

ลักษณะจำเพาะของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

นางสาวรัชกรณ์ ระวังเหตุ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**CHARACTERISTICS OF AGING DETERIORATION OF
SILICONE RUBBER FOR OUTDOOR POLYMER
INSULATORS UNDER ACCELERATED
AGEING TEST**

Ratchaphon Rawonghad



**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 2015

ลักษณะจำเพาะของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับตู้กล้วยannonพอลิเมอร์
ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. ธนัชชัย กุลวรรณิขพงษ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัชภรณ์ระวังเหตุ :ลักษณะจำเพาะของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน
พอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ (CHARACTERISTICS OF
AGING DETERIORATION OF SILICONE RUBBER FOR OUTDOOR POLYMER
INSULATORS UNDER ACCELERATED AGEING TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา:ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี, 202 หน้า

ในปัจจุบันลูกถ้วยฉนวน พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ มากมายเนื่องจากมีข้อดีในการนำไปใช้งาน
มากกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดาแต่เมื่อ ใช้งานเป็นระยะเวลานาน ๆ จากความเครียด ทางไฟฟ้า
และ สภาพแวดล้อม ต่าง ๆ จึงทำให้ เกิดการเสื่อม อายุและนำไปสู่ความผิดปกติในระบบส่งจ่าย
ไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เพื่อนำไปตัดสินใจ
เลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ของฉนวนยางซิลิโคน ด้วยผลของโคโรนา-
ดีสชาร์จในสนามไฟฟ้าแนวตั้งฉากและแนวนาน ทดสอบที่สภาวะต่าง ๆ กัน คือในสภาวะไร้อากาศ -
หมอก หมอกไอเกลือและหมอกสะอาดประยุกต์มาจากมาตรฐาน IEC Publ.61109ทำการศึกษาผล
ของการเร่งการเสื่อมอายุกับฉนวนยางซิลิโคน 8 ชนิด (A-H) หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเสร็จ
สิ้น ทำการวิเคราะห์การเสื่อมอายุทางกายภาพและทางเคมีพบว่าจากผลของโคโรนาดีสชาร์จใน
แนวตั้งฉาก ที่วัสดุทดสอบชนิด A-H ไม่พบการเปลี่ยนแปลงจากก่อนการทดสอบมากนักในทุก
สภาวะยางซิลิโคนยังคงมีสภาพเช่นเดิม แต่จากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานพบว่า ยาง
ซิลิโคนชนิดที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่ได้ทำการทรีตเมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา หรือยางซิลิโคนชนิด
A เกิดการเสื่อมอายุมากกว่าชนิดอื่น โดยเฉพาะที่สภาวะหมอกไอเกลือ พบการกัดกร่อนและ
ร่องผิวเสื่อมสภาพอย่างชัดเจนทำให้ค่าความขรุขระมีมากขึ้น ค่าความแข็งก็มากขึ้น การ
เปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำฝนซึ่งได้จากวิธีวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ ด้วยเครื่องมือที่
ประยุกต์จากมาตรฐาน IEC/TS 62073พบว่ายางซิลิโคนชนิด H ยังคงค่าระดับความไม่ชอบน้ำที่
HC1-HC2 ซึ่งบอกได้ว่าวัสดุทดสอบยังมีคุณสมบัติหยดน้ำฝนที่ และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทาง
เคมีจากเทคนิค ATR-FTIR พบว่าพันธะ Si-CH₃ และ Si-O-Si มีปริมาณ ลดลง โดยเฉพาะที่วัสดุ
ทดสอบชนิด A ที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ต่างกับชนิด H ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดจากผล
การทดสอบทั้ง 3 สภาวะ ที่สภาวะหมอกไอเกลือที่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานมีผลทำให้
วัสดุทดสอบเกิดการเสื่อมอายุมากที่สุด เนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้าสูง และยังพบว่ายาง
ซิลิโคนที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง หรือเติมในปริมาณที่น้อยเกิดการเสื่อมอายุอย่างชัดเจน ทำให้

สูญเสียคุณสมบัติความเป็นฉนวน โดยเฉพาะที่บริเวณด้านต่อแรงดัน พบรอยกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพ ดังนั้นการเติมสารเพื่อเสริมคุณสมบัติของยางซิลิโคนจึงจำเป็นต่อการฉนวน และการเลือกใช้ยางซิลิโคนที่มีการเติมสารเพื่อเสริมคุณสมบัติของยางซิลิโคนอาจช่วยให้ยางซิลิโคนเสื่อมอายุช้าลงได้



สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

RATCHAPHON RAWONGHAD:CHARACTERISTICS OF AGING
DETERIORATION OF SILICONERUBBER FOR OUTDOOR
POLYMERINSULATORS UNDERACCELERATED AGEING TEST.
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D.Eng.,
202PP.

AGING DETERIORATION/SILICONE RUBBER/POLYMER INSULATORS
/ACCELERATED AGEING TEST

This thesis studied about characteristics of aging deterioration of silicone rubber. The accelerated aging test using electric field consisted of vertical corona discharged and parallel corona discharged. The study will be performed in different environments such as no fog, clean fog and salt fog conditions, adapted from IEC6119 standard. 8 types of polymer rubber sheets (A to H) were used in this experiment. After the test, all specimens of vertical corona discharged test had less physical and chemical changed than those of parallel corona discharged test. Specimen A (that had no additives and not treatment with silica fume) was the most aging deterioration. Especially in salt fog test, Specimen A was found a lot of tracking and erosion on the entire surface. Hydrophobicity property (IEC/TS 62073 standard) of Specimen A was the least HC level while Specimen H (that adds most of additives and had treatment with silica fume) was at HC1 to HC2 which was better than other specimens. Analysis of chemical changed using ATR-FTIR technique (attenuated total reflectance-Fourier transforms infrared spectrometer) found that Si-O-Si and Si-CH₃ had been changed mostly at Specimen A while Specimen H had least changed.

This meant that Specimen H was aging slower than the other specimens. The results showed that in the salt fog test, parallel corona discharged test had been more affected on specimen's surface than other tests. Specimens that had no additives added had been aging faster than other specimens, then finally lost its dielectric property. Therefore the additives were very necessary in polymer insulation. In addition, the energized end of the specimen was found tracking and erosion more than the other side. This indicated that polymer insulators that had high additives and had well treatment with silica fume could be expected and extended the life cycle.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ นายปรัชญา แก้วจันทิก พี่วรวิทย์ พยัมโซ พี่สุชาติ ทองอัม และพี่ ๆ กลุ่มเทคโนโลยีการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อน ๆ มหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ในทุก ๆ เรื่องที่ข้าพเจ้ามีปัญหา

ขอขอบคุณ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายสัมพันธ์ ระวังเหตุ ผู้เป็นบิดา และนางนวลฉวี ระวังเหตุ ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และ นางสาวอรปวีณ์ ระวังเหตุ ผู้เป็นน้อง ที่ให้แรงบันดาลใจแก่ข้าพเจ้า ให้การส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมา ผู้ที่ให้ทั้งแรงกายและแรงใจจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

รัชกรณ ะวังเหตุ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
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	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 สรุป	11
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 กล่าวนำ	12
3.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	12
3.3 โครงสร้างและรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	13
3.3.1 ยางซิลิโคน	14
3.4 กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	ปัจจัยในการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	18
3.5.1	สนามไฟฟ้า	18
3.5.1.1	การเกิดดีสชาร์จบางส่วน	20
3.5.1.2	การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ	20
3.5.2	ความร้อนและผลจากรังสีอัลตราไวโอเลต	21
3.5.3	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	21
3.5.4	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	22
3.5.5	คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น	23
3.6	การวิเคราะห์การเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคน	25
3.6.1	การวิเคราะห์ทางกายภาพ	25
3.6.1.1	การวัดความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน	25
3.6.1.2	การวัดความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน	27
3.6.1.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำขึ้น	28
3.6.2	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี	32
3.7	สรุป	34
4	การออกแบบและสร้างชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคน และชุดวัดมุมสัมผัส	35
4.1	กล่าวนำ	35
4.2	ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคน	35
4.3	มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 clause 5.3	35
4.4	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	36
4.5	ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก	36
4.5.1	ชุดทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก	36
4.5.1.1	อิเล็กทรอนิกส์สายแหลม	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1.2	อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน.....	38
4.5.1.3	ตัวทดสอบ.....	39
4.5.2	ตัวทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน	41
4.5.2.1	อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน.....	41
4.5.2.2	ฐานวางวัสดุทดสอบ.....	42
4.5.2.3	ตัวทดสอบ.....	45
4.5.3	ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	47
4.6	ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขงซิลิโคนในสภาวะหมอกสะอาด และหมอกไอเกลือ	48
4.6.1	ห้องทดสอบ.....	49
4.6.2	โคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก	49
4.6.2.1	อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน.....	49
4.6.2.2	อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน.....	50
4.6.3	โคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน	52
4.6.3.1	อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน.....	52
4.6.4	เครื่องสร้างหมอก	54
4.6.5	ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า	55
4.7	มาตรฐาน IEC 62073	56
4.8	ชุดวัดมุมสัมผัส	57
4.8.1	ฐานตั้งวัสดุทดสอบ.....	57
4.8.2	ฉากหลัง.....	62
4.8.3	โซลิ่งและฐานจับโซลิ่ง.....	63
4.8.4	กล้องบันทึกภาพ	64
4.9	สรุป.....	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	การทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	66
5.1	กล่าวนำ.....	66
5.2	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน	66
5.3	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3.....	68
5.4	การเตรียมวัสดุทดสอบ	68
5.4.1	ชนิดของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน	68
5.4.2	แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบกรณีโคโรนาดีสชาร์จ ใน แนวตั้งฉาก	70
5.4.3	แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบกรณีโคโรนาดีสชาร์จ ใน แนวนาน.....	71
5.5	การวัดแรงดันโคโรนาดีสชาร์จ	72
5.6	วิธีดำเนินการทดสอบ.....	75
5.6.1	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก.....	75
5.6.2	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอกสะอาด และในสภาวะหมอกไอเกลือ	76
5.7	สรุป.....	78
6	การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ	79
6.1	กล่าวนำ.....	79
6.2	การวิเคราะห์การเสื่อมอายุทางกายภาพของแผ่นยางซิลิโคน.....	79
6.2.1	การเตรียมวัสดุทดสอบเพื่อวิเคราะห์การเสื่อมอายุ	79
6.2.2	การสังเกตฉนวนยางซิลิโคนด้วยสายตา.....	80
6.2.3	การวัดความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน	88
6.2.4	การวัดความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน	92
6.2.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำขึ้น	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางซิลิโคน.....	116
6.3.1	การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด โครมาโตกราฟี.....	116
6.4	ผลของปริมาณ ATH และการทรีตเมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกาต่อการเสื่อมอายุ.....	145
6.5	ผลของสภาวะในการเร่งการเสื่อมอายุของวัสดุทดสอบที่มีการเติม ATH และการทรีตเมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา.....	147
6.6	สรุป.....	149
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	151
7.1	สรุป.....	151
7.2	ข้อเสนอแนะ	153
	รายการอ้างอิง.....	154
	ภาคผนวก	157
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ	157
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	168
	ภาคผนวก ค. มาตรฐานเกี่ยวข้องในงานวิจัย.....	178
	ประวัติผู้เขียน	202

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1	เกณฑ์สำหรับแยกประเภทความไม่ชอบน้ำ (HC1-HC7).....	31
5.1	ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือตามมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3.....	68
5.2	ชนิดของแผ่นยางซิลิโคน.....	69
5.3	ค่าแรงดันโคโรนา.....	74
5.4	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก	75
5.5	การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาดและในสภาวะหมอกไอเกลือ.....	76
5.6	วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาดและสภาวะ หมอกไอเกลือ (24 ชั่วโมง).....	77
6.1	หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก	81
6.2	หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาด	83
6.3	หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือ.....	85
6.4	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะไร้หมอกผลของโคโรนา ในแนวตั้งฉาก.....	89
6.5	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะไร้หมอกผลของโคโรนา ในแนวนอน	89
6.6	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกสะอาดผลของ โคโรนาในแนวตั้งฉาก	90
6.7	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกสะอาดผลของ โคโรนาในแนวนอน.....	90
6.8	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกไอเกลือผลของ โคโรนาในแนวตั้งฉาก	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

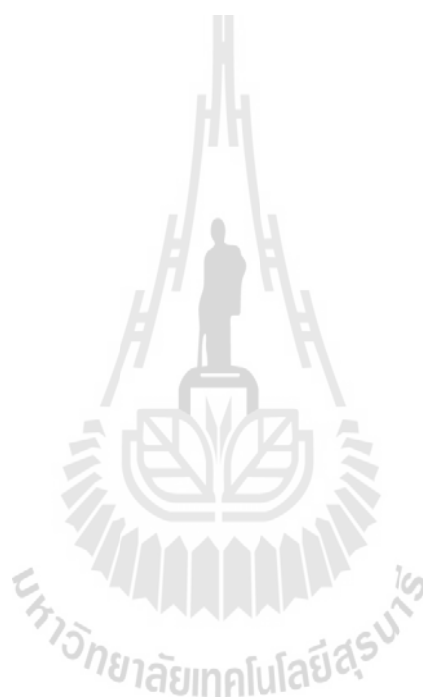
ตารางที่ หน้า

6.9	ค่าความแข็งของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกไอเกลือผลของ โคโรนาในแนวนาน.....	91
6.10	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะไร้หมอกผลของโคโรนา ในแนวตั้งฉาก.....	93
6.11	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะไร้หมอกผลของโคโรนา ในแนวนาน	94
6.12	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกสะอาดผลของ โคโรนาในแนวตั้งฉาก	94
6.13	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกสะอาดผลของ โคโรนาในแนวตั้งฉาก	95
6.14	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกไอเกลือผลของ โคโรนาในแนวตั้งฉาก	95
6.15	ค่าความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนหลังทดสอบในสภาวะหมอกไอเกลือผลของ โคโรนาในแนวนาน.....	96
6.16	การหาค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดมุม	103
6.17	ค่ามุมสัมผัสก่อนการทดสอบของยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด	104
6.18	ค่ามุมสัมผัสของผิวฉนวนหลังการทดสอบแรงเสียดทานในสภาวะไร้หมอกจาก ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก	106
6.19	ค่ามุมสัมผัสของผิวฉนวนหลังการทดสอบแรงเสียดทานในสภาวะไร้หมอกจาก ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน.....	107
6.20	ค่ามุมสัมผัสของผิวฉนวนหลังการทดสอบแรงเสียดทานในสภาวะหมอกสะอาดจากผล ของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก	109
6.21	ค่ามุมสัมผัสของผิวฉนวนหลังการทดสอบแรงเสียดทานในสภาวะหมอกสะอาดจากผล ของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน.....	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

- 6.22 ค่ามุมสัมผัสของพิกนนวนหลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือจากผล
ของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก 112
- 6.23 ค่ามุมสัมผัสของพิกนนวนหลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือจากผล
ของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน 113



สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1	ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....	12
3.2	โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์	13
3.3	โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS.....	14
3.4	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กัน.....	18
3.5	ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 1	21
3.6	ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 2	22
3.7	ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 3	22
3.8	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 1.....	23
3.9	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 2.....	23
3.10	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 3.....	23
3.11	มุมสัมผัสของหยดน้ำ.....	23
3.12	การวัดมุมคงค่าตามสมการของยัง.....	24
3.13	การวัดมุมในระนาบต่าง ๆ	25
3.14	การทดสอบของเครื่องมือ Rockwell Hardness test.....	26
3.15	เครื่องทดสอบความแข็ง Willson/Rockwell Hardness test series 500	27
3.16	ลักษณะกราฟจากการทดสอบความขรุขระของวัสดุ.....	28
3.17	เครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระ Mitutoyo SV-400	28
3.18	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดหาค่ามุมสัมผัส	29
3.19	วิธีการวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์	30
3.20	การวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์	31
3.21	ผลของช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.22	ลักษณะการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR	33
3.23	เครื่องวิเคราะห์ ATR-FTIR spectrometer Bruker model T27/Hyp 2000.....	34
4.1	การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก	36
4.2	ขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดปลายแหลมที่ออกแบบ	37
4.3	ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์โทรดปลายแหลม.....	37
4.4	ขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดระนาบที่ออกแบบ	38
4.5	ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์โทรดระนาบ	38
4.6	ขนาดตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากที่ออกแบบ	39
4.7	ลักษณะตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก.....	39
4.8	การวางวัสดุทดสอบลงในตู้ทดสอบ	40
4.9	การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก	40
4.10	การติดตั้งการทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนาน	41
4.11	ขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรดปลายแหลมที่ออกแบบ	41
4.12	ขนาดอะลูมิเนียมชั้นหนีบวัสดุทดสอบที่ออกแบบ	42
4.13	ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์โทรดปลายแหลม-ปลายแหลมและอุปกรณ์ยึดวัสดุทดสอบ	42
4.14	ขนาดฐานตั้งวัสดุทดสอบที่ออกแบบ.....	43
4.15	ลักษณะฐานตั้งวัสดุทดสอบ.....	43
4.16	การติดตั้งการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนานที่ออกแบบ	44
4.17	การติดตั้งการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนานที่ออกแบบ	44
4.18	ขนาดตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนานที่ออกแบบ	45
4.19	ลักษณะตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนาน	45
4.20	ตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนาน	46
4.21	การติดตั้งการทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนาน	46
4.22	การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนาน	47
4.23	ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า	47
4.24	ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนกรณีไร้หมอกที่สร้างเสร็จ	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.25	ลักษณะห้องทดสอบปิดในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน กรณีหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ	49
4.26	ลักษณะอิเล็กโตรดปลายแหลม.....	50
4.27	ลักษณะอิเล็กโตรดระนาบ	50
4.28	ลักษณะฐานตั้งแผ่นอิเล็กโตรดระนาบ	51
4.29	ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบที่ออกแบบ	51
4.30	ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ	52
4.31	ลักษณะอิเล็กโตรดปลายแหลม.....	52
4.32	ลักษณะการยึดอิเล็กโตรดปลายแหลม-ปลายแหลม.....	53
4.33	ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโตรดปลายแหลม-ปลายแหลมที่ออกแบบ	53
4.34	ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโตรดปลายแหลม-ปลายแหลม	53
4.35	การติดตั้งวัสดุทดสอบ	54
4.36	เครื่องสร้างหมอก.....	54
4.37	ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า	55
4.38	ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนกรณีไร้หมอกที่สร้างเสร็จ	55
4.39	ส่วนประกอบของฐานตั้งวัสดุทดสอบ	57
4.40	ขนาดของฐานส่วนที่ 1.....	57
4.41	ฐานส่วนที่ 1.....	58
4.42	ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 2.....	58
4.43	ฐานส่วนที่ 2.....	59
4.44	ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 3.....	59
4.45	ฐานส่วนที่ 3.....	60
4.46	ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 4.....	60
4.47	ฐานส่วนที่ 4.....	61
4.48	ลักษณะการประกอบฐานตั้งวัสดุทดสอบในแต่ละส่วน.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.49	ลักษณะฐานตั้งวัสดุทดสอบ.....	62
4.50	ลักษณะฉากหลัง	62
4.51	ลักษณะการติดตั้งฉากหลังเข้ากับฐานวางวัสดุทดสอบ.....	63
4.52	ไซริง	63
4.53	ฐานจับไซริง	63
4.54	ลักษณะกล้องบันทึกภาพและการติดตั้งกล้องบันทึกภาพ	64
4.55	ลักษณะการประกอบฐานชุดวัดมุมสัมพัทธ์ในแต่ละส่วน	64
4.56	ลักษณะการประกอบฐานชุดวัดมุมสัมพัทธ์ในแต่ละส่วน	65
5.1	แผนผังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ	67
5.2	ลักษณะแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด.....	69
5.3	ลักษณะการวางแผ่นฉนวนยางซิลิโคนบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในกรณีไร้หมอก	70
5.4	ลักษณะการวางแผ่นฉนวนยางซิลิโคนบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในกรณีหมอกสะอาด และหมอกไอเกลือ	70
5.5	ลักษณะการยึดแผ่นฉนวนยางซิลิโคนกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในกรณีไร้หมอก	71
5.6	ลักษณะการยึดแผ่นฉนวนยางซิลิโคนกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในกรณีหมอกสะอาด และหมอกไอเกลือ	71
5.7	วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ	72
5.8	ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก	73
5.9	ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน	74
5.10	ลักษณะการติดตั้งและการจ่ายแรงดันให้วัสดุทดสอบภายในห้องทดสอบ	75
5.11	ลักษณะการติดตั้งและการจ่ายแรงดันให้วัสดุทดสอบภายในห้องทดสอบ	77
6.1	ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก(ซ้าย)และผลของโคโรนาดีสชาร์จ ในแนวนอน(ขวา)	79
6.2	การวัดและวิเคราะห์ของวัสดุทดสอบที่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก	80
6.3	การวัดและวิเคราะห์ของวัสดุทดสอบที่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.4	เครื่องทดสอบความแข็ง Willson/Rockwell Hardness test series 500	88
6.5	เครื่องทดสอบวัดความขรุขระ Mitutoyo SV-400	93
6.6	วิธีการหามุมสัมผัสหยดน้ำ	97
6.7	การเลือกไฟล์	99
6.8	การเริ่มต้นโปรแกรม	100
6.9	การแปลงรูปภาพหยดน้ำ	100
6.10	การเลือกรูปภาพหยดน้ำ	101
6.11	การเลือกตำแหน่ง	101
6.12	การแสดงค่าเมื่อจบการทำงาน	102
6.13	รูปจำลองหยดน้ำ	102
6.14	เครื่องวิเคราะห์ Spectrometer Bruker model T27/Hyp 2000	116
6.15	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสถานะไร้หมอก	117
6.16	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	117
6.17	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสถานะไร้หมอก	118
6.18	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	118
6.19	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสถานะไร้หมอก	119
6.20	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	119
6.21	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสถานะไร้หมอก	120
6.22	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	120
6.23	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสถานะไร้หมอก	121
6.24	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.25	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสถานะไร้หมอก.....	122
6.26	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสถานะไร้หมอกขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	122
6.27	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสถานะไร้หมอก	123
6.28	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสถานะไร้หมอก ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	123
6.29	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสถานะไร้หมอก	124
6.30	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสถานะไร้หมอก ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	124
6.31	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสถานะหมอกสะอาด.....	125
6.32	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสถานะหมอกสะอาดขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	125
6.33	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสถานะหมอกสะอาด	126
6.34	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสถานะหมอกสะอาดขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	126
6.35	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสถานะหมอกสะอาด	127
6.36	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสถานะหมอกสะอาดขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	127
6.37	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสถานะหมอกสะอาด.....	128
6.38	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสถานะหมอกสะอาดขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	128
6.39	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสถานะหมอกสะอาด	129
6.40	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสถานะหมอกสะอาดขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	129
6.41	อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสถานะหมอกสะอาด.....	130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.42 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสภาวะหมอกสะอาดขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	130
6.43 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสภาวะหมอกสะอาด.....	131
6.44 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสภาวะหมอกสะอาดขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	131
6.45 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสภาวะหมอกสะอาด.....	132
6.46 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสภาวะหมอกสะอาดขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	132
6.47 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสภาวะหมอกไอเกลือ.....	133
6.48 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ในสภาวะหมอกไอเกลือขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	133
6.49 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสภาวะหมอกไอเกลือ	134
6.50 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ในสภาวะหมอกไอเกลือขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	134
6.51 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสภาวะหมอกไอเกลือ	135
6.52 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ในสภาวะหมอกไอเกลือขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	135
6.53 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสภาวะหมอกไอเกลือ.....	136
6.54 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ในสภาวะหมอกไอเกลือขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	136
6.55 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสภาวะหมอกไอเกลือ	137
6.56 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ในสภาวะหมอกไอเกลือขยายไปที่	
Wave number 900-1300 cm^{-1}	137
6.57 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสภาวะหมอกไอเกลือ	138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.58 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ในสถานะหมอกไอเกลือขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	138
6.59 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสถานะหมอกไอเกลือ	139
6.60 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ในสถานะหมอกไอเกลือขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	139
6.61 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสถานะหมอกไอเกลือ	140
6.62 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ในสถานะหมอกไอเกลือขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}	140
6.63 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใน สถานะไรร้อน cm^{-1}	142
6.64 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใน สถานะหมอกสะอาด cm^{-1}	143
6.65 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใน สถานะหมอกเกลือ cm^{-1}	144
6.66 วัสดุทดสอบก่อนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ	145
6.67 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสถานะไรร้อน	145
6.68 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสถานะหมอกสะอาด	146
6.69 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสถานะหมอกไอเกลือ	146
6.70 กราฟความสัมพันธ์ของวัสดุทดสอบชนิด A	148
6.71 กราฟความสัมพันธ์ของวัสดุทดสอบชนิด H	148

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา ด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทยระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่าย ไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นถ้าฉนวน ได้รับ การออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสมปัจจุบันระบบไฟฟ้าแรงสูงของ ประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็นแบบสายจึงในอากาศและใช้ฉนวนด้วยฉนวนแบบทั่วไปซึ่งได้แก่ฉนวนด้วย ฉนวนพอร์ซเลนและฉนวนด้วยฉนวนแบบแก้วเหนียวจากข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่า การขัดข้องของ สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลหรือใกล้กับโรงงาน อุตสาหกรรมเป็นประจำเนื่องจากการเกิดวายุไฟตามผิวจากความเปรอะเปื้อนของฉนวนด้วยฉนวน นอกจากนั้นมลภาวะโดยรอบอาจทำให้แกนของฉนวนเป็นสนิมและผุกร่อนอาจส่งผลให้เกิดการ หลุดร่วงของสายส่งขึ้นบางครั้งต้องใช้เวลาในการกู้ระบบนำมาสู่ที่สภาวะปกติอีกครั้งการ แก้ปัญหาแบบเดิมคือเปลี่ยนฉนวนด้วยชุดใหม่แต่ก็ยังเกิดปัญหาลักษณะเดิมขึ้นเหมือนเดิมวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม สำหรับบริเวณที่มีมลภาวะก็คือการนำฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้แทน

ข้อดีของฉนวนด้วยฉนวนยางซิลิโคนหรือฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนด้วย ฉนวนพอร์ซเลนหรือฉนวนด้วยฉนวนแก้วเหนียวคือ

1. ฉนวนด้วยฉนวนยางซิลิโคนมีอัตราส่วนความทนทานแรงกดต่อน้ำหนัก (mechanical strength to weight ratios) สูงกว่าฉนวนด้วยฉนวนแบบทั่วไปทำให้ลดราคาในการก่อสร้างและการ บำรุงรักษาสายส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบก่อสร้างสายส่ง แบบกะทัดรัดได้

2. ฉนวนด้วยฉนวนยางซิลิโคนมีแรงตึงผิวต่ำ (low surface tension energy) จึงทำให้ผิวของ ฉนวนด้วยฉนวนมีคุณสมบัติผิวหยาบคาย (hydrophobic surface property) คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ฉนวน ด้วยฉนวนยางซิลิโคนมีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนและสภาวะเปียกชื้นดีกว่าฉนวน ด้วยฉนวนแบบทั่วไป

3. ฉนวนด้วยฉนวนยางซิลิโคนไม่มีปัญหาที่ปกฉนวนด้วยฉนวนแตกหักหรือชำรุดเสียหายที่เกิดจาก กลุ่มคนที่ชอบทำลายสมบัติสาธารณะ

ข้อดีของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนหรือลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้วเหนียวคือ

1. เนื่องจากยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์เมื่อใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานานทำให้เกิดอาร์กแถบแห้ง (dry band arcing) จนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผิวฉนวน
2. ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สามารถสุกก่อนเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลง
3. ความเชื่อมั่นในระยะยาว (long term reliability) และอายุการใช้งาน (life expectancy) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ยังยากที่ประมาณหรือคาดเดาได้
4. ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตพร้อมมีความยากในการตรวจสอบว่าเกิดจากปัญหาอะไร

ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสมรรถนะความทนทานของยางซิลิโคนต่อการสุกก่อนของพื้นผิวฉนวนและการเสถียรภาพของคุณสมบัติผิวหยดน้ำของยางซิลิโคนทั้งในสภาวะแวดล้อมจากการใช้งานจริงและสภาวะที่ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการอย่างกว้างขวาง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินค่าความเชื่อมั่นระยะยาวในการนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิลิโคนมาใช้แทนที่การใช้ลูกถ้วยฉนวนแบบทั่วไปและเพื่อทำการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานเนื่องจากสภาวะแวดล้อมก็เป็นสาเหตุสำคัญในการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์การที่จะออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยจึงทำได้ยากด้วยเหตุนี้ทางการไฟฟ้าในประเทศไทยจึงยังคงต้องนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาด้านมลภาวะจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุที่ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณี คือ (1) การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จ(corona discharge) ภายใต้สภาวะไร้หมอก(2) การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จภายใต้สภาวะหมอกสะอาด(3)การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จภายใต้สภาวะหมอกไอเกลือ โดยจำลองสภาวะที่มีไอหมอกที่ใช้งานตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC Publ. 1109-1992 clause 5.3และใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ค่าความแข็ง และค่าความขรุขระที่เปลี่ยนไป รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle) ที่ทดสอบบนผิวยางซิลิโคน ซึ่งเป็นตัววิเคราะห์การเสื่อมถอยของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น รวมทั้งวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection-Fourier Transforms Infrared Spectroscopy) เพื่อ

เป็นตัวชี้วัดการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน และนำองค์ความรู้ที่ได้ไปเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะการเสื่อมถอยของยางซิลิโคนภายใต้การทดสอบเร่งเสื่อมอายุ
2. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนที่เสื่อมอายุ
3. เพื่อออกแบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัส (contact angle) สำหรับตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำบนผิวยางซิลิโคน
4. เพื่อหาองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ต่อไป

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุโดยใช้โคโรนาดีสชาร์จ โดยใช้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับผิวยางซิลิโคน
2. ทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุโดยใช้โคโรนาดีสชาร์จ ในสภาวะหมอกไอเกลือโดยใช้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับผิวยางซิลิโคน
3. ทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุโดยใช้โคโรนาดีสชาร์จ ในสภาวะหมอกธรรมดาโดยใช้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับผิวยางซิลิโคน
4. สร้างชุดวัดมุมสัมผัสและตรวจสอบคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC/TS 62073 และ STRI Guide

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาปฏิกิริยวัฏจักรและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
2. ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนทั้ง 6 กรณี โดยทำการทดสอบแต่ละกรณีอย่างละ 1000 ชั่วโมง
3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผิวฉนวนซิลิโคนทางกายภาพ
4. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผิวฉนวนซิลิโคนด้วยเทคนิค ATR-FTIR

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการเสื่อมอายุจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
2. สามารถทำการทดสอบเพื่อประเมินลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนลูกถ้วยยางซิลิโคน
3. ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนสำหรับทำโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ภายหลังการเร่งการเสื่อมในที่ประชุมวิชาการได้

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งประกอบด้วยชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จและหมอกไอเกลือประคิษฐ์และการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จและหมอกสะอาด

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จและหมอกไอเกลือประคิษฐ์และการทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จและหมอกสะอาดของฉนวนยางซิลิโคน

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบโครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน รวมไปถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำ

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยทำการทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้โคโรนาดีสชาร์จ โดยทำการทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน IEC Publ. 61109 และทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เคยมีมาเพื่อหาแนวทางการวิจัยระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานจากคณะนักวิจัยหลาย ๆ ท่านตั้งแต่อดีตเป็นต้นมาโดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE และ IEE เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยที่ใช้เป็นแนวทางประยุกต์และพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และการศึกษาลักษณะหยดน้ำล้น ที่นักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าและวิจัยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันสามารถสรุปการดำเนินงานวิจัยโดยอธิบายได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1990	S. M. Gubanski and A.E. Vlastos	ศึกษาคุณสมบัติหยดน้ำล้น โดยการวัดมุมแบบสถิตย์ (static contact angle) ด้วยวิธี half angle method ทดสอบบนผิวยางซิลิโคนEDPM เทียบกับยางซิลิโคนที่ไม่ได้ทำการเร่งเสื่อมอายุพบว่ายางที่ผ่านการเร่งการเสื่อมอายุไม่มีการพ่นคืนคุณสมบัติหยดน้ำล้นและค่ามุมสัมผัสลดลง โดยขึ้นกับเวลาที่ยางซิลิโคนได้รับแรงดันโคโรนา ส่วนยางซิลิโคนที่ไม่ได้เร่งการเสื่อมอายุมีระยะรักษาดัวในการพ่นคุณสมบัติหยดน้ำล้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1999	J. Kim and M. K. Chaudhury	ศึกษาผลของการสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำและ การฟื้นคืนสภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำของฉนวน ยางซิลิโคนหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะพบว่า การฟื้นคืนสภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำเกิดจากการ แพร่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
1999	G. Paolettian and A. Golubev	ทดสอบรูปแบบของดีสชาร์จบางส่วนแบบต่าง ๆ กับ ฉนวนหลาย ๆ แบบ โดยป้อนไฟ 4kV จ่ายไปที่ขั้ว ทองแดง และใช้ฉนวนแบบต่าง ๆ เป็นตัวกลาง พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนใหม่มีกระแสรั่วเกิดขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่ พบการเกิดดีสชาร์จ-บางส่วน ฉนวนผสมมีกระแสรั่ว คงที่ตลอดการทดสอบและเกิดดีสชาร์จบางส่วน เล็กน้อยทั้งขั้วลบและขั้วบวกส่วนฉนวนที่มีสิ่ง ปนเปื้อน (pollution) มีกระแสรั่วมาก และเกิดความผิ พร่องขณะทดลองเกิดดีสชาร์จบางส่วนทำให้เกิดรอย แตกโก่ง ๆ ขั้วทองแดง สูดท้ายในฉนวนที่มีรอยแตก เกิดกระแสรั่วมากที่สุด และเกิดความเสียหายใน ระหว่างการทดสอบ เกิดดีสชาร์จบางส่วนและเกิดอาร์ก (arc) ทำให้เกิดความเสียหายแบบถาวร
1999	V.M. Moreno and R.S. Gorur	ศึกษาการเสื่อมอายุของฉนวนด้วยฉนวนแบบพอลิเมอร์ ภายใต้โคโรนาดีสชาร์จ บนฉนวนต่าง ๆ กัน และขนาด ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการเสื่อมสภาพทางเคมีและทาง กายภาพ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 7.2 kV โดยทำการทดลอง 500 ชั่วโมงเมื่อตรวจสอบด้วยตาพบว่า ฉนวนทั้งหมด เกิดความเสียหายต่าง ๆ กัน SiRชนิด A พบรอยแตกเล็ก ถึง 0.5 mm. SiRชนิด Bพบการเปลี่ยนสีที่ผิวเท่านั้น SiR ชนิด C มีความเสียหายมากกว่า SiRชนิด A และเกิด ความเสียหายในช่วงชั่วโมงที่ 200 เท่านั้น และสุดท้าย PVC พบการกัดกร่อนบนผิวและพบรอยการเกิด คาร์บอนไนเซชัน (carbonization) อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	I. Lopes S. H. Jayaram and E.A. Cherney	ศึกษาการเสื่อมอายุโดยการวัดคีสชาร์จบางส่วน (partial discharge:PD) และศึกษาลักษณะกระแสรั่ว บนผิวยางซิลิโคน ภายใต้การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุด้วยตู้หมอกไอเกลือ (salt fog test) สูงจนวนพอลิเมอร์ซิลิโคนแบบ 3 ปี และ 4 ปี พบว่า PD เป็นวิธีที่ยากต่อการตรวจสอบการเริ่มเปลี่ยนแปลงจากโคโรนาที่เกิดจากหยดน้ำ จนถึงช่วงที่เกิดวาบไฟตามผิว (dry-band arcing) พบว่าระดับของ PD จะมีลักษณะที่เปลี่ยนไปอย่างฉับพลัน เมื่อเกิดวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยจนวนทั้ง 2 ชนิด
2003	S. Kumagai and N. Yoshimura	ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นบนแผ่นยางซิลิโคน ทดสอบทั้งหมด 2000 ชั่วโมง ด้วยสภาพแวดล้อมที่มีความเครียดต่างๆ เช่น แสง UV โคโรนา คีสชาร์จ (คงค่ากระแส 3-4 mA) และความร้อน เมื่อทำการทดสอบครบแล้ว จึงวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์โดยให้หยดน้ำมีปริมาตร 5 μ l และทำการวัดมุมสัมผัสด้วยกล้องไมโครสโคป พบว่าวัสดุทดสอบมีมุมอยู่ที่ $23 \pm 2^\circ$
2007	B. Bhushan and Y.C. Jung	ศึกษาคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น ที่มีมุมสัมผัส อยู่ในช่วง 150° - 180° บน Single-crystal Silicon 2 ชนิดโดยทำการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ 5 ตำแหน่งบนพื้นผิววัสดุทดสอบ และนำมาเทียบมุมสัมผัส โดยพบว่าการวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์ควรใช้หยดน้ำที่เล็ก จึงเลือกใช้หยดน้ำขนาด 5 μ l และใช้ไมโคร-ไซริงขนาด 1ml เลือกใช้น้ำ DI (de-ionization) พบว่าเมื่อวัดมุมแบบสถิตย์แล้วได้ มุมสัมผัสที่ชนิดที่ 1 เป็น 109° และชนิดที่ 2 เป็น 152° - 170°

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2008	C. Li, X. Huang and L. Zhao	ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วย ฉนวน พอลิเมอร์ที่มีความเปราะเปื้อน โดยการใช้ วิธีการพ่นละอองน้ำไปยังลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และ ใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ละเอียดสูง เพื่อแบ่งประเภทผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วย ฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC 62073 และ STRI ซึ่งสามารถแบ่งประเภทคุณสมบัติผิวหยด-น้ำลื่น ออกเป็น 7 ประเภท
2008	S. Amin, M. Amin and R. Sundararajan	ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนพอลิ เมอร์ที่ผลิตจากยางซิลิโคนและเทอร์โมพลาสติกอี ลาสโตเมอร์(thermo plastic elastomeric: TPE) ภายใต้ การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยการจำลองด้วยสภาวะ ความเครียดต่าง ๆ และป้อนแรงดันกระแสสลับขนาด 10 kV ผลจากการศึกษาทำให้ทราบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิ เมอร์ที่ผลิตจาก TPE มีความเสียหายทางกายภาพ มากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากซิลิโคน สังเกต ได้จากการประเมินการเสื่อมอายุด้วยคุณสมบัติผิวหยด น้ำลื่น ตามมาตรฐานของ STRI
2010	J. V. Vas B. Venkatesulu and M. J. Thomas	ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟของ ยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมและยางซิลิโคนที่มีสารตัว เติม (เติมอะลูมินาและอนุภาคของซิลิกา) พบว่า ประสิทธิภาพของยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมชนิด อะลูมินา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่ายางซิลิโคน มีสารตัวเติมแบบซิลิกาและดีกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสาร ตัวเติม เนื่องจากวัสดุที่มีส่วนผสมของอะลูมินาสามารถ ทนความร้อนได้สูงกว่าชนิดอื่น ๆ

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่ามีความรู้ที่ผู้วิจัยได้คิดค้นและมีการนำเสนอวิธีการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และลักษณะหยดน้ำขึ้น ตลอดจนเป็นแนวทางการตัดสินใจในการเลือกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้ค้นคว้ามา เพื่อนำมาศึกษาการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนได้สรุปโดยย่อไว้ดังนี้

ในปี ค.ศ.2003 BoonruangMarungsri et al. (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุของขางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยพอลิเมอร์ ประกอบด้วยแสง UV และหมอกไอเกลือ โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบผลของหมอกไอเกลือจาก เครื่องพ่นหมอกอัลตราโซนิกฮิวมิไดฟายเออร์และหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ซึ่งในการทดสอบทำการเปิดหมอกไอเกลือให้กับฉนวนขางซิลิโคน โดย 24 ชั่วโมง ฉายหมอกเกลือ 8 ชั่วโมง และหยุดฉาย 16 ชั่วโมง ทำการทดสอบทั้งสิ้น 50 cycles (1 cycle เท่ากับ 24 ชั่วโมง) ผลการทดสอบสรุปได้ว่าสามารถใช้เครื่องพ่นหมอกอัลตราโซนิกฮิวมิไดฟายเออร์แทนหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ได้ เนื่องจากผลจากการวัดค่าความเปรอะเปื้อน คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น ค่าประจุสะสม และการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ (EDX) มีค่าใกล้เคียงกันมาก

Ivan Lopes et al. (2003) ใช้ PD วัดและวิเคราะห์อายุของลูกถ้วยฉนวน โดยทำการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือด้วยฝนเกลือ 1800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ใช้ลูกถ้วย 2 แบบ คือแบบ 3 ปีก และ 4 ปีกเมื่อนำมาตรวจสอบระยะกระแสรั่วพบว่า ทั้งสองแบบมีระยะกระแสรั่วประมาณ 1 mA เท่า ๆ กัน จึงไม่สามารถระบุได้ว่าแบบไหนทำงานได้ดีภายใต้สภาวะฝนเกลือแต่เมื่อนำมาตรวจสอบ PD พบว่า ลูกถ้วยแบบ 3 ปีกจะเกิด PD ก่อน และตรวจพบ PD ได้มากกว่าแบบ 4 ปีก เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นด้วยการวัดมุมสัมผัสก็พบว่าสูญเสียคุณสมบัติมากกว่าพบว่าวิธีที่นำ PD มาวิเคราะห์ผลได้ผลที่ชัดเจนมากกว่าการวัดกระแสรั่ว

Yong Zhu et al. (2006) ทดสอบฉนวนซิลิโคนด้วยโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ด้วยอิเล็กโทรด ปลายแหลม-ระนาบ ในแนวนอน ใช้ไฟ 8-11 kV ฉนวนมีขนาด 60×50×2 mm ให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 mm พบว่าเกิดแสงสีฟ้าที่ปลายแหลมเมื่อเกิดโคโรนา (ทำในห้องมืดทึบ) เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และมีรอยไหม้ที่จุดปลายแหลมสัมผัสกับฉนวน และเกิดแสงสีฟ้าทั้งสองข้างของอิเล็กโทรดเมื่อผ่านไป 60 นาที และมีรอยไหม้ตามแนวทั้งสองข้างตามแนวอิเล็กโทรด และเกิดแสงทั่วทั้งพื้นผิวเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที และเกิดรอยไหม้ทั่วทั้งผิวฉนวน และเมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นด้วยการวัดมุมสัมผัสพบว่า ยิ่งใช้เวลานาน มุมสัมผัสยิ่งลดลงน้อยลง ยิ่งสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นไป

RajiSundararajan et al. (2006) ได้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักแรงดันเกินภายใต้การจำลองด้วยสภาวะความเครียดต่าง ๆ จากการใช้งานจริง มีขนาดห้องทดสอบ $1.8 \times 1.8 \times 1.8 \text{ m}^3$ โคนทำการทดลองที่รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา สิ่งที่Rajiมุ่งเน้นคือ การจำแนกว่าเนื้อของฉนวนซิลิโคนที่มีส่วนผสมของ เอทิลีน (ethylene) โพรพิลีน (propylene) และซิลิโคน (EPSB) หลังจากการทดสอบแล้วอยู่ในช่วงของการเสื่อมจากคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นแบบใด จากผลการทดสอบปรากฏว่า คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (hydrophobic surface property) ที่ได้อยู่ในช่วง HC5

Suchart Thong-om et al. (2011) ศึกษาการเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคนที่ใช้ภายนอกทั้งหมด 4 ชนิด ซึ่งมีส่วนผสมของ ATH ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ต่าง ๆ กัน โดยทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการทดสอบหมอกไอเกลือ (salt-fog test) เป็นเวลา 1000 ชม. ทำการวัดการเสื่อมอายุทางเคมีด้วยเทคนิค ATIR-FTIR และ SEM (scanning electron microscope) และหาคุณสมบัติหยดน้ำลื่นด้วยวิธีพ่นน้ำ โดยใช้ขวดพ่นละอองน้ำธรรมดา โดยใช้น้ำสะอาดที่ไม่ได้ผสมสารเคมีใด ๆ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยฉีดพ่นละอองน้ำ 1-2 ครั้งต่อวินาทีต่อไปเป็นระยะเวลา 20-30 วินาที จากระยะ $25 \pm 10 \text{ cm}$. การพิจารณาระดับของความไม่ชอบน้ำกระทำภายในเวลา 10 วินาทีหลังจากพ่นละอองน้ำ โดยเทียบกับรูปประเภทความไม่ชอบน้ำตามลักษณะพื้นผิวพบว่าแผ่นทดสอบทั้งสี่ชนิดจะมีคุณสมบัติหยดน้ำลื่นอยู่ในช่วง HC4-HC6 เป็นส่วนใหญ่ และคุณสมบัติหยดน้ำลื่นจะอยู่ในช่วงมากขึ้น HC6 เมื่อตรวจสอบที่บริเวณที่จ่ายไฟ

BoXue Du et al. (2012) สร้างโคโรนาดีสชาร์จด้วยอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ ในแนวตั้งฉากกับฉนวน โดยใช้ฉนวนขนาด $50 \times 35 \times 6 \text{ mm}$ โดยกำหนดให้ปลายแหลมห่างจากฉนวน 3 cm ใช้ระบบไฟ DC ขั้วลบ 12 kV อุณหภูมิ 20° เป็นเวลา 2-12 ชั่วโมง ทำการวัดมุมทางกลพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น PD ก็จะเกิดกว้างขึ้น ความถี่มากขึ้น พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น และคุณสมบัติหยดน้ำลื่นก็เสียไปมากขึ้น

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับการเร่งการเสื่อมอายุมีอยู่มากมาย แต่ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จจากอิเล็กโตรด 2 แบบ คือ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ปลายแหลม และอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยทดสอบกับยางซิลิโคนหลาย ๆ ชนิด หลังการทดสอบจึงตรวจสอบการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยการหาคุณสมบัติหยดน้ำลื่นโดยการวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์ ที่สามารถทำได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับ รวมถึงการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เปลี่ยนไปของยางซิลิโคนแต่ละชนิดอีกด้วย

2.3 สรุป

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้ทำการค้นคว้าข้อมูลต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ และแนวทางการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ได้ทำการทดลองไว้แล้ว ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยจากการสืบค้นปรัทัศน์และวรรณกรรมยังแสดงให้เห็นว่า ยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคารได้มีการนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนไม่เพียงพอ จึงเป็นที่มาของการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน เพื่อศึกษาลักษณะของการเสื่อมอายุให้มากขึ้น โดยนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาและลดข้อด้อยของยางซิลิโคนให้มีความน่าเชื่อถือต่อการนำมาใช้งานในอนาคต



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยทำการทดสอบเร่งเสื่อมอายุภายใต้โคโรนาดีสชาร์จ โดยทำการทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน IEC Publ. 61109 และทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เคยมีมาเพื่อหาแนวทางการวิจัยระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานจากคณะนักวิจัยหลาย ๆ ท่านตั้งแต่อดีตเป็นต้นมาโดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE และ IEE เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยที่ใช้เป็นแนวทางประยุกต์และพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และการศึกษาลักษณะหยดน้ำล้น ที่นักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าและวิจัยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันสามารถสรุปการดำเนินงานวิจัยโดยอธิบายได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1990	S. M. Gubanski and A.E. Vlastos	ศึกษาคุณสมบัติหยดน้ำล้น โดยการวัดมุมแบบสถิตย์ (static contact angle) ด้วยวิธี half angle method ทดสอบบนผิวยางซิลิโคน EDPM เทียบกับยางซิลิโคนที่ไม่ได้ทำการเร่งเสื่อมอายุพบว่ายางที่ผ่านการเร่งการเสื่อมอายุไม่มีการพ่นคืนคุณสมบัติหยดน้ำล้นและค่ามุมสัมผัสลดลง โดยขึ้นกับเวลาที่ยางซิลิโคนได้รับแรงดันโคโรนา ส่วนยางซิลิโคนที่ไม่ได้เร่งการเสื่อมอายุมีระยะรักษาดัวในการพ่นคุณสมบัติหยดน้ำล้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1999	J. Kim and M. K. Chaudhury	ศึกษาผลของการสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำและ การฟื้นคืนสภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำของฉนวน ยางซิลิโคนหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะพบว่า การฟื้นคืนสภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำเกิดจากการ แพร่ของพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
1999	G. Paolettian and A. Golubev	ทดสอบรูปแบบของดีสชาร์จบางส่วนแบบต่าง ๆ กับ ฉนวนหลาย ๆ แบบ โดยป้อนไฟ 4kV จ่ายไปที่ขั้ว ทองแดง และใช้ฉนวนแบบต่าง ๆ เป็นตัวกลาง พบว่า ฉนวนยางซิลิโคนใหม่มีกระแสรั่วเกิดขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่ พบการเกิดดีสชาร์จ-บางส่วน ฉนวนผสมมีกระแสรั่ว คงที่ตลอดการทดสอบและเกิดดีสชาร์จบางส่วน เล็กน้อยทั้งขั้วลบและขั้วบวกส่วนฉนวนที่มีสิ่ง ปนเปื้อน (pollution) มีกระแสรั่วมาก และเกิดความผิ พร่องขณะทดลองเกิดดีสชาร์จบางส่วนทำให้เกิดรอย แตกโก่ง ๆ ขั้วทองแดง สูดท้ายในฉนวนที่มีรอยแตก เกิดกระแสรั่วมากที่สุด และเกิดความเสียหายใน ระหว่างการทดสอบ เกิดดีสชาร์จบางส่วนและเกิดอาร์ก (arc) ทำให้เกิดความเสียหายแบบถาวร
1999	V.M. Moreno and R.S. Gorur	ศึกษาการเสื่อมอายุของฉนวนด้วยฉนวนแบบพอลิเมอร์ ภายใต้โคโรนาดีสชาร์จ บนฉนวนต่าง ๆ กัน และขนาด ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการเสื่อมสภาพทางเคมีและทาง กายภาพ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 7.2 kV โดยทำการทดลอง 500 ชั่วโมงเมื่อตรวจสอบด้วยตาพบว่า ฉนวนทั้งหมด เกิดความเสียหายต่าง ๆ กัน SiRชนิด A พบรอยแตกเล็ก ถึง 0.5 mm. SiRชนิด Bพบการเปลี่ยนสีที่ผิวเท่านั้น SiR ชนิด C มีความเสียหายมากกว่า SiRชนิด A และเกิด ความเสียหายในช่วงชั่วโมงที่ 200 เท่านั้น และสูดท้าย PVC พบการกัดกร่อนบนผิวและพบรอยการเกิด คาร์บอนไนเซชัน (carbonization) อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	I. Lopes S. H. Jayaram and E.A. Cherney	ศึกษาการเสื่อมอายุโดยการวัดคีสชาร์จบางส่วน (partial discharge:PD) และศึกษาลักษณะกระแสรั่ว บนผิววงซิลิโคน ภายใต้การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุด้วยตู้หมอกไอเกลือ (salt fog test) สูงจนวนพอลิเมอร์ซิลิโคนแบบ 3 ปีก และ 4 ปีกพบว่า PD เป็นวิธีที่ยากต่อการตรวจสอบการเริ่มเปลี่ยนแปลงจากโคโรนาที่เกิดจากหยดน้ำ จนถึงช่วงที่เกิดวาบไฟตามผิว (dry-band arcing) พบว่าระดับของ PD จะมีลักษณะที่เปลี่ยนไปอย่างฉับพลัน เมื่อเกิดวาบไฟตามผิวบนลูกถ้วยจนวนทั้ง 2 ชนิด
2003	S. Kumagai and N. Yoshimura	ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นบนแผ่นยางซิลิโคน ทดสอบทั้งหมด 2000 ชั่วโมง ด้วยสภาพแวดล้อมที่มีความเครียดต่างๆ เช่น แสง UV โคโรนา คีสชาร์จ (คงค่ากระแส 3-4 mA) และความร้อน เมื่อทำการทดสอบครบแล้ว จึงวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์โดยให้หยดน้ำมีปริมาตร 5 μ l และทำการวัดมุมสัมผัสด้วยกล้องไมโครสโคป พบว่าวัสดุทดสอบมีมุมอยู่ที่ $23 \pm 2^\circ$
2007	B. Bhushan and Y.C. Jung	ศึกษาคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น ที่มีมุมสัมผัส อยู่ในช่วง 150° - 180° บน Single-crystal Silicon 2 ชนิดโดยทำการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ 5 ตำแหน่งบนพื้นผิววัสดุทดสอบ และนำมาเทียบมุมสัมผัส โดยพบว่า การวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์ควรใช้หยดน้ำที่เล็ก จึงเลือกใช้หยดน้ำขนาด 5 μ l และใช้ไมโคร-ไซริงขนาด 1ml เลือกใช้น้ำ DI (de-ionization) พบว่าเมื่อวัดมุมแบบสถิตย์แล้วได้ มุมสัมผัสที่ชนิดที่ 1 เป็น 109° และชนิดที่ 2 เป็น 152° - 170°

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2008	C. Li, X. Huang and L. Zhao	ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วย ฉนวน พอลิเมอร์ที่มีความเปราะเปื้อน โดยการใช้ วิธีการพ่นละอองน้ำไปยังลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และ ใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ด้วยกล้องดิจิทัลวัดความ ละเอียดสูง เพื่อแบ่งประเภทผิวหยดน้ำลื่นของลูกถ้วย ฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC 62073 และ STRI ซึ่งสามารถแบ่งประเภทคุณสมบัติผิวหยด-น้ำลื่น ออกเป็น 7 ประเภท
2008	S. Amin, M. Amin and R. Sundararajan	ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนพอลิ เมอร์ที่ผลิตจากยางซิลิโคนและเทอร์โมพลาสติกอี ลาสโตเมอร์(thermo plastic elastomeric: TPE) ภายใต้ การทดสอบแรงการเสื่อมอายุด้วยการจำลองด้วยสภาวะ ความเครียดต่าง ๆ และป้อนแรงดันกระแสสลับขนาด 10 kV ผลจากการศึกษาทำให้ทราบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิ เมอร์ที่ผลิตจาก TPE มีความเสียหายทางกายภาพ มากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากซิลิโคน สังเกต ได้จากการประเมินการเสื่อมอายุด้วยคุณสมบัติผิวหยด น้ำลื่น ตามมาตรฐานของ STRI
2010	J. V. Vas B. Venkatesulu and M. J. Thomas	ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟของ ยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมและยางซิลิโคนที่มีสารตัว เติม (เติมอะลูมินาและอนุภาคของซิลิกา) พบว่า ประสิทธิภาพของยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมชนิด อะลูมินา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่ายางซิลิโคน มีสารตัวเติมแบบซิลิกาและดีกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสาร ตัวเติม เนื่องจากวัสดุที่มีส่วนผสมของอะลูมินาสามารถ ทนความร้อนได้สูงกว่าชนิดอื่น ๆ

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่ามิฉะนั้นผู้วิจัยได้คิดค้นและมีการนำเสนอวิธีการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และลักษณะหยดน้ำขึ้น ตลอดจนเป็นแนวทางการตัดสินใจในการเลือกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้ค้นคว้ามา เพื่อนำมาศึกษาการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนได้สรุปโดยย่อไว้ดังนี้

ในปี ค.ศ.2003 BoonruangMarungsri et al. (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุของขางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยพอลิเมอร์ ประกอบด้วยแสง UV และหมอกไอเกลือ โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบผลของหมอกไอเกลือจาก เครื่องพ่นหมอกอัลตราโซนิกฮิวมิไดฟายเออร์และหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ซึ่งในการทดสอบทำการเปิดหมอกไอเกลือให้กับฉนวนขางซิลิโคน โดย 24 ชั่วโมง จ่ายหมอกเกลือ 8 ชั่วโมง และหยุดจ่าย 16 ชั่วโมง ทำการทดสอบทั้งสิ้น 50 cycles (1 cycle เท่ากับ 24 ชั่วโมง) ผลการทดสอบสรุปได้ว่าสามารถใช้เครื่องพ่นหมอกอัลตราโซนิกฮิวมิไดฟายเออร์แทนหัวฉีดหมอกที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC Nozzle ได้ เนื่องจากผลจากการวัดค่าความเปรอะเปื้อน คุณสมบัติผิวหยดน้ำขึ้น ค่าประจุสะสม และการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ (EDX) มีค่าใกล้เคียงกันมาก

Ivan Lopes et al. (2003) ใช้ PD วัดและวิเคราะห์อายุของลูกถ้วยฉนวน โดยทำการทดสอบด้วยหมอกไอเกลือด้วยฝนเกลือ 1800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ใช้ลูกถ้วย 2 แบบ คือแบบ 3 ปีก และ 4 ปีกเมื่อนำมาตรวจสอบระยะกระแสรั่วพบว่า ทั้งสองแบบมีระยะกระแสรั่วประมาณ 1 mA เท่า ๆ กัน จึงไม่สามารถระบุได้ว่าแบบไหนทำงานได้ดีภายใต้สภาวะฝนเกลือแต่เมื่อนำมาตรวจสอบ PD พบว่า ที่ลูกถ้วยแบบ 3 ปีกจะเกิด PD ก่อน และตรวจพบ PD ได้มากกว่าแบบ 4 ปีก เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นด้วยการวัดมุมสัมผัสก็พบว่าสูญเสียคุณสมบัติมากกว่าพบว่าวิธีที่นำ PD มาวิเคราะห์ผลได้ผลที่ชัดเจนมากกว่าการวัดกระแสรั่ว

Yong Zhu et al. (2006) ทดสอบฉนวนซิลิโคนด้วยโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ด้วยอิเล็กโทรด ปลายแหลม-ระนาบ ในแนวนอน ใช้ไฟ 8-11 kV ฉนวนมีขนาด 60×50×2 mm ให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 mm พบว่าเกิดแสงสีฟ้าที่ปลายแหลมเมื่อเกิดโคโรนา (ทำในห้องมืดทึบ) เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และมีรอยไหม้ที่จุดปลายแหลมสัมผัสกับฉนวน และเกิดแสงสีฟ้าทั้งสองข้างของอิเล็กโทรดเมื่อผ่านไป 60 นาที และมีรอยไหม้ตามแนวทั้งสองข้างตามแนวอิเล็กโทรด และเกิดแสงทั่วทั้งพื้นผิวเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที และเกิดรอยไหม้ทั่วทั้งผิวฉนวน และเมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นด้วยการวัดมุมสัมผัสพบว่า ยิ่งใช้เวลานาน มุมสัมผัสยิ่งลดลงน้อยลง ยิ่งสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นไป

RajiSundararajan et al. (2006) ได้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของกับดักแรงดันเกินภายใต้การจำลองด้วยสภาวะความเครียดต่าง ๆ จากการใช้งานจริง มีขนาดห้องทดสอบ $1.8 \times 1.8 \times 1.8 \text{ m}^3$ โคนทำการทดลองที่รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา สิ่งที่Rajiมุ่งเน้นคือ การจำแนกว่าเนื้อของฉนวนซิลิโคนที่มีส่วนผสมของ เอทิลีน (ethylene) โพรพิลีน (propylene) และซิลิโคน (EPSB) หลังจากการทดสอบแล้วอยู่ในช่วงของการเสื่อมจากคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นแบบใด จากผลการทดสอบปรากฏว่า คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (hydrophobic surface property) ที่ได้อยู่ในช่วง HC5

