แสดงลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบความเสียหาย พบว่า ลักษณะความเสียหายไม่แตกต่างจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนมากนัก โดยพบการกักร้อนบริเวณลำตัวและบนปีกเล็กตรงกลางระหว่างปีกใหญ่เช่นเดียวกัน สำหรับปีกเล็กด้านล่างสุด

(ใกล้ชั่วป้อนแรงดันไฟฟ้า) พบว่า เกิดการกักตร้อนมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกลับ-เอียงชนิดอ่อนเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 6.6 (ก) รูปที่ 6.6 (ข) และรูปที่ 6.6 (ค)

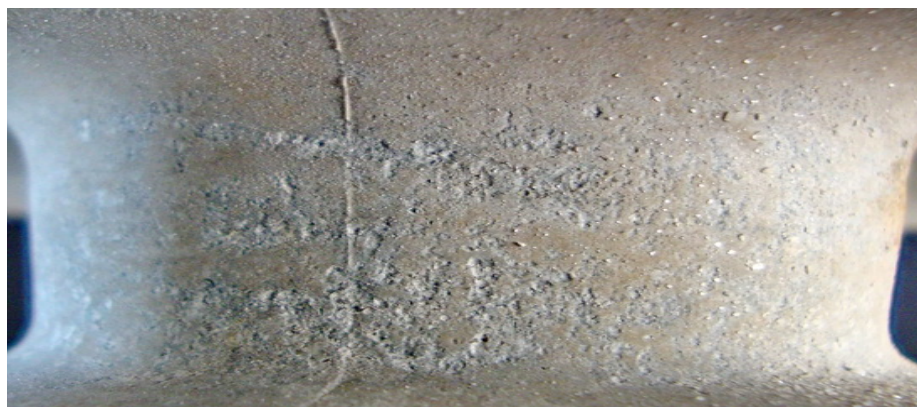


(ก) ลักษณะลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกลับ-เอียงชนิดแข็งหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ

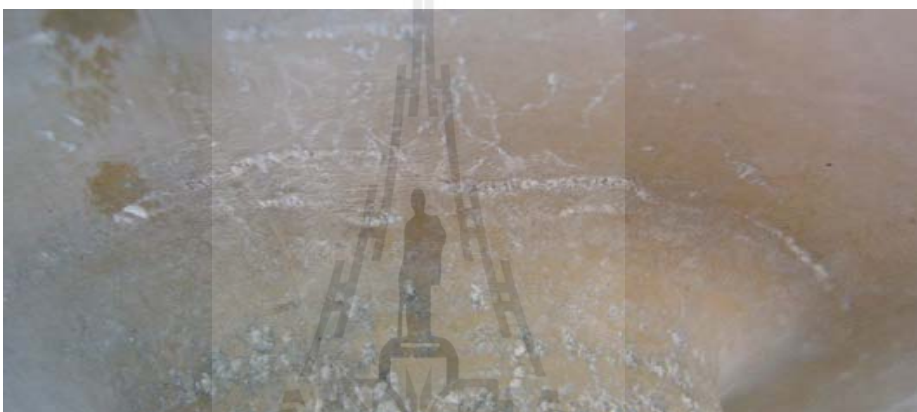


(ข) การกักตร้อนบนพื้นผิวบริเวณปีกเล็กกลางลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกลับ-เอียงชนิดแข็ง

รูปที่ 6.6 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังการทดสอบหมอกไอเกลือ



บริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



บริเวณใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



การกัดกร่อนใต้ปีกเล็กด้านล่าง

(ค) การเสื่อมสภาพบริเวณพื้นผิวที่ปีกและลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

รูปที่ 6.6 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



การกัดกร่อนบนปีกเล็กด้านล่าง

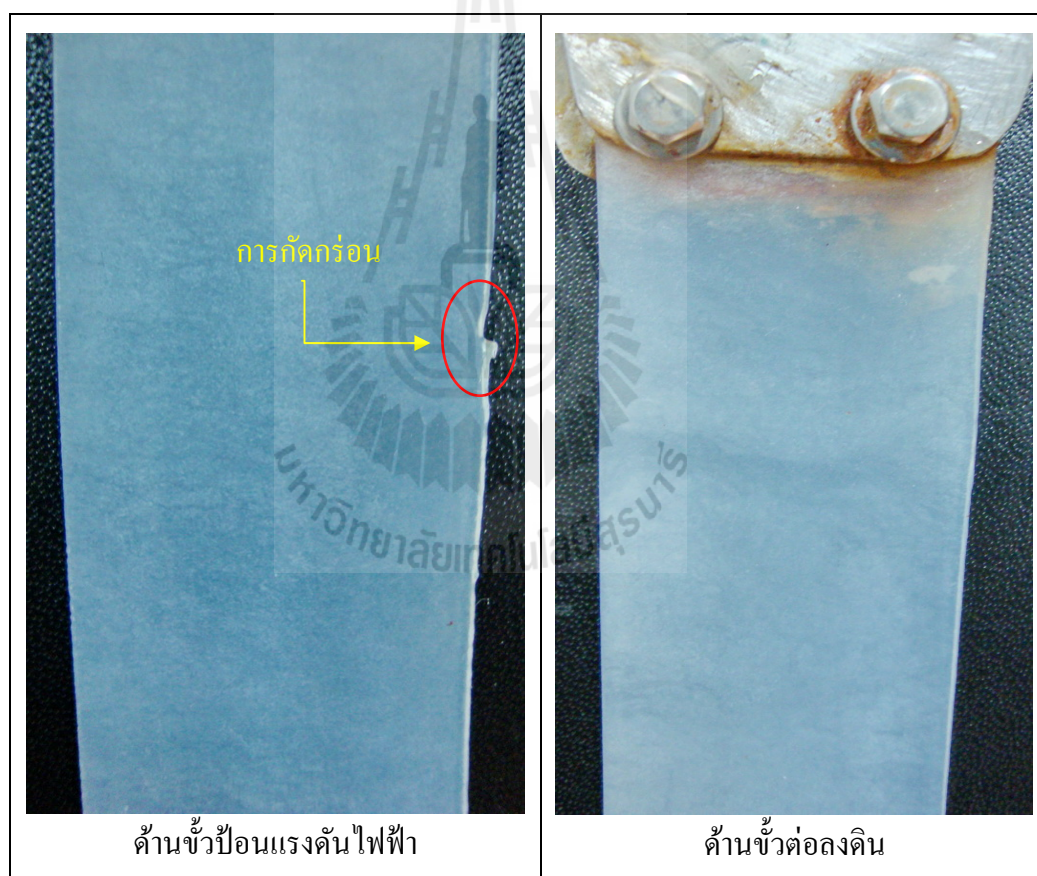
(ง) การเสื่อมสภาพบริเวณพื้นผิวที่ปีกและลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (ต่อ)

รูปที่ 6.6 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด หลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของ
ยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบว่า เกิดความเสื่อมสภาพความ
เป็นฉนวนหรือเสื่อมอายุ โดยสังเกตได้จากลักษณะพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนที่มีการเปลี่ยนแปลง
ส่วนใหญ่ความเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด จะเกิดขึ้นบริเวณลำตัวของ
ลูกถ้วยฉนวนและรุนแรงที่สุดบริเวณลำตัวตรงกลางที่อยู่ระหว่างปีกใหญ่ทั้งสอง

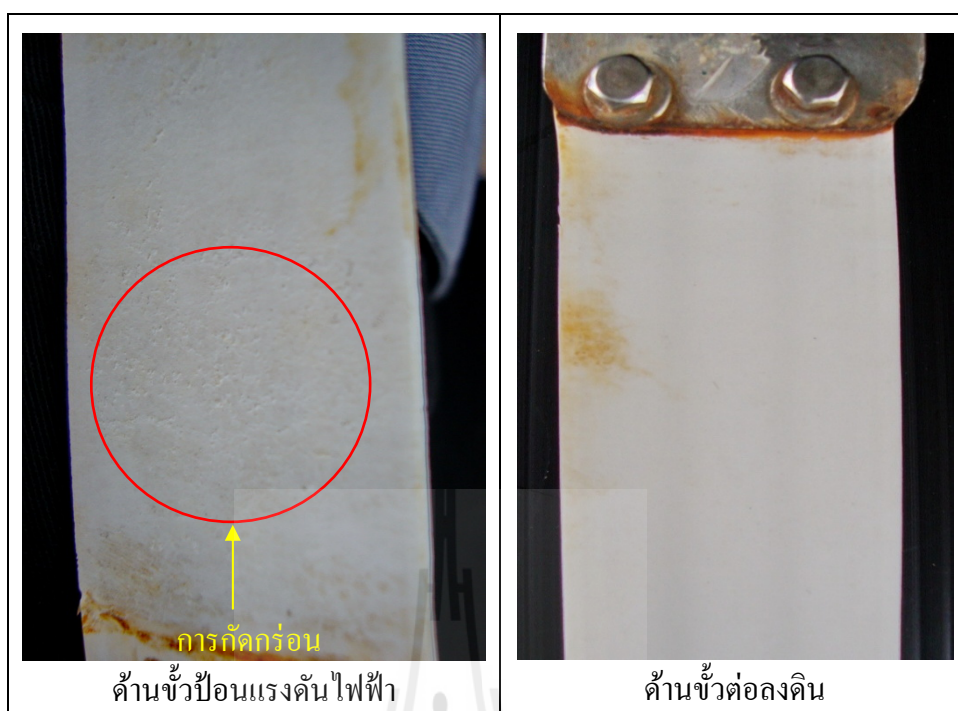
ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงและปีกสลับที่มีระยะร้าวยาวเท่ากัน
เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงบริเวณลำตัวตรงกลางเช่นเดียวกันและบริเวณพื้นผิวของปีกลูกถ้วยฉนวน
ทั้งสองพบการกัดกร่อนเล็กน้อย แต่บริเวณใกล้ขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
ปีกตรง เกิดความเสื่อมสภาพมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ ทั้งนี้ความเสื่อมสภาพดังกล่าว
อาจมาจากรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนทั้งสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิด
ขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย สำหรับกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-
เอียงชนิดแข็งและชนิดอ่อน พบว่า เกิดการกัดกร่อนบริเวณปีกเล็กกลางและลำตัวกลางระหว่างปีก
เหมือนกัน แต่บริเวณปีกเล็กด้านล่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็งมีความ
เสื่อมสภาพมากกว่าชนิดอ่อนเล็กน้อย

สำหรับกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด หลังจากทดสอบแรงเสียดทานของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อย ร่องรอยการเสื่อมสภาพที่พบส่วนใหญ่เป็นบริเวณใกล้กับขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งฉนวนยางซิลิโคนชนิด E และชนิด F เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อย แต่ที่พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนชนิด G และชนิด H แทบจะไม่พบการกัดกร่อนเลย ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ลักษณะความเสื่อมสภาพดังกล่าว อาจเป็นผลจากปริมาณสารตัวเติมหรืออะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ ที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มความต้านทานจากการกระทำทางไฟฟ้า เช่น ทนทานต่อการกัดกร่อน ทนต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ เป็นต้น



(ก) ความเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนชนิด E

รูปที่ 6.7 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนผิวฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ

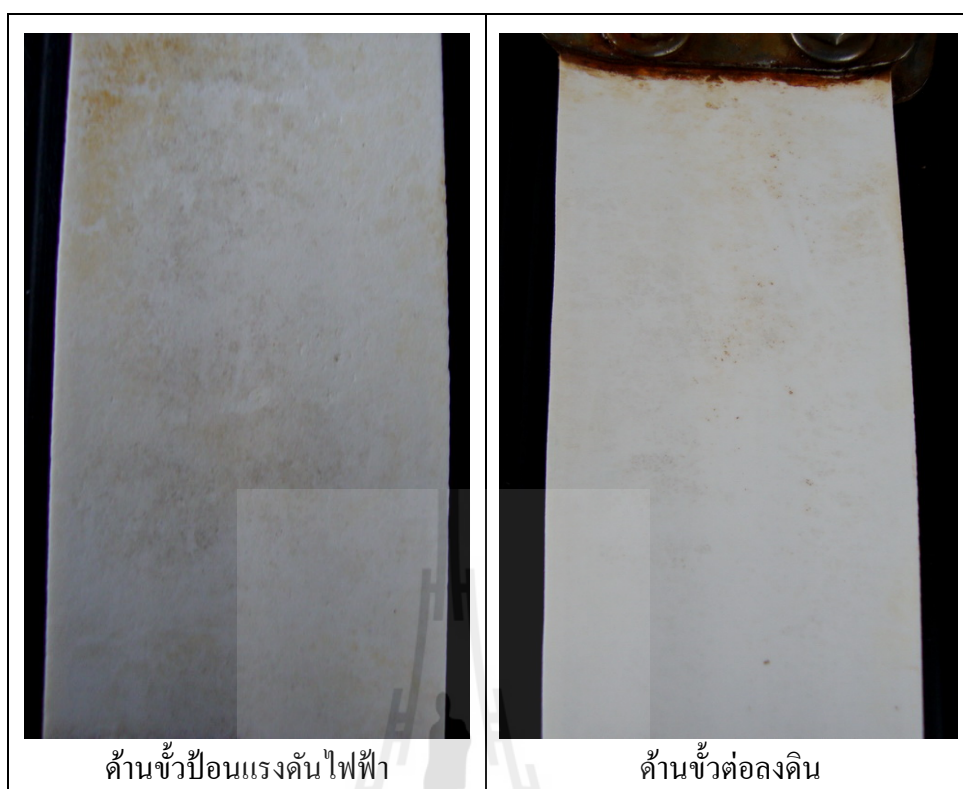


(ข) ความเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนชนิด F



(ค) ความเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนชนิด G

รูปที่ 6.7 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนผิวฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



(ง) ความเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนชนิด H

รูปที่ 6.7 ลักษณะความเสื่อมสภาพบนผิวฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ

- การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่แขวนไว้กลางแจ้ง ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ มากมาย เมื่อตรวจสอบดูพบว่า มีฝุ่นหรือคราบสกปรกที่เกาะบนผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน นอกจากนี้ยังพบว่า เกิดคราบสีดำหรืออาจเป็นเชื้อรา เกาะบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนด้วย ลักษณะพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนจากการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติเป็นเวลา 2 ปี ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และรูปที่ 6.9 ซึ่งในบางครั้งฝุ่นละอองที่เกาะบนผิวของฉนวนยางซิลิโคนจะถูกชะล้างออกเมื่อฝนตกลงมา แต่บางครั้งฝนที่ตกเบา ๆ หรือหยดน้ำค้าง อาจทำให้ฝุ่นละอองละลายรวมกับน้ำเกิดเป็นคราบสกปรกขึ้น ซึ่งมีผลให้ผิวลูกถ้วยฉนวนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าและเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วตามผิวได้



ตุ๊กด้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน



ตุ๊กด้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง

รูปที่ 6.8 คราบสกปรกบนพื้นผิวของตุ๊กด้วยฉนวนพอลิเมอร์หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

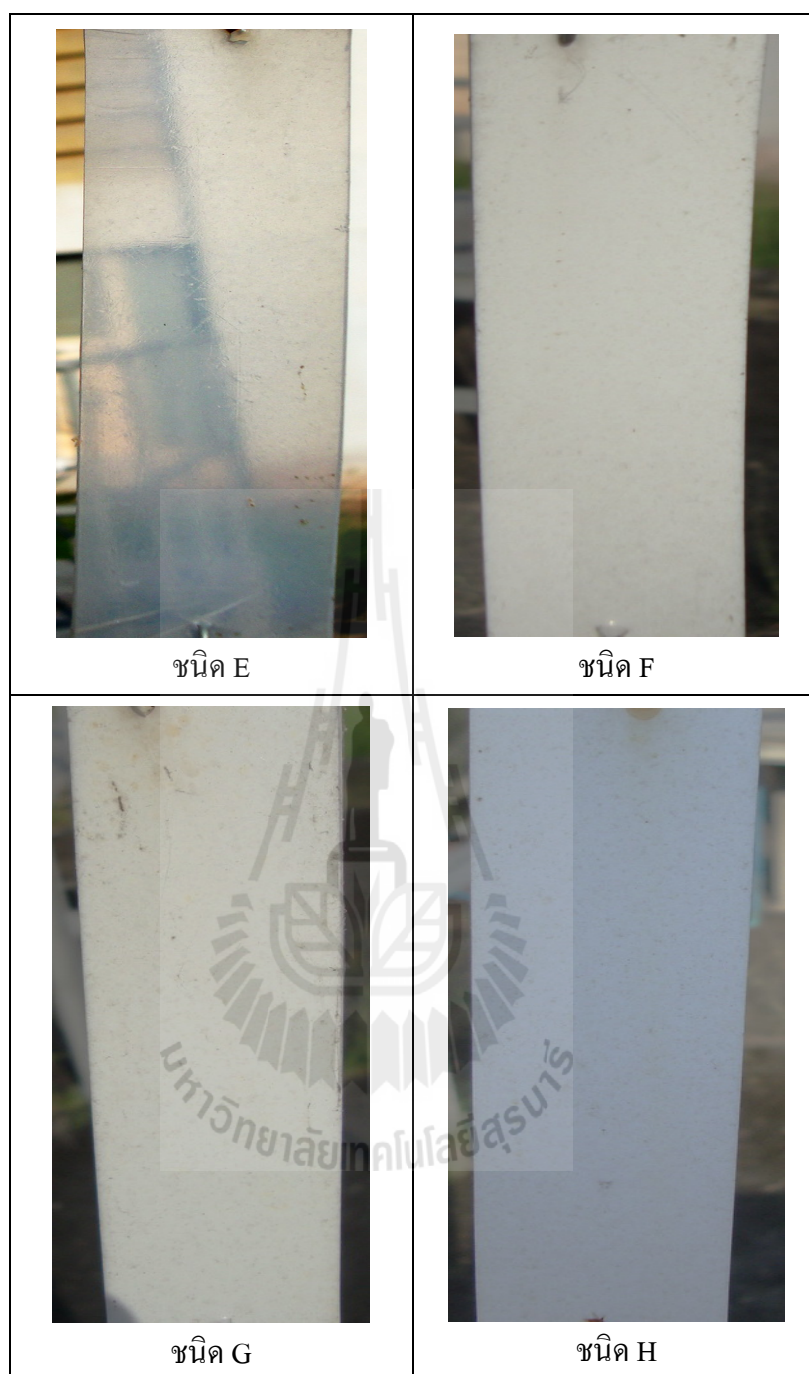


ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ



ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง

รูปที่ 6.8 คราบสกปรกบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



รูปที่ 6.9 คราบสกปรกบนพื้นผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

6.2.2 ระดับความเปรอะเปื้อน

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในสถานะใช้งานจริงมีโอกาสสัมผัสกับสิ่งเปรอะเปื้อนต่าง ๆ ที่มาเกาะตามพื้นผิว เมื่อพื้นผิวมีสิ่งเปรอะเปื้อนและอยู่ในสถานะเปียกชื้นจะทำให้เกิดกระแสรั่วและส่งผลให้เกิดอาร์กแฉกแห้งหรือวาวไฟ ปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวน สามารถหาได้โดยการหาค่าปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวน (Salt Deposit Density: SDD) ผลที่ได้บ่งบอกถึงระดับความนำไฟฟ้าของสารละลาย กล่าวคือ ถ้าค่า SDD มีค่ามาก แสดงว่าการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนมีปริมาณมาก การหาค่า SDD สามารถอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 60507

ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเปรอะเปื้อน

- 1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความเปรอะเปื้อน มีดังนี้
 - 1.1) มิเตอร์วัดความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ
 - 1.2) ถ้วยตวงขนาด 500 cm³
 - 1.3) น้ำบริสุทธิ์ (น้ำกลั่น)
 - 1.4) สำลีหรือกระดาษที่ไม่เป็นขุย
 - 1.5) ถุงมือ
- 2) การวัดค่าความเปรอะเปื้อน มีขั้นตอนดังนี้
 - 2.1) นำลูกถ้วยออกจากห้องทดสอบ ระวังไม่ให้สัมผัสกับผิวของลูกถ้วยฉนวนหรือสัมผัสน้อยที่สุด
 - 2.2) ใช้ถ้วยตวง ตวงน้ำให้ได้ปริมาณ 300 cm³
 - 2.3) สวมถุงมือและนำสำลีหรือกระดาษจุ่มน้ำหมาด ๆ แล้วนำไปเช็ดลูกถ้วย โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวที่เป็นพอลิเมอร์เท่านั้น เมื่อเช็ดแล้วนำสำลีหรือกระดาษลงแช่ในน้ำ บีบน้ำออกพอหมาด ๆ แล้วนำไปเช็ดลูกถ้วยอีก ทำเช่นนี้จนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนสะอาด
 - 2.4) คนน้ำให้สิ่งเปรอะเปื้อนที่ล้างจากลูกถ้วยฉนวนละลายก่อน จากนั้นนำมิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิแล้วจดบันทึกค่า

ค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิดังกล่าวจะนำเข้าสู่กระบวนการคำนวณ ซึ่งสมการและวิธีการคำนวณสามารถดูได้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.14 การหาค่าความเปรอะเปื้อนโดยการหาค่า SDD นี้ จำเป็นต้องทราบพื้นที่ผิวฉนวนทั้งหมดของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนด้วย พื้นที่ผิวฉนวนดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และผลจากการวิเคราะห์ค่า SDD ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 พื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

ประเภทของลูกถ้วยฉนวนและแผ่นยางซิลิโคน	พื้นที่ผิว (cm ²)
แบบปีกตรง	556.30
แบบปีกสลับ	503.29
แบบปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง	604.24
แบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน	604.24
พื้นที่ผิวทั้งหมดของแผ่นยางซิลิโคนแต่ละชนิด	134.4

ตารางที่ 6.2 ค่า SDD ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ

ประเภทของลูกถ้วยฉนวนและแผ่นยางซิลิโคน	SDD (mg/cm ²)
แบบปีกตรง	0.065
แบบปีกสลับ	0.109
แบบปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง	0.100
แบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน	0.157
แผ่นยางซิลิโคนชนิด E	0.093
แผ่นยางซิลิโคนชนิด F	0.099
แผ่นยางซิลิโคนชนิด G	0.085
แผ่นยางซิลิโคนชนิด H	0.085

จากตารางที่ 6.2 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเปรอะเปื้อนที่ได้จากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด เห็นได้ว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนมีค่าความเปรอะเปื้อนมากกว่าชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีคราบสิ่งเปรอะเปื้อนเกาะบนผิวมาก สำหรับลูกถ้วยพอลิเมอร์ที่มีค่าความเปรอะเปื้อนน้อยที่สุดคือ ลูกถ้วยพอลิเมอร์ปีกตรง ส่วนกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนค่าความเปรอะเปื้อนของฉนวนยางซิลิโคนชนิด F มีค่ามากที่สุดและใกล้เคียงกับชนิด E ส่วนฉนวนยางซิลิโคนชนิด G จะมีค่าความเปรอะเปื้อนเท่ากับฉนวนยางซิลิโคนชนิด H และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์กับแผ่นฉนวนยางซิลิโคน พบว่า ส่วนใหญ่แผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความเปรอะเปื้อนน้อยกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ สาเหตุดังกล่าวอาจเนื่องจากลักษณะของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ไม่มีปีกเหมือนกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จึงทำให้การไหลของน้ำที่พื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนได้ดีและสามารถชำระล้างคราบสิ่งเปรอะเปื้อนได้

ดีกว่า ซึ่งทำให้ทราบสกรปรกที่เกาะบริเวณพื้นผิวมีปริมาณน้อย แต่ไม่ได้หมายความว่า การที่ลูกถ้วยฉนวนไม่มีปีกนั้นจะเป็นผลดี เพราะเมื่อใช้งานจริงลูกถ้วยฉนวนจำเป็นต้องมีโครงสร้างที่มีปีก เพื่อเพิ่มระยะรั้วให้กับลูกถ้วยฉนวนและยังป้องกันการเปียกน้ำในกรณีที่เกิดฝนตกด้วย

6.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้น

การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนพร้อมกับสภาวะที่เปียกชื้นนั้น เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสรั่วและเกิดการดีสชาร์จที่ผิวของฉนวนยางซิลิโคน ผลที่ตามมาจากการดีสชาร์จก็คือ ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพหรือเสื่อมอายุมากขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นลดลงตามไปด้วย การวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นของฉนวนยางซิลิโคนนี้ สามารถอ้างอิงมาตรฐานของ STRI การลดลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เป็นส่วนสำคัญที่บ่งบอกถึงความเสื่อมสภาพหรือเสื่อมอายุ เมื่อคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นลดลงถึงขั้นรุนแรงน้ำที่มากเกาะบริเวณผิวของลูกถ้วยฉนวนจะมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำหรือเป็นคราบน้ำที่เปียกตลอดแนวผิวของฉนวน อาจจะมาจากการฝนตก หมอกหรือไอน้ำต่าง ๆ สภาพที่ผิวเปียกน้ำดังกล่าว ทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวมากขึ้น ทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและวาวไฟได้ง่ายและรุนแรงมากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เกิดการเสื่อมอายุเร็วขึ้นด้วย

• การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

หลังจากการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และหลังจากล้างทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้น โดยอ้างอิงมาตรฐาน STRI ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงและปีกสลับ ดังแสดงในรูปที่ 6.10 รูปที่ 6.11 สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนและชนิดแข็ง แสดงในรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด พบว่าคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนลดลงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณปีก พบว่าปีกด้านบนมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นลดลงมากกว่าบริเวณใต้ปีก การลดลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นดังกล่าว อาจเป็นผลจากการเกิดดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบริเวณพื้นผิวลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มากกว่าบริเวณอื่น ๆ

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงและปีกสลับ แสดงในตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนและชนิดแข็ง แสดงในตารางที่ 6.5 และตารางที่ 6.6 ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น	
	1	HC 5
	2	HC 5
	3	HC 2
	4	HC 4
	5	HC 5
	6	HC 2
	7	HC 5



รูปที่ 6.11 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

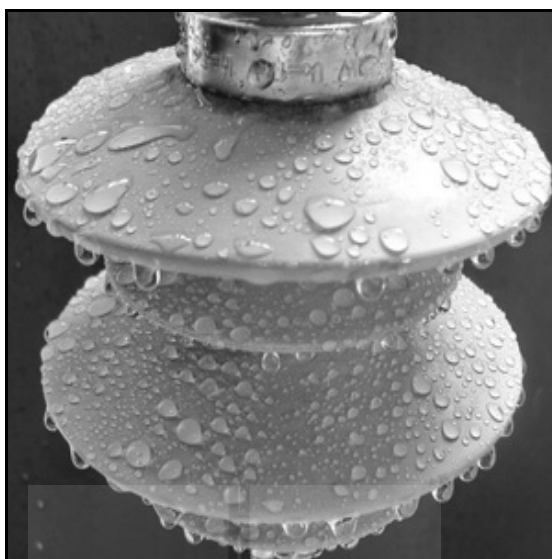
ตำแหน่ง	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น	
	1	HC 4
	2	HC 5
	3	HC 2
	4	HC 4
	5	HC 5
	6	HC 3
	7	HC 4
	8	HC 4
	9	HC 2
	10	HC 4



รูปที่ 6.12 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 6.5 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น	
	1	HC 2
	2	HC 1
	3	HC 3
	4	HC 2
	5	HC 1
	6	HC 3
	7	HC 2
	8	HC 2
	9	HC 3
	10	HC 4
	11	HC 4

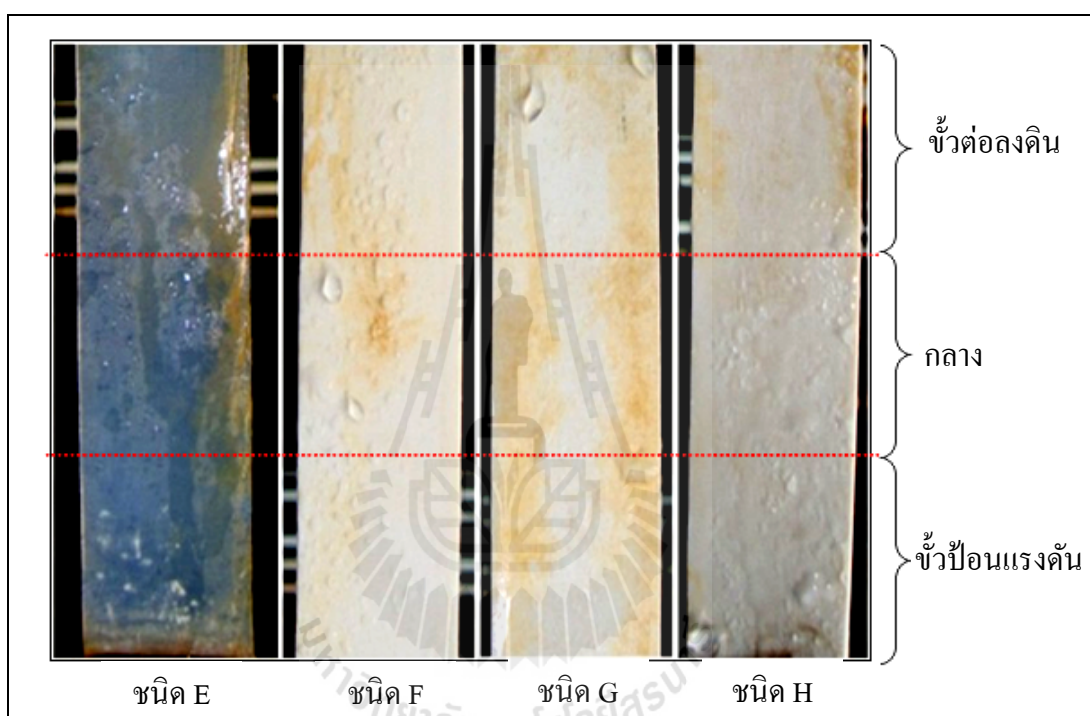


รูปที่ 6.13 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 6.6 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น	
	1	HC 3
	2	HC 2
	3	HC 3
	4	HC 2
	5	HC 2
	6	HC 2
	7	HC 2
	8	HC 2
	9	HC 3
	10	HC 3
	11	HC 4

สำหรับคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด พบว่า บริเวณด้านข้างป้อนแรงดันไฟฟ้ามีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นลดลงมากกว่าบริเวณตรงกลางและด้านข้างต่อลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 6.14 และตารางที่ 6.7 ซึ่งอาจเกิดจากการที่ผิวฉนวนอยู่ในสภาวะเปียกและทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิว ส่งผลให้เกิดอาร์กแฉกแห้งและดิสชาร์จบริเวณด้านข้างป้อนแรงดันไฟฟ้าที่รุนแรงและบ่อยครั้งกว่าส่วนอื่น ๆ จึงทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนบริเวณดังกล่าวเกิดความเสื่อมสภาพลงและทำให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 6.14 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตารางที่ 6.7 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน			
	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
ข้างต่อลงดิน	HC6	HC4	HC4	HC4
กลาง	HC6	HC4	HC4	HC5
ข้างป้อนแรงดัน	HC6	HC6	HC6	HC6

- การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนถูกวิเคราะห์ทุก ๆ 3 เดือน สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกวิเคราะห์เมื่อทดสอบครบ 2 ปี ซึ่งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้งานอยู่กลางแจ้งย่อมได้รับผลกระทบจากสภาวะอากาศต่าง ๆ เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต ฝน การสะสมของฝุ่นละออง หรือคราบสกปรก เป็นต้น ระดับความแรงของรังสีอัลตราไวโอเลต ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ลักษณะของคุณสมบัติผิวหยดน้ำฉนวนพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 6.15 ถึงรูปที่ 6.18 สำหรับผลการวิเคราะห์ระดับคุณสมบัติผิวหยดน้ำฉนวนแสดงในตารางที่ 6.8 ถึงตารางที่ 6.11

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ส่วนใหญ่แล้วผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงเพียงเล็กน้อยอยู่ระดับ HC2 ถึง HC3 เท่านั้น มีแค่บางบริเวณที่ลดลงที่ระดับ HC4 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละตำแหน่งจะเห็นว่า บริเวณด้านบนของปีกใหญ่ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงกว่าส่วนอื่น ๆ แต่สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน จะมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงมากอยู่ระดับ HC5 ถึง HC6 เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนดังกล่าวมีคราบสกปรกเกาะอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมาก โดยคราบสกปรกที่เกิดขึ้นทำให้น้ำที่มาเกาะบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6.17

ในกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน หลังจากทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติตลอดระยะเวลา 2 ปี พบว่า มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเปลี่ยนระดับจาก HC1 เป็น HC2 ถือว่าอยู่ในระดับที่ดีเยี่ยม การเสื่อมลงของคุณสมบัติผิวหยดน้ำฉนวนอาจมีผลกระทบมาจากรังสีอัลตราไวโอเลต ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำฉนวนยางซิลิโคน แสดงในรูปที่ 6.19 และตารางที่ 6.12



รูปที่ 6.15 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ตารางที่ 6.8 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง			
ตำแหน่ง		2 ปี	
		แดดเช้า	แดดบ่าย
	1	HC 2	HC 2
	2	HC 3	HC 3
	3	HC 2	HC 2
	4	HC 2	HC 2
	5	HC 4	HC 4
	6	HC 2	HC 2
	7	HC 2	HC 2



รูปที่ 6.16 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ตารางที่ 6.9 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ			
ตำแหน่ง		2 ปี	
		แดดเช้า	แดดบ่าย
	1	HC 2	HC 2
	2	HC 3	HC 3
	3	HC 2	HC 2
	4	HC 3	HC 3
	5	HC 5	HC 5
	6	HC 2	HC 2
	7	HC 3	HC 3
	8	HC 4	HC 4
	9	HC 2	HC 2
	10	HC 2	HC 2



รูปที่ 6.17 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ตารางที่ 6.10 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

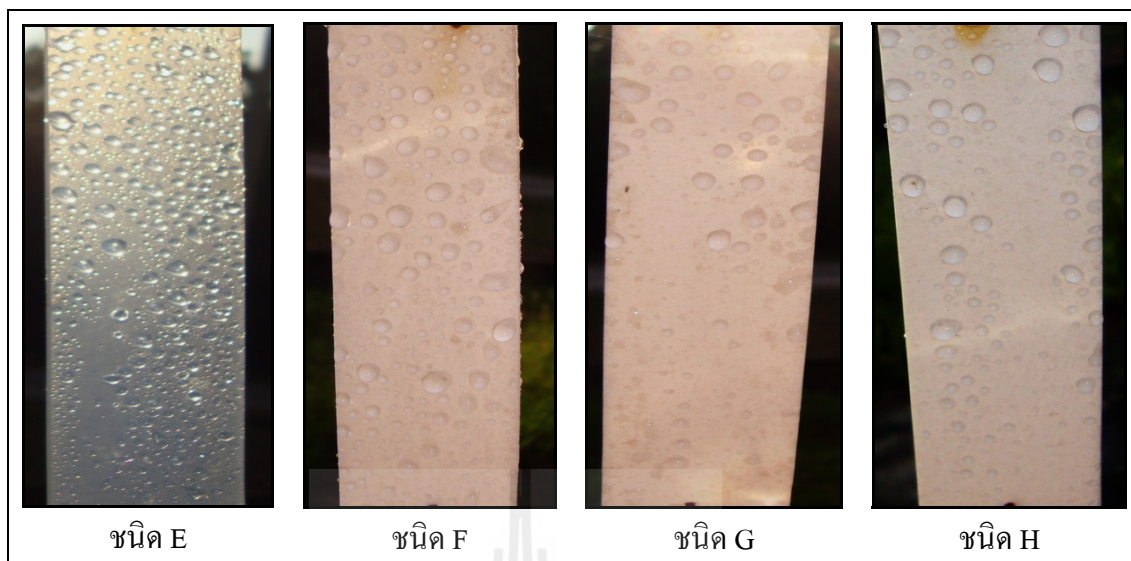
คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น			
ตำแหน่ง		1 ปี	2 ปี
		แดดเช้า	แดดบ่าย
	1	HC 6	HC 6
	2	HC 5	HC 5
	3	HC 5	HC 5
	4	HC 5	HC 5
	5	HC 5	HC 5
	6	HC 5	HC 5
	7	HC 5	HC 5
	8	HC 5	HC 5
	9	HC 5	HC 5
	10	HC 5	HC 5
	11	HC 5	HC 5