Suchart Thong-om et al. (2011) ศึกษาการเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคนที่ใช้ภายนอกทั้งหมด 4 ชนิด ซึ่งมีส่วนผสมของ ATH ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)ต่าง ๆ กัน โดยทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยการทดสอบหมอกไอเกลือ (salt-fog test) เป็นเวลา 1000 ชม.ทำการวัดการเสื่อมอายุทางเคมีด้วยเทคนิคATIR-FTIR และSEM (scanning electron microscope) และหาคุณสมบัติหยดน้ำลื่นด้วยวิธีพ่นน้ำ โดยใช้ขวดพ่นละอองน้ำธรรมดา โดยใช้น้ำสะอาดที่ไม่ได้ผสมสารเคมีใด ๆ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยฉีดพ่นละอองน้ำ 1-2 ครั้งต่อวินาทีต่อไปเป็นระยะเวลา 20-30 วินาที จากระยะ $25 \pm 10 \text{ cm}$. การพิจารณาระดับของความไม่ชอบน้ำกระทำภายในเวลา 10 วินาทีหลังจากพ่นละอองน้ำโดยเทียบกับรูปประเภทความไม่ชอบน้ำตามลักษณะพื้นผิวพบว่าแผ่นทดสอบทั้งสี่ชนิดจะมีคุณสมบัติหยดน้ำลื่นอยู่ในช่วง HC4-HC6 เป็นส่วนใหญ่ และคุณสมบัติหยดน้ำลื่นจะอยู่ในช่วงมากขึ้นHC6 เมื่อตรวจสอบที่บริเวณที่จ่ายไฟ

BoXue Du et al. (2012) สร้างโคโรนาดีสชาร์จด้วยอิเล็กโตรดปลายแหลม-ระนาบ ในแนวตั้งฉากกับฉนวน โดยใช้ฉนวนขนาด $50 \times 35 \times 6 \text{ mm}$ โดยกำหนดให้ปลายแหลมห่างจากฉนวน 3 cmใช้ระบบไฟ DC ขั้วลบ 12 kV อุณหภูมิ 20° เป็นเวลา 2-12 ชั่วโมง ทำการวัดมุมทางกลพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น PD ก็จะเกิดกว้างขึ้น ความถี่มากขึ้น พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น และคุณสมบัติหยดน้ำลื่นก็เสียไปมากขึ้น

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่มีมาพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับการเร่งการเสื่อมอายุมีอยู่มากมาย แต่ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยโคโรนาดีสชาร์จจากอิเล็กโตรด 2 แบบ คือ อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ปลายแหลม และอิเล็กโตรดแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยทดสอบกับยางซิลิโคนหลาย ๆ ชนิด หลังการทดสอบจึงตรวจสอบการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยการหาคุณสมบัติหยดน้ำลื่นโดยการวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย์ ที่สามารถทำได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับ รวมถึงการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เปลี่ยนไปของยางซิลิโคนแต่ละชนิดอีกด้วย

2.3 สรุป

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้ทำการค้นคว้าข้อมูลต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ และแนวทางการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ได้ทำการทดลองไว้แล้ว ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยจากการสืบค้นปรัทัศน์และวรรณกรรมยังแสดงให้เห็นว่า ยางชิลิโคนที่ใช้ทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคารได้มีการนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยการเสื่อมอายุของยางชิลิโคนไม่เพียงพอ จึงเป็นที่มาของการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางชิลิโคน เพื่อศึกษาลักษณะของการเสื่อมอายุให้มากขึ้น โดยนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาและลดข้อด้อยของยางชิลิโคนให้มีความน่าเชื่อถือต่อการนำมาใช้งานในอนาคต



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นในปัจจุบันสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุจึงจำเป็นต้องมีการสืบค้นทฤษฎีต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ทั้งชนิดของฉนวน กลไกการเสื่อมอายุ ปัจจัยการเสื่อมอายุ และวิธีการวิเคราะห์การเสื่อมอายุ เพื่อนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้อย่างเหมาะสมโดยในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและสมมติฐานที่มีความเกี่ยวข้องกับหัวข้อการวิจัยซึ่งแสดงไว้ต่อไปนี้

3.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ลูกถ้วยฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับสายไฟทำหน้าที่เป็นฉนวนและป้องกันมิให้กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินหรือลัดวงจรลงดินเพราะถ้าปริมาณกระแสที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายก็จะตัดวงจรออก ทำให้การจ่ายไฟหยุดชะงักดังนั้นลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญตราบใดที่ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน (overhead line) ทั้งสายส่งแรงสูง (transmission line) และสายระบบจำหน่าย (distribution line) ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
(ที่มา : <http://pti-sa.com.co/en/arp>)

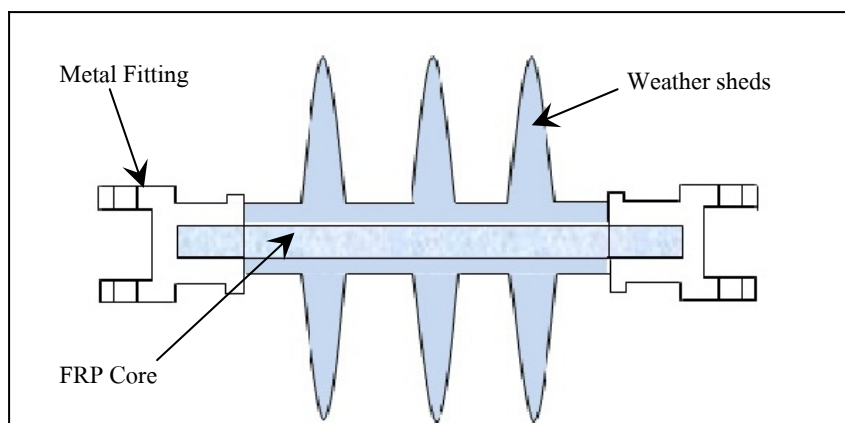
เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าลูกถ้วยฉนวนเซรามิกเช่น น้ำหนักเบา ทนต่อแรงทางกลสูงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำดี มีความสามารถในการทน วาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อน ขึ้นรูปได้ง่ายและสะดวกในการบำรุงรักษา เป็นต้น แต่เมื่อ ถูกใช้งานภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติย่อมทำให้ คุณสมบัติความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เกิดการเสื่อมอายุลงซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด ความผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อความเชื่อถือของระบบส่งจ่ายกำลัง งานไฟฟ้าจึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ต่อไป

3.3 โครงสร้างและรูปร่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1. แกนลูกถ้วย (fiber reinforced plastic core : FRP core) อยู่ภายในแกนกลางของลูกถ้วย
2. เมททอลฟิตติง (metal fittings) มีอยู่ทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อกับโหลด
3. ปีกลูกถ้วย (weather sheds) เป็นฉนวนหุ้มไปทั่วแกนลูกถ้วยมีลักษณะเหมือนปีก

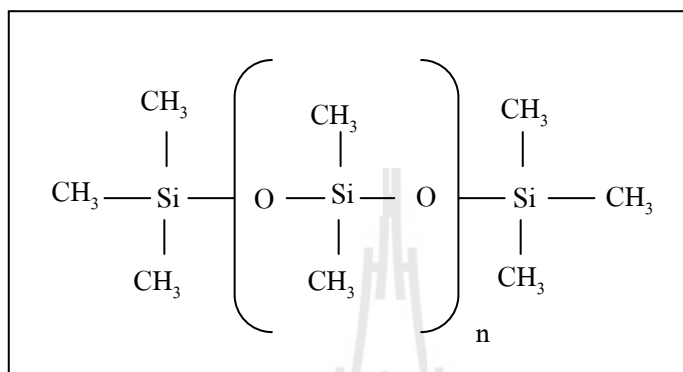
ความเครียดทางไฟฟ้าเสริมกับการเกิดขึ้นของหยดน้ำและหมอกไอน้ำต่าง ๆ ในสภาวะเปราะ เปื้อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ อาจทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) หรือดีสชาร์จ เฉพาะส่วน (local discharges) ส่งผลให้สารเคมีที่ใช้ทำแกนลูกถ้วยเกิดการเสื่อมถอยอย่างเช่น การ เกิดร่องรอยผิวเสียหาย (tracking) และการเกิดผิวผุกร่อน (erosion) เพื่อเป็นการป้องกัน FRP core จากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และเพื่อเพิ่มระยะกระแสรั่ว (leakage distance) ให้ได้ความยาวตรงตาม ข้อกำหนดของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการใช้งานในสภาวะ เปียกและสภาวะแห้ง ปีกลูกถ้วยจึงได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ทำหน้าที่ดังกล่าว และยางซิลิโคนก็ ถูกนำมาใช้เป็นโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวน (housing material) สำหรับทำปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

3.3.1 ยางซิลิโคน

ยางซิลิโคนถูกนำมาเป็นส่วนที่เป็นปึกด้วย จะมีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของโมเลกุลยางซิลิโคนคือโพลีไดเมทิลไซล๊อกเซน (polydimethylsiloxane:PDMS) ซึ่งองค์ประกอบมูลฐานในโมเลกุลของ PDMS ประกอบด้วยอะตอมของ Si กับ O เป็นโครงหลักแบบโควาเลนต์(main chain) และมี CH_3 เป็นโซ่ข้าง(side chain) กับอะตอมของ Si ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโมเลกุลของ PDMS

จากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่ม CH_3 ในสภาวะปกติเรียงตัวแบบซี่อกที่ผิวด้านบน จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเป็นผิวแบบหยดน้ำลื่น พลังงานพันธะของ Si-O ในโมเลกุลของ PDMS มีค่าประมาณ 444 kJ/mol ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานพันธะของอินทรีย์พอลิเมอร์ (organic polymers) ตัวอย่างเช่น C-C (356 kJ/mol) หรือ C-O (339 kJ/mol) ทำให้มีความเสถียรกว่าอินทรีย์พอลิเมอร์เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอม Si (1.8) น้อยกว่าอะตอมของ O (3.5) ทำให้พันธะ Si-O ถูกโพลาริซ์ให้เป็นโครงสร้างแบบโควาเลนต์อะตอมของ Si เป็นประจุบวกและอะตอมของ O เป็นประจุลบ โดยมีความแรงของการเป็นพันธะประมาณ 37% และเป็นพันธะเคมีที่มีความเสถียรด้วยโครงสร้างของพันธะไซล๊อกเซน (siloxane bond) จึงทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติคงทนต่อความร้อนและสภาวะอากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากพันธะไซล๊อกเซนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงจากผลกระทบของกรดและเบสระยะของพันธะไซล๊อกเซน ($1.6 \times 10^{-10} \text{ m}$) มีความยาวมากกว่าระยะของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ($1.54 \times 10^{-10} \text{ m}$) และมุมของพันธะไซล๊อกเซน (O - Si - O) (140°) ก็มีค่ามากกว่ามุมของโพลีเอทิลีน (C - C - C) (109°) (Ono, Y., 2003) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ Si - O ($< 0.5 \text{ kJ/mol}$) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการหมุนของพันธะ C - C (15.4 kJ/mol) หรือพันธะ C - O (11.31 kJ/mol) จึงทำให้พันธะไซล๊อกเซนหมุนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้โครงสร้างโมเลกุลของยางซิลิโคนจึงเป็นแบบเกลียว (helical structure) โดยประกอบด้วยพันธะ Si - O จำนวน 6 พันธะในหนึ่งรอบเกลียวโครงสร้างแบบนี้จะส่งผลให้ผิวของซิลิโคนครอบคลุมไปด้วย CH_3 ซึ่งมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นและมีพลังงานแรงดึงดูดผิวต่ำ (Clarson, S. J., 1993)

จากโครงสร้างดังกล่าวทำให้ผิวของ PDMS มีคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย

- 1.แรงระหว่างโมเลกุลของ CH_3 ต่ำ
- 2.ความสามารถในการยืดหยุ่นของพันธะซิลิอกเซน
- 3.ความแข็งแรงของพันธะซิลิอกเซน
- 4.การมีคุณสมบัติเป็นพันธะไอออนิกบางส่วน of พันธะซิลิอกเซน

ลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นของ PDMS เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง คุณสมบัติเหล่านั้นมีดังต่อไปนี้

- 1.คุณสมบัติของการเป็นไดอิเล็กทริกที่ดี (good dielectric properties)
- 2.มีความทนทานดีเยี่ยมต่อสภาวะอากาศ (excellent resistance to weathering)
3. คุณสมบัติของผิวแบบหยาบน้ำลื่น (hydrophobic surface properties)
- 4.มีเสถียรภาพสูงทางความร้อนและไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (high thermal and oxidative stability)

ยางซิลิโคนที่ผ่านการทำโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง หรือ XPDMS (crosslinked PDMS) ที่นำมาใช้เป็นฉนวนภายนอกในระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นยางซิลิโคนที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง (crosslinked) สามารถแบ่งได้ 2 แบบตามกระบวนการผลิต คือ ยางซิลิโคนวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง (high temperature vulcanization silicone rubber : HTV SiR) และยางซิลิโคนวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้อง (room temperature vulcanization silicone rubber: RTV SiR) นอกจากนี้แล้ว ยังมีการเติมสารเติมแต่ง (additives) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและสารตัวเติม (fillers) ลงไปใน XPDMS เพื่อทำการเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของยางซิลิโคนให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น (Clarson, S. J., 1993)

ในการปรับปรุงคุณสมบัติการฉนวนให้ดีขึ้น จึงมีสารเติมเข้าไปเสริมแรงยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มค่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (modulus) ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความต้านทานการเสียดสี (abrasion resistance) ของยางซิลิโคน เช่นการเติมผงฝุ่นซิลิกา (fumed silica) ที่เติมเข้าไปเพื่อควบคุมเกี่ยวกับการไหล (rheological) ของยางซิลิโคน รวมไปถึงการเติมอลูมินาไตรไฮเดรต (alumina trihydrate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: ATH) ที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความทนทานต่อร่องรอยผิวเสียหายทางไฟฟ้า (electrical tracking) และเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้า โดย ATH จะแตกตัวเป็น Al_2O_3 และ H_2O เมื่อถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า 200°C เนื่องจากการเกิดขึ้นของ H_2O เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนจึงทำให้อากาศบริเวณรอบนอกยางซิลิโคนเย็นลง ซึ่งทำให้อาร์กทางไฟฟ้าลดลงได้ส่วนสารคู่ควบ (coupling agents) เป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ช่วย

เพิ่มความสามารถในการยึดต่อระหว่างสารตัวเดิมและ polymer matrix การยึดติดที่ดีระหว่างสารตัวเดิมและ polymer matrix ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้นและทำให้ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุและค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มมากขึ้น

3.4 กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ เป็นเวลานาน ก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ อาจเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น การเกิดผิวผุกร่อน การเกิดร่องรอยผิวเสียหายเป็นต้น) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี (เช่น การแตกตัวของพอลิเมอร์ (de-polymerization)) หรือการเปลี่ยนแปลงทาง physicochemical (เช่น การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำเป็นต้น) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการลัดวงจรไฟฟ้าและทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฉนวน การเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า การเสื่อมอายุ (aging)

ปัญหาที่เป็นกังวลมากที่สุดในการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ก็คือ การเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวน (surface deterioration) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำไปยังแกนลูกถ้วยของลูกถ้วยฉนวนลดลง นอกจากนี้ผลของการเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเนื่องจากผลของดีสชาร์จและสภาวะแวดล้อมยังเป็นส่วนเร่งให้คุณสมบัติหยดน้ำของยางซิลิโคนลดลง ส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนเปียกน้ำ และมีฟิล์มน้ำที่มีความนำไฟฟ้าสูงเกาะที่ผิว ผลที่ตามมาก็คือ ทำให้มีกระแสรั่ว และดีสชาร์จจากแถบแห้ง (dry band arc discharge) ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปฏิกริยาทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากการเกิดกระแสรั่วและดีสชาร์จจากแถบแห้งที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวนโดยประกอบด้วย (Kim, S., 1994)

1. การเกิดแยกตัว (scission) และ/หรือ การเกิดเชื่อมโยงระหว่างกัน(interchange) ของสายโซ่ข้าง(CH_3 groups) หรือ สายโซ่หลัก (Si-O groups) ของ PDMS
2. การเกิดไฮโดรไลซิส(hydrolysis) ของสายโซ่ข้าง หรือ สายโซ่หลักของ PDMS
3. การเกิดออกซิเดชัน(oxidation) ของสายโซ่ข้าง หรือการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่หลักของ PDMS

โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวของยางซิลิโคนสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีดีสชาร์จทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของธาตุมูลฐานที่ผิวของยางซิลิโคน ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดกลุ่ม

ไฮดรอกซิล(hydroxyl groups ; $\text{Si-CH}_2\text{OH}$) กลุ่มเพอร์ร็อกไซด์(peroxides groups; $\text{Si-CH}_2\text{OOH}$) กลุ่มไฮลันอล(silanol groups; Si-OH) และโครงสร้างแบบคล้ายซิลิกา(silica-like (SiO_x) structure) เป็นโครงสร้างที่หมายถึงอะตอมของซิลิกอนสร้างพันธะทางเคมีกับออกซิเจนมากกว่าสองอะตอม (SiO_3 และ/หรือ SiO_4) (Kim, S. H., 1994; Smith, P. S., 1992; Toth, A., 2003 and Bogнар, A. 1993) การเกิดขึ้นของโครงสร้างทางเคมีเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนลดลงจากงานของ Delman พบว่าแสง UV จากผลของดิสซาร์จที่ผิวสามารถตัดพันธะ $\text{CH}_3\text{-O}$ และกลายเป็นกลุ่มไฮลันอล (Delman, A. D., 1969)

คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนสามารถฟื้นกลับมาได้ ถ้าเป็นการสูญเสียแบบชั่วคราวซึ่งเป็นผลจากการเกิดดิสซาร์จแถบแห้งที่ผิว และฝนตกหนัก เป็นต้น ระดับการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นขึ้นอยู่กับขนาดของดิสซาร์จที่ผิว ส่วนผสมของพอลิเมอร์ และเวลาที่ใช้ในการคืนตัว ยางซิลิโคนที่มีการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นจะพบว่ามีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำมันซิลิโคนเหนือชั้นคล้ายซิลิกาที่ผิว กลไกที่อาจเป็นไปได้ในการคืนตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนอาจประกอบด้วย(Owen, M. J., 1988)

1. การจัดเรียงตัวกันใหม่ของกลุ่มเมทิล(methyl groups)และกลุ่มดีออกซิไดซ์(de-oxidized groups)
2. การเคลื่อนที่ของ PDMS โมเลกุลเล็กต่ำ (low molecular weight PDMS : LMW PDMS) จากเนื้อยางชั้นในไปที่ผิวชั้นนอก

เมื่อพิจารณาการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น พบว่าชั้นคล้ายซิลิกาที่เกิดขึ้นบนผิวเนื่องจากผลของดิสซาร์จที่ผิว สามารถต้านการเคลื่อนที่ของ LMW PDMS ไปยังผิวด้านบน แต่การแตกของชั้นคล้ายซิลิกาก็สามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อน LMW PDMS ไปยังผิวด้านบนได้ด้วยเช่นกัน การเคลื่อนที่ของ LMW PDMS ที่ไปสู่ผิวด้านบนเชื่อว่าเป็นกลไกหลักในการฟื้นตัวของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าจุดไหนเป็นขีดจำกัดของปริมาณ LMW PDMS ที่ผิวของยางซิลิโคนเนื่องจาก LMW PDMS เกิดจากการแตกตัวของพอลิเมอร์ (de-polymerization) ในยางซิลิโคน

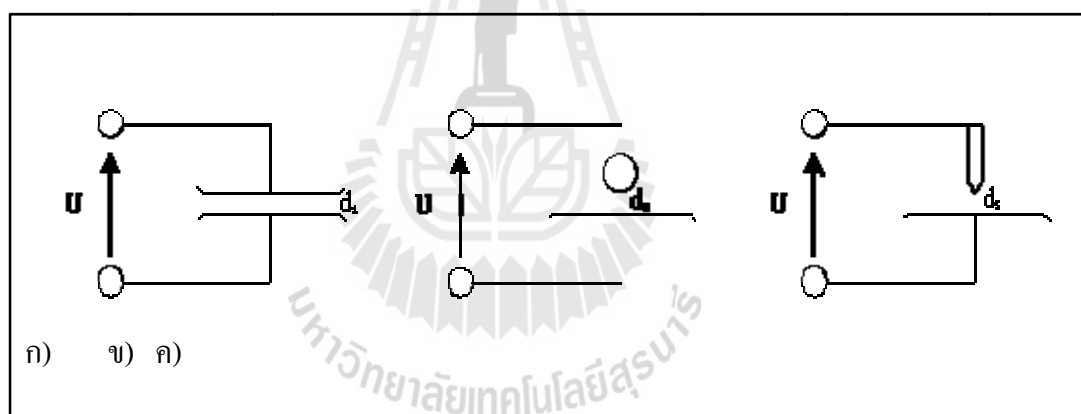
นอกจากนี้การเสื่อมถอยของผิวยางซิลิโคนในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากความร้อนเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีดิสซาร์จที่ผิว Kim พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเกิดดิสซาร์จแถบแห้งที่ผิวลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนอาจสูงถึง 3000°C ในระหว่างเกิดการเสื่อมถอยของผิวยางซิลิโคนเนื่องจากความร้อน ทำให้เกิดการแตกสลายของสายโซ่หลัก และการเชื่อมขวาง การแตกตัวของสายโซ่ข้าง และการเชื่อมขวางในสายโซ่หลักโมเลกุลของ PDMS ทำให้ผิวยางซิลิโคนสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำลื่น (Kim, S. H., 1992) ส่วนการแตกสลายของสายโซ่หลักในสายโซ่โมเลกุลของ PDMS จากความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดไซคลิกโอลิโกเมอร์(cyclic oligomers) เกิดขึ้น(Cherney, E.

A.,1996; Hackam, R., 1999) เมื่อมีการเสื่อมอายุทางความร้อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน การเกิดการเชื่อมขวางของโซ่ลิกเชนเด่นกว่าการเกิดการแตกสลายของสายโซ่หลัก (Kim, J., 1999) โดย Doyle รายงานว่า การเสื่อมอายุทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ ในอากาศของยางซิลิโคน จะทำให้เกิดชั้นผิวเปราะ(brittle surface layer) ที่ผิวเนื่องจากผลของการเชื่อมขวางด้วยออกซิเจน (oxidative crosslinking) (Doyle, C. D., 1958)

3.5 ปัจจัยในการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทำฉนวนด้วยฉนวนพอลิเมอร์

3.5.1 สนามไฟฟ้า

โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ(uniform field)และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ(non-uniform field)สนามไฟฟ้าชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย(slightly non-uniform field)และแบบไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรด (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547)



รูปที่ 3.4 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน (สำรวจ สังข์สะอาด, 2547)

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
- ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 4 พบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าระยะ d_1 , d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่เป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณมักกำหนดหรือระบุด้วยค่า

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรด ในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด เช่นในช่องระหว่างอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือสปาร์ก (spark) ขึ้นทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมาในทันทีทันใด

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือ ไม่มีดิสชาร์จนำหน้า (pre-discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์ไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน

ส่วนในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในบริเวณใกล้ผิวอิเล็กโทรดที่มีผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลม เมื่อความระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตามเบรกดาวน์ยังไม่เกิดแต่เกิดโคโรนาขึ้น

บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรดเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้วัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสก่อนดิสชาร์จ (pre-discharge)

ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย แรงดันเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด เป็นแบบเบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) ซึ่งเกิดขึ้นทันทีทันใดเมื่อได้รับเงื่อนไข โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ แต่ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น (U_i) นั่นคือ เมื่อได้เงื่อนไขของแรงดันเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงก็ไม่เกิดเบรกดาวน์ หากแต่เริ่มเกิดโคโรนา ถ้าต้องการให้เกิดเบรกดาวน์ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก การเกิดเบรกดาวน์แบบนี้เรียกว่า โคโรนาเบรกดาวน์ หรือเบรกดาวน์แบบโคโรนา

3.5.1.1 การเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เนื่องจากการฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ดี ต้องมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้า ทนต่อแรงทางกล ทนต่อความร้อน ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี และยังต้องมีความทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปตลอดเวลาอีกด้วย เพราะเมื่อฉนวนเสียความเป็นฉนวนจากปัจจัยต่างๆ แล้ว ทำให้เกิดแรงดันเกินจนทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน เกิดวาบไฟตามพื้นผิวฉนวน และเกิดการเบรกดาวนและเกิดการเจาะทะลุในที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดปกติในระบบสายส่งได้

ดีสชาร์จบางส่วนคือ ดีสชาร์จเบรกดาวนที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จไม่มากพอที่ทำให้ฉนวนเสียสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน เกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปนทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในไฟฟ้ากระแสสลับ และไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดีสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำ ทุก ๆ ไซเคิล (cycle) ของแรงดัน โดยปกติเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ โคโรนาดีสชาร์จดีสชาร์จตามผิว และดีสชาร์จภายใน

3.5.1.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

ดีสชาร์จแบบโคโรนาในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่อยู่ใต้อากาศที่เป็นฉนวนภายนอก หรือแก๊สความดันปกติ เรียกว่าโคโรนา โดยเริ่มเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ โดยผลจากการเกิดโคโรนามีหลายประการดังต่อไปนี้

1. เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศ สามารถรับรู้ได้ด้วยร่างกายคน คือได้ยินเสียงฮิสซิง (เสียงคล้ายแมลงบิน) มีกลิ่นโอโซน (O_3) ในยามมืดสนิทพบเห็นแสงเรืองสีน้ำเงินม่วง

2. โคโรนาดีสชาร์จเกิดในรูปพัลส์สั้น ๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงเป็น MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะรบกวนสัญญาณสื่อสารเรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

3. การเกิดโคโรนาจะทำให้มีพลังงานสูญเสียตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยง ไม่ให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินกว่าค่าสนามวิกฤต

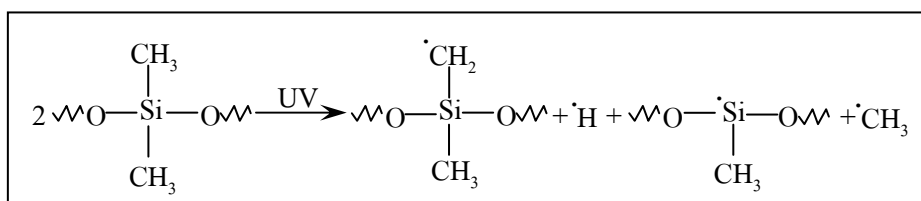
พลังงานสูญเสียเนื่องจากโคโรนาขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของพีดตัวนำนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศ ฝน หมอก น้ำค้าง ซึ่งทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย

3.5.2 ความร้อนและผลจากรังสีอัลตราไวโอเลต

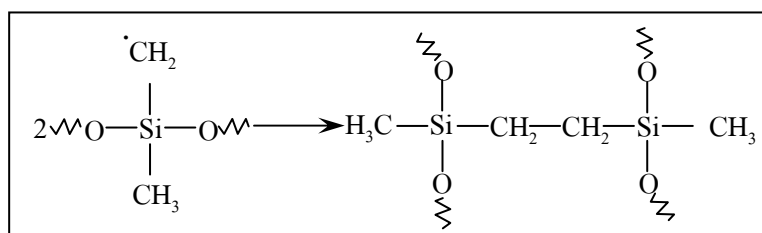
เมื่อมีการใช้งานลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง รังสีอัลตราไวโอเลตที่สัมผัสกับผิวฉนวนยางซิลิโคนตลอดเวลา จึงเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเสื่อมอายุเนื่องจากผลของรังสีอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะ C-C และ C-H กลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียรจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์เป็นเหตุให้สายโซ่ขาดนอกจากรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีจากแสงแดดแล้วยังพบว่าผลจากการเกิดโคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแฉกที่ผิวฉนวนก็มีรังสีอัลตราไวโอเลตเช่นเดียวกันสามารถนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการแตกตัวของเมทิลโดยช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีผลโดยตรงต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนอยู่ในช่วงระหว่างความยาวคลื่น 270 nm – 320 nm ผลของการดูดกลืนรังสีจึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของยางซิลิโคน การเสื่อมอายุในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มและความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม

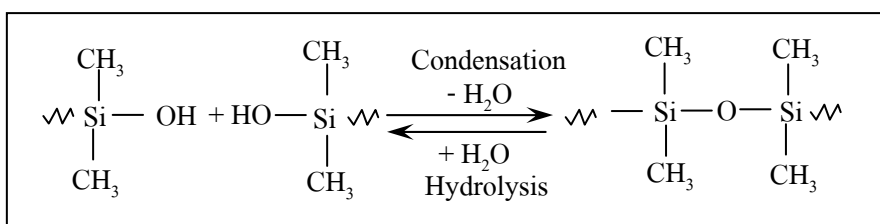
3.5.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PDMS เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีบนผิวฉนวนยางซิลิโคน จะเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่นเมื่อเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้า เมื่อมีออกซิเจน ความร้อน และรังสีไวโอเลต เป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดกลุ่มไฮเปอร์ออกไซด์ (hyperoxide groups: Si-CH₂OH) กลุ่มของเปอร์ออกไซด์ (peroxides groups: Si - CH₂OOH) กลุ่มซิลานอล (silanol groups: Si - OH) และโครงสร้างแบบคล้ายซิลิกา (silica-like: SiO_x) ซึ่งหมายถึงอะตอมของซิลิคอนสร้างพันธะทางเคมีกับออกซิเจนมากกว่าสองอะตอมเมื่อเกิดโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลให้ฉนวนยางซิลิโคนมีคุณสมบัติหยดน้ำลดลง ดังสมการเคมีในรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.7

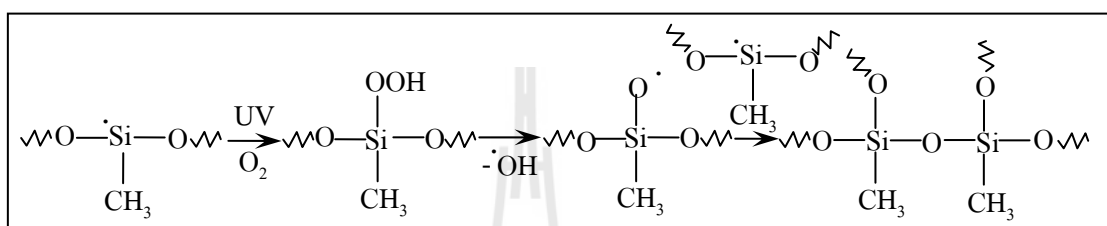


รูปที่ 3.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 1





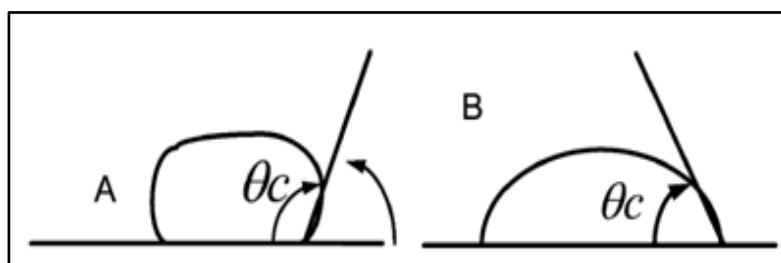
รูปที่ 3.9ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 2



รูปที่ 3.10ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 3

3.5.5คุณสมบัติผิวหยดน้ำ

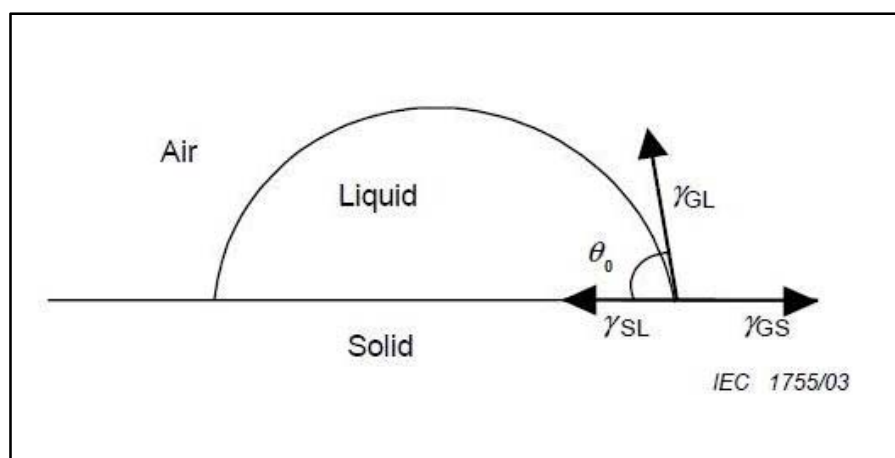
คุณสมบัติผิวหยดน้ำของวัสดุ อ้างอิงตามมาตรฐาน STRI Guideคุณสมบัติผิวหยดน้ำเป็นลักษณะความต้านทานในการฟิล์มของน้ำบนพื้นผิววัสดุทดสอบโดยคุณสมบัติผิวหยดน้ำสามารถอธิบายในรูปของมุมสัมผัสบนพื้นผิววัสดุ (θ_c) น้ำจะมีลักษณะเป็นหยดเมื่อมาเกาะอยู่ที่ผิววัสดุโดยมีมุมสัมผัสเป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติผิวหยดน้ำของวัสดุที่ไม่ชอบน้ำเมื่อมีหยดน้ำมาเกาะอยู่ที่พื้นผิวมีมุมสัมผัสมากกว่า 90° (รูปที่ 3.11, A) ส่วนวัสดุที่ชอบน้ำ(hydrophilicity) หยดน้ำเกาะที่พื้นผิวมีพื้นสัมผัสมากกว่าและมีมุมสัมผัสน้อยกว่า 90° (รูปที่ 3.11, B)



รูปที่3.11มุมสัมผัสของหยดน้ำ (STRi Guide, 1992)

ประสิทธิภาพของสารประกอบของฉนวนทางไฟฟ้าและฉนวนที่เคลือบผิวด้วยสารชนิดหยดน้ำมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับเวลา สภาพแวดล้อม และการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (หรือโคโรนา) ที่ทำให้คุณสมบัติบนผิววัสดุทดสอบเปลี่ยนไป

โดยปกติแล้วสภาพพื้นผิวที่ขรุขระหรือสภาพที่มีองค์ประกอบที่ต่างกัน หยดน้ำที่อยู่บนพื้นผิวต้องอาศัยความสมดุลคงที่(สถานะพลังงานต่ำที่สุด) หรือ ความสมดุลของมุมสัมผัสที่สอดคล้องมุมที่สถานะพลังงานต่ำสุดของระบบ โดยในระบบอุดมคติแล้วมีองค์ประกอบพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถอธิบายผ่านรูปแบบแรงดึงผิวภายนอกได้ด้วยสมการของยัง (Young's equation) ดังรูปที่ 3.12 เมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของแข็ง ถ้าสัมผัสกับทั้งสองพื้นผิวแรงกระทำที่หน้าสัมผัสซึ่งทำให้เกิดความสมดุล มีด้วยกันสามทิศทาง แรงนี้จะเกิดจากความดึงผิวกระทำที่พื้นผิวต่าง ๆ โดยตรง



รูปที่ 3.12 การวัดมุมคงค่าตามสมการของ Young (STRI Guide, 1992)

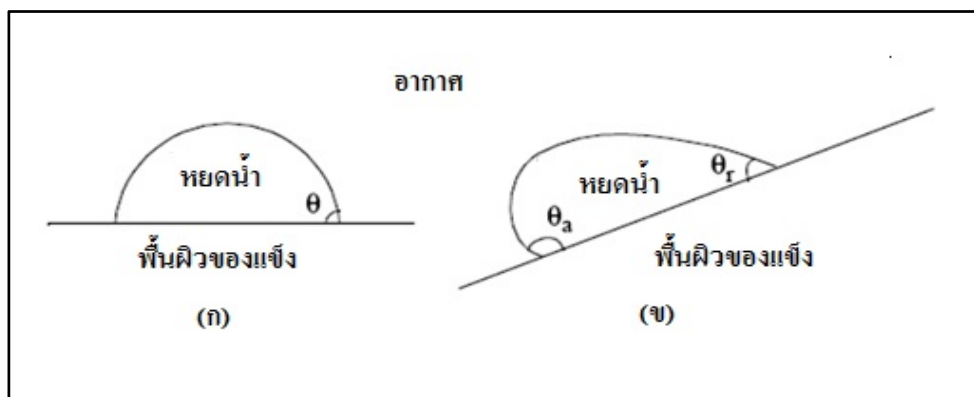
ขนาดของแรงดึงผิวของของเหลวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของยัง (Young's equation) ดังสมการที่ (3.1)

$$\gamma_{LV} \cos \theta_0 = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (3.1)$$

โดย γ_{LV} คือ แรงดึงผิวของของเหลวในสถานะสมดุลกับไออิ่มตัว
 γ_{SV} คือ แรงดึงผิวของของแข็งในสถานะสมดุลกับไออิ่มตัวของน้ำ
 γ_{SL} คือ แรงดึงผิวในระหว่างของแข็งกับของเหลว
 θ_0 คือ มุมสัมผัสที่แท้จริง

โดยมุมสัมผัสคือมุมระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของแข็งที่นำมาพิจารณา ดังรูปที่ 3.13 โดยที่มุมสัมผัสที่ปรากฏเป็นมุมที่ต่างกัน คือที่รูป 3.13 (ก) มุมที่ได้กระทำบนระนาบในแนวอนชนานกับพื้น มุมทั้งสองข้างจะมีความสมมาตร (θ) แต่ที่รูป 3.13 (ข) มุมที่ได้ คือมุมด้านหน้า

(advancing contact angle, θ_a) และมุมด้านหลัง (receding contact angle, θ_r) ซึ่งเกิดในบริเวณพื้นผิวระนาบเอียง พื้นผิวที่ขรุขระ หรือพื้นผิวที่ต่างชนิดกัน



รูปที่ 3.13 การวัดมุมในระนาบต่าง ๆ (STRI Guide, 1992)

(ก) มุมในระนาบแนวนอน

(ข) ระนาบเอียง

3.6 การวิเคราะห์การเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคน

การวิเคราะห์การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสามารถทำได้หลายแบบ แบ่งเป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

3.6.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของยางซิลิโคนด้วยการสังเกตด้วยสายตาหรืออาจใช้เครื่องมือเพื่อให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือหลาย ๆ ชนิด เช่น การวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า การวิเคราะห์ค่าความแข็ง การวิเคราะห์ค่าความขรุขระ และการวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำเคลื่อนด้วยวิธีวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ

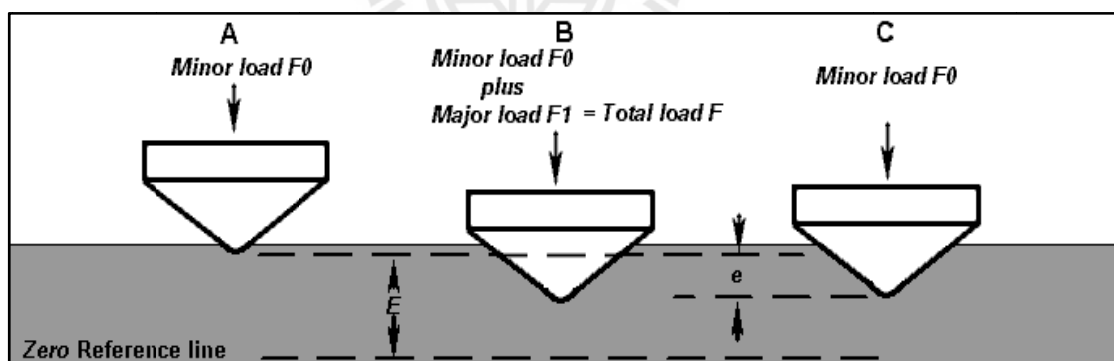
3.6.1.1 การวัดความแข็งของฉนวนยางซิลิโคน

ความแข็ง (hardness) เป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิวการทดสอบความแข็งมีหลายแบบเช่น ความแข็งแบบรอยกดแบบกระดอนแบบจีด่วนแบบลึกหรือโดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นบนวัสดุซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกดความแข็งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ และอื่นๆนอกจากนี้พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับเวลาอุณหภูมิ

ความเค้น (stress) ความเครียด (strain) เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าความแข็งคือการทดสอบแบบร็อกเวล (Rockwell hardness test) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดในการทดสอบความแข็งในแวดวงอุตสาหกรรม การทดสอบทำได้อย่างรวดเร็ว และอ่านค่าได้โดยตรงทันที โดยไม่ต้องทำการวัดขนาดรอยกด อีกทั้งยังทดสอบวัสดุที่มีขนาดเล็กได้ หัวกดของทดสอบแบบร็อกเวลมีอยู่ 2 ชนิด นั่นก็คือ หัวกดเพชรทรงกรวย (diamond cone) และ หัวกดแบบลูกบอลกลม (ball) ทำให้มีสเกลการวัดแบ่งออกได้หลายสเกล โดยแรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ Minor load F_0 เป็นแรงที่ยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง มีค่า 10kgf เมื่อกดแรงนี้ลงไป จะเป็นการ zero set ที่หน้าปัด และ Major load F_1 เป็นแรงที่มากกว่า F_0 และกดลงอย่างต่อเนื่องภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน

ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบความแข็งด้วยหัวกดลูกบอลทังสเตน-คาร์ไบด์ (tungsten-carbide) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว มีค่าโหลด 100 kg ซึ่งเหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกับวัสดุอ่อนค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0-100 ค่าความแข็งสามารถอ่านได้โดยตรงจากการอ่านที่หน้าจอตัวเลขดิจิทัล หรือจากเข็มนาฬิกาวัด ในเครื่องทดสอบ โดยการอ่านค่าแบบร็อกเวลขึ้นอยู่กับความลึกของการกด ลักษณะการทดสอบของเครื่องมือแบบร็อกเวลสามารถดูได้จากรูป 3.15



รูปที่ 3.14 การทดสอบของเครื่องมือ Rockwell Hardness test

(ที่มา: app.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/1302423/บทที่%209%20Hardness.ppt)

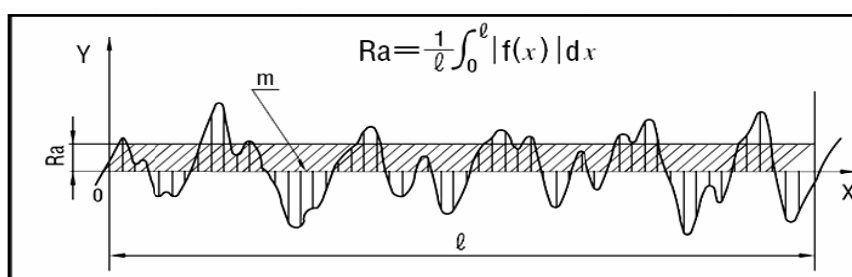


รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความแข็งWillson/Rockwell Hardness test series 500

3.6.1.2 การวัดความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคน

ความขรุขระ (surface roughness) ของพื้นผิววัสดุจากปริมาณความกว้าง กับปริมาณความสูงเทียบกับระนาบอ้างอิงของวัสดุทดสอบ ผิวของชิ้นงานถูกกำหนดด้วยความเบี่ยงเบนด้านบนของพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่สมบูรณ์ และสามารถคำนวณได้จากสมการในรูปที่ 3.16ความเบี่ยงเบนน้อยแสดงว่าชิ้นงานมีความเรียบมาก วัสดุที่มีพื้นผิวหยาบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าพื้นผิวเรียบ ทำให้เกิดการแตก หรือการกัดกร่อน

การวัดความขรุขระมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจสอบความขรุขระด้วยตาเปล่า หรือใช้นิ้วสัมผัสเปรียบเทียบกับความขรุขระมาตรฐาน ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีเหล่านี้มีความผิดพลาดสูงจึงต้องใช้เครื่องมือทดสอบความหยาบ (roughness tester) ประกอบด้วย หัววัดที่ต่อกับตัวแปลงสัญญาณลากไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณเชิงกลถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และคำนวณออกมาเป็นค่าความขรุขระ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความขรุขระแสดงดังรูปที่ 3.17 ผลของการทดสอบจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย R_a (arithmetical mean roughness) ซึ่งเฉลี่ยจากเส้นกราฟความขรุขระของวัสดุทดสอบ เส้นค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะวางบนระบบพิกัดแกน X และการขยายทางแกน Y ค่า R_a ที่วัดได้อยู่ในหน่วยไมโครเมตร



รูปที่ 3.16 ลักษณะกราฟจากการทดสอบความขรุขระของวัสดุ

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

เมื่อ / คือความยาว

$f(x)$ คือฟังก์ชันการอินทิกรัล

โดยค่าระยะ / ของเครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระที่ใช้คือ 3 cm



รูปที่ 3.17 เครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระ Mitutoyo SV-400

3.6.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำนั้นสามารถทำได้หลายวิธี จากมาตรฐาน IEC 62073 ซึ่งแต่ละวิธีมีความซับซ้อนและความแม่นยำต่างกันประกอบด้วย

1. วิธีสเปรย์น้ำ (spray method)
2. วิธีวัดค่าความตึงผิว (surface tension method)
3. วิธีวัดมุมสัมผัส (contact angle method)

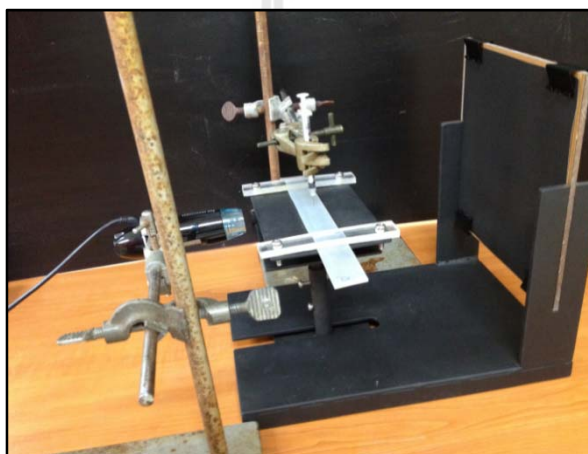
การวิเคราะห์หาคุณสมบัติหยดน้ำในงานวิจัยนี้ใช้วิธีวัดมุมสัมผัส เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ชัดเจน ตรงกับจุดที่สนใจศึกษาการเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคน

วิธีวัดมุมสัมผัส

การวัดมุมสัมผัสเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการแยกประเภทคุณสมบัติหยดน้ำ ถัดมา มุมสัมผัสเป็นการวัดที่เกี่ยวข้องกับการประเมินมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นสัมผัสของหยดน้ำและ

พื้นผิวของวัสดุของแข็ง โดยการวัดมุมจะขึ้นกับความขรุขระของพื้นผิว รวมทั้งมุมที่วัดบนพื้นผิวที่มีการปนเปื้อนก็อาจจะให้ผลที่แตกต่างมากกว่าพื้นผิวที่สะอาดและเป็นระนาบ (IEC/TS 62073, 2003)

ความแตกต่างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมุมมีด้วยกันหลายแบบ แต่การวัดอย่างง่ายจะทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีการส่องขยายและเส้นกำกับที่แม่นยำติดอยู่ที่หลังฉาก พร้อมทั้งต้องมีไซริง เพื่อใช้ในการหยคน้ำลงบนวัสดุทดสอบ ส่วนวิธีอื่น ๆ เช่น การขยายหยคน้ำให้ใหญ่ขึ้นจากการส่องไฟ (ให้ไฟอยู่ด้านหลัง) ส่องภาพหยคน้ำให้ไปตกกระทบจนได้รูปที่พื้นหลังก็ทำได้เช่นกัน อุปกรณ์ที่ใช้เช่น กล้อง เครื่องมือเปิดภาพถ่าย และคอมพิวเตอร์ ยังจำเป็นต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่ามุมสัมผัส (IEC/TS 62073, 2003) โดยรูปของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการการออกแบบและสร้างเพื่อให้ได้ชุดการวัดมุมสัมผัส แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดหาค่ามุมสัมผัส

ขั้นตอนการวัดมุม

โดยทั่วไปแล้วการวัดมุมสัมผัสมีขั้นตอนดังนี้

1. โดยปกติเมื่อทำการทดสอบเสร็จต้องตัดแผ่นวัสดุทดสอบออกมา แผ่นที่เลือกมานั้นควรมีลักษณะเป็นระนาบมากที่สุด พื้นผิวที่ทำการวัดไม่ควรสัมผัสกับสิ่งอื่น หรือไม่ควรติดตั้งทิ้งไว้นานกว่าวัดจริง การวัดก็ควรทำในทันทีหลังการทดสอบ
2. น้ำที่นำมาใช้ในการวัดมุมสัมผัสต้องไม่มีการปนเปื้อนใด ๆ จนส่งผลต่อแรงตึงผิวของน้ำ (เช่น สารที่ลดแรงตึงผิว, ตัวทำละลาย, น้ำมันตกค้าง และอื่น ๆ) น้ำแยกไอออนจึงเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้
3. ปริมาณของหยคน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีปริมาตรระหว่าง $5-50\mu\text{l}$ แต่ถ้าที่ $50\mu\text{l}$ เป็นปริมาตรที่แนะนำ ส่วนในพื้นผิวที่มีความขรุขระ ไม่เรียบ ต้องใช้หยคน้ำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

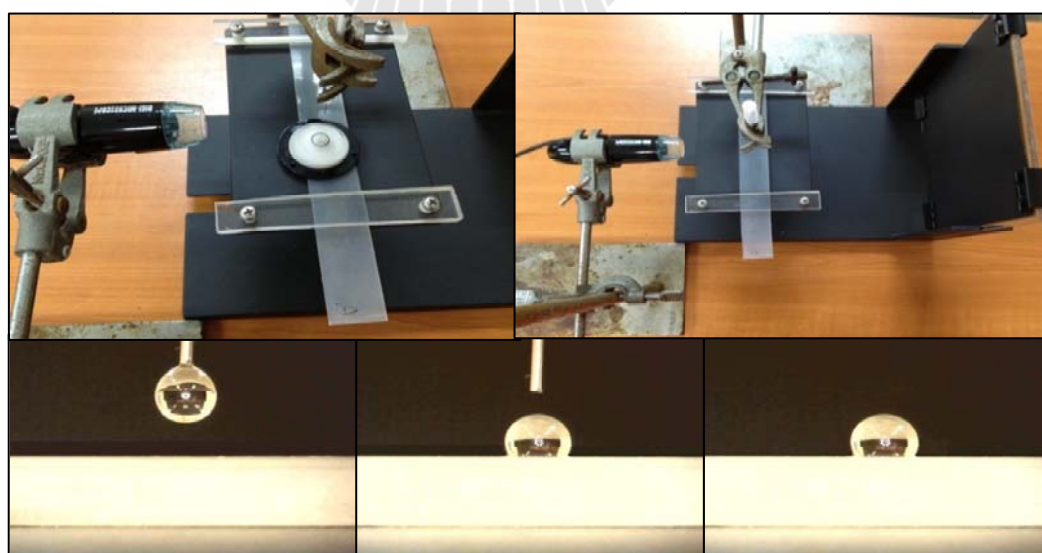
และเพื่อเป็นการกำจัดตัวแปรในเรื่องขนาดของหยดน้ำ หยดน้ำแต่ละหยดที่ทำการทดลองก็ควรมีปริมาตรที่เท่ากันมากที่สุดเมื่อต้องนำผลมาเปรียบเทียบกัน

4. การวัดมุมสัมผัสควรทำโดยเร็วที่สุดหลังจากหยดน้ำลงบนวัสดุทดสอบ (ภายใน 1 นาที) เพราะถ้าหากอุณหภูมิภายนอกมีอยู่สูงและมีความชื้นต่ำ ทำให้มีอัตราการระเหยของหยดน้ำเกิดขึ้น ในกรณีที่หยดน้ำมีขนาดเล็กมาก แต่ถ้าวัดในห้องที่มีไอน้ำอิ่มตัว (ความชื้นสูง) ก็ช่วยตัดตัวแปรเรื่องการระเหยของหยดน้ำไปได้

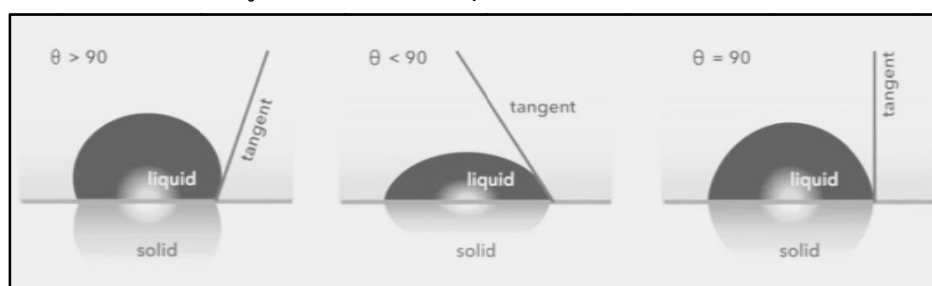
ถ้าหยดน้ำที่ใช้มีขนาดเล็ก ๆ ก็สามารถลดผลกระทบเรื่องแรงโน้มถ่วงของโลกที่อาจส่งผลต่อมุมของหยดน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามหยดน้ำที่เล็กเกินไปส่งผลให้มีการระเหยของหยดน้ำ มีผลต่อการวัดมุมสัมผัส ส่วนในพื้นที่ผิวที่ขรุขระหยดน้ำที่เล็กเกินไปก็ทำให้ไม่สามารถเห็นหยดน้ำได้ชัดเจนเช่นกัน ดังนั้นปริมาตรของหยดน้ำจึงขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของพื้นผิว อุณหภูมิ และความชื้นด้วย (IEC/TS 62073, 2003) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปริมาตรหยดน้ำขนาด 50 μl กับทุกวัสดุทดสอบ

การวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย

การวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย (θ_s) สามารถวัดด้วยการหยดน้ำลงบนพื้นผิววัสดุทดสอบในแนวนอนแบบระนาบ โดยใช้ไซริงก์ที่มีมาตรวัดปริมาตรหยดน้ำ กดปลายไซริงก์ให้เกิดหยดน้ำในปริมาณที่ต้องการแล้วเคลื่อนหยดน้ำเข้าสู่วัสดุทดสอบ หรือยกวัสดุทดสอบให้ชนกับหยดน้ำแล้วเลื่อนออกก็ได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และทำการวัดมุมสัมผัสแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 วิธีการวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย



รูปที่ 3.20 การวัดมุมสัมผัสแบบสถิตย

(ที่มา: [http://www.attension.com/\\$2/file/filarkiv/glossary-science-pages/sessiledrop3angles-1.jpg](http://www.attension.com/$2/file/filarkiv/glossary-science-pages/sessiledrop3angles-1.jpg))

[glossary-science-pages/sessiledrop3angles-1.jpg](http://www.attension.com/$2/file/filarkiv/glossary-science-pages/sessiledrop3angles-1.jpg))

เพื่อให้ได้การวัดผลที่น่าเชื่อถือ ควรทำการวัดทั่วทั้งผิววัสดุทดสอบ เพราะการวัดมุมสัมผัสบนผิวลูกถ้วยเพียงจุดเดียวให้ผลแค่จุด ๆ นั้นไม่เพียงพอในการสรุปค่าคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของวัสดุทดสอบทั้งชิ้น

โดยค่ามุมสัมผัสที่มีค่าต่ำ ๆ หรือเป็น 0 แสดงว่าลูกถ้วยเกิดการเปียกได้ง่าย หรือสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำลื่น แต่ถ้ามุมสัมผัสมีค่าสูง แสดงว่าผิววัสดุทดสอบมีความไม่ชอบน้ำหรือมีคุณสมบัติหยดน้ำลื่นอยู่นั่นเองคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท (HC1-HC7) โดยHC1มีสภาพพื้นผิวที่มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นอย่างสมบูรณ์ไปจนถึงHC7พื้นผิวสามารถเปียกน้ำได้โดยง่าย เกณฑ์ที่ใช้ในแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่3.1(IEC/TS 62073, 2003)

ตารางที่3.1 เกณฑ์สำหรับแยกประเภทความไม่ชอบน้ำ(HC1-7)

HC	คำอธิบาย
1	รูปแบบที่หยดน้ำเล็กๆแยกออกจากกันเมื่อ $\theta_r \geq 80^\circ$
2	รูปแบบที่หยดน้ำเล็กๆแยกออกจากกันเมื่อ $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$
3	$20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ โดยปกติไม่เป็นวงกลม
4	ทั้งหยดน้ำเล็กๆที่แยกออกจากกันและรอยน้ำ $\theta_r = 0$ มีพื้นที่ที่เปียกน้ำอย่างสมบูรณ์น้อยกว่า 2 cm^2 หรือ ครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90%
5	มีพื้นผิวที่เปียกบางส่วนมากกว่า 2 cm^2 หรือ ครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90%
6	มีพื้นผิวที่เปียกครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 90%
7	มีฟิล์มน้ำต่อเนื่องทั้งหมดบนพื้นที่ทดสอบ

3.6.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

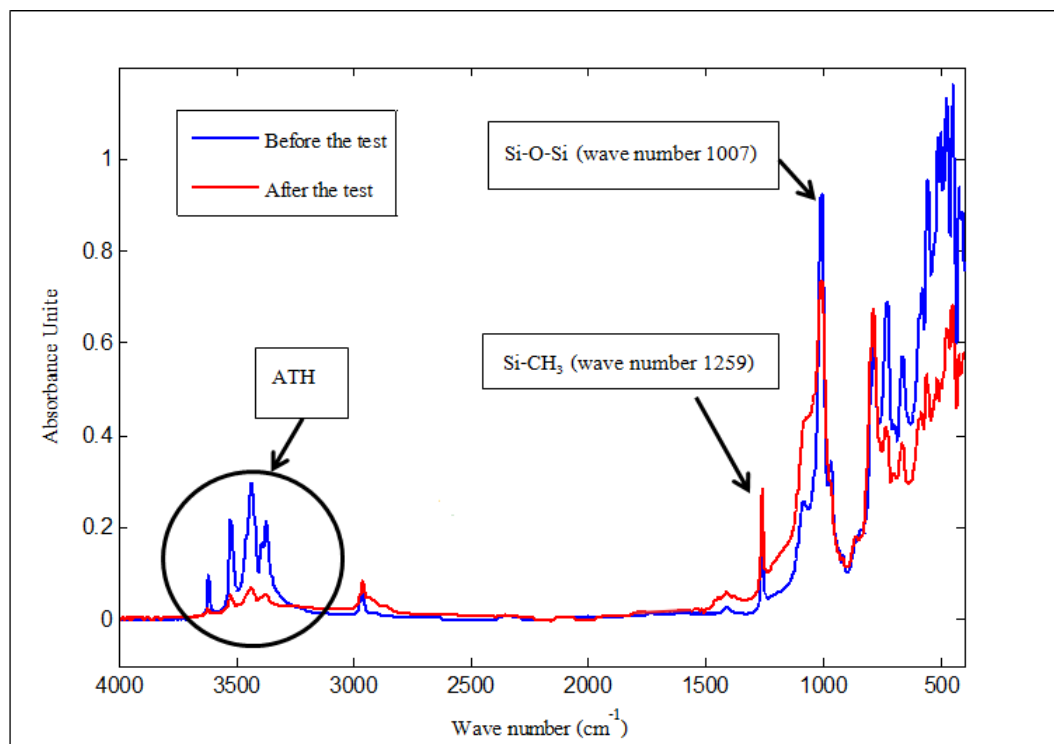
การวิเคราะห์ทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ ทราน-ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และศึกษาเกี่ยวกับ โมเลกุลของสาร หรือวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และสารประกอบ อนินทรีย์บางประเภทรวมถึงหมู่ฟังก์ชันในสารเทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโคปีชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสาร ในย่านความถี่ของแสงโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารอาศัยการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน โมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกันและมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงเทคนิคนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารที่อยู่ในยางซิลิโคนโดยที่คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (visible region) กับย่านไมโครเวฟความยาวของคลื่นอินฟราเรดซึ่งจะแบ่งเป็นช่วงคลื่น (wave number) ได้ดังนี้

1. ช่วงคลื่น $4,000-12,800\text{ cm}^{-1}$ เป็นย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared region)
2. ช่วงคลื่น $200-4,000\text{ cm}^{-1}$ เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (middle infrared region)
3. ช่วงคลื่น $10-200\text{ cm}^{-1}$ เป็นย่านไกลอินฟราเรด (far infrared region)

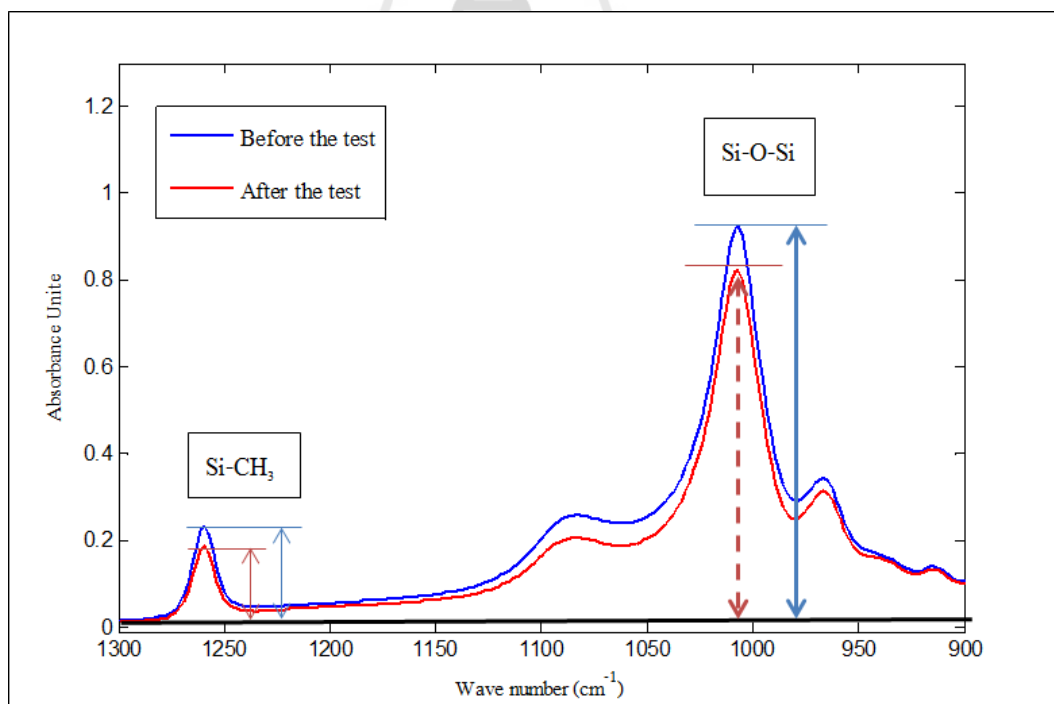
การวิเคราะห์ใช้ประโยชน์จากคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลางมากกว่าช่วงอื่นเมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสม จะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์คู่ขั้วของโมเลกุลและเกิดการดูดกลืนแสงจากนั้นวัดแสงที่ส่งผ่านออกมา และแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าการส่งผ่านของแสงเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (infrared spectrum หรือ IR spectrum)

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์พันธะ Si-O ซึ่งจะเกิดขึ้นในขอบเขตของสเปกตรัมที่ $1000-1130\text{ cm}^{-1}$ การเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-O นั้นหมายถึงการแยกตัวของสายโซ่หลักและพันธะของ Si-CH₃ จะเกิดขึ้นในขอบเขตของสเปกตรัมที่ $1270-1255\text{ cm}^{-1}$ หมายถึงการแยกตัวของสายโซ่ข้างของพันธะพอลิไดเมทิลไซล๊อกเซนซึ่งเป็นโครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

การวิเคราะห์นี้เป็นการตรวจสอบสารในเชิงปริมาณเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุทดสอบว่าเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงมากอย่างไร โดยการพิจารณาเปรียบเทียบค่ายอดของค่าจากตัวอย่างก่อนการทดสอบกับตัวอย่างหลังการทดสอบซึ่งสเปกตรัมของตัวอย่างหลังการทดสอบหรือเสื่อมสภาพจะมีค่ายอดต่ำกว่า ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.21 และ 3.22 โดยเส้นสีแดงคือ สเปกตรัมของยางซิลิโคนที่เสื่อมอายุ (aging) และเส้นสีน้ำเงินคือ สเปกตรัมของยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ (new) และ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.21 ผลของช่วงคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR



รูปที่ 3.22 ลักษณะการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR



รูปที่ 3.23 เครื่องวิเคราะห์ spectrometer Bruker model T27/Hyp2000

3.7สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคาร เช่น ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ คุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โครงสร้างทั่วไปของฉนวนยางซิลิโคน กลไกการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน และปัจจัยการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อให้เข้าใจถึงผลจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่กระทบต่อการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนเมื่อเข้าใจการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนดีแล้ว ผู้วิจัยจึงสร้างการทดสอบเร่งให้เกิดการเสื่อมอายุในฉนวนยางซิลิโคนให้เร็วยิ่งขึ้น เพื่อศึกษาลักษณะที่เกิดการเสื่อมอายุและช่วงเวลาของการเกิดการเสื่อมอายุ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โดยกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบ

การเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคนและชุดวัดมุมสัมผัส

4.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากโคโรนาดีสชาร์จ ดีสชาร์จบางส่วน และการเกิดการกัดกร่อนบนผิวยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวน พร้อมทั้งแสดงการออกแบบชุดวัดมุมสัมผัสซึ่งเป็นหนึ่งในการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของแผ่นยางซิลิโคนอีกด้วย ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุมีดังนี้

4.2 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคน

ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนโดยประยุกต์ตามมาตรฐาน IEC Publ.61109-1992 clause 5.3 และชุดวัดมุมสัมผัสประยุกต์จากมาตรฐาน IEC 62073

4.3 มาตรฐาน IEC Publ. 61109-1992 clause 5.3

มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้คือ IEC Publ. 61109-1992 clause 5.3 เป็นมาตรฐานการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับทำโครงหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยวิธีหมอกไอเกลือ เวลาการทดสอบอยู่ที่ 1000 ชั่วโมงมีข้อกำหนดตามมาตรฐานดังนี้

- อัตราการไหลของน้ำ $(0.4 \pm 0.1) \text{ l}/(\text{m}^2 \times \text{h})$
- ความเข้มข้นของน้ำเกลือ $10 \text{ kg}/\text{m}^3$
- ใช้อัลตราโซนิกฮิวมิดิไฟเออร์สำหรับการสร้างหมอกไอเกลือมีขนาด $5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$
- ช่วงระยะเวลาในการทดสอบ 1000 ชั่วโมง
- ปริมาตรสูงสุดของห้องทดสอบ 10 m^3
- ระยะห่างตามผิวของลูกถ้วยฉนวน $20 \text{ mm}/\text{kV}$
- แรงดันทดสอบอยู่ในช่วง $14\text{--}20 \text{ kV}$
- แรงดันตกสูงสุด 5% สำหรับกระแส $250 \text{ mA}_{\text{rms}}$
- อุณหภูมิขณะทดสอบ $25 \pm 5^\circ\text{C}$

4.4 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ โดยศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆ กับยางซิลิโคน 8 ชนิด โดยทำการศึกษา 2 ประเภทหลักๆ คือ

- 1.ผลของหมอก แบ่งเป็น การทดสอบแบบไร้หมอก (without fog) การทดสอบแบบสภาวะหมอกสะอาด (clean fog) และ การทดสอบแบบสภาวะหมอกไอเกลือ (salt fog)
- 2.ผลของโคโรนาจากสนามไฟฟ้า แบ่งเป็น สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับผิวฉนวนยางซิลิโคนใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบในการสร้างโคโรนาดีสชาร์จ์ และสนามไฟฟ้าแนวขนานกับผิวฉนวนยางซิลิโคนใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม-ปลายแหลม

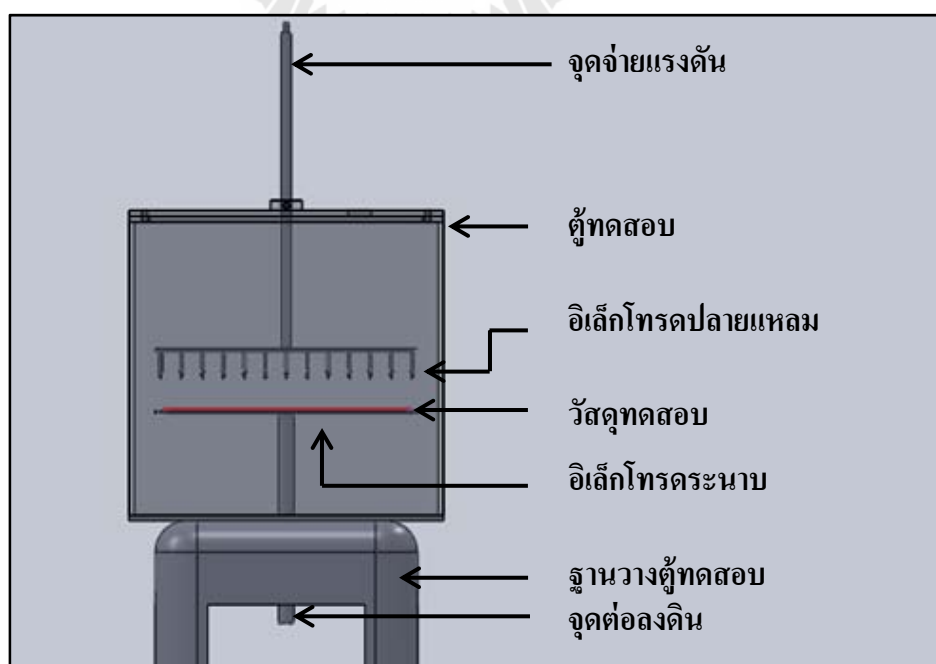
ดังนั้นชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนนั้นแบ่งห้องทดสอบเป็น 2 ชุด คือในสภาวะไร้หมอก ในชุดทดสอบชุดหนึ่ง อีกส่วนในสภาวะหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ

4.5 ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก

การเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอกมีอุปกรณ์การทดสอบดังต่อไปนี้

4.5.1 ตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จ์ในแนวตั้งฉาก

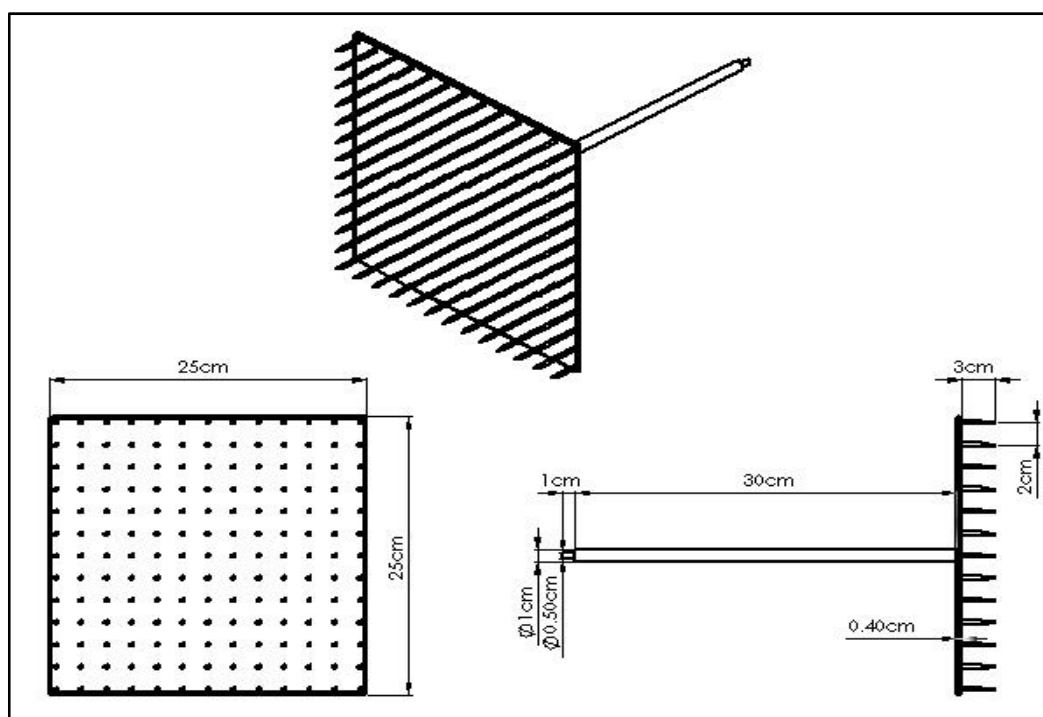
ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ในตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จ์จากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากโดยรวมแสดงดังรูปที่ 4.10



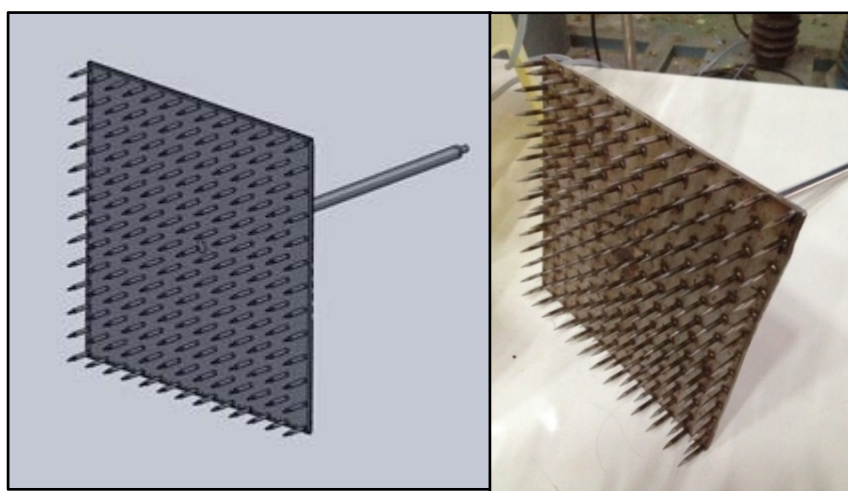
รูปที่ 4.1 การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จ์จากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

4.5.1.1 อิเล็กโทรดปลายแหลม

อิเล็กโทรดปลายแหลมในรูปที่ 4.1 มีแผ่นฐานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งทำมาจากสแตนเลสขนาด 25×25 cm มีความหนา 0.4 cm และปลายแหลมมีลักษณะคล้ายตะปูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 cm ความยาวจากฐานถึงปลาย 3 cm ติดอยู่ทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสโดยปลายแหลมแต่ละแท่งจะมีระยะห่าง 2 cm มีแกนรับแรงดันไฟฟ้าเป็นแท่งกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 cm ความยาว 30 cm ติดอยู่อีกด้านของแผ่นสแตนเลสลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



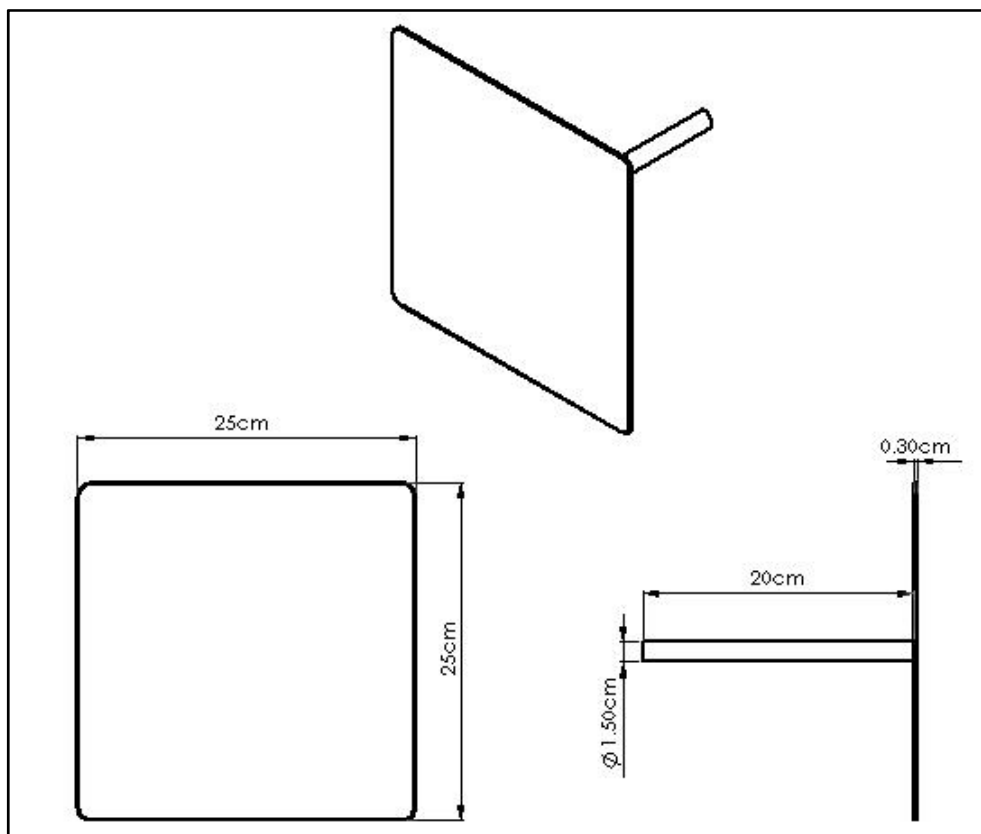
รูปที่ 4.2 ขนาดอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ออกแบบ



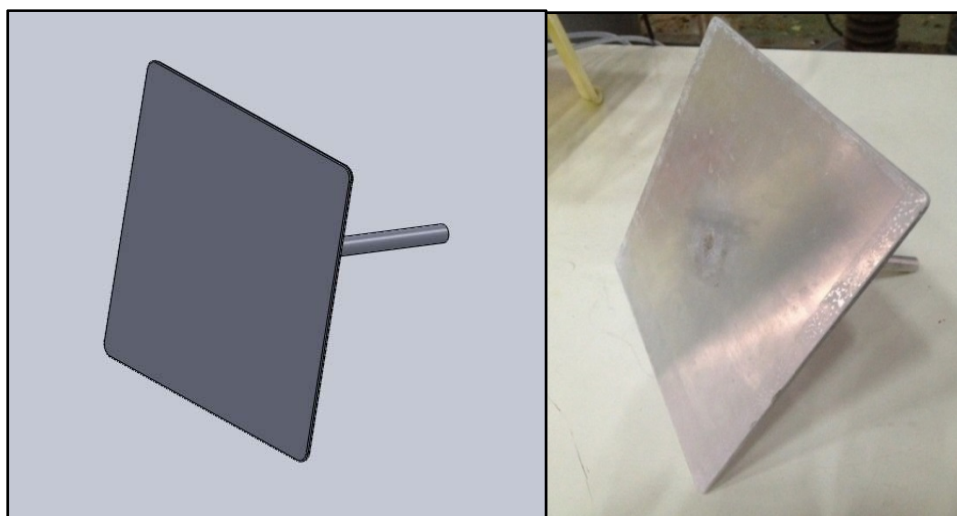
รูปที่ 4.3 ลักษณะอิเล็กโทรดปลายแหลม

4.5.1.2 อิเล็กโตรดระนาบ

อิเล็กโตรดระนาบมีอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้ มีลักษณะเป็นระนาบสี่เหลี่ยม ซึ่งมีขนาด $25 \times 25 \text{ cm}$ ความหนา 0.4 cm มีแกนต่อลงดินเป็นแท่งกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ความยาว 20 cm ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบแสดงดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5



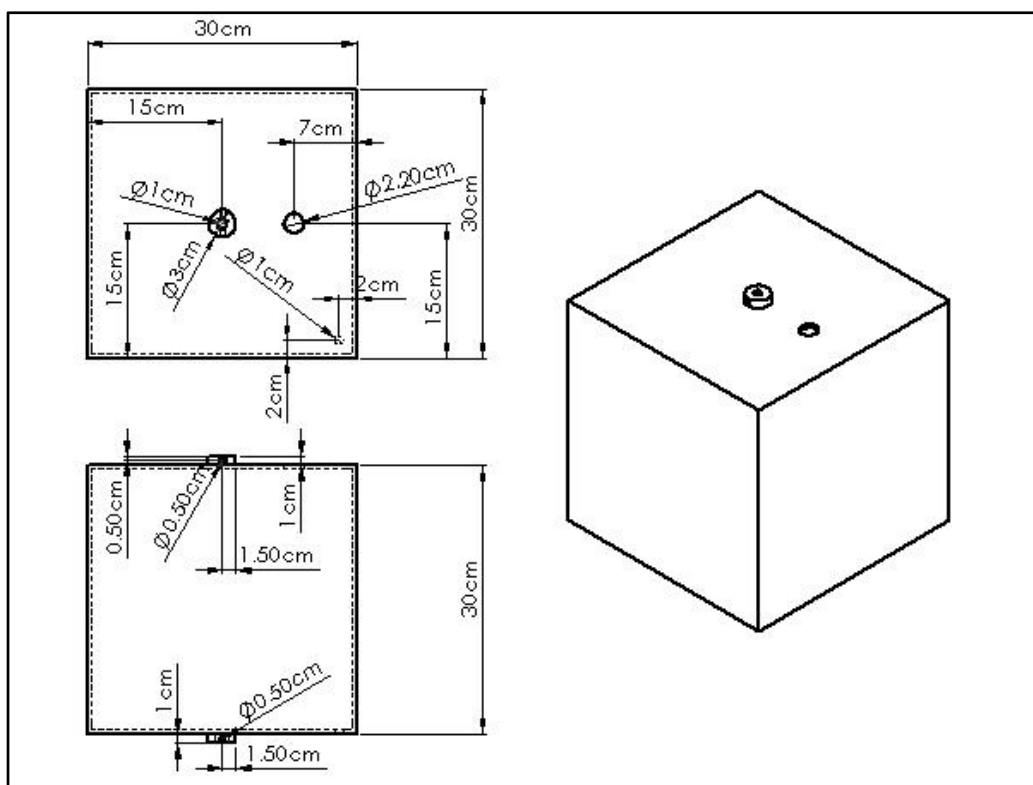
รูปที่ 4.4 ขนาดอิเล็กโตรดระนาบที่ออกแบบ



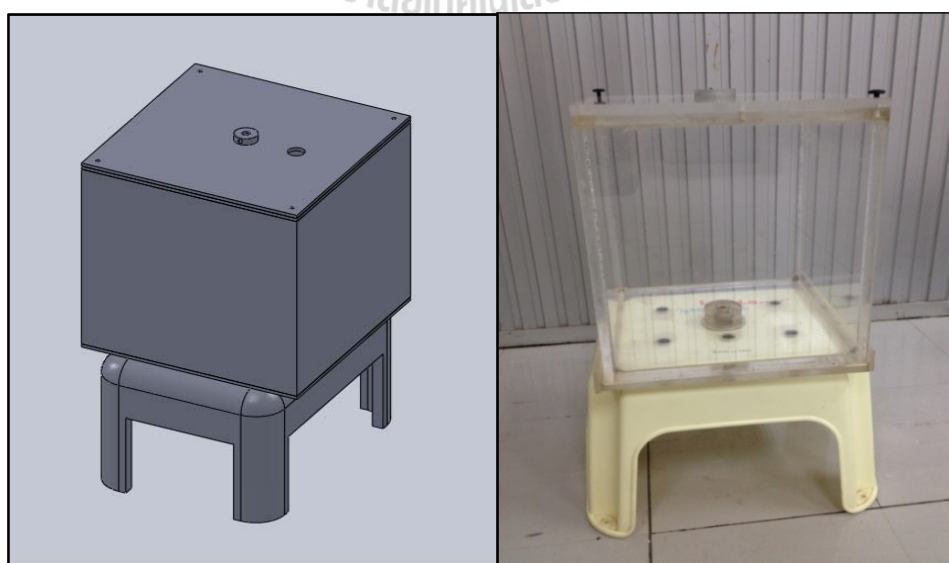
รูปที่ 4.5 ลักษณะอิเล็กโตรดระนาบ

4.5.1.3 ตู้ทดสอบ

ตู้ทดสอบที่ใช้ทำมาจากแผ่นอะคริลิกมีความหนา 4mm และออกแบบให้มีช่องทรงกระบอกกลวงด้านบนไว้ใส่แกนอิเล็กโทรดปลายแหลมเพื่อรับแรงดันไฟฟ้า และช่องด้านล่างของแกนอิเล็กโทรดระนาบเพื่อต่อลงดิน โดยทั้งสองที่จะต้องมียุคล็อกแกนไม่ให้ขยับได้ ลักษณะของตู้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

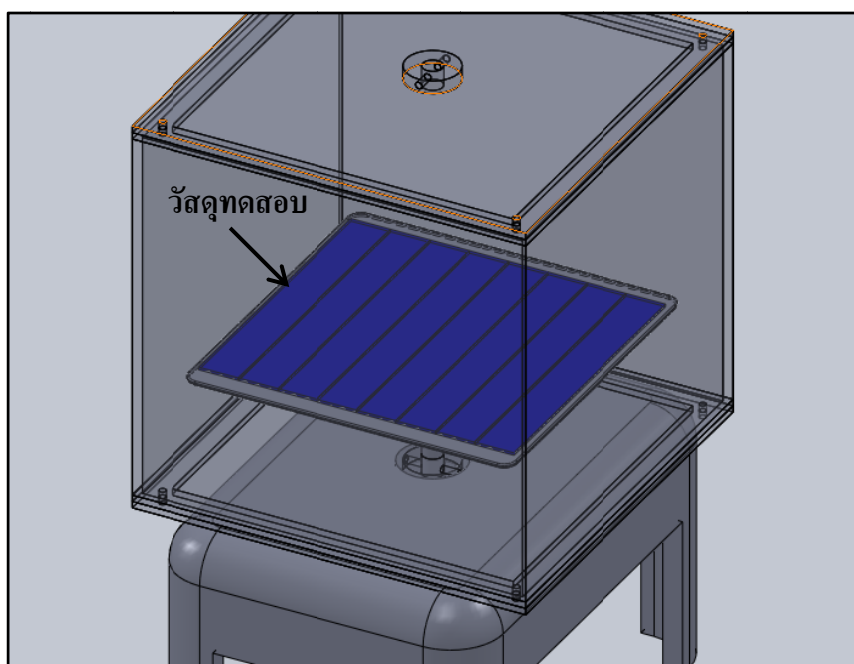


รูปที่ 4.6 ขนาดตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากที่ออกแบบ

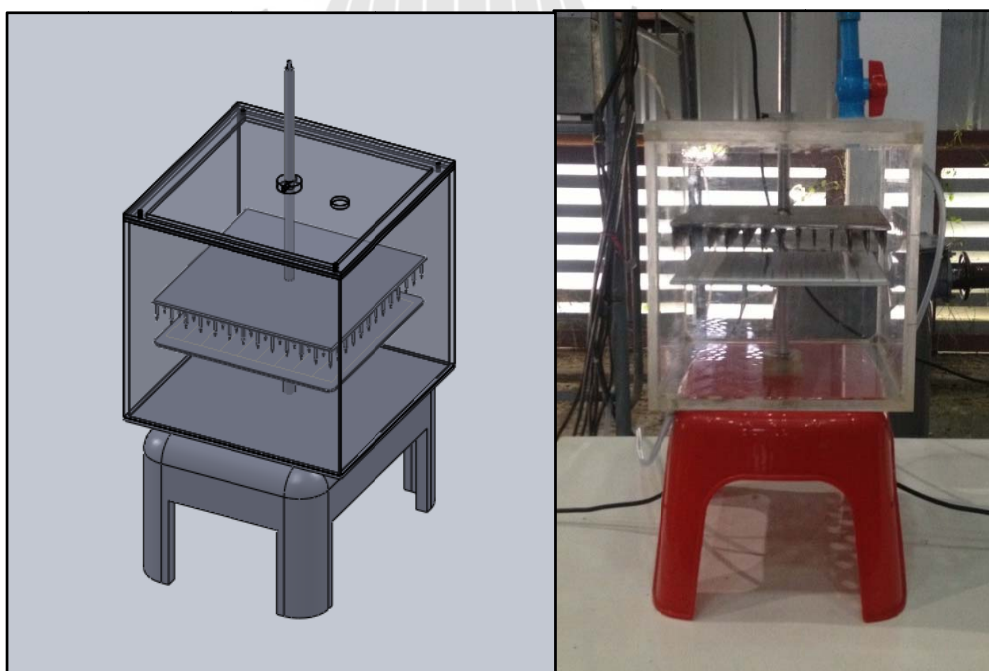


รูปที่ 4.7 ลักษณะตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

เมื่อสร้างตู้ทดสอบและอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์เรียบร้อยแล้ว
จึงนำตู้ทดสอบวางบนฐานเพื่อให้ตำแหน่งใส่แกนต่อลงดินพื้นพื้น แล้วจึงติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ไว้
ด้านล่างในช่องใส่แกนต่อลงดิน เมื่อวางให้ระนาบได้ระดับแล้วจึงล็อกให้ระนาบอยู่นิ่ง จึงวางวัสดุ
ทดสอบลงบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ดังรูปที่ 4.7 จากนั้นใส่แกนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ที่ด้านบนแล้วปิดตู้
ทดสอบให้สนิท ดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9



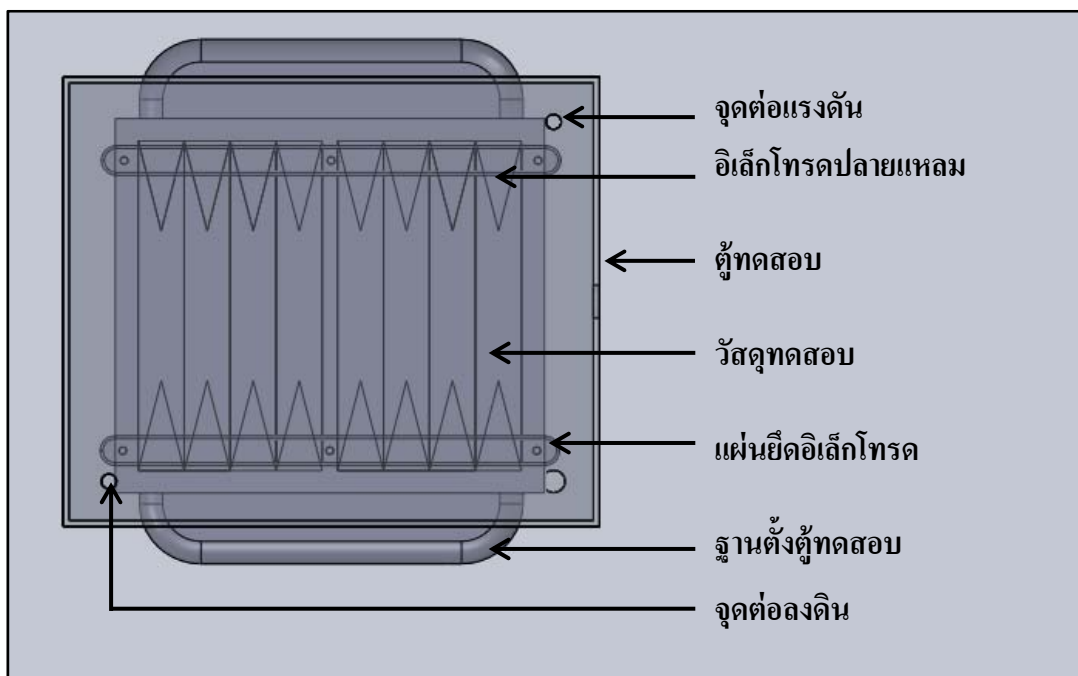
รูปที่ 4.8 การวางวัสดุทดสอบลงในตู้ทดสอบ



รูปที่ 4.9 การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

4.5.2 ตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน

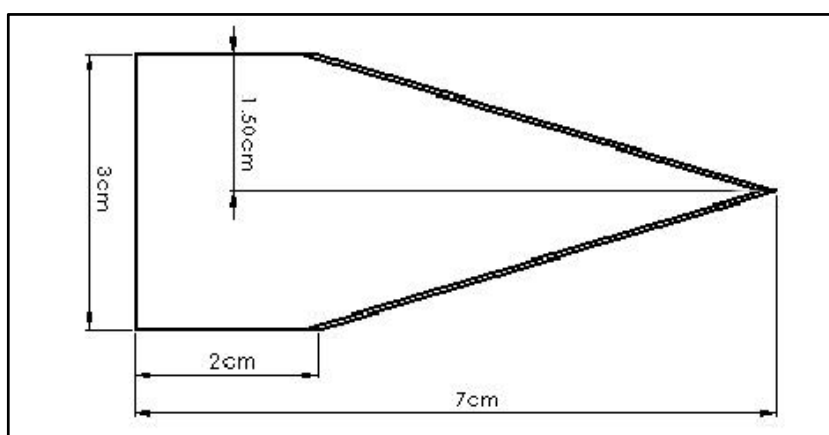
ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ในตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอนโดยรวมแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การติดตั้งการทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน

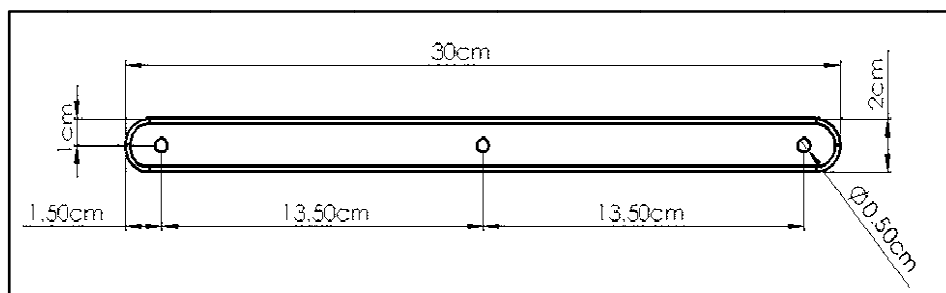
4.5.2.1 อิเล็กโทรดปลายแหลม

จากรูปที่ 4.10 เป็นการทดสอบด้วยสนามไฟฟ้าในแนวนอนกับผิวฉนวนยางซิลิโคน ซึ่งต้องใช้อิเล็กโทรดชุดใหม่ ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดปลายแหลมและปลายแหลมทั้งคู่ โดยอิเล็กโทรดปลายแหลมมีลักษณะเป็นแผ่นระนาบที่มีความหนา 1mm และมีขนาดดังรูปที่ 4.11

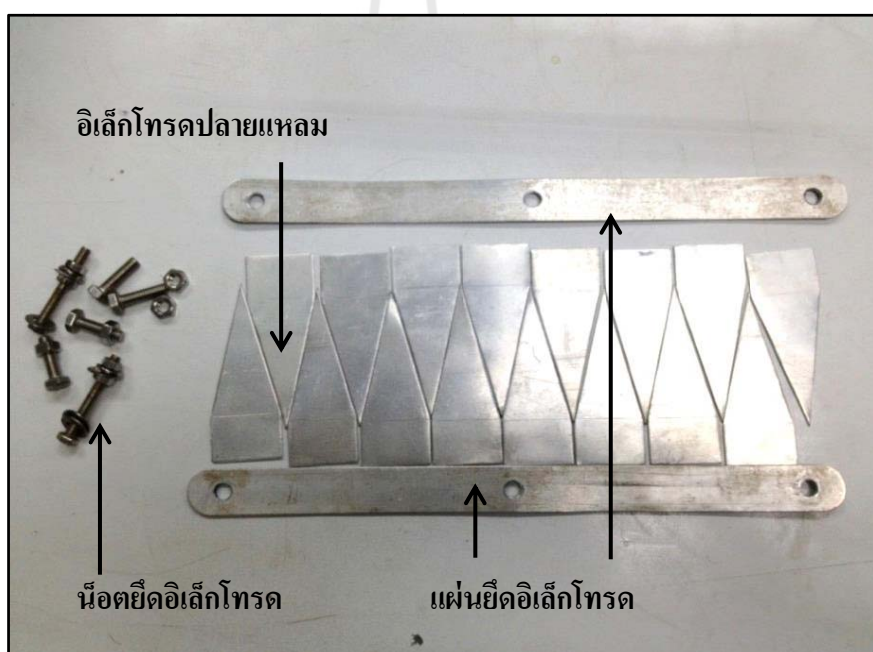


รูปที่ 4.11 ขนาดอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ออกแบบ

จากนั้นออกแบบให้มีแผ่นลักษณะคล้ายไม้บรรทัดทำมาจากอะลูมิเนียม ความหนา 2mm ออกแบบมาเพื่อเป็นตัวยึดอิเล็กโทรดปลายแหลมทั้งสองข้างให้ติดอยู่บนวัสดุทดสอบเพื่อไม่ให้วัสดุทดสอบขยับเขยื้อนระหว่างการทดสอบซึ่งจะมีขนาดชิ้นงานดังรูปที่ 4.12 และ ได้แสดงชุดอิเล็กโทรดและอุปกรณ์ยึดวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



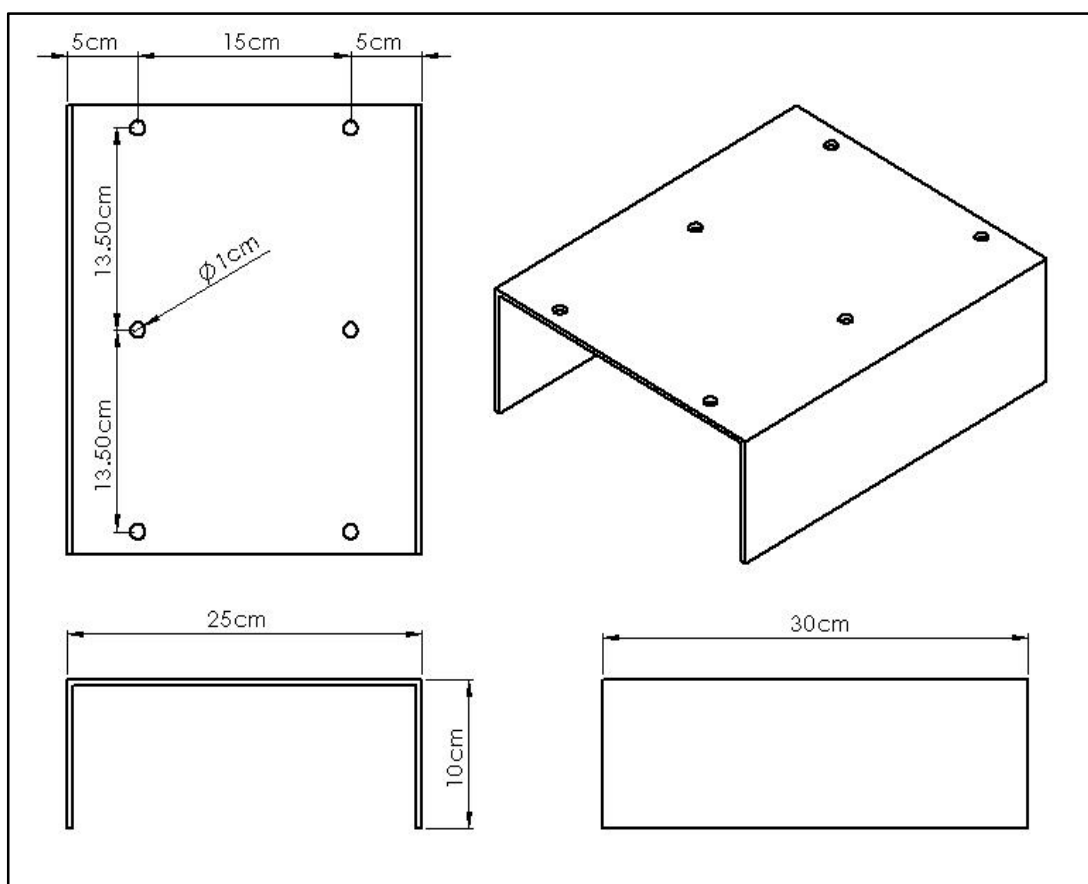
รูปที่ 4.12 ขนาดอะลูมิเนียมชิ้นหนีบวัสดุทดสอบที่ออกแบบ



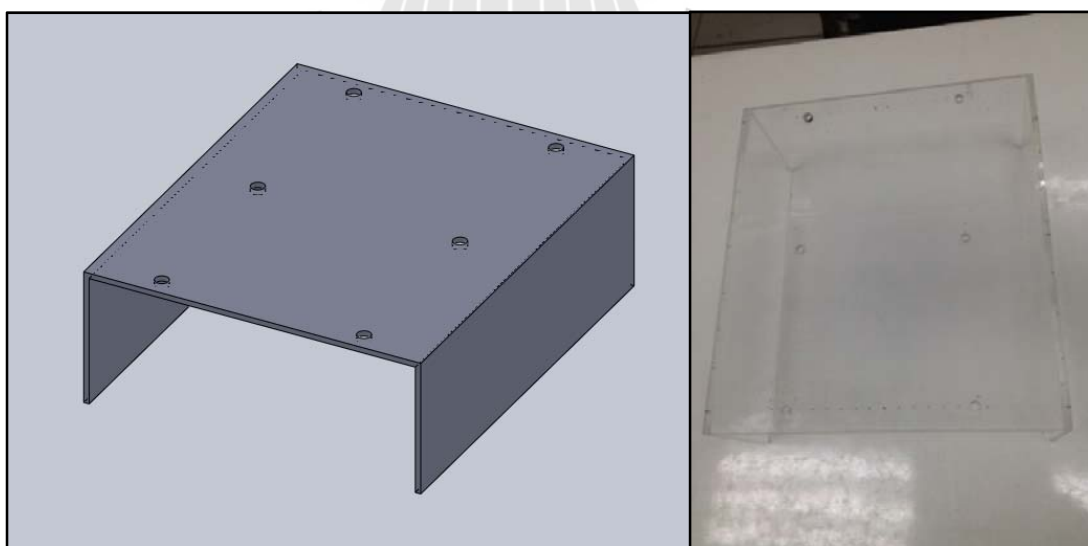
รูปที่ 4.13 ลักษณะอิเล็กโทรดปลายแหลม-ปลายแหลมและอุปกรณ์ยึดวัสดุทดสอบ

4.5.2.2 ฐานวางวัสดุทดสอบ

ฐานที่ใช้วางวัสดุทดสอบทั้ง 8 ชิ้นนั้นทำมาจากวัสดุที่เป็นอะคริลิก มีความหนา 4mm ตัวฐานระนาบเจาะเป็นรูไว้เพื่อเป็นจุดให้น็อตยึดวัสดุทดสอบ ฐานจะมีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง มีขนาดและตำแหน่งดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15

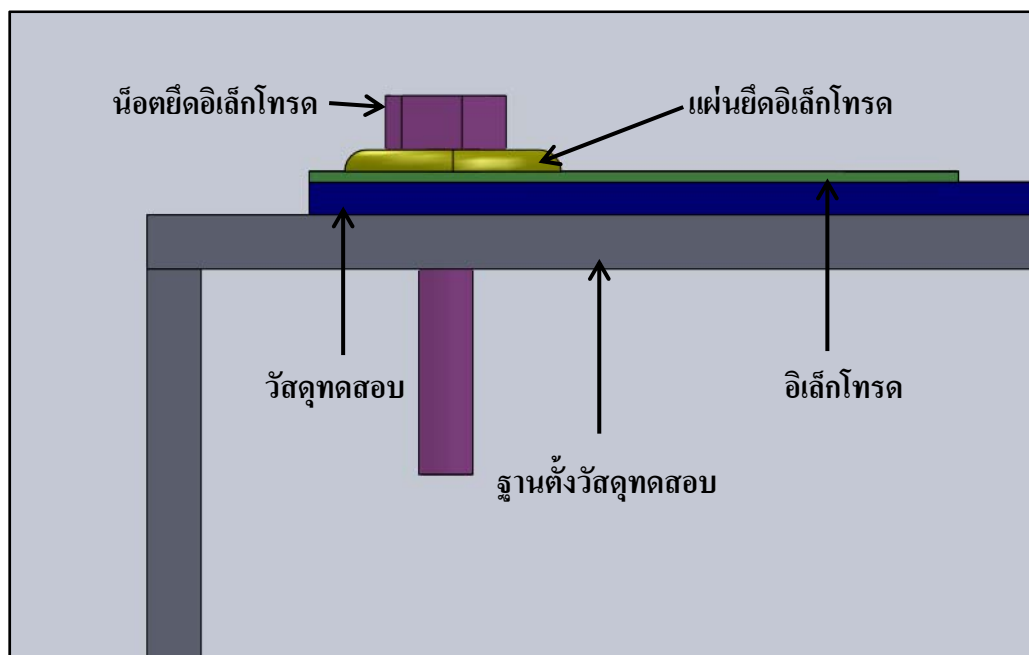


รูปที่ 4.14 ขนาดฐานตั้งวัสดุทดสอบที่ออกแบบ

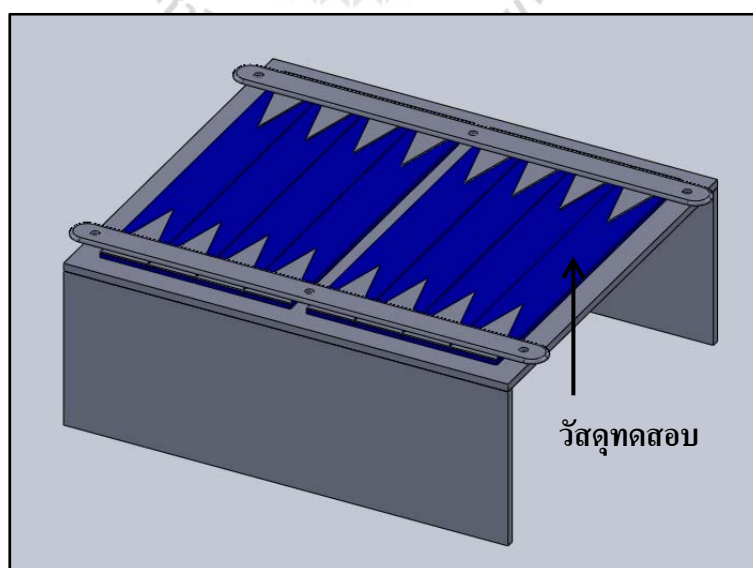


รูปที่ 4.15 ลักษณะฐานตั้งวัสดุทดสอบ

เมื่อนำวัสดุทดสอบทั้ง 8 ชนิด วางบนฐานตั้งวัสดุทดสอบแล้วจึงนำอิเล็กโทรดปลายแหลมวางทับบนแผ่นวัสดุทดสอบอีกชั้นหนึ่ง โดยวางแผ่นอิเล็กโทรดด้านที่ไม่ใช่ปลายแหลมชิดที่หัวและท้ายของวัสดุทดสอบ ให้ด้านปลายแหลมหันเข้าหากัน จากนั้นใช้น็อตสแตนเลสเป็นตัวยึดให้อิเล็กโทรดปลายแหลมทั้งสองข้างติดอยู่กับวัสดุทดสอบ โดยการยึดกับฐานวางวัสดุทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17



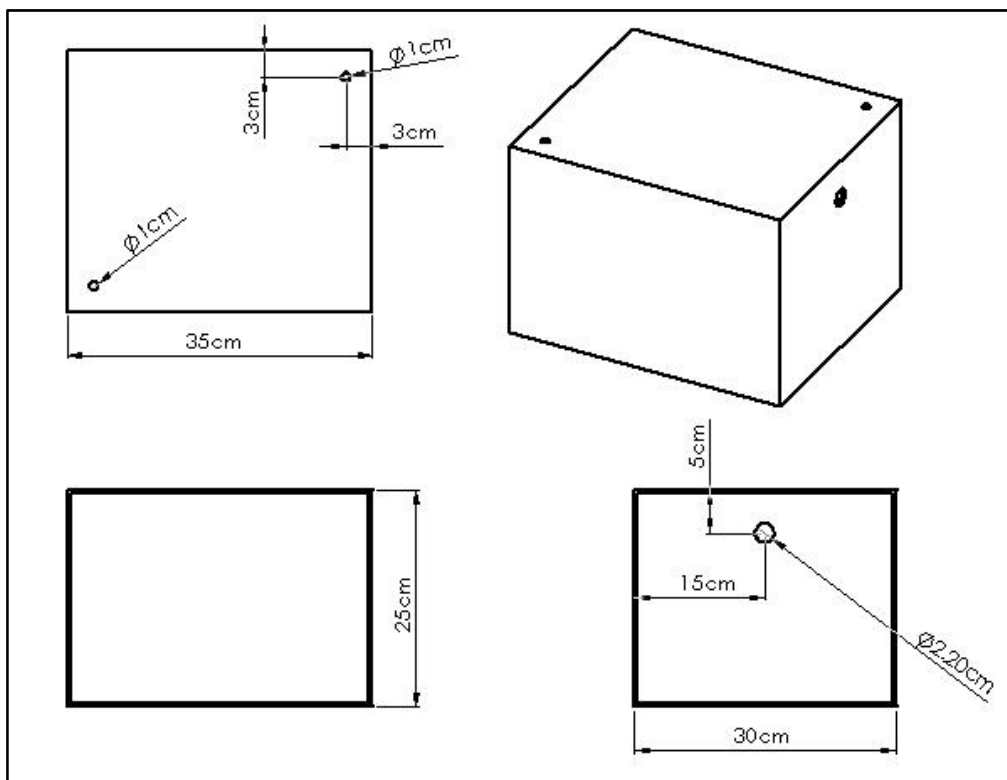
รูปที่ 4.16 การติดตั้งการทดสอบโคโรนาไวรัสจากสนามไฟฟ้าในแนวนอนที่ออกแบบ



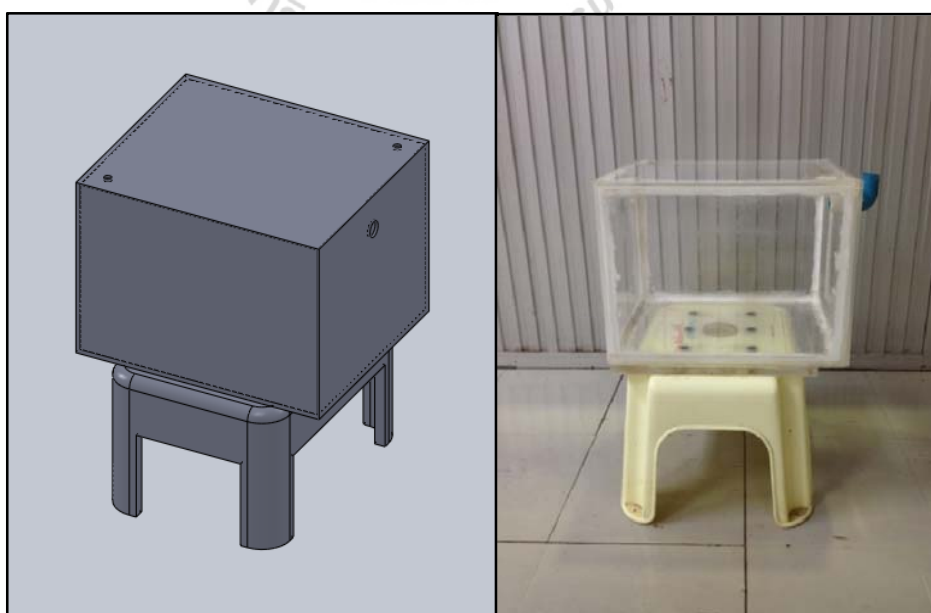
รูปที่ 4.17 การติดตั้งการทดสอบโคโรนาไวรัสจากสนามไฟฟ้าในแนวนอนที่ออกแบบ

4.5.2.3 ตู้ทดสอบ

การทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งขนาน ตู้ทดสอบที่ใช้ทำมาจากแผ่นอะคริลิกหนา 4mm ออกแบบให้ช่องนำสายไฟต่อเพื่อจ่ายแรงดัน และช่องต่อลงดิน ที่มุมบนขวาและมุมล่างซ้าย ตามลำดับ โดยแสดงขนาดของตู้ทดสอบดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19

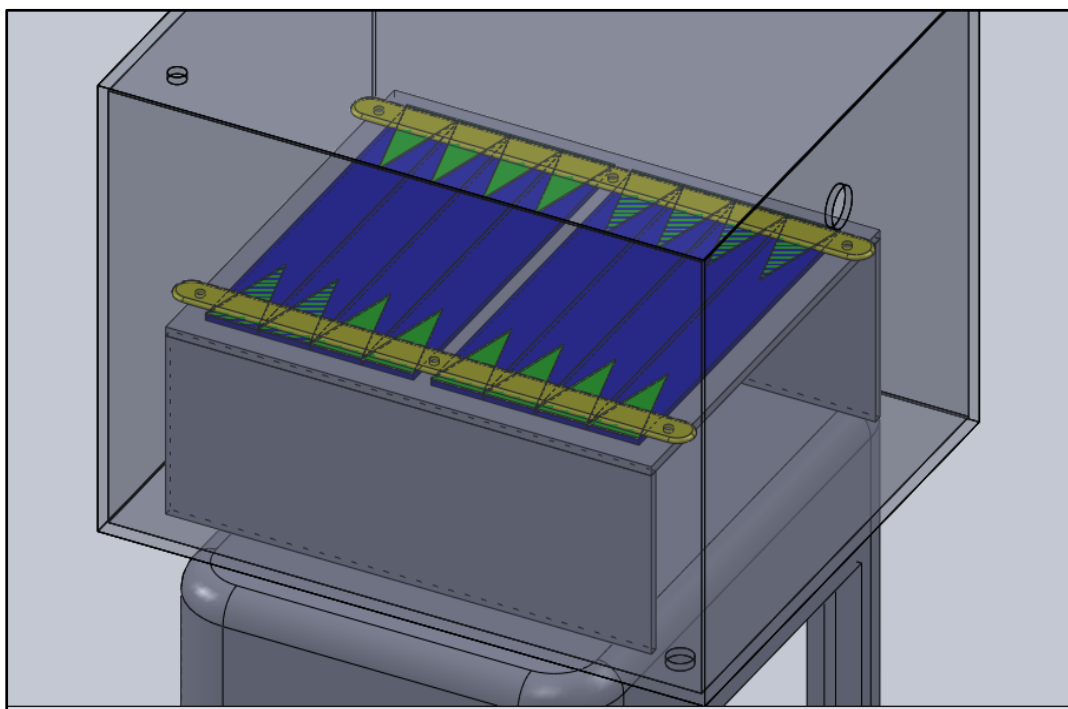


รูปที่ 4.18 ขนาดตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวขนานที่ออกแบบ

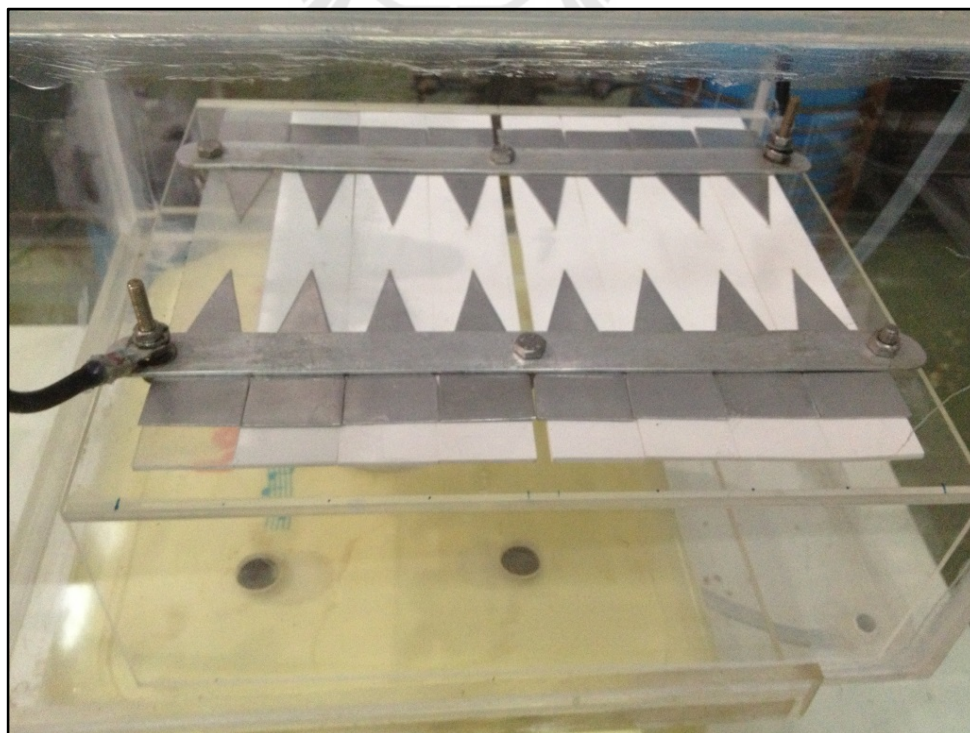


รูปที่ 4.19 ลักษณะตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวขนาน

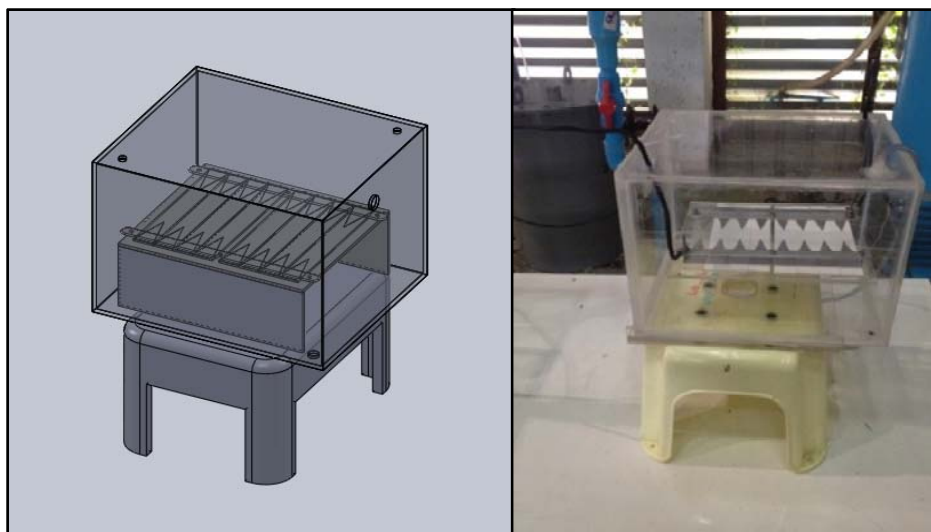
เมื่อนำฐานและวัสดุทดสอบมาติดตั้งร่วมกันเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาใส่ในตู้ทดสอบที่ได้ ออกแบบมาโดยตู้ทดสอบมีรูเจาะเพื่อต่อสายไฟด้านจ่ายแรงดันและรูเจาะเพื่อต่อสายลงดิน ดังแสดง ในรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.20 ตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน



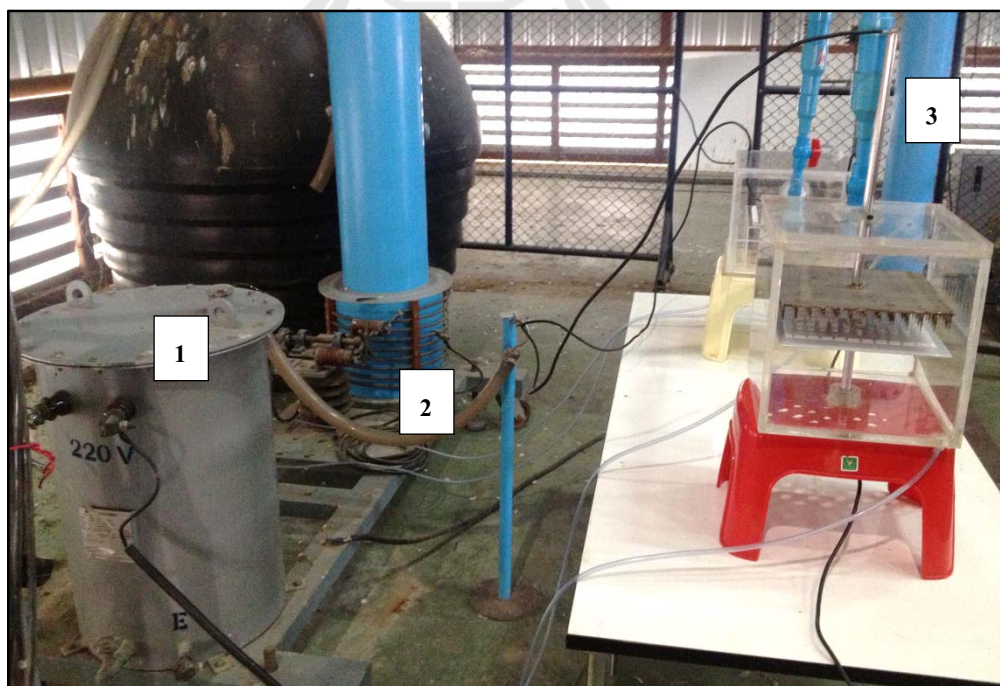
รูปที่ 4.21 การติดตั้งการทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน



รูปที่ 4.22 การติดตั้งตู้ทดสอบการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน

4.5.3 ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

เมื่อออกแบบตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งจากและตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนแล้ว นำอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อเข้ากับชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.23 เมื่อเสร็จสิ้นจึงได้ชุดทดสอบชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนกรณีไร้หมอกดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยด้านขวาเป็นกรณีที่มีโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวนอน และด้านซ้ายคือกรณีที่มิโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก



รูปที่ 4.23 ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.24 ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนกรณีไร้หมอกที่สร้างเสร็จ

รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 มีรายละเอียดของชุดทดสอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุยางซิลิโคนในสถานะไร้หมอกซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ 1 เฟส 20 kV, 5 kVA
2. ตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_{damp})
3. วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุ
4. วาไรเอ็ลปรับแรงดันทดสอบ (variac) 220 V/ 0 – 220 V 50 Hz, 5 kV
5. ตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก
6. ตู้ทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน

4.6 ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะหมอกสะอาดและในสถานะหมอกไอเกลือประกอบไปด้วยขั้นตอนและอุปกรณ์การทดสอบดังนี้

4.6.1 ห้องทดสอบ

การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของในสภาวะหมอกสะอาดและในสภาวะหมอกไอเกลือ ทดสอบในห้องทดสอบปิดขนาด 9.6m^3 (วรวิทย์พันธ์, 2555) สามารถทดสอบได้ทั้งกรณีโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากและกรณีโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนภายในห้องทดสอบเดียวกัน ไม่แยกตู้ทดสอบเหมือนการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอกลักษณะห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ลักษณะห้องทดสอบปิดในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนกรณีหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ

4.6.2 โครนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

4.6.2.1 อิเล็กโทรดปลายแหลม

อิเล็กโทรดปลายแหลมที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาดและในสภาวะหมอกไอเกลือ นั้น มีลักษณะเหมือนกับอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุกรณีไร้หมอกทุกประการแต่ส่วนที่ต่างกันคือแกนรับแรงดันไฟฟ้ามีความยาวเพียง 20cm ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลล

4.6.2.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลล

อิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลลถูกออกแบบให้คล้ายกับการทดสอบแรงการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก โดยออกแบบให้มีขนาดเท่ากันและทำมาจากสแตนเลสแต่ส่วนที่ต่อลงดินนั้นออกแบบให้เป็นเนื้อขนาด 5mm ยาว 2cm เชื่อมเอาไว้แทนการทำแกนยาวต่อลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลล

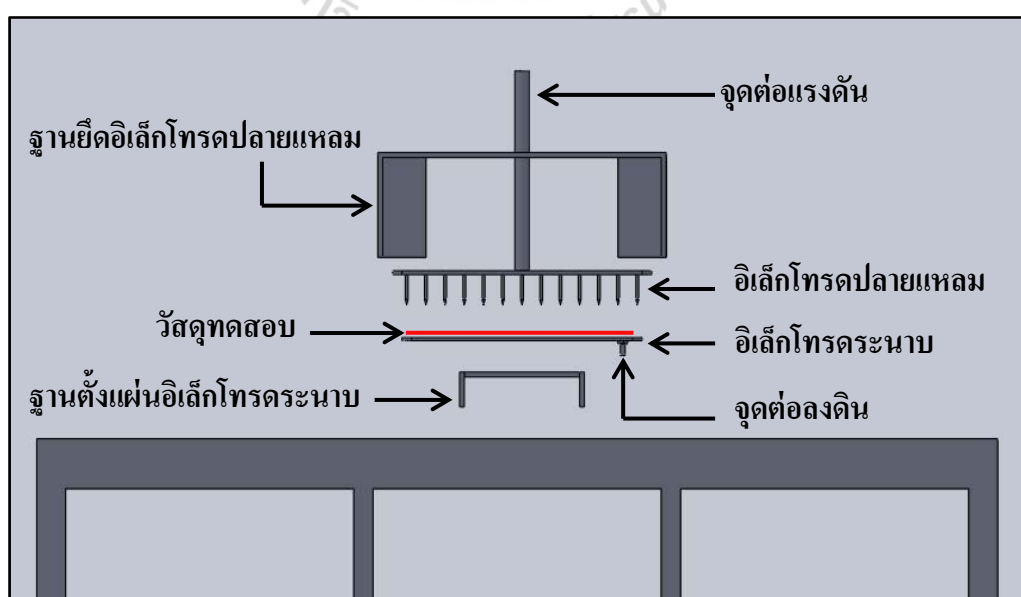
เมื่อได้อิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลลแล้ว จึงออกแบบฐานวางอิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลลโดยทำมาจากแผ่นอะคริลิกหนา 1cm ที่มีความกว้าง 12cm ความยาว 12cm และ ความสูง 4cm ใช้เพื่อเป็นฉนวนกับอิเล็กทรอนิกส์ทรายนลลลลล ดังแสดงในรูปที่ 4.28



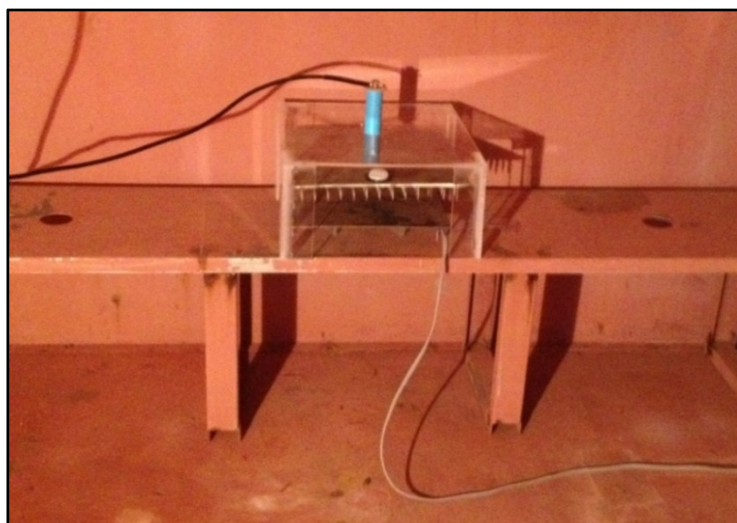
รูปที่ 4.28 ลักษณะฐานตั้งแผ่นอิเล็กโทรดระนาบ

การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับเร่งการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากและโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนในสภาวะหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือมีความแตกต่างกับการทดสอบในสภาวะไร้หมอกนั้นเนื่องจากสามารถทดสอบร่วมในห้องทดสอบเดียวกัน จึงมีการติดตั้งต่างกัน

การติดตั้งชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากประกอบด้วย ฐานตั้งแผ่นอิเล็กโทรดระนาบ อิเล็กโทรดระนาบ อิเล็กโทรดปลายแหลม ฐานยึดอิเล็กโทรดปลายแหลม ทั้งหมดวางอยู่บนฐานสูง 30cm แสดงดังรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ



รูปที่ 4.30 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์-ระนาบ

4.6.3 โครนาดีสสารจากสนามไฟฟ้าในแนวขนาน

4.6.3.1 อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์

อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ใช้เป็นแบบเดียวกันกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ในการทดสอบแรงการเชื่อมต่ออายุกรณีไร้หมอกแต่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำมาจากแผ่นสแตนเลสและเจาะรูขนาด 2mm ห่างจากปลายแหลม 2cm เพื่อยึดวัสดุไม่ให้ขยับระหว่างการทดสอบ และเจาะรูขนาดเท่ากัน ให้ห่างจากด้านที่ไม่ใช่ปลายแหลมออกมา 1cm เพื่อร้อยลวดยึดวัสดุทดสอบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์แสดงในรูปที่ 4.31

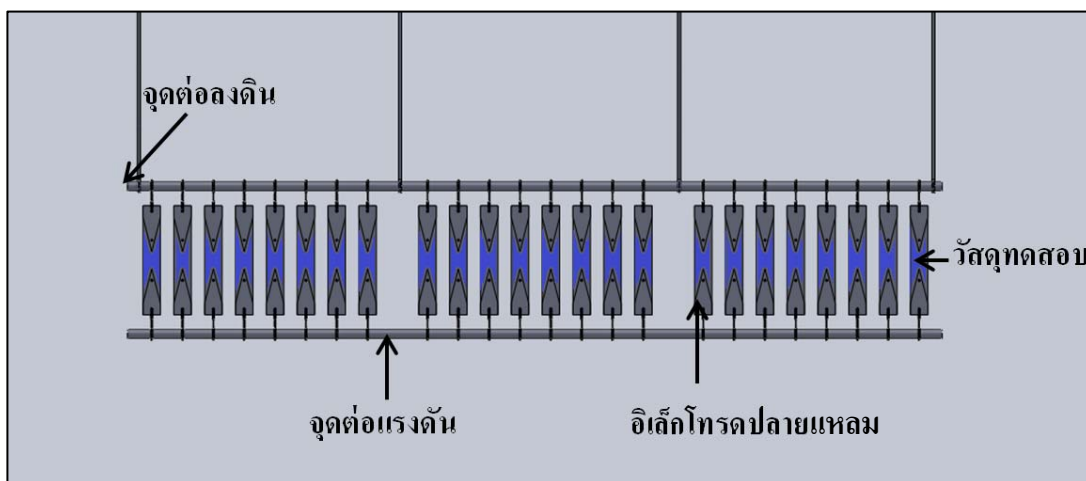


รูปที่ 4.31 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์

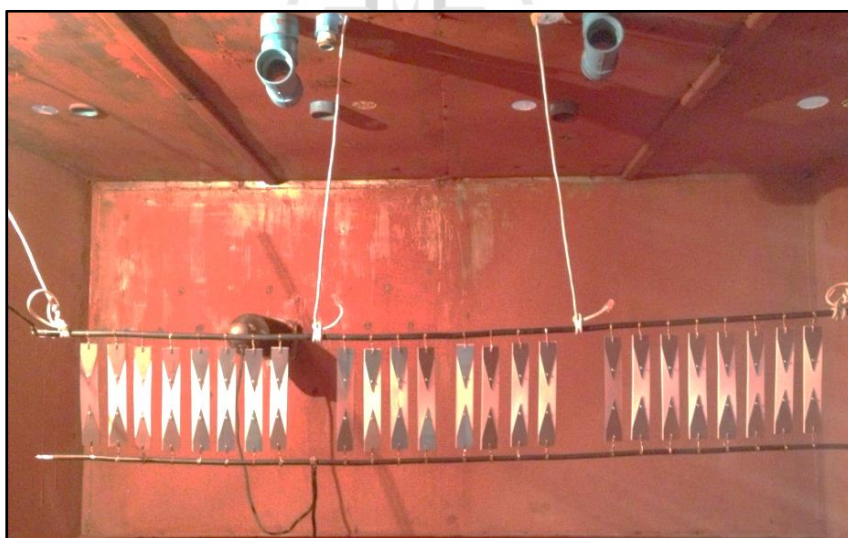
ยึดอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์-ปลายแหลมกับวัสดุทดสอบโดยให้ปลายแหลมทั้งสองด้านห่างกัน 3cm ทั้ง 8 ชนิด แล้วนำไปยึดกับสายไฟทั้งสองด้าน เพื่อจ่ายแรงดันและต่อลงดิน วัสดุทดสอบมี 3 ชุด ลักษณะการยึดวัสดุทดสอบและการติดตั้งแสดงในรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.32 ลักษณะการยึดอิเล็กโทรดปลายแหลม-ปลายแหลม

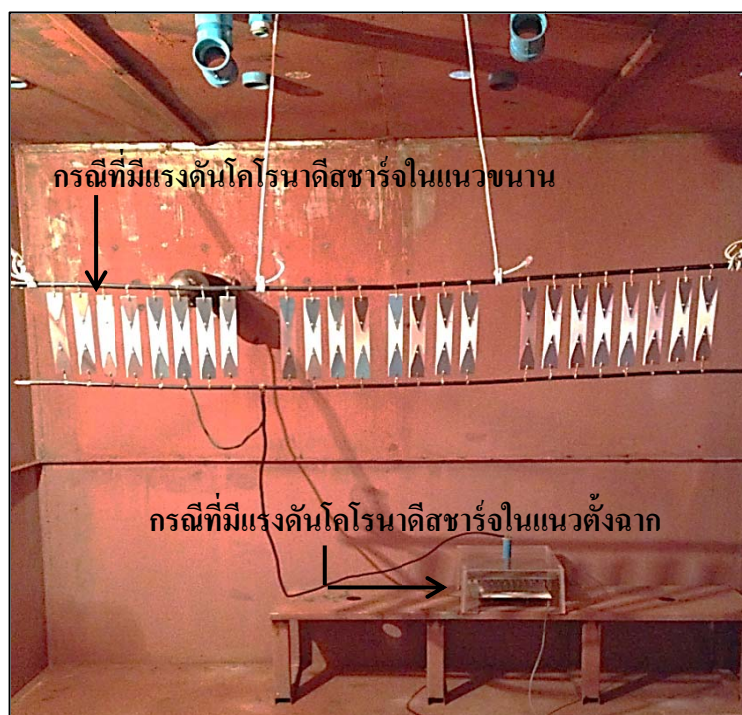


รูปที่ 4.33 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลม-ปลายแหลม



รูปที่ 4.34 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดปลายแหลม-ปลายแหลม

ได้ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอก
 สะอาดและสภาวะหมอกไอเกลือ จากรูปที่ 4.35 ด้านบนจะเป็นกรณีที่มีโคโรนาดีสชาร์จจาก
 สนามไฟฟ้าในแนวนาน และด้านล่างจะเป็นกรณีที่มีโคโรนาดีสชาร์จจากสนามไฟฟ้าใน
 แนวตั้งฉาก



รูปที่ 4.35 การติดตั้งวัสดุทดสอบ

4.6.4 เครื่องสร้างหมอก

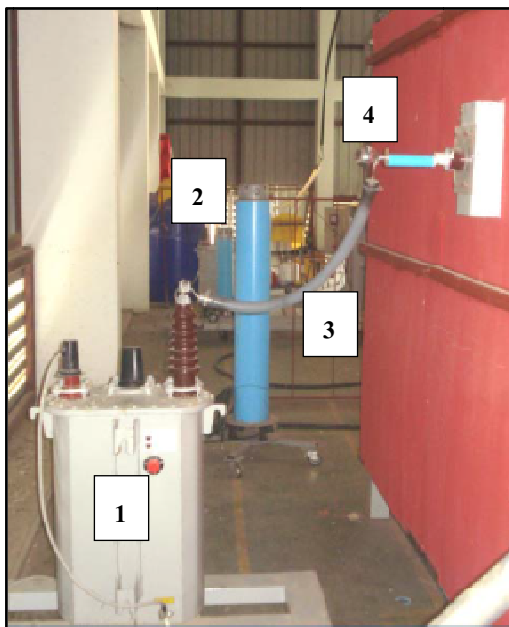
เครื่องที่ใช้ในการสร้างละอองหมอกคืออัลตราโซนิกฮิวมิไดฟายเออร์ ซึ่งมีหัวอัลตราโซนิกด้วยความถี่สูงทำให้ได้เป็นละอองหมอกที่เล็กขนาด $7\ \mu\text{m}$ ละอองที่มีขนาดเล็กมากผสมกับอากาศได้ดีทำให้ความชื้นในห้องทดสอบสูงตามมาตรฐานกำหนดไว้คือความชื้นในห้องทดสอบต้องมีค่า 95%RH ภายใน 15 นาที ส่วนน้ำที่ใช้สร้างหมอกเป็นน้ำที่ผ่านการกรองแยกไอออน (de-ionized water) ถ้าเป็นหมอกไอเกลือก็ผสมกับเกลือ (NaCl) ความเข้มข้นที่ต้องการเครื่องนี้จะตั้งไว้ด้านบนของห้องทดสอบเพื่อฉีดหมอกเข้าไปในห้องทดสอบ การติดตั้งเครื่องสร้างหมอกแสดงดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 เครื่องสร้างหมอก

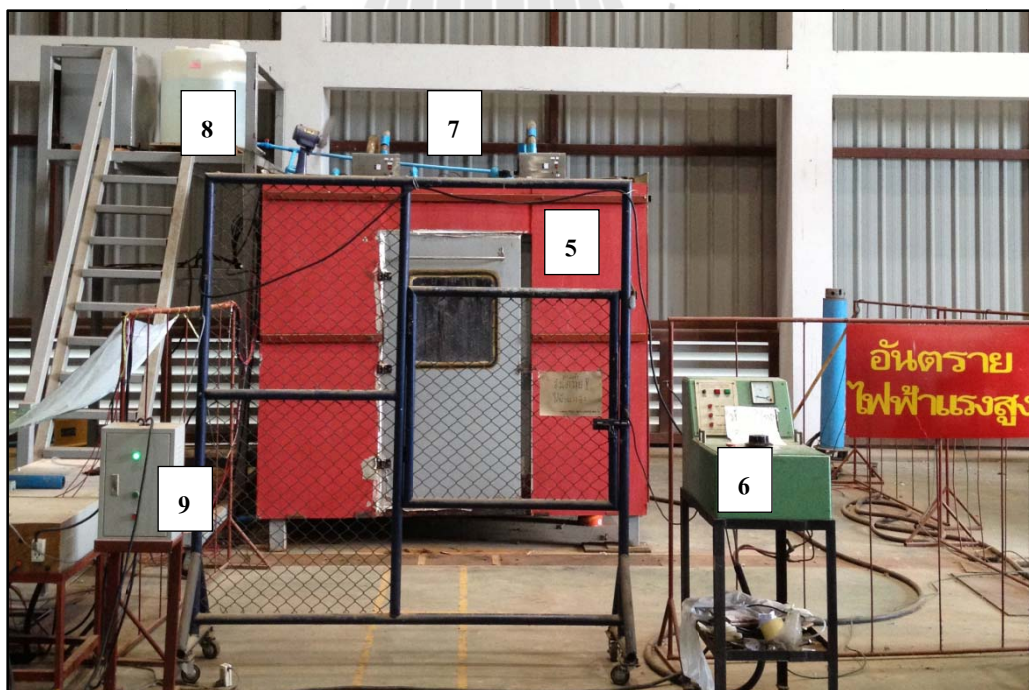
4.6.5 ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

เมื่อติดตั้งวัสดุทดสอบในห้องทดสอบแล้ว ต้องต่ออุปกรณ์เข้ากับชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ได้ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนกรณีหมอกสะเก็ดและกรณีหมอกไอเกลือในห้องทดสอบปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนขางซิลิโคนกรณีหมอกที่สร้างเสร็จ

จากรูป 4.37 และรูปที่ 4.38 มีรายละเอียดของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของซิลิโคนในสถานะหมอกสะอาดและในสถานะหมอกไอเกลือดังนี้

1. หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ 1 เฟส 22 kV, 30 kVA
2. วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุ
3. ตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_{damp})
4. อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์เชื่อมต่อกับปลอกฉนวนนำสายแรงสูงในห้องทดสอบ
5. ห้องทดสอบ
6. วาไรเอเบิลปรับแรงดันทดสอบ (variac) 220 V/ 0 – 220 V 50 Hz, 5 kV
7. เครื่องสร้างหมอก
8. ถังน้ำ
9. แผงวงจรควบคุมเวลา

4.7 มาตรฐาน IEC 62073

มาตรฐาน IEC 62073 เป็นมาตรฐานที่ใช้ออกแบบสร้างชุดวัดมุมสัมผัส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น ซึ่งเป็นหนึ่งในการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

หลักการในการออกแบบชุดวัดมุมสัมผัส ต้องคำนึงถึงการใช้งานจริง ซึ่งการวัดมุมสัมผัสนั้นจะต้องมีความแม่นยำในการส่องวัด ให้ได้มุมสัมผัสของหยดน้ำที่เห็นได้อย่างชัดเจน และต้องหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น การสั่นของพื้นที่ การระเหยของหยดน้ำจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ความเอียงของพื้นที่ทำการวัด ที่อาจจะทำให้รูปทรงของหยดน้ำเปลี่ยนไป การวัดมุมสัมผัสหยดน้ำยังต้องมีความสะดวก ง่าย และรวดเร็วในการติดตั้งใช้งาน

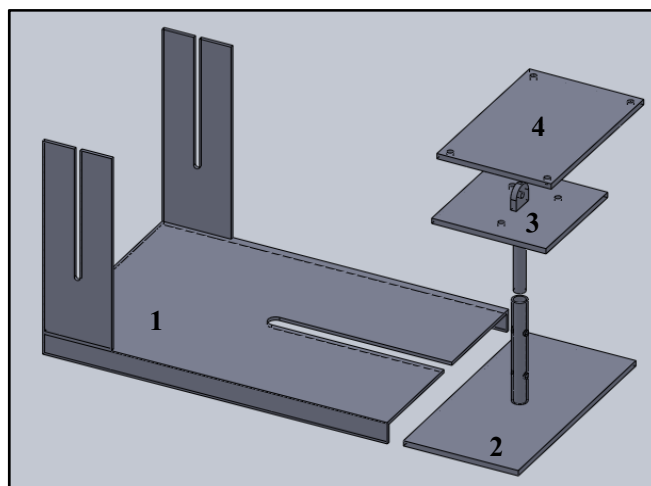
ส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการปรับวัดได้แก่

1. ฐานตั้งวัสดุทดสอบ มีไว้ยึดวัสดุทดสอบที่จะนำมาวัดมุมสัมผัส
2. ฉากหลัง เพื่อเป็นฉากรับแสงของหยดน้ำ
3. ไซริง (syringe) ใช้หยดน้ำลงบนวัสดุทดสอบ
4. ที่ฉายไฟ (light) ใช้หลอดไฟส่องไปที่หยดน้ำ เพื่อให้เห็นรูปหยดน้ำได้อย่างชัดเจน
5. กล้องบันทึกภาพ (microscopy camera) ใช้กล้องจุลทรรศน์บันทึกภาพมุมสัมผัสของหยดน้ำ และนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป

4.8 ชุดวัดมุมสัมผัส

4.8.1 ฐานตั้งวัสดุทดสอบ

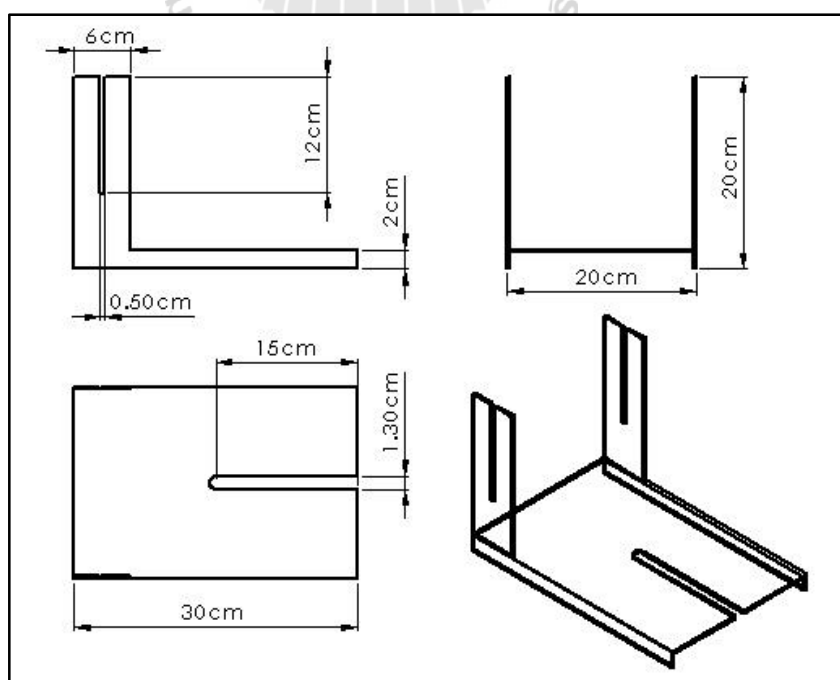
ฐานตั้งวัสดุทดสอบ จะใช้เหล็กหนา 3 mm ฐานตั้งวัสดุทดสอบจะต้องมีความมั่นคง ไม่ล้มหรือสั่นคลอนได้ง่าย สามารถปรับระดับได้รอบทิศทาง ซึ่งส่วนประกอบของฐานตั้งวัสดุทดสอบจะมีทั้งหมด 4 ส่วนลักษณะส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 4.39



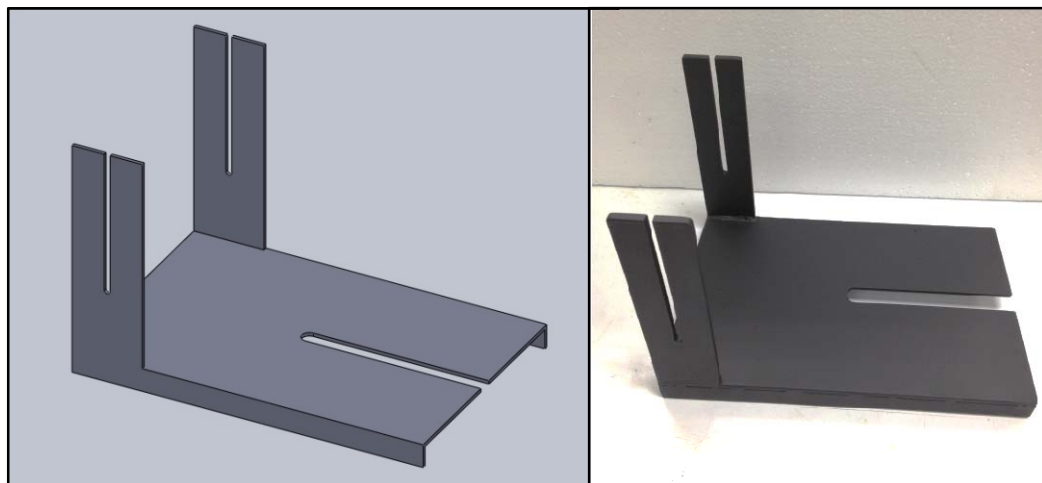
รูปที่ 4.39 ส่วนประกอบของของฐานตั้งวัสดุทดสอบ

ส่วนที่ 1 :

ออกแบบให้เป็นฐานสำหรับใส่ฉากหลังและสามารถปรับเลื่อนฐานใกล้หรือไกลจากกล้องที่จับภาพได้ แสดงขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41



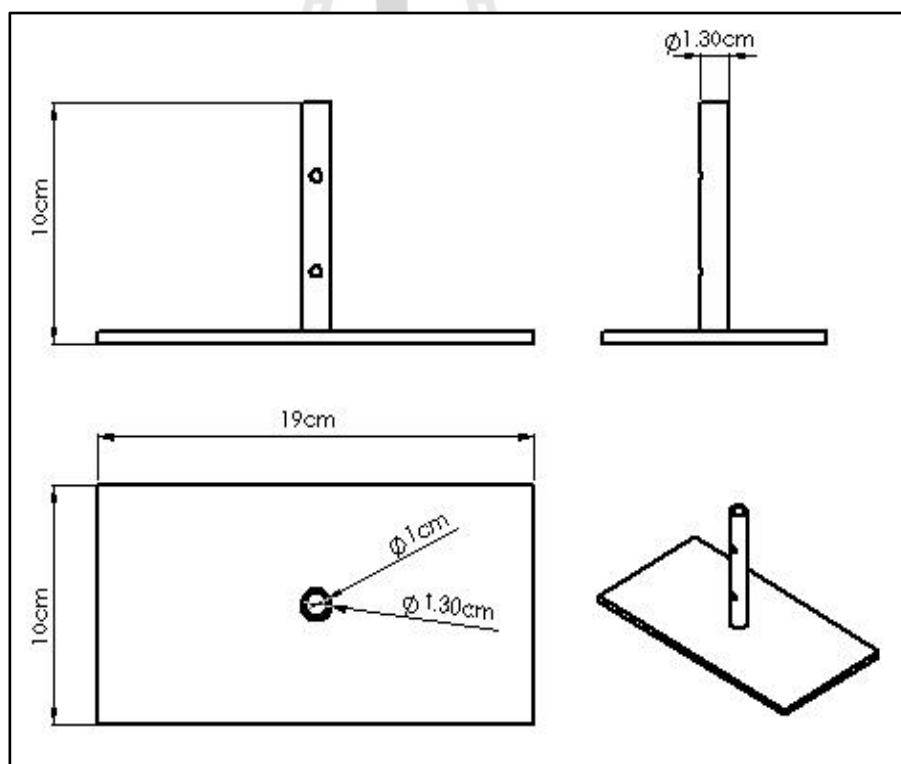
รูปที่ 4.40ขนาดของฐานส่วนที่ 1



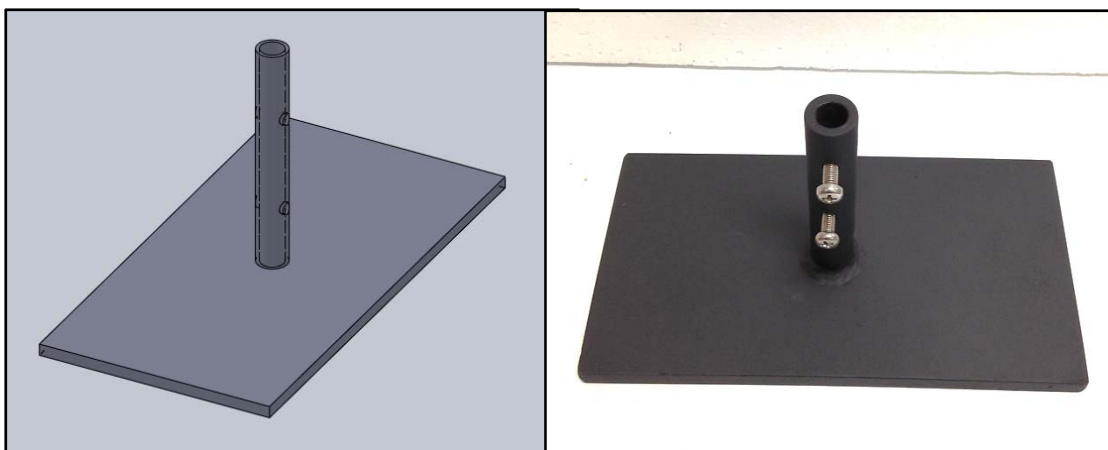
รูปที่ 4.41ฐานส่วนที่ 1

ส่วนที่ 2 :

ออกแบบให้เป็นฐานล็อกเพื่อให้ปรับส่วนที่ 3 และส่วนที่ 4 ให้สามารถเลื่อนขึ้นบนหรือเลื่อนลงข้างล่างได้ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43



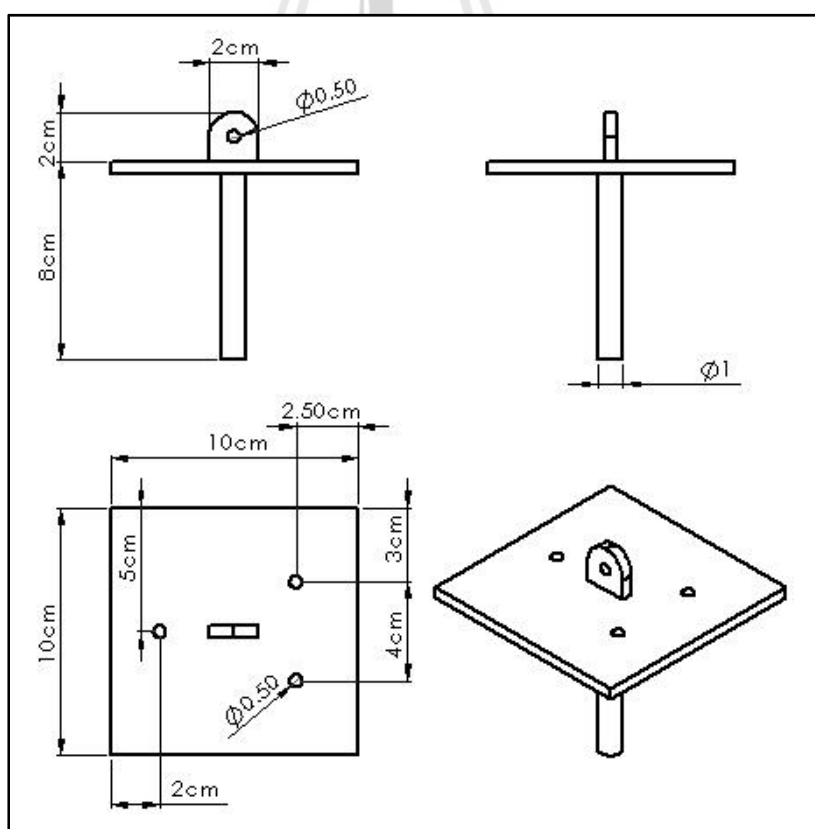
รูปที่ 4.42ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 2



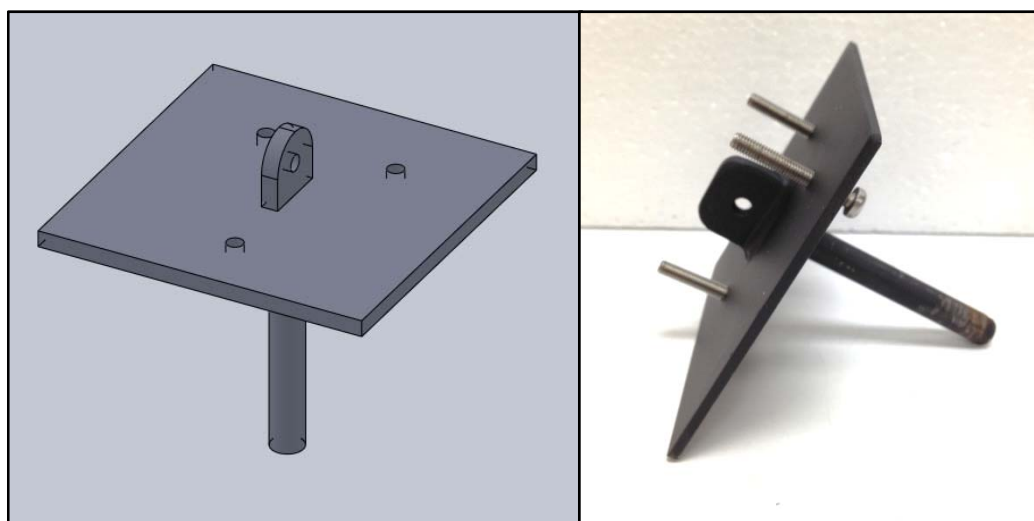
รูปที่ 4.43ฐานส่วนที่ 2

ส่วนที่ 3 :

ออกแบบให้เป็นฐานติดกับส่วนที่ 4 สามารถปรับทิศทางได้อิสระ โดยมีรูเจาะให้ข้อ 3 ตัวยื่นขึ้นมาด้านบนเพื่อเป็นตัวค้ำระนาบที่ใช้วางวัสดุทดสอบอีกทีขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45



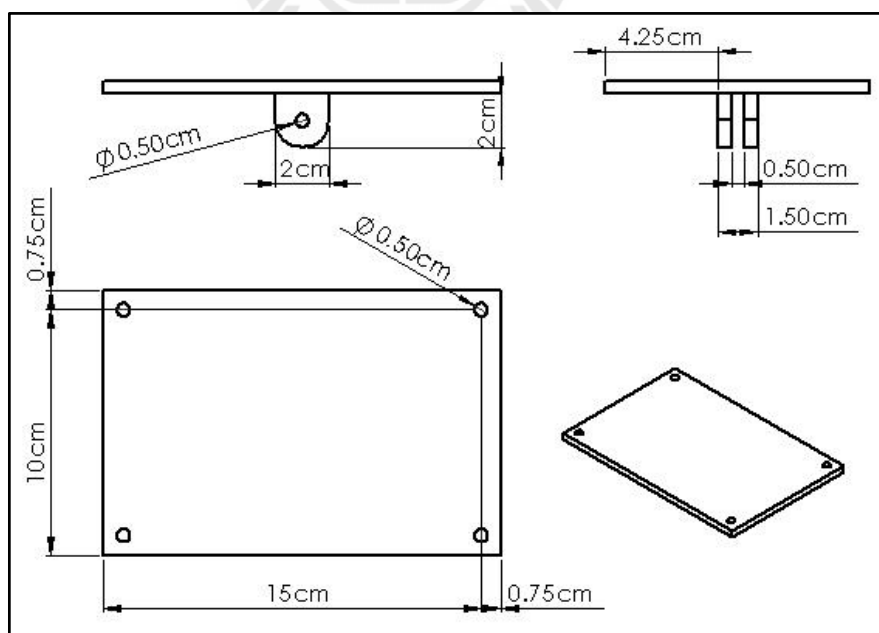
รูปที่ 4.44ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 3



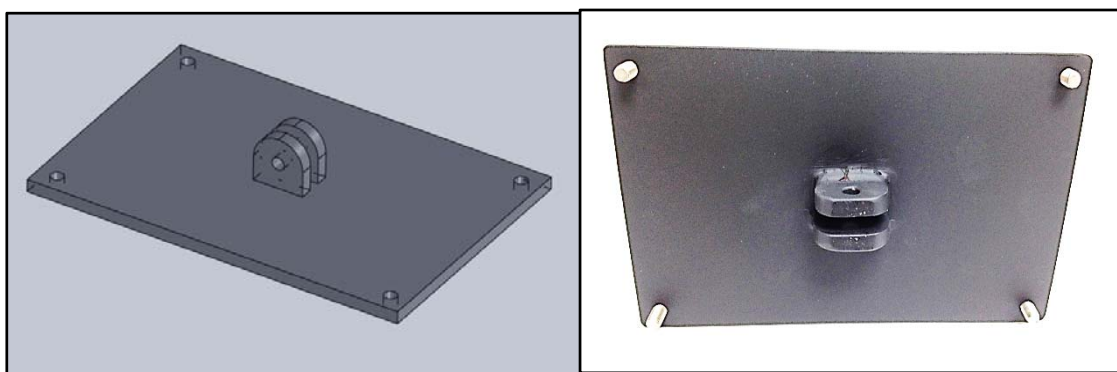
รูปที่ 4.45ฐานส่วนที่ 3

ส่วนที่ 4 :

ออกแบบให้สามารถปรับเลื่อนซ้ายหรือเลื่อนขวาได้โดยมีจุดล็อกตรงกลางชิ้นงาน ด้านล่างเมื่อทำการปรับระดับเรียบร้อยและออกแบบให้มีรูเจาะทั้ง 4 ด้าน ให้แผ่นอะคริลิกสองชิ้นที่มีขนาดกว้าง 2cm ยาว 10cm วางชิดด้านซ้ายและด้านขวา เจาะรูที่ตำแหน่งเดียวกันกับส่วนที่ 4 เพื่อให้เป็นที่ยึดวัสดุทดสอบให้อยู่นิ่งและเป็นระนาบอีกด้วยขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.46 และรูปที่ 4.47

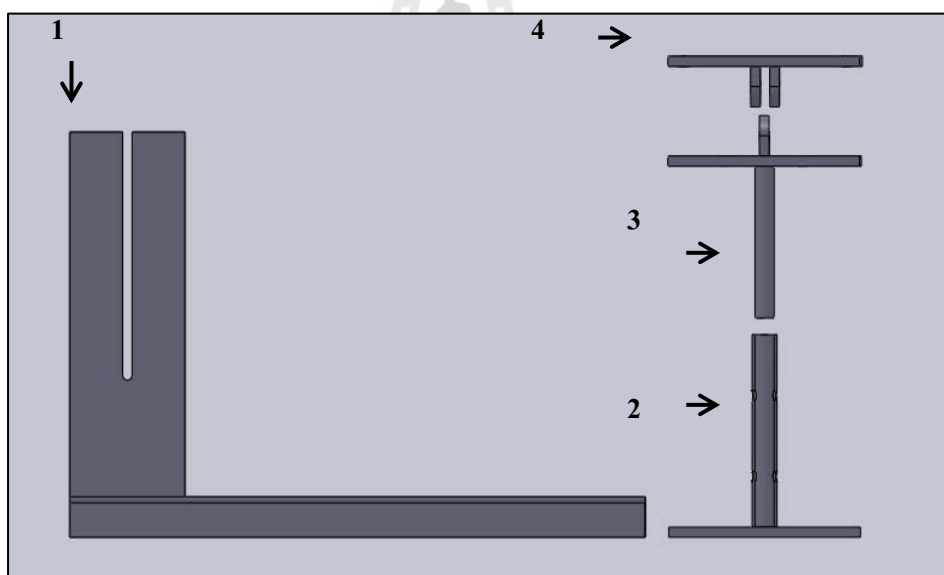


รูปที่ 4.46ขนาดและลักษณะของฐานส่วนที่ 4



รูปที่ 4.47ฐานส่วนที่ 4

เมื่อออกแบบและสร้างส่วนประกอบของฐานตั้งวัสดุทดสอบทั้ง 4 ชิ้นแล้ว จึงนำส่วนประกอบทั้งหมดประกอบเข้าด้วยกัน โดยการปรับฐานตั้งวัสดุทดสอบให้ได้ระนาบนั้น แล้วใช้ระดับน้ำแบบกลม(bulls-eye level) มาเป็นตัววัดระดับ ลักษณะการประกอบฐานที่ตั้งวัสดุแสดงดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48ลักษณะการประกอบฐานตั้งวัสดุทดสอบในแต่ละส่วน

เมื่อเสร็จสิ้นได้ฐานวางวัสดุทดสอบของชุดวัดมุมสัมผัส ซึ่งสามารถปรับระดับได้ทุกทิศทาง ดังแสดงในดังรูปที่ 4.49



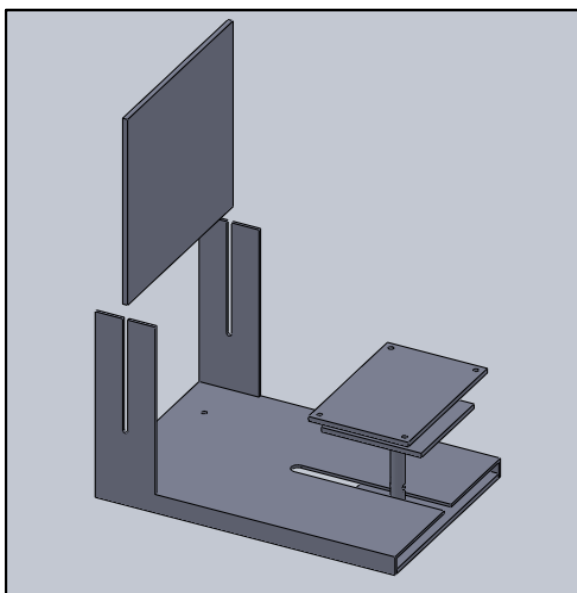
รูปที่ 4.49 ลักษณะฐานตั้งวัสดุทดสอบ

4.8.2 ฉากหลัง

ฉากหลังเป็นฉากรับแสง ปรับรูปของหยดน้ำให้มีความชัดมากขึ้น โดยที่ฉากหลังทำจากแผ่นอะคริลิกความหนา 4mm ความกว้าง 20cm และความยาว 20cm นำไปใส่ลงในช่องของฐานวางวัสดุทดสอบตรงส่วนที่ 1 ลักษณะของฉากหลังและการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.50 และรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.50 ลักษณะฉากหลัง



รูปที่ 4.51 ลักษณะการติดตั้งฉากหลังเข้ากับฐานวางวัสดุทดสอบ

4.8.3 ไชริงและฐานจับไชริง

ไชริงที่ใช้มีขนาด 1ml และต้องมีฐานจับไชริงเพื่อใช้ในระหว่างที่หยดน้ำลงบนผิววัสดุทดสอบ ไชริงและฐานจับไชริง แสดงดังรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.52 ไชริง



รูปที่ 4.53 ฐานจับไชริง

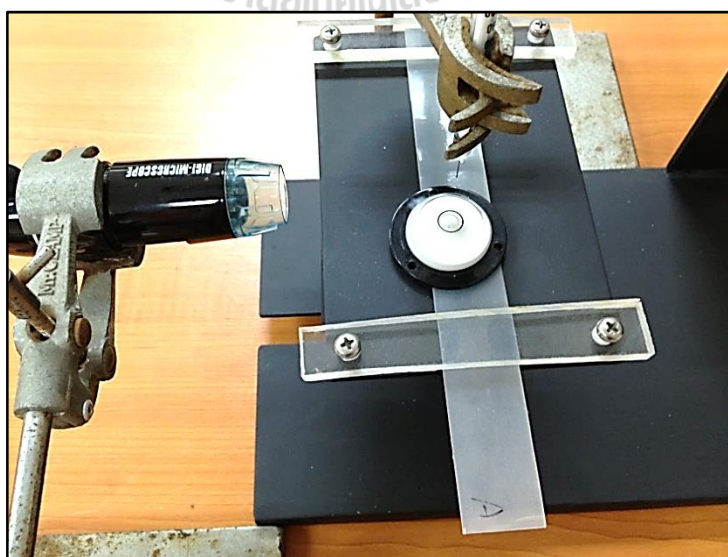
4.8.4 กล้องบันทึกภาพ

กล้องบันทึกภาพแบบ microscope ของ OEM DigiMicroscope มีกำลังขยาย 5-500 เท่าให้ความละเอียด 2.0 M pixels มีไฟฉายมาจากด้านหลังกล้องในตัว และใช้ฐานจับกล้องแบบเดียวกับฐานจับไซริง เพื่อให้สามารถปรับระดับกล้องได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ลักษณะกล้องบันทึกภาพและการติดตั้งกล้องบันทึกภาพ

เมื่อประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันได้ชุดวัดมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ ที่ประกอบไปด้วย ฐานวางวัสดุทดสอบ ฉากหลัง ไซริง ฐานจับไซริง และกล้องบันทึกภาพ ฐานจับกล้องบันทึกภาพ และปรับระดับของระนาบที่วางวัสดุทดสอบด้วยที่วัดระดับแบบกลม (bull-eye level) ดังรูปที่ 4.55 เมื่อติดตั้งและปรับระดับอุปกรณ์ทั้งหมดแล้ว ได้อุปกรณ์วัดมุมสัมพัทธ์หยดน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.55 ลักษณะการประกอบฐานชุดวัดมุมสัมพัทธ์ในแต่ละส่วน



รูปที่ 4.56 ลักษณะการประกอบฐานชุดวัดมุมสัมผัสในแต่ละส่วน

4.9 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ประกอบไปด้วยรายละเอียดในการออกแบบและสร้างสร้างชุดทดสอบ การเร่งการเสื่อมอายุของซิลิโคนและชุดทดสอบวัดมุมสัมผัส โดยมีรายละเอียดการออกแบบ และสร้างชุดเร่งการเสื่อมอายุ 2 ชุดการทดสอบ และสร้างชุดวัดมุมสัมผัสอีก 1 การทดสอบ

หลังจากสร้างชุดเร่งการเสื่อมอายุของซิลิโคนทั้งหมดเสร็จแล้ว จึงมีการเตรียมวัสดุทดสอบ และอุปกรณ์ในการสร้างสภาวะทดสอบ อ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ.61109-1992 clause 5.3 และ วิธีการทดสอบในสภาวะไรัหมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะหมอกไอเกลือดังรายละเอียดใน บทต่อไป

บทที่ 5

การทดสอบการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

5.1 กล่าวนำ

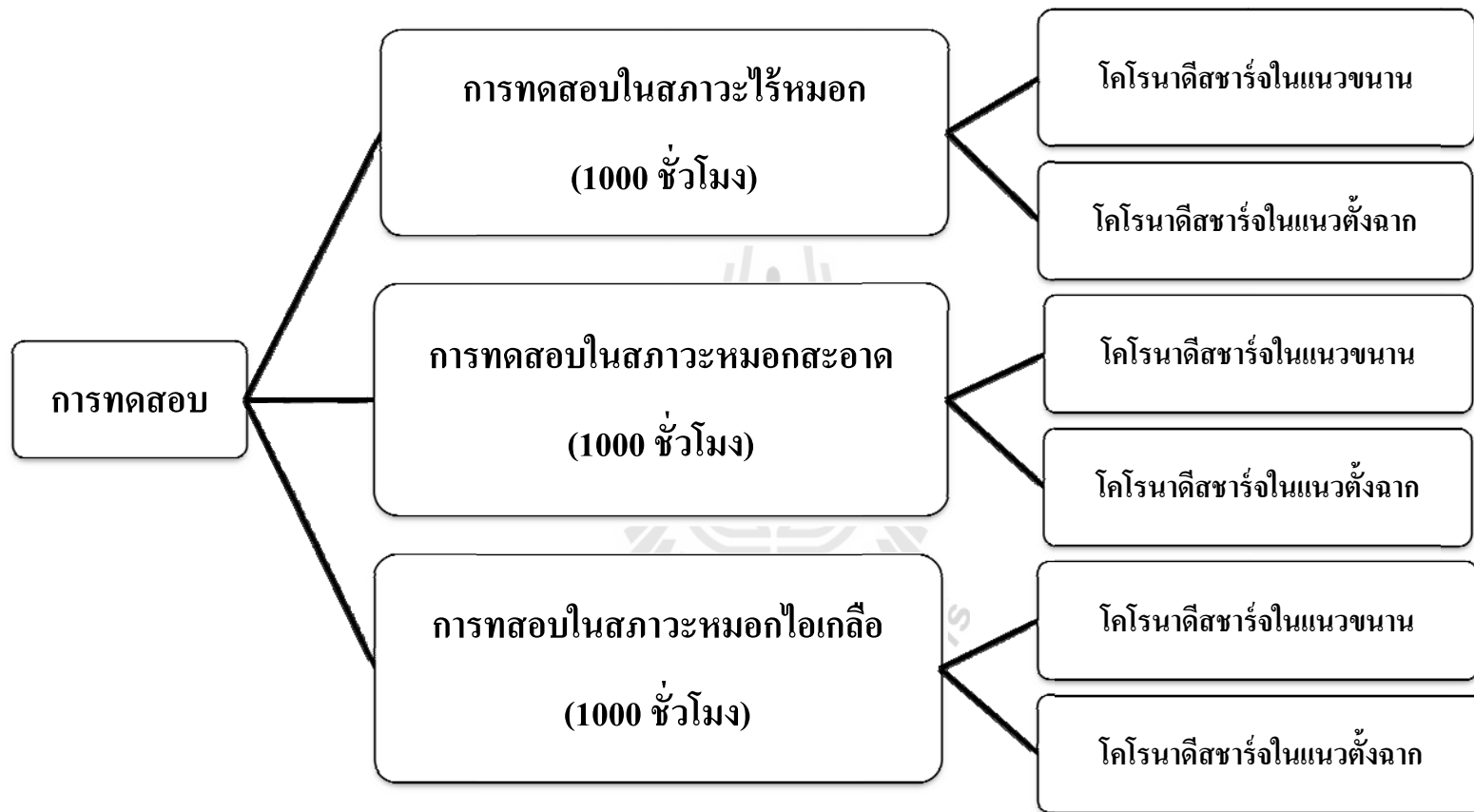
การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเสื่อมอายุของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน 8 ชนิด ที่มีสารเติมเต็มและสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน การทดสอบจะประยุกต์จากมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3 แต่ใช้ระดับแรงดันที่ทำให้เกิดแรงดันโคโรนา เพื่อศึกษาผลของโคโรนาที่มีต่อแผ่นฉนวนยางซิลิโคนภายใต้ 3 สภาวะ คือ สภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะหมอกไอเกลือ โดยมีรายละเอียดของการทดสอบ และการเตรียมวัสดุสำหรับการทดสอบไว้ดังนี้

5.2 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในงานวิจัยนี้ ศึกษาด้วยวัสดุทดสอบที่มีสารเติมแต่งต่าง ๆ กัน 8 ชนิด โดยทำการศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆ จึงแบ่งเป็น 3 กรณีใหญ่ ๆ คือ

1. ในสภาวะไร้หมอก 1000 ชั่วโมง จึงแบ่งการทดสอบ 2 แบบ คือ
 - 1.1 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก
 - 1.2 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน
2. ในสภาวะหมอกสะอาด 1000 ชั่วโมง จึงแบ่งการทดสอบ 2 แบบ คือ
 - 2.1 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก
 - 2.2 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน
3. ในสภาวะหมอกไอเกลือ 1000 ชั่วโมง จึงแบ่งการทดสอบ 2 แบบ คือ
 - 3.1 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก
 - 3.2 ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ใช้ระยะเวลา 1000 ชั่วโมงต่อสภาวะการทดสอบดังแผนผังแสดงในดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

5.3 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3 เป็นการจำลองสภาพความเครียดที่จำลองในบริเวณชายฝั่งทะเล โดยทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ในระหว่างการทดสอบวัสดุทดสอบถูกติดตั้งไว้ในห้องทดสอบ จากนั้นจึงป้อนแรงดันไฟฟ้าตลอดการทดสอบ และการฉีดหมอกไอเกลือเข้าไปในห้องทดสอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง เพื่อจำลองสภาพหมอกไอเกลือ จากนั้นก็หยุดฉีดหมอกไอเกลือเป็นเวลา 16 ชั่วโมงและกลับมาฉีดหมอกอีกครั้งหนึ่ง ทำการทดสอบแบบนี้จนครบ 1000 ชั่วโมง เงื่อนไขในการทดสอบมีข้อกำหนดและรายละเอียดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยหมอกไอเกลือตามมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3

ข้อกำหนด	มาตรฐานกำหนด	สิ่งที่ใช้ในงานวิจัย
ขนาดห้องทดสอบสูงสุด (m^3)	10	O
ระยะห่างตามผิวของลูกถ้วยฉนวน (mm/kV)	20	X
แรงดันทดสอบ (kV)	14-20	X
อัตราการไหลของน้ำ (l/m^3h)	0.4 ± 0.1	O
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (kg/m^3)	10	O
ขนาดของละอองหมอก (μm)	5-10	O
อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	20 ± 5	X
ระยะเวลาในการทดสอบ (hr.)	1000	O

หมายเหตุ : O คือนำมาใช้ในการทดสอบ และ X คือไม่นำมาใช้ในการทดสอบ

5.4 การเตรียมวัสดุทดสอบ

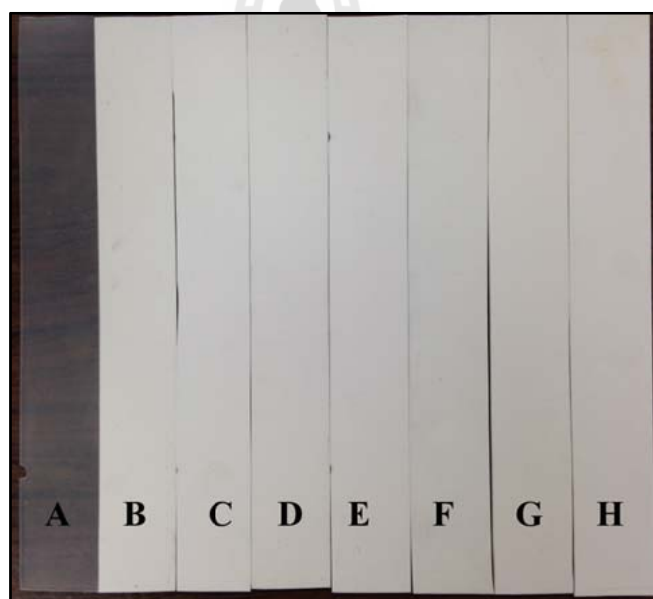
5.4.1 ชนิดของแผ่นฉนวนยางซิลิโคน

แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในงานวิจัยคือแผ่นฉนวนยางซิลิโคน 8 ชนิด แต่ละชนิดมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ มีการทรีตเมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา และใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการฉนวน โดยเติม อลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ ($ATH: Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยมีอัตราส่วนแสดงในตารางที่ 5.2 และ ลักษณะแผ่นยางซิลิโคนที่เป็นวัสดุทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในภาวะต่าง ๆ จะทำการทดสอบกับยางซิลิโคนทั้งหมด

ตารางที่ 5.2 ชนิดของแผ่นยางซิลิโคน

ชนิดของยางซิลิโคน	ATH by weight (Alumina tri-hydrate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	Treatment with Silica fume
A	1.0 : 0.0	X
B	1.0 : 0.5	X
C	1.0 : 1.0	X
D	1.0 : 1.5	X
E	1.0 : 0.0	✓
F	1.0 : 0.5	✓
G	1.0 : 1.0	✓
H	1.0 : 1.5	✓

หมายเหตุ: เครื่องหมาย X คือไม่ได้ทรีสต์เมนต์ด้วยผงฝุ่นซิลิกาและเครื่องหมาย ✓ ได้รับความทรีสต์เมนต์

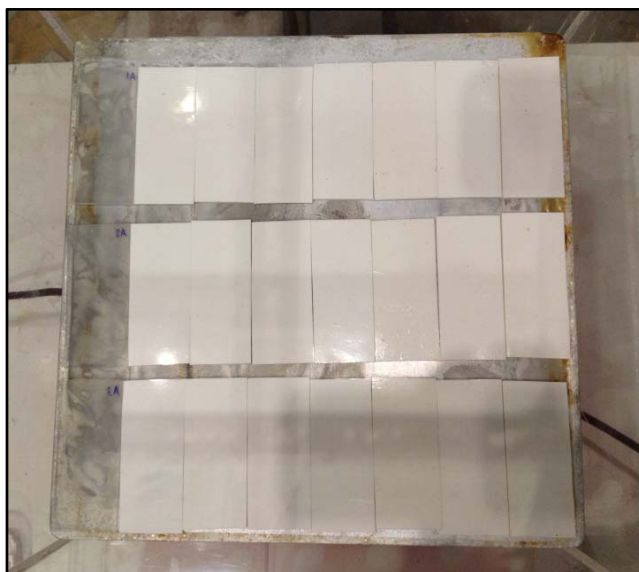


รูปที่ 5.2 ลักษณะแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด

ในการทดสอบทั้ง 3 สภาวะ(สภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะหมอก-ไอเกลือ) กรณีทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากและโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานกับผิวฉนวนอีกด้วย ด้วยเหตุนี้แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบจึงต้องแบ่งเป็น 2 ลักษณะ

5.4.2 แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก

การทดสอบผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากนั้น ใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม และอิเล็กโทรดระนาบเป็นตัวสร้างโคโรนาดีสชาร์จ แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้มีความหนา 2 mm ความกว้าง 3cm และความยาว 7cm โดยวางวัสดุทดสอบ 3 ชิ้น ลงบนอิเล็กโทรดระนาบแล้วทดสอบในห้องทดสอบที่ต่างกัน แต่จัดวางอิเล็กโทรดและวัสดุทดสอบในลักษณะเดียวกัน ทั้งสภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และ สภาวะหมอกไอเกลือ โดยลักษณะการวางวัสดุทดสอบแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