รูปที่ 6.18 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ตารางที่ 6.11 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น			
ตำแหน่ง		2 ปี	
		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	1	HC 3	HC 3
	2	HC 3	HC 3
	3	HC 3	HC 3
	4	HC 5	HC 5
	5	HC 2	HC 2
	6	HC 3	HC 3
	7	HC 3	HC 3
	8	HC 2	HC 2
	9	HC 3	HC 3
	10	HC 4	HC 4
	11	HC 2	HC 2



รูปที่ 6.19 ลักษณะคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ตารางที่ 6.12 คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน					
ตำแหน่ง	เวลา (เดือน)	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
ช่วงเช้า	6	CH 1	CH 1	CH 1	CH 1
	9	CH 2	CH 1	CH 1	CH 1
	12	CH 2	CH 1	CH 1	CH 1
	15	CH 2	CH 2	CH 1	CH 1
	18	CH 2	CH 2	CH 1	CH 2
	21	CH 2	CH 2	CH 2	CH 1
	24	CH 2	CH 2	CH 2	CH 2
ช่วงบ่าย	6	CH 1	CH 1	CH 1	CH 1
	9	CH 2	CH 1	CH 1	CH 1
	12	CH 2	CH 1	CH 1	CH 1
	15	CH 2	CH 2	CH 1	CH 1
	18	CH 2	CH 2	CH 1	CH 1
	21	CH 2	CH 2	CH 2	CH 2
	24	CH 2	CH 2	CH 2	CH 2

6.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลังการทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน วัสดุดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิววัสดุ สามารถตรวจสอบความเสียหายระดับจุลภาค หรือความเสียหายบนพื้นผิวที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JSM-6400 ดังแสดงในรูปที่ 6.20 และรุ่น NeoScope JCM-5000 ดังแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JSM-6400

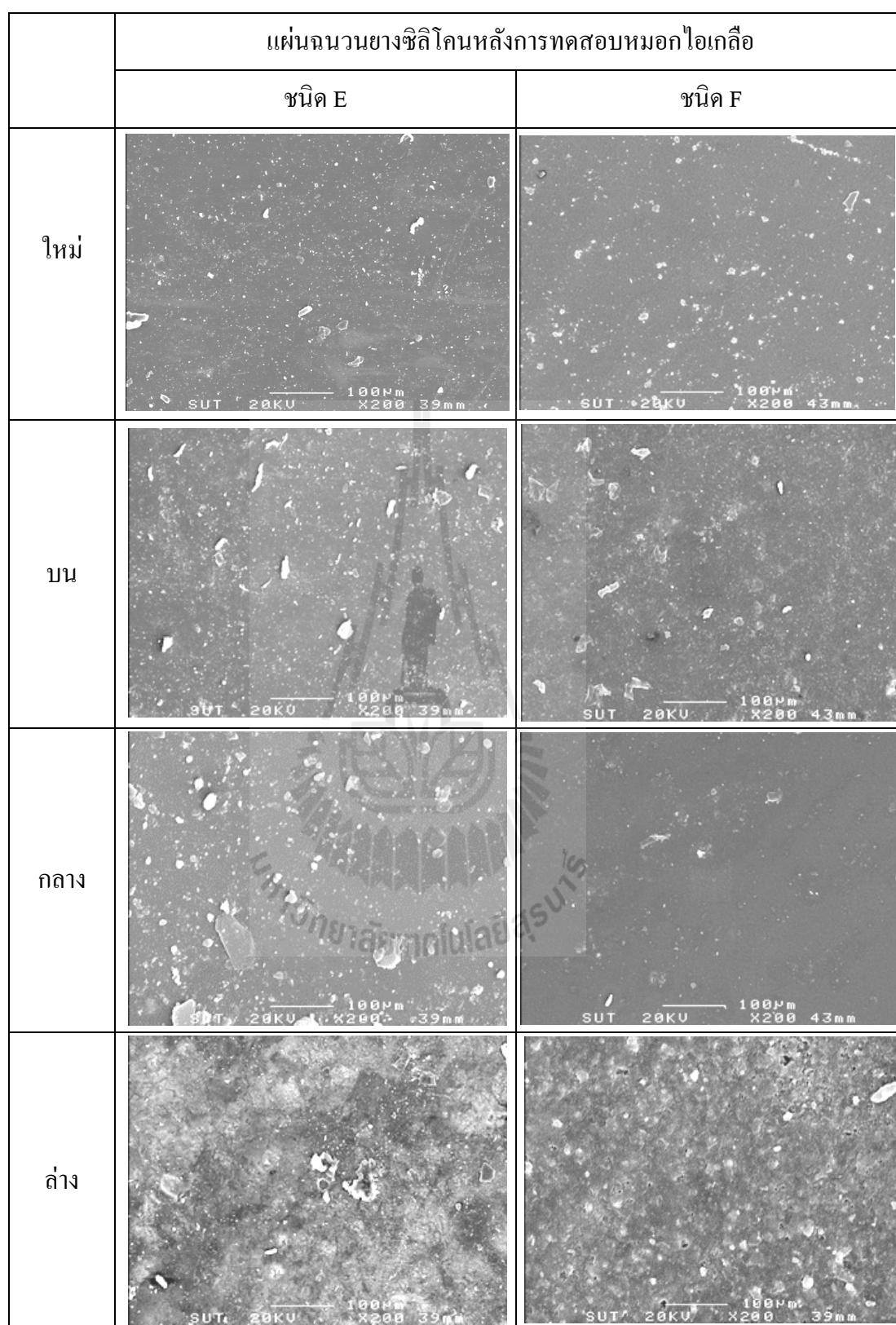


รูปที่ 6.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น NeoScope JCM-5000

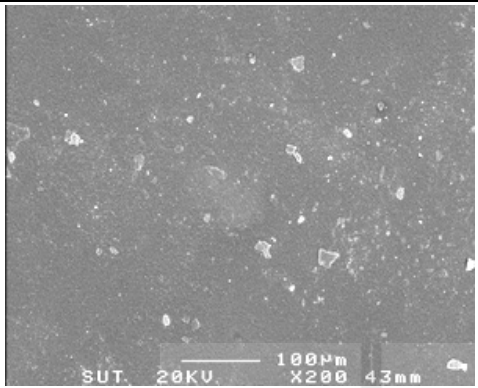
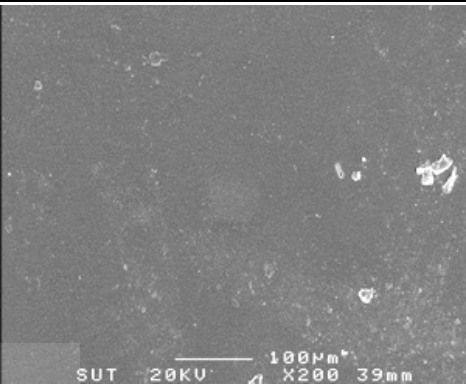
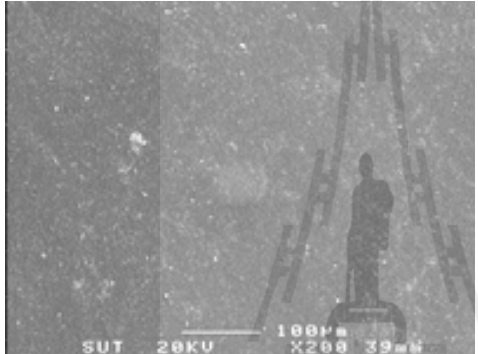
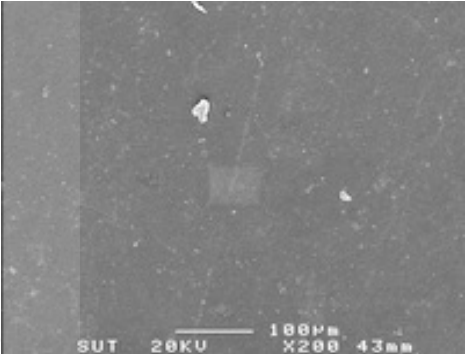
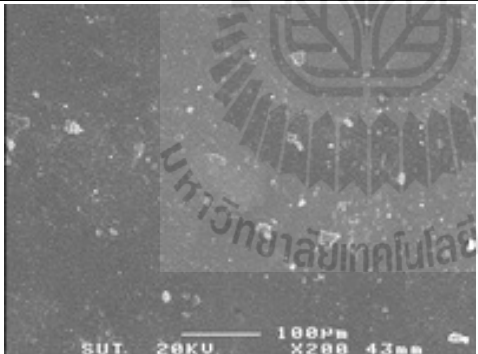
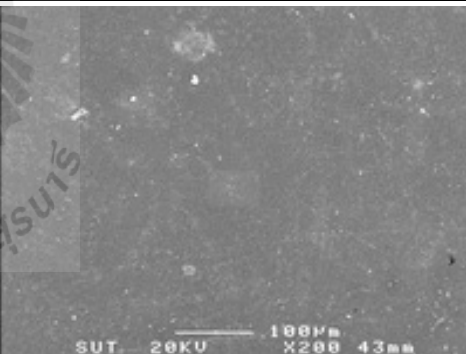
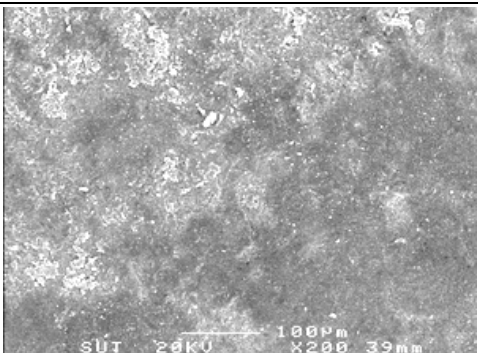
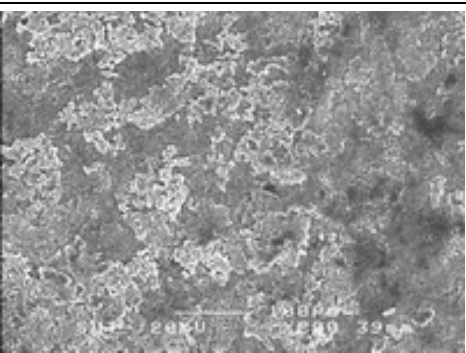
- การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM หลังจากการทดสอบ ในกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งพบการกัดกร่อนที่ตำแหน่งใกล้กับขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า (ด้านล่าง) มากกว่าส่วนอื่น ๆ ส่วนตำแหน่งที่เกิดความเสียหายน้อยที่สุดเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับด้านขั้วต่อลงดิน (ด้านบน) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะตำแหน่งขั้วต่อลงดินมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ และเกิดอาร์กแถบแห้งหรือดิสชาร์จที่ไม่รุนแรง เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนชนิด E เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด เนื่องจากยางซิลิโคนชนิด E ไม่มีการเติมสารอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากการกระทำทางไฟฟ้า เช่น การดิสชาร์จอาร์กแถบแห้ง เป็นต้น จึงทำให้ฉนวนยางซิลิโคนชนิด E เกิดการเสื่อมสภาพมากกว่าชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.22

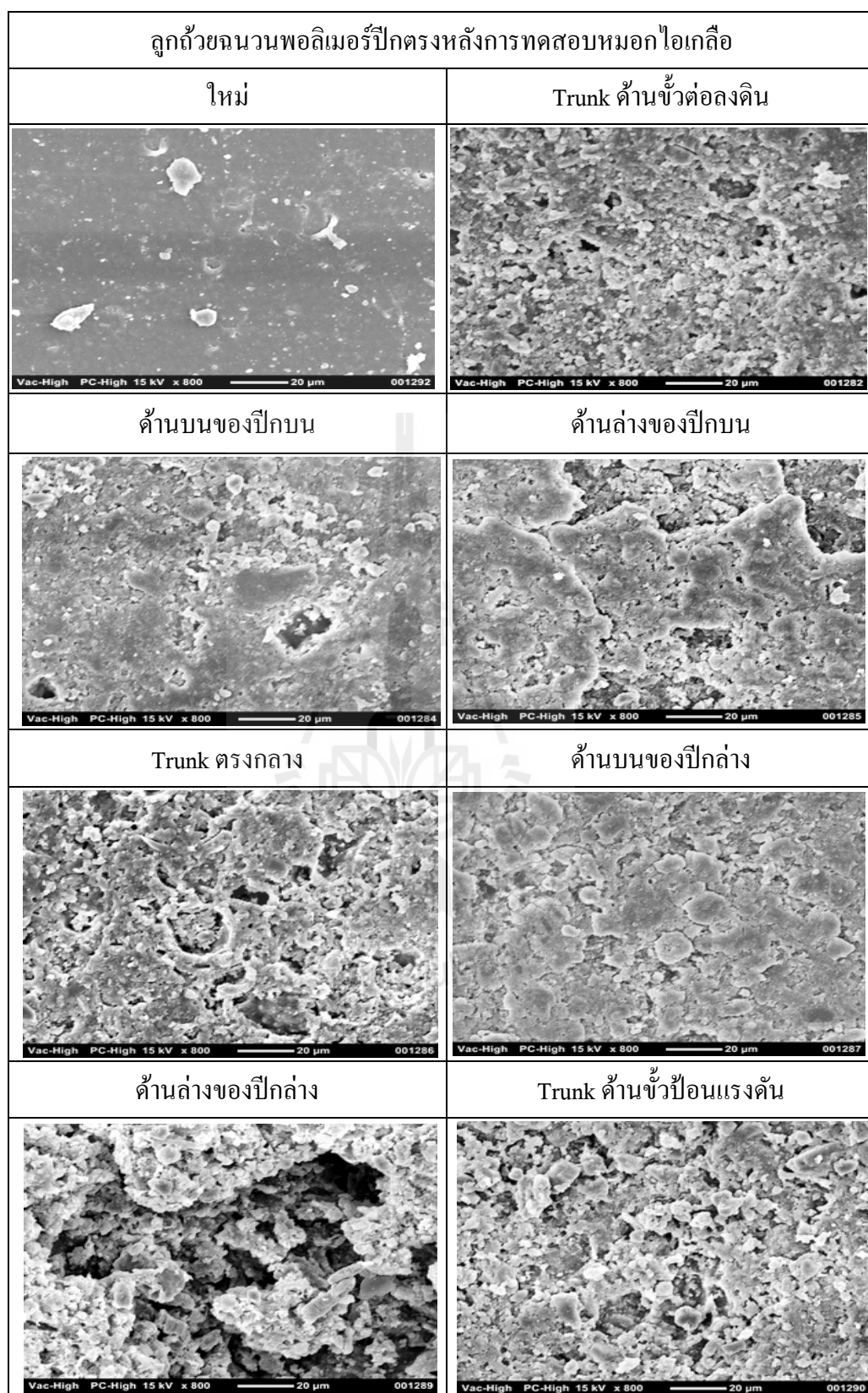
ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ พบว่า เกิดร่องรอยการกัดกร่อนบนพื้นผิวฉนวนที่รุนแรง ส่วนใหญ่พบบริเวณลำตัวมากกว่าส่วนอื่น ๆ โดยเฉพาะตรงกลางระหว่างปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้ ยังพบการกัดกร่อนที่รุนแรงบริเวณปีกเล็กตรงกลางระหว่างปีกใหญ่ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับอีกด้วย การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุจากการกระทำทางไฟฟ้า เช่น การดิสชาร์จ อาร์กแถบแห้ง เป็นต้น ลักษณะพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ถึงรูปที่ 6.26



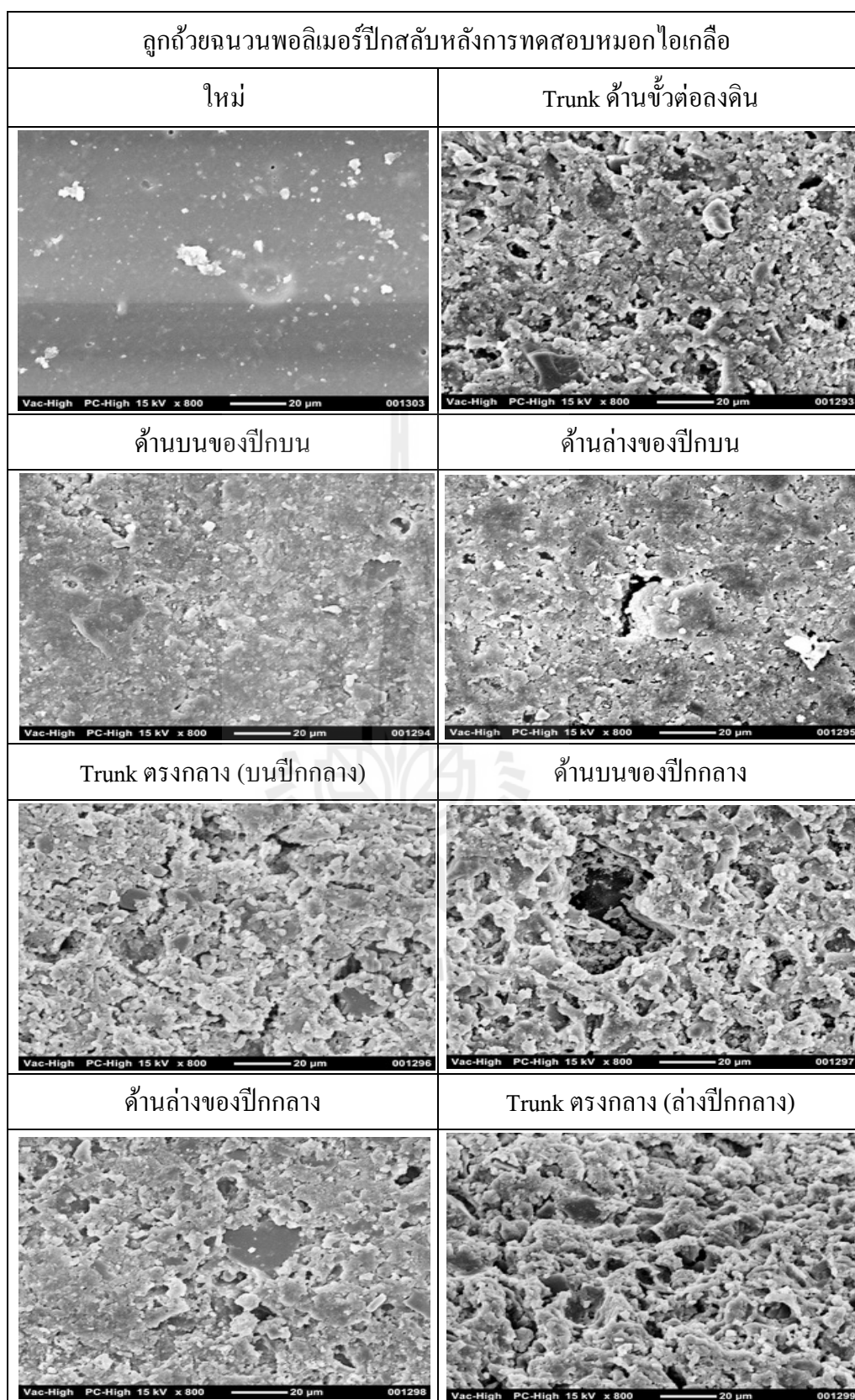
รูปที่ 6.22 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	แผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)	
	ชนิด G	ชนิด H
ใหม่		
บน		
กลาง		
ล่าง		

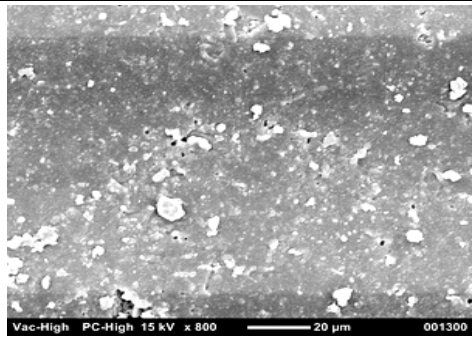
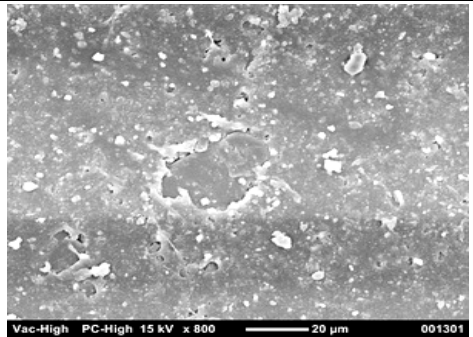
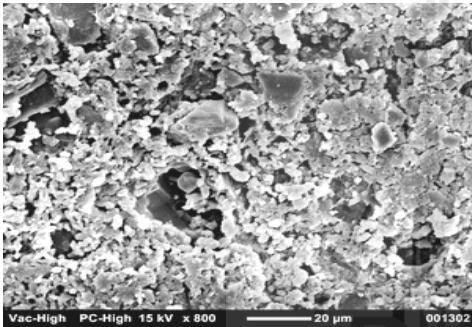
รูปที่ 6.22 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



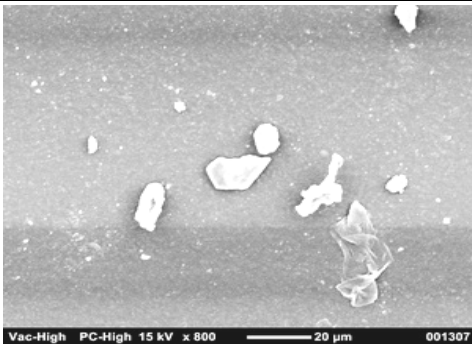
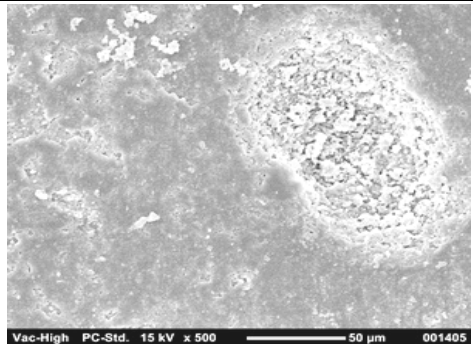
รูปที่ 6.23 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ



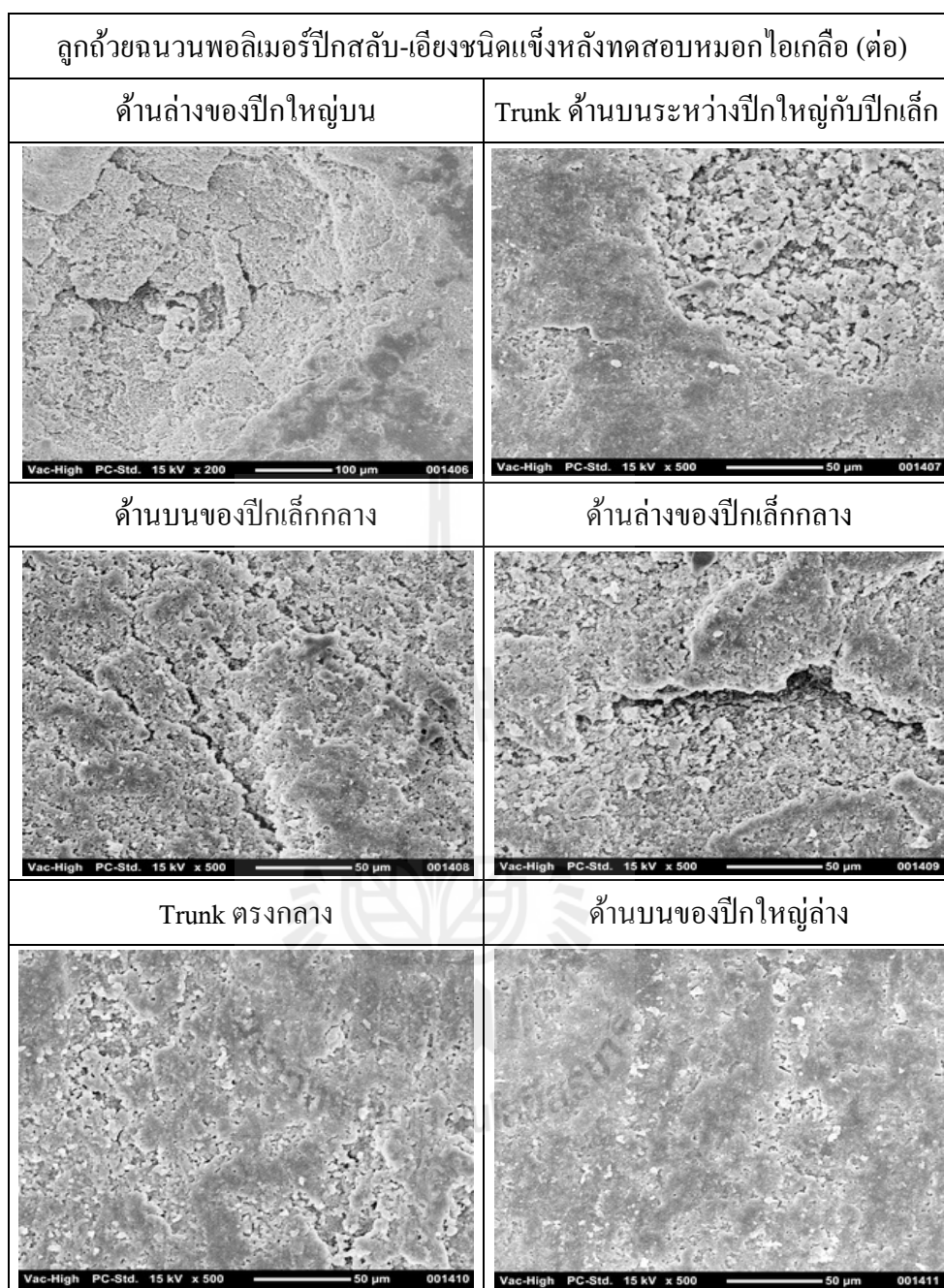
รูปที่ 6.24 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังการทดสอบครบหมอกไอเกลือ (ต่อ)	
ด้านบนของปีกล่าง	ด้านล่างของปีกล่าง
	
Trunk ด้านซ้ายป้อนแรงดัน	-
	-

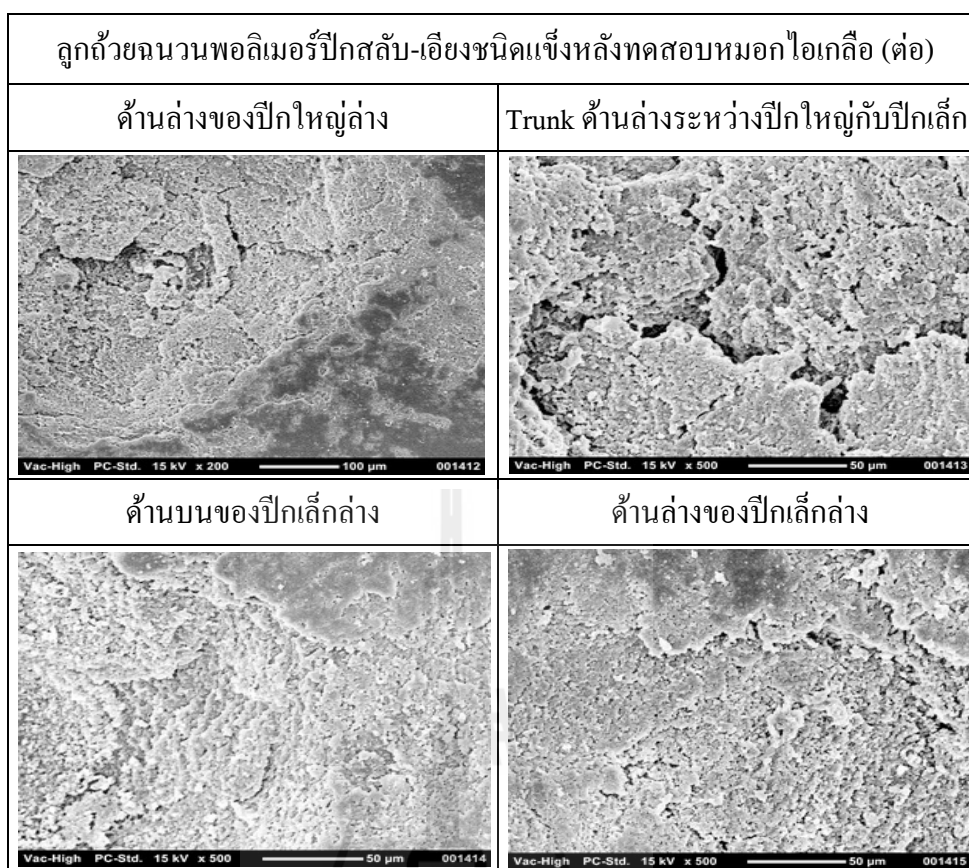
รูปที่ 6.24 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็งหลังทดสอบหมอกไอเกลือ	
ใหม่	ด้านบนของปีกใหญ่บน
	

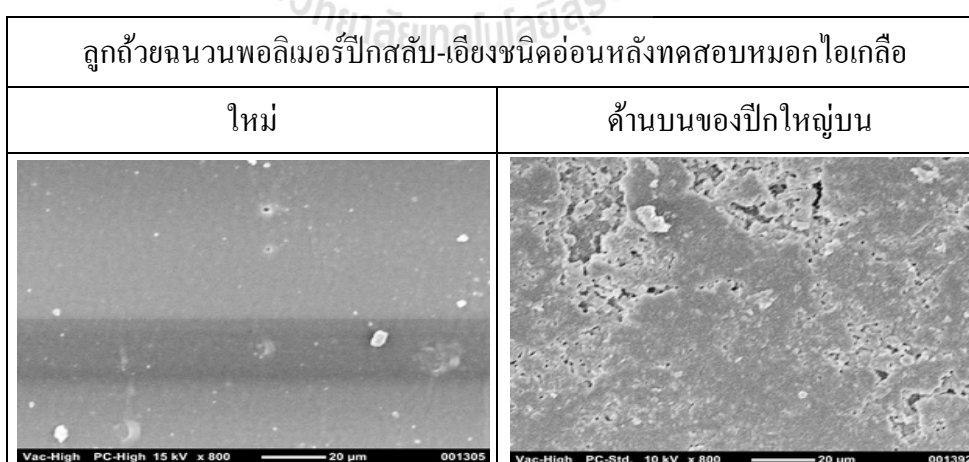
รูปที่ 6.25 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ



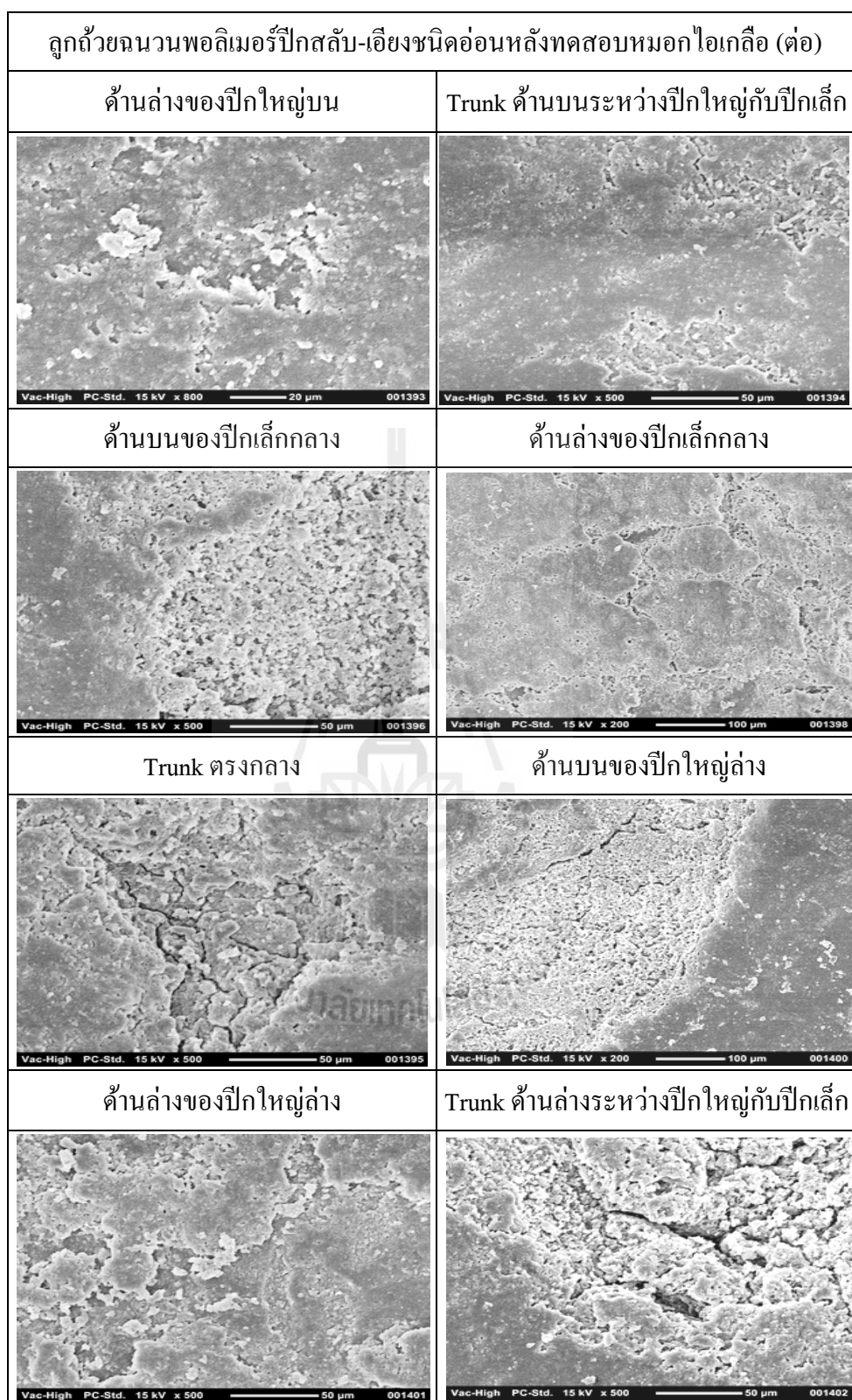
รูปที่ 6.25 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



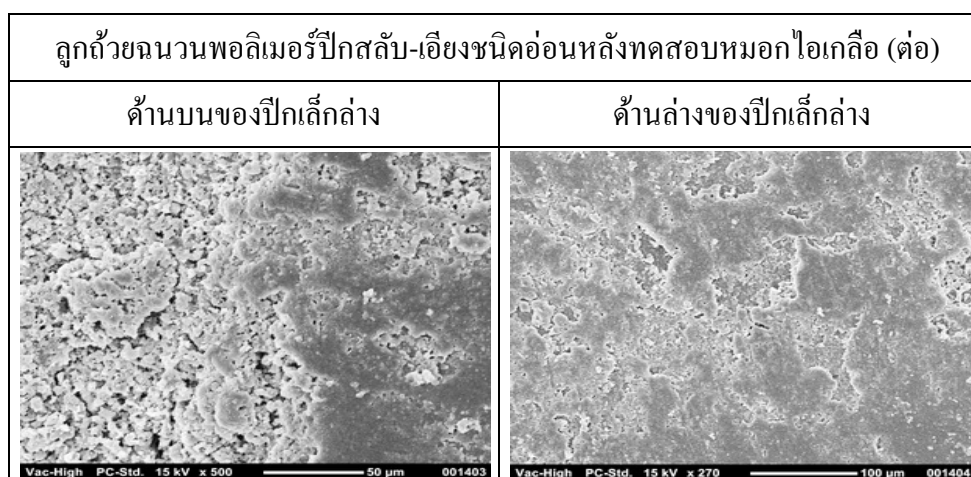
รูปที่ 6.25 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



รูปที่ 6.26 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังทดสอบหมอกไอเกลือ



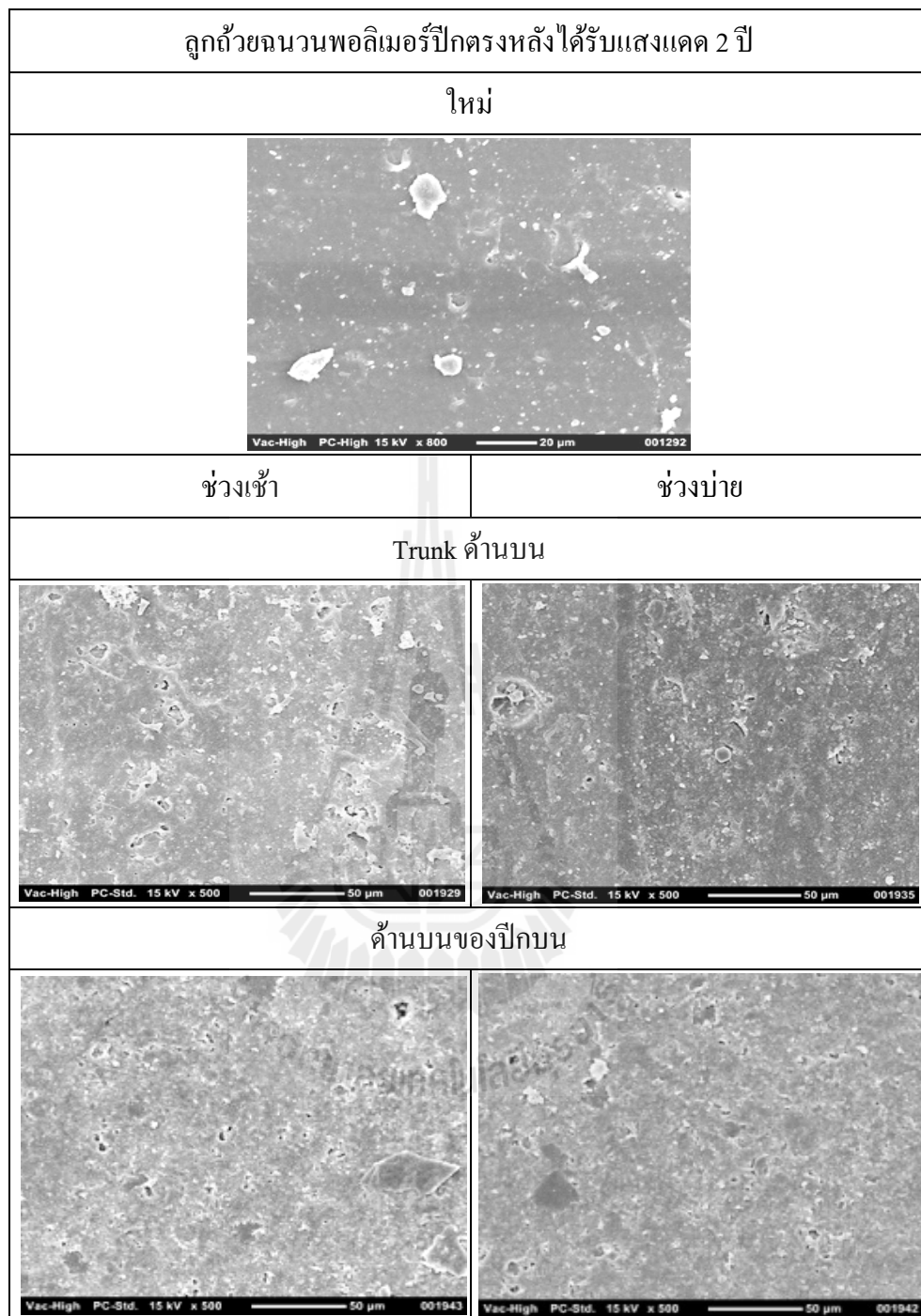
รูปที่ 6.26 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)



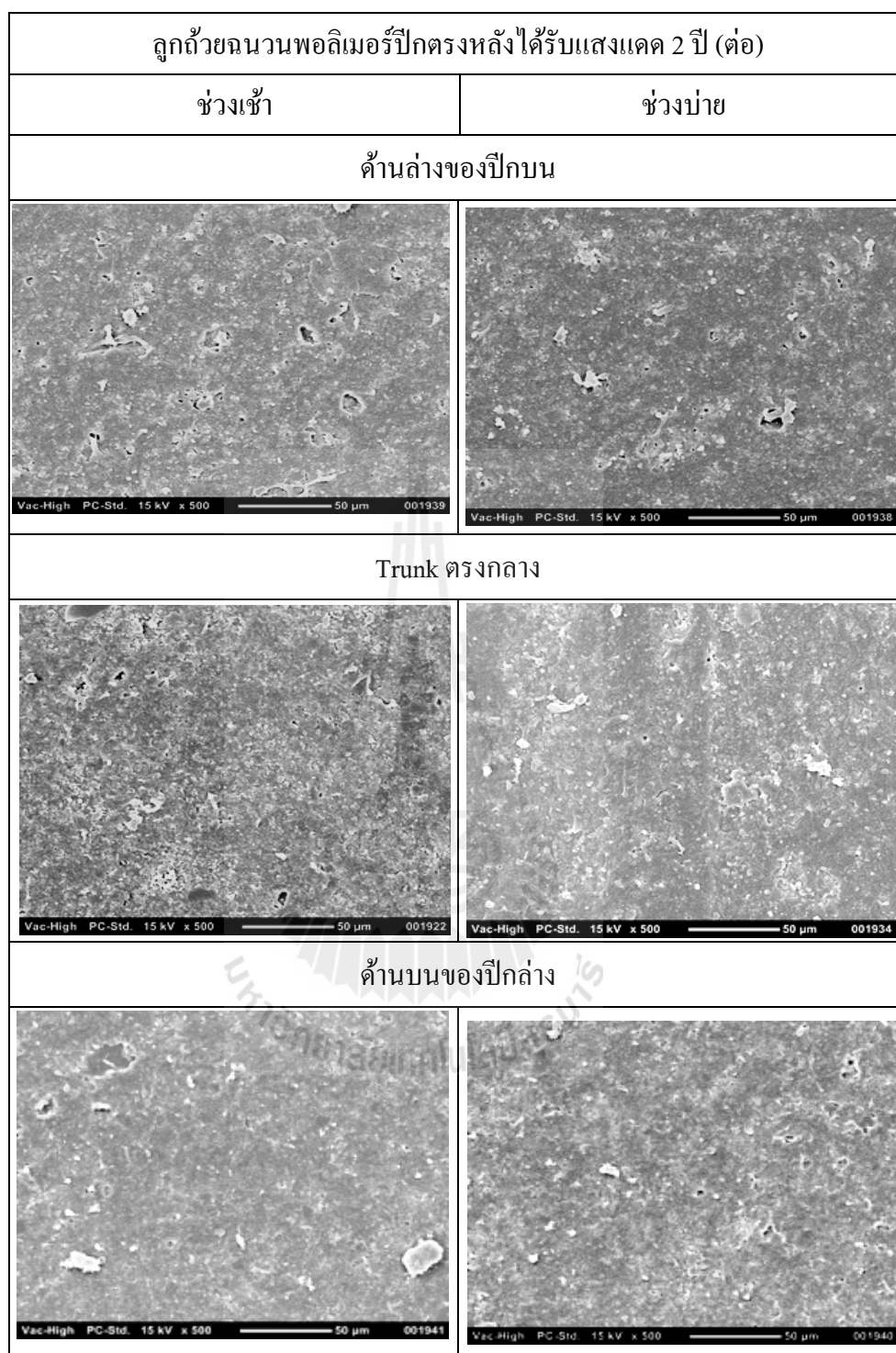
รูปที่ 6.26 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ (ต่อ)

- การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

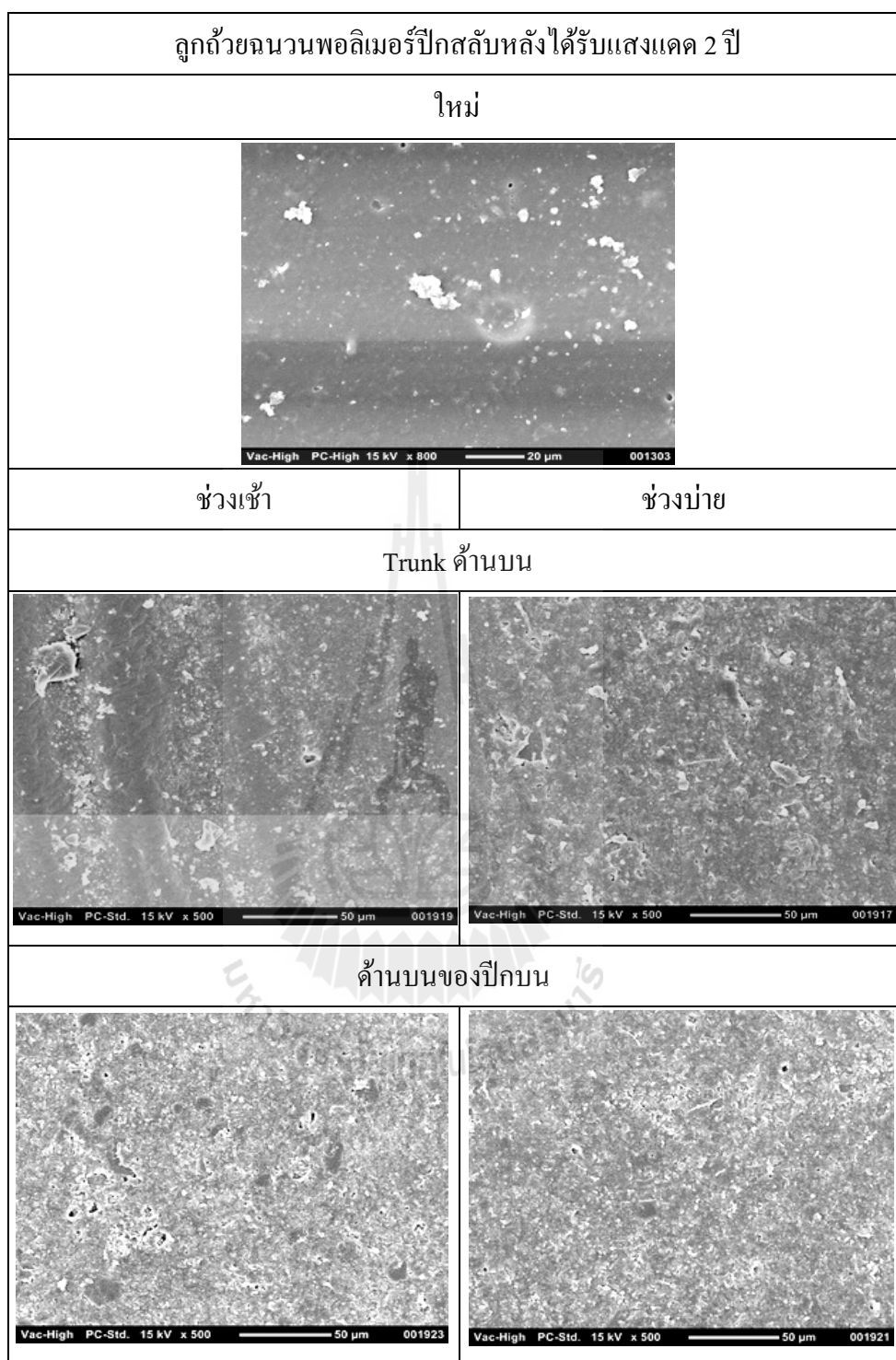
การวิเคราะห์ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน ในกรณีการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ พบว่า พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคน เกิดความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นั่นคือ พบรอยแตกหรือความขรุขระบริเวณพื้นผิวทั้งสองด้าน (ด้านที่ได้รับแสงแดดตอนเช้าและได้รับแสงแดดตอนบ่าย) ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบ โดยรอยแตกหรือความขรุขระที่เกิดขึ้นอาจมาจากผลของความร้อนจากแสงแดด ซึ่งความร้อนจากแสงแดดสามารถทำให้สภาพของพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเป็นตัวเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วขึ้น อาจทำให้พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดรอยแตกและเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเสื่อมสภาพลงได้ ลักษณะความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 6.27 ถึงรูปที่ 6.34



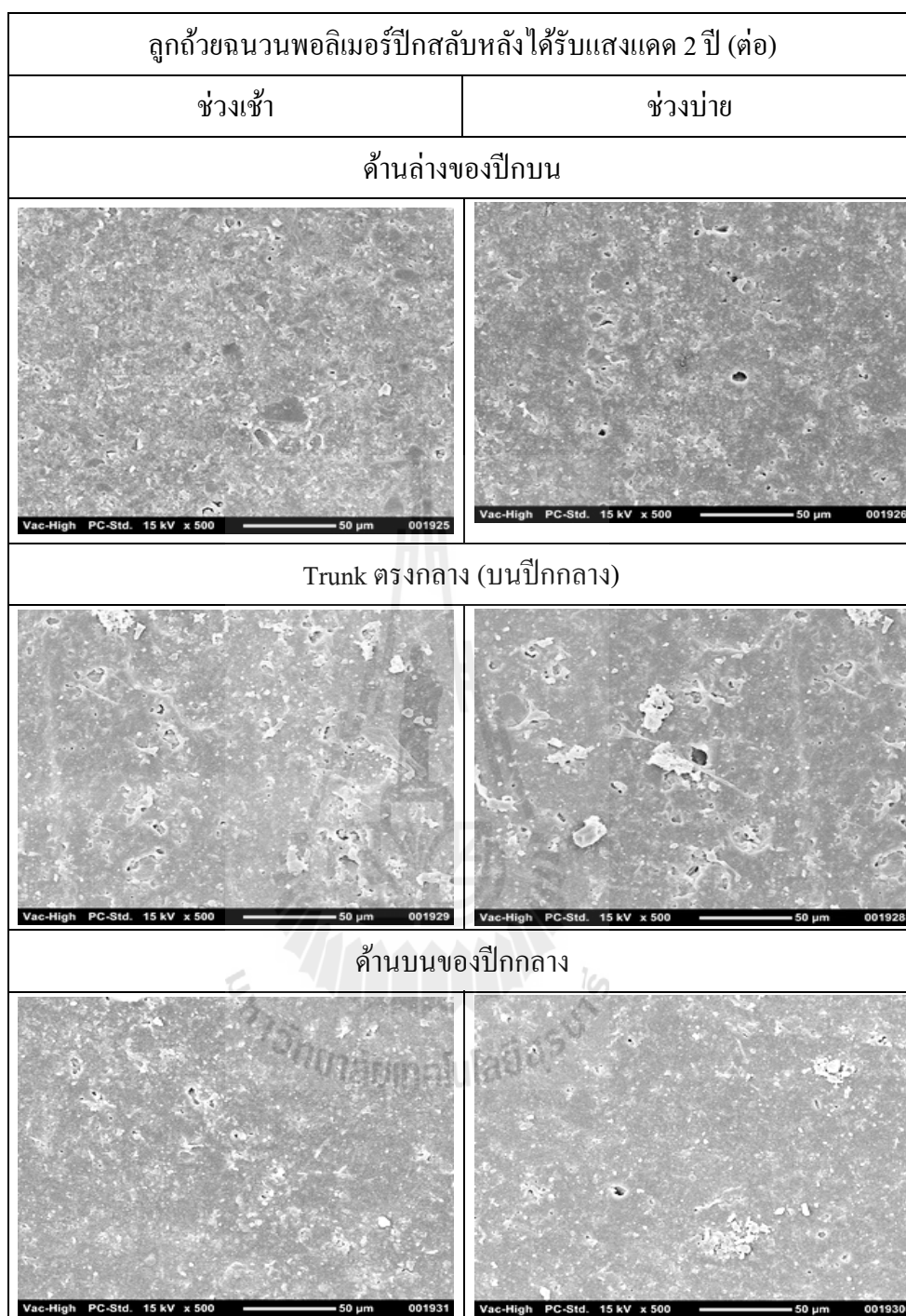
รูปที่ 6.27 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี



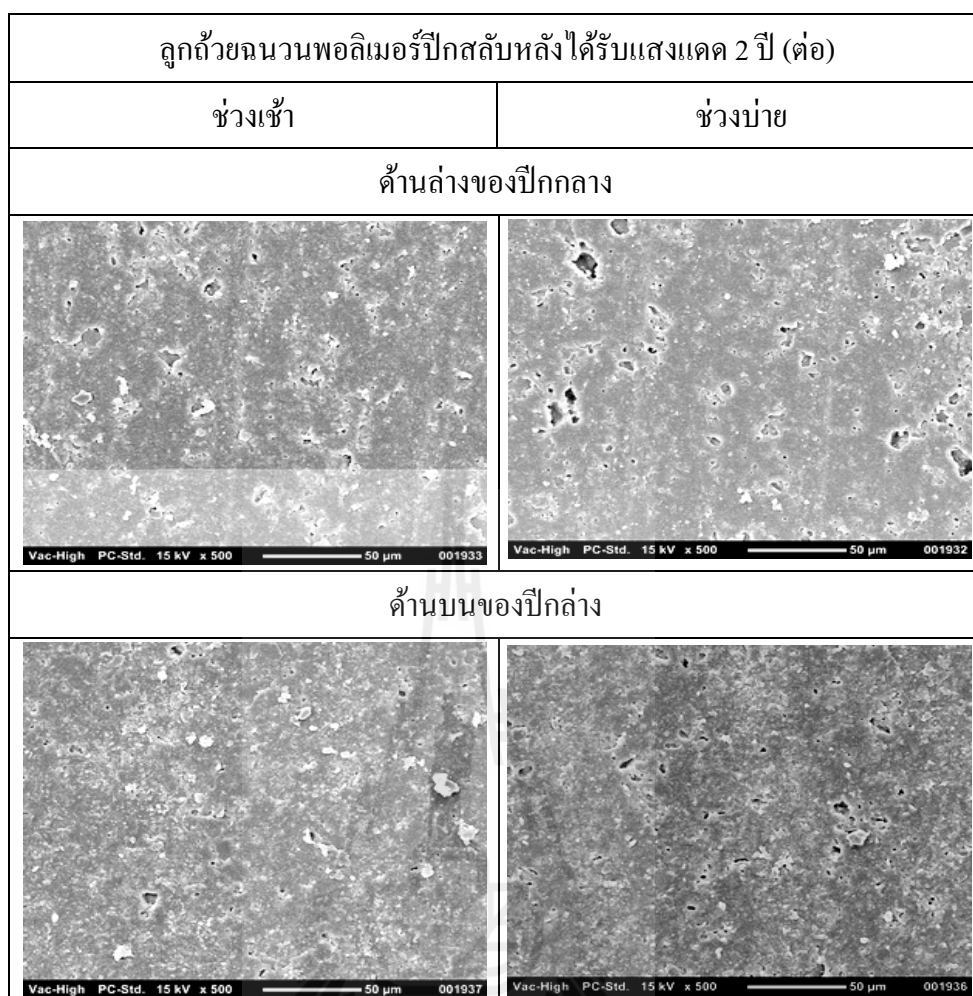
รูปที่ 6.27 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



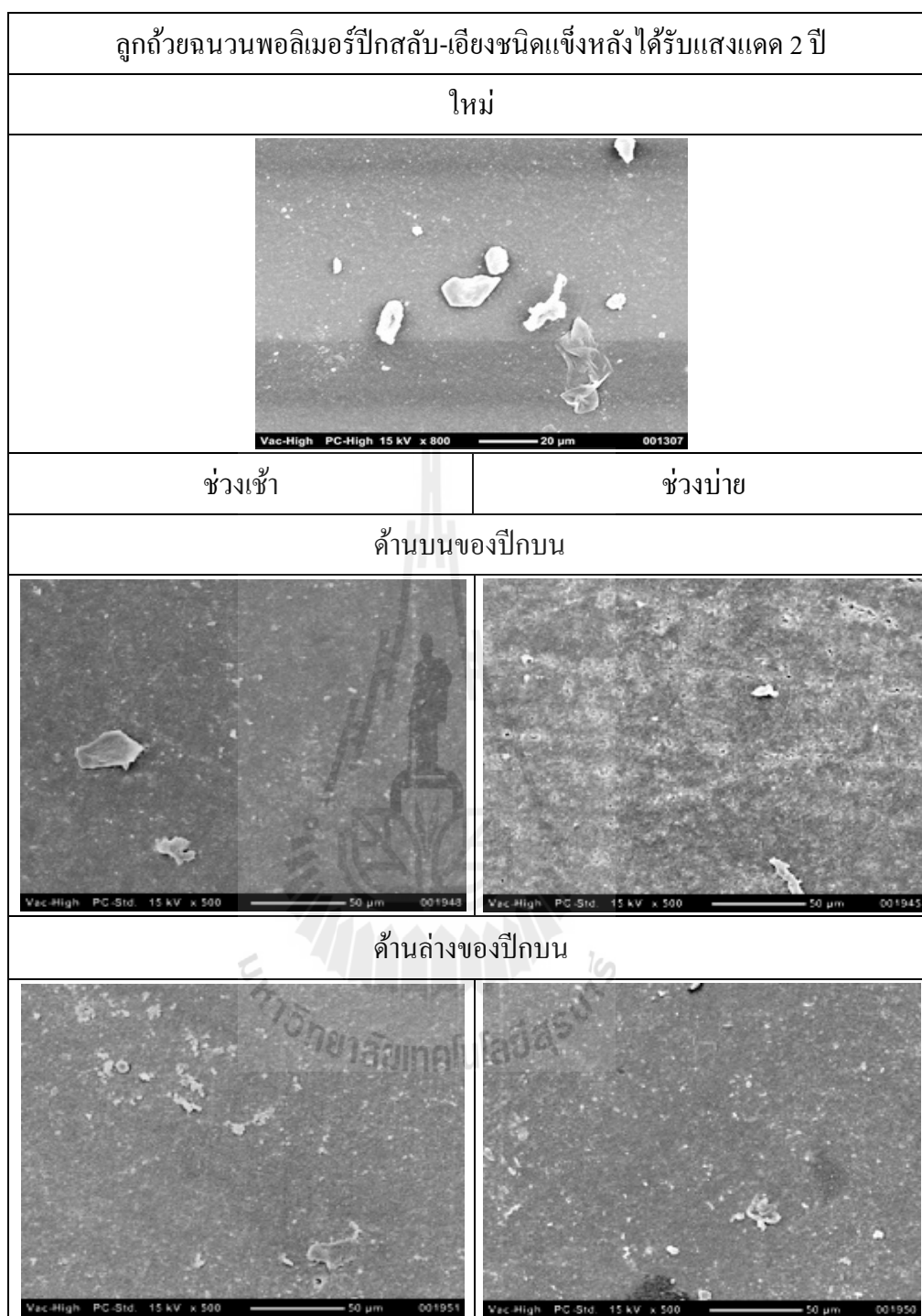
รูปที่ 6.28 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี



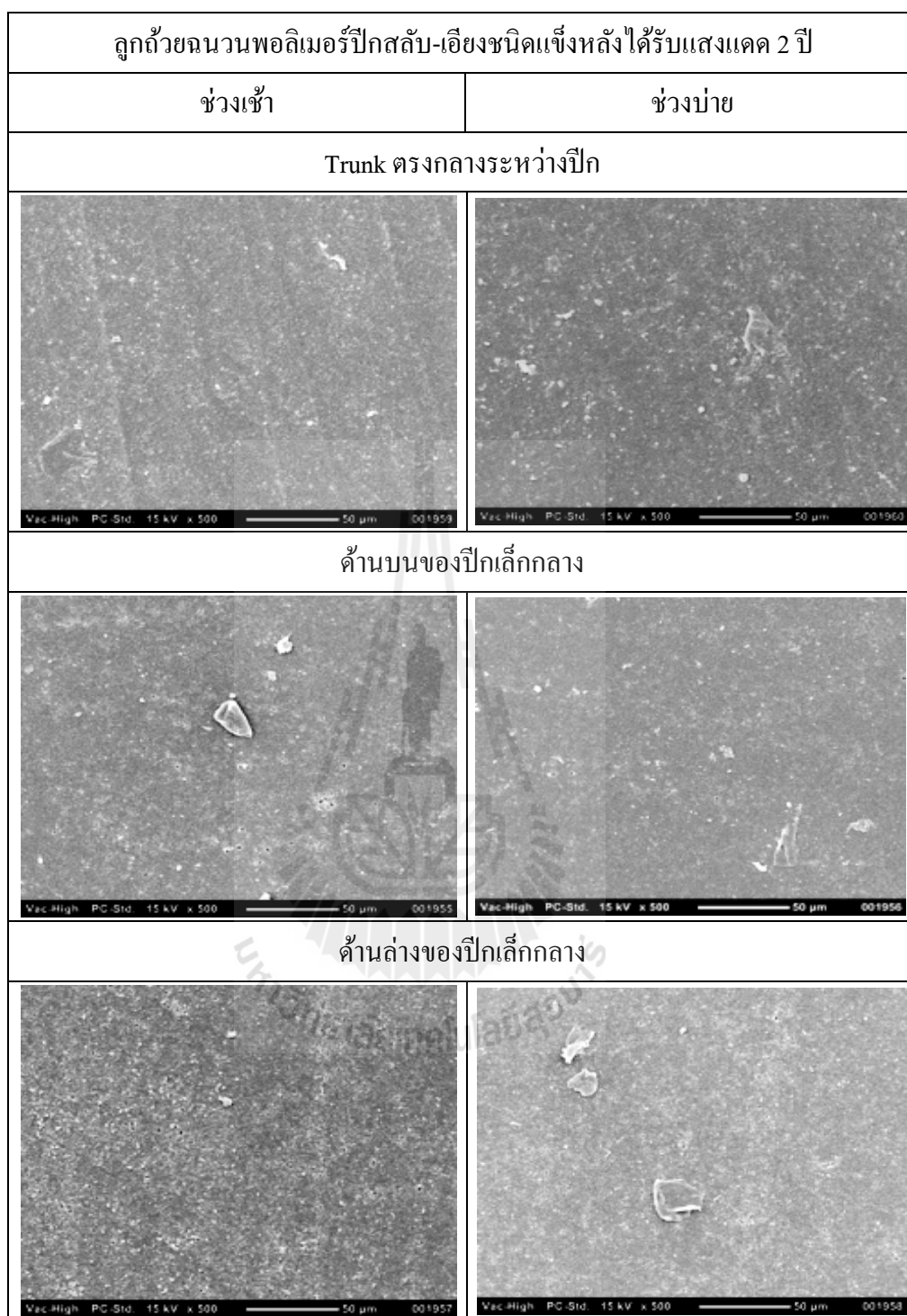
รูปที่ 6.28 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



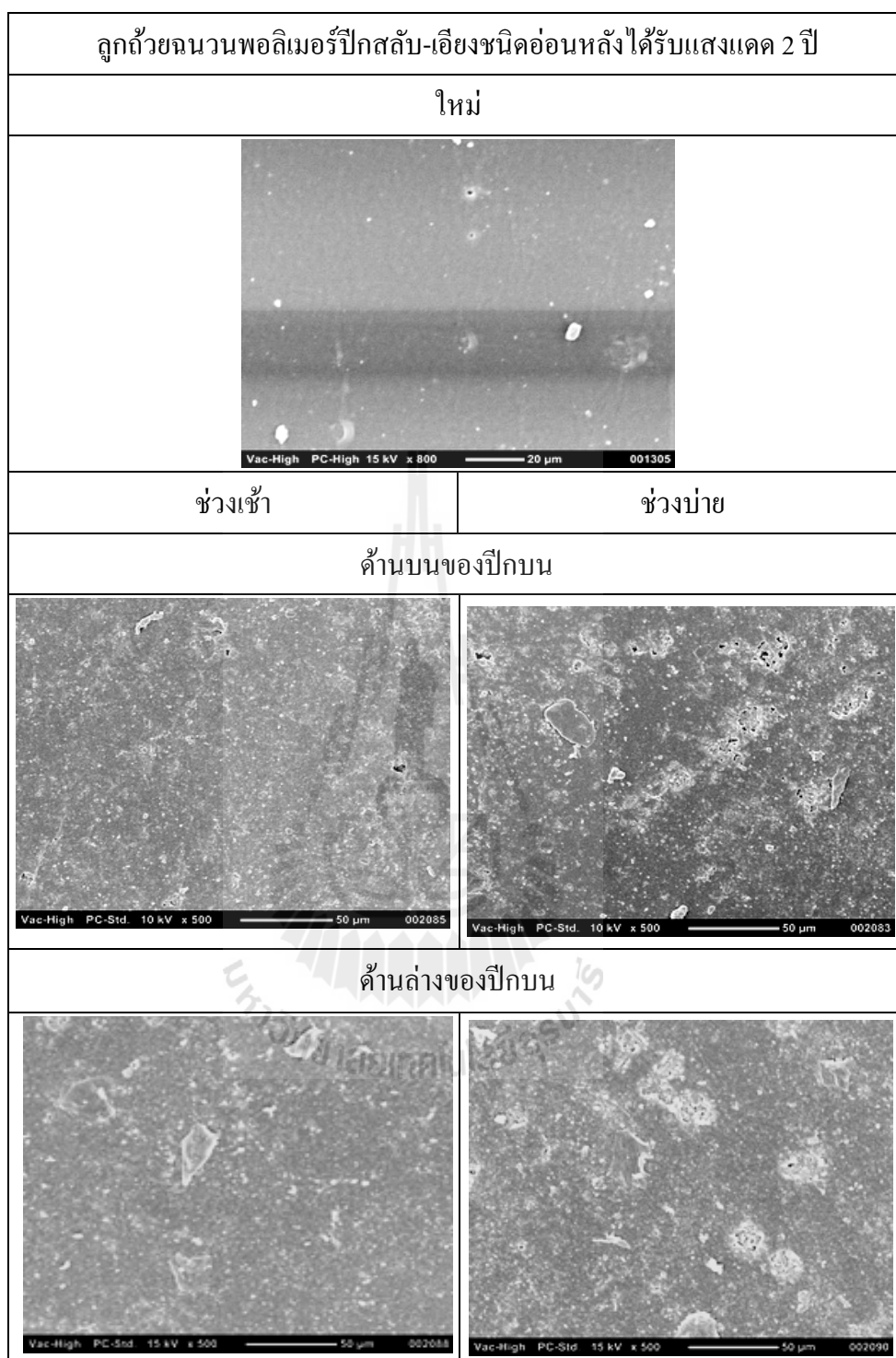
รูปที่ 6.28 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



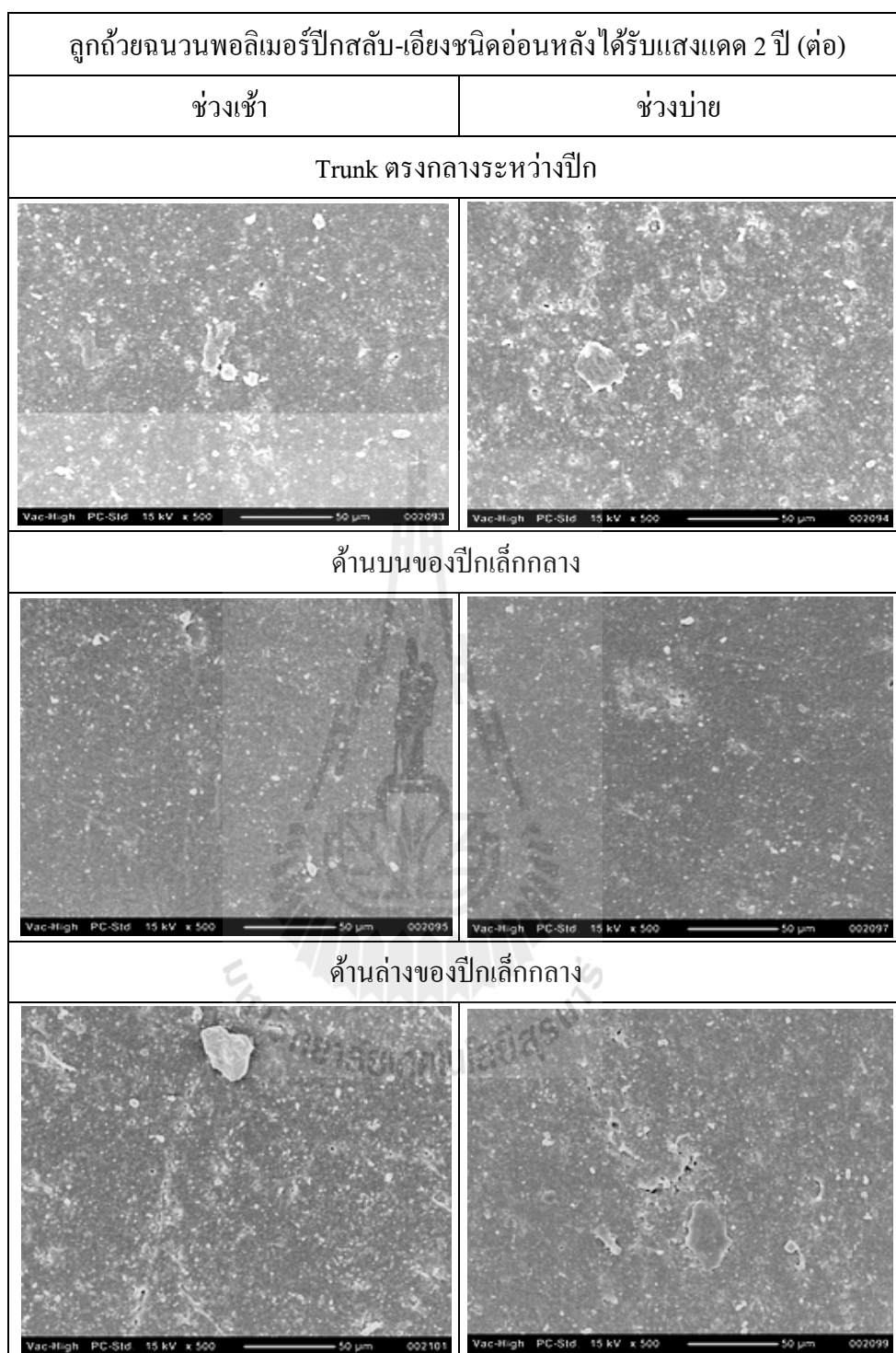
รูปที่ 6.29 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี



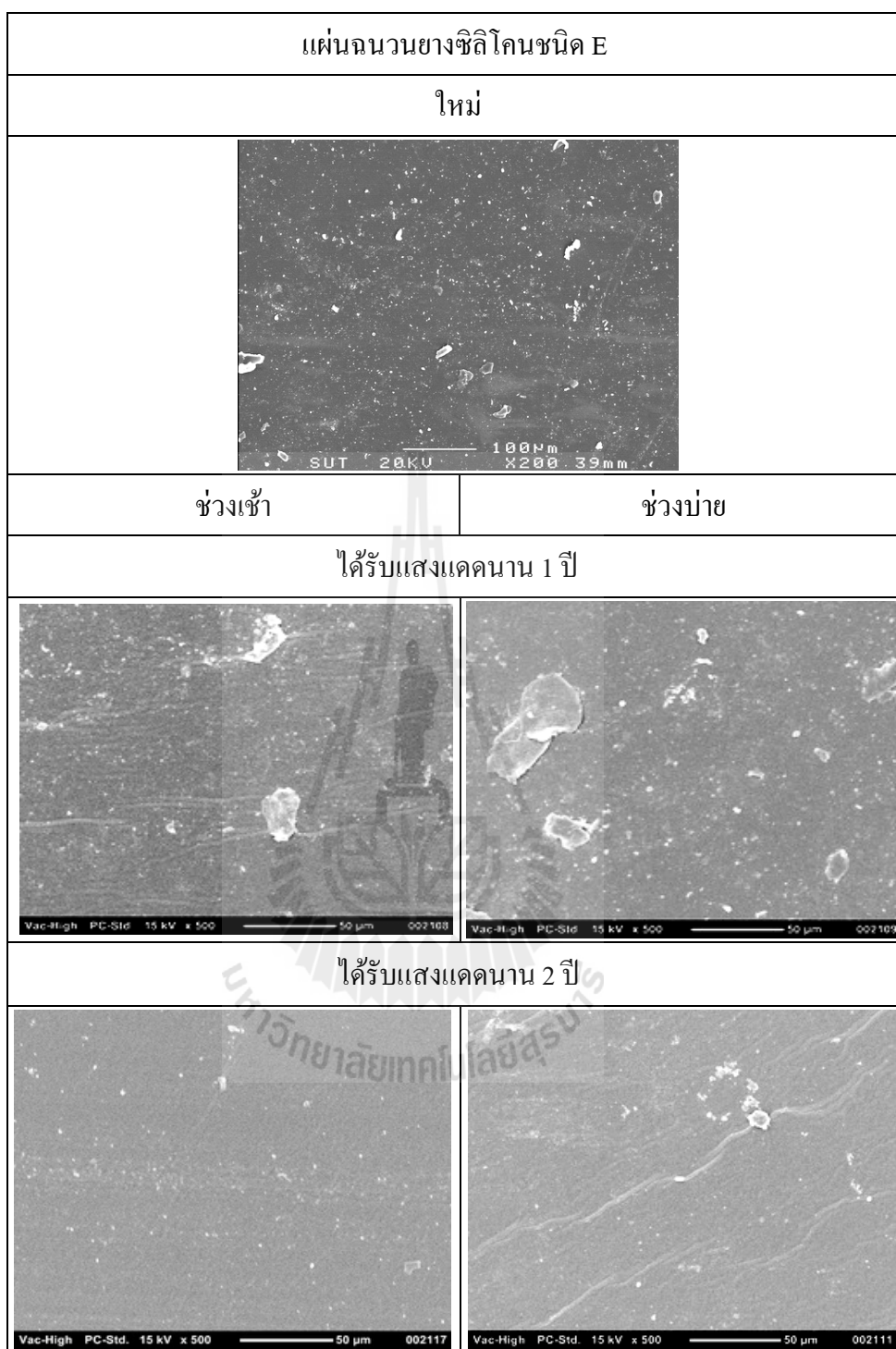
รูปที่ 6.29 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



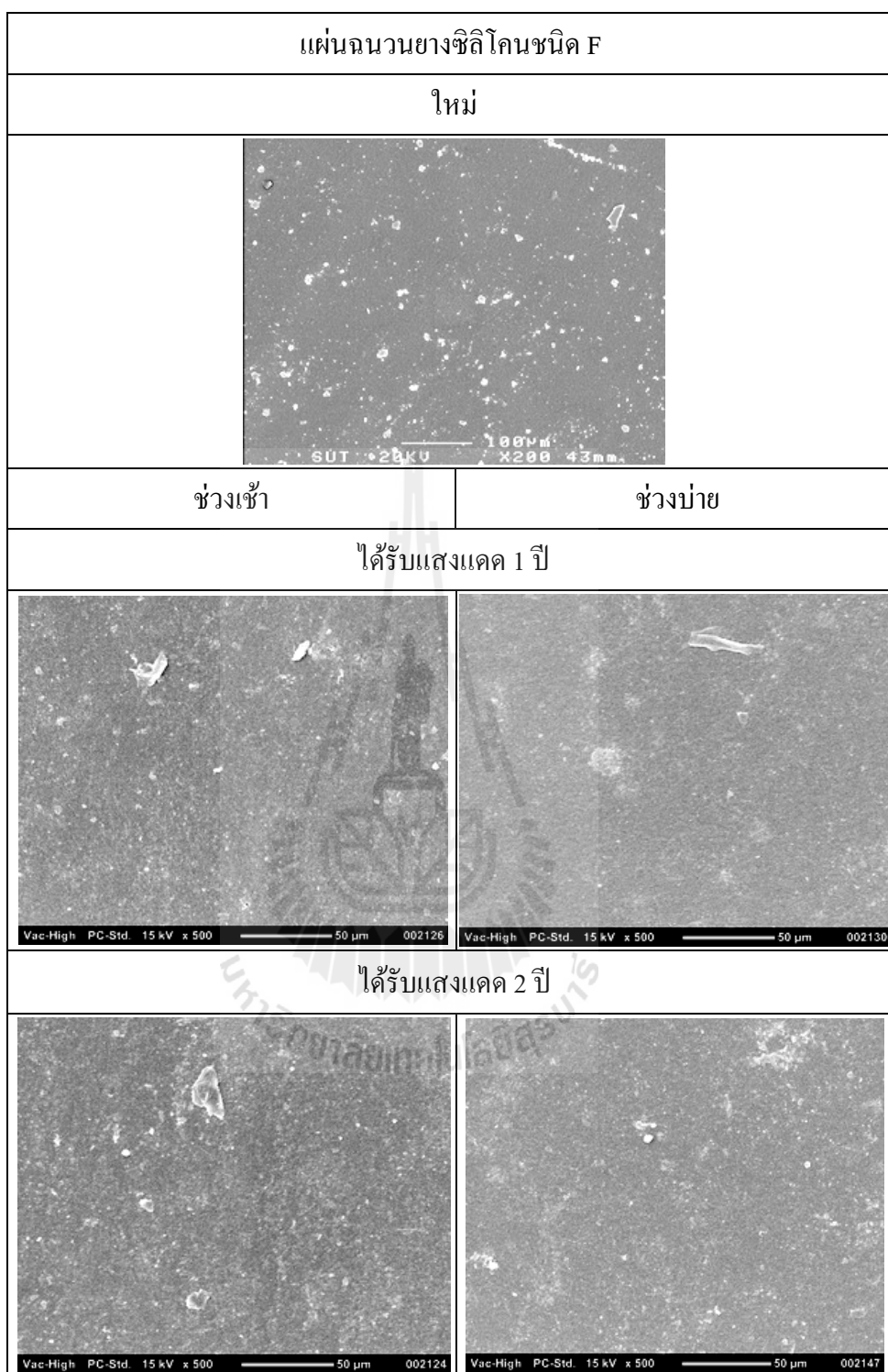
รูปที่ 6.30 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี



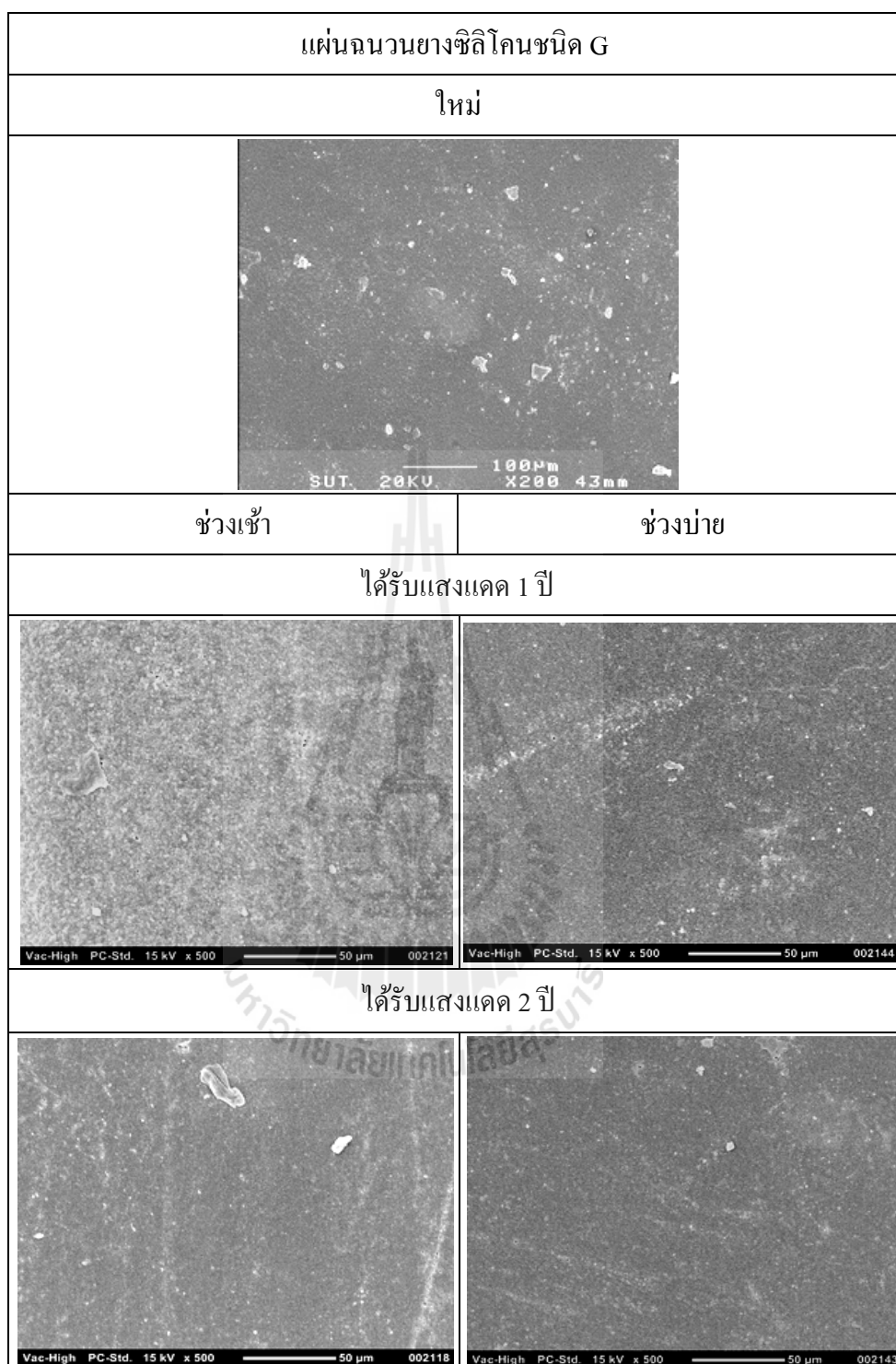
รูปที่ 6.30 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)



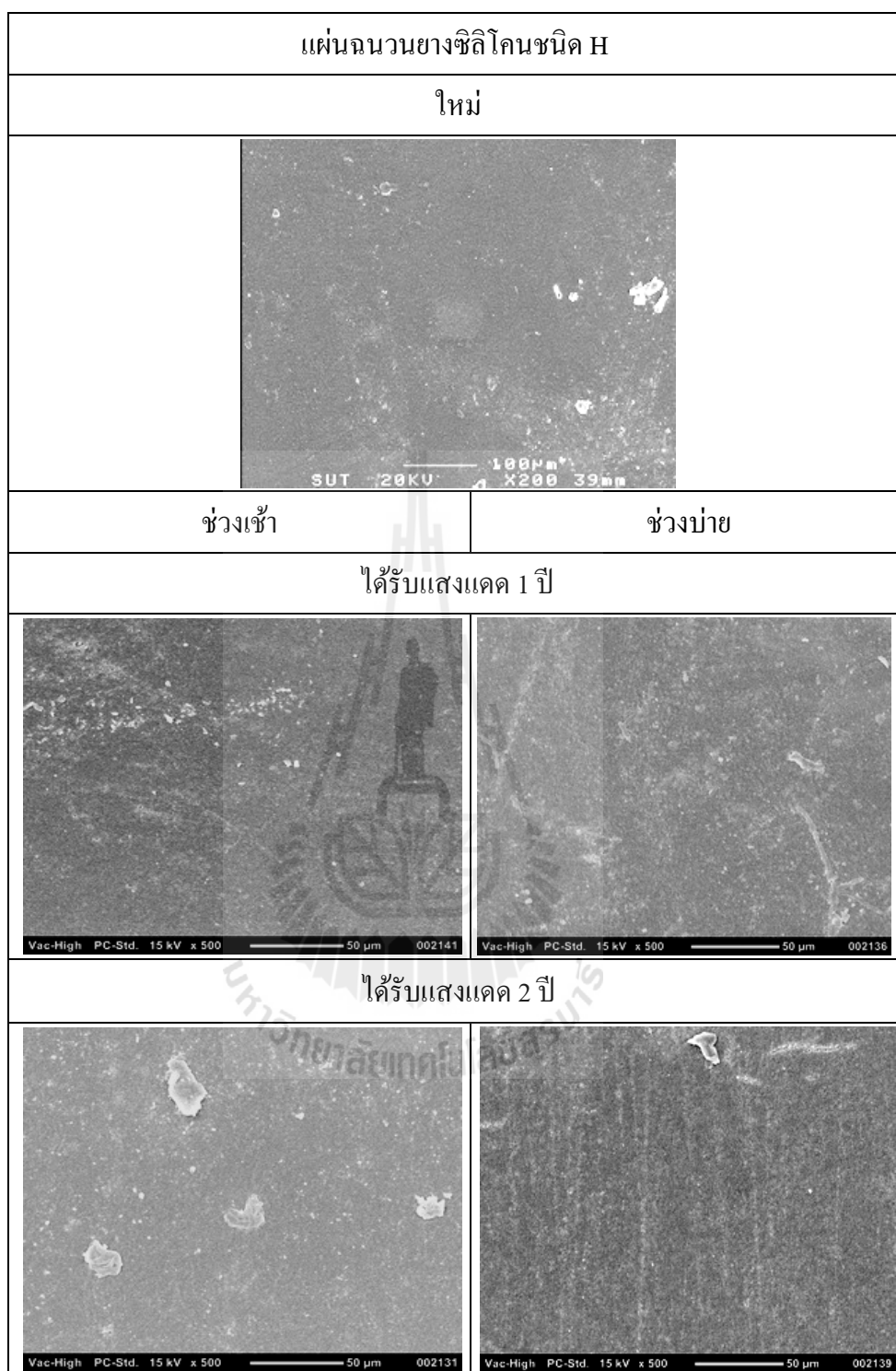
รูปที่ 6.31 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E หลังได้รับแสงแดด 2 ปี



รูปที่ 6.32 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด F หลังได้รับแสงแดด 2 ปี



รูปที่ 6.33 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G หลังได้รับแสงแดด 2 ปี



รูปที่ 6.34 การวิเคราะห์ด้วย SEM ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด H หลังได้รับแสงแดด 2 ปี

6.2.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานได้สัมผัสกับความร้อน อาจจะเป็นจากแสงแดด การเกิดอาร์กแถบแห้ง การคืบซาร์จหรือจากปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้สภาพของเนื้อยางซิลิโคนเกิดการเปลี่ยนแปลง เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 6.35



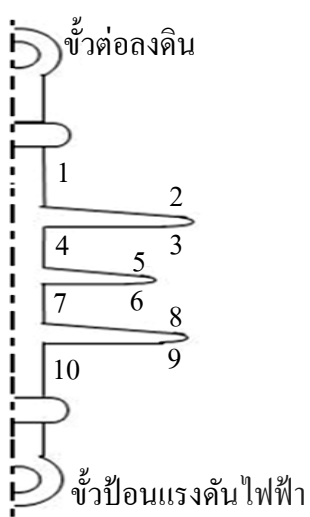
รูปที่ 6.35 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน

- การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

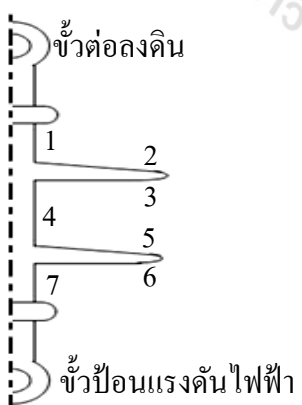
หลังจากการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์ครบ 1000 ชั่วโมง ทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความแข็ง จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (ตัวอย่างใหม่) และตำแหน่งด้านขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าความแข็งมากกว่าส่วนอื่น ๆ ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 6.13, 6.14 และ 6.15

สำหรับค่าความแข็งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในตารางที่ 6.16 หลังการทดสอบพบว่า ฉนวนยางซิลิโคนมีความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ความแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากฉนวนยางซิลิโคนสัมผัสกับอุณหภูมิความร้อน ออกซิเจน หรือจากสภาวะต่าง ๆ และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ยางซิลิโคนเกิดการเชื่อมโยงหรือเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลมากขึ้น สาเหตุดังกล่าวสามารถทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดความแข็งและดึงตัวขึ้นได้

ตารางที่ 6.13 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	ค่าความแข็งแรง
	ใหม่
	1
	2
	3
	4
	5
	6
	7
	8
	9
	10

ตารางที่ 6.14 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง	ค่าความแข็งแรง
	ใหม่
	1
	2
	3
	4
	5
	6
	7

ตารางที่ 6.15 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง			
ตำแหน่ง		ชนิดแข็ง	ชนิดอ่อน
	ใหม่	61.12	42.48
	1	72.88	53.36
	2	69.52	49.44
	3	65.92	55.84
	4	69.12	56.16
	5	66.40	56.96
	6	65.60	48.08
	7	67.92	59.04
	8	68.72	57.60
	9	65.04	56.88
	10	70.24	58.00
	11	65.52	58.64

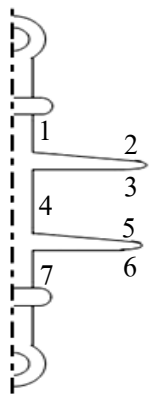
ตารางที่ 6.16 ค่าความแข็งแรงของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ค่าความแข็งแรงของแผ่นยางซิลิโคน				
ชนิด	ใหม่	หัวต่อลงดิน	กลาง	หัวป้อนแรงดัน
E	66.00	66.32	67.12	68.00
F	76.64	78.72	79.12	80.24
G	82.88	84.56	85.12	86.16
H	89.36	91.52	91.36	92.56

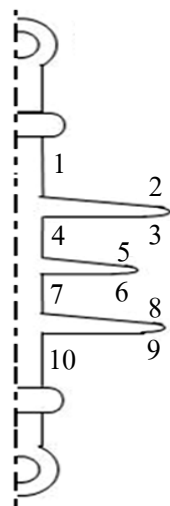
- การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

ค่าความแข็งแรงของยางซิลิโคนหลังการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 6.17 ถึงตารางที่ 6.20 พบว่า ทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งที่สัมผัสกับแสงแดดตอนเช้าและตอนบ่าย พบว่า ในตำแหน่งต่าง ๆ ของทั้งสองฝั่ง มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกันโดยไม่แตกต่างกันมากนัก

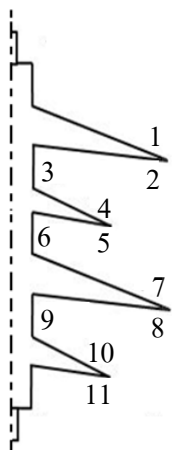
ตารางที่ 6.17 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าความแข็งแรงระยะเวลา 2 ปี			
ตำแหน่ง		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	59.60	59.60
	1	67.04	69.04
	2	66.24	72.24
	3	68.96	70.56
	4	68.56	68.96
	5	69.28	69.36
	6	69.12	69.52
	7	60.80	63.52

ตารางที่ 6.18 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าความแข็งแรงระยะเวลา 2 ปี			
ตำแหน่ง		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	52.88	52.88
	1	65.04	65.76
	2	65.60	69.04
	3	69.12	68.56
	4	66.00	65.76
	5	69.20	69.52
	6	69.12	70.56
	7	63.12	61.84
	8	69.52	70.96
	9	69.04	70.00
	10	60.24	61.52

ตารางที่ 6.19 ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าความแข็งแรงของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี					
ตำแหน่ง		ชนิดอ่อน		ชนิดแข็ง	
		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	42.48	42.48	61.12	61.12
	1	59.76	57.28	72.72	72.16
	2	57.60	56.32	71.76	72.48
	3	45.04	49.92	62.72	65.28
	4	55.36	56.64	69.52	68.88
	5	53.04	56.96	65.12	65.12
	6	45.20	45.52	62.96	63.20
	7	57.60	56.72	75.36	73.20
	8	57.20	56.40	70.72	66.08
	9	51.92	51.28	63.04	69.28
	10	57.36	57.36	69.36	69.28
	11	56.64	56.72	66.64	66.00

ตารางที่ 6.20 ค่าความแข็งแรงของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าความแข็งแรงของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน					
ตำแหน่ง	เวลา (เดือน)	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
ใหม่	-	66.00	76.64	82.88	89.36
ช่วงเช้า	6	66.16	77.52	83.12	89.84
	9	67.68	78.00	85.12	90.88
	12	66.82	79.36	85.28	90.80
	15	68.16	80.48	87.20	93.52
	18	68.80	80.00	86.56	93.68
	21	68.48	78.88	85.84	89.52
	24	68.64	78.96	86.16	90.24

ตารางที่ 6.20 ค่าความแข็งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)

ค่าความแข็งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน					
ตำแหน่ง	เวลา (เดือน)	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
ใหม่	-	66.00	76.64	82.88	89.36
ช่วงบ่าย	6	66.23	76.96	83.68	90.48
	9	67.92	78.00	85.44	89.80
	12	66.00	78.88	84.88	90.72
	15	68.64	80.32	87.20	93.52
	18	69.04	80.16	86.32	93.76
	21	68.64	79.36	85.92	89.76
	24	68.96	79.68	86.32	90.64

6.2.6 การวิเคราะห์ค่าความขรุขระ

หลังจากการทดสอบ ฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์ความขรุขระเพื่อตรวจสอบความเสียหายบนพื้นผิว ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย Ra โดยค่าเฉลี่ย Ra ที่วัดได้ สามารถอธิบายได้ว่า ถ้ามีค่า Ra มากตัวอย่างทดสอบก็就会有ความขรุขระมาก แต่ถ้าค่า Ra น้อย นั่นคือ ตัวอย่างทดสอบมีความขรุขระน้อย นอกจากนี้ ความขรุขระดังกล่าวจะสื่อถึงความเสื่อมสภาพบนพื้นผิวของฉนวนอีกด้วย เครื่องวัดค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 6.36



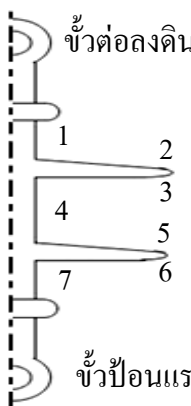
รูปที่ 6.36 ลักษณะของเครื่องวัดค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน

- การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

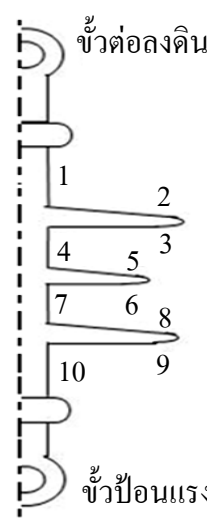
ค่าความขรุขระของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ หลังจากการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 6.21 ถึงตารางที่ 6.23 หลังจากการทดสอบพบว่าพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ ส่วนใหญ่บริเวณลำตัวจะมีความขรุขระมากกว่าบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้ ยังพบว่า บริเวณปีกกลาง (ปีกเล็ก) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ มีความขรุขระมากเช่นเดียวกับบริเวณของลำตัวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ในกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน พบว่า บริเวณที่มีค่าความขรุขระมากที่สุดเป็นบริเวณด้านหัวป้อนแรงดัน ซึ่งพบที่แผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 6.24 โดยค่าความขรุขระที่เกิดขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากบริเวณดังกล่าวเกิดอาร์กแฉกแฉงและเกิดดีสชาร์จที่รุนแรงและบ่อยครั้ง มีผลทำให้ผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดการกัดกร่อนและเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวไฟ ความขรุขระที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนยางซิลิโคนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ชี้ได้ว่าพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเสื่อมอายุลง

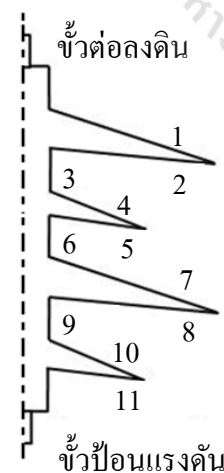
ตารางที่ 6.21 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง		ค่าเฉลี่ย Ra (μm)
	ใหม่	0.39
	1	10.40
	2	0.48
	3	2.50
	4	4.82
	5	3.11
	6	5.32
	7	13.64

ตารางที่ 6.22 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง		ค่าเฉลี่ย Ra (μm)
	ใหม่	0.39
	1	9.23
	2	2.49
	3	9.47
	4	13.08
	5	10.62
	6	16.71
	7	13.81
	8	2.18
	9	1.17
	10	9.83

ตารางที่ 6.23 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง (μm)			
ตำแหน่ง		ชนิดแข็ง	ชนิดอ่อน
	ใหม่	0.34	0.34
	1	3.76	3.19
	2	6.17	1.54
	3	16.73	16.03
	4	8.76	11.12
	5	12.14	10.00
	6	2.66	10.78
	7	0.63	9.85
	8	8.57	5.08
	9	15.43	17.07
	10	2.97	9.42
	11	6.77	3.42

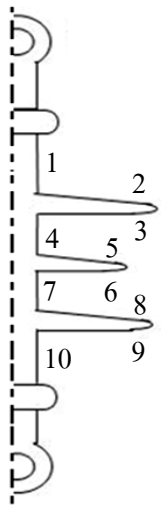
ตารางที่ 6.24 ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นยางซิลิโคน (μm)				
ชนิด	ใหม่	ขั้วต่อลงดิน	ตรงกลาง	ขั้วป้อนแรงดัน
E	0.32	0.77	1.63	2.77
F	0.33	1.56	2.12	2.55
G	0.35	0.84	1.07	2.09
H	0.33	0.57	0.73	1.68

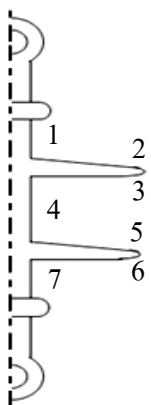
• การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

สำหรับค่าความขรุขระในกรณีการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ หลังการทดสอบพบว่า ทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แต่ละชนิด จะมีค่าความขรุขระต่างกันเพียงเล็กน้อย ค่าดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากคราบสกปรกที่ติดอยู่บนผิวของฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในตารางที่ 6.25 ถึงตารางที่ 6.28

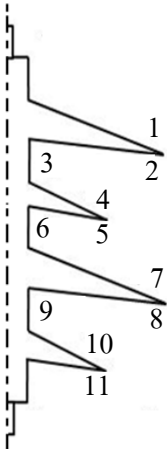
ตารางที่ 6.25 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าเฉลี่ย Ra หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (μm)			
ตำแหน่ง	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย	
	ใหม่	0.39	
	1	1.76	1.62
	2	0.93	0.95
	3	0.64	0.70
	4	1.18	1.25
	5	0.58	0.67
	6	0.86	0.86
	7	1.54	1.79
	8	0.88	0.85
	9	0.78	0.72
	10	1.33	1.33

ตารางที่ 6.26 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าเฉลี่ย Ra หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (μm)			
ตำแหน่ง		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	0.39	
	1	1.15	1.35
	2	0.88	0.91
	3	0.84	0.91
	4	0.97	0.94
	5	0.69	0.69
	6	0.72	0.78
	7	1.01	0.82

ตารางที่ 6.27 ค่าเฉลี่ย Ra ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าเฉลี่ย Ra หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (μm)					
ตำแหน่ง		ชนิดแข็ง		ชนิดอ่อน	
		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	0.34		0.34	
	1	0.53	0.41	0.47	0.55
	2	0.76	0.59	0.45	0.53
	3	0.63	0.67	0.57	0.79
	4	0.64	0.64	0.89	0.52
	5	0.63	0.66	0.44	0.57
	6	0.67	0.65	0.62	0.68
	7	0.60	0.48	0.45	0.45
	8	0.59	0.46	0.55	0.40
	9	0.63	0.72	0.59	0.47
	10	0.51	0.41	0.49	0.46
	11	0.46	0.43	0.45	0.44

ตารางที่ 6.28 ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

ค่าเฉลี่ย Ra ของแผ่นยางซิลิโคน (μm)					
ตำแหน่ง	เวลา (เดือน)	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
ช่วงเช้า	ใหม่	0.32	0.33	0.35	0.33
	6	0.68	0.43	0.64	0.36
	9	0.54	0.38	0.35	0.71
	12	0.34	0.46	0.38	0.52
	15	0.39	0.35	0.35	0.36
	18	0.56	0.69	0.49	0.85
	21	0.55	0.59	0.50	0.44
	24	1.06	0.88	0.56	0.45
ช่วงบ่าย	6	0.35	0.63	0.84	0.45
	9	0.36	0.63	0.71	0.35
	12	0.37	0.46	0.53	0.33
	15	0.36	0.35	0.36	0.34
	18	0.54	0.92	0.55	0.87
	21	0.90	0.53	0.62	0.64
	24	0.92	0.97	0.58	0.63

6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

6.3.1 การใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

การวิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธี ATR-FTIR เป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนยางซิลิโคน โดยอาศัยการสั่นของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave Number กับการส่งผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum หรือ IR Spectrum) สำหรับช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์ยางซิลิโคนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังแสดงในตารางที่ 6.29 สำหรับการลดลงของอินฟราเรดสเปกตรัมในช่วงดังกล่าว บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของ

พันธะเคมีที่สำคัญของฉนวนยางซิลิโคนและการเปลี่ยนแปลงนี้อาจหมายถึง การเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-O นั้นหมายถึง การแตกหักหรือแยกตัวของสายโซ่หลัก สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-CH₃ นั้นหมายถึง การสลายตัวของสายโซ่ข้าง โดยพันธะ Si-O และ Si-CH₃ ก็คือ โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของฉนวนยางซิลิโคนนั่นเอง เมื่อพันธะเคมีทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อมมีผลกับโครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของฉนวนยางซิลิโคนด้วย การเปลี่ยนแปลงหรือระดับความเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน จะเปรียบเทียบระหว่างยอดของกราฟในช่วงคลื่นจากการสั่นของพันธะเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ ถ้าค่ายอดสั้นลงมาก ๆ นั้นหมายถึง ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุลงมากด้วย ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ดังแสดงในรูปที่ 6.37

ตารางที่ 6.29 ช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคน

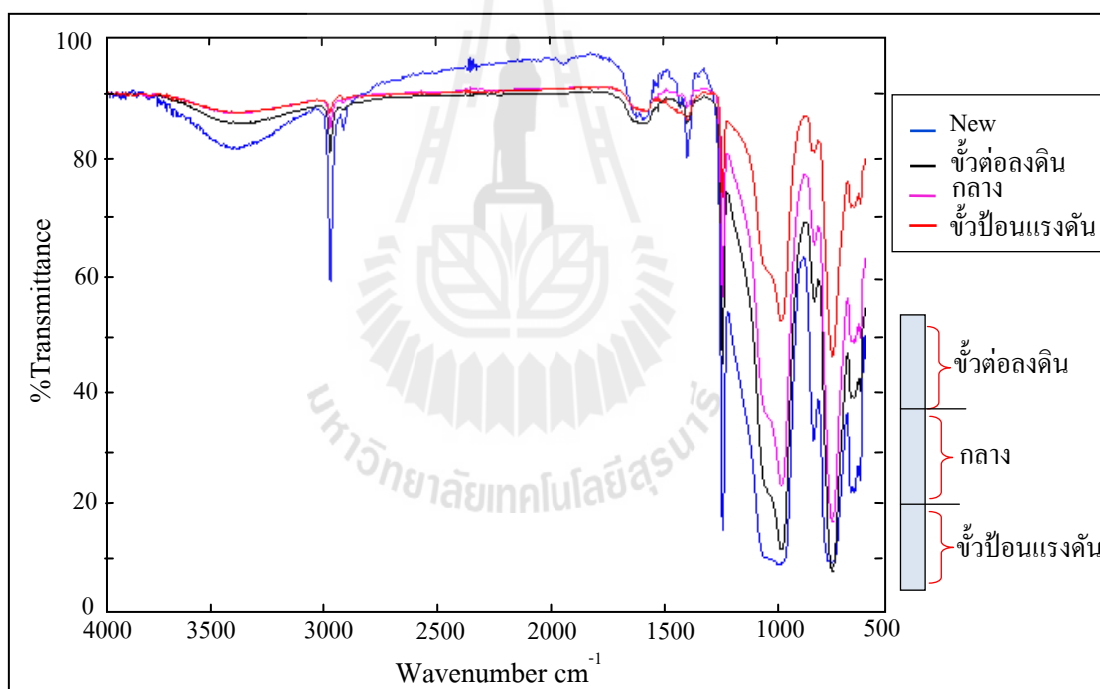
พันธะเคมี	Wave Number (cm ⁻¹)
Si-O	1100-1000
Si-CH ₃	1270-1255
C-H ในเมทิล (CH ₃)	2962-2960
OH ใน ATH	3700-3200



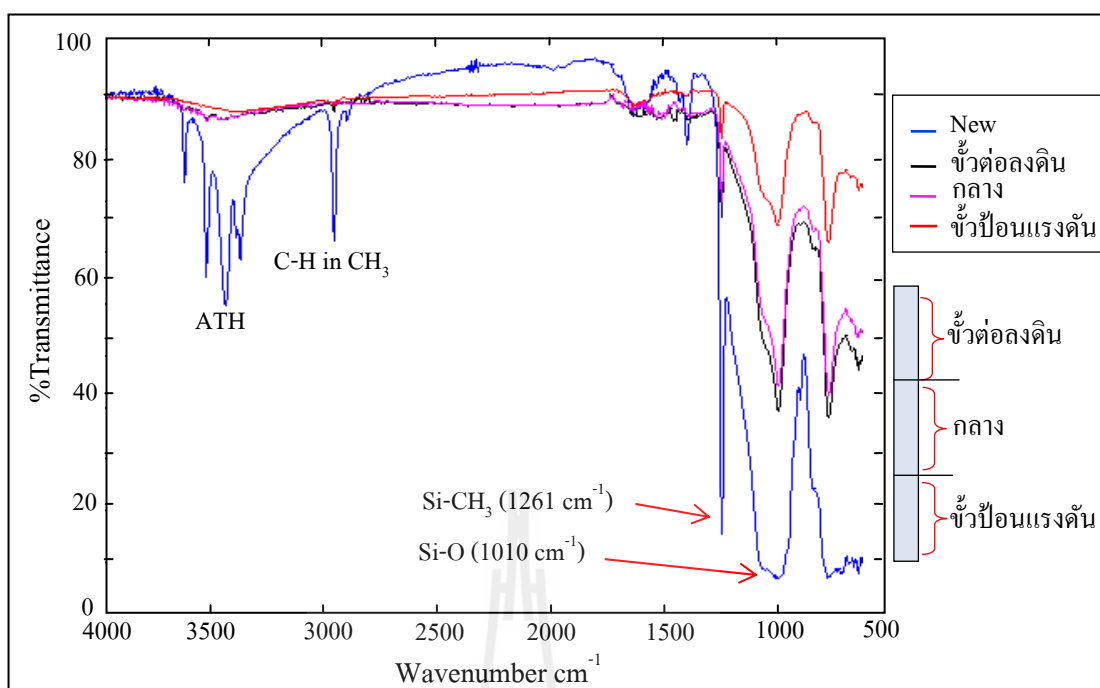
รูปที่ 6.37 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ฉนวนยางซิลิโคนด้วยเทคนิค ATR-FTIR

- การทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ

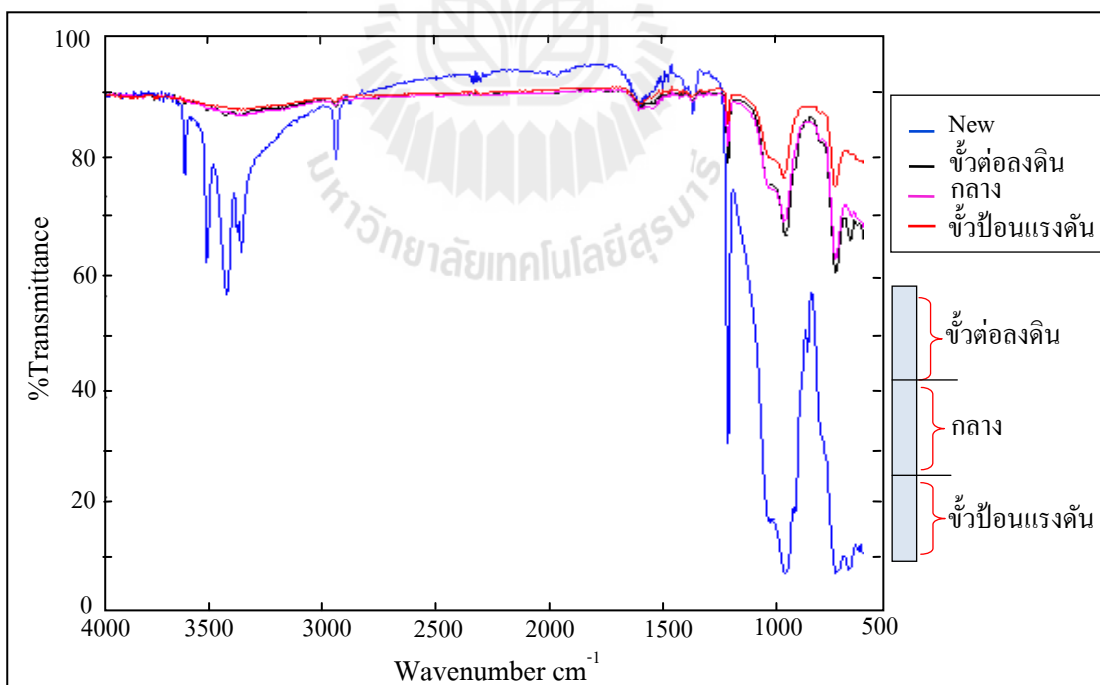
หลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์ 1000 ชั่วโมง ทั้งลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนและแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ซึ่งจากกราฟพบว่า ค่ายอดที่ชี้ลงของพันธะ Si-O และ Si-CH₃ ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ มีค่าลดลงหรือสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (เส้นสีน้ำเงิน) ดังแสดงในรูปที่ 6.38 ถึงรูปที่ 6.41 และยังพบอีกว่าบริเวณด้านขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า มีค่าลดลงสั้นที่สุด รองลงมาคือด้านตรงกลางและด้านต่อลงดินตามลำดับ และช่วงพันธะ OH (3700-3200 cm⁻¹) ในสารอะลูมินาไตรไฮเดรตมีเส้นกราฟสั้นลง สาเหตุการลดลงของพันธะ OH ในอะลูมินาไตรไฮเดรต มาจากพื้นผิวของยางซิลิโคนเกิดปฏิกิริยาการดึงน้ำออกจากโมเลกุล อาจเนื่องจากผิวของฉนวนยางซิลิโคนได้สัมผัสกับความร้อนที่เกิดจากการดีสชาร์จ



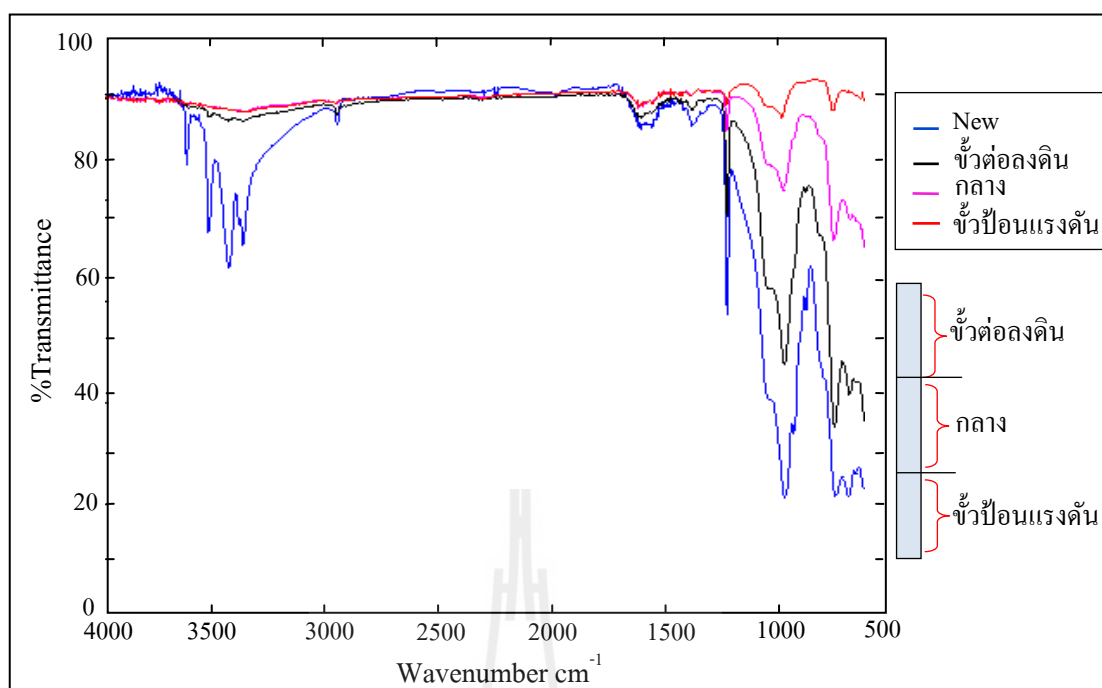
รูปที่ 6.38 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด E หลังทดสอบหมอกไอเกลือ



รูปที่ 6.39 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด F หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

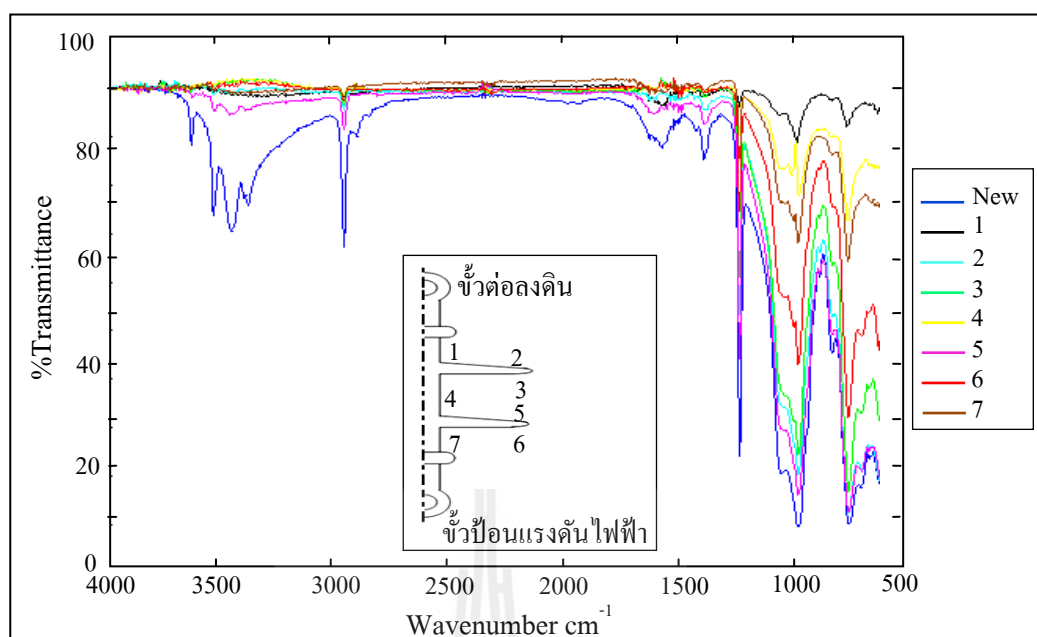


รูปที่ 6.40 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด G หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

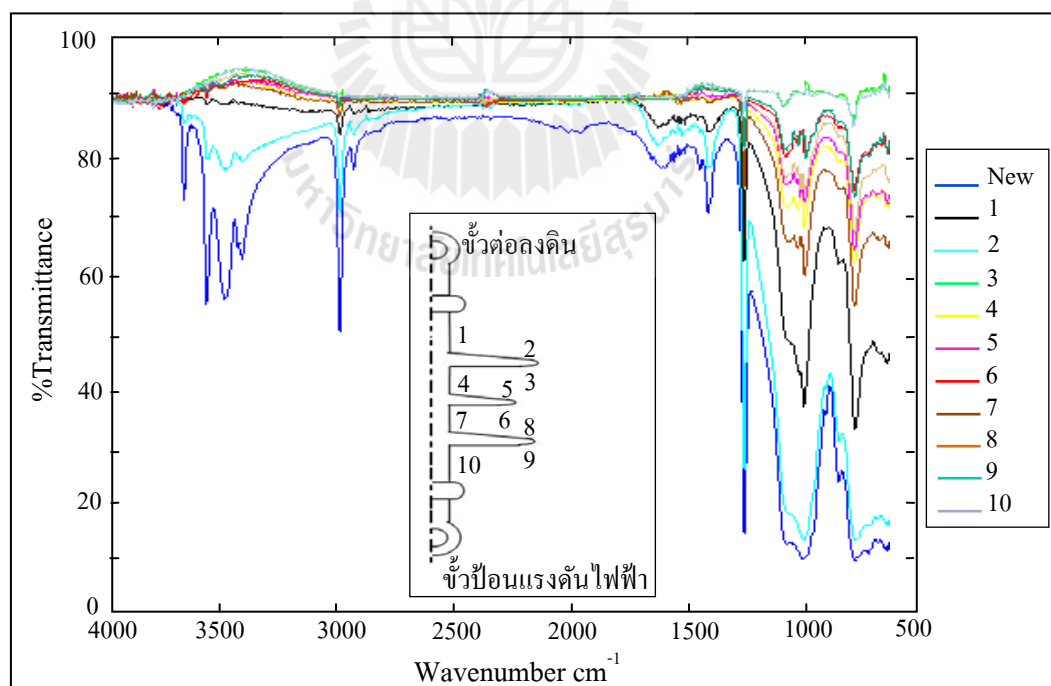


รูปที่ 6.41 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของฉนวนยางซิลิโคนชนิด H หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

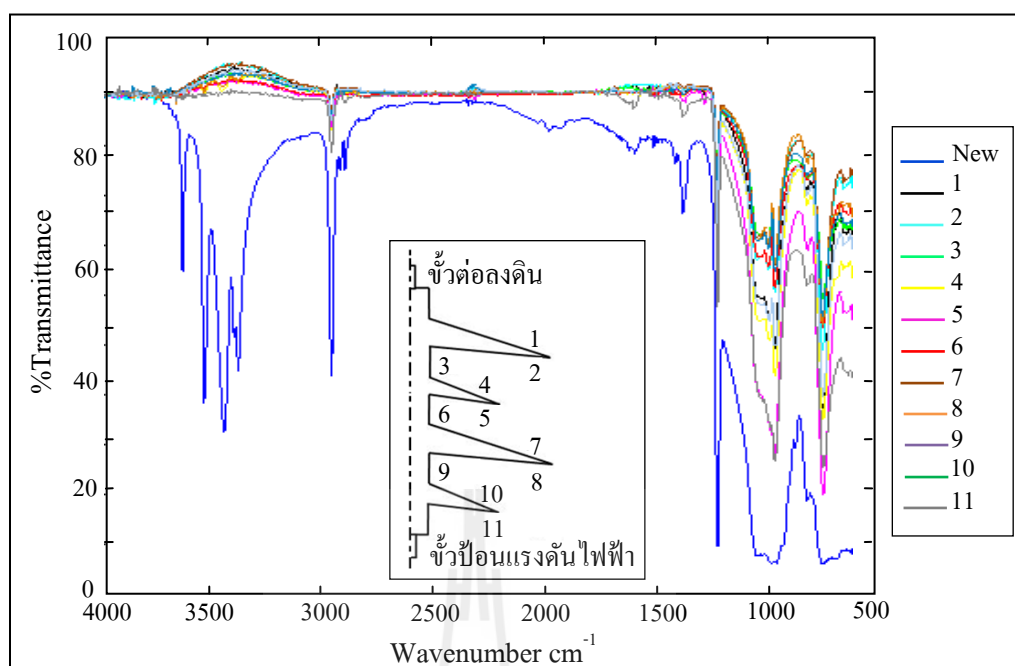
สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ หลังการทดสอบแรงเสียดทานด้วยหมอกไอเกลือประดิษฐ์ที่ 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 6.42 ถึงรูปที่ 6.45 จากการวิเคราะห์พบว่า บริเวณด้านที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าและบริเวณลำตัวของลูกถ้วย ฉนวนพอลิเมอร์มีค่ายอดของพันธะ Si-O และ Si-CH₃ ที่ชี้ลงสั้นกว่าบริเวณปีก อาจเป็นเพราะ บริเวณพื้นผิวของลำตัวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เกิดการกัดกร่อนมากกว่าบริเวณปีก เนื่องจากว่า บริเวณลำตัวจะมีความเครียดสนามไฟฟ้ามากกว่าบริเวณปีก ซึ่งทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและเกิด ดิสชาร์จได้ง่ายและรุนแรงกว่าบริเวณอื่น ๆ ผลดังกล่าวทำให้ยางซิลิโคนเกิดความเสื่อมสภาพลง จึงทำให้ยอดที่ชี้สั้นลง ซึ่งกล่าวได้ว่าฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุลงเช่นกัน



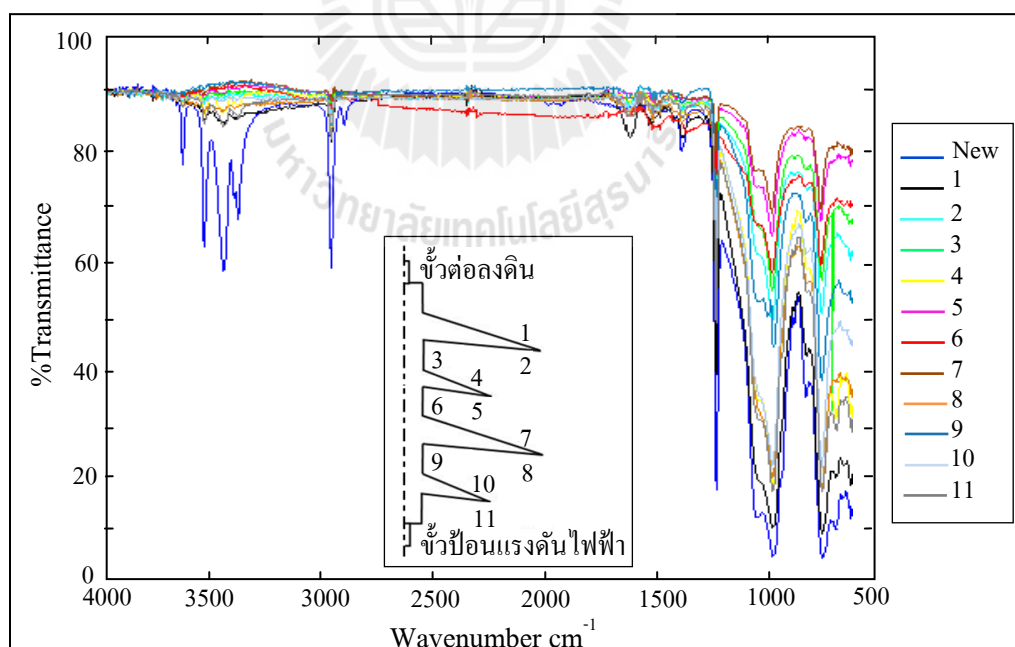
รูปที่ 6.42 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกตรง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ



รูปที่ 6.43 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปึกสลับ
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

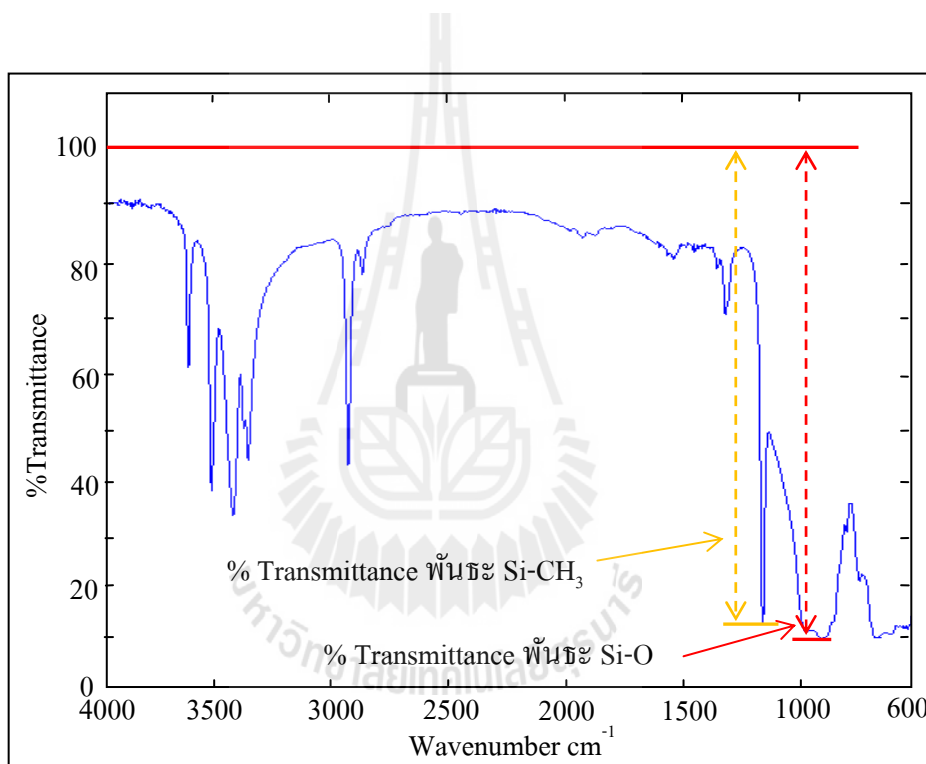


รูปที่ 6.44 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง หลังทดสอบหมอกไอเกลือ



รูปที่ 6.45 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

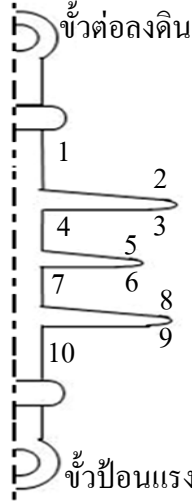
จากการวิเคราะห์จำนวนยางซิลิโคนด้วยเทคนิค ATR-FTIR ข้างต้น ข้อมูลที่อยู่ในรูปของตัวเลข % Transmittance ของพันธะ Si-CH₃ และพันธะ Si-O ของฉนวนยางซิลิโคน จะถูกนำไปคำนวณโดยการนำ % Transmittance ของพันธะ Si-CH₃ หารด้วยพันธะ Si-O นั่นคือ อยู่ในรูปของอัตราส่วน [(Si-CH₃)/(Si-O)] ซึ่งค่าอัตราส่วนของ (Si-CH₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคน ก่อนการทดสอบจะถูกกำหนดให้เป็น 100 % โดยผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละตำแหน่ง จะนำไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ สำหรับวิธีการหาค่า % Transmittance ของพันธะ Si-CH₃ และพันธะ Si-O ของฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 6.46



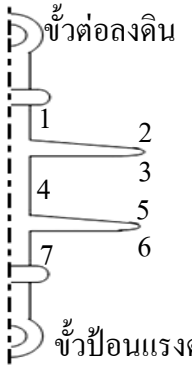
รูปที่ 6.46 วิธีการหา % Transmittance พันธะ Si-CH₃ และพันธะ Si-O ของฉนวนยางซิลิโคน

ค่าอัตราส่วนของพันธะ (Si-CH₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ ด้วยวิธีหมอกไอเกลือประคิษฐ์ โดยคำนวณค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 6.30 ถึงตารางที่ 6.32 จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ ซึ่งบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และด้านหัวป้อนแรงดันไฟฟ้าของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีค่าลดลงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าบริเวณดังกล่าวเกิดการเสื่อมอายุลง

ตารางที่ 6.30 อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง		อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) (%)
	ใหม่	100
	1	85.32
	2	87.82
	3	57.42
	4	72.83
	5	71.77
	6	69.91
	7	64.67
	8	75.87
	9	67.66
	10	65.40

ตารางที่ 6.31 อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

ตำแหน่ง		อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) (%)
	ใหม่	100
	1	57.28
	2	80.59
	3	70.07
	4	67.13
	5	89.26
	6	70.84
	7	66.29

ตารางที่ 6.32 อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง
หลังทดสอบหมอกไอเกลือ

อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง (%)			
ตำแหน่ง		ชนิดแข็ง	ชนิดอ่อน
	ใหม่	100	100
	1	63.11	58.81
	2	67.24	63.00
	3	68.04	62.11
	4	70.27	95.10
	5	92.81	96.10
	6	68.72	67.91
	7	63.61	58.83
	8	72.74	81.37
	9	73.95	68.99
	10	82.75	83.86
	11	89.61	98.02

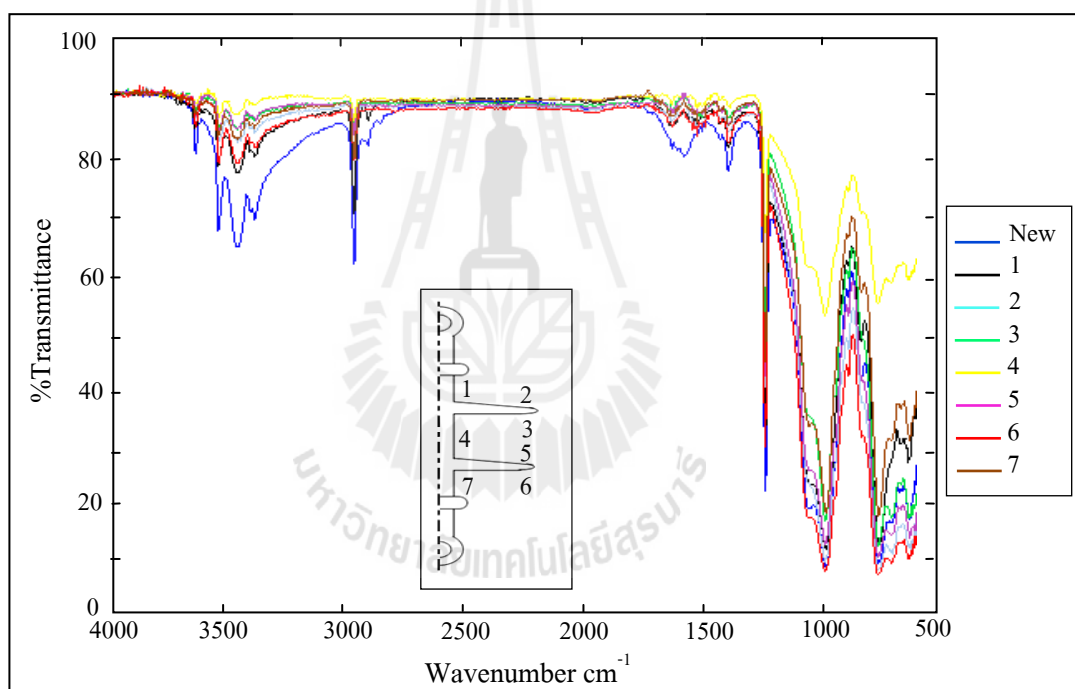
ตารางที่ 6.33 อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบหมอกไอเกลือ

อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) (%)				
ชนิด	ใหม่	ขั้วต่อลงดิน	ตรงกลาง	ขั้วป้อนแรงดัน
E	100	68.16	57.69	40.43
F	100	44.99	42.62	41.86
G	100	83.13	86.35	70.66
H	100	79.19	54.68	53.03

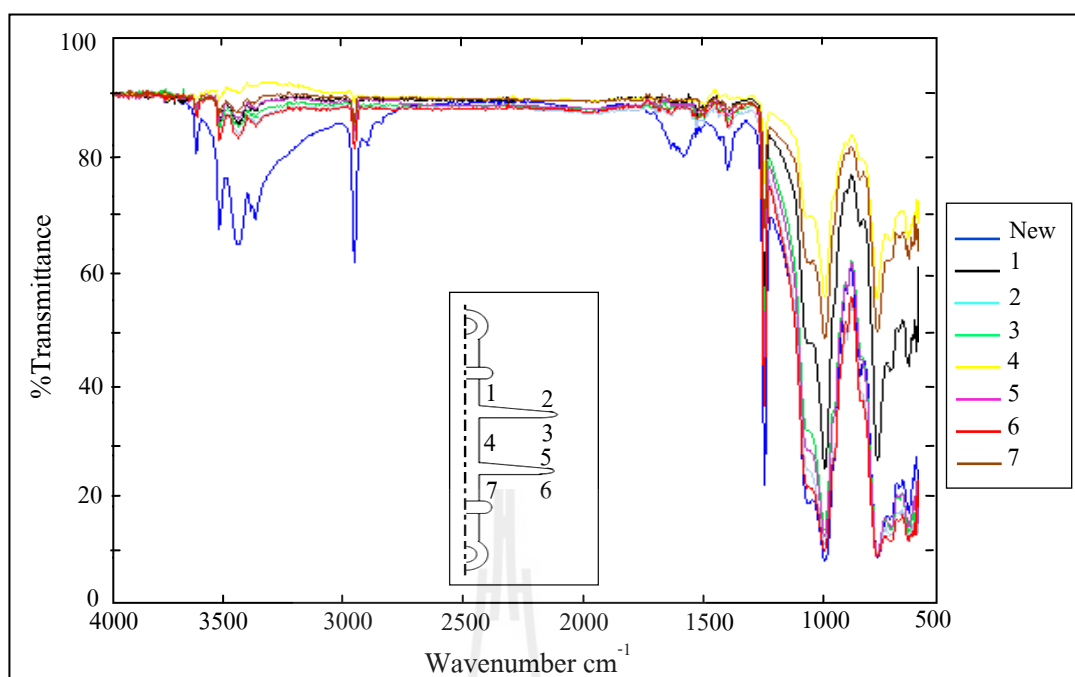
- การทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ หลังการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ลักษณะ

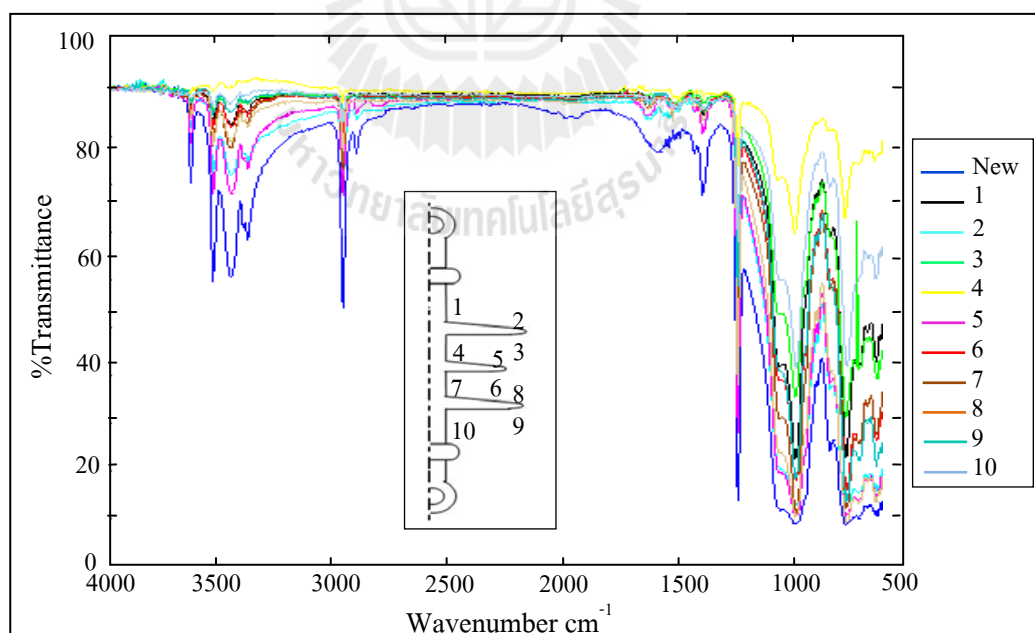
ของกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน แสดงในรูปที่ 6.47 ถึงรูปที่ 6.54 โดยส่วนใหญ่พบว่า ค่ายอดของพันธะ Si-O และ Si-CH₃ ที่ชี้ลง ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบจะสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ และช่วงพันธะ OH (3700-3200 cm⁻¹) สารอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์มีเส้นกราฟสั้นลง แต่ยังมีโครงสร้างโมเลกุลของสารดังกล่าวเหลืออยู่ในฉนวนยางซิลิโคนเล็กน้อย และจากการคำนวณหาอัตราส่วนพันธะ (Si-CH₃)/(Si-CH₃) ส่วนใหญ่จะพบว่า ฝั่งที่สัมผัสกับแสงแดดตอนบ่ายจะมีเปอร์เซ็นต์ (Si-CH₃)/(Si-CH₃) น้อยกว่าฝั่งที่สัมผัสแสงแดดตอนเช้า นั่นหมายถึง ฉนวนยางซิลิโคนฝั่งที่สัมผัสแสงแดดตอนบ่ายมีความเสื่อมสภาพมากกว่าตอนเช้า แต่ในบางตำแหน่งก็มีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 6.34 ถึงตารางที่ 6.36



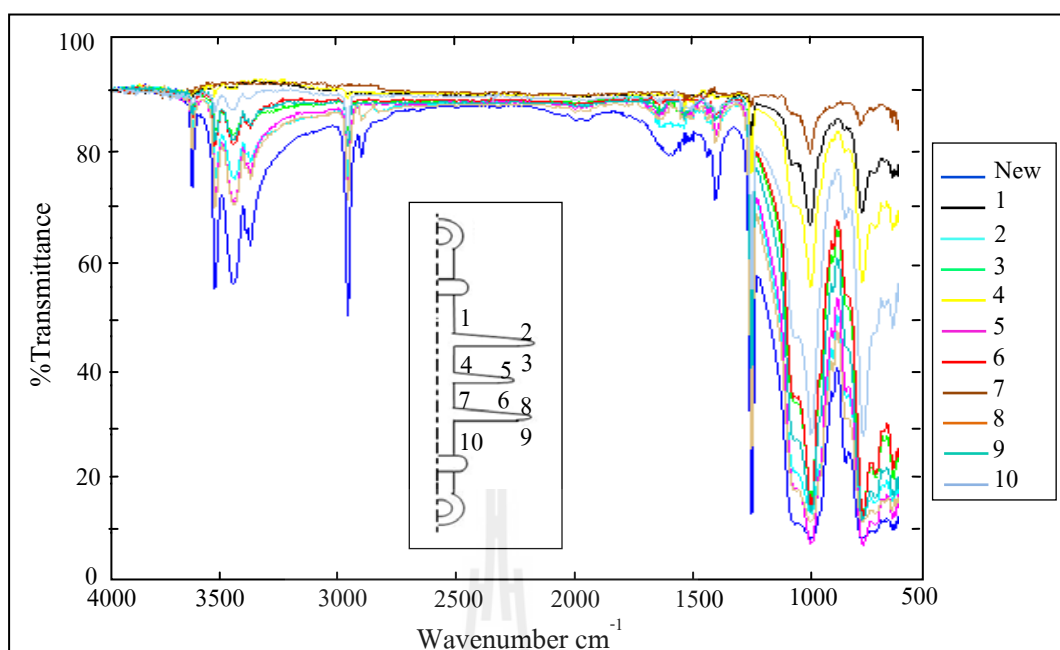
รูปที่ 6.47 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี



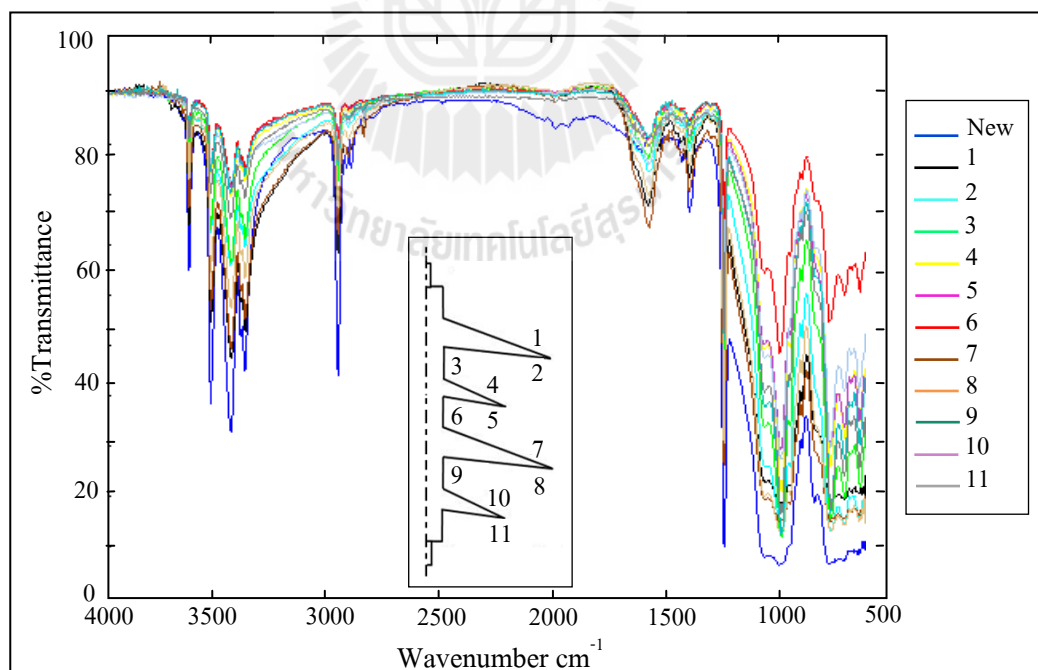
รูปที่ 6.48 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงฝั่งได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย 2 ปี



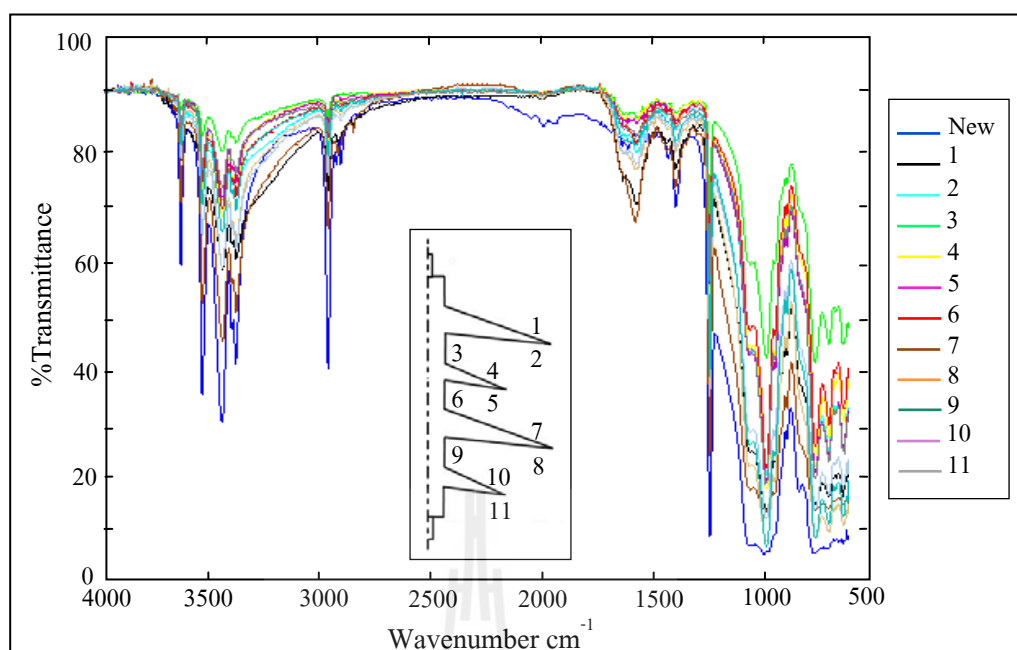
รูปที่ 6.49 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับฝั่งได้รับแสงแดด
ตอนเช้า 2 ปี