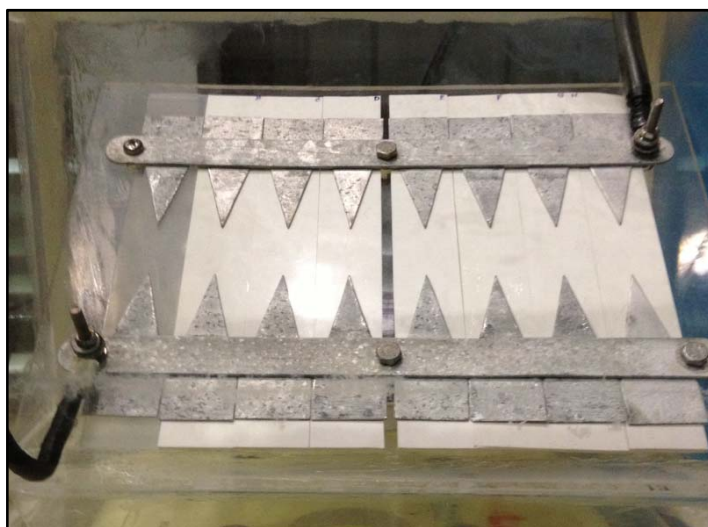
รูปที่ 5.3 ลักษณะการวางแผ่นฉนวนยางซิลิโคนบนอิเล็กโทรดระนาบในกรณีไร้หมอก



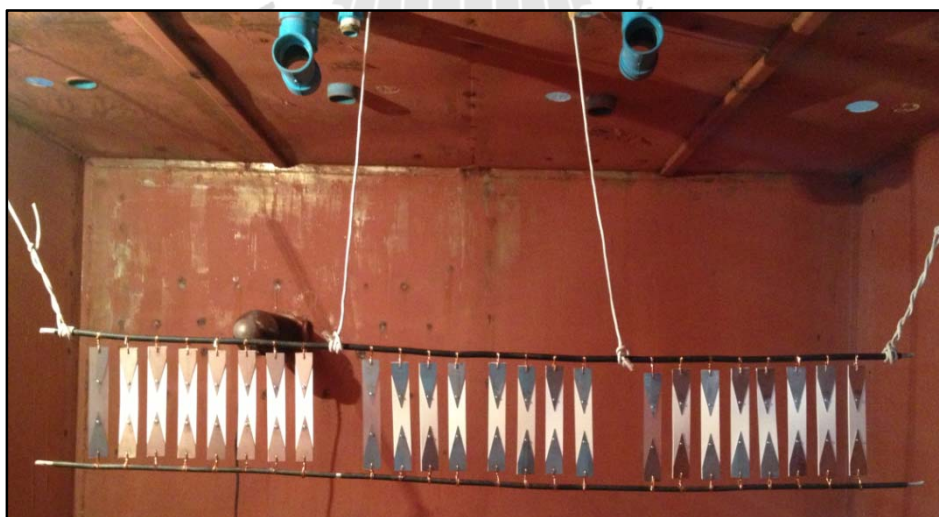
รูปที่ 5.4 ลักษณะการวางแผ่นฉนวนยางซิลิโคนบนอิเล็กโทรดระนาบในกรณีหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ

5.4.3 แผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน

ในผลของโคโรนาในแนวนานนั้นใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมปลายแหลมสร้างโคโรนา-ดีสชาร์จ โดยแผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้มีความหนา 2mm ความกว้าง 3cm และความยาว 19cm ในกรณีไร้หมอก ทดสอบในตู้ทดสอบปิด โดยวางวัสดุทดสอบและอิเล็กโทรดปลายแหลมยึดกันไว้กับฐานวางวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 5.5 แต่เมื่อทดสอบในสภาวะหมอกสะอาดและสภาวะหมอกไอเกลือเกิดดีสชาร์จไปบนบริเวณอะคริลิก ทำให้ยางซิลิโคนเสียสภาพจากการไหม้ของอะคริลิก จึงหันไปทำการทดสอบในห้องปิดที่ขนาด 9.6m^3 (วรวิทย์พັນโช, 2555) ลักษณะการวางวัสดุทดสอบแสดงในรูปที่ 5.6



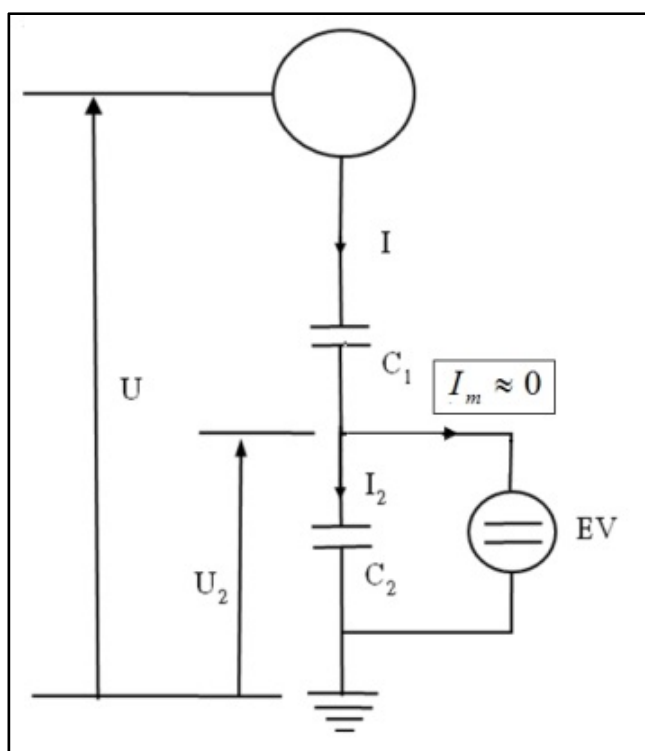
รูปที่ 5.5 ลักษณะการยึดแผ่นฉนวนยางซิลิโคนกับอิเล็กโทรดปลายแหลมในกรณีไร้หมอก



รูปที่ 5.6 ลักษณะการยึดแผ่นฉนวนยางซิลิโคนกับอิเล็กโทรดปลายแหลมในกรณีหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ

5.5 การวัดแรงดันโคโรนาดีสชาร์จ

ก่อนการหาแรงดันที่ใช้ในการทดสอบนั้น ต้องปรับเทียบหม้อแปลงทดสอบเสียก่อน เพื่อความถูกต้อง การป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใช้ว่าไร้อีกเป็นอุปกรณ์ปรับและป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทดสอบทางด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงต่ำ ส่วนด้านทุติยภูมิหรือด้านแรงสูงจ่ายให้วัสดุทดสอบ โดยด้านแรงสูงที่ถูกจ่ายออกไปสามารถวัดได้ด้วยชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุ(สำรวย สังข์สะอาด. 2547)

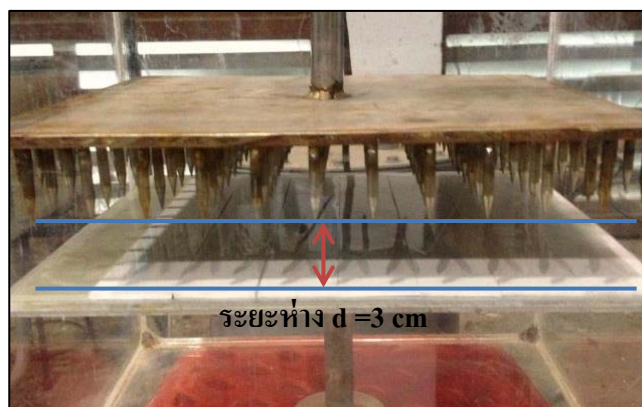
จากวงจรในรูปที่ 5.7 C_1 เป็นตัวเก็บประจุด้านแรงสูง และ C_2 เป็นตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ โดยหลักการแล้วกระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องวัด I_m นั้น ต้องมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ หรือ $I_m \approx 0$ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำมีค่าเท่ากัน การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำ สามารถทำได้จากสมการดังนี้

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

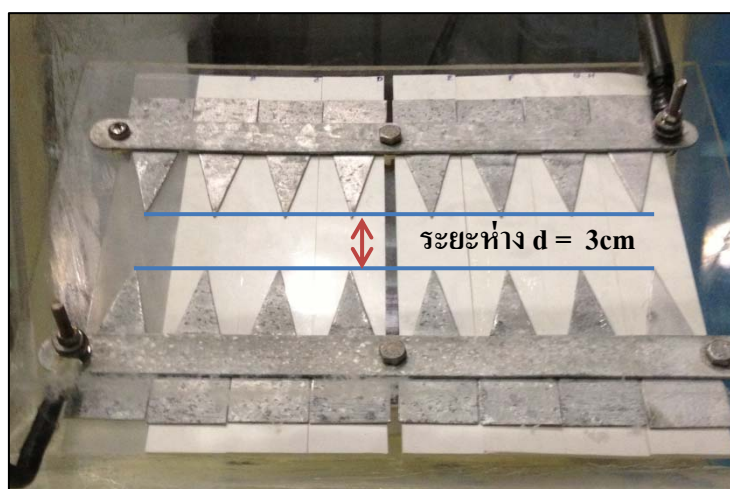
โดย	C_1	คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง มีขนาด 210 pF
	C_2	คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 110 nF
	U	คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)
	U_2	คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

จากสมการที่ 5.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (U) ถูกแบ่งให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (U_2) ดังนั้น การกำหนดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับวัสดุทดสอบ สามารถกำหนดได้จากการปรับค่าที่แรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำตามที่ทำการคำนวณโดยวิธีการแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุได้ จากนั้นนำมาปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีความเที่ยงตรงขึ้น

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะหมอกโอเอกลีโอ ต้องหาแรงดันเหมาะสมที่ทำให้โคโรนาดีสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบอิเล็กโทรดปลายแหลม เกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ (สำหรับสังข์สะอาด, 2547) ก่อนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ โดยผู้วิจัยหาแรงดันโคโรนาด้วยการกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดแล้วปรับค่าแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ (โดยสังเกตจากแสงสีม่วงที่เริ่มเกิดขึ้น และเสียงฮิสซิ่งที่เกิดขึ้น) เพราะสามารถทำได้ง่ายกว่าโดยกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หรือค่า d ที่ต้องการจากแนวคิดของ Y. Zhu (2006) ที่เลือกใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมและอิเล็กโทรดระนาบ มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2cm และใช้แรงดันเริ่มต้นการทดสอบตั้งแต่ 8 kV ถึง 11 kV แต่ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้แรงดันเท่า ๆ กัน ในทุกกรณีการทดสอบ และเนื่องจากในการทดสอบกรณีโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งจากการปรับอิเล็กโทรดปลายแหลมระนาบที่ได้ออกแบบไว้ปรับได้ยาก ดังนั้นจึงเลือกให้ระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นระยะ 3cm แทนดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 ระยะห่างของอิเล็กโทรดในผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก



รูปที่ 5.9 ระยะห่างของอิเล็กโทรดในผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน

หาแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากเริ่มจากเพิ่มแรงดันขึ้นจนสังเกตเห็นแสงสีม่วงน้ำเงินเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดปลายแหลมและอิเล็กโทรดระนาบ บันทึกค่าแรงดันไว้แล้วเพิ่มแรงดันจนเกิดเบรกดาวน์ ทำแบบนี้ 10 ครั้งการหาแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนก็ใช้วิธีเดียวกันเนื่องจากแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จนั้นต่างกันไม่มากดังแสดงในตารางที่ 5.3 จึงเลือกใช้แรงดันค่า 10.5 kV โดยประมาณและจ่ายแรงดันค่านี้ตลอด 1000 ชั่วโมง ในทุก ๆ กรณี

ตารางที่ 5.3 ค่าแรงดันโคโรนาที่ใช้ในการทดสอบ

ครั้งที่	ค่าแรงดันโคโรนา ดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก(kV)	ค่าแรงดันโคโรนา ดีสชาร์จในแนวนอน(kV)
1	10.3	10.2
2	10.3	10.2
3	10.5	10.1
4	10.5	10.1
5	10.2	10.2
6	10.2	10.3
7	10.3	10.3
8	10.5	10.2
9	10.5	10.2
10	10.3	10.3
ค่าเฉลี่ย	10.36	10.21

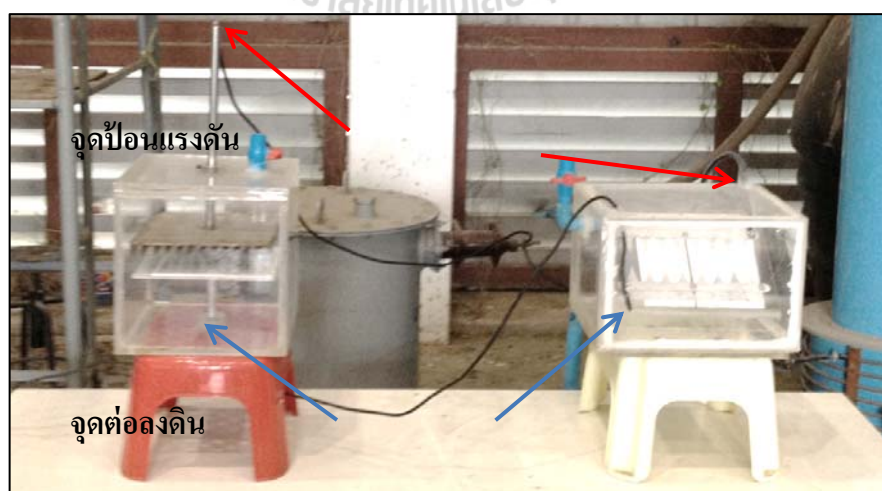
5.6 วิธีดำเนินการทดสอบ

5.6.1 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะไร้หมอก

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะไร้หมอกในการวิจัยนี้ ทำการทดสอบพร้อมกันทั้งกรณีโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก และกรณีโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน ทำการประยุกต์มาจากมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3 โดยทดสอบแรงดัน 10.5 kV ตลอด 1000 ชั่วโมง แต่ไม่มีการจ่ายหมอก โดยที่แบ่งตู้ทดสอบเป็น 2 ชุดกรณีของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากทดสอบในตู้ขนาด 0.27 m³ ซึ่งสามารถใส่วัสดุทดสอบได้ 8 ชนิด ชนิดละ 3 ชิ้น จึงทดสอบเพียงรอบเดียว และผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากติดตั้งในตู้ขนาด 0.225 m³ สามารถใส่วัสดุทดสอบได้ 8 ชนิด ชนิดละ 1 ชิ้น ดังนั้นต้องเปลี่ยนวัสดุทดสอบเข้าไปใหม่หลังจากครบ 1000 ชั่วโมง ทำเช่นนี้ 3 รอบการทดสอบ โดยทั้งสองตู้ได้รับจ่ายแรงดันจากหม้อแปลงตัวเดียวกัน ลักษณะการติดตั้งชุดทดสอบไว้ดังรูปที่ 5.10 สถานะที่ใช้ทดสอบจริงแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสถานะไร้หมอก

ขนาดตู้ทดสอบ	ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากขนาด 0.27 m ³
	ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานขนาด 0.23 m ³
แรงดันทดสอบ	AC 10.5 kV (ป้อนตลอดการทดสอบ)
ความคงทนแรงดัน (Voltage Stress)	ใช้ตามข้อกำหนดของระยะห่างตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ที่ 20 mm/kV
อุณหภูมิ	อุณหภูมิของห้องทดสอบ
ระยะเวลาการทดสอบ	1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.10 ลักษณะการติดตั้งและการจ่ายแรงดันให้วัสดุทดสอบภายในห้องทดสอบ

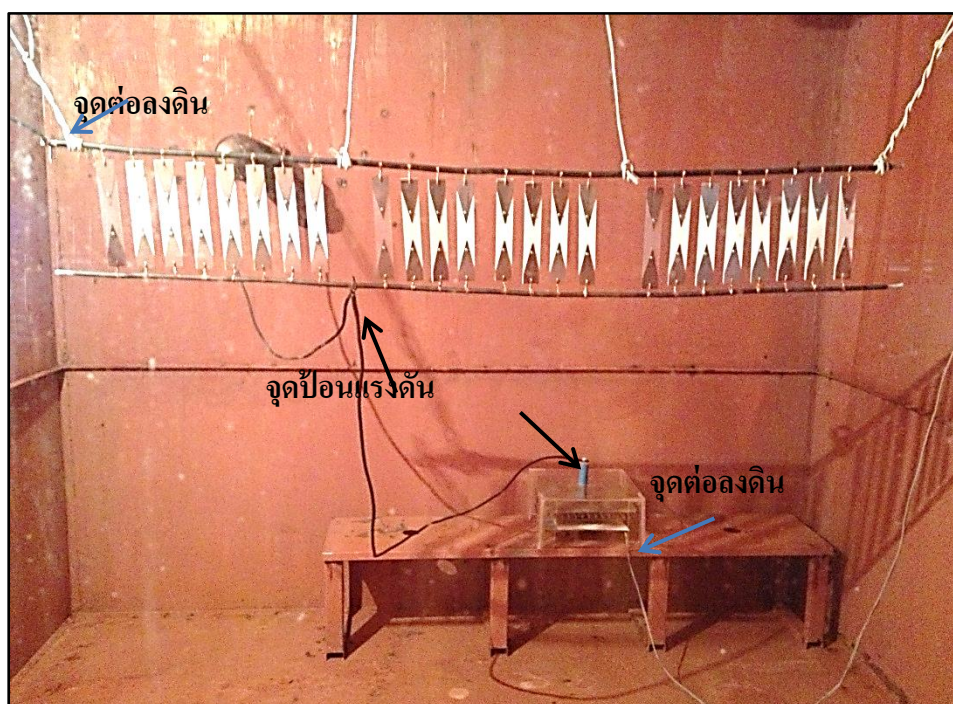
5.6.2 การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสถานะหมอกสะอาดและในสถานะหมอกไอเกลือ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุสภาวะหมอกสะอาดและสภาวะหมอกไอเกลือในงานวิจัยนี้ประยุกต์มาจากมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3 ที่เป็นการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โดยในงานวิจัยนี้ได้จำลองสภาวะหมอกสะอาดให้เป็นสภาวะในบริเวณทั่วไปในช่วงที่มีหมอกหนา และสภาวะหมอกไอเกลือได้จำลองให้เป็นบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่มีมลภาวะสูง โดยนำวัสดุทดสอบทั้ง 8 ชนิด ไปติดตั้งภายในห้องทดสอบซึ่งสามารถทำการทดสอบผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก และผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนภายในห้องเดียวกัน ทั้งสองการทดสอบถูกออกแบบให้สามารถใส่วัสดุทดสอบอย่างละ 8 ชนิด ชนิดละ 3 ชิ้นเท่า ๆ กัน ลักษณะการติดตั้งและการจ่ายแรงดันแสดงในรูปที่ 5.10

การทดสอบเริ่มต้นด้วยสภาวะหมอกสะอาดก่อนเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง เพื่อความสะดวกในการทำความสะอาดเครื่องสร้างหมอก เมื่อครบระยะเวลา 1000 ชั่วโมงแล้ว จึงเปลี่ยนวัสดุทดสอบชุดใหม่เข้าไป ติดตั้งเช่นเดิม และจ่ายแรงดันเดิม ที่สภาวะหมอกไอเกลือป้อนน้ำเกลือให้เครื่องสร้างหมอก ทดสอบในสภาวะหมอกไอเกลืออีก 1000 ชั่วโมงสภาวะที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การทดสอบเร่งเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาดและในสภาวะหมอกไอเกลือ

ห้องทดสอบ	9.6 m ³
แรงดันทดสอบ	AC 10.5 kV(ป้อนตลอดการทดสอบ)
ความคงทนแรงดัน(Voltage Stress)	ใช้ตามข้อจำกัดของระยะห่างตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่ 20 mm/kV
การสร้างหมอก	สภาวะหมอกสะอาด : -ใช้อัลตราโซนิกฮิวมิดิไฟเออร์ ขนาดหมอกอยู่ที่ 7 μm -มีอัตราการไหลของน้ำ 0.5l/ hr /m ³
	สภาวะหมอกไอเกลือ : -ใช้อัลตราโซนิกฮิวมิดิไฟเออร์ ขนาดหมอกอยู่ที่ 7 μm -มีอัตราการไหลของน้ำเกลือ 0.5l/ hr /m ³ - มีความเข้มข้นน้ำเกลือ 10 kg/m ³
รอบการทดสอบ (1000 ชั่วโมง)	จ่ายหมอก 8 ชั่วโมง หยุดจ่ายหมอก 16 ชั่วโมง (ใน 1 วัน)
อุณหภูมิ	อุณหภูมิของห้องทดสอบ
ระยะเวลาการทดสอบ	1000 ชั่วโมง



รูปที่ 5.11 ลักษณะการติดตั้งและการจ่ายแรงดันให้วัสดุทดสอบภายในห้องทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบ 1000 ชั่วโมง ทุก ๆ 24 ชั่วโมงจ่ายหมอกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และหยุดจ่ายหมอกเป็นเวลา 16 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกฮิวมิดิไฟเออร์สร้างหมอก ขนาดของละอองหมอกอยู่ที่ $7\mu\text{m}$ ฟุ้งเข้าไปในห้องทดสอบอย่างต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงในสภาวะหมอก สะอาด ใช้น้ำกรองน้ำแยกไอออน สร้างหมอกเท่านั้น โดยเก็บน้ำไว้ในถังพักขนาด 2 ลิตร แล้วต่อ เข้าเครื่องอัลตราโซนิกฮิวมิดิไฟเออร์อีกครั้ง แต่ในสภาวะหมอกไอเกลือต้องเติมเกลือลงในน้ำให้มี ความเข้มข้นน้ำเกลือ 10kg/m^3 โดยเติมน้ำเกลือลงในถังพัก โดยที่แต่ละครั้งควรหยุดป้อน แรงดันไฟฟ้าก่อนในแต่ละครั้งในการเติมน้ำก็ควรใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที วงรอบการทดสอบแสดง ในตารางที่ 5.6

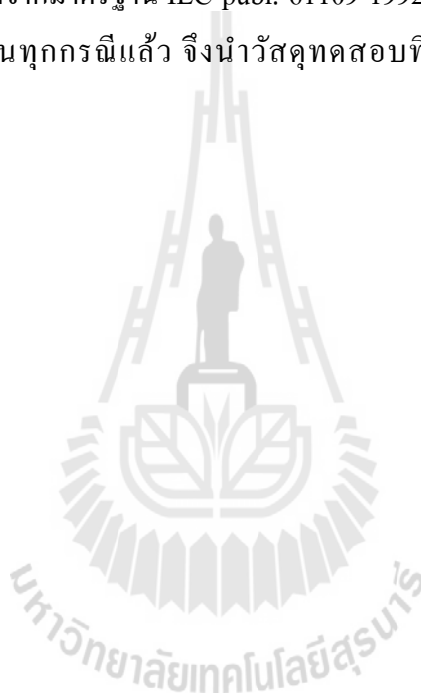
ตารางที่ 5.6 วงรอบการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาดและสภาวะหมอกไอเกลือ (24 ชั่วโมง)

รอบการทดสอบ (ชั่วโมง)	0-8			8-24					
ป้อนแรงดันทดสอบ									
จ่ายหมอก									

หมายเหตุ : สีแดง คือ ทำการป้อนแรงดัน สีน้ำเงิน คือ ทำการจ่ายหมอก และสีขาว คือ ไม่ได้จ่ายหมอก

5.7 สรุป

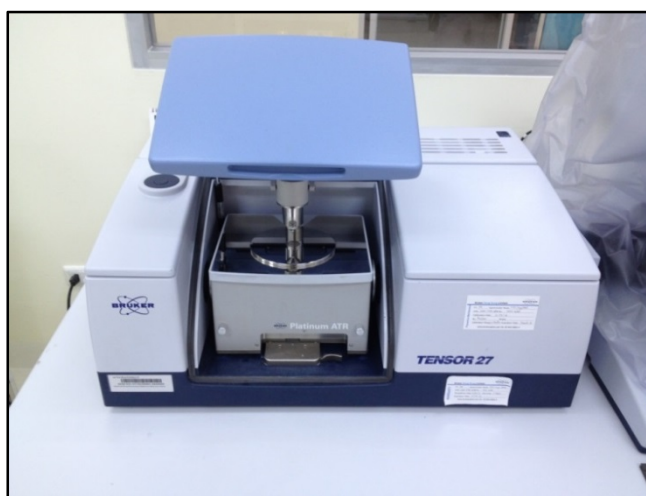
เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ ได้กล่าวถึงรายละเอียดการเตรียมการทดสอบและการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นฉนวนยางซิลิโคนแบบแผ่นจำนวน 8 ชนิด ทำการทดสอบด้วยการทดสอบทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก 1000 ชั่วโมง การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอกสะอาด 1000 ชั่วโมง และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอกไอเกลือ 1000 ชั่วโมง โดยทั้ง 3 สภาวะ จะแบบการทดสอบเป็นผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก และผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน โดยที่การทดสอบเร่งเสื่อมอายุด้วยวิธีหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ จะประยุกต์จากมาตรฐาน IEC publ. 61109-1992 clause 5.3 หลังจากทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนทุกกรณีแล้ว จึงนำวัสดุทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลตามวัตถุประสงค์ต่อไป



6.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางซิลิโคน

6.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุทดสอบ ตรวจสอบวัสดุทดสอบที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ และหลังผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนสามารถวิเคราะห์ได้จาก %Absorbance โดยใช้ช่วงเลขคลื่น $4000-600\text{ cm}^{-1}$ ทำการวิเคราะห์ค่ายอดของกราฟ ที่พันธะ Si-O-Si เลขคลื่น 1007 cm^{-1} และที่พันธะ Si-CH₃ เลขคลื่น 1259 cm^{-1} เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ดังแสดงในรูปที่ 6.14

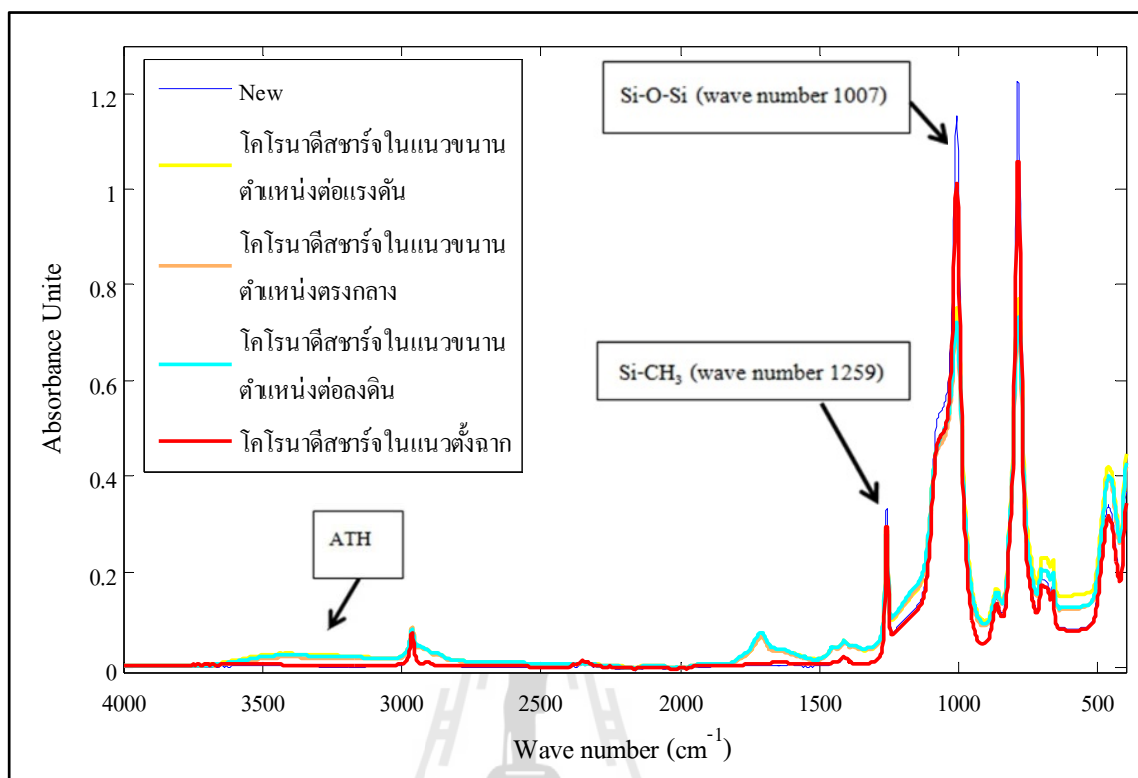


รูปที่ 6.14 เครื่องวิเคราะห์ spectrometer Bruker model T27/Hyp2000

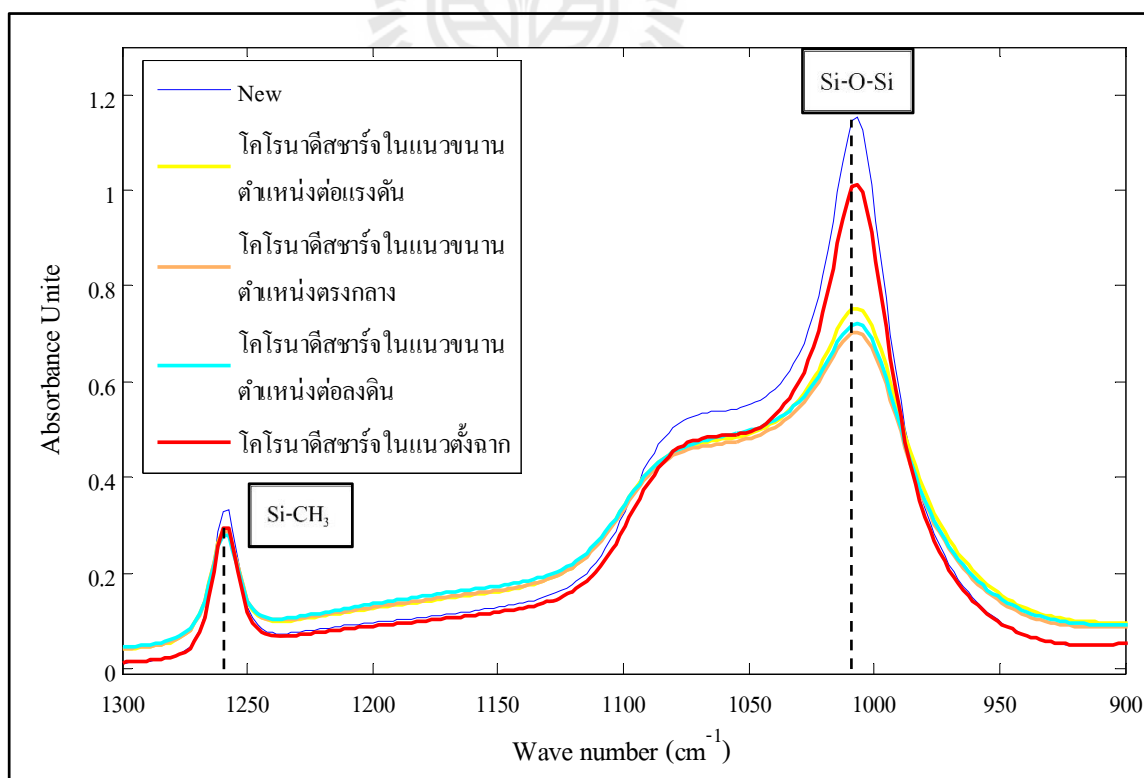
การวิเคราะห์ค่าอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวนยางซิลิโคน ทั้ง 8 ชนิด หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน เทียบกับก่อนการทดสอบ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน แบ่งเป็น 3 สภาวะ แสดงดังต่อไปนี้

1. สภาวะไร้หมอก ทำการทดสอบในตู้ที่ไม่ได้จ่ายหมอก ทดสอบเป็นเวลา 1000 ชม. หลังการทดสอบจึงนำวัสดุทดสอบไปหาค่าอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวนยางซิลิโคน ทั้ง 8 ชนิด ดังรูปที่ 6.15 ถึงรูปที่ 6.30
2. สภาวะหมอกสะอาด ทำการทดสอบในห้องปิดจ่ายหมอกสะอาดเข้าไป ทดสอบเป็นเวลา 1000 ชม. หลังการทดสอบจึงนำวัสดุทดสอบไปหาค่าอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวนยางซิลิโคน ทั้ง 8 ชนิด แสดงในรูปที่ 6.31 ถึง รูปที่ 6.46
3. สภาวะหมอกไอเกลือ ทำการทดสอบในห้องปิดจ่ายหมอกไอเกลือเข้าไป ทดสอบเป็นเวลา 1000 ชม. หลังการทดสอบจึงนำวัสดุทดสอบไปหาค่าอินฟราเรดสเปกตรัมของฉนวนยางซิลิโคน ทั้ง 8 ชนิด แสดงดังรูปที่ 6.47 ถึง รูปที่ 6.62

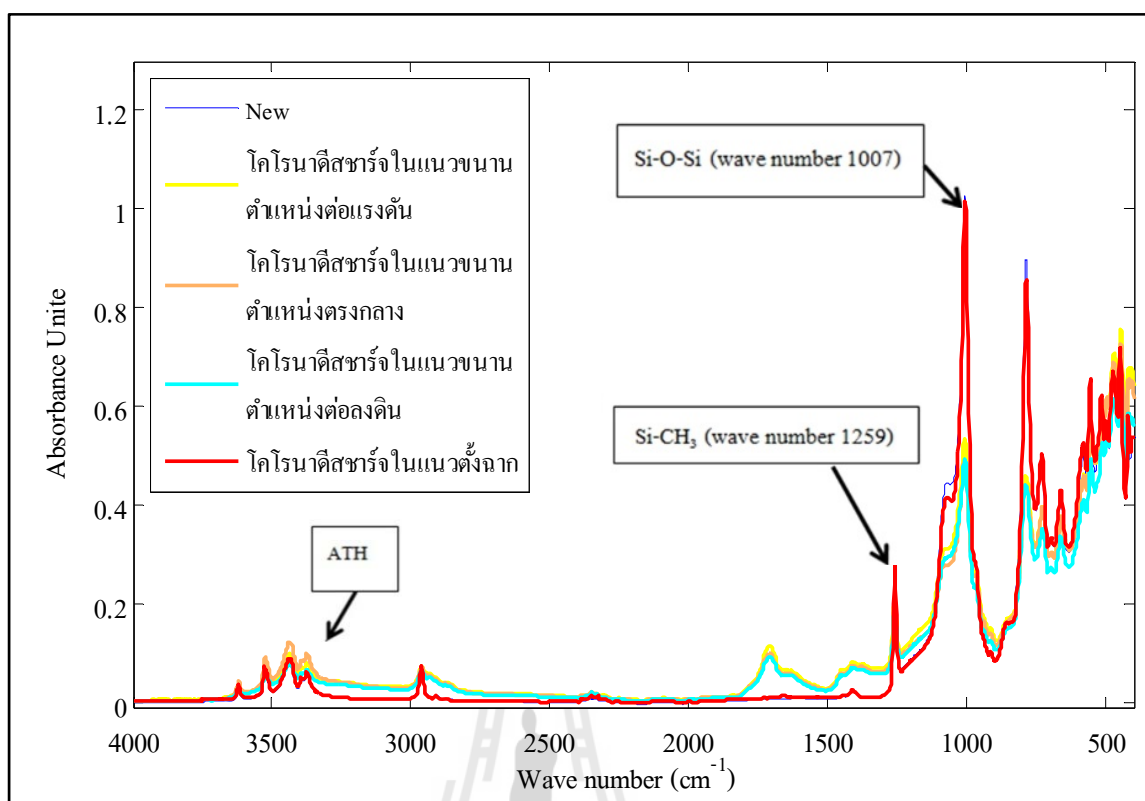
6.1.1 ภาวะไร้หมอก



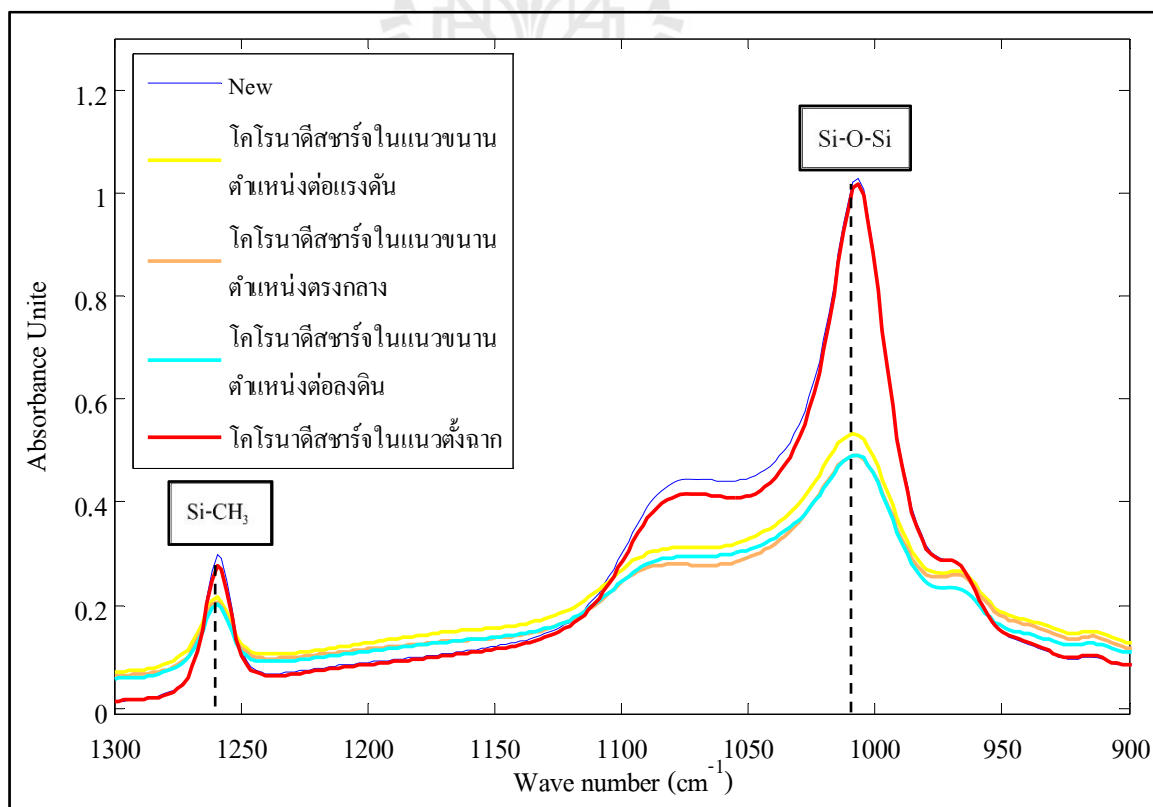
รูปที่ 6.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A



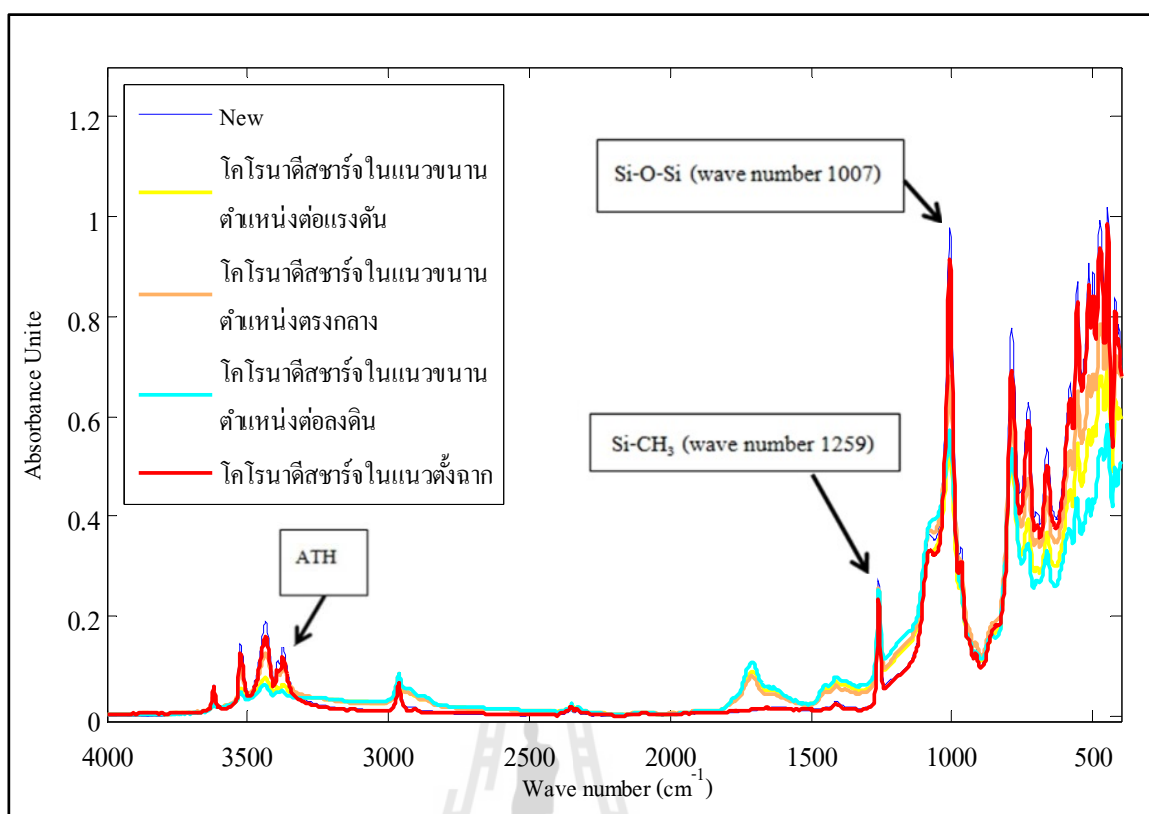
รูปที่ 6.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



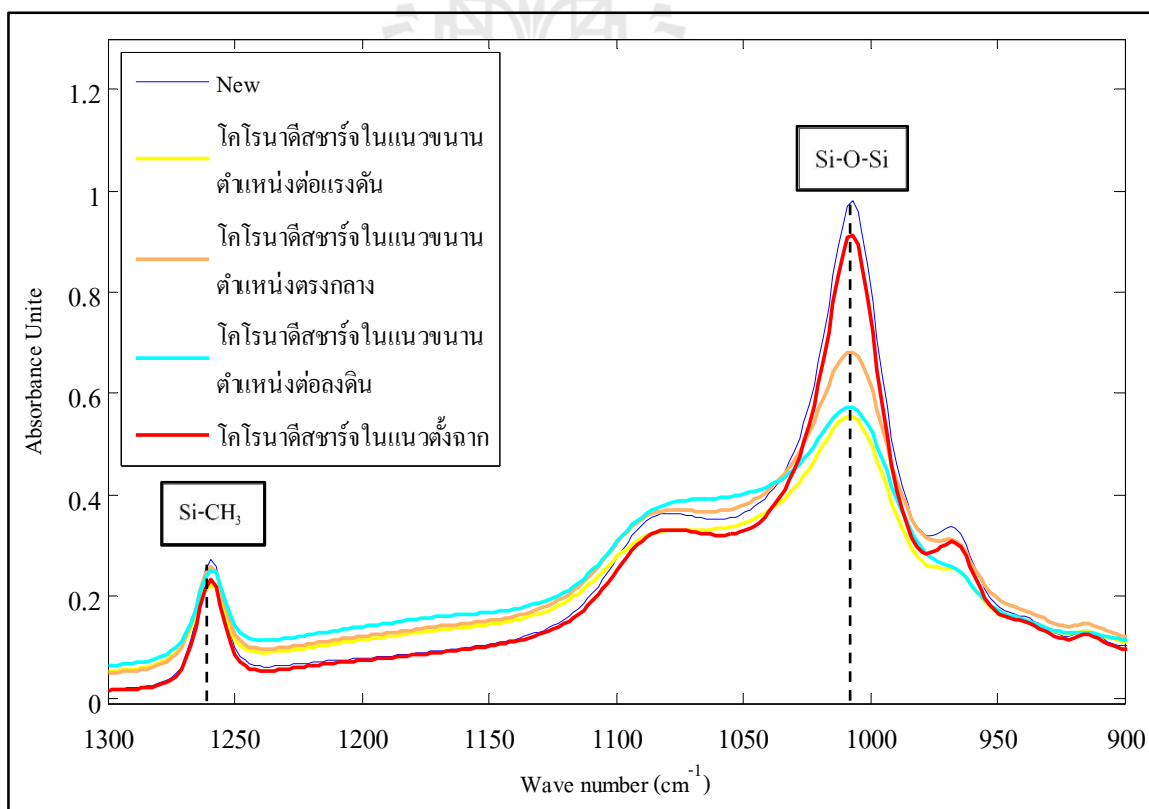
รูปที่ 6.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B



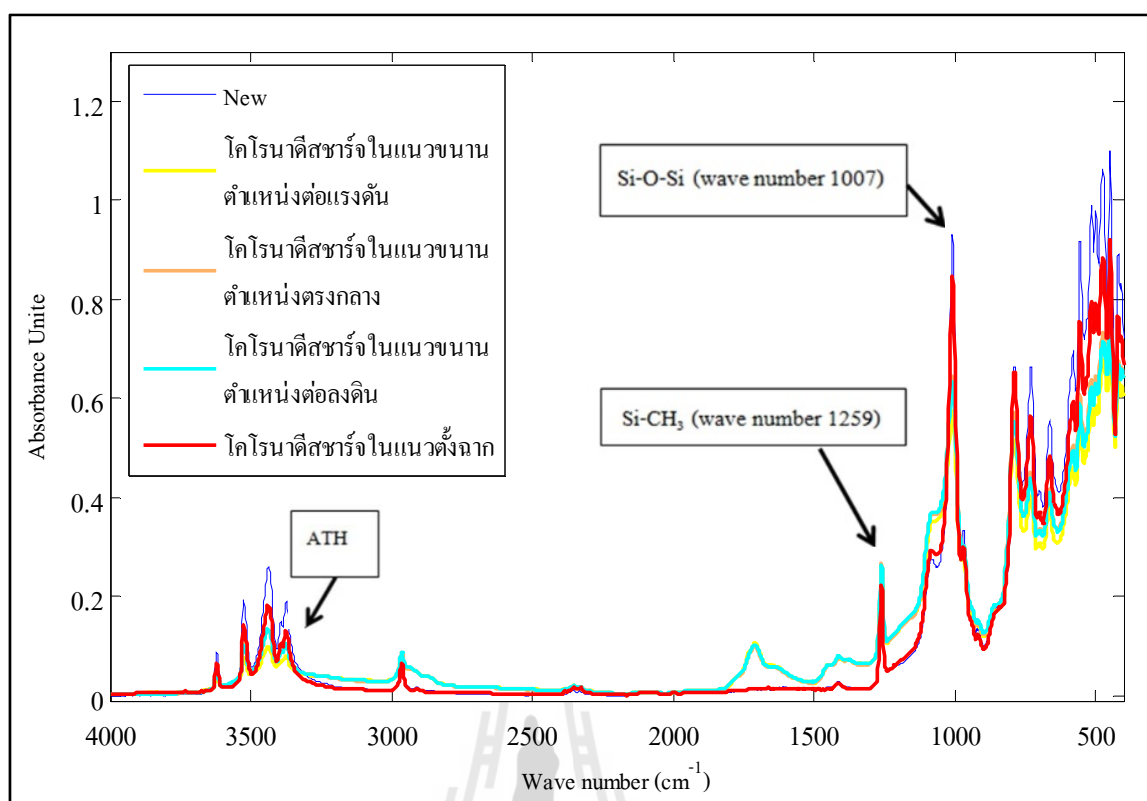
รูปที่ 6.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



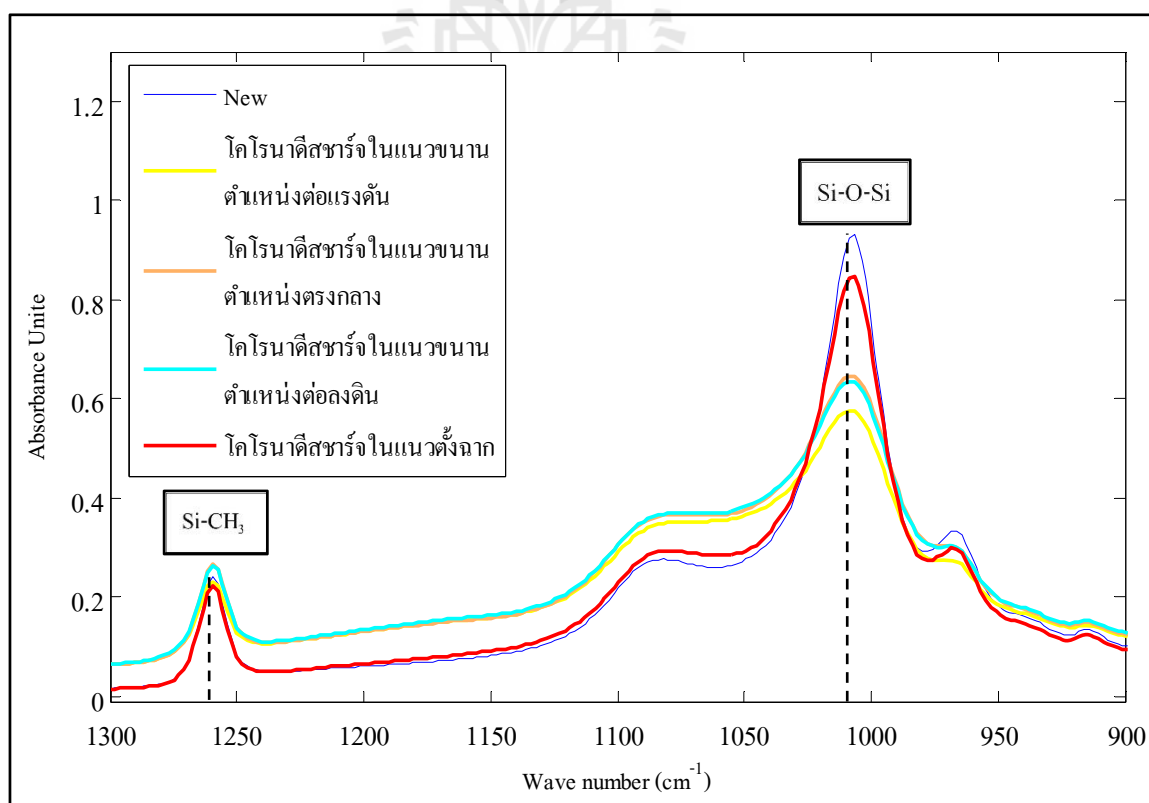
รูปที่ 6.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C



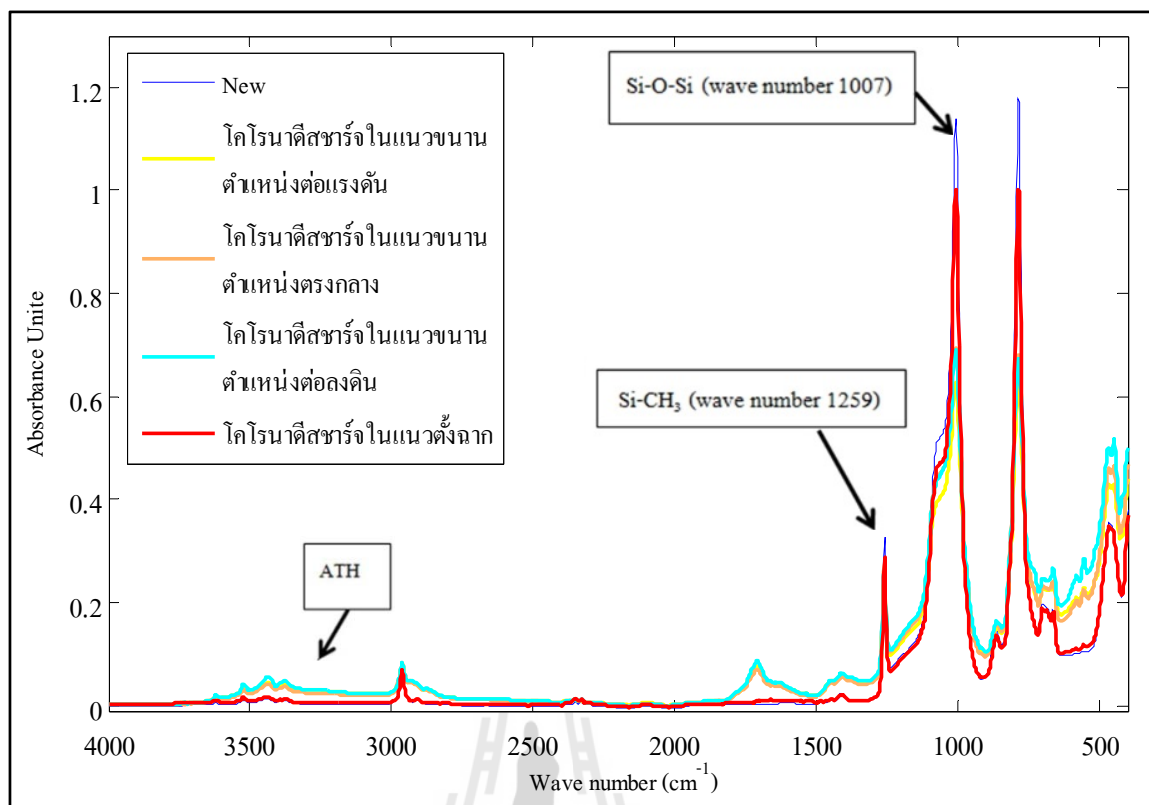
รูปที่ 6.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



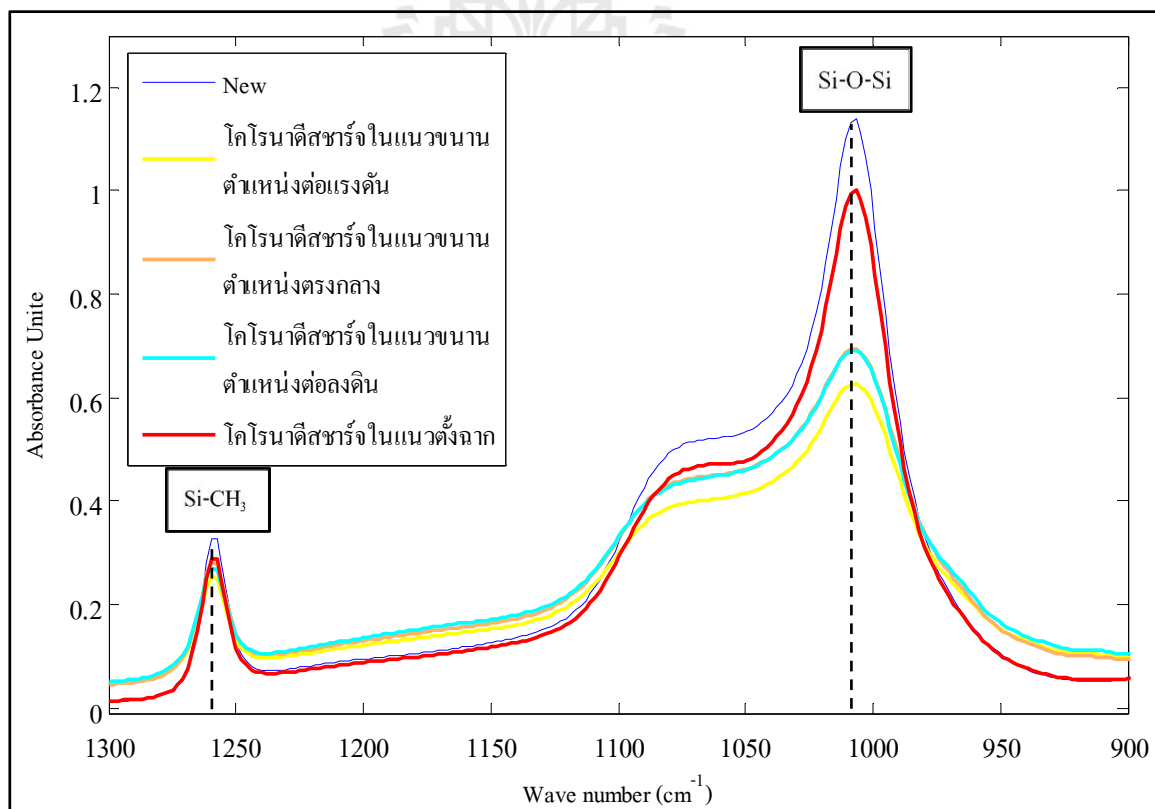
รูปที่ 6.21 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D



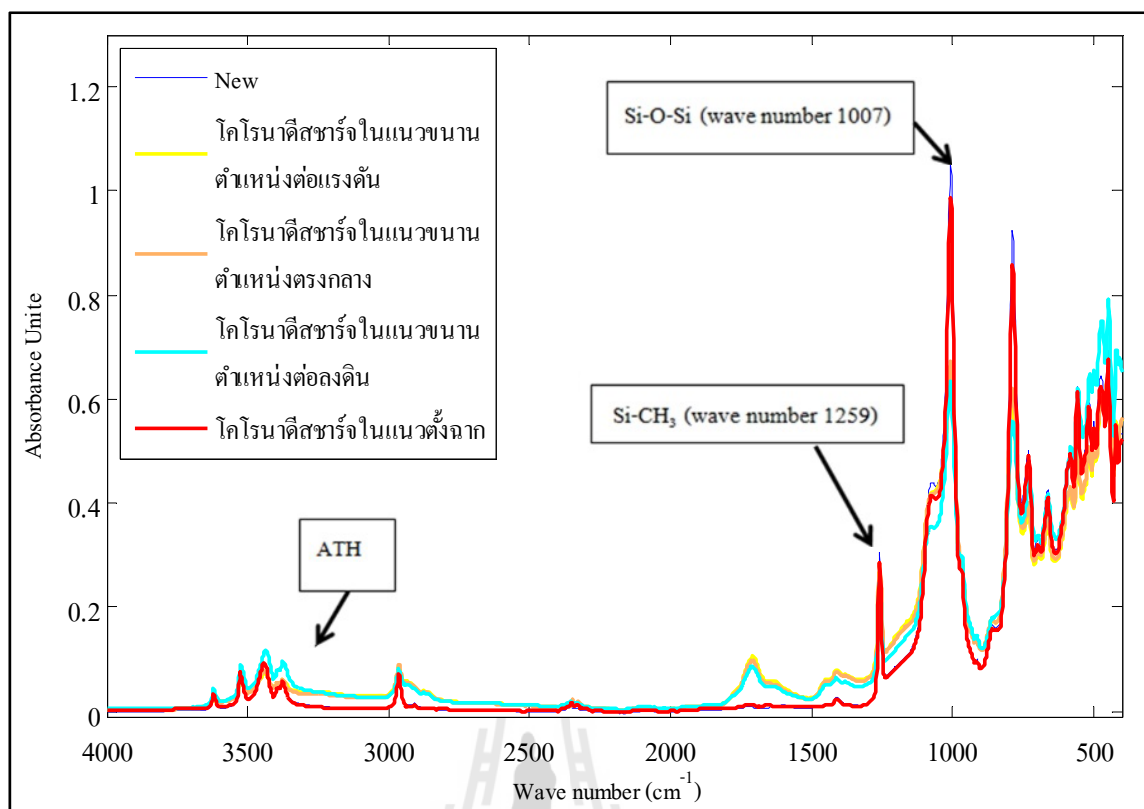
รูปที่ 6.22 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