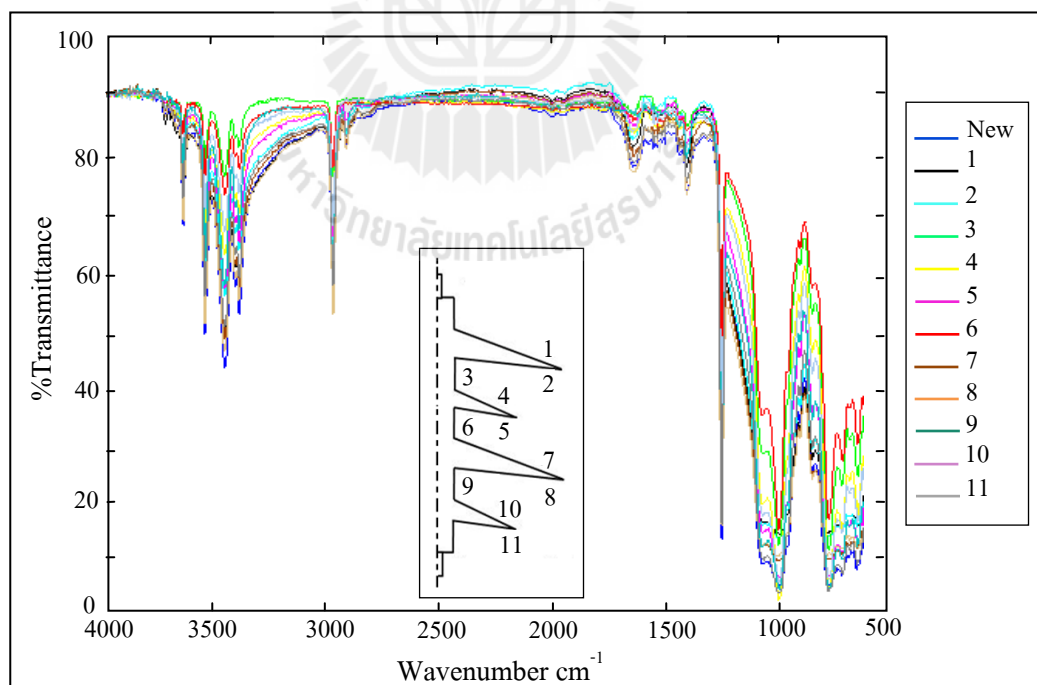
รูปที่ 6.50 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลัฟฝังได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย 2 ปี



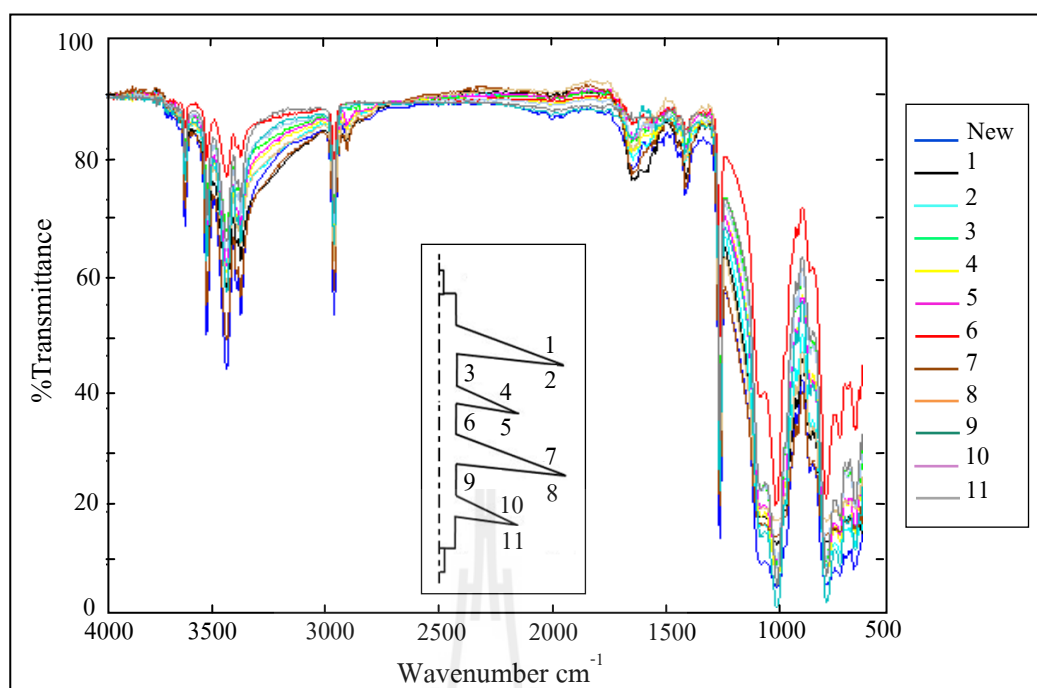
รูปที่ 6.51 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลัฟ-เอียงชนิดแข็ง
ฝังได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี



รูปที่ 6.52 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง
ผึ่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี

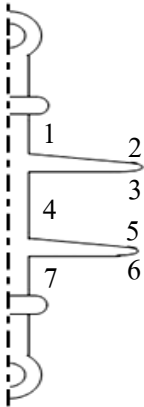


รูปที่ 6.53 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
ผึ่งได้รับแสงแดดตอนเช้า 2 ปี

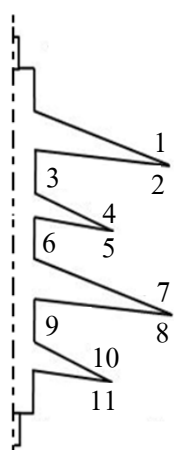


รูปที่ 6.54 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
ฝั่งได้รับแสงแดดตอนบ่าย 2 ปี

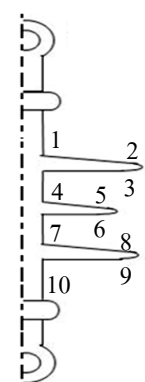
ตารางที่ 6.34 อัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงหลังได้รับ
แสงแดด 2 ปี

อัตราส่วน (Si-CH ₃)/(Si-O) (%)			
	ตำแหน่ง	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	100	100
	1	83.21	69.22
	2	76.86	75.50
	3	64.35	67.93
	4	76.14	53.58
	5	76.10	73.18
	6	90.16	83.40
	7	76.10	64.38

ตารางที่ 6.35 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงหลัง ได้รับแสงแดด 2 ปี

(Si-CH ₃)/(Si-O) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียง (%)					
		ชนิดแข็ง		ชนิดอ่อน	
ตำแหน่ง		ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	100		100	
	1	94.72	79.41	94.49	85.53
	2	73.36	52.71	92.56	80.17
	3	67.37	49.61	66.26	71.66
	4	53.93	54.27	71.71	77.61
	5	57.05	53.55	81.03	78.27
	6	61.16	51.84	60.45	59.29
	7	94.37	58.83	99.09	94.61
	8	86.31	73.61	95.00	91.75
	9	57.98	71.31	76.42	73.88
	10	59.62	68.08	91.50	77.16
	11	60.83	52.24	87.18	70.51

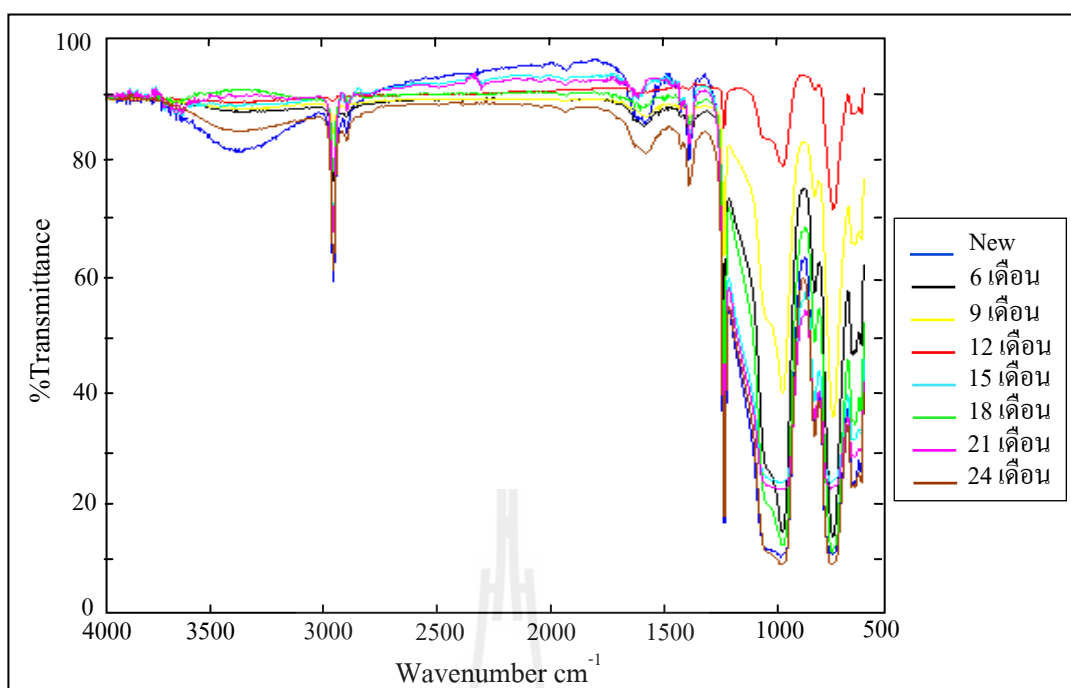
ตารางที่ 6.36 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับหลัง ได้รับแสงแดด 2 ปี

อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ (%)			
	ตำแหน่ง	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	100	100
	1	65.03	40.57
	2	81.12	77.41
	3	55.66	56.23
	4	54.51	42.27
	5	81.23	77.83
	6	57.55	57.12

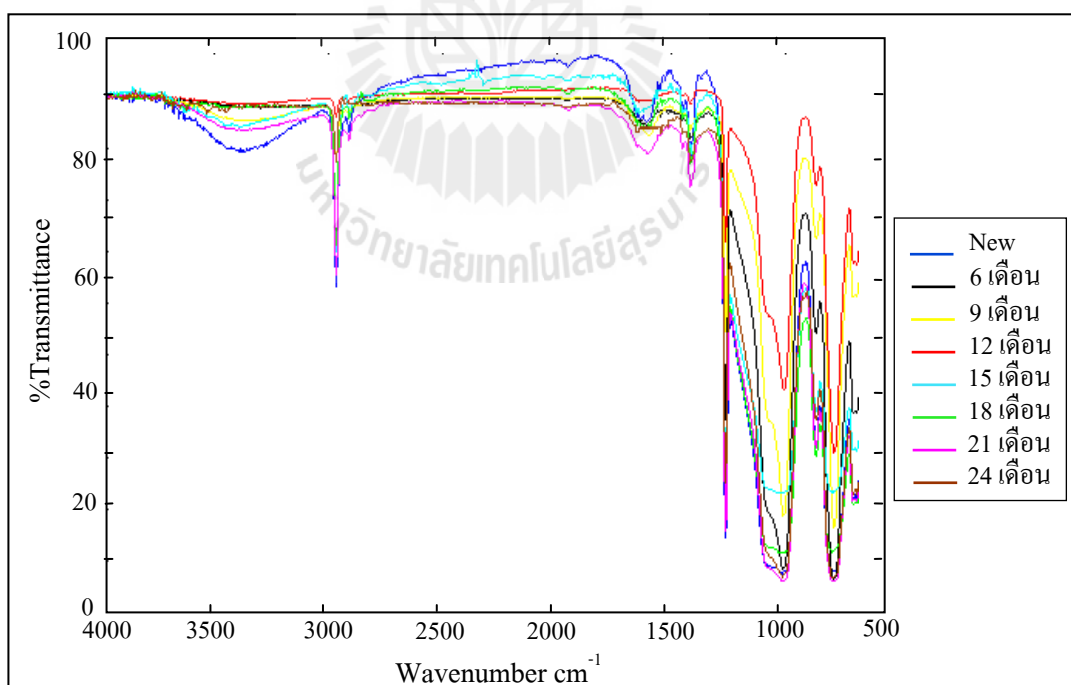
ตารางที่ 6.36 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ
หลังได้รับแสงแดด 2 ปี (ต่อ)

อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ (%)			
-	ตำแหน่ง	ช่วงเช้า	ช่วงบ่าย
	ใหม่	100	100
	7	65.65	43.74
	8	70.31	84.29
	9	51.10	66.29
	10	55.72	56.10

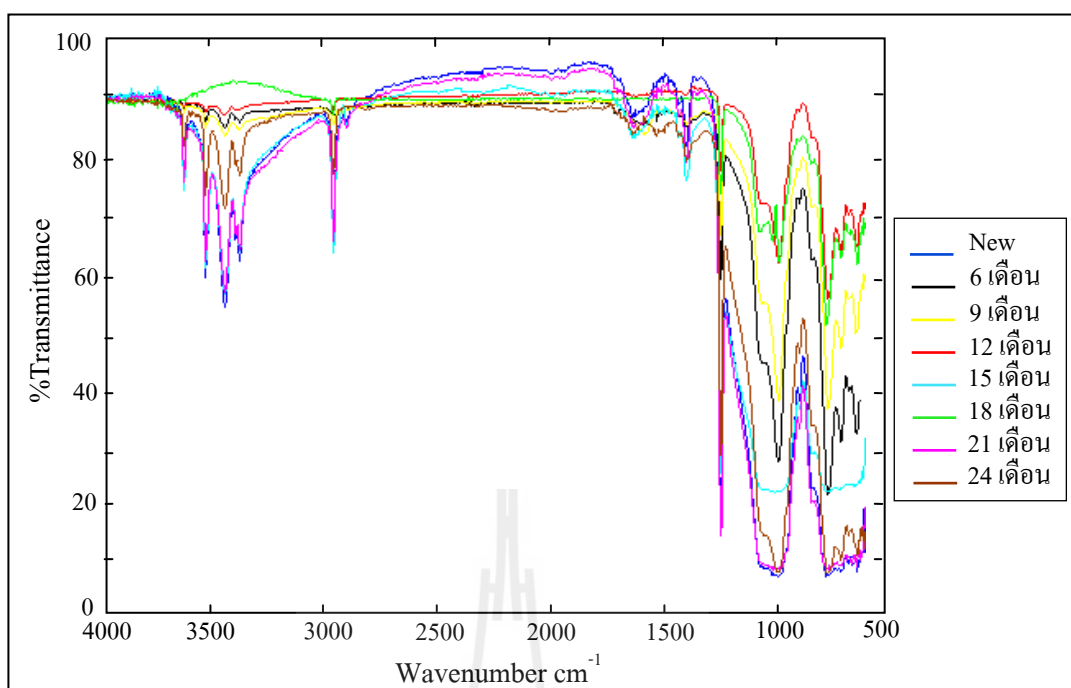
ในกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยจะวิเคราะห์ทุก ๆ 3 เดือน (โดยเริ่มวิเคราะห์ตั้งแต่เดือนที่ 6 เป็นต้นไป) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะความเสื่อมสภาพ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า ค่ายอดของพันธะ Si-O และ Si-CH₃ ที่ชี้ลงของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด ในแต่ละเดือนจะมีลักษณะแตกต่างกัน อาจเป็นผลมาจากความเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศและฤดูกาลของแต่ละเดือน ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน แสดงในรูปที่ 6.55 ถึงรูปที่ 6.62 และจากการคำนวณหาอัตราส่วนพันธะ $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ส่วนใหญ่จะพบว่า ฟังก์ชันที่สัมพันธ์แสงแดดตอนบ่ายจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ น้อยกว่าฟังก์ชันที่สัมพันธ์แสงแดดตอนเช้า เช่นเดียวกับค่าอัตราส่วนที่ได้จากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ค่าอัตราส่วนของพันธะ $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ดังแสดงในตารางที่ 6.37



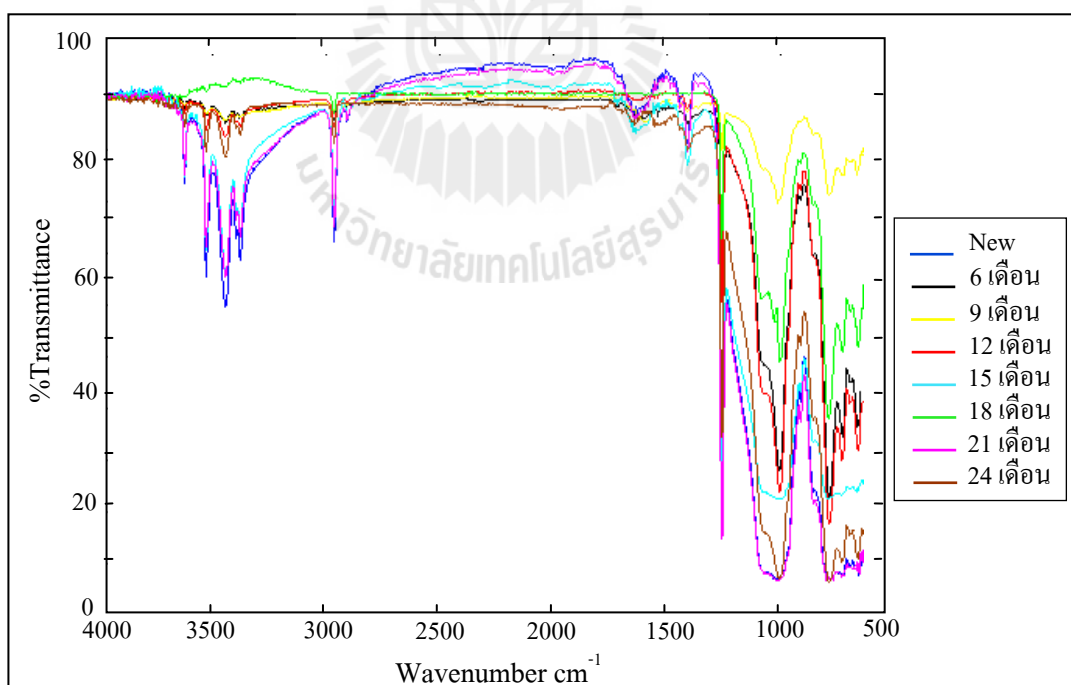
รูปที่ 6.55 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด E ฟังได้รับแสงแดดตอนเช้า



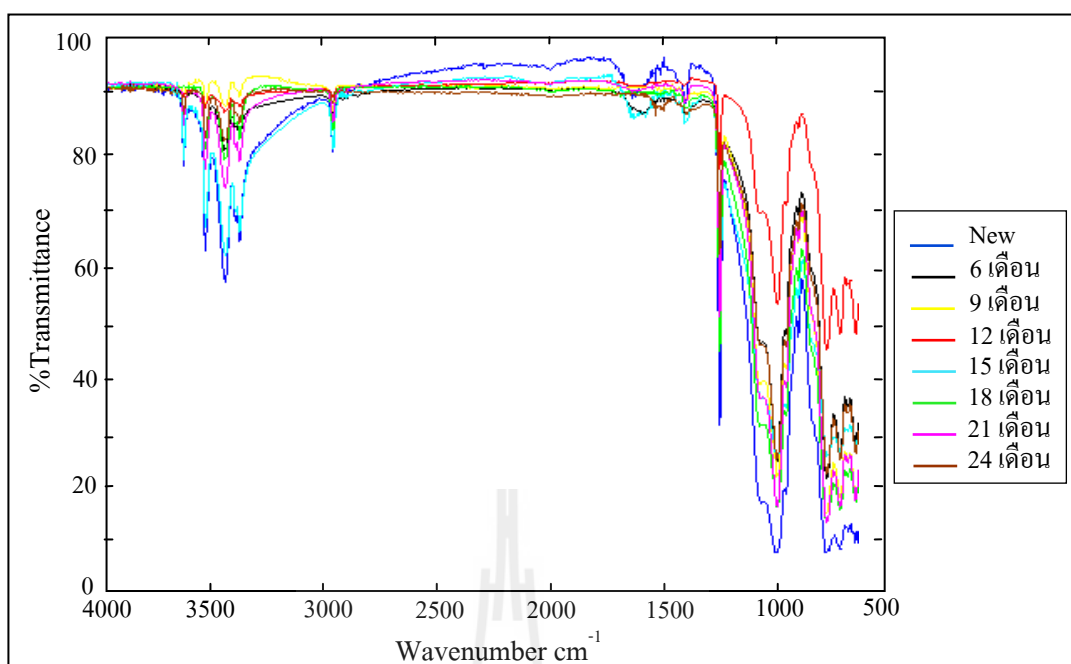
รูปที่ 6.56 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด E ฟังได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย



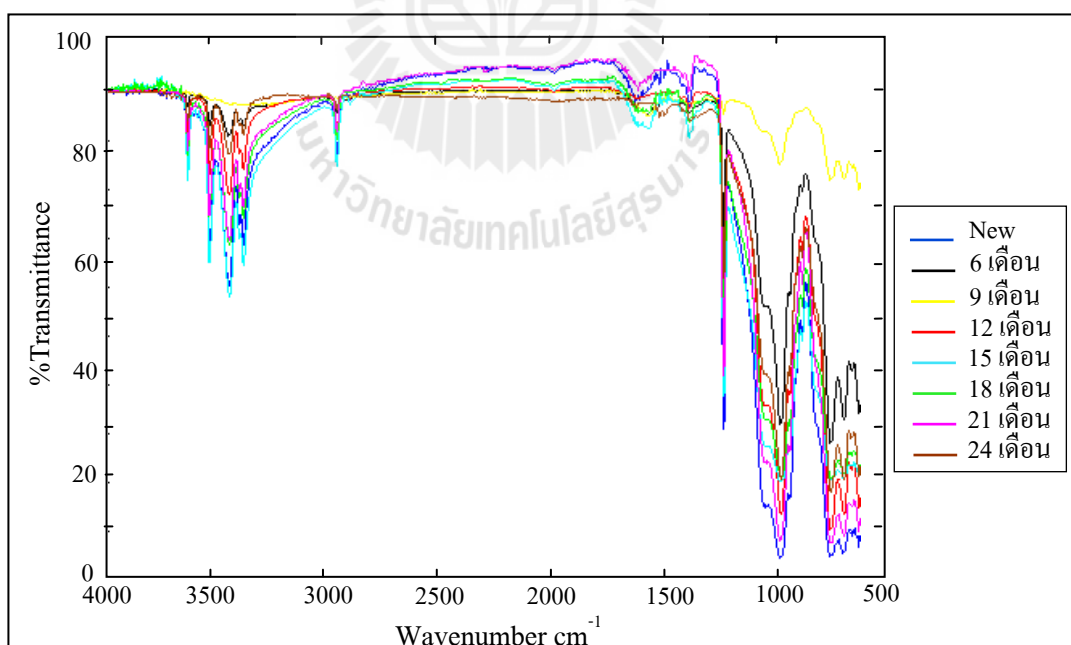
รูปที่ 6.57 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด F ผึ่งได้รับแสงแดดตอนเช้า



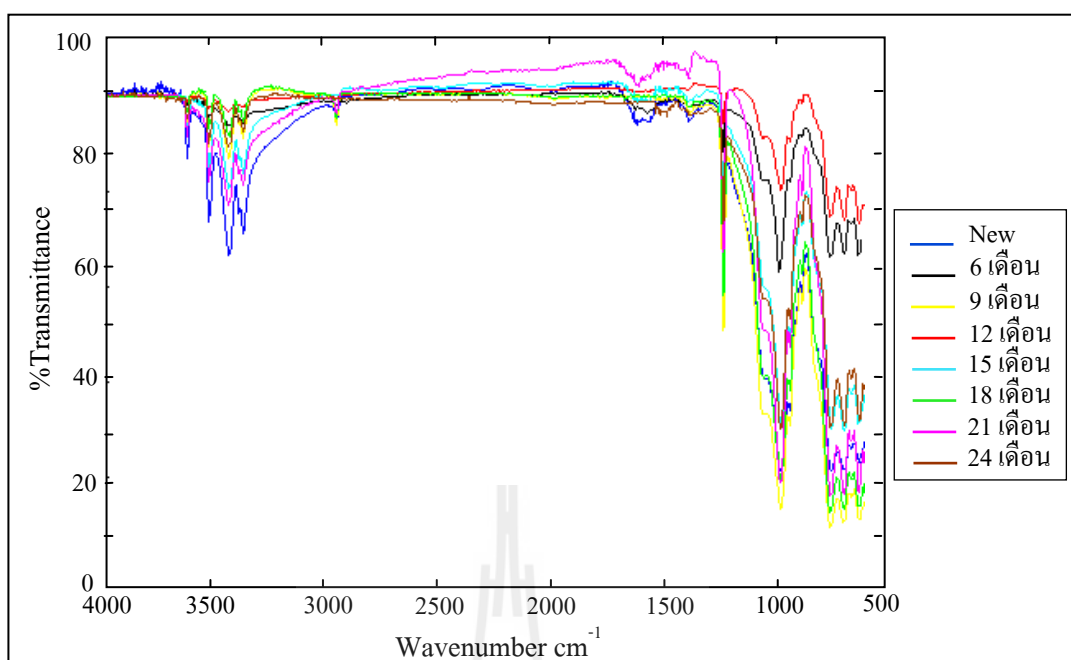
รูปที่ 6.58 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด F ผึ่งได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย



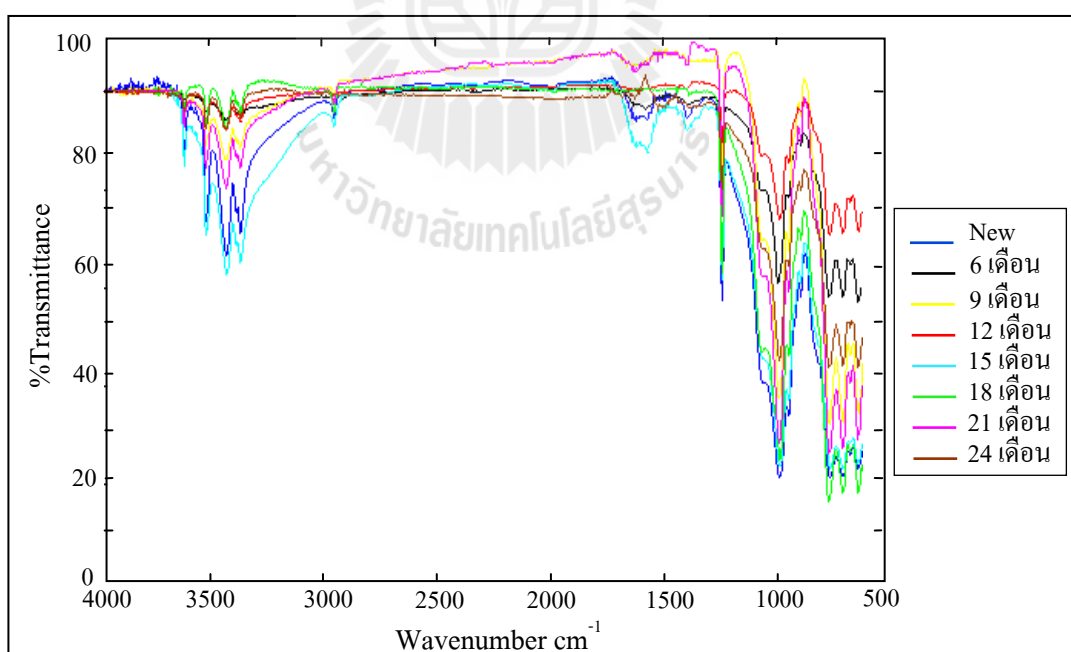
รูปที่ 6.59 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G ฟังได้รับแสงแดด
ตอนเช้า



รูปที่ 6.60 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G ฟังได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย



รูปที่ 6.61 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด H ฟังก์์ได้รับแสงแดด
ตอนเช้า



รูปที่ 6.62 ผลการวิเคราะห์ ATR-FTIR ของแผ่นฉนวนยางซิติโคนชนิด H ฟังก์์ได้รับแสงแดด
ตอนบ่าย

ตารางที่ 6.37 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังได้รับแสงแดด 2 ปี

$(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน (%)								
เวลา (เดือน)	ชนิด E		ชนิด F		ชนิด G		ชนิด H	
	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย	เช้า	บ่าย
ใหม่	100		100		100		100	
6	74.05	75.54	58.67	57.21	82.32	74.78	73.95	81.17
9	79.51	64.78	71.90	76.18	80.24	70.57	89.31	98.40
12	76.42	67.21	81.94	74.78	72.58	79.35	94.73	98.72
15	70.61	71.52	81.65	78.32	96.88	93.18	86.95	88.32
18	78.30	77.31	83.61	65.42	94.18	89.95	97.97	93.09
21	84.53	79.26	82.99	81.81	86.32	88.11	89.43	87.88
24	81.17	89.80	88.43	83.35	76.70	82.91	94.77	89.09

6.4 การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวและประจุไฟฟ้าสะสม

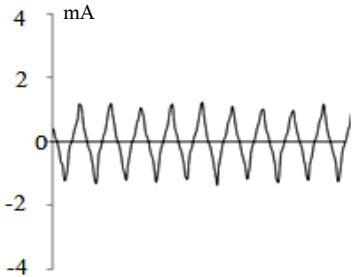
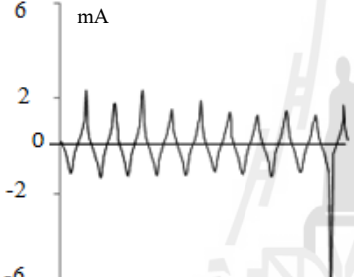
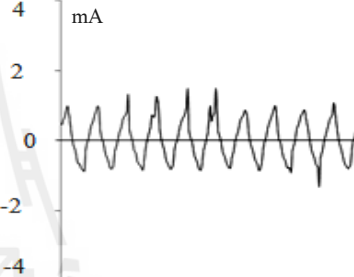
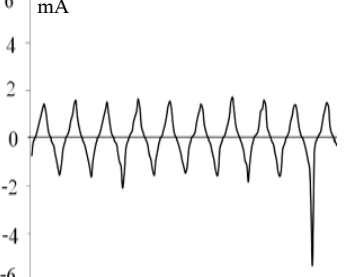
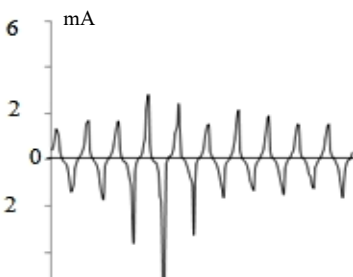
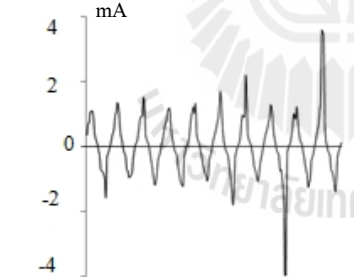
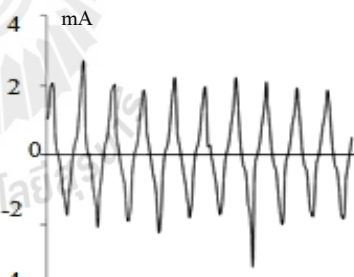
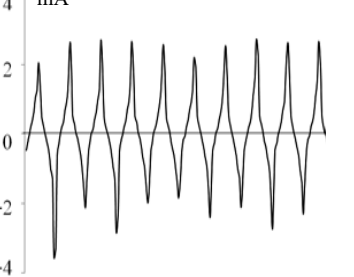
การเกิดกระแสรั่ว (Leakage Current) ตามผิวลูกถ้วยฉนวนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดวามไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนง่ายขึ้น การที่ลูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วตามผิวอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนได้รับความเสียหาย เป็นผลให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงและทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเปลี่ยนแปลงไป กระแสรั่วที่เกิดขึ้นทำให้มีพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้นด้วย เหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วตามผิว เพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวจำเป็นต้องมีการบันทึกค่าตลอดเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง ผู้วิจัยจึงต้องมีการออกแบบซอฟต์แวร์ เพื่อช่วยในการบันทึกค่ากระแสรั่ว รวมทั้งนำกระแสรั่วที่ได้บันทึกผ่านกระบวนการอินทิเกรตเพื่อหาค่าประจุไฟฟ้าสะสม (Cumulative Charge) ด้วย โดยซอฟต์แวร์ที่ออกแบบขึ้นได้ประยุกต์ใช้จากโปรแกรม Lab VIEW รายละเอียดของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.15 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 6.38 และตารางที่ 6.39 โดยในตารางถูกแบ่งช่วงเวลาที่ 100, 400, 800 และ 1000 ชั่วโมง เพื่อให้การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของรูปคลื่นกระแสรั่วได้ชัดเจนขึ้น

ตารางที่ 6.38 แสดงลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับตารางที่ 6.39 เป็นรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนในช่วงเวลาต่าง ๆ

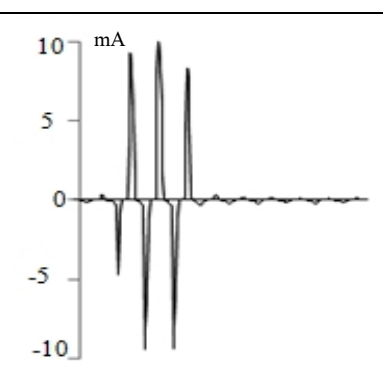
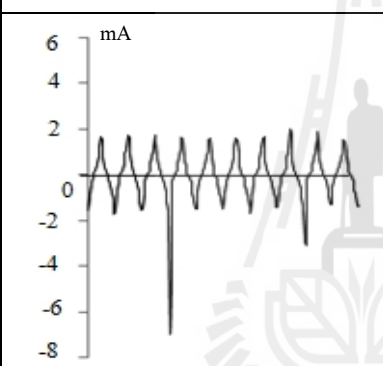
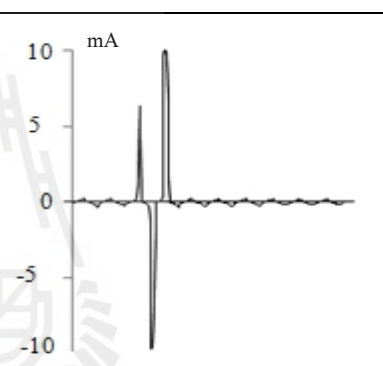
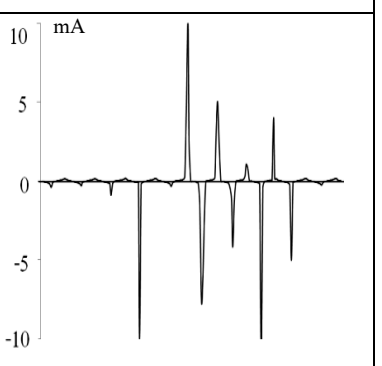
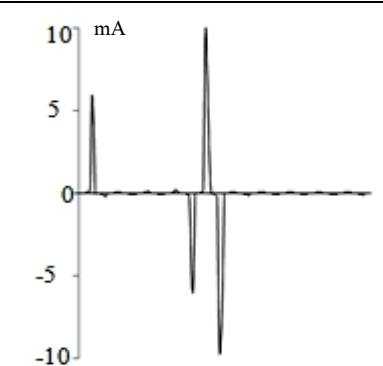
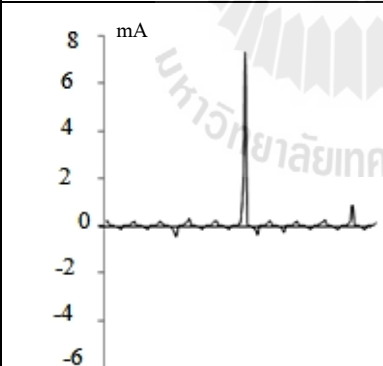
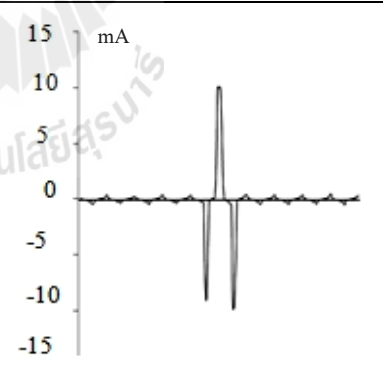
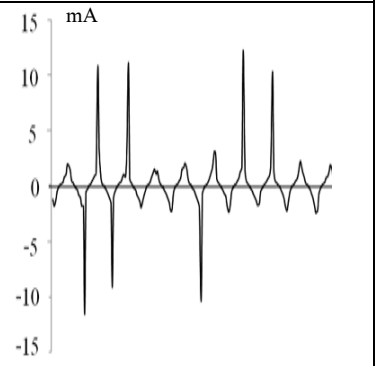
ที่บันทึกไว้ระหว่างการทดสอบ จากรูปคลื่นดังกล่าวพบว่า แอมพลิจูดของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด มีลักษณะที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น โดยค่ายอดสูง ๆ ของรูปคลื่นที่เกิดจากกระแสรั่วตามผิวนั้น จะเกิดจากปรากฏการณ์ดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้ง เพราะเมื่อเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น กระแสรั่วตามผิวก็จะมีค่าสูงขึ้น ณ ช่วงขณะหนึ่ง และผลของค่ายอดที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ นั้น หมายถึง ฉนวนยางซิลิโคนเริ่มเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการเสื่อมอายุลง