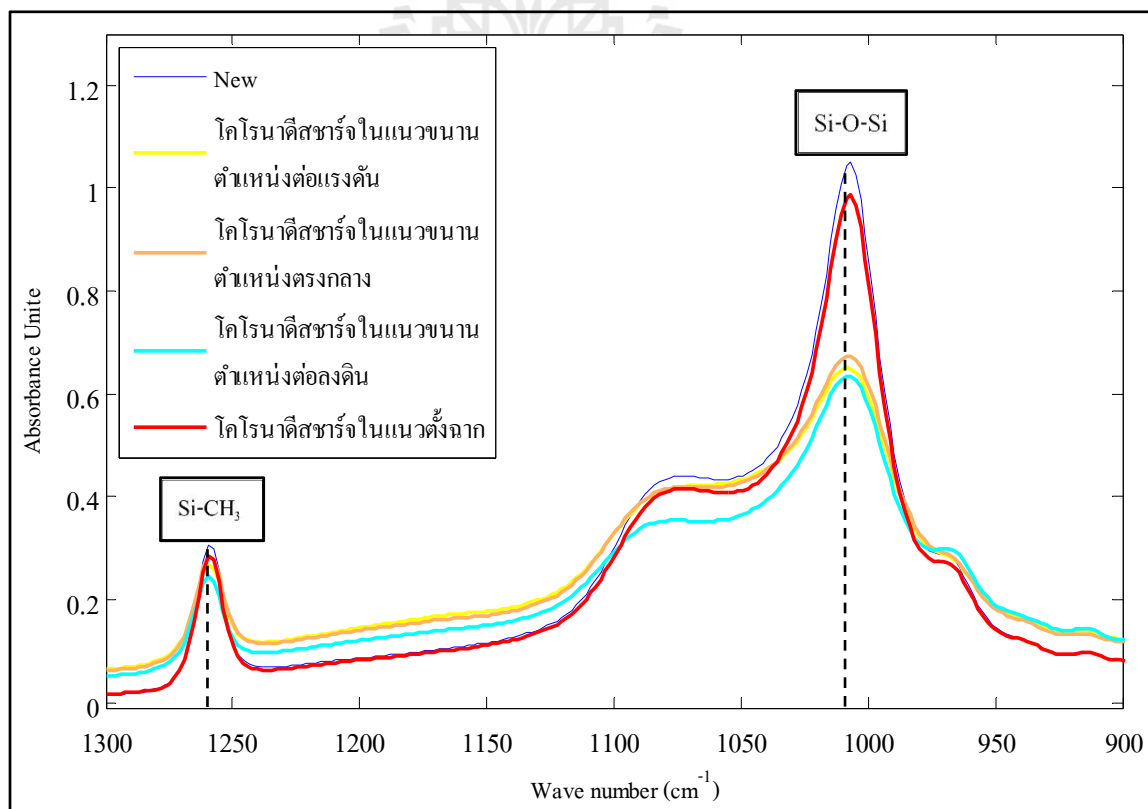
รูปที่ 6.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E



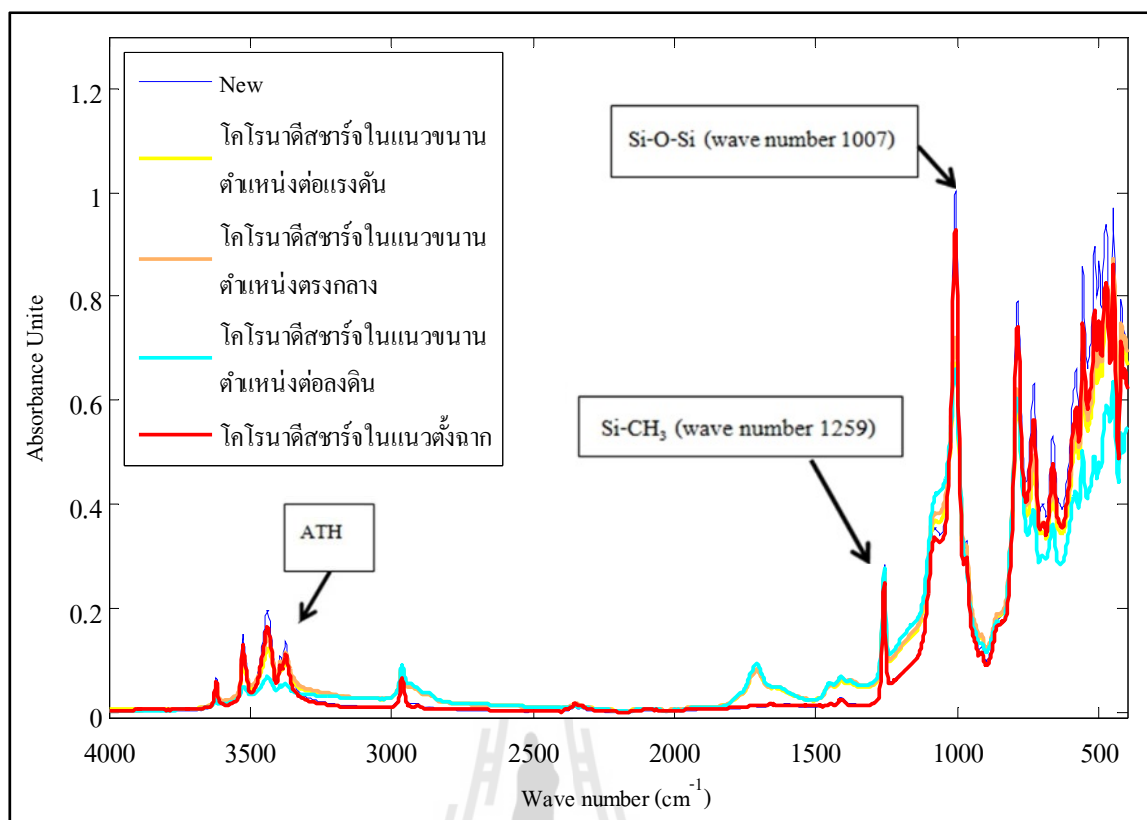
รูปที่ 6.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



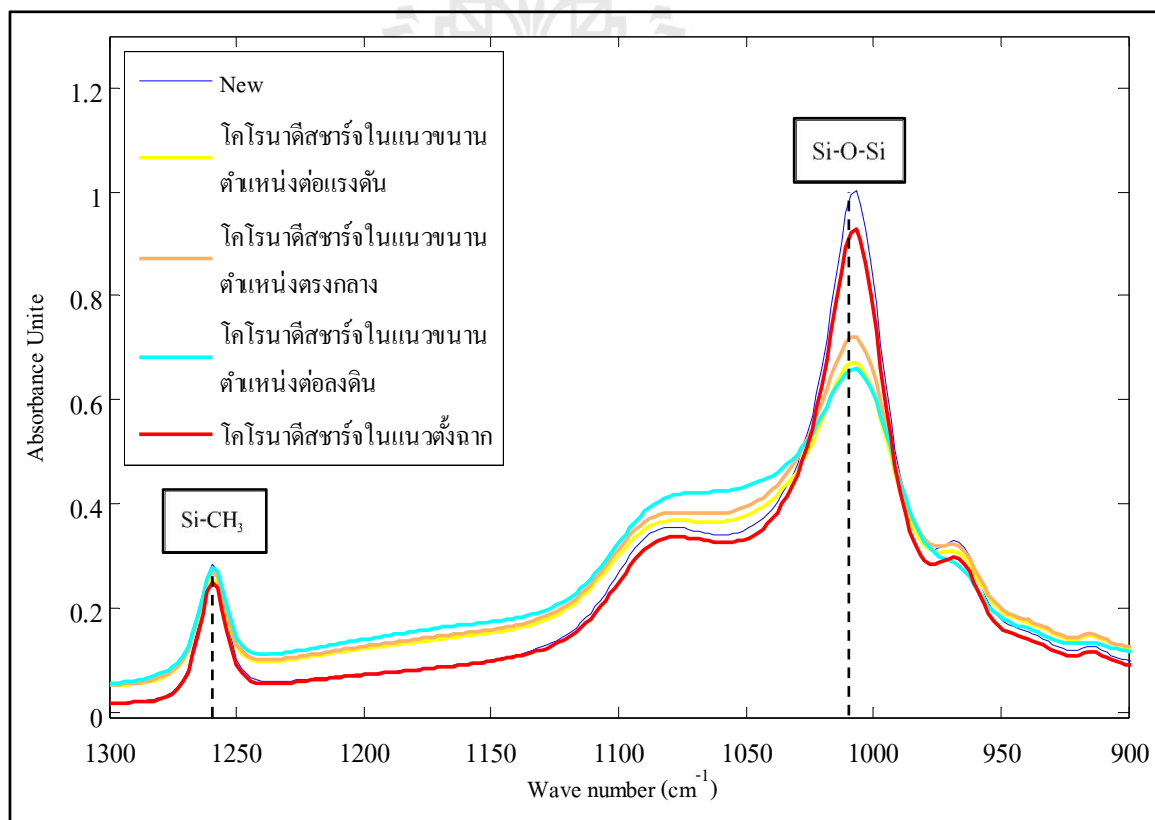
รูปที่ 6.25 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F



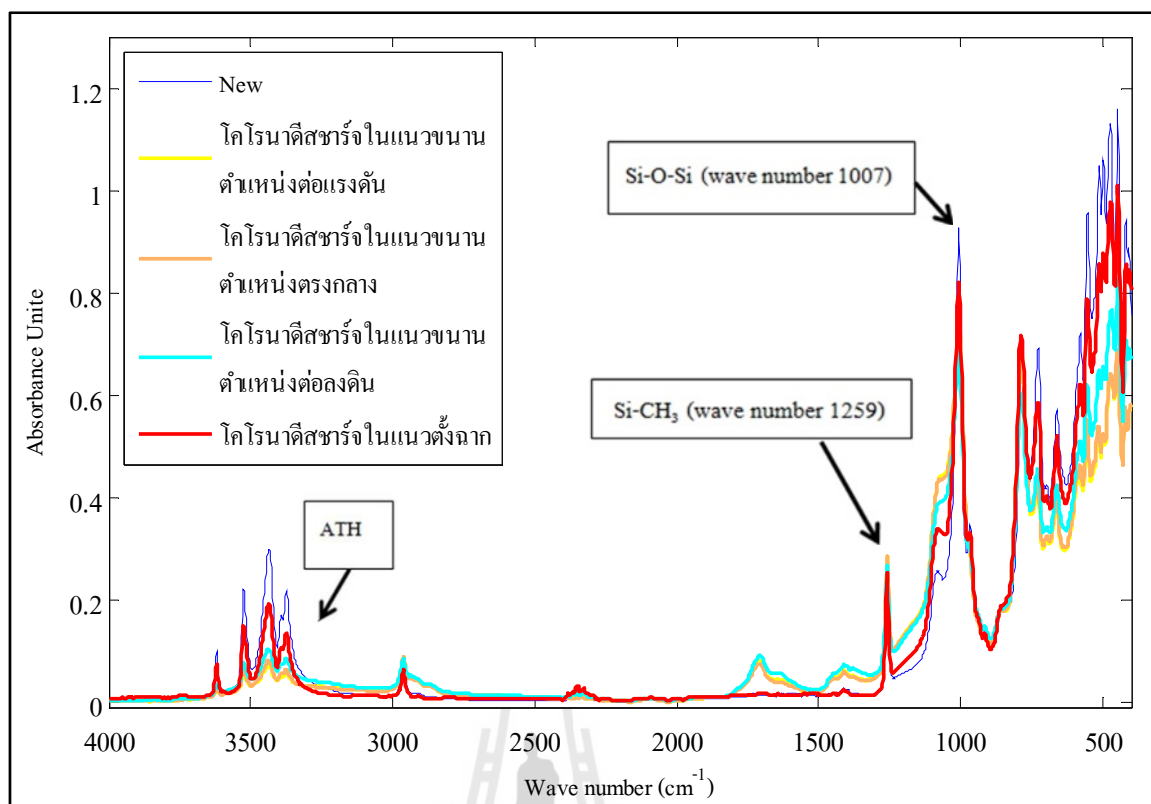
รูปที่ 6.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



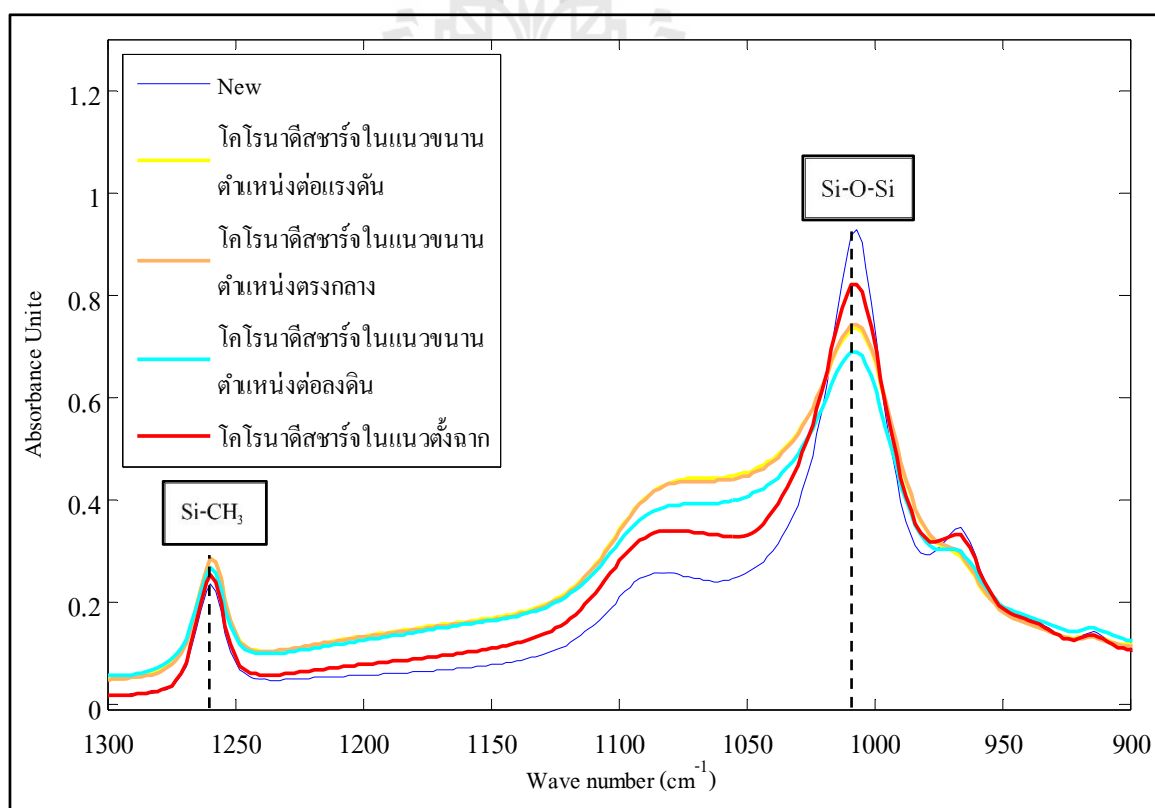
รูปที่ 6.27 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G



รูปที่ 6.28 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}

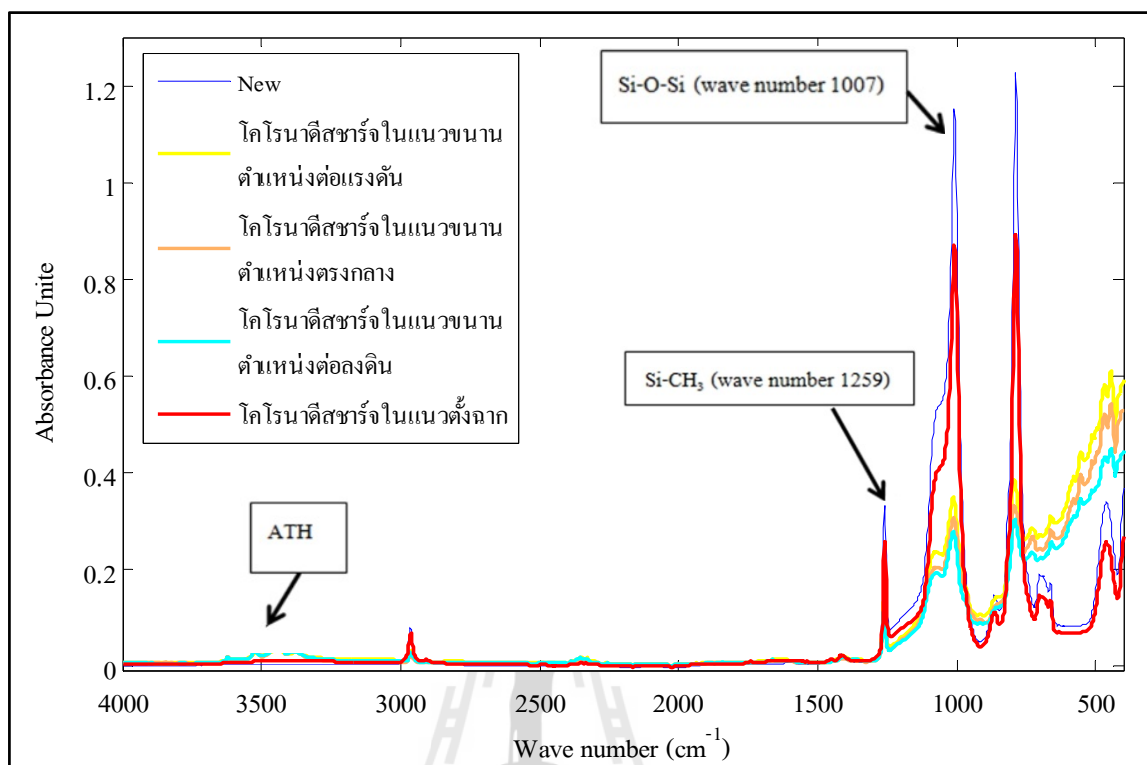


รูปที่ 6.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H

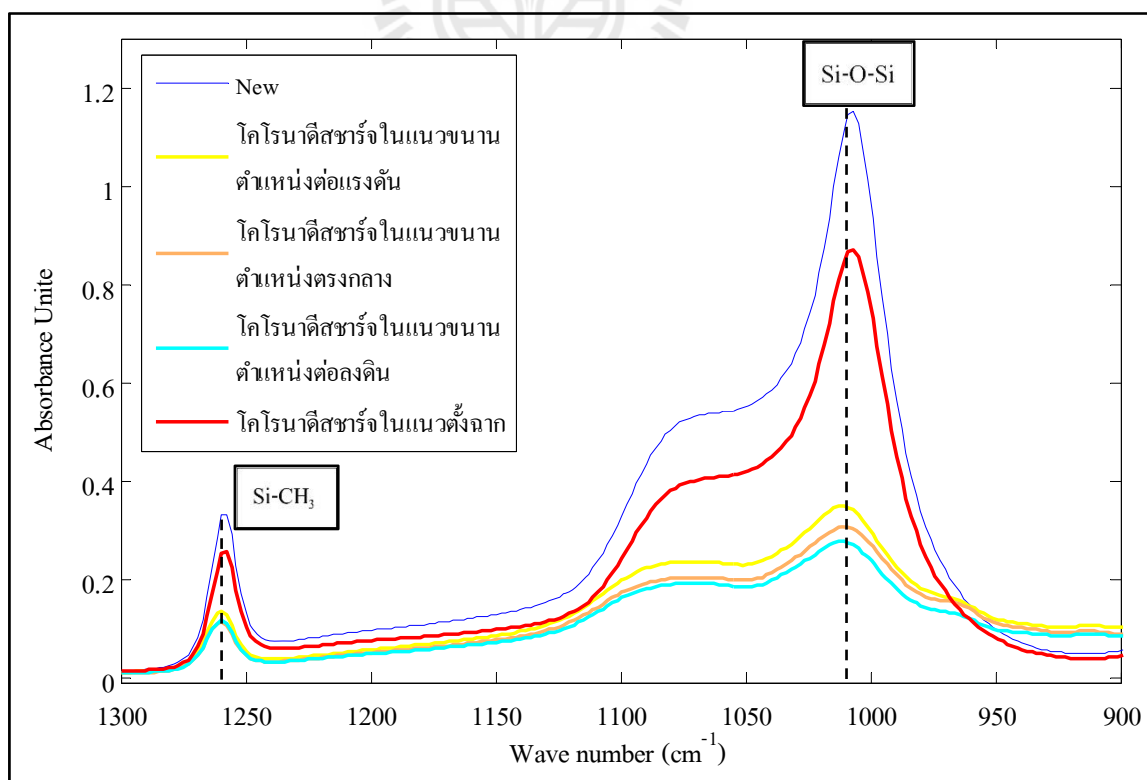


รูปที่ 6.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}

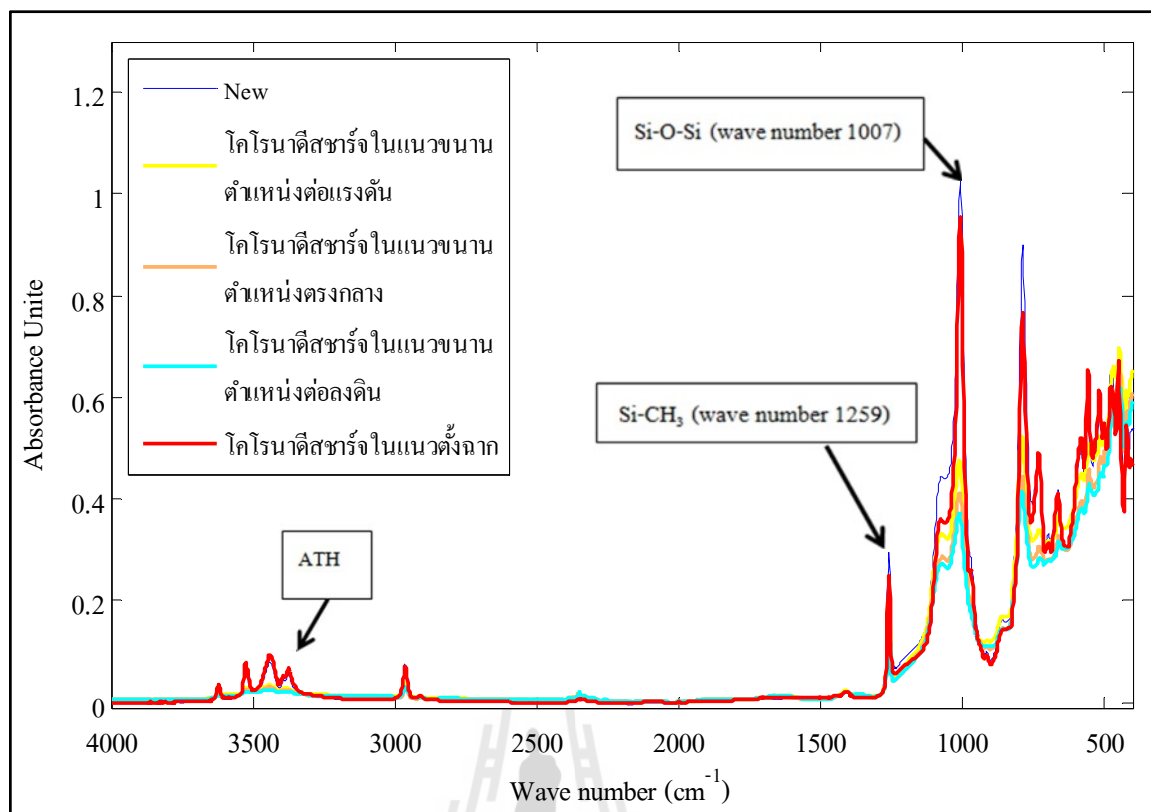
6.1.2 สภาวะหมอกสะอาด



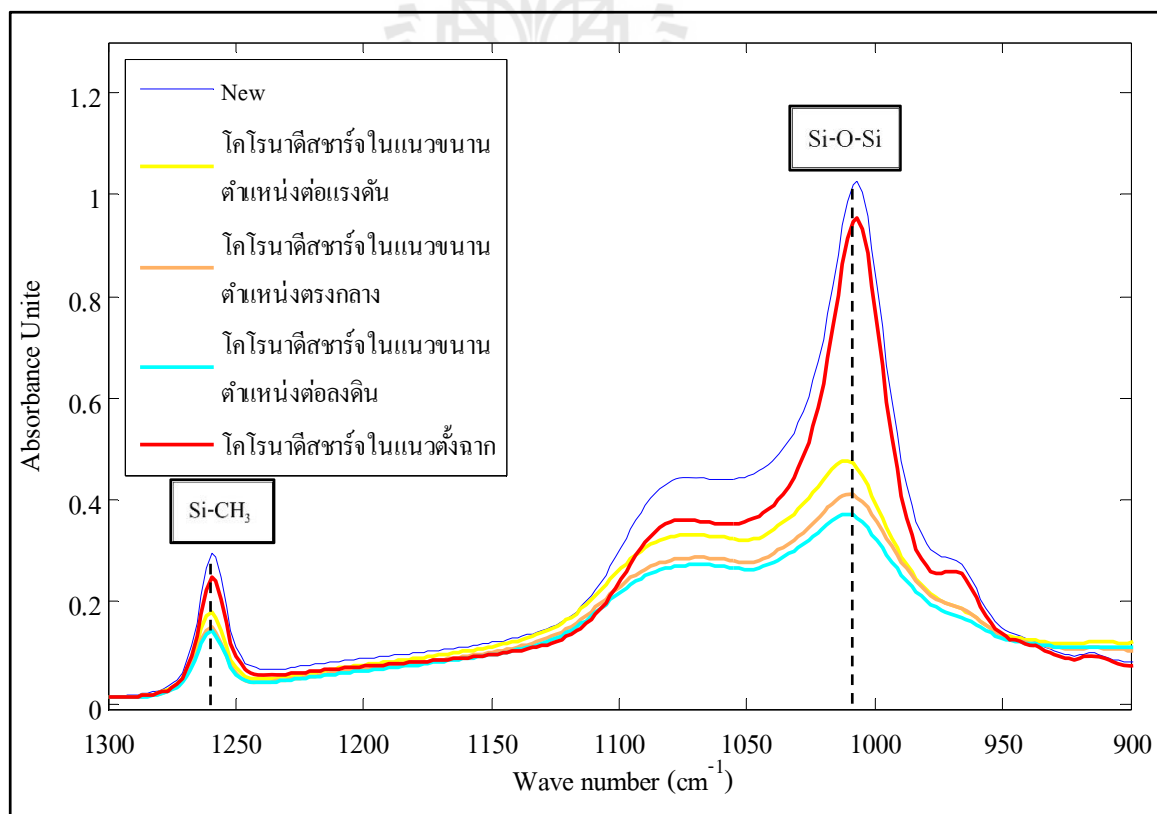
รูปที่ 6.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A



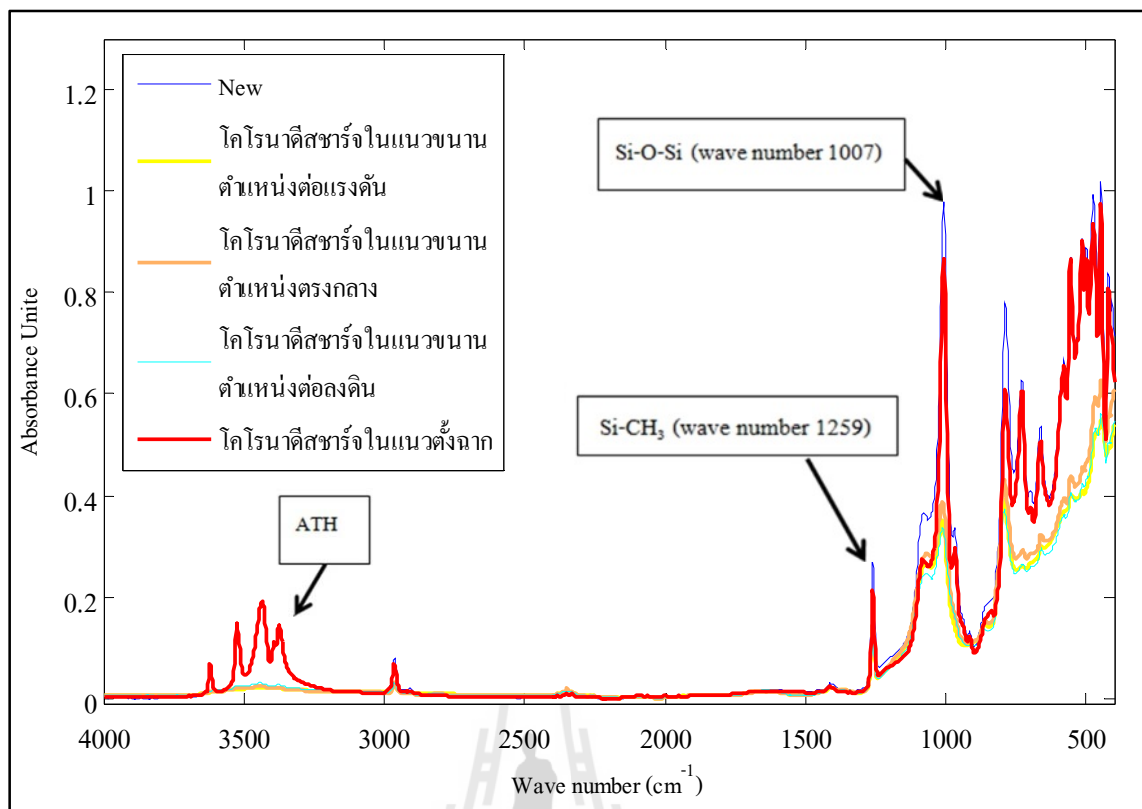
รูปที่ 6.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



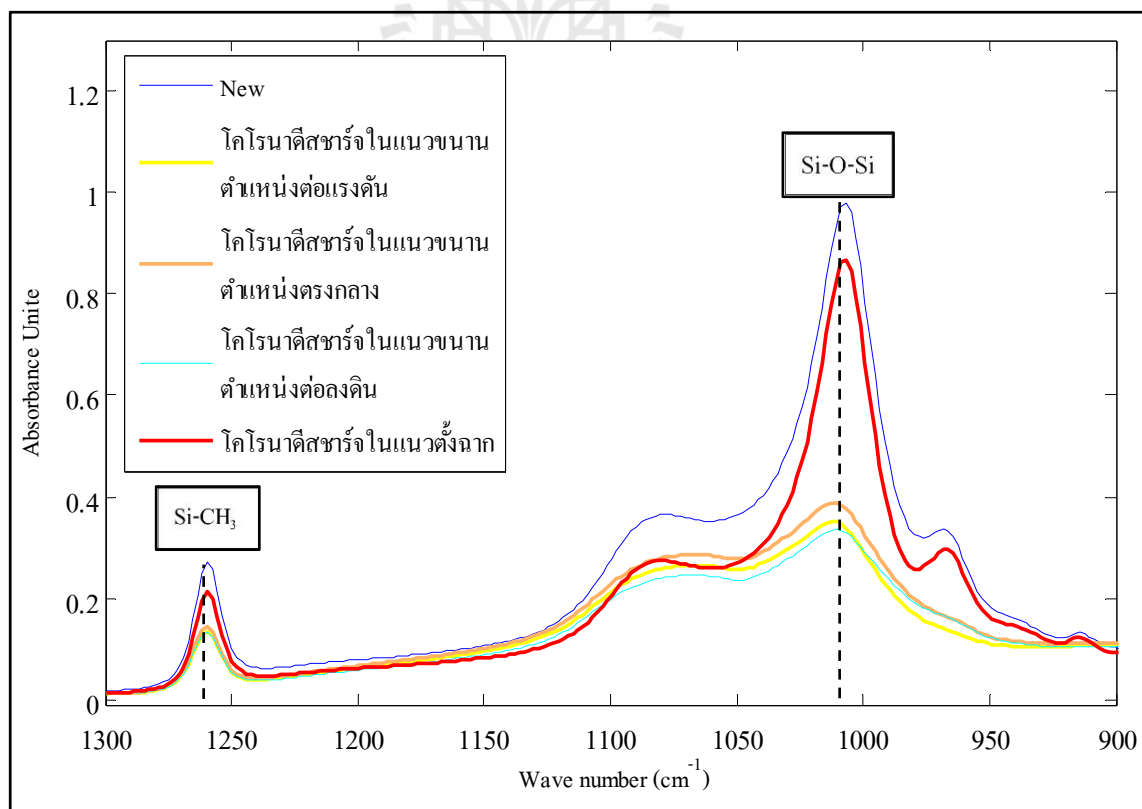
รูปที่ 6.33 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B



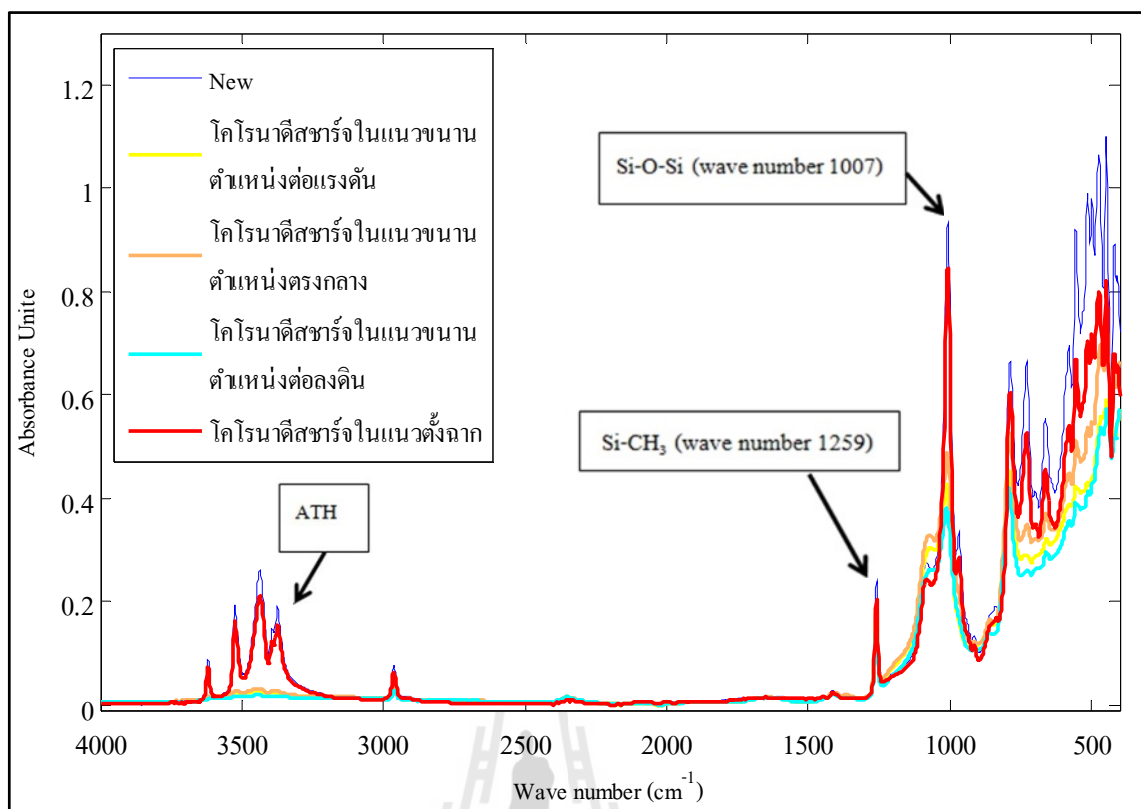
รูปที่ 6.34 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



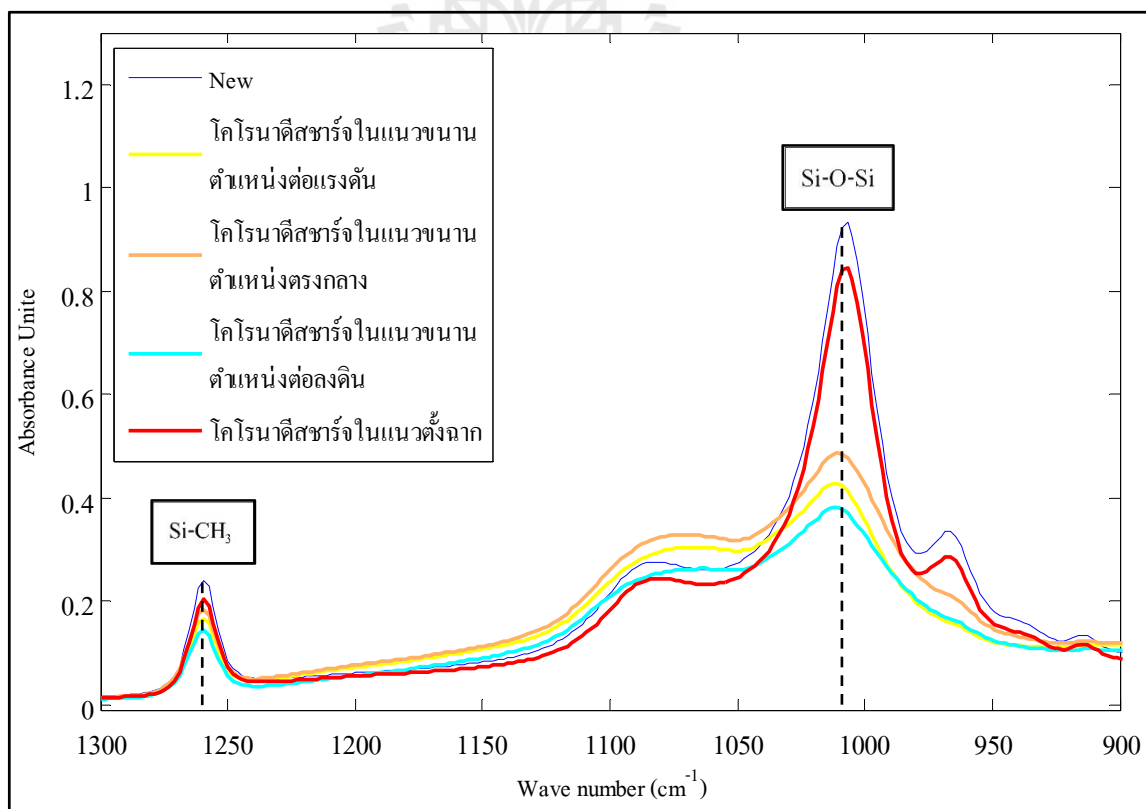
รูปที่ 6.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C



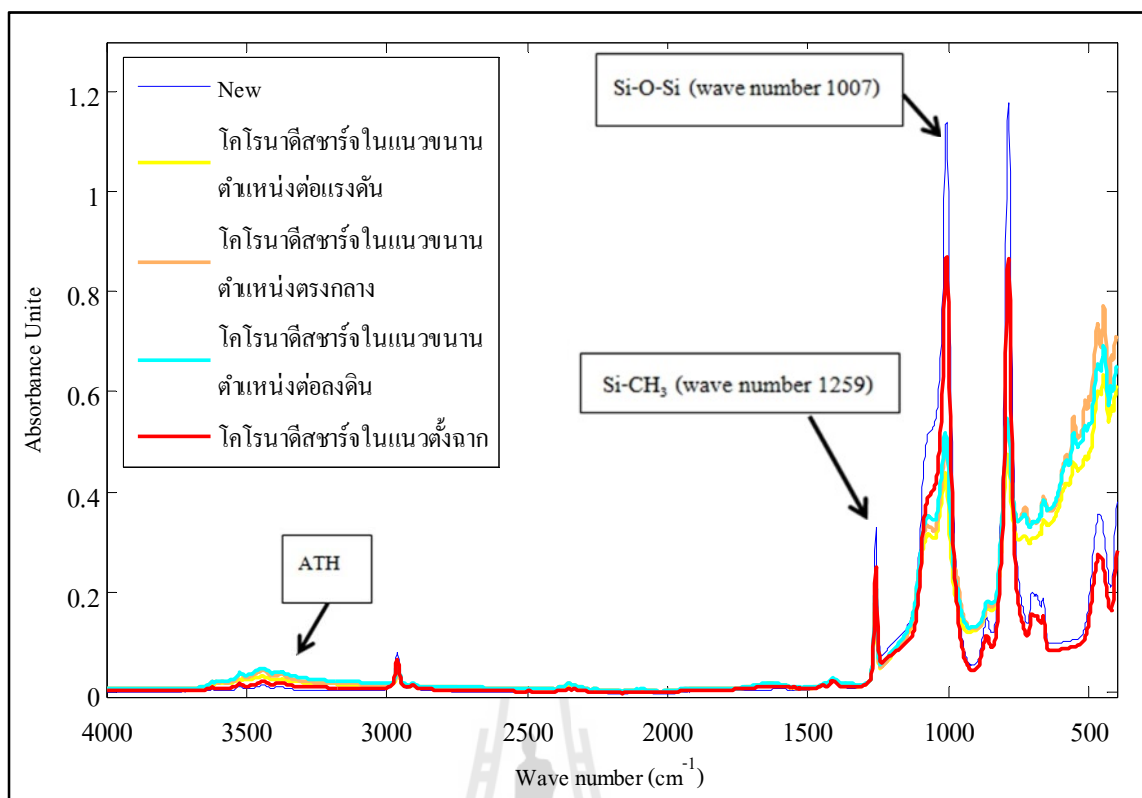
รูปที่ 6.36 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



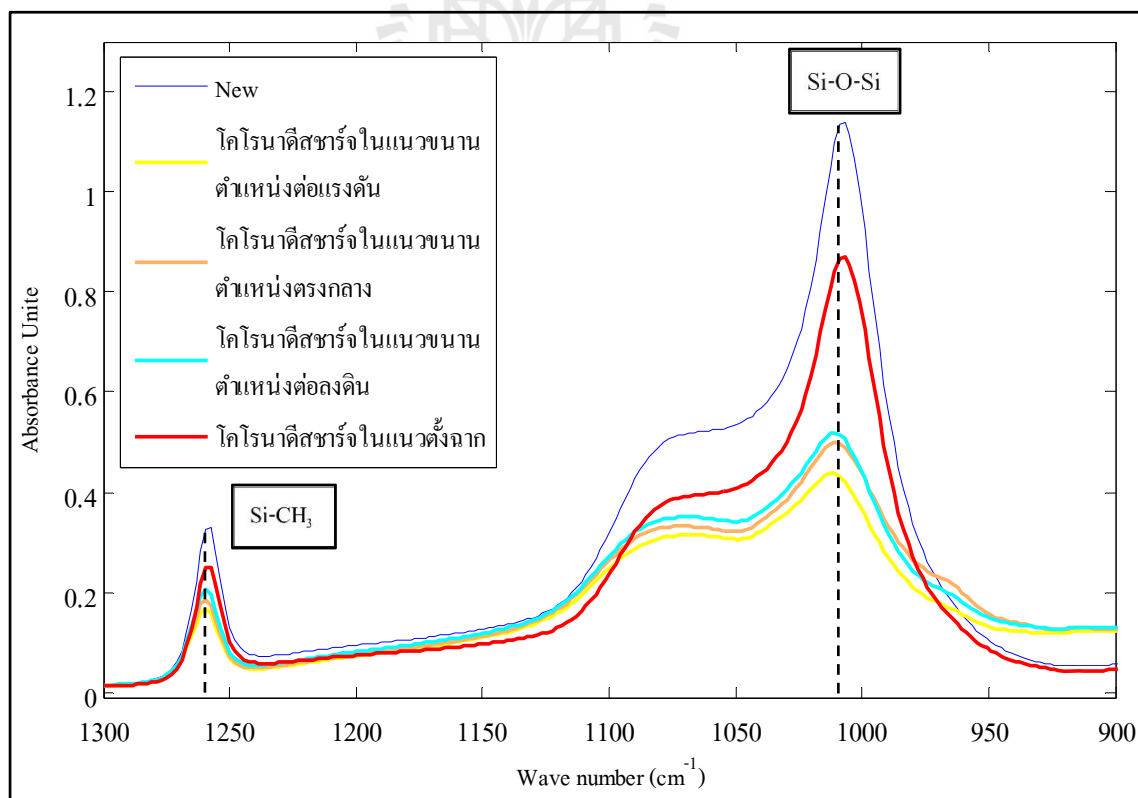
รูปที่ 6.37 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D



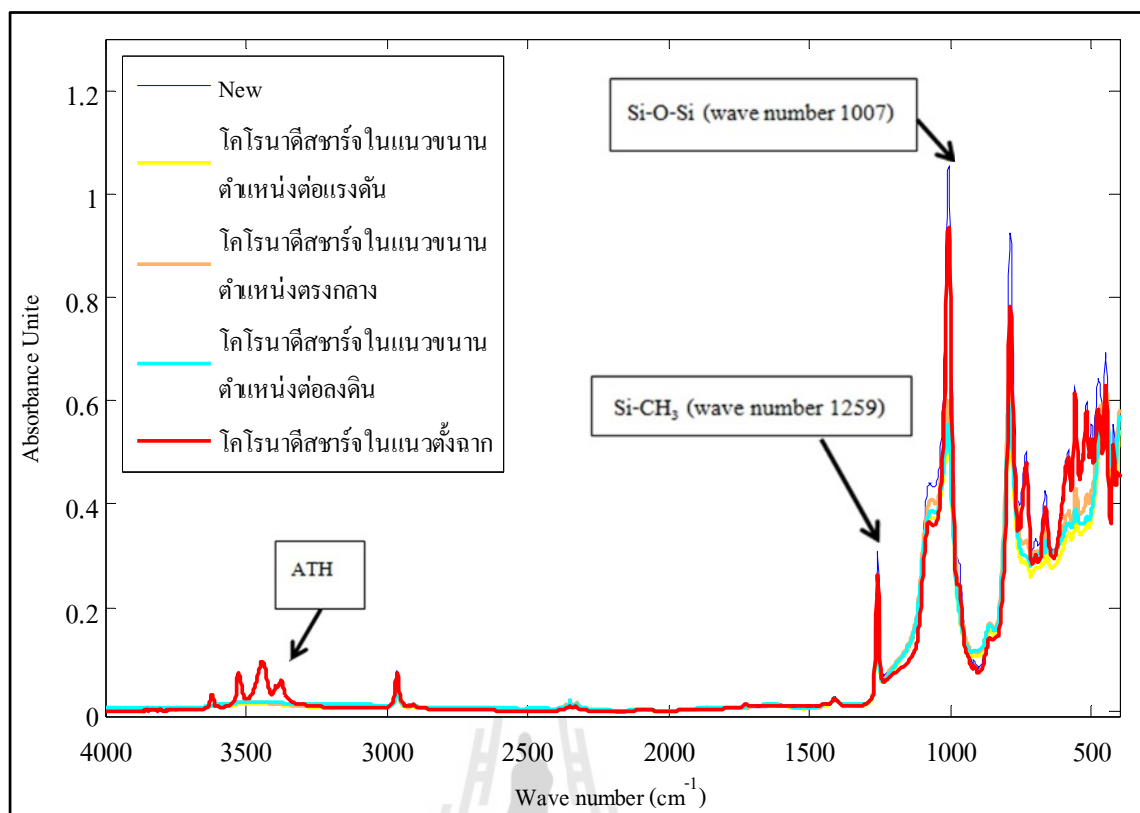
รูปที่ 6.38 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



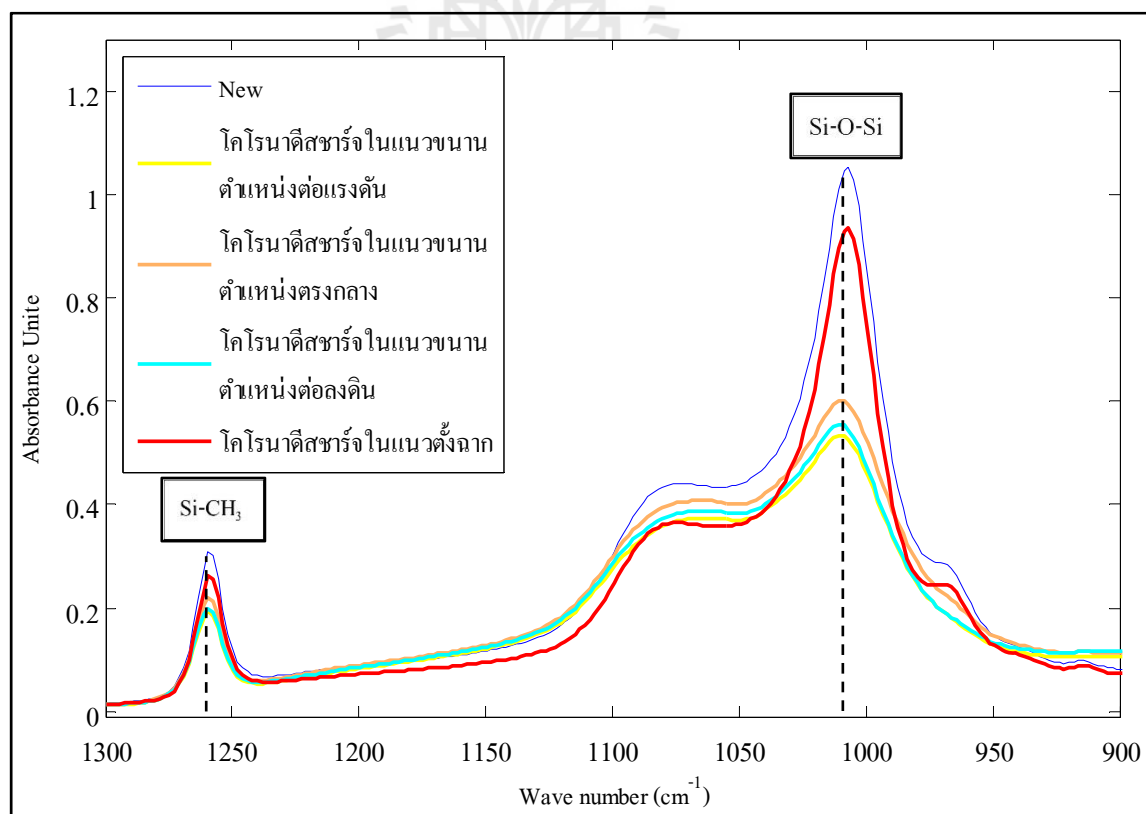
รูปที่ 6.39 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E



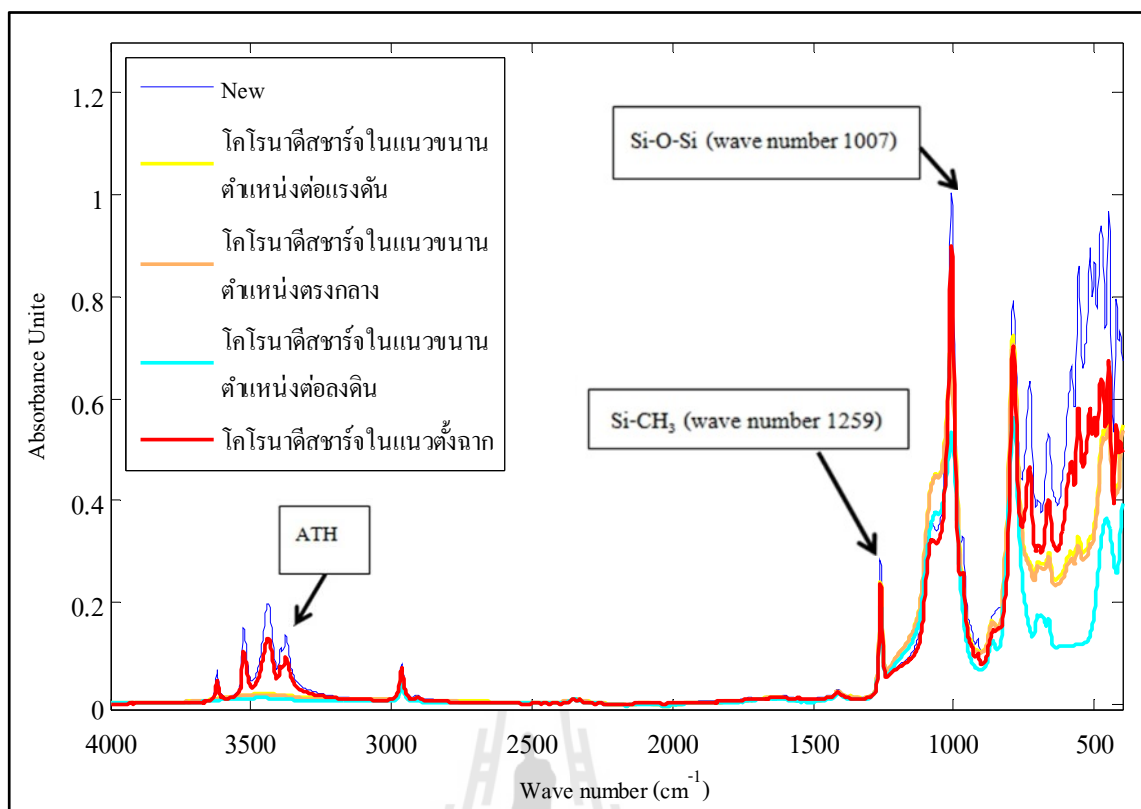
รูปที่ 6.40 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



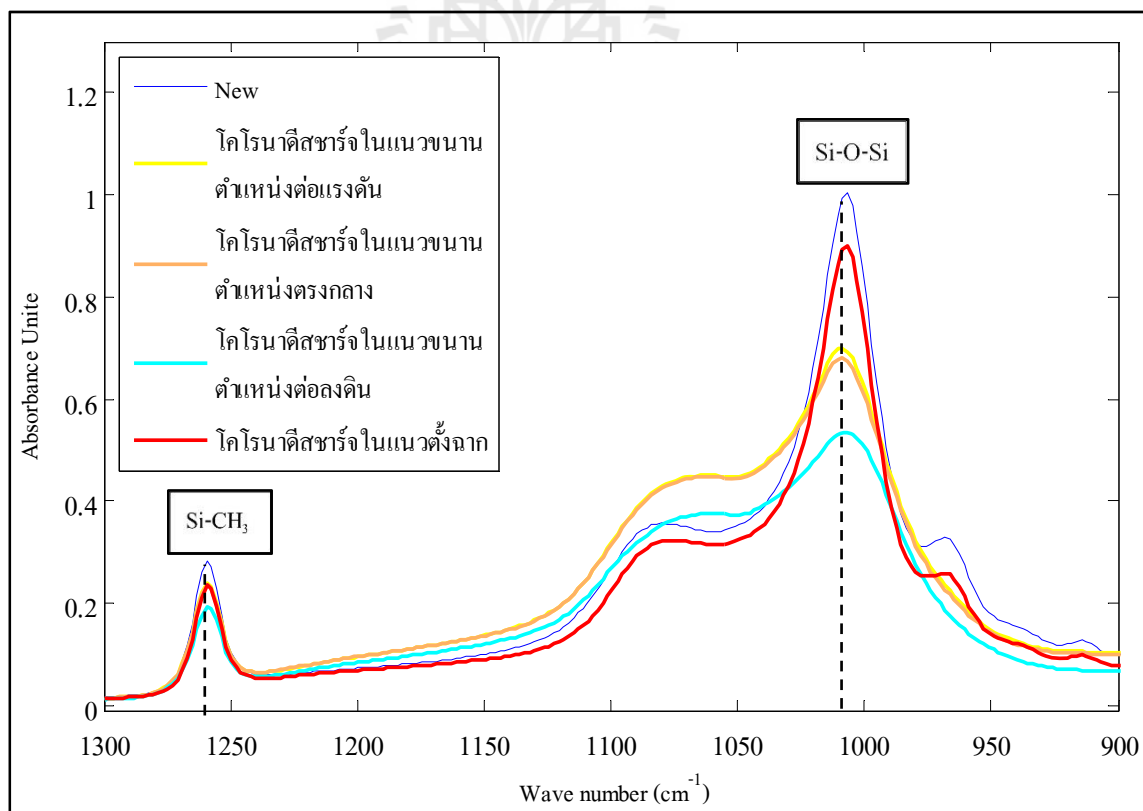
รูปที่ 6.41 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F



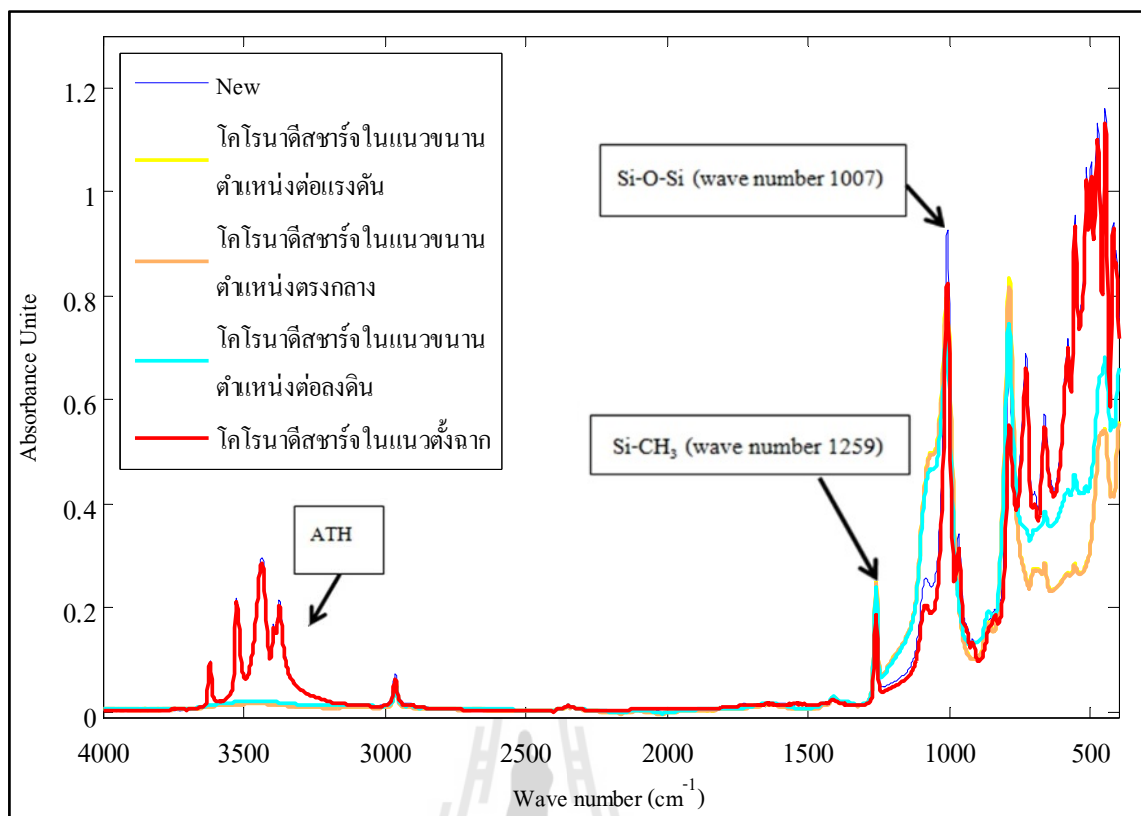
รูปที่ 6.42 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