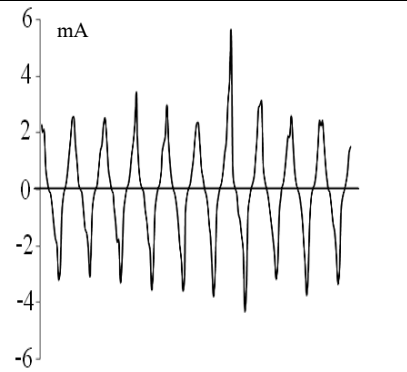
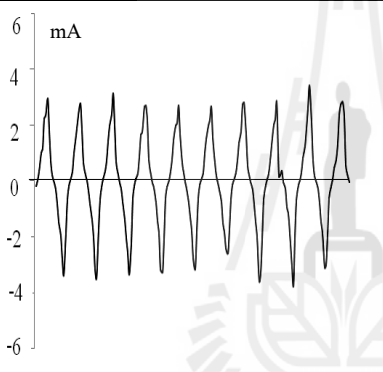
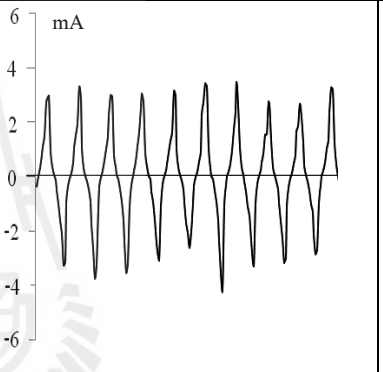
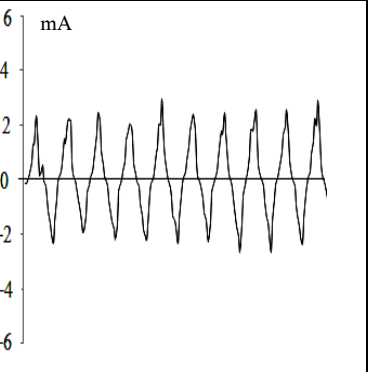
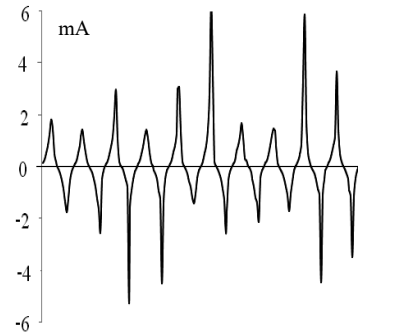
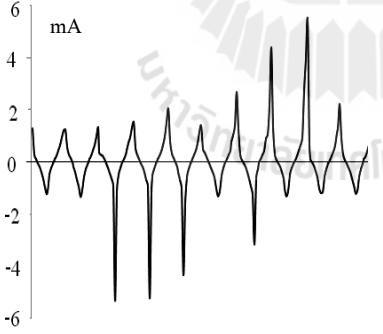
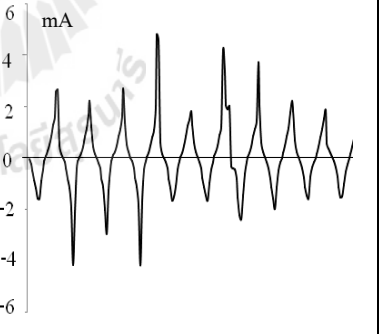
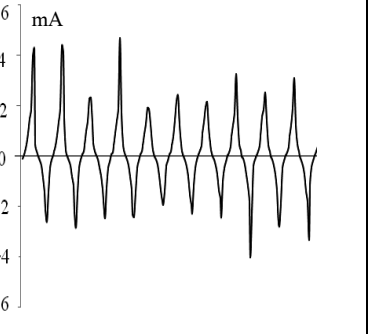
ตารางที่ 6.38 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

กระแสรั่วตามผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์				
เวลา (ชั่วโมง)	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
100				
400				

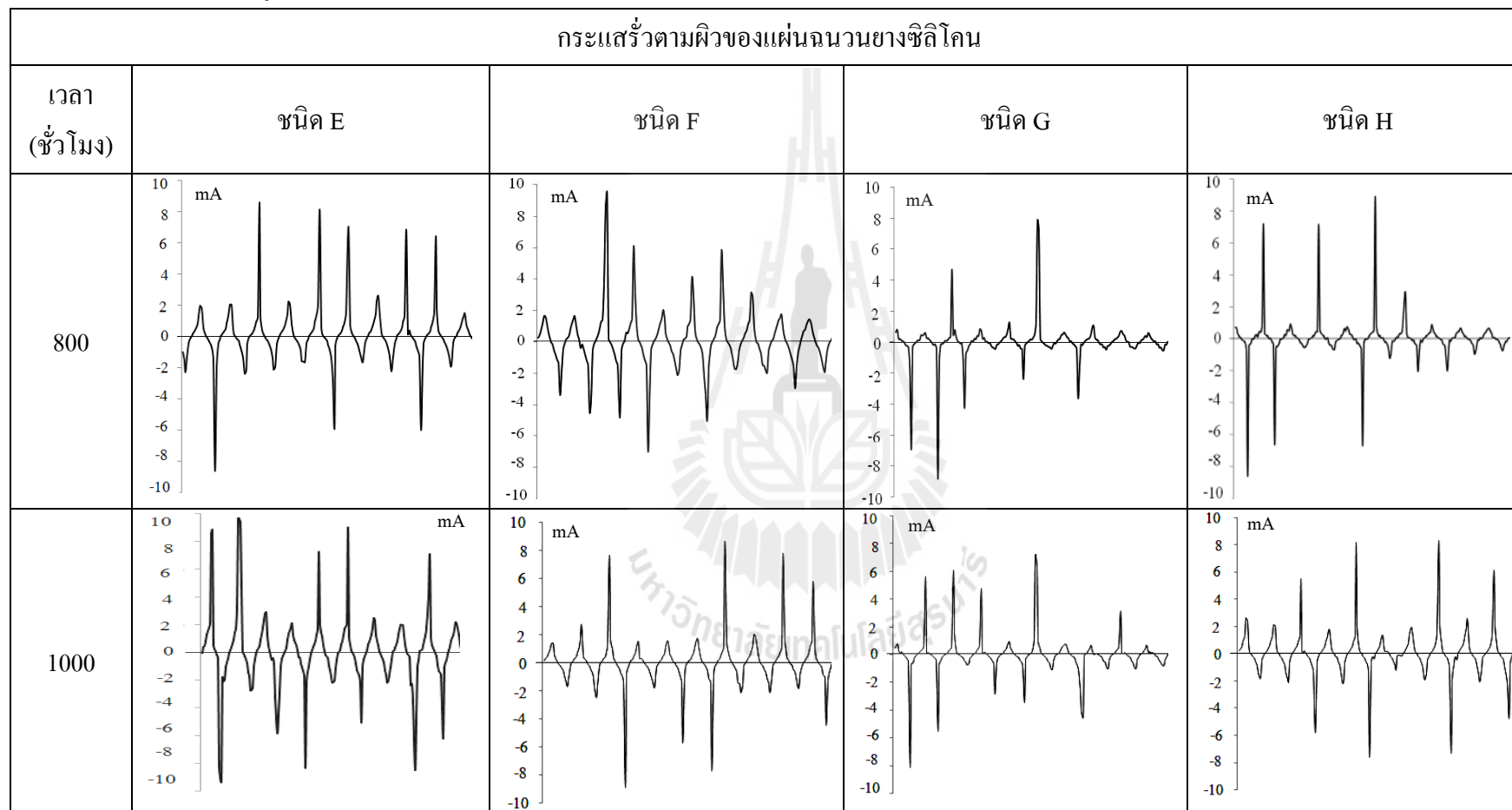
ตารางที่ 6.38 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (ต่อ)

กระแสตามผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์				
เวลา (ชั่วโมง)	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรง	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน
800				
1000				

ตารางที่ 6.39 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

กระแสรั่วตามผิวของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน				
เวลา (ชั่วโมง)	ชนิด E	ชนิด F	ชนิด G	ชนิด H
100				
400				

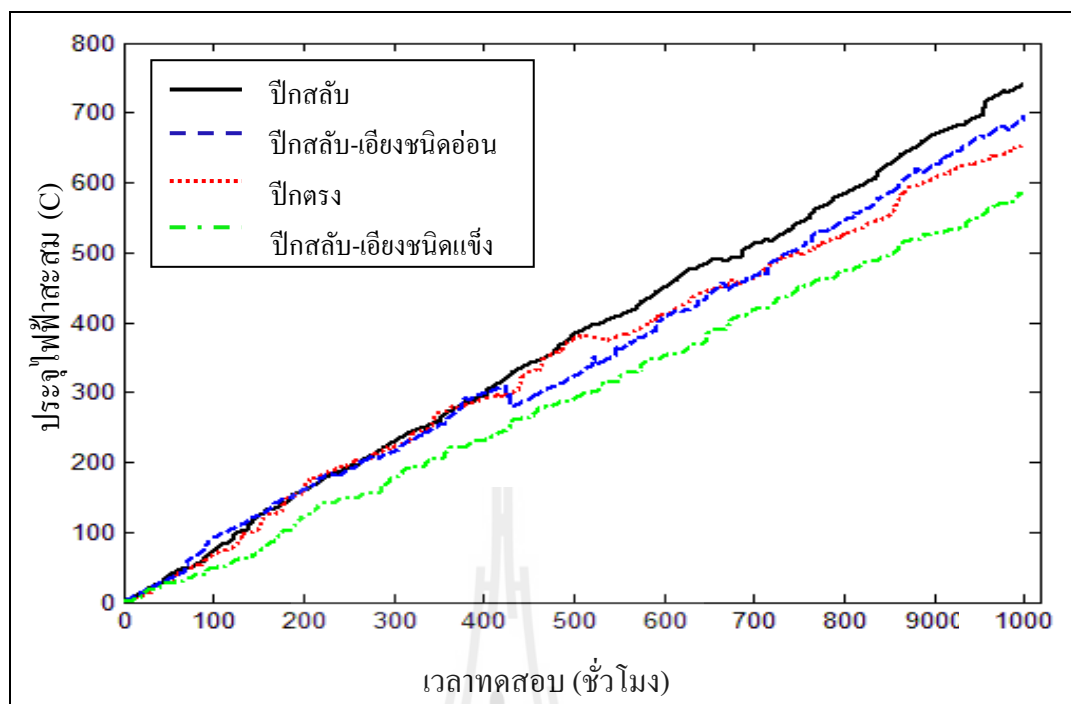
ตารางที่ 6.39 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน (ต่อ)



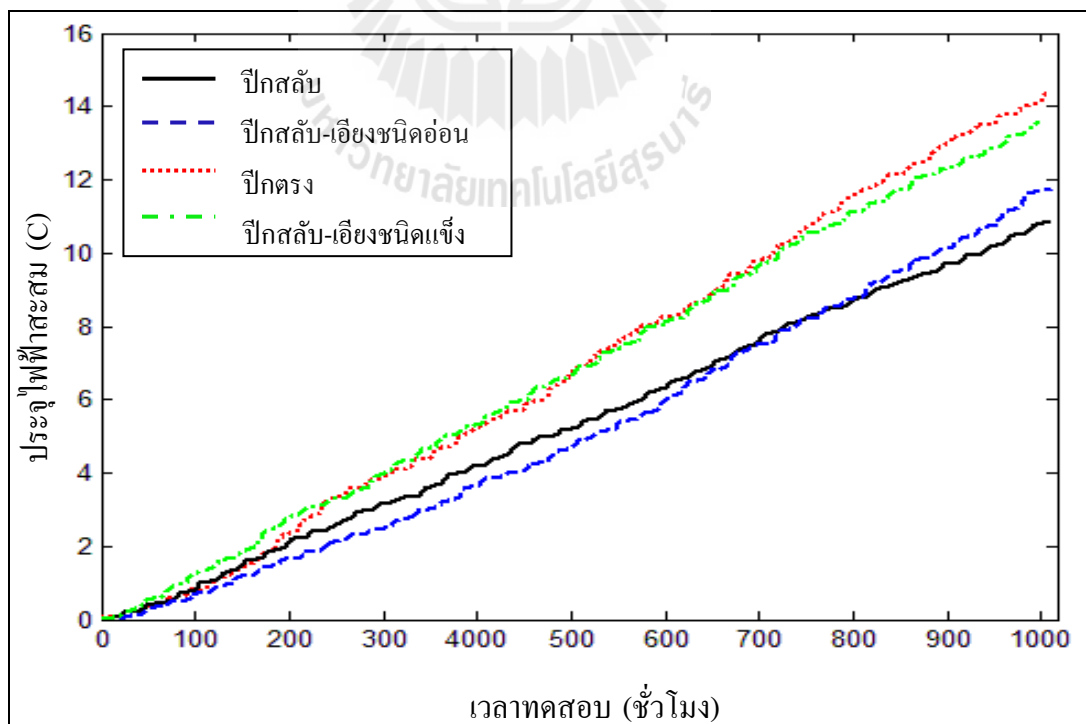
นอกจากนี้ ค่าประจุรั่วที่บันทึกได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการคำนวณเพื่อหาค่าประจุไฟฟ้าสะสม (Cumulative Charge) โดยการนำค่าประจุร่วมาทำการบวกเพิ่มเรื่อย ๆ จากค่าแรกจนถึงค่าสุดท้ายที่บันทึกได้ตลอดช่วงเวลาการทดสอบด้วยวิธีหมอกไอเกลือประจุที่ 1000 ชั่วโมง จากนั้นผลบวกที่ได้จะถูกนำไปพล็อตกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 6.63 รูปที่ 6.64 และรูปที่ 6.65

รูปที่ 6.63 แสดงลักษณะประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วจากกระแสที่เกิดจากความนำไฟฟ้า จากการวิเคราะห์พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมมากที่สุด รองลงมาคือลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงและลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็งตามลำดับ โดยส่วนใหญ่แล้วค่าประจุไฟฟ้าสะสมมาจากการที่ลูกถ้วยฉนวนอยู่ในสภาวะเปียกชื้นรวมทั้งมีสิ่งเปื้อนสะสมหรือเกาะอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และผลของกระแสรั่วที่มากขึ้น จะเป็นสาเหตุให้ค่าประจุไฟฟ้าสะสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการเสื่อมอายุนั่นเอง

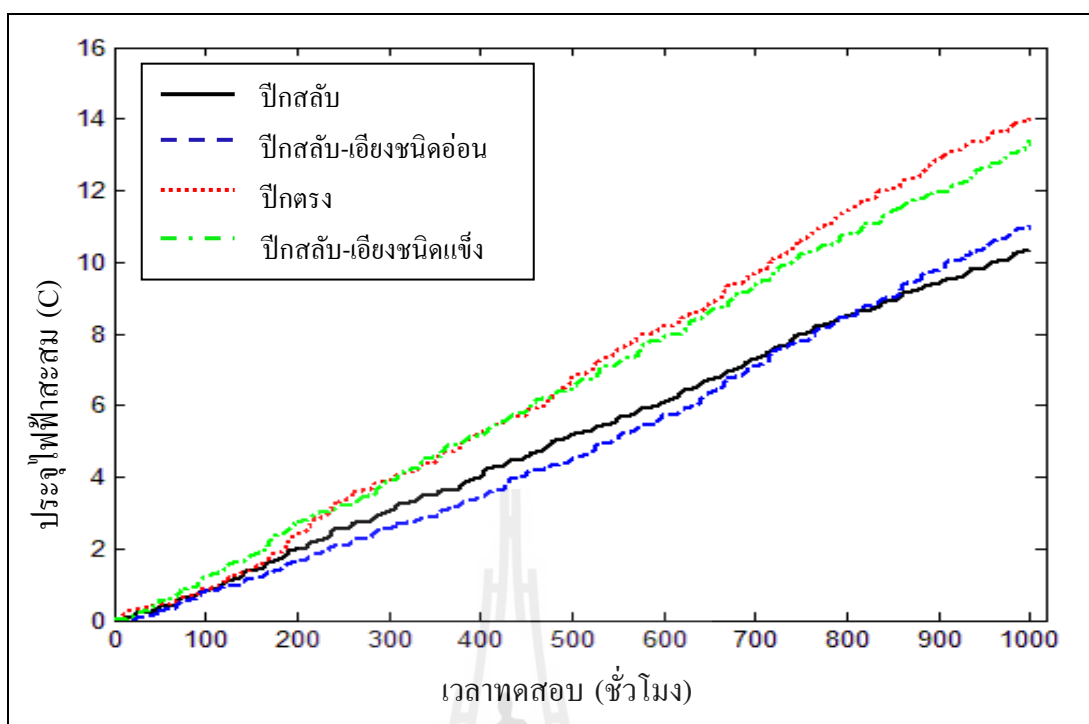
รูปที่ 6.64 แสดงลักษณะประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้ง และรูปที่ 6.65 แสดงลักษณะประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากดีสชาร์จบางส่วน of ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งพบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกตรงมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมมากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็ง รองลงมาคือลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับและลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของรูปร่าง (ปีกของลูกถ้วยฉนวน) นั้นมีผลต่อค่ากระแสรั่วและค่าประจุไฟฟ้าสะสมด้วย ซึ่งลักษณะของปีกที่แตกต่างกันย่อมทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่แล้ว ความเครียดสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนจะมีค่ามากมากในบริเวณลำตัวระหว่างปีกและบริเวณปีกเล็กตรงกลางเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งหรือดีสชาร์จบางส่วนบริเวณดังกล่าวง่ายขึ้น และอาจมีความรุนแรงเมื่อลูกถ้วยฉนวนเสื่อมสภาพมาก ๆ



รูปที่ 6.63 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากกระแสความนำไฟฟ้าของ
ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

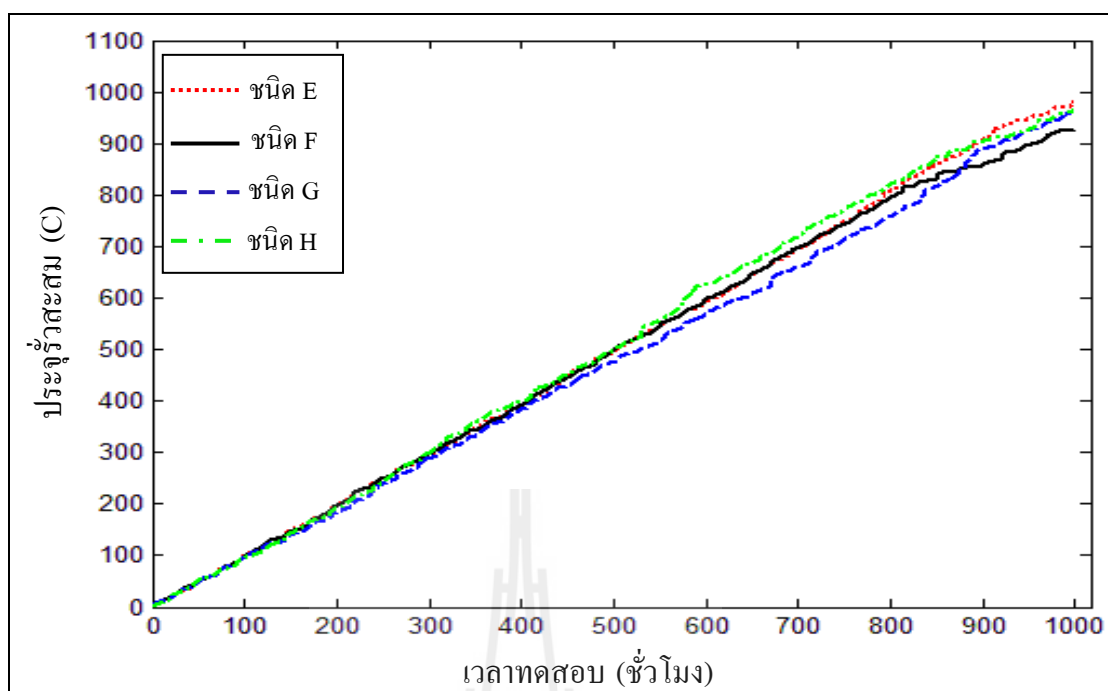


รูปที่ 6.64 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้งของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

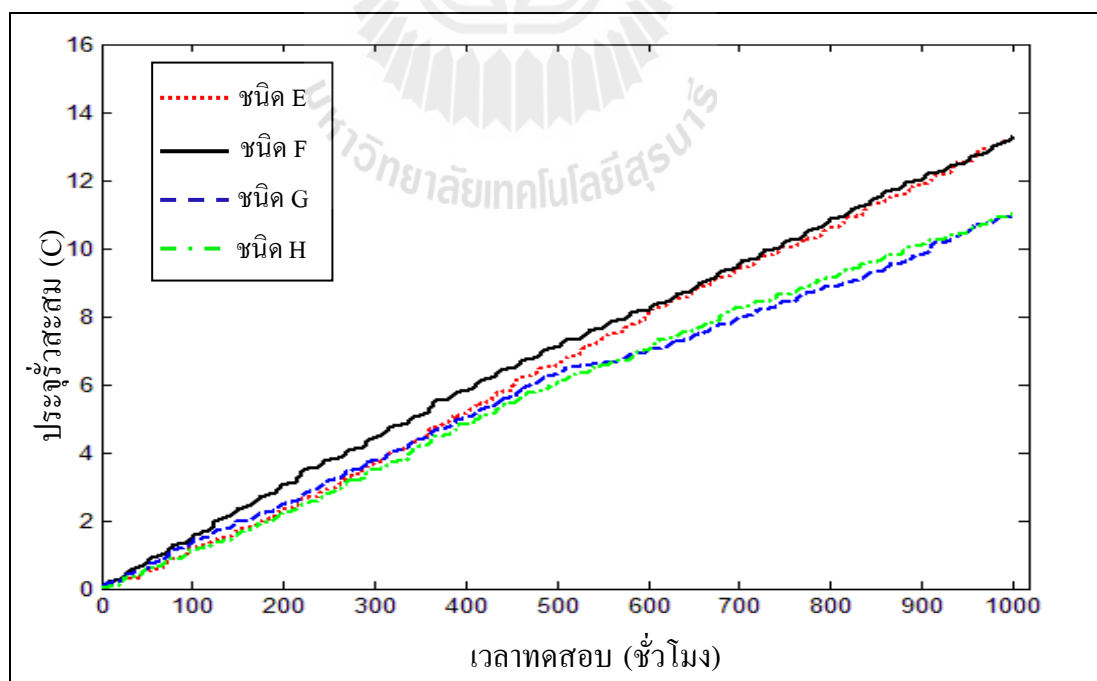


รูปที่ 6.65 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากคิซาร์จบางส่วนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

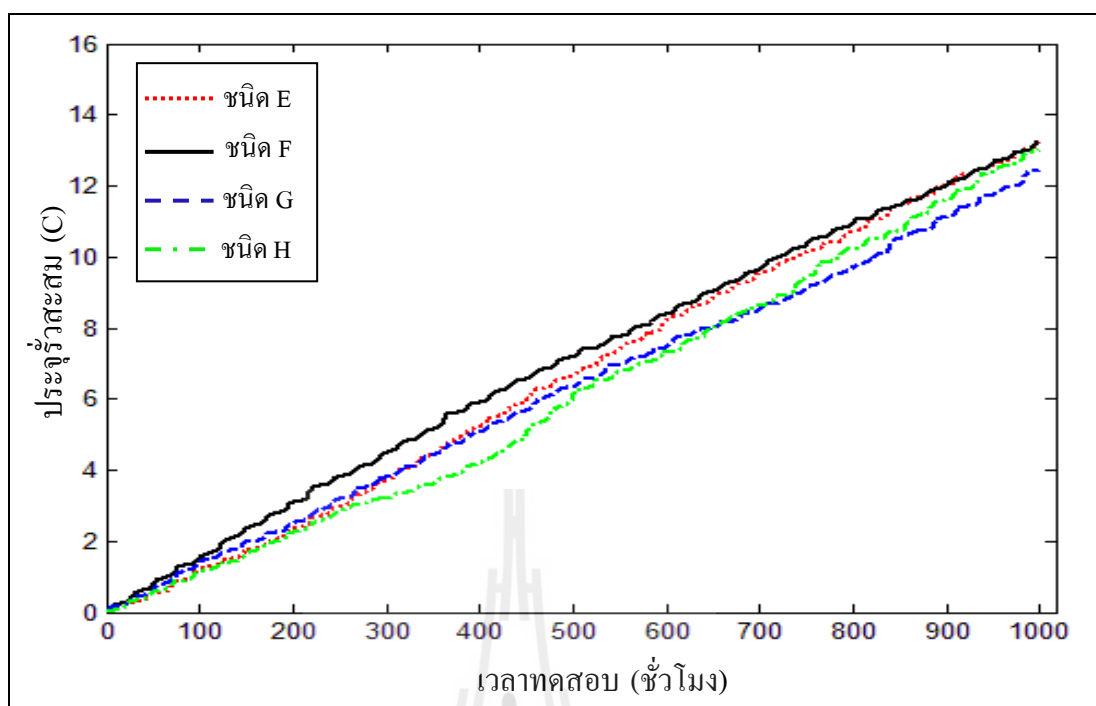
รูปที่ 6.66, รูปที่ 6.67 และรูปที่ 6.68 เป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เกิดจากกระแสรั่วในแบบต่าง ๆ บนแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งพบว่า แผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะเห็นได้ชัดเจนว่า แผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G และชนิด H มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแฉกน้อยกว่าแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E และชนิด F อาจเนื่องจากแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G และชนิด H มีการเติมปริมาณสารตัวเติมหรืออะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์มากกว่าชนิด E และชนิด F



รูปที่ 6.66 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากกระแสความนำไฟฟ้าของแผ่น
ฉนวนยางซิลิโคน



รูปที่ 6.67 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากอาร์กแถบแห้งของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน



รูปที่ 6.68 ประจุไฟฟ้าสะสมของกระแสรั่วที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

6.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 เป็นการนำเสนอผลและการตรวจสอบลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีการต่าง ๆ จากการทดสอบการเสื่อมอายุ ทั้งการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั และการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ หลังการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนจะถูกวิเคราะห์ผลและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั 1000 ชั่วโมง ในกรณีของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน พบว่า เกิดการดิสชาร์จหรืออาร์กแถบหนึ่งบริเวณลำตัวและบนปีกของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน ผลดังกล่าวทำให้พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพที่บริเวณพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน นอกจากนี้ยังทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความขรุขระและมีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน จะมีลักษณะเป็นรอยจากการกัดกร่อนและรอยแตกเล็กลงไปบนเนื้อฉนวนยางซิลิโคน โดยเฉพาะบริเวณของลำตัวจะเกิดความเสียหายมากกว่าส่วนอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า บริเวณปีกเล็กตรงกลางของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับเกิดความเสียหายมากกว่าบริเวณปีกใหญ่อีกด้วย ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคน ส่งผลให้มีคุณสมบัติผิวหยาบ

ลดลง ซึ่งหลังจากการทดสอบจะอยู่ในระดับ HC4 ถึง HC5 ถือว่ามีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แต่ถูกด้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดแข็งและชนิดอ่อน พบว่า มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นอยู่ในระดับดี (HC2 ถึง HC3) ยกเว้นบริเวณด้านข้างปั๊มแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ระดับ HC4 ฉนวนยางซิลิโคนที่มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก ๆ พื้นผิวจะเปื่อยง่าย ซึ่งทำให้เกิดกระแสร่วมมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นกระแสรั่วที่มีระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการทดสอบนานขึ้น เมื่อนำฉนวนยางซิลิโคนไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า ยางซิลิโคนมีโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งพันธะ Si-CH₃ และพันธะ Si-O ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งมียอดกราฟที่ลดลงและยังมีปริมาณสารตัวเติมลดลงด้วย ความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ฉนวนยางซิลิโคนเกิดความเสื่อมสภาพหรือเสื่อมอายุลงนั่นเอง

ในกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน พบว่า เกิดความเสื่อมสภาพมากในบริเวณด้านข้างปั๊มแรงดันไฟฟ้า (ด้านล่าง) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดการดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบ่อยครั้งจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้างปั๊มแรงดันไฟฟ้าเกิดการกัดกร่อนเมื่อนำไปต่อกล่องจุดทรานส์อิเล็กตรอนแบบสองเกรด พบว่า พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้างปั๊มแรงดันไฟฟ้ามีร่องรอยการกัดกร่อนมากกว่าบริเวณอื่น แต่ถือว่าเกิดความเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวพบที่ฉนวนยางซิลิโคนชนิด E (ATH = 0) และชนิด F (ATH = 50) ในขณะที่ฉนวนยางซิลิโคนชนิด G (ATH = 100) และชนิด H (ATH = 150) แทบไม่พบร่องรอยการกัดกร่อนเลย กล่าวได้ว่า สารตัวเติมสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี การเกิดดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบ่อยครั้งอาจทำให้ฉนวนยางซิลิโคนมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นลดลงได้ ซึ่งคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก (HC5 ถึง HC6) โดยแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นลดลงที่ระดับ HC6 ตลอดทั้งพื้นผิว ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก ๆ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า แผ่นฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้างปั๊มแรงดันไฟฟ้ามียอดกราฟสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณตรงกลางและด้านข้างต่อลงดิน นอกจากนี้ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E และชนิด F ยังมีค่าประจุไฟฟ้าสะสมมากกว่าแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด G และชนิด H อีกด้วย นั่นหมายความว่า ปริมาณสารตัวเติมก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นฉนวนให้กับยางซิลิโคนได้เป็นอย่างดีเช่นกัน สำหรับรูปคลื่นกระแสรั่วที่วัดได้ก็มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการทดสอบนานขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของฉนวนพอลิเมอร์

สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ พบว่า ทั้งทางฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้าและตอนบ่าย ถูกด้วยฉนวนพอลิเมอร์มีคราบสกปรกเกาะอยู่บนพื้นผิวเพียงเล็กน้อยและมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (ระดับ HC2 ถึง HC3) ยกเว้น

ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อน ซึ่งมีคราบสกปรกสีน้ำตาลอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมาก และทำให้พื้นผิวดังกล่าวมีคุณสมบัติผิวหยาบน้ำฝนลดลงอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก ๆ (HC5 ถึง HC6) เมื่อนำฉนวนยางซิลิโคนไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะพบว่า พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยแตกและผุกร่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบ ซึ่งถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก สำหรับการตรวจสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านบนของปีก จะมีความเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณด้านล่างของปีก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ด้านบนสุดและสัมผัสกับแสงแดดมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเลตมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้งานภายนอกอาคาร

สำหรับกรณีของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบผ่านไปเป็นเวลา 2 ปี พบว่า มีคุณสมบัติผิวหยาบน้ำฝนลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ในระดับ HC1 ถึง HC2 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก แต่ลักษณะของกราฟจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า บริเวณพันธะ Si-CH_3 และพันธะ Si-O รวมทั้งบริเวณสารตัวเติมจะมีลักษณะสั้นลงและมีอัตราส่วนของ $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ลดลงเมื่อเวลาการทดสอบนานขึ้น ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากแสงแดดเช่นเดียวกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาตินี้ พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนฝั่งที่ได้รับแสงแดดตอนเช้ามีความเสื่อมสภาพน้อยกว่าฉนวนยางซิลิโคนฝั่งที่ได้รับแสงแดดตอนบ่ายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีเนื้อหาเกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบและการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยการทดสอบหมอกไอเกลือประดิดฐ์เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติเป็นเวลา 2 ปี เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากผลของความเครียดทางไฟฟ้าและทางสภาวะแวดล้อม จากผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปและเสนอแนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไป ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในการทำงานวิจัย โดยกล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่เกิดจากความ เปราะเปื้อนจากสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ หมอกไอเกลือและผลกระทบจากความเครียดทางไฟฟ้า เพื่อเป็นแนว ในการทำการทดสอบและการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในการใช้งานให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนขึ้น ดังนั้น จึงมี นักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดความเสื่อมสภาพหรือเสื่อมอายุ ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 ได้นำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและเป็นแนวทางในการทำ การทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งเป็นการกล่าวถึง วิวัฒนาการของฉนวนยางซิลิโคนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของ ฉนวนยางซิลิโคน ปัจจัยที่ก่อให้เกิดฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุ รวมถึงการเกิดปฏิกิริยา ทางเคมี ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส รวมทั้งหลักการและวิธีการสำหรับใช้วิเคราะห์ ลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน นอกจากนี้ยังมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซอฟต์แวร์ที่ใช้ สำหรับวัดกระแสรั่วตามผิวและเก็บค่าประจุสะสมของฉนวนยางซิลิโคนด้วย

บทที่ 4 ได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยาง ซิลิโคนทั้ง 2 ชุดทดสอบ ได้แก่ ชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือ ประดิดฐ์และการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ โดย อธิบายถึงส่วนประกอบโครงสร้างต่าง ๆ ที่ต้องใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบดังกล่าว รวมถึงการ พัฒนาโปรแกรมที่ประยุกต์จากโปรแกรม Lab VIEW เพื่อใช้วัดกระแสรั่วตามผิวของฉนวนยาง

ซิลิโคนและคำนวณค่าประจุไฟฟ้าสะสมจากกระแสรั่วตามผิว โดยชุดการทดสอบทั้งสองแบบถูกสร้างขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการทดสอบได้จริง

บทที่ 5 ได้นำเสนอรายละเอียดการเตรียมการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบทั้งสองวิธี ได้แก่ การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัที่ 1000 ชั่วโมง และการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติเป็นเวลา 2 ปี โดยการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัจะทดสอบภายใต้มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นฉนวนยางซิลิโคนที่ขึ้นรูปเป็นลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแบบแผ่นฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งวัสดุทดสอบทั้งสองประเภทจะมีโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นลง วัสดุทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์ผล โดยเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุทั้งทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 6 ได้นำเสนอผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทั้งโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน หลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรัภายใต้มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 และการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (ไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า)

หลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประดิสรั วัสดุทดสอบทั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนได้ถูกตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพนั้น เป็นการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงภายนอกของฉนวนยางซิลิโคนทั้งระหว่างการทดสอบและหลังการทดสอบ จากการตรวจสอบพบว่า ในระหว่างการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนได้เกิดการคืบซาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น โดยพบที่บริเวณลำตัวมากกว่าบริเวณปีก ทำให้พื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนเกิดการร่อนการกัดกร่อนที่ลึกลงไปใ้ในเนื้อฉนวนบริเวณลำตัวใกล้ด้านขั้วป้อนแรงดันของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ สำหรับแผ่นฉนวนยางซิลิโคนการคืบซาร์จและอาร์กแถบแห้งจะเกิดขึ้นบ่อยบริเวณด้านขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้บริเวณพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดการกัดกร่อนเป็นผลให้พื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดความขรุขระ เกิดความแข็งและสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำสิ้น เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเห็นได้ว่า เกิดการกัดกร่อนลึกลงในเนื้อฉนวนยางซิลิโคนอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังมีสิ่งประอะเปื้อนที่เกิดจากคราบเกลือเกาะอยู่บนพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคน โดยพบมากบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และอยู่ตามร่องของการกัดกร่อน ซึ่งค่าความประอะเปื้อนดังกล่าว สามารถคำนวณได้โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 60507 การสะสมของสิ่งประอะเปื้อนพร้อมกับสภาวะที่เปียกชื้นนั้น เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวฉนวน โดยค่ากระแสรั่วตามผิวที่วัดได้ก็มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลา

การทดสอบนานขึ้น และผลจากกระแสรั่วตามผิวจะทำให้จำนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพ ความเป็นฉนวน ส่งผลให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลง จากการทดสอบคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝน สามารถอ้างอิงจากคู่มือ STRI พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝนลดลงมากบริเวณ ลำตัวและด้านข้างป้อนแรงดันไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ สำหรับคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝนของ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ชนิด ลดลงมากและมากที่สุดบริเวณด้านข้างป้อนแรงดันไฟฟ้า สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้าง ป้อนแรงดันไฟฟ้ามียอดกราฟสั้น นั่นหมายถึง บริเวณดังกล่าวเกิดความเสื่อมสภาพความเป็นฉนวน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพที่กล่าวมาข้างต้น

สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติโดยไม่ได้อุปกรณ์ไฟฟ้า หลังการตรวจสอบ พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้งฝั่งได้รับแสงแดด ตอนเช้าและรับแสงแดดตอนบ่าย มีคราบสกปรกเกาะอยู่บนพื้นผิวเพียงเล็กน้อยและมีคุณสมบัติผิว หยดน้ำฝนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ยกเว้นลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ปีกสลับ-เอียงชนิดอ่อนที่มีคราบสกปรก สีดำอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมากและทำให้พื้นผิวดังกล่าวมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำฝนลดลงอยู่ใน เกณฑ์ต่ำมาก ๆ เมื่อนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเป็นรอยแตกและผุกร่อนเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ พบว่า บริเวณบนปีกเล็กของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์นั้นมีความเสื่อมสภาพมากกว่า บริเวณบนปีกใหญ่ สำหรับแผ่นฉนวนยางซิลิโคนมีลักษณะเสื่อมสภาพลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการ ทดสอบนานขึ้น โดยยืนยันจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR ซึ่งกล่าวได้ว่ารังสี อัลตราไวโอเลตมีผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างของฉนวนยางซิลิโคน ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนที่ ใช้งานภายนอกอาคารเกิดการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างทั้งทางเคมีและทางกายภาพ อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาตินี้ พบว่า ฉนวน ยางซิลิโคนฝั่งได้รับแสงแดดตอนเช้ามีความเสื่อมสภาพน้อยกว่าฉนวนยางซิลิโคนที่ได้รับแสงแดด ตอนบ่ายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากบทสรุปที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน จะมีความเสื่อมอายุที่บริเวณลำตัวมากกว่าบริเวณปีก สำหรับแผ่นฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้าง ป้อนแรงดันไฟฟ้าจะเสื่อมอายุมากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ และแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E จะเกิดการ กัดกร่อนมากที่สุด เนื่องจากแผ่นฉนวนยางซิลิโคนชนิด E ไม่มีส่วนผสมของ ATH ซึ่งช่วยในการ ต้านทานต่อการกัดกร่อน โดยหลังจากการทดสอบและวิเคราะห์ผล สามารถยืนยันได้ว่า การเสื่อม อายุของฉนวนยางซิลิโคนจะได้รับผลกระทบจากความเครียดต่าง ๆ ได้แก่ สภาวะความประทุษร้าย ประกอบกับความเปียกชื้น การเกิดอาร์กแถบแห้ง การเกิดดีสชาร์จ ความร้อน รังสีอัลตราไวโอเลต

ซึ่งจากการทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน สามารถยืนยันลักษณะการเสื่อมอายุได้ด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของฉนวนยางซิลิโคน

จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบ ควรใช้เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบดิจิทัลแทนที่ระบบควบคุมด้วยมนุษย์ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบ
- 2) อุปกรณ์ที่ใช้ยึดจับวัสดุทดสอบควรใช้อุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดสนิม เนื่องจากการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยวิธีหมอกไอเกลือประติศฐ์ต้องทำในห้องทดสอบที่มีหมอกไอเกลืออยู่ด้วย
- 3) ควรมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นในแต่ละครั้ง

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา ได้ให้แนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถนำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนไปใช้กับอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายชนิดอื่น ๆ เพื่อหาความคงทนของเนื้อสาร
- 2) การทดสอบเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ควรทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบด้วย เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะที่ใช้งานจริง
- 3) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะอื่นๆ เช่น การศึกษาเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในความเข้มข้นของน้ำเกลือที่แตกต่างกัน การศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในความเครียดทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เป็นต้น

รายการอ้างอิง

กนต์ธร ชำนิประศาสน์. **LabVIEW Tutorial**.

แม่น อมรสิทธิ์. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.

สำราญ สังข์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).

อนงค์พันธุ์ แม้นอิม และ วินัย พฤกษ์วัน. (2553). การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดีสชาร์จไฟฟ้า
บางส่วนบนผิวฉนวน.

อนงค์พันธุ์ แม้นอิม และ วินัย พฤกษ์วัน. (2553). การศึกษาค่าความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่
ก่อให้เกิดวบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย.

Amin, M., and Salman, M. (2006). Aging of polymeric insulators (An overview).
Rev.Adv.Mater.Sci. 13: 93-116.

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.

Berger, T., Sundhararajan, S., and Nagaosa, T. (1997). Influence of temperature on the
hydrophobicity of polymers. **Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena.**
394-397.

Bognar, A., et al. (1993). A comparative study of the effect of Surface discharges on different
silicone rubber compounds. **Proceedings of the 8th International Symposium on High
Voltage Engineering.** 177-180.

Chang, J. W., and Gorur, R. S. (1994). Surface recovery of silicone rubber used for HV outdoor
insulation. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation.** 1(6): 1093-1046.

Cherney, E. A. (1996). Non-ceramic insulators - a simple design that requires careful analysis.
IEEE Electrical Insulation Magazine. 12(3): 7-15.

CIGRE TF33.04.07. (1999). Natural and artificial ageing and pollution testing of polymer
insulators. **CIGRE Pub.** 142.

Clarson, S. J., and Semlyem, J.A. (1993). Siloxane polymers. **Prentice Hall**, New Jersey.

- Gorur, R. S., Chang, J. W., and Amburgey, O. G. (1990). Surface hydrophobicity of polymers used for outdoor insulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 5(4): 1923-1928.
- Gorur, R. S., Gerlach, D. W., and Thallam, R. S. (1991). Aging in outdoor insulating polymers due to UV and high temperature. **Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena**. 268-273.
- Gorur, R.S., Karady, G. G., Jagota, A., Shah, M., and Yates, A. M. (1992). Ageing in silicone rubber used for outdoor insulations. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 7(2): 525-538.
- Gutman, I., Harting, R., Matsuoka, R., and Kondo, K. (1997). Experience with IEC 1109 1000h salt fog ageing test for composite insulators. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 13(3): 36-39.
- Hackam, R. (1999). Outdoor HV composite polymeric insulators. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 6(5): 557-585.
- Hall, J. F. (1993). History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(1): 376-385.
- Hillborg, H. C., and Gedde, U. W. (1999). Hydrophobicity changes in silicone rubbers. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 6(5): 703-717.
- Homma, H., Kuroyagi, T., Izumi, K., Mirley, C. L., Ronzello, J., and Boggs, S. A. (1999). Diffusion of low molecular weight siloxane from bulk to surface. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 6(3): 370-375.
- Homma, H., et al. (2006). Determination of long-term performance of polymeric insulators for distribution lines by salt fog method. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 401-404.
- 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**.
- Imakoma, T., Suzuki, Y., Fujii, O., and Nakajima, I. (1994). Degradation of silicone rubber housing by ultraviolet radiation. *Proceedings of 4th ICPADM*. 306-308.
- ISO 868. (1985). **Plastics and ebonite-determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)**.

- Kamyar, F-A. (2004). **The effect of stabilizers on the discharge-Induced oxidation of Ccrosslinked polydimethylsiloxane**. Universitetsservice US AB, Sweden.
- Kim, J., and Chaudhury, M. K. (1999). **Corona-discharges-induced hydrophobicity loss and recovery of silicones**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 703-706.
- Kim, J., Chaudhury, M. K., and Owen, M. J. (1999). Hydrophobicity loss and recovery of silicone HV insulation. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 6(5). 695-702.
- Kim, S. H., Cherney, E. A., and Hackam, R. (1992). Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubber. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 27(3): 610-622.
- Kim, J-H., Song, W-C., Lee, J-H., and Park, Y-K. (2001). Leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**. 8(6): 1108-1115.
- Li, C., Huang, X., and Zhao, L. (2008). Image analysis on the surface hydrophobicity of polluted silicone rubber insulators. **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**.
- Lopes, I. J. S., Jayaram, H. S., and Chemey, A. E. (2001). Partial discharge patterns for silicone rubber insulators under salt-fog. **IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 452-455.
- 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. **International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 1-5 Nagoya**. 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.
- Marklove, M. C., and Wheeler, J. C. G. (1996). Salt – fog testing of composite insulators. **International Conference on Conf. Pub.** (430): 299-302.
- Nasrat, L.S., and Nosseir, A. (2002). Evaluation of polymeric insulating materials under polluted conditions. **CIGRE**. 15-402.
- Otsubo, M., et al. (2001). Discharge and emission spectra on the surface of polymer insulator materials in salt fog aging test. **IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 260-263.
- Sundararajan, R., and Soundarajan, E. (2006). Multistress accelerated aging of polymer housed surge arresters under simulated coastal florida conditions. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 13(1): 211-226.
- STRI Guide. (1992). **Hydrophobicity classification guide**. 92/1.
- Venkatesulu, B., and Thomas, M. (2010). Tracking and erosion resistance of nano-filled silicone rubber for use in high voltage outdoor insulators. **National Power Systems Conference**. 562-566
- Wang, X., Kumagai, S., and Yoshimura, N. (1998). Performance of silicone rubber insulator subjected to acid rain contaminant. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 5(6): 909-916.
- Yoshimura, N., Kumagai, S., and Nishimura, S. (1999). Electrical and environmental silicone rubbers used in outdoor insulation. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. 6(5): 632-650.
- Zhao, L., Li, C., Xiong, J., Wang, C., Zhang, S., and Bi, Y. (2007). Artificial pollution test on silicone rubber insulators under long-time wetted conditions. **IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 320-323.
- Zhao, T., and John, S. (1996). Salt fog ageing tests on non-ceramic insulators and fog chamber data acquisition system. **IEEE Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 377-380.
- Zhu, Y., et al. (2003). Leakage current analysis and electric field calculation in salt fog ageing test on polymer insulation material. **IEEE Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 92-95.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 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.
- 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.
- Payakcho, W., Grasaesom, J., Thong-om, S. and Marungsri, B. (2011). **Artificail Accelerated Ageing Test of Silicone Rubber Housing Material for Lightning Arrester.** World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 80, pp. 650-655.
- 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.
- 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.

Study of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators

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

Abstract— This paper presents the experimental results of salt fog ageing test of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulator based on IEC 61109. Four types of HTV silicone rubber sheet with different amount of ATH were tested continuously 1000 hours in salt fog chamber. By visual observation after tested, slightly surface erosion was observed on tested specimen surface near the energized end. Furthermore, increasing in hardness and reduction in hydrophobicity were measured on tested specimen comparing with new specimen. In addition, chemical analysis by ATR-FTIR was conducted in order to elucidate the chemical change of tested specimens comparing with new specimen. Physical and chemical results confirmed the experimental results as well.

Keywords— Accelerated ageing test, HTV silicone rubber, housing material, salt fog test, surface erosion, polymer insulator.

I. INTRODUCTION

Recently, silicone rubber (cross linked PDMS) has been widely used as housing material for outdoor polymer insulators. Polymer insulators have better performance over conventional porcelain and glass types, such as being light weight, having better contamination performance due to surface hydrophobicity, possessing high impact strength, etc. Furthermore, also, additives and fillers are included in the silicone rubber in order to enhance the physical and chemical properties for improve the long-term performance under environment stresses. Alumina trihydrate ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: ATH) is commonly filled to enhance tracking- and erosion-resistance of polymer. ATH decomposes into aluminum oxide and water when heated to the temperature above 200 °C. The liberation of water is endothermic and the surface is cooled, which may extinguish an electric arc. Furthermore, the resistance against tracking is improved. Which coupling agents are compounds added to a chemical reaction. This improves the ability to connect between the filler and polymer matrix links each well of the filler and the polymer matrix to make silicone rubber properties, electrical better reduce the modulus and tensile strength increases of the material [1-4].

Due to silicone rubber insulator made of polymeric housing material, so ageing deterioration is not avoidable. Artificial

salt fog ageing tests are widely conducted for evaluating anti-tracking and/or anti-erosion performance of housing materials for polymer insulators. Salt fog ageing test have been conducted in order to evaluate anti-ageing performance of silicone rubber housing material. The deterioration of their surfaces in the salt fog ageing test depended on many effect such as filler content and their configuration [5]. Furthermore, surface tracking and weather shed puncture occurred on the polymer insulator surface resulting from many effect such as surface wetting, degree of contamination and dry-band arcing[6],[7].

This paper presents salt fog ageing test results of silicone rubber was conducted based on IEC 61109 specifications [8].

II. EXPERIMENTAL

A. Specimens

Specimens made of high-temperature vulcanized silicone rubber (HTV SiR) with/without alumina trihydrate (ATH: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) having content 0%, 50%, 100% and 150% by weight were used in this experimental, as shown in Table I and Fig. 1. Configuration of tested specimen illustrated in Fig. 2. All specimen having 2 mm in thickness, 30 mm in width and 200 mm in length attached with metal electrodes on the both ends of each specimen were hung vertically in test chamber during test.

TABLE I
CHARACTERISTICS OF HTV SPECIMENS

Type	With surface treatment	ATH (wt %)
A	✓	0
B	✓	50
C	✓	100
D	✓	150

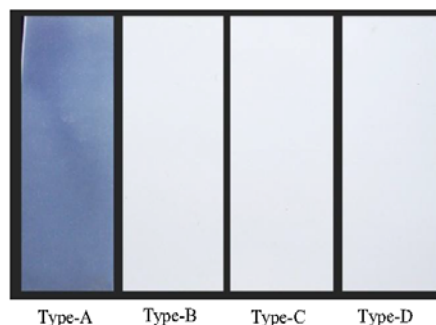


Fig. 1 specimens

S. Thongom, W. Payakcho and J. Grasasom are master degree student with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND

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

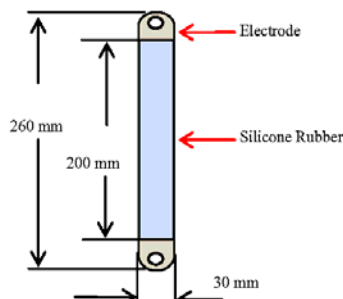


Fig. 2 Specimen configuration

B. Test Arrangement and Test Methods

A polyethylene tank having the volume 4.0 m^3 was used as the salt fog test chamber. During salt fog ageing tests, specimens were hung vertically in the test chamber. An ultrasonic humidifier was used as salt fog generation and salt fog was injected from the top of the test chamber. Fig. 3 shows the test arrangement and Fig. 4 shows the actual test chamber.

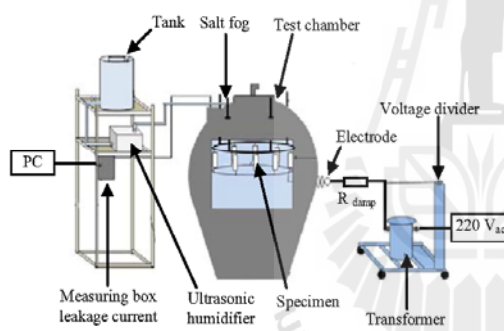


Fig. 3 Test arrangement

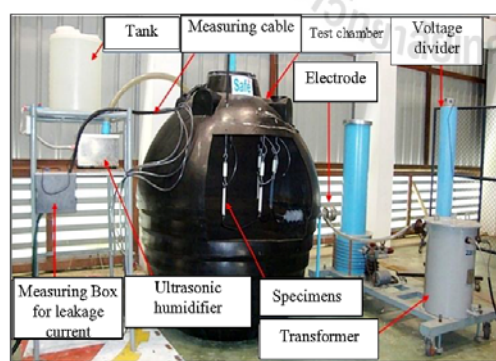


Fig. 4 Test chamber

C. Test Conditions

In this experimental, specimens were subjected to a constant voltage at voltage based on IEC 61109 specifications. The

cyclic salt fog ageing test was conducted by injecting salt fog in to the test chamber for 8 hours and stopping it for 16 hours every day under ac high voltage 15 kV. The salt fog having injection 0.5 l/hr/m^3 was injected from the top of the chamber as test conditions shown in table II. All specimens were hung vertically in test chamber and were tested together. Leakage current measurement system is shown in Fig. 5. Individual specimens were connected to the leakage current measurement system via the shunt resistors of 100Ω by means of coaxial cables. Leakage currents were continuously measured for individual specimens during the test. The leakage current was fed to an A/D board and converted to voltage. The leakage current data measured at the sampling rate of 10 kHz were recorded once every 60 s by postulating the data continuing for this period using the computer software developed via LabView.

TABLE II
TEST CONDITIONS [8].

Salt fog ageing test	Conditions
test chamber	4 m^3
test voltage	AC15 kV Continuously Applied
voltage stress	75 V/mm
salt fog generation	Ultrasonic Humidifier
salt fog injection rate	0.5 l/hr/m^3
salt fog salinity	10 kg/m^3 ($16000 \mu\text{S/cm}$)
test sequence in 24 hours	Salt fog injected for 8 hours and stopped for 16 hours

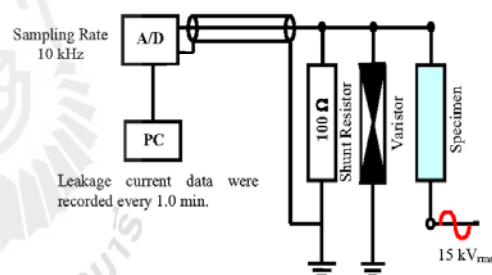


Fig. 5 Diagram of leakage current measuring system

III. TEST RESULTS AND DISCUSSION

A. Visual Observation

After 1000 hours salt fog ageing test, visual observation was conducted in order to inspect any change on tested specimen surface. Slightly surface erosion near the energized end, as shown in Fig. 5, was observed on specimens type A and type B. This may be caused by discharges on specimens surface during test due to higher electric field stress on such position. No surface erosion was observed on specimen type C and type D. The results confirm that the amount of ATH is effective to improve the anti-erosion performance of silicone rubber.

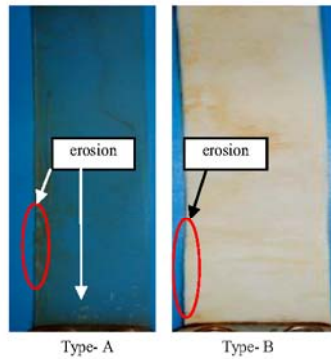


Fig.6 Specimens surface after 1000 hours.

B. Hydrophobicity

Surface discharges accompanying the contaminant deposit on the specimen surface led to a reduction in hydrophobicity. The occurrence of surface deterioration and contaminant deposition on the specimen surface may be related to the

reduction in hydrophobicity and/or may be related to the amount of ATH. Reduction in hydrophobicity was evaluated by STRI criteria, as shown in Fig.7 [9,10]. Characteristics of hydrophobicity on tested specimen surface are shown in Fig.8. Hydrophobicity measurement results are shown in Table III.

Significant decreasing in hydrophobicity can be observed on thoroughly surface of the specimens. Extremely loss of hydrophobicity (HC 6) was observed on thoroughly surface of specimen type A. In the case of the specimen without ATH and without filler surface treatment, a larger reduction in hydrophobicity can be seen compared with the other specimens having ATH. Such results indicate that ATH filler and filler surface treatment can delay the reduction of hydrophobicity on silicone rubber surface. Also, extremely loss of hydrophobicity (HC 6) at energized end was observed on all specimen surfaces. Such results indicate that high electric field stress can accelerate the reduction of hydrophobicity on the specimen surface.

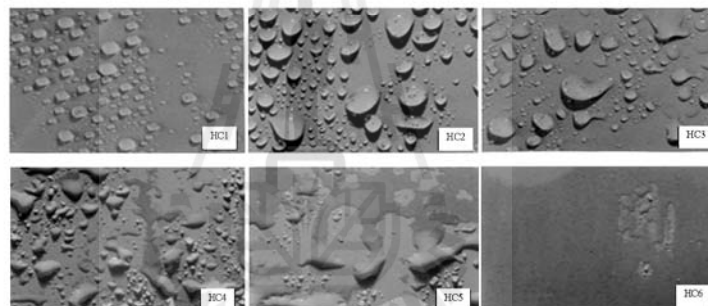


Fig. 7 Characteristics of the sample surface HC1-HC6

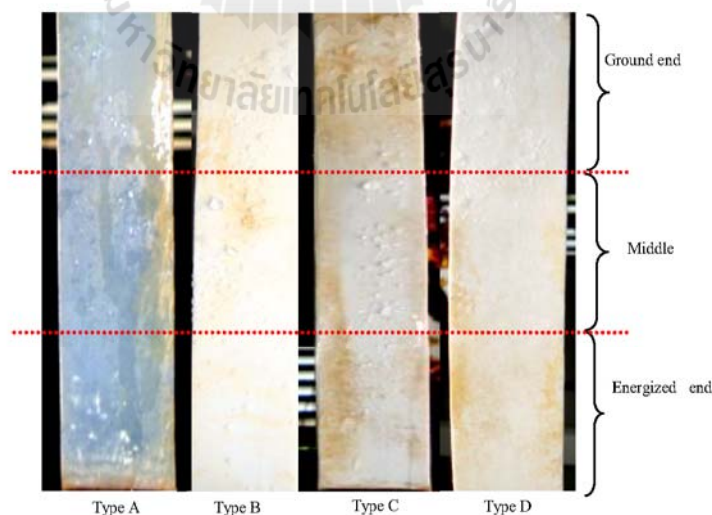


Fig. 8 Characteristics of hydrophobicity on surface

TABLE III
REDUCTION OF HYDROPHOBICITY

Position	Specimen			
	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
Ground end	HC6	HC4	HC4	HC4
Middle	HC6	HC4	HC4	HC5
Energized end	HC6	HC6	HC6	HC6

C. ATR-FTIR

Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) technique was used to investigate the molecular structural changes at the specimen surface. All tested specimen were cleaned by ethyl alcohol to remove deposition of salt layer. Then, each tested specimen was cut in

to three small pieces, energized end, middle and ground end portions. The absorption takes place at different frequencies, which is displayed by the IR spectra. IR spectra are expressed in wave numbers versus their intensities [11].

The chemical bonds of interested chemical structure are bonding side chain (Si-CH_3) with wave number 1261 cm^{-1} , backbone (Si-O) with wave number 1041 cm^{-1} . Decreasing of Si-CH_3 means separation of side chain and decreasing of Si-O refers to the separation of the back bone of polydimethylsiloxane bonding changes. The changes in the absorption peak of Si-CH_3 and Si-O bonds show degree of specimen surface deterioration. FTIR spectra of specimens and %Transmittance of specimens after 1000 hrs salt fog test are shown in Fig.9 and Table IV.

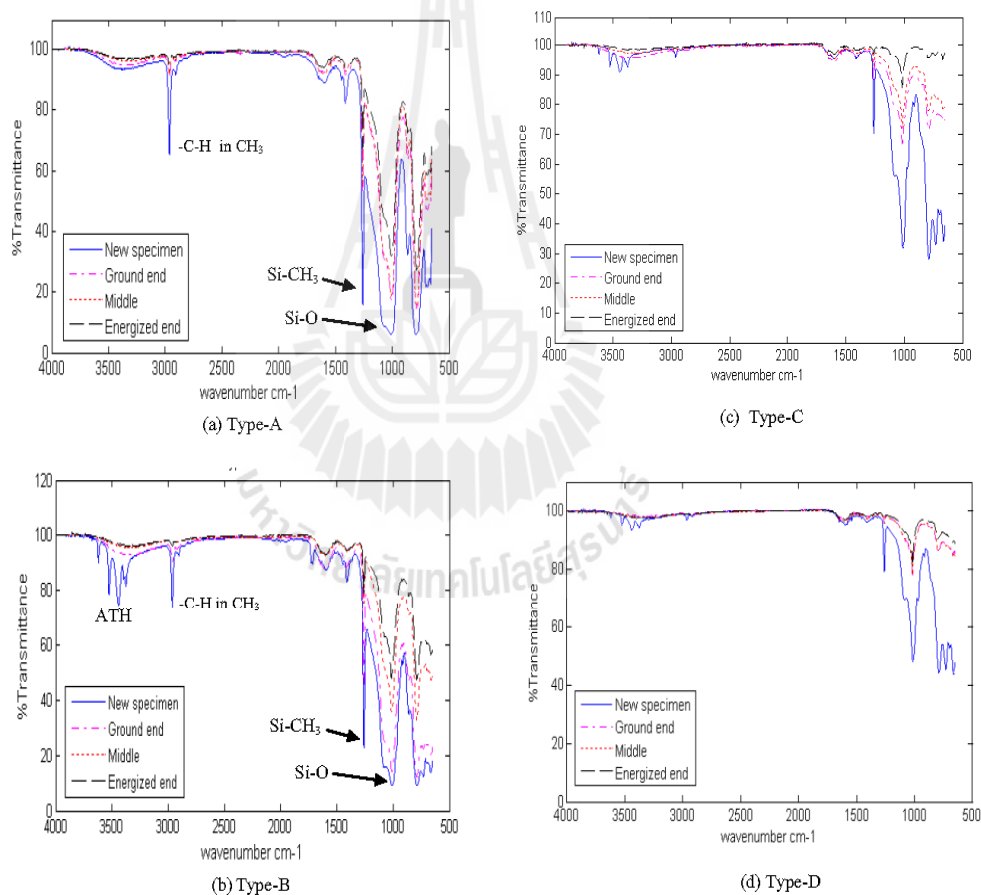


Fig. 9 FTIR spectra of test specimens

TABLE IV
SPECIMEN SURFACE ANALYSIS RESULTS BY ATR-FTIR

Type	Vibration	Wave No. cm^{-1}	%Transmittance			
			New specimens	Ground end	Middle	Energized end
A	Si-CH ₃	1261	81.79 (100%)	45.31(55.4%)	43.37(53.23%)	31.74(38.81%)
	Si-O	1041	92.00 (100%)	72.09(78.36%)	70.26(76.37%)	58.27(63.34%)
B	Si-CH ₃	1261	75.52 (100%)	53.60(70.97%)	24.28(25.42%)	20.70(21.67%)
	Si-O	1041	85.79 (100%)	77.43(90.25%)	54.07(63.02%)	40.41(47.10%)
C	Si-CH ₃	1261	11.93 (100%)	11.91(99.83%)	6.82(57.17%)	2.92(24.48%)
	Si-O	1041	28.28 (100%)	24.16(85.43%)	18.3(64.71%)	6.34(22.42%)
D	Si-CH ₃	1261	20.53 (100%)	3.96(19.29%)	4.14(20.17%)	2.96(14.42%)
	Si-O	1041	36.56 (100%)	13.33(36.46%)	12.80(35.01%)	9.77(26.72%)

D. SEM

A scanning electron microscope (SEM) was used for inspecting topographies of the specimen surface at high magnifications. Although visual observation by naked eyes was conducted to find out any deterioration on the specimen surface, but microstructural changes or invisible deterioration could not be found out by naked eyes. SEM can produce photo-micrographs of fracture surfaces of a specimen surface.

A comparison of the photo-micrographs between the aged and new specimen can provide a comparative indication of the surface conditions. Specimens were gold coated prior to examination [11]. Severe micro-erosion was observed on the energized end of tested specimen type-A comparing with the other type, as shown in Fig. 10.

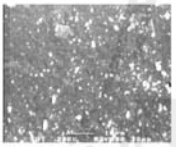
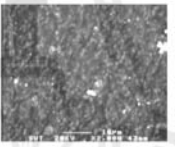
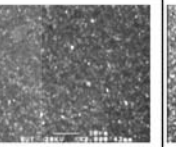
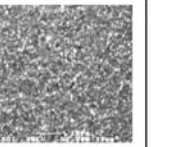
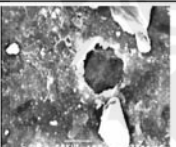
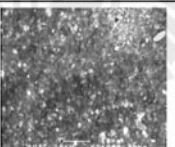
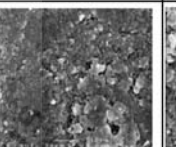
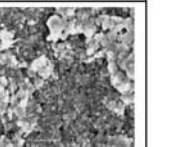
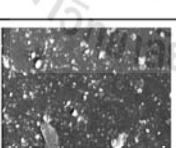
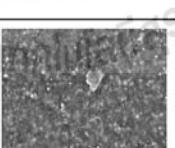
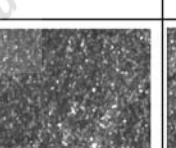
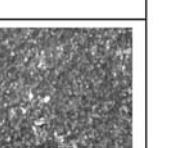
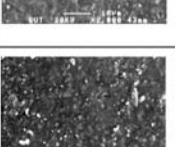
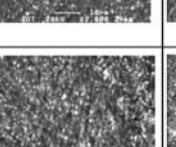
	position	Specimens			
		Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
After 1000 hrs salt fog ageing test.	New				
	Energized end				
	Middle				
	Ground end				

Fig. 10 SEM analyzes of the specimens surface.

E. Hardness

Hardness was measured to examine the chemical reactions, e.g. depolymerization and oxidative crosslinking, of the specimen surface. It is known that depolymerization of the backbone by thermal scission of siloxane bond causes softening of the silicone rubber whereas oxidative crosslinking causes hardening of the silicone rubber. The specimen surfaces were cut into small pieces at three portions, ground end, center and energized end, of individual specimens and surface hardness was measured. Hardness of tested specimens after 1000 hours salt fog ageing test, was measured with a shore A scale durometer system based on the ISO 868- Shore hardness[12]. Slightly increasing in hardness was obtained from the measurement result as shown in Table V. However, no significant different incessantly hardness was observed.

TABLE V
HARDNESS OF THE SPECIMEN BY SHORE A SCALE

Type	Shore A			
	Ground end	Middle	Energized end	New
A	67.04	65.68	67.2	66
B	77.6	77.28	80	76.64
C	84.64	84.24	83.92	82.88
D	90.96	89.76	90.24	89.36

F. Leakage Current

Leakage current flowing along the specimen surface was continuously measured and was recorded every 1 minute by leakage measuring software via LabView. Typical leakage current waveforms in each test cycle during salt fog injection are shown in Fig.11. The magnitudes of the leakage current increased gradually as the number of test cycles increased. The degree of the surface deterioration correlated with magnitudes of the leakage current.

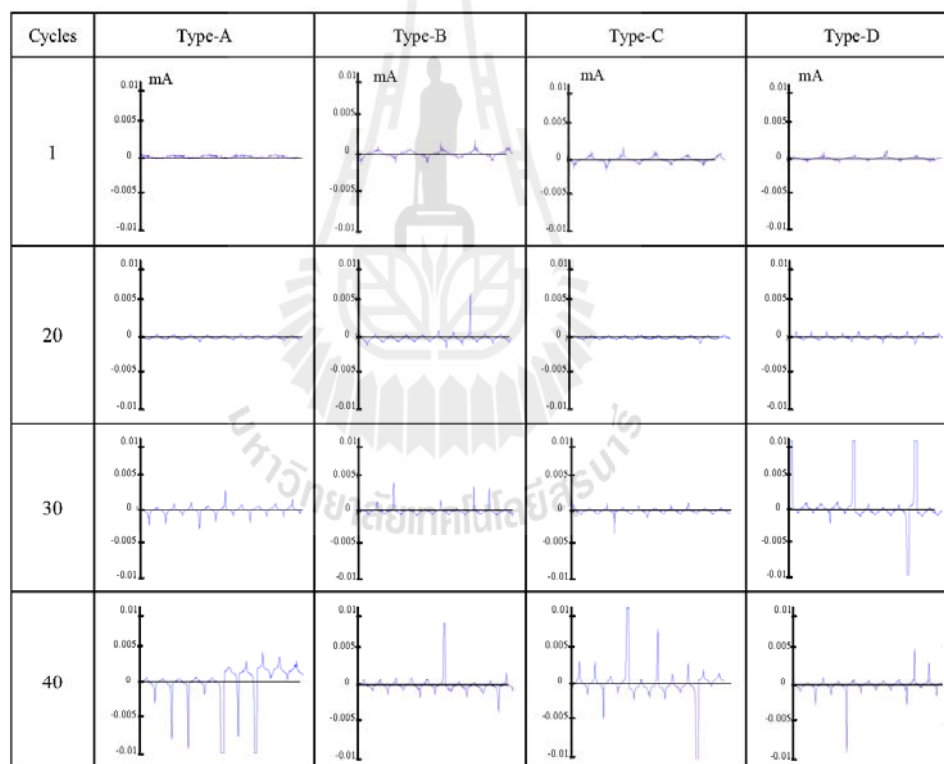


Fig. 11 Leakage current waveform (1 cycle is 24 hrs).

IV. CONCLUSION

Study of ageing deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulator based on IEC 61109. The following conclusions were given.

- 1.) Electrical stress and pollutants deposited on the surface of specimens caused ageing deterioration of specimens surface.
- 2.) Slightly erosion was observed on the specimens type-A (ATH 0 pph) and Type-B (ATH 50 pph).
- 3.) Extremely reduction of hydrophobicity (IIC6) was observed on the 4 types specimens near the energized end.
- 4.) The chemical analysis by ATR – FTIR also confirmed surface deterioration of silicone rubber housing material for insulator in the salt fog ageing test.

ACKNOWLEDGMENT

The Author would like to thank you Suranaree University of Technology and National Research Council of Thailand for kind financial support.

REFERENCES

- [1] S.J. Clarson, J.A. Semlyem, "Siloxane Polymers", Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [2] CIGRE TF33.04.07, "Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymer Insulators", CIGRE Pub. 142, June 1999.
- [3] T. Zhao and R. A. Bernstorff, "Ageing Tests of Polymeric Housing Materials for Non – ceramic Insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 2, March/April 1998, pp. 26 – 33.
- [4] M. C. Arklove and J. C. G. Wheeler, "Salt – Fog Testing of Composite Insulators", 7th Int. Conf. on Dielectric Material, Measurements and Applications, Conf. Pub. No. 430, September 1996, pp. 296 – 302.
- [5] B. Marungsri, H. Shinokubo, R. Matsuoka and S. Kumagai, "Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test", IEEE Trans. on DEI, Vol.13, No. 1, February 2006, pp. 129 – 138.
- [6] L.S. Nasrat and A. Nosseir, "Evaluation of polymeric insulating materials under polluted conditions", CIGRE 2002, 15-402.
- [7] T. Zhao and S. John, "Salt Fog Ageing Tests on Non –Ceramic Insulators and Fog Chamber Data Acquisition System", IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1996, pp. 377-380.
- [8] I. Gutman, R. Harting, R. Matsuoka and K. Kondo, "Experience with IEC 1109 1000h Salt Fog Ageing Test for Composite Insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June 1997, pp. 36 – 39.
- [9] I. Gutman, R. Harting, R. Matsuoka and K. Kondo, "Experience with IEC 1109 1000h Salt Fog Ageing Test for Composite Insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June, 1997, pp. 36 – 39.
- [10] STRI Guide, "Hydrophobicity Classification Guide", 92/1, 1992.
- [11] T. Zhao and R.A. Bernstorff, "Ageing Tests on of Polymeric Housing Materials for Non –Ceramic Insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 2, March/April, 1998, pp. 26 – 33.
- [12] ISO 868, "Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)".



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.



Power System Technology.

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 master degree 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



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



electrical power system.

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

ประวัติผู้เขียน

นายสุชาติ ทองอัม เกิดเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอศรีณรงค์ จังหวัดสุรินทร์ เริ่มศึกษาระดับอนุบาล ระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนบ้านแดง อำเภอศรีณรงค์ จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสังขะ อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ เมื่อ พ.ศ. 2548 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาในปี 2552 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะที่ได้ศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