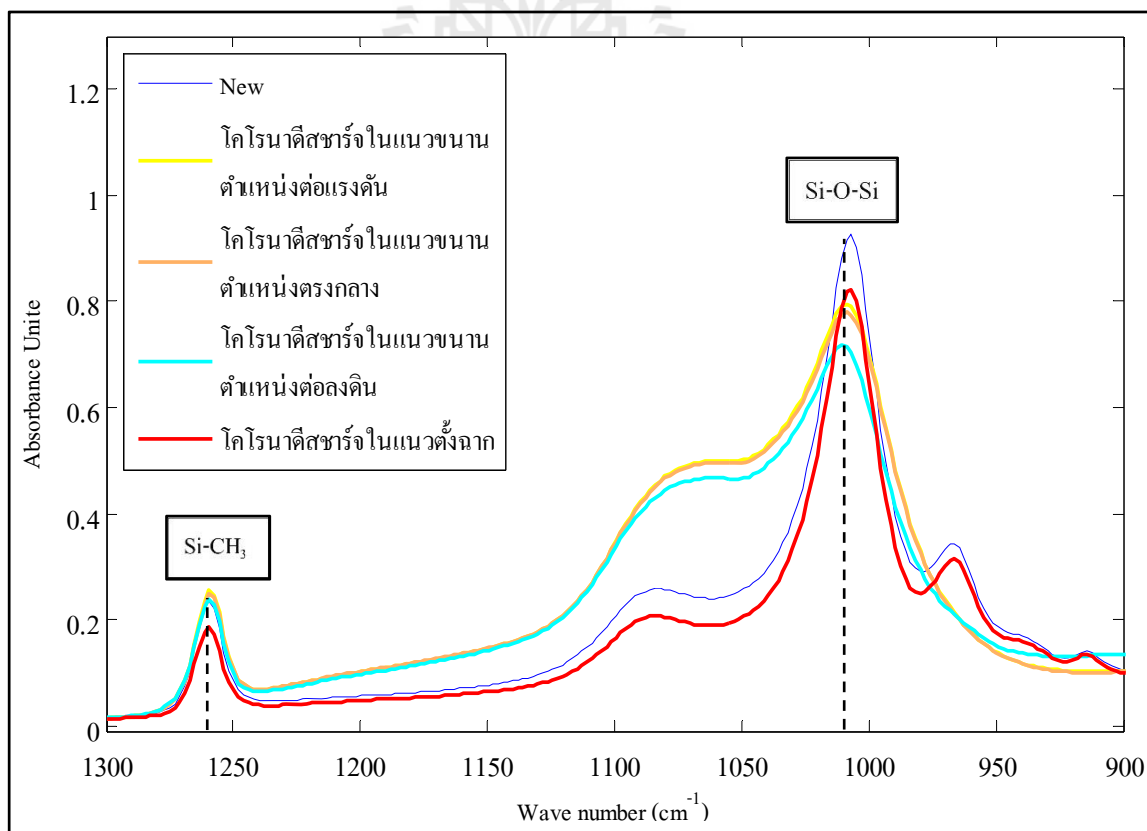
รูปที่ 6.43 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G



รูปที่ 6.44 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}

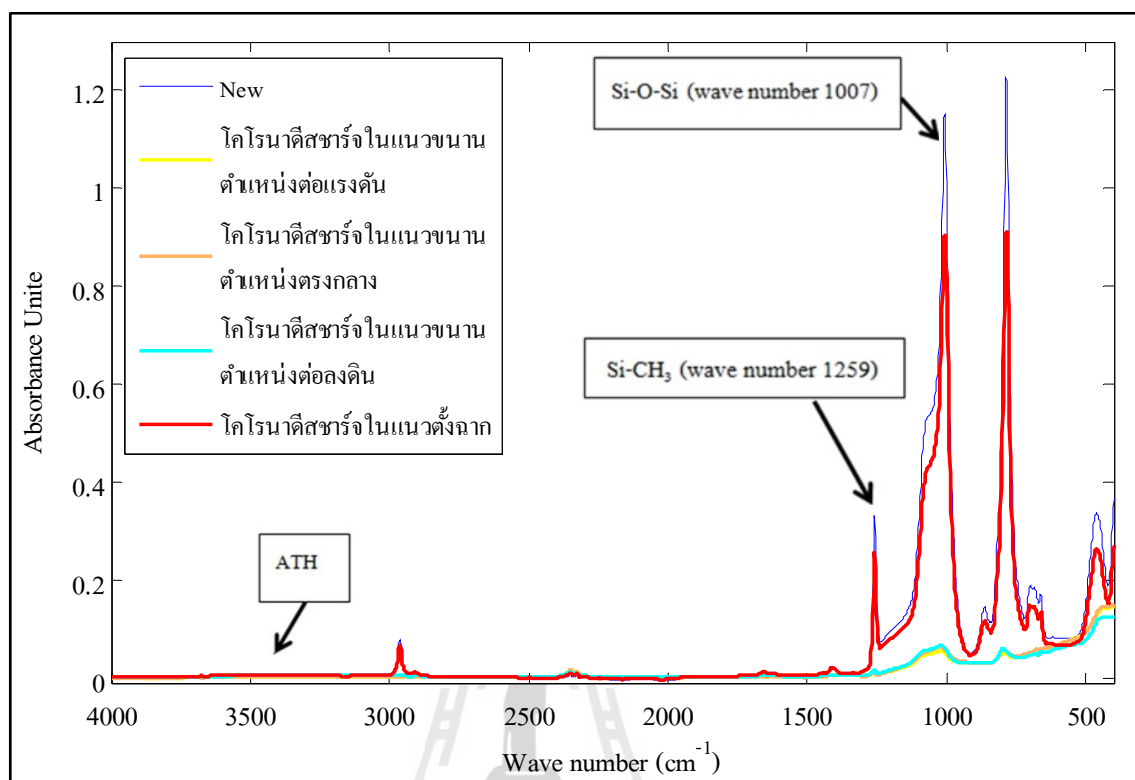


รูปที่ 6.45 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H

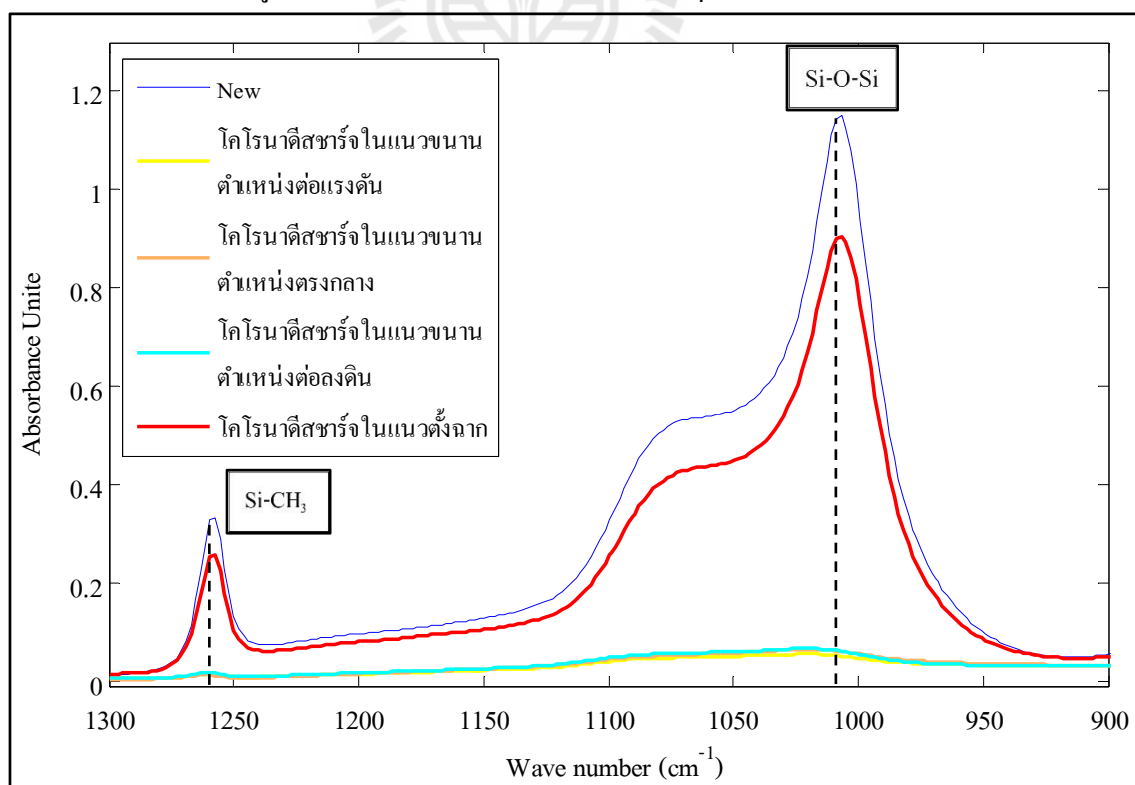


รูปที่ 6.46 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}

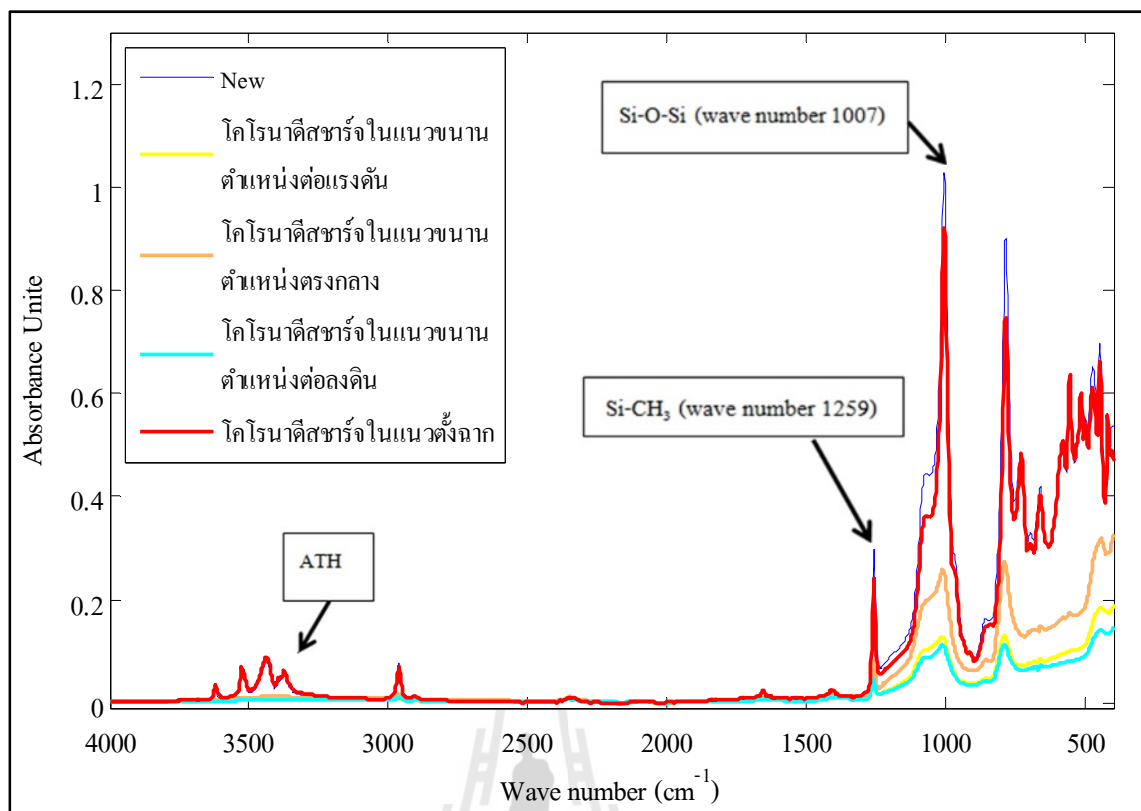
6.1.3 สภาวะหมอกไอเกลือ



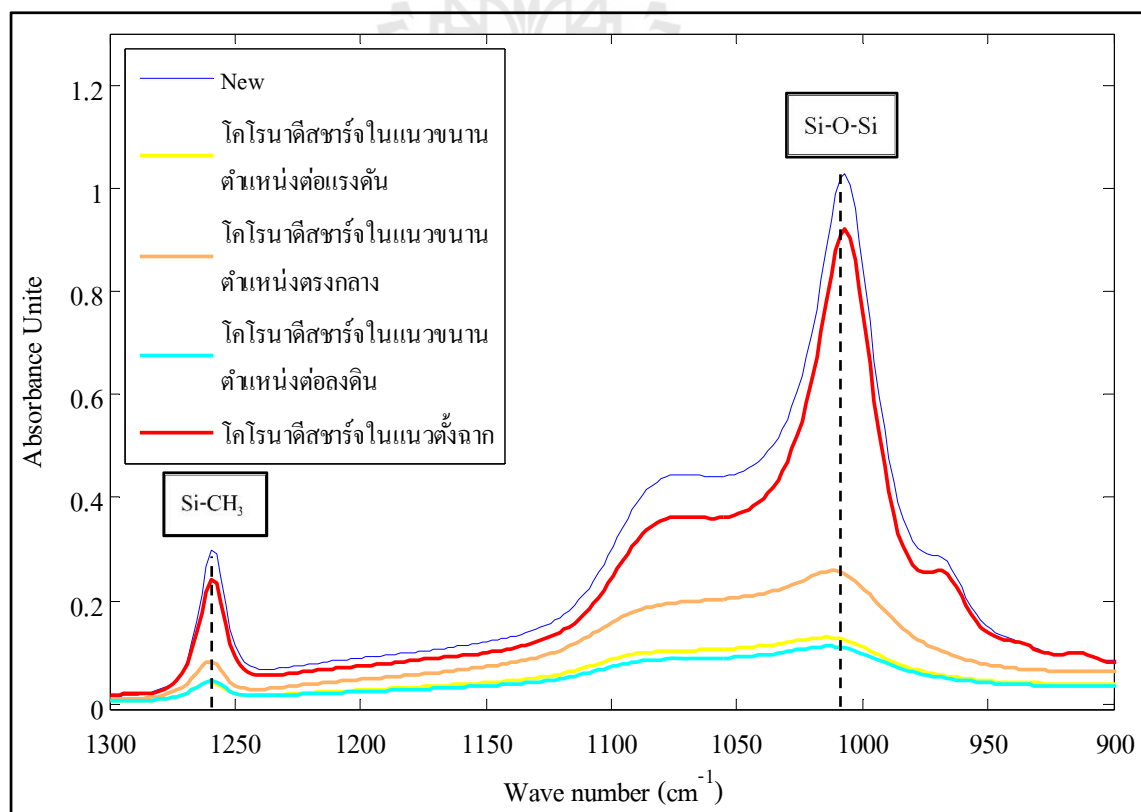
รูปที่ 6.47 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A



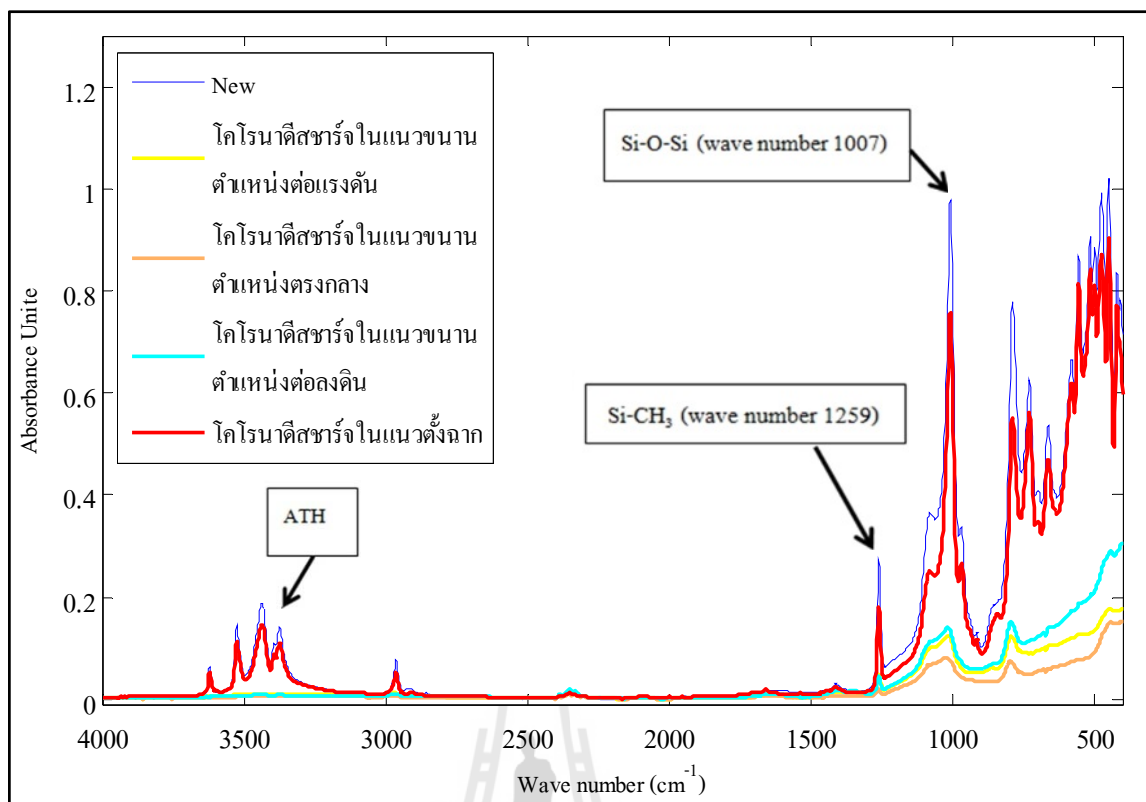
รูปที่ 6.48 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด A ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



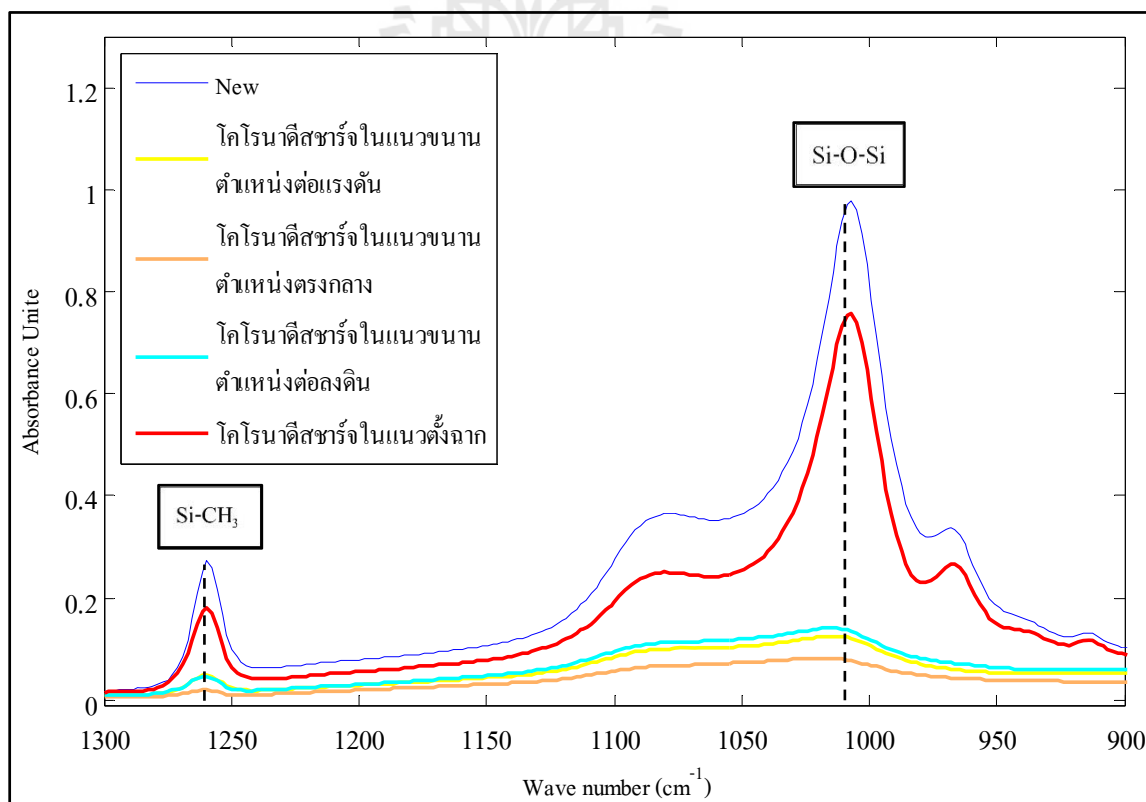
รูปที่ 6.49 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B



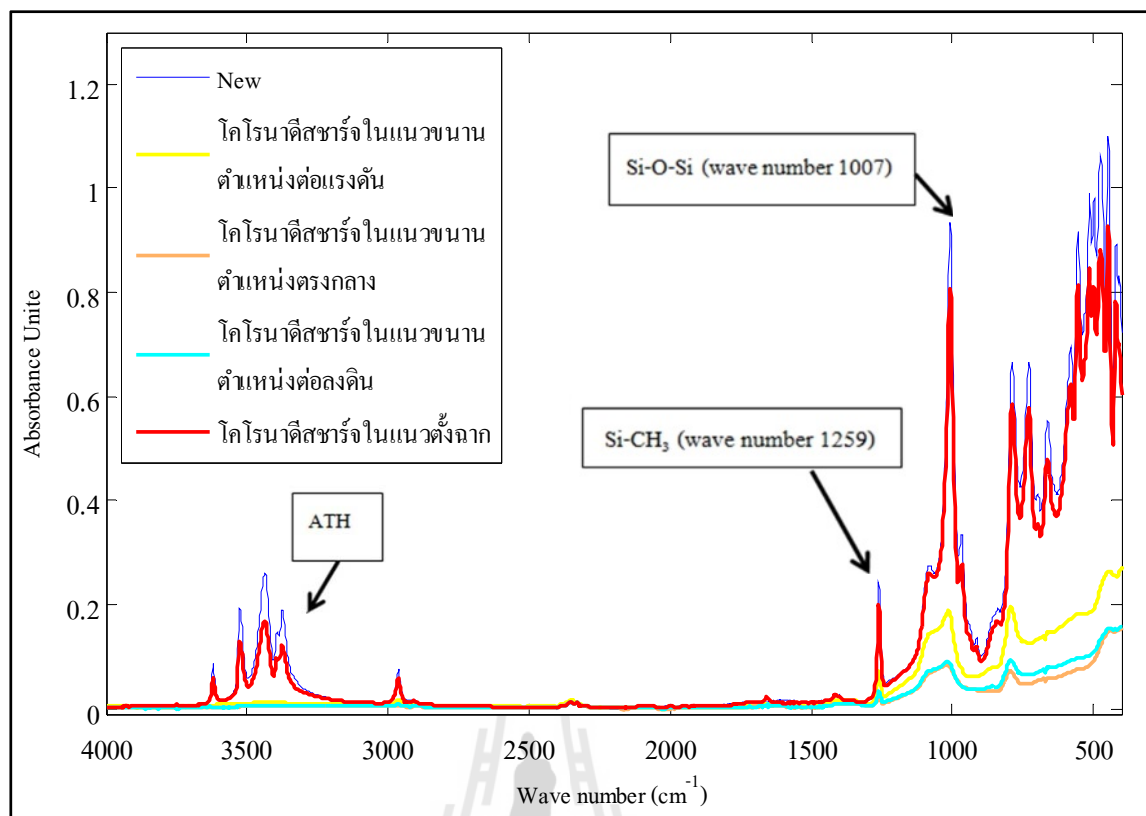
รูปที่ 6.50 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด B ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



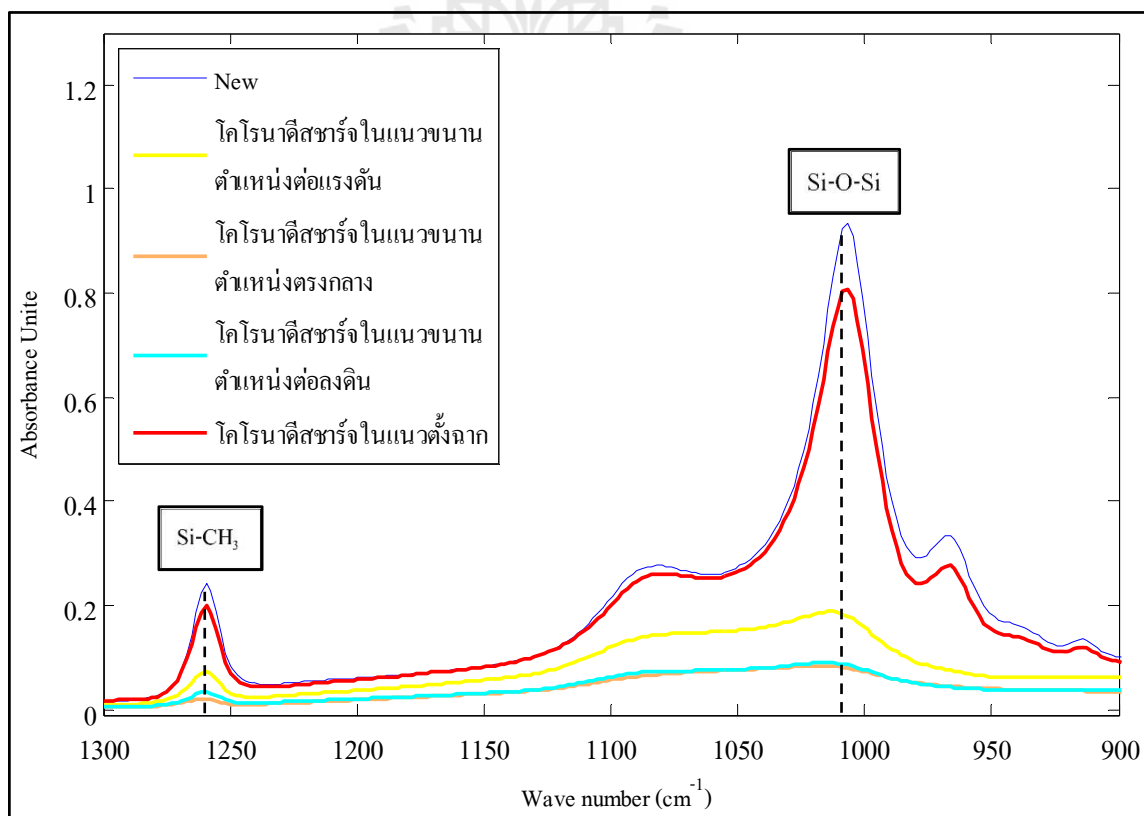
รูปที่ 6.51 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C



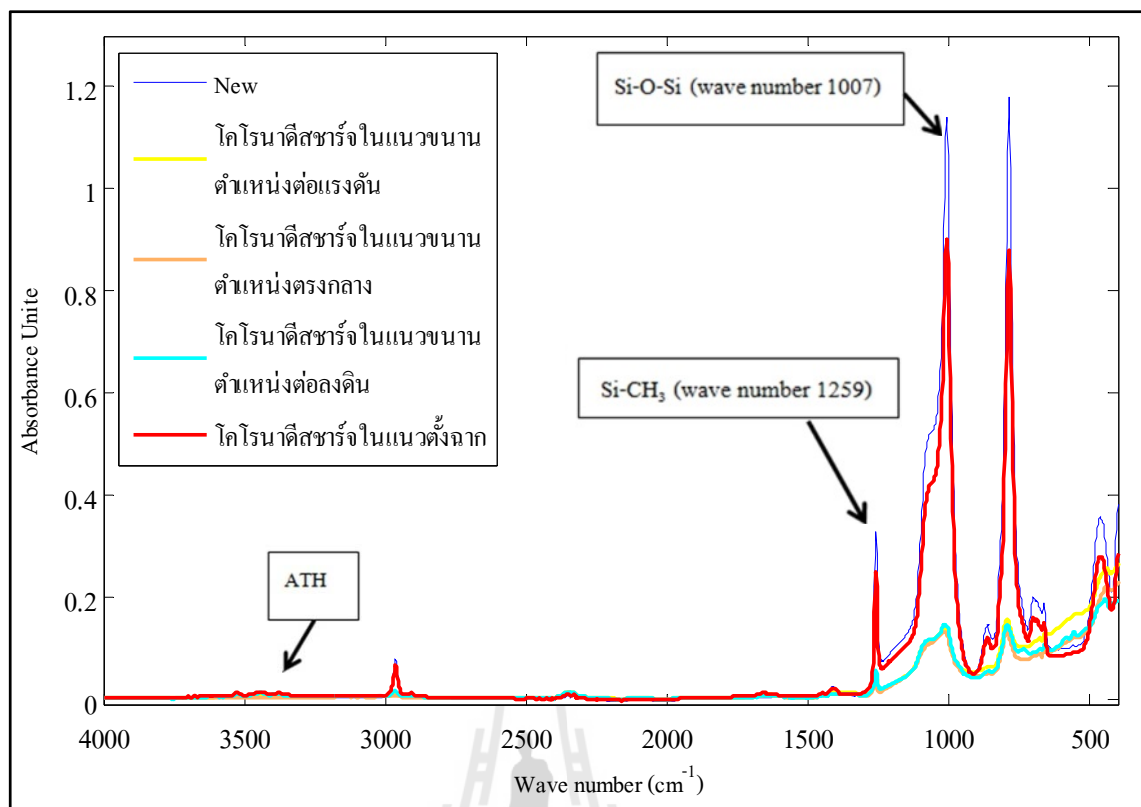
รูปที่ 6.52 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด C ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



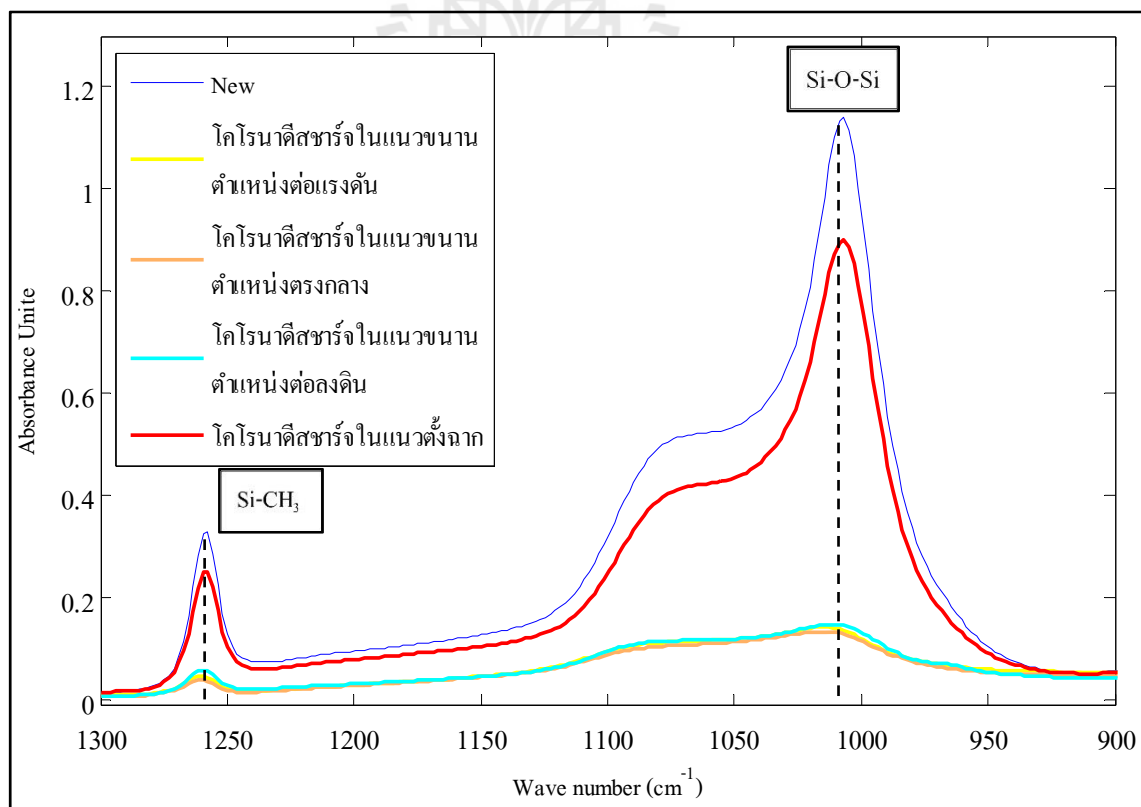
รูปที่ 6.53 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D



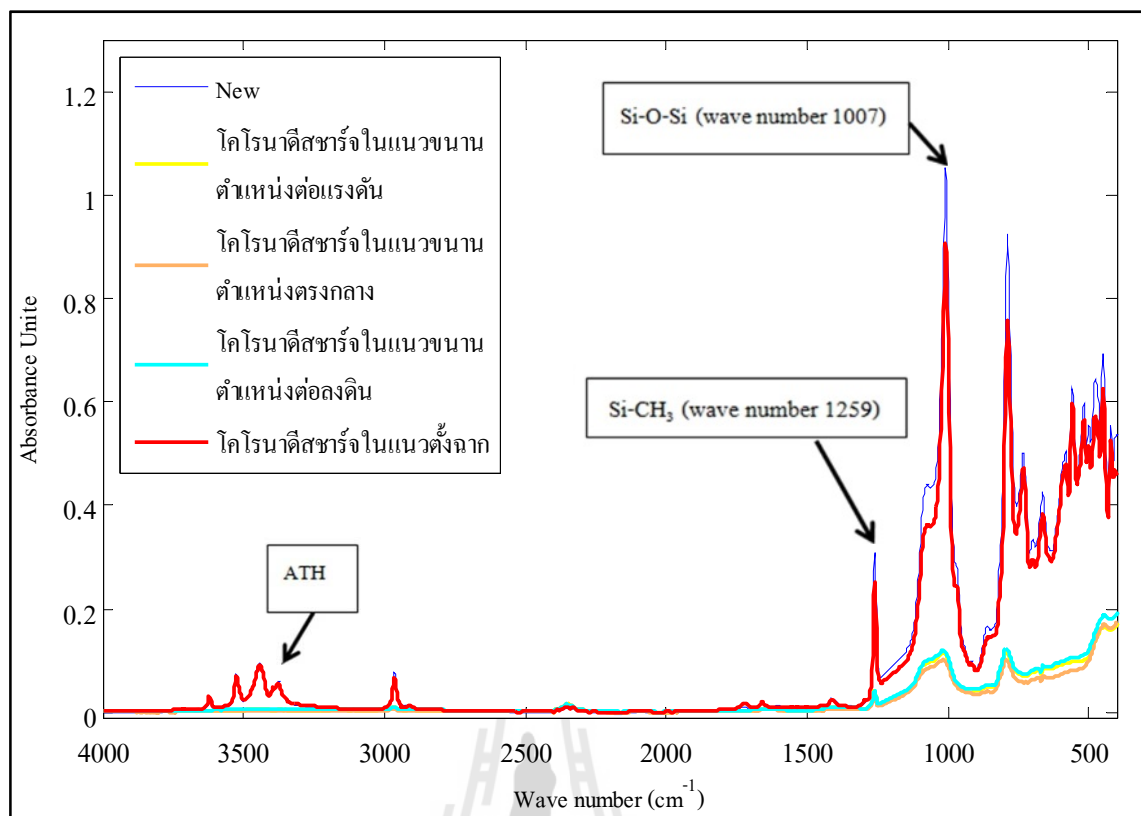
รูปที่ 6.54 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด D ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



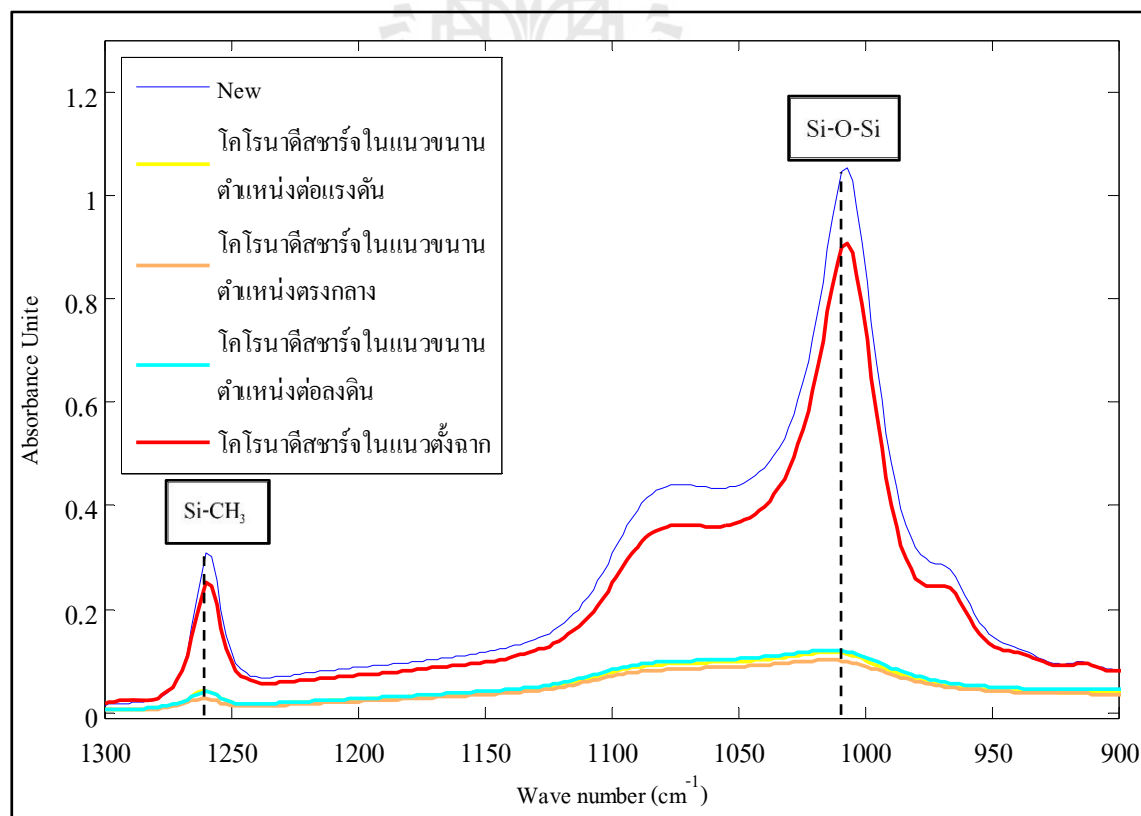
รูปที่ 6.55 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E



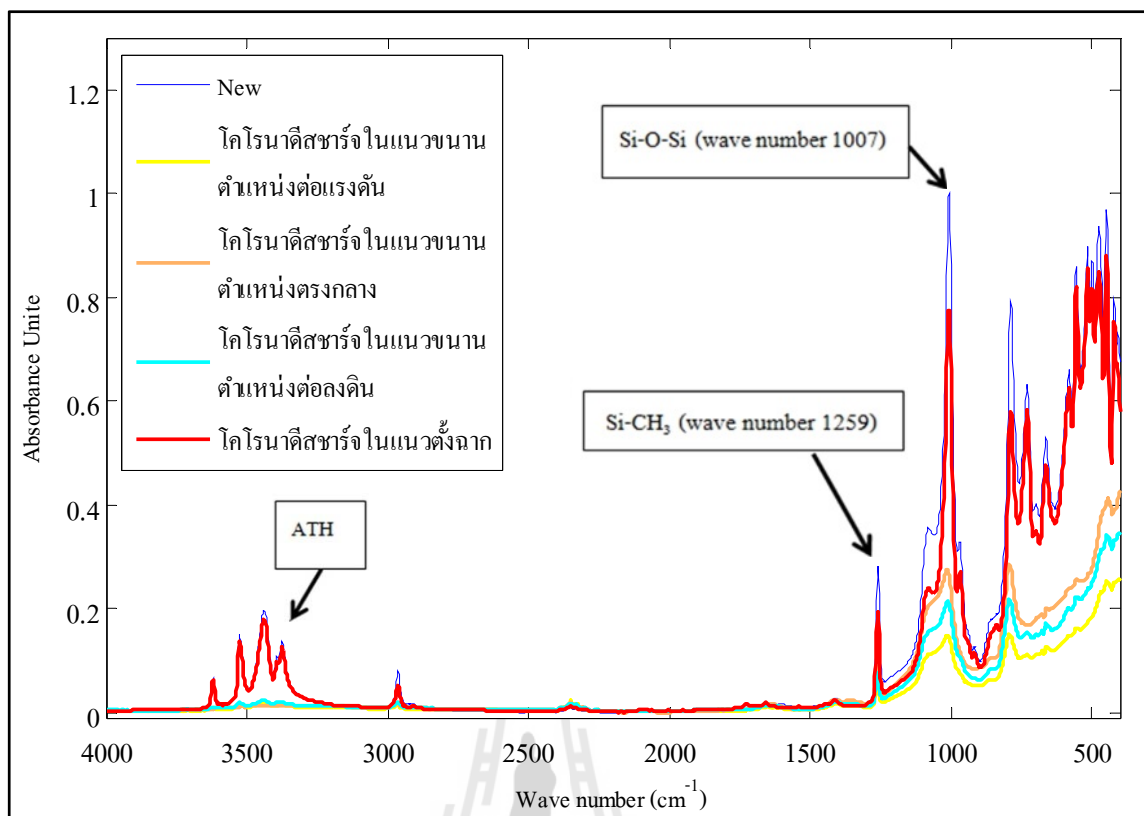
รูปที่ 6.56 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด E ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



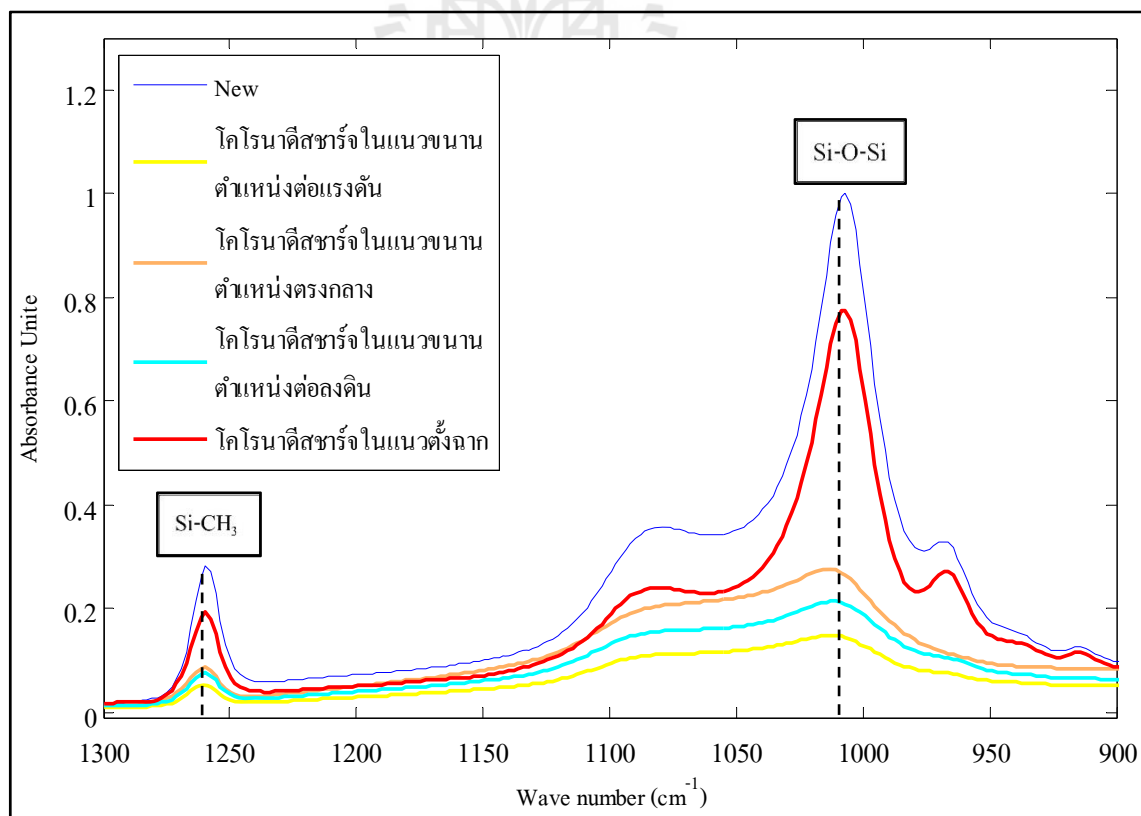
รูปที่ 6.57 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F



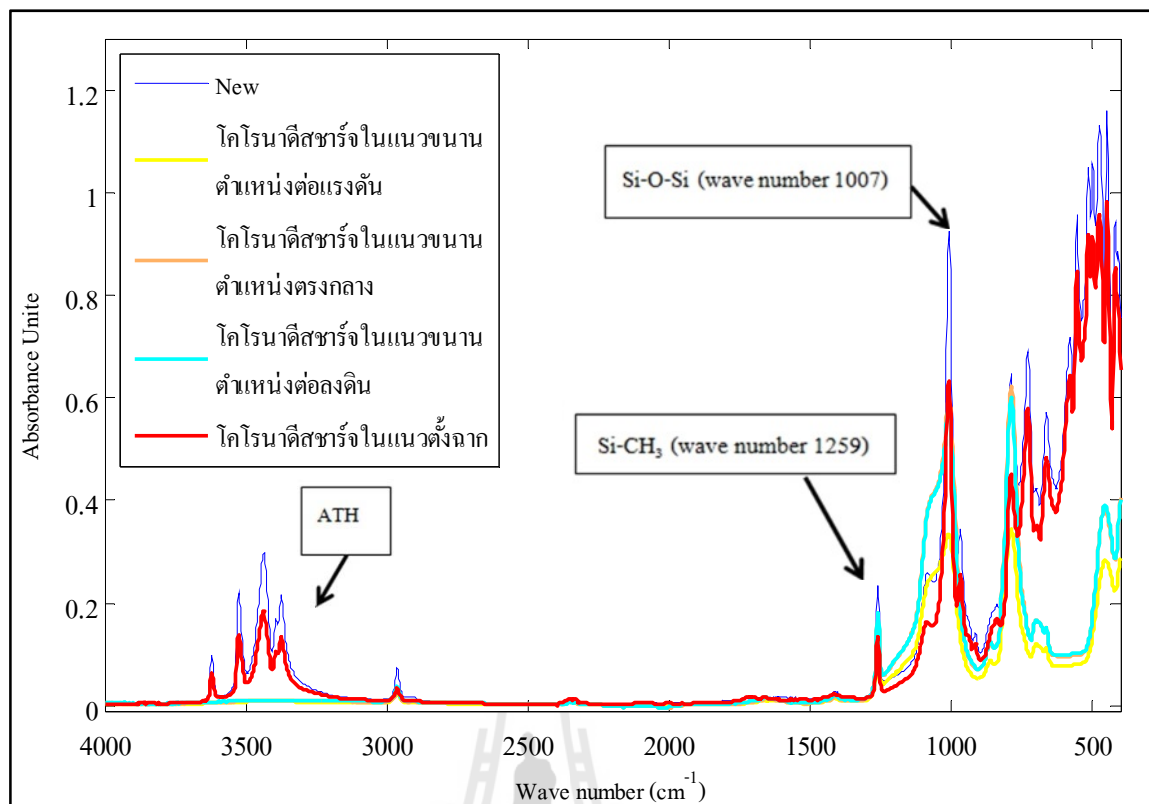
รูปที่ 6.58 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด F ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



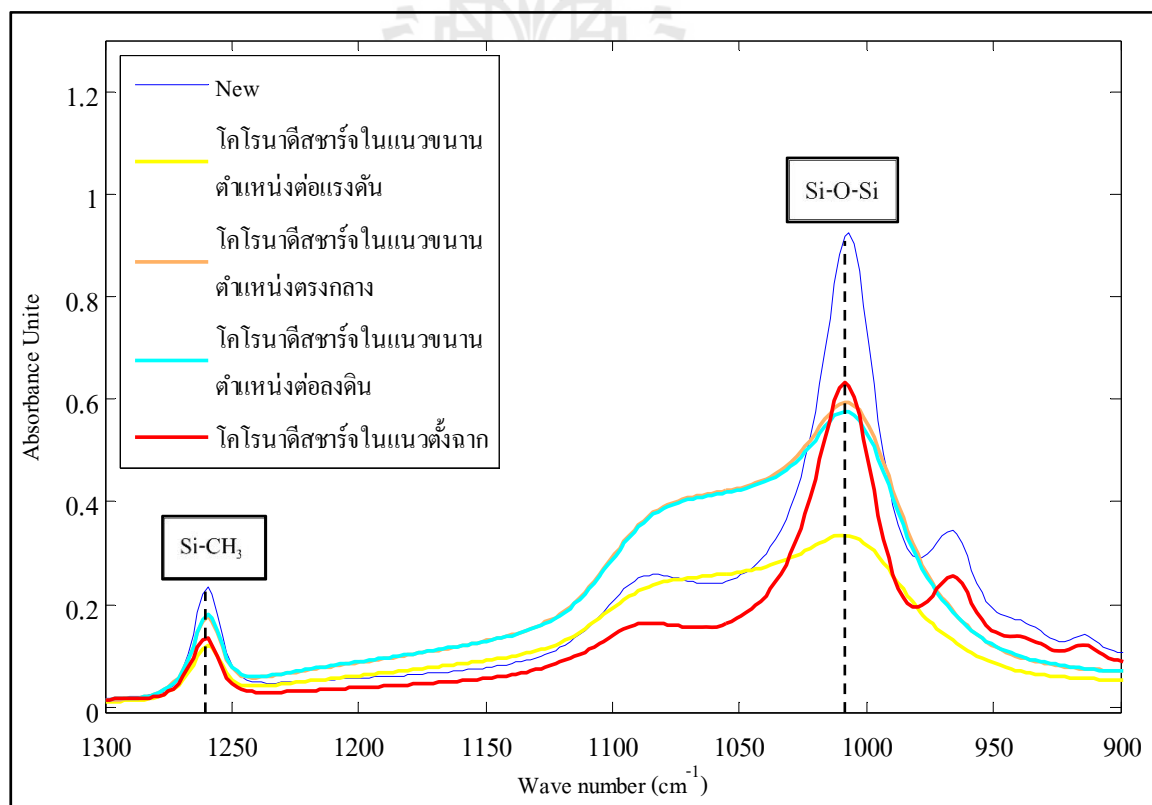
รูปที่ 6.59 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G



รูปที่ 6.60 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด G ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}



รูปที่ 6.61 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H



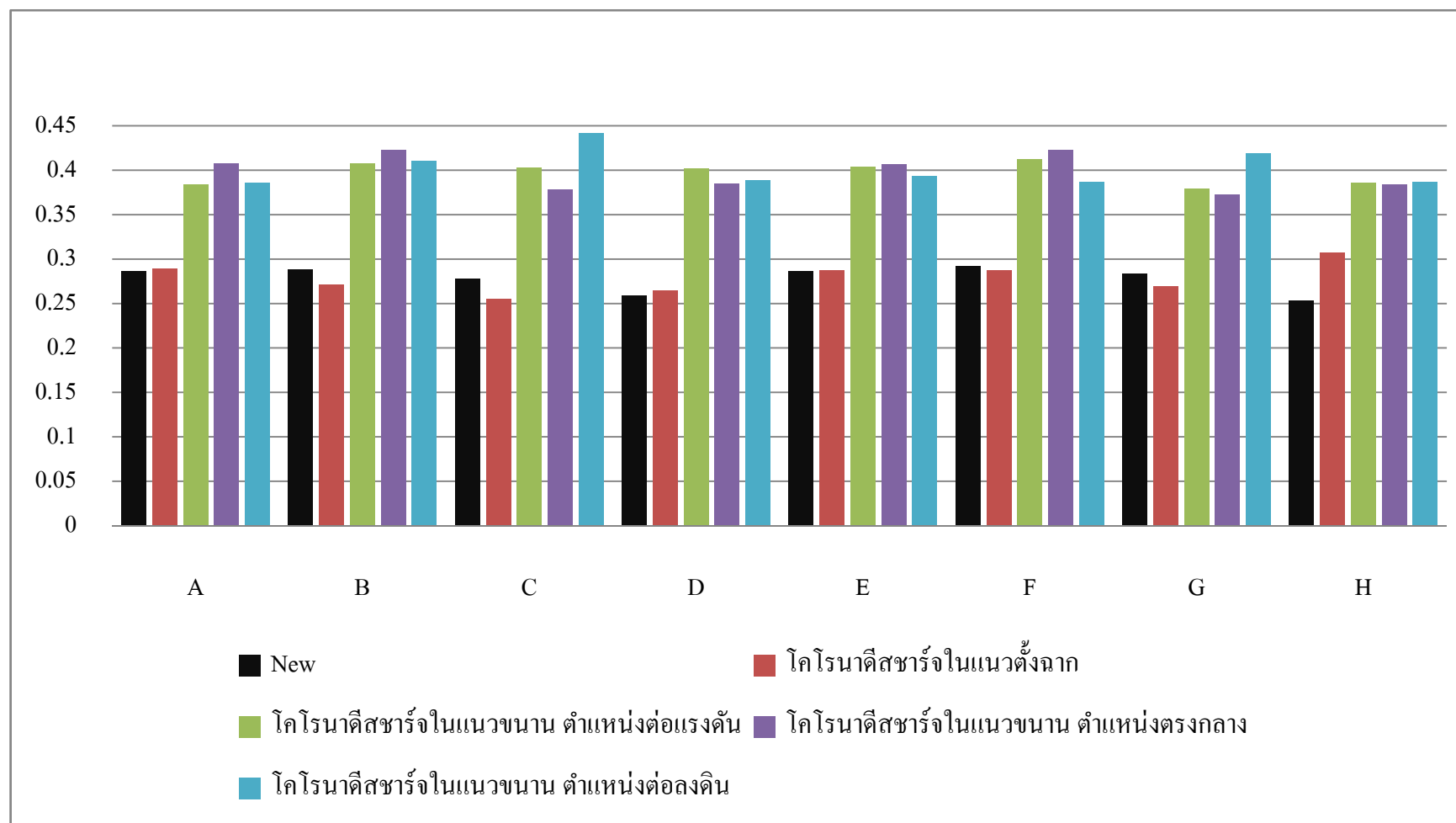
รูปที่ 6.62 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุทดสอบชนิด H ขยายไปที่ Wave number 900-1300 cm^{-1}

การลดลงของอินฟราเรดสเปกตรัมหลังการทดสอบเกิดจากความร้อนจากดีสชาร์จทางไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-O คือการแตกหักหรือแยกตัวของสายโซ่หลัก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพันธะ Si-CH₃ คือการสลายตัวของสายโซ่ข้าง เมื่อเกิดการแตกตัว ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนและน้ำเข้ามาแทนที่ ยางซิลิโคนจึงกลายเป็นมีคุณสมบัติชอบน้ำ เมื่อ Si-CH₃ มีปริมาณลดลงและ Si-O มีปริมาณเพิ่มขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยางซิลิโคน ถ้าค่ายอดของพันธะเปลี่ยนไปมาก ๆ เมื่อเทียบกับก่อนการทดสอบ นั้นหมายถึงเกิดการเสื่อมอายุมาก

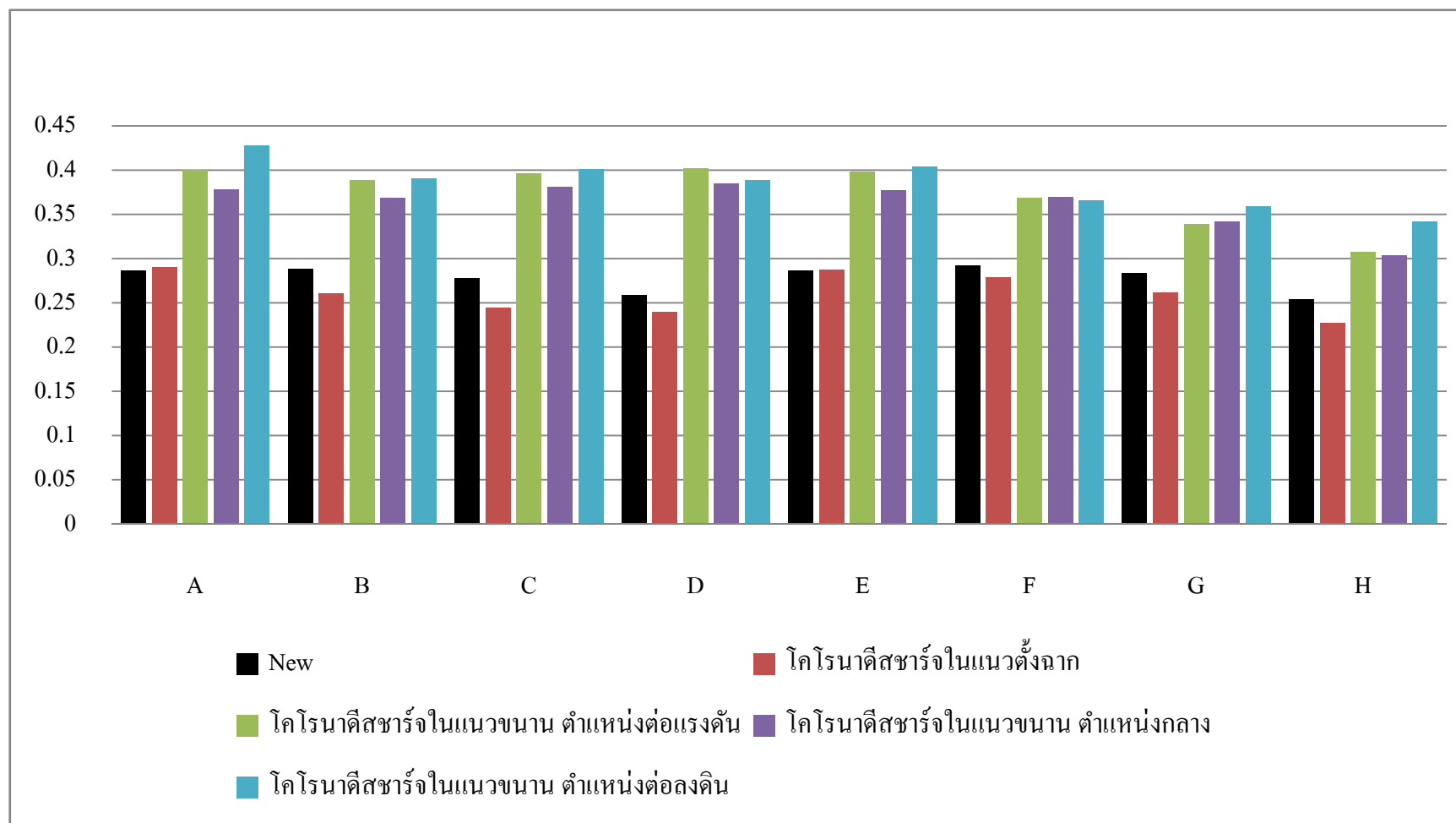
จากกราฟหลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก หมอกสะอาด และหมอกไอเกลือ พบว่า ค่ายอดของพันธะ Si-O-Si(1007 cm⁻¹) และ Si-CH₃(1259cm⁻¹) ของแผ่นฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบ มีค่ายอดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ จากวัสดุทดสอบชนิด A ถึงวัสดุทดสอบชนิด H มีค่ายอดของกราฟต่างกันตามสภาวะการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6.15 ถึงรูปที่ 6.62 โดยที่วัสดุทดสอบชนิด A พบความเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เนื่องจากค่ายอดลดลงอย่างชัดเจนในทุกกรณี และพบว่าวัสดุทดสอบชนิด H ค่ายอดของกราฟมีความเปลี่ยนแปลงจากก่อนการทดสอบน้อยที่สุด และยังพบอีกว่าบริเวณด้านต่อแรงดันมีค่ายอดลดลงมากที่สุด รองลงมาคือด้านต่อลงดิน และด้านกลางยังพบว่าช่วงพันธะ OH (3700-3200 cm⁻¹) ใน ATH ของวัสดุทดสอบทุกชนิดก็มีเส้นกราฟลดลงด้วยเช่นกัน สาเหตุการลดลงของพันธะ OH ใน ATH จากพื้นผิวของยางซิลิโคนอาจเกิดจากปฏิกิริยาการดึงน้ำออกจากโมเลกุล เนื่องมาจากผิวของฉนวนยางซิลิโคนได้สัมผัสกับความร้อนที่เกิดจากการดีสชาร์จเป็นเวลานาน

ค่ายอดของวัสดุทดสอบ A ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในทุกการทดสอบ บอกได้ว่าวัสดุทดสอบชนิด A นั้นเกิดการเสื่อมอายุได้ง่ายกว่าวัสดุทดสอบชนิดอื่น ๆ เมื่อเทียบกับวัสดุทดสอบชนิดอื่นที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มากกว่า โดยเฉพาะที่การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือ จากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน กราฟเกือบเป็นเส้นตรง ทั้งบริเวณด้านรับแรงดันตรงกลาง และด้านหมอกไอเกลือ ไม่เหมือนกับวัสดุทดสอบชนิด H ที่พบว่า ค่ายอดลดลงมาเพียงเล็กน้อย ยกเว้นที่การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือที่พบว่าค่ายอดลดลงมาครึ่งหนึ่งจากก่อนการทดสอบ และที่ผลของโคโรนาในแนวนาน

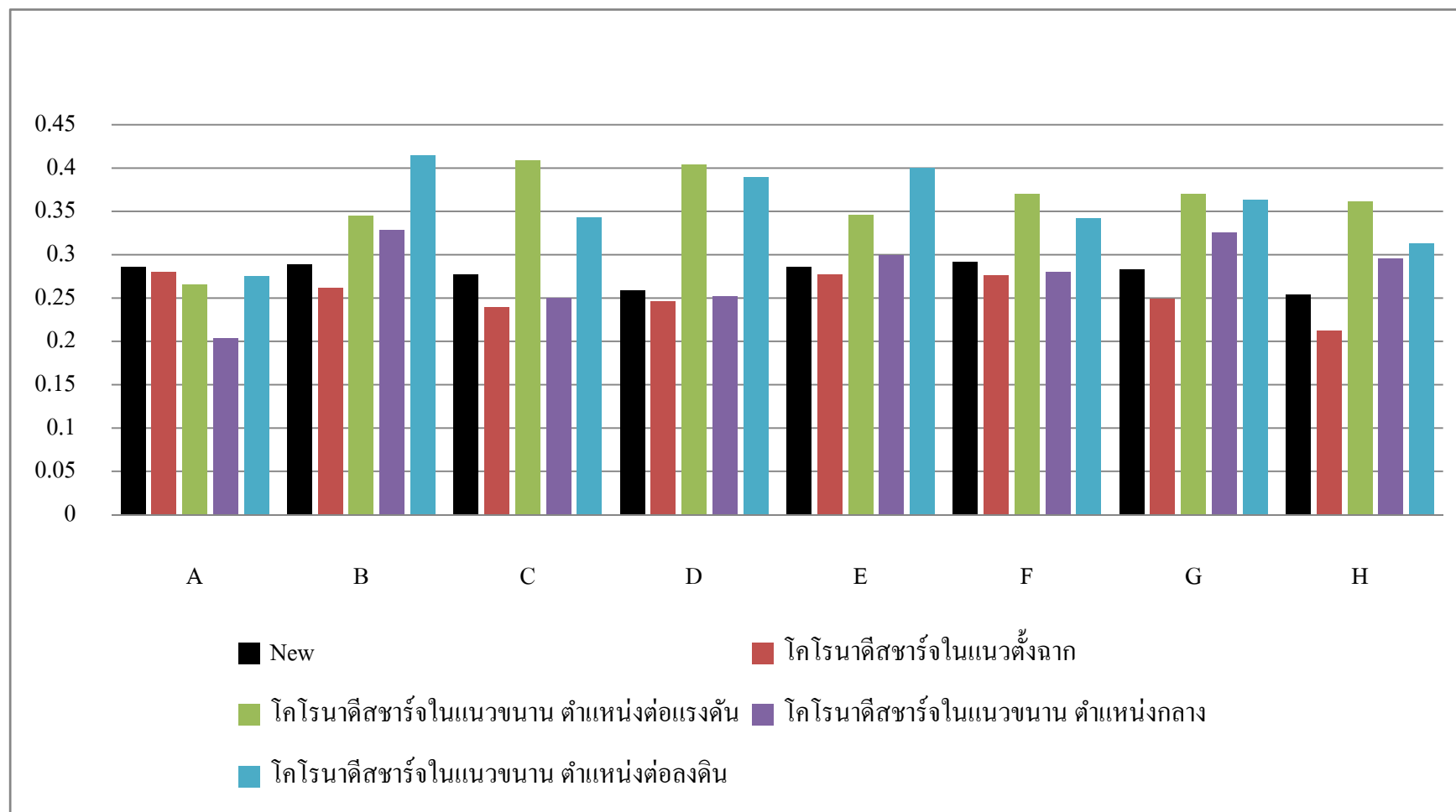
เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ในรูปของตัวเลข Absorbance ของพันธะ Si-CH₃ และพันธะ Si-O-Siโดยการนำค่าของพันธะ Si-CH₃หารด้วยค่าพันธะ Si-O-Siให้อยู่ในรูปอัตราส่วน [(Si-CH₃)/(Si-O-Si)]หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในทุกสภาวะ จากการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O-Si) ของฉนวนยางซิลิโคนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ เนื่องจากโซ่หลักถูกตัดทอนลง บริเวณดังกล่าวจึงเกิดการเสื่อมอายุแสดงกราฟอัตราส่วน (Si-CH₃)/(Si-O-Si) ของการทดสอบในกรณีต่าง ๆ ดังรูปที่ 6.63 ถึง รูปที่ 6.65



รูปที่ 6.63 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O-Si})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก



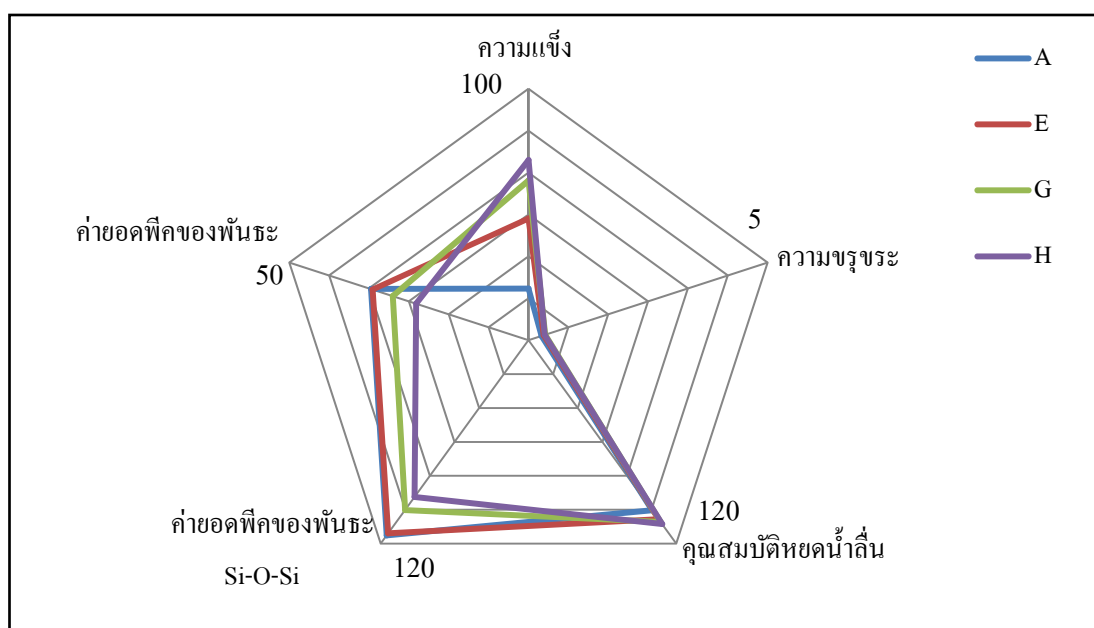
รูปที่ 6.64 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O-Si})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาด



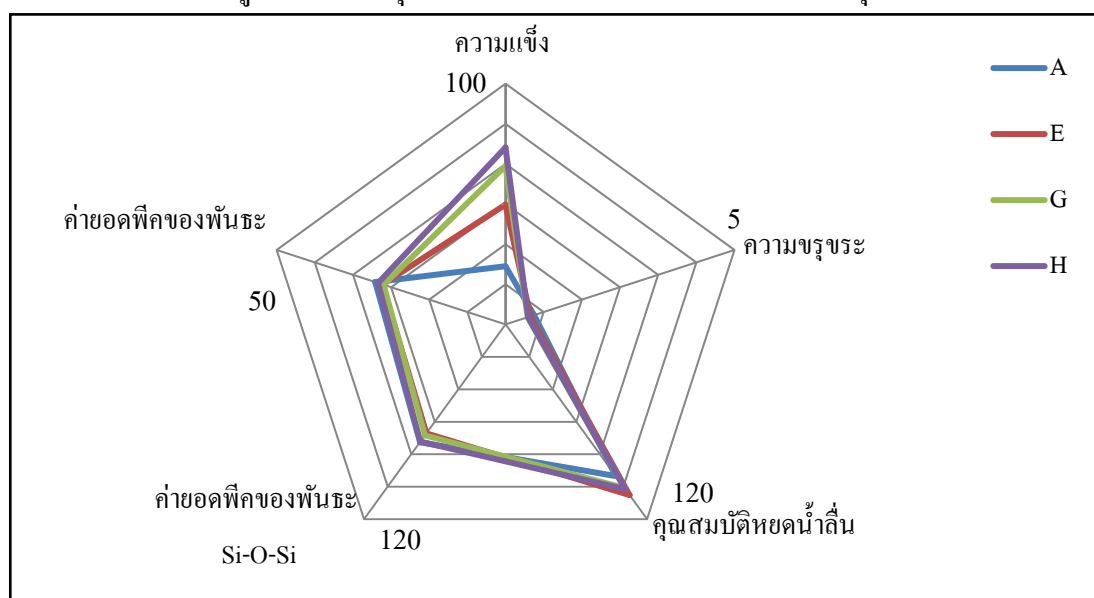
รูปที่ 6.65 อัตราส่วน $(\text{Si-CH}_3)/(\text{Si-O-Si})$ ของฉนวนยางซิลิโคนหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือ

6.4 ผลของปริมาณ ATH และการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกาต่อการเสื่อมอายุ

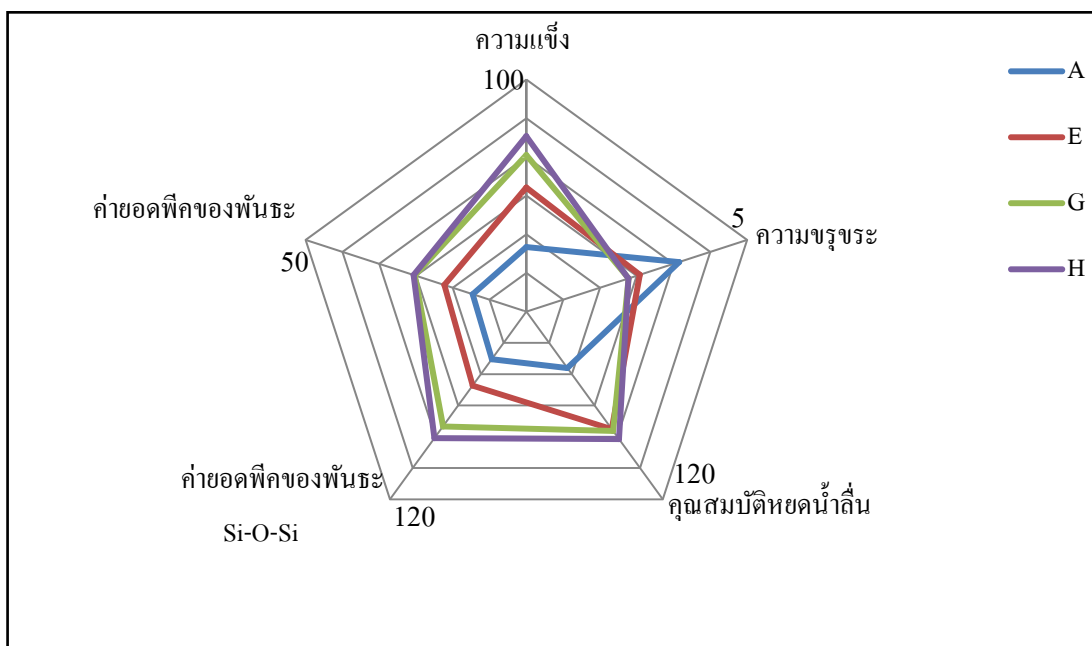
หลังจากได้ผลการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิดในสภาวะต่าง ๆ กัน พบว่าจากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งจากมีความเปลี่ยนแปลงจากก่อนการทดสอบน้อยมาก ในทุกสภาวะ แต่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน พบว่าคุณสมบัติต่าง ๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยแสดงความสัมพันธ์ของวัสดุทดสอบที่มีการเติม ATH และการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา ดังรูปที่ 6.66 ถึงรูปที่ 6.79



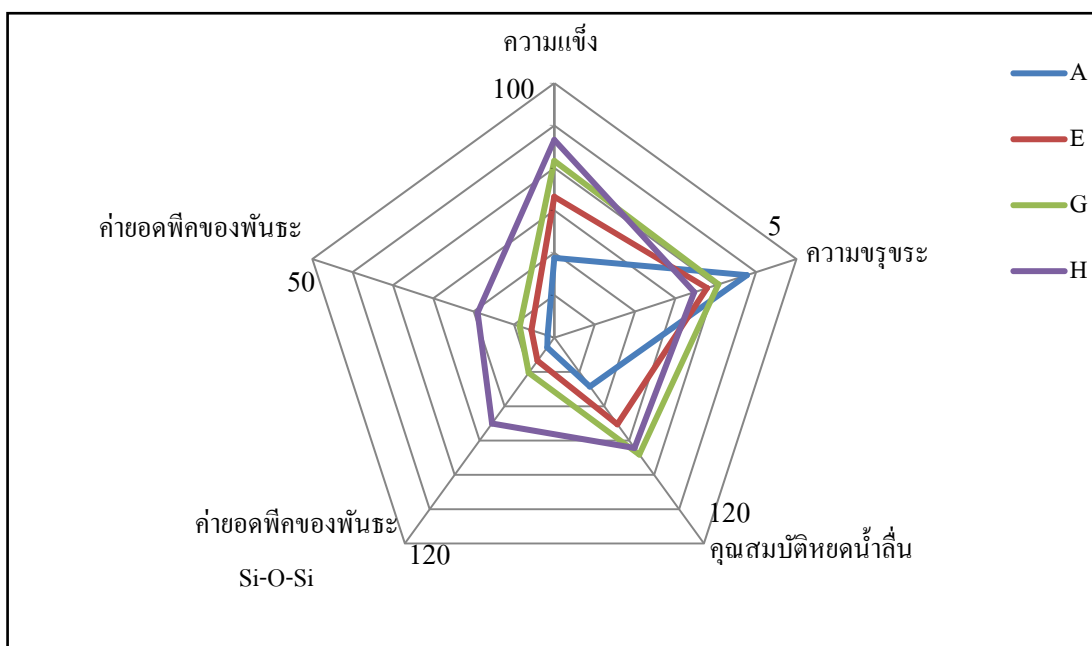
รูปที่ 6.66 วัสดุทดสอบก่อนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ



รูปที่ 6.67 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในสภาวะไร้หมอก



รูปที่ 6.68 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกสะอาด



รูปที่ 6.69 วัสดุทดสอบหลังการทดสอบแรงการเสื่อมอายุในสภาวะหมอกไอเกลือ

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6.66 ถึง รูปที่ 6.69 พบว่าก่อนการทดสอบคุณสมบัติหยดน้ำและค่าความขรุขระที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกันในวัสดุทดสอบทุกชนิด แต่พบว่าค่าความแข็งแรงและค่ายอดพีคของพันธะที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุทดสอบ ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับปริมาณของATH ที่ถูกเติมลงไป ในวัสดุทดสอบหลังการทดสอบที่สภาวะไร้หมอก ที่มีเพียงผลจากโคโรนาเท่านั้น พบว่าค่าความแข็งแรง ค่าความขรุขระ ค่าคุณสมบัติหยดน้ำ มีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย วัสดุทดสอบชนิด A และ E ค่า

ยอดของพันธะ Si-O-Si มีค่าลดลงมากกว่าวัสดุทดสอบชนิดอื่น เนื่องจากไม่ได้ทำการเติม ATH ดังรูปที่ 6.67

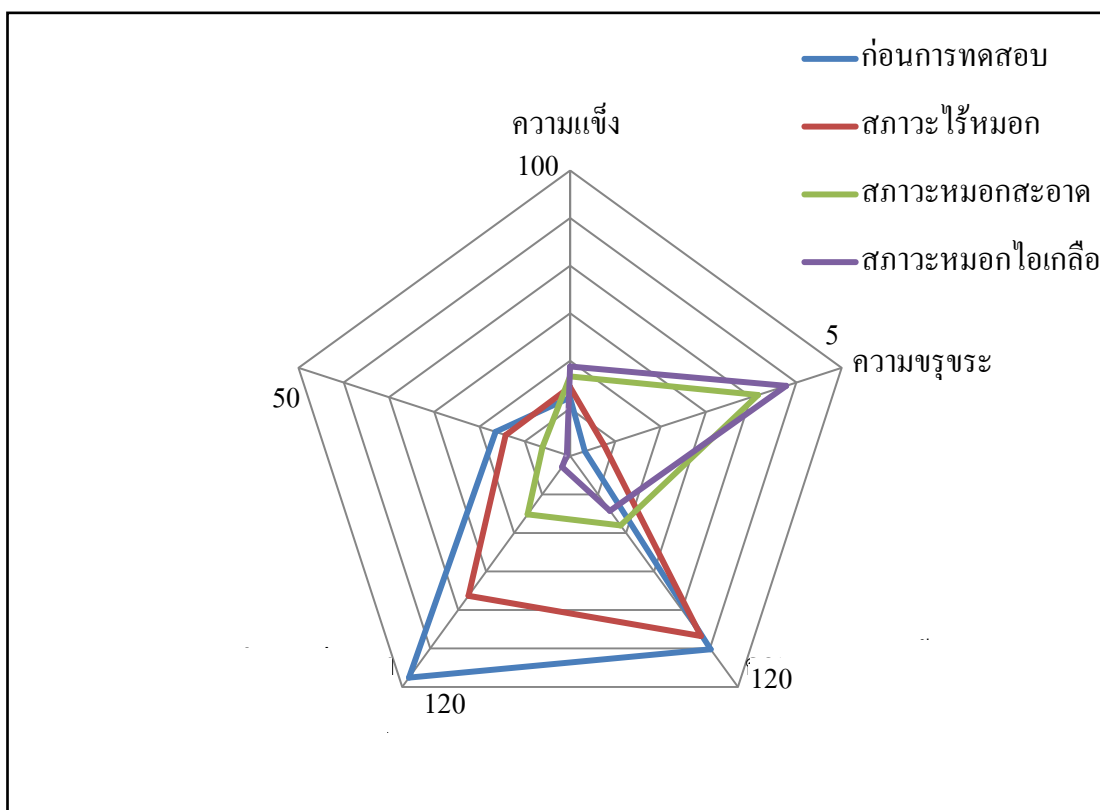
สำหรับสถานะหมอกสะอาด ที่มีผลจากโคโรนาร่วมกับหมอกสะอาด พบว่า ค่ายอดพีคของพันธะ Si-O-Si มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงมาก ทำให้ค่าพันธะ Si-CH₃ และค่าพันธะ Si-O-Si เกิดการแตกตัวทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนและน้ำเข้ามาแทนที่ เมื่อ Si-CH₃ มีปริมาณลดลงและ Si-O-Si มีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติหยดน้ำลดลง ทำให้ความเป็นฉนวนลดลง เกิดการเสื่อมอายุ ผิวยางซิลิโคนจึงเกิดความขรุขระและความแข็งมีค่ามากขึ้น พบว่าวัสดุทดสอบชนิด A และ E มีค่ายอดพีคของพันธะลดลงมากกว่าวัสดุทดสอบ G และ H ดังแสดงในรูปที่ 6.68

สำหรับสถานะหมอกไอเกลือ ที่มีผลของแรงดันโคโรนาร่วมกับหมอกไอเกลือ พบว่าค่าพีคของพันธะทั้งสองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติหยดน้ำลดลง ทำให้ค่าความแข็งและค่าความขรุขระมีค่ามากขึ้นในทุกวัสดุทดสอบ มีเพียงวัสดุทดสอบชนิด H เท่านั้น ที่มีความเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด

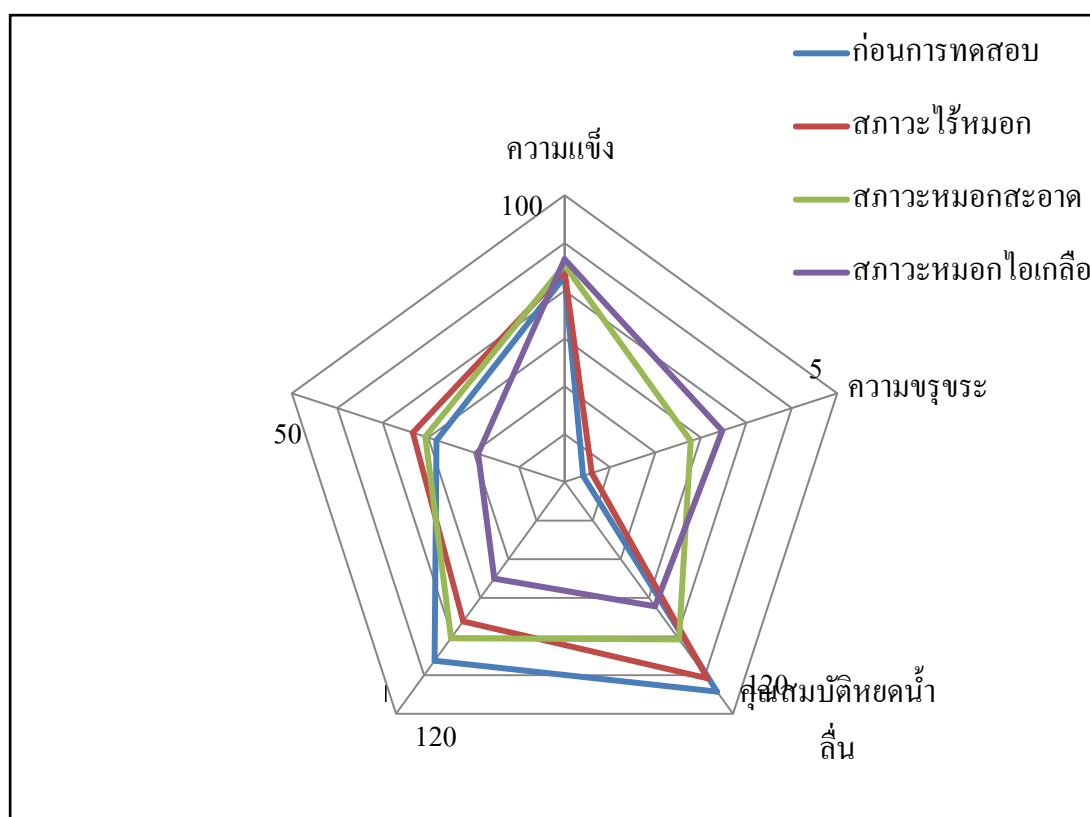
จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้แสดงไว้ในรูป 6.66 ถึง 6.69 พบว่าวัสดุทดสอบชนิด A และ E มีการเสื่อมอายุมากที่สุด โดยที่วัสดุทดสอบ ชนิด E ที่ทำการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา มีการเสื่อมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุทดสอบชนิด A ที่ไม่ได้ทำการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา (Marungsri, B., 2005) แต่ที่วัสดุทดสอบชนิด H ที่ทำการเติม ATH มากกว่าวัสดุทดสอบชนิดอื่น มีค่ายอดของพันธะลดลงน้อยกว่า ค่าความแข็ง ค่าความขรุขระ และคุณสมบัติหยดน้ำลดลงไปน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่น จึงสรุปได้ว่าการเติม ATH และการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกาช่วยให้ยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุได้ช้ากว่าวัสดุทดสอบที่ไม่ได้เติม ATH และไม่ได้ทำการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา

6.5 ผลของสถานะในการเร่งการเสื่อมอายุของวัสดุทดสอบที่มีการเติม ATH และการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา

จากวัสดุทดสอบชนิด A ที่ไม่มีการเติม ATH และไม่ได้ทำการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา และวัสดุทดสอบชนิด H ที่ทำการเติม ATH และทำการทรีสต์เมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุใน 3 สถานะ ผลการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของวัสดุทดสอบชนิด A และ H ดังแสดงในรูปที่ 6.70 และรูปที่ 6.71



รูปที่ 6.70 กราฟความสัมพันธ์ของวัสดุทดสอบชนิด A



รูปที่ 6.71 กราฟความสัมพันธ์ของวัสดุทดสอบชนิด H

จากกราฟพบว่าที่วัสดุทดสอบชนิด A ค่าของฟังก์ชันของพันธะ Si-O-Si มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับก่อนการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ซึ่งค่าที่ลดลงบอกได้ว่าวัสดุทดสอบเกิดการเสื่อมอายุขึ้น โดยที่สภาวะไร้หมอก ค่าพันธะ Si-O-Si ลดลงเหลืออยู่ร้อยละ 63.05 สภาวะหมอกสะอาดค่าพันธะลดลงมากกว่าเดิม เหลือร้อยละ 26.37 หมอกไอเกลือลดลงมากที่สุดจนเกือบเป็นเส้นตรง เหลือเพียงร้อยละ 4.96 จากก่อนการทดสอบ การเสื่อมอายุของวัสดุทดสอบทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น โดยที่สภาวะไร้หมอกมุมสัมผัสลดลง เหลือร้อยละ 93.09 ที่สภาวะหมอกสะอาดมุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเหลือเพียงร้อยละ 35.89 และในสภาวะหมอกไอเกลือมุมสัมผัสลดลงมากที่สุด เหลือเพียงร้อยละ 28.38 การเสื่อมอายุยังทำให้ค่าความแข็งและค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ส่วนวัสดุทดสอบชนิด H ค่าของคุณสมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนไปน้อยกว่าวัสดุทดสอบชนิด A ค่าของฟังก์ชันของพันธะ Si-O-Si มีค่าลดลงเล็กน้อย โดยที่สภาวะไร้หมอก ค่าพันธะลดลง เหลือร้อยละ 78.02 ที่สภาวะหมอกสะอาด เหลือร้อยละ 87.38 และสภาวะหมอกไอเกลือ เหลือร้อยละ 54.06 การเปลี่ยนแปลงของค่าฟังก์ชันของพันธะ Si-O-Si ทำให้คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นลดลง ซึ่งในสภาวะไร้หมอกค่ามุมสัมผัสลดลงเล็กน้อย เหลือร้อยละ 93.67 ส่วนสภาวะหมอกสะอาดค่ามุมสัมผัสเริ่มมีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้น มุมสัมผัสลดลงเหลือร้อยละ 75.11 และในสภาวะหมอกไอเกลือค่ามุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงมากที่สุด มุมสัมผัสหยดน้ำลดลงเหลือร้อยละ 59.29 และยังพบว่าค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงก่อนการทดสอบ ส่วนค่าความขรุขระมีค่าเพิ่มขึ้นมากในสภาวะหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือเท่านั้น เห็นได้ว่าหลังจากทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นเวลา 1000 ชั่วโมงเท่า ๆ กัน วัสดุทดสอบที่มีการเติม ATH และทำการทรีตเมนต์ด้วยฝุ่นผงซิลิกา สามารถชะลอการเสื่อมเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้อย่างชัดเจน

6.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมี หลังการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก หมอกสะอาด และ หมอกไอเกลือ แต่ละสภาวะเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โดยสรุปเป็นกรณีดังนี้

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสภาวะไร้หมอกผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก และผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน พบว่ามีความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นยังอยู่ในระดับ HC1 เมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยเทคนิคATR-

FTIR พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเชิงปริมาณที่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน โดยโซ่หลักและโซ่ข้างลดลงจากเดิมเล็กน้อย จึงสามารถกล่าวได้ว่ายางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอกสะอาดจากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากไม่พบความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่น การกัดกร่อน พบเพียงคราบรอยน้ำเกาะบนแผ่นยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด เมื่อเช็ดทำความสะอาดก็ไม่พบรอยคราบติดอยู่ ค่าความแข็งและค่าความขรุขระมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย การวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำลื่นก็ยังคงอยู่ในระดับเดิม แต่จากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานพบว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุทดสอบชนิด A มีร่องรอยการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพทั่วบริเวณ และพบการกัดกร่อนเป็นร่องลึกมากที่สุด ตรวจสอบได้จากค่าความขรุขระ และค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วนคุณสมบัติหยดน้ำลื่นพบว่าวัสดุทดสอบชนิด A มีระดับความไม่ชอบน้ำอยู่ในช่วง HC3 แต่ในวัสดุทดสอบ B-H ยังพบว่าคุณสมบัติหยดน้ำลื่น ยังอยู่ในช่วง HC2-HC3เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า แผ่นฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านข้างข้อต่อแรงดันไฟฟ้ามียอดกราฟลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณตรงกลางและด้านข้างต่อลงดิน

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนสภาวะหมอกไอเกลือ ที่ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก พบว่าทางกายภาพยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิดเกิดรอยคล้ำจากไอเกลือที่เกาะตามผิวยางซิลิโคน เมื่อเช็ดทำความสะอาดแล้วก็พบคราบติดอยู่ แต่ไม่พบร่องรอยการกัดกร่อนบนผิวยางซิลิโคน ค่าความแข็งและค่าความขรุขระมีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงก่อนการทดสอบ คุณสมบัติหยดน้ำลื่นลดลงแต่ก็ยังคงอยู่ในระดับ HC1แต่จากผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนาน ยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด มีรอยกัดกร่อนไปทั่วบริเวณระหว่างอิเล็กโทรด โดยวัสดุทดสอบชนิด A มีรอยการกัดกร่อนลึกกว่าชนิดอื่น ๆ และพบว่าทั้งด้านต่อแรงดันและด้านต่อลงดินเกิดความเสียหายพอ ๆ กัน เมื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งและค่าความขรุขระพบว่าวัสดุทดสอบชนิด A มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วนคุณสมบัติหยดน้ำลื่นนั้น พบว่าวัสดุทดสอบชนิด A-Fมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยอยู่ในช่วง HC3และวัสดุทดสอบชนิด G-H อยู่ในช่วง HC2-HC3 ซึ่งบอกได้ว่ายางทั้ง 8 ชนิดสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำลื่น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าค่ายอดลดลงมากในวัสดุทดสอบทุกชนิด โดยเฉพาะวัสดุทดสอบ A ค่ายอดของกราฟเกือบเป็นเส้นตรง

จากการวิเคราะห์ผลของโคโรนาในแนวนานทำให้ยางซิลิโคนเสื่อมอายุมากกว่าผลของโคโรนาในแนวตั้งฉาก เนื่องจากความเครียดที่ปลายอิเล็กโทรดมากกว่า ทำให้เกิดการกัดกร่อนมากกว่าจากแผ่นฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 8 ชนิด พบว่าที่วัสดุทดสอบชนิด A ถึงชนิด D มีการเสื่อมอายุมากกว่าวัสดุทดสอบชนิด E ถึงชนิด H หมายความว่า ปริมาณสารเพิ่มคุณสมบัติสามารถเพิ่มความทนทานให้กับยางซิลิโคน ทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีเนื้อหาเกี่ยวกับการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนด้วยการประยุกต์ จากการ ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วย หมอกไอเกลือประดิษฐ์เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบใน 3 สภาวะ คือในสภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะหมอกไอ - เกลือ เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคาร จากผลของความเครียดทางไฟฟ้าและทางสภาวะแวดล้อม ที่กำหนด จากผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปและเสนอแนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไป ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาในการทำงานวิจัย โดยกล่าวถึงความเป็นมาของฉนวนยางซิลิโคน และการนำใช้งานที่แพร่หลายมากขึ้น เมื่อลูกถ้วยยางซิลิโคนเกิดจากความ เปราะเปื้อนจากสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ทำให้มีผลกระทบจากความเครียดทางไฟฟ้า ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุ จึงต้องทำการศึกษาเพื่อเป็นแนวในการทำการทดสอบและการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในการใช้งานให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน เนื่องจากยังมีการวิจัยเกี่ยวกับยางซิลิโคนอยู่น้อย

บทที่ 2 ได้นำเสนองานวิจัยและบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการในการทำการวิจัย โดยประยุกต์จาก วิธีที่เคยมีการใช้มาก่อน โดยแสดง ผลการดำเนินงาน และ ข้อเสนอแนะของคณะนักวิจัยที่เคยมีการดำเนินการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 3 ได้นำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและเป็นแนวทางในการทำการทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน กล่าวถึง โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี และปัจจัยที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุ รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำฉนวนยางซิลิโคนที่มีการเสื่อมอายุ

บทที่ 4 ได้นำเสนอขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุฉนวนยางซิลิโคนและชุดวัดมุมสัมผัส โดยออกแบบชุดทดสอบ ได้แก่ ชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะไร้หมอก และชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะ มีหมอก (หมอกสะอาดและหมอกไอเกลือ) โดยอธิบายส่วนประกอบและโครงสร้างต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบ และยังทำการออกแบบและสร้างชุดวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำฉนวนคือชุดวัดมุมสัมผัส ซึ่ง

จะเป็นหนึ่งในการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน โดยออกแบบอ้างอิงมาจาก
มาตรฐาน IEC/TS 62073

บทที่ 5 ได้นำเสนอการเตรียมการทดสอบ การเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ การ
ทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ในสภาวะไร้หมอก สภาวะหมอกสะอาด และสภาวะ
หมอกไอเกลือ สภาวะละ 1000 ชั่วโมง โดยประยุกต์มาจาก มาตรฐาน IEC Publ. 61109 โดยวัสดุ
ทดสอบที่ใช้ เป็นแผ่นฉนวนยางซิลิโคนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน หลังจากการทดสอบ
เสร็จสิ้นลง วัสดุทดสอบทั้งหมดถูกนำไปวิเคราะห์ผล โดยเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนก่อน
การทดสอบ เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุทั้งทางกายภาพและทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน ที่
เกิดขึ้น

บทที่ 6 ได้นำเสนอการวิเคราะห์เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีของฉนวนยาง
ซิลิโคน หลังการทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 3 สภาวะ

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ เป็นการ สังเกตฉนวนยางซิลิโคนด้วยสายตา พบว่า
เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นในระหว่างการทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยาง -
ซิลิโคนสภาวะหมอกสะอาดและสภาวะหมอกไอเกลือ พบการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ บน
ผิวของยางซิลิโคน A-H และยังพบคราบสกปรกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวยางซิลิโคนหลังจากเร่งการเสื่อม
อายุ และในสภาวะไร้หมอกพบเพียงแสงโคโรนาสีน้ำเงินเท่านั้น ไม่เกิดการดีสชาร์จที่ผิวของยาง -
ซิลิโคน เมื่อวัดค่า ความแข็ง ของบางซิลิโคนหลังการทดสอบพบว่ามีค่า เพิ่มขึ้น ตรวจสอบ โดยใช้
เครื่องมือวัดค่าความแข็ง ด้วยหัววัดแบบ shore a และวัดค่าความขรุขระที่เปลี่ยนไปจากการเกิดร่อง
ผิวเสื่อมสภาพ ด้วยเครื่องมือวัดความขรุขระ และทำการตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลง ของคุณสมบัติ
หยดน้ำลื่น ด้วยการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ โดยอ้างอิงจากคู่มือ STRI และมาตรฐาน IEC/TS
62073 นอกจากนี้การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง ATR-FTIR เพื่อหาโครงสร้างพันธะ
เคมีเปลี่ยนแปลงของยางซิลิโคนหลังการ เร่งเสื่อมอายุ พบว่า ปริมาณพันธะของ Si-CH_3 และ
 Si-O-Si ลดลงอันเนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน ที่เกิดจากการดีสชาร์จ บนผิวยาง -
ซิลิโคน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อยางซิลิโคน อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีเพียงโคโรนาดีสชาร์จ เป็น
ระยะเวลานาน โดยไม่มีหมอกเกิดขึ้น ทำให้แผ่นยางซิลิโคน เริ่มเกิดการเสียสภาพ แต่ยังไม่สามารถ
ตรวจสอบได้ชัดเจนจากการมองด้วยสายตา ต้องใช้การวัดคุณสมบัติทางเคมีจึงทำให้ทราบว่าแผ่น
ยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุจริง แต่ในสภาวะที่มีหมอกสะอาด หรือหมอกไอเกลือ ทำให้เกิด ดีส
ชาร์จและวาวไฟบนผิวยางซิลิโคนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลยางซิลิโคนเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจาก วาว
ไฟทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป และ เกิด การสึกกร่อนของยางซิลิโ น ฉนวนยางซิลิโคน
เสื่อมสภาพอย่างเห็นได้ชัด

จากบทสรุปที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า ลักษณะการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่วัสดุทดสอบชนิดที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งไม่มีการทรีสเมนต์ด้วยฝุ่นซิลิกาและไม่มีส่วนผสมของ ATH พบว่าจะเกิดการกัดกร่อนและเสียหายมากที่สุด เพราะไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติที่ช่วยในการต้านทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งเป็น ผลกระทบจากความเครียดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ สภาวะความเปราะ เปื้อนประกอบกับความเปียกชื้น การเกิดอาร์กแถบแห้ง การเกิดดีสชาร์จ และความร้อน เป็นปัจจัยที่ทำให้ยางซิลิโคนเสื่อมอายุเร็วมากขึ้น โดยยังพบอีกว่าที่แผ่นฉนวนยางซิลิโคนบริเวณด้านขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้าจะพบการเสื่อมอายุมากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) ในอุปกรณ์ที่ใช้ยึดจับวัสดุทดสอบควรใช้อุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดสนิม เนื่องจาก การทดสอบเร่งเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนในสภาวะหมอกสะอาดและหมอกไอเกลือต้องทำในห้องทดสอบที่มีหมอกอยู่ด้วย ทำให้อุปกรณ์ที่เป็นเหล็กเกิดสนิมได้
- 2) ต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นในแต่ละครั้ง เนื่องจากการทดสอบแต่ละครั้ง ต้องมีคราบสกปรกของฝุ่น คราบน้ำ หรือคราบไอเกลือจับอยู่หลังการทดสอบ
- 3) ในการสร้างชุดวัดมุมสัมผัส ควรใช้กล้องที่สามารถเก็บภาพได้ชัดเจนมากขึ้นเพื่อให้การวัดมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
- 4) ควรพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการหามุมสัมผัสหยดน้ำ ให้มีความแม่นยำ และเป็นระบบอัตโนมัติมากที่สุด เพื่อให้สะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา ได้ให้แนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) นำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน นี้ไปใช้กับอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายชนิดอื่น ๆ เพื่อหาความคงทนของเนื้อสารได้เช่นกัน
- 2) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคน ช่วงเวลาต่าง ๆ กัน เช่น ทำการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนทุก ๆ 1-2 สัปดาห์ จนครบระยะเวลา 1000 ชั่วโมง เป็นต้น
- 3) เมื่อทำการทดสอบกับวัสดุทดสอบหลาย ๆ ชนิด ก็ควรทำการทดสอบให้เฉพาะเจาะจงในแต่ละสภาวะเท่านั้น เพื่อให้ได้การวิเคราะห์ผลการเสื่อมอายุที่ชัดเจนมากขึ้น

รายการอ้างอิง

แม่น อมรสิทธิ์. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.

ตำรวจ ตั้งษ์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).

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.

Amin, M., Akbar, M., and Amin, S. (2007).Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (an overview). **Rev.Adv.Mater.Sci**. 16: 10-26.

Bhushan, B., and Jung, Y.C. (2007).Wetting study of patterned surfaces for superhydrophobicity.**Ultramicroscopy****107**. 1033–1041

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.

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

Delman, A. D., Landy, M., and Simms, B. B. (1969).Photodecomposition of Polydimethylsiloxane.**J. Polym. Sci**. 7(1): 3375-3386.

Du, B. X., Ma, Z. L., Cheng, X. X., and Liu, Y. (2012).Hydrophobicity Evaluation of Silicone Rubber Insulator Using PD-Induced Electromagnetic Wave.**IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 19(3): 1060-1067.

Gubanski, S. M., and Vlastos, A. E.,(1990).Wettability of naturally aged siliconeand EPDM composite insulators.**IEEE Trans. Power Del**.5(3):1527–1535.

Hackam, R. (1999).Outdoor HV composite polymeric insulators.**IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**.6(5): 557-585.

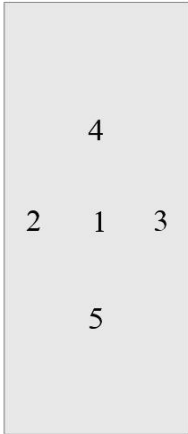
IEC/TS 62073. (2003). **Guide to the measurement of wettability of insulator surface**.

- 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, 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, S. H., Cherney, E. A., and Hackam, R. (1992). Thermal Characteristics of RTV Silicone Rubber Coatings as A Function of Filler Level. **IEEE CEIDP**. 713-718.
- Kim, S. H., Cherney, E. A., and Hackam, R., and Rutherford, K. G. (1994). Chemical Changes at the Surface of RTV Silicone Rubber Coatings on Insulators during Dry Band Arcing. **IEEE Trans.on DEI**. 1(1): 106-123.
- Kumagai, S., and Yoshimura N. (2003). Hydrophobic Transfer of RTV Silicone Rubber Aged in Single and Multiple Environmental Stresses and the Behavior of LMW Silicone Fluid. **IEEE Transection On Power Delivery**. 18(2): 506-516.
- 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., Jayaram, S., and Chemey, E. (2001). Partial discharge patterns for silicone rubber insulators under salt-fog. **IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 452-455.
- Lopes, I., Jayaram, S., and Chemey, E. (2003) Partial discharge measurement as a diagnostic tool of the early ageing of silicone rubber insulation. **IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 202-206.
- Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S. (2005) Effect of Surface Treatment of Fillers on Deterioration of Silicone Rubber Housing Materials in Salt Fog Ageing Test. **Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005). Proceedings of 2005 International Symposium. IEEE**. 556 – 559.
- 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.
- Moreno, V.M., and Gorur, R.S. (1999) Accelerated corona discharge performance of polymer compounds used in high voltage outdoor insulators. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**. 731-734.
- Paoletti, G. J., and Golubev, A. (1999). Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems. **The TAPPI Conference**. 124-138.
- 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.
- Smith, P. J., Owen, M. J., Holm, P. H., and Toskey, G. A. (1992). Surface Study of Corona-treated silicone Rubber High-Voltage Insulation. **IEEE CEIDP**. 829-836.
- STRI Guide. (1992). **Hydrophobicity classification guide**. 92/1.
- Thong-om, S., Payakcho, W., Grasasom, 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**. 533-539.
- Thong-om, S. (2012). **Ageing Characteristic of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulator Under Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test**. Master degree thesis, Suranaree University of Technology.
- Toth, A., et al. (1993). Oxidative Damage and Recovery of Silicone Rubber Surfaces. **J. Polym. Sci.**, 52(1): 1293-1307.
- Vas, J. M., Venkatesulu, B., and Thomas, M. J. (2012). Tracking and erosion resistance of nano-filled silicone rubber for use in high voltage outdoor insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 91-98.
- Xu, Z. (2013) A Static Contact Angle Algorithm for Silicone Rubber Aging Experiments. **IEEE Transection On Power Delivery**. 28(1): 491-498.
- Zhu, Y., Otsubo, M., Honda, C., and Tanaka, S. (2006). Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge. **Polymer Degradation and Stability**. 91(1): 1448-1454.



ตารางที่ ก.1 ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ตำแหน่ง	รายละเอียด
1.ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉาก 	1.กำหนดจุดตรงกลางวัสดุทดสอบ 2.ขยับไปด้านซ้ายจากตำแหน่ง 1 มา 1 ซม. 3.ขยับไปด้านขวาจากตำแหน่ง 1 มา 1 ซม. 4.ขยับไปด้านบนจากตำแหน่ง 1 มา 1 ซม. 5.ขยับไปด้านล่างจากตำแหน่ง 1 มา 1 ซม.
1.ผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอน 	1.ด้านต่อแรงดัน 2.ตรงกลางวัสดุทดสอบ 3.ด้านต่อลงดิน

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากในสภาวะไร้หมอก

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	98.5	98.4	98.5	98.5	98.4	98.4	98.5	98.5	98.6	98.5
	2		98.3	98.4	98.4	98.4	98.4	98.3	98.5	98.4	98.5	98.4
	3		98.5	98.4	98.4	98.3	98.4	98.4	98.3	98.3	98.4	98.4
	4		99.3	99.4	99.3	99.5	99.4	99.4	99.3	99.4	99.3	99.4
	5		99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	99.2	99.2	99.3	99.3	99.1
B	1	104.1	107.4	107.3	107.4	107.3	107.3	107.4	107.3	107.5	107.4	107.4
	2		106.8	106.9	106.9	107.0	107.0	106.9	106.8	106.9	106.8	106.9
	3		107.3	107.3	107.4	107.4	107.4	107.3	107.3	107.3	107.4	107.3
	4		107.4	107.5	107.5	107.4	107.5	107.4	107.5	107.5	107.5	107.5
	5		107.5	107.4	107.4	107.5	107.4	107.4	107.3	107.3	107.4	107.4
C	1	103.4	107.2	107.3	107.2	107.1	107.1	107.2	107.2	107.1	107.1	107.2
	2		107.2	107.1	107.2	107.2	107.2	107.2	107.1	107.1	107.2	107.1
	3		107.3	107.2	107.3	107.3	107.2	107.2	107.3	107.3	107.4	107.3
	4		106.9	106.8	106.8	106.8	106.7	106.7	106.7	106.8	106.8	106.8
	5		107.5	107.6	107.6	107.6	107.6	107.5	107.5	107.5	107.6	107.6
D	1	106.0	104.1	104.2	104.1	104.0	104.2	104.3	104.0	104.1	104.1	104.1
	2		104.4	104.2	104.3	104.4	104.3	104.3	104.4	104.2	104.4	104.4
	3		104.1	104.0	104.0	103.9	103.9	104.0	104.1	104.0	104.0	104.0
	4		103.8	103.9	103.9	103.7	103.7	103.7	103.8	103.8	103.9	103.8
	5		104.1	104.2	104.2	104.1	104.1	104.1	104.0	104.1	104.0	104.1

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมมม

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งจากในสภาวะไร้หมอก(ต่อ)

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
E	1	105.6	105.0	105.0	105.1	105.1	105.0	105.1	105.1	105.1	105.2	105.1
	2		104.8	104.7	104.8	104.9	104.7	104.7	104.8	104.8	104.7	104.8
	3		105.2	105.1	105.1	105.2	105.2	105.3	105.3	105.3	105.1	105.3
	4		105.3	105.3	105.1	105.2	105.1	105.2	105.3	105.2	105.2	105.2
	5		105.4	105.5	105.2	105.2	105.3	105.3	105.4	105.4	105.3	105.4
F	1	105.3	104.1	104.0	104.2	104.0	104.2	104.1	103.9	103.9	104.0	104.1
	2		104.3	104.4	104.4	104.5	104.4	104.3	104.3	104.3	104.4	104.4
	3		103.7	103.7	103.6	103.8	103.8	103.8	103.7	103.8	103.7	103.8
	4		104.1	104.2	104.1	104.0	104.0	104.1	104.2	104.2	104.1	104.1
	5		104.1	104.1	104.1	104.2	104.1	104.2	104.2	104.2	104.3	104.2
G	1	107.2	105.1	105.1	105.0	105.0	105.0	104.9	104.9	105.0	105.1	105.0
	2		104.7	104.6	104.7	104.8	104.8	104.8	104.7	104.7	104.7	104.8
	3		105.1	105.1	105.2	105.1	105.1	105.0	105.0	105.0	105.1	105.1
	4		105.3	105.2	105.2	105.1	105.1	105.1	105.1	105.2	105.1	105.2
	5		104.8	104.9	104.8	104.8	104.7	104.7	104.8	104.8	104.9	104.9
H	1	108.5	106.0	106.1	106.1	106.0	106.0	106.0	105.9	105.9	105.9	106.0
	2		106.3	106.2	106.2	106.1	106.1	106.2	106.2	106.1	106.2	106.2
	3		106.1	106.1	106.1	106.0	106.1	106.0	106.0	106.1	106.0	106.1
	4		106.1	106.1	106.0	106.0	105.9	106.0	106.0	106.0	106.1	106.0
	5		105.6	105.6	105.5	105.7	105.6	105.6	105.7	105.7	105.8	105.7

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมมม

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานในสภาวะไร้หมอก

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	92.9	92.8	92.9	92.9	92.9	92.8	92.9	92.9	92.8	92.9
	2		91.1	91.2	91.2	91.2	91.3	91.3	91.2	91.1	91.2	91.2
	3		96.4	96.4	96.3	96.2	96.2	96.3	96.3	96.3	96.2	96.3
B	1	104.1	100.5	100.4	100.5	100.5	100.5	100.5	100.4	100.5	100.4	100.5
	2		104.8	104.8	104.8	104.7	104.8	104.7	104.7	104.6	104.6	104.8
	3		100.6	100.6	100.6	100.5	100.5	100.6	100.4	100.4	100.5	100.6
C	1	103.4	94.1	94.2	94.1	94.1	94.1	94.2	94.0	94.0	94.0	94.1
	2		96.6	96.7	96.7	96.8	96.9	96.8	96.8	96.8	96.9	96.8
	3		96.8	96.7	96.7	96.7	96.8	96.7	96.7	96.6	96.7	96.7
D	1	106.0	109.5	109.5	109.5	109.5	109.4	109.4	109.3	109.4	109.3	109.5
	2		105.4	105.4	105.3	105.5	105.5	105.4	105.5	105.5	105.5	105.5
	3		92.2	92.3	92.3	92.4	92.4	92.4	92.4	92.2	92.3	92.4
E	1	105.6	107.4	107.4	107.4	107.3	107.4	107.3	107.4	107.5	107.4	107.4
	2		98.6	98.6	98.7	98.7	98.7	98.8	98.7	98.7	98.8	98.7
	3		109.4	109.5	109.5	109.5	109.4	109.5	109.4	109.4	109.3	109.5
F	1	105.3	98.1	98.1	98.2	98.3	98.3	98.2	98.1	98.2	98.2	98.2
	2		100.0	100.1	100.1	100.3	100.4	100.4	100.4	100.4	100.3	100.3
	3		99.9	100.0	99.9	99.9	99.9	100.0	99.7	99.8	99.8	99.9
G	1	107.2	96.5	96.5	96.4	96.4	96.4	96.4	96.3	96.3	96.4	96.4
	2		106.8	106.9	106.9	107.0	106.9	106.9	106.8	106.8	106.7	106.9
	3		98.9	99.0	98.9	99.0	99.0	99.0	99.0	99.2	99.1	99.0
H	1	108.5	103.3	103.3	103.2	103.2	103.3	103.1	103.2	103.4	103.4	103.3
	2		99.5	99.5	99.4	99.4	99.5	99.4	99.3	99.4	99.4	99.4
	3		102.1	102.3	102.3	102.2	102.1	102.2	102.3	102.2	102.3	102.2

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมมม

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติหยดน้ำกลั่นผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากในสภาวะหมอกสะอาด

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	88.2	88.3	88.3	88.3	88.2	88.2	88.1	88.1	88.0	88.2
	2		88.1	88.3	88.3	88.3	88.2	88.3	88.2	88.2	88.1	88.3
	3		87.7	87.7	87.8	87.8	87.9	87.9	88.0	88.0	87.9	87.9
	4		87.9	88.0	88.0	88.0	88.1	88.1	87.9	88.0	87.9	88.0
	5		88.3	88.2	88.1	88.1	88.1	88.1	88.2	88.2	88.3	88.2
B	1	104.1	100.4	100.5	100.5	100.5	100.4	100.5	100.4	100.4	100.3	100.5
	2		100.4	100.4	100.4	100.5	100.5	100.4	100.3	100.3	100.2	100.4
	3		100.3	100.4	100.3	100.4	100.5	100.5	100.3	100.4	100.4	100.4
	4		100.4	100.4	100.5	100.5	100.5	100.4	100.3	100.5	100.3	100.5
	5		100.6	100.5	100.6	100.5	100.6	100.6	100.4	100.4	100.5	100.6
C	1	103.4	101.3	101.3	101.4	101.3	101.3	101.4	101.5	101.4	101.5	101.4
	2		101.5	101.4	101.5	101.3	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5
	3		101.5	101.5	101.4	101.5	101.6	101.6	101.6	101.5	101.6	101.6
	4		101.3	101.2	101.3	101.3	101.3	101.4	101.3	101.4	101.4	101.3
	5		100.7	100.8	100.8	100.9	100.8	100.9	100.9	100.8	100.9	100.9
D	1	106.0	100.5	100.6	100.6	100.7	100.8	100.8	100.7	100.7	100.6	100.7
	2		100.5	100.4	100.4	100.6	100.6	100.5	100.5	100.6	100.4	100.5
	3		100.8	100.9	100.9	100.8	100.8	100.7	100.7	100.9	100.8	100.9
	4		100.7	100.6	100.7	100.6	100.5	100.6	100.6	100.5	100.5	100.6
	5		100.6	100.5	100.5	100.6	100.7	100.6	100.5	100.6	100.5	100.6

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมอมงศา

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติหยดน้ำกลั่นผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากในสภาวะหมอกสะอาด(ต่อ)

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
E	1	105.6	94.5	94.6	94.5	94.6	94.4	94.4	94.5	94.6	94.6	94.6
	2		94.6	94.5	94.6	94.5	94.6	94.5	94.5	94.4	94.5	94.6
	3		94.4	94.4	94.5	94.5	94.5	94.4	94.6	94.6	94.6	94.5
	4		95.0	95.0	95.1	95.0	95.1	94.9	94.4	94.9	94.9	95.0
	5		94.1	94.2	94.1	94.1	94.2	94.2	94.3	94.4	94.4	94.2
F	1	105.3	97.7	97.8	97.8	97.7	97.7	97.6	97.6	97.7	97.8	97.8
	2		97.4	97.5	97.5	97.6	97.5	97.5	97.5	97.6	97.5	97.5
	3		97.8	97.7	97.7	97.7	97.8	97.7	97.7	97.6	97.6	97.7
	4		98.0	98.1	98.0	97.9	97.9	98.0	98.0	97.9	98.0	98.0
	5		97.6	97.5	97.5	97.5	97.4	97.4	97.5	97.6	97.4	97.5
G	1	107.2	99.0	99.1	99.1	99.0	98.9	98.9	98.8	98.9	98.8	98.9
	2		98.8	98.8	98.9	98.9	98.8	98.9	98.8	98.7	98.7	98.8
	3		98.3	98.4	98.3	98.4	98.5	98.4	98.5	98.6	98.5	98.4
	4		98.4	98.4	98.5	98.5	98.4	98.5	98.6	98.6	98.6	98.6
	5		98.9	99.0	99.0	99.1	99.0	99.0	98.9	99.0	98.9	99.0
H	1	108.5	101.2	101.3	101.2	101.2	101.3	101.4	101.4	101.3	101.3	101.3
	2		101.4	101.3	101.3	101.2	101.2	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2
	3		101.4	101.2	101.3	101.4	101.5	101.5	101.3	101.3	101.2	101.4
	4		101.4	101.4	101.5	101.2	101.2	101.3	101.5	101.5	101.4	101.4
	5		101.5	101.6	101.6	101.4	101.4	101.5	101.6	101.5	101.6	101.5

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมอมงศา

ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนอนในสภาวะหมอกสะอาด

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	31.0	31.1	31.1	31.2	31.1	31.2	31.2	31.3	31.2	31.1
	2		39.4	39.3	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.4	39.4	39.4
	3		37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6
B	1	104.1	59.3	59.2	59.1	59.3	59.2	59.2	59.6	59.5	59.5	59.4
	2		59.3	59.3	59.4	59.4	59.3	59.4	59.1	59.2	59.2	59.4
	3		47.2	47.3	47.2	47.3	47.2	47.2	47.4	47.3	47.4	47.2
C	1	103.4	64.0	64.0	64.1	64.3	64.3	64.2	64.1	64.1	64.2	64.1
	2		70.8	70.8	70.9	70.8	70.7	70.8	70.7	70.8	70.7	70.8
	3		74.0	73.9	3.9	74.1	74.0	74.0	74.1	74.2	74.1	74.0
D	1	106.0	79.0	79.1	79.0	79.3	79.3	79.2	79.4	79.3	79.3	79.2
	2		77.3	72.2	77.3	72.2	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3
	3		72.2	72.1	72.1	72.2	72.3	72.2	72.3	72.3	72.3	72.2
E	1	105.6	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8
	2		75.5	75.5	75.6	75.7	75.6	75.7	75.7	75.6	75.6	75.7
	3		72.8	72.9	72.9	72.7	72.8	72.7	73.1	73.0	73.0	72.9
F	1	105.3	71.6	71.6	71.5	71.5	71.4	71.4	71.3	71.3	71.4	71.5
	2		72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3
	3		75.9	75.9	75.9	75.9	75.9	75.9	75.9	75.9	75.9	75.9
G	1	107.2	73.9	73.8	73.8	73.9	73.9	73.9	73.8	73.7	73.7	73.8
	2		78.5	78.6	78.6	78.5	78.5	78.6	78.7	78.6	78.7	78.6
	3		76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2
H	1	108.5	72.0	72.1	72.0	71.9	71.8	71.8	71.9	71.9	72.0	71.9
	2		86.9	87.0	87.0	87.0	86.8	86.9	86.7	86.7	86.6	86.8
	3		85.6	85.7	85.6	85.9	85.8	85.8	85.6	85.7	85.7	85.8

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมมม

ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวตั้งฉากในสภาวะหมอกไอเกลือ

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	91.4	91.4	91.3	91.2	91.2	91.1	91.3	91.2	91.2	91.3
	2		91.5	91.4	91.5	91.3	91.3	91.5	91.5	91.6	91.6	91.4
	3		91.2	91.2	91.3	91.4	91.4	91.5	91.2	91.3	91.1	91.2
	4		91.4	91.3	91.3	91.6	91.5	91.5	91.7	91.7	91.6	91.5
	5		91.4	91.3	91.4	91.1	91.2	91.2	91.3	91.1	91.3	91.2
B	1	104.1	97.6	97.7	97.8	97.7	97.6	97.6	97.6	97.7	97.8	97.7
	2		97.6	97.7	97.8	97.6	97.6	97.7	97.8	97.7	97.7	97.7
	3		97.6	97.6	97.7	97.5	97.7	97.5	97.5	97.5	97.6	97.5
	4		97.9	97.7	97.8	97.8	97.9	97.7	97.8	97.7	97.8	97.8
	5		97.8	97.8	97.9	97.9	97.8	97.9	97.7	97.7	97.8	97.9
C	1	103.4	96.4	96.5	96.5	96.4	96.3	96.4	96.3	96.3	96.4	96.4
	2		96.5	96.4	96.5	96.3	96.4	96.3	96.5	96.4	96.5	96.5
	3		96.5	96.4	96.5	96.4	96.5	96.5	96.4	96.3	96.3	96.5
	4		96.3	96.3	96.4	96.2	96.2	96.3	96.3	96.4	96.4	96.3
	5		96.3	96.2	96.2	96.2	96.3	96.2	96.1	96.2	96.1	96.2
D	1	106.0	98.8	98.8	98.8	98.9	98.8	98.8	98.8	98.7	98.7	98.8
	2		98.6	98.5	98.5	98.4	98.5	98.4	98.3	98.4	98.4	98.5
	3		98.5	98.4	98.5	98.7	98.7	98.7	98.7	98.6	98.7	98.7
	4		98.7	98.7	98.8	98.9	98.9	98.7	98.9	98.8	98.8	98.9
	5		98.4	98.4	98.5	98.5	98.6	98.6	98.4	98.4	98.5	98.5

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมอมองศา

ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสารรังในแนวตั้งฉากในสภาวะหมอกไอเกลือ(ต่อ)

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
E	1	105.6	97.8	97.9	97.9	98.0	98.0	97.9	98.0	97.9	97.9	97.9
	2		97.8	97.8	97.9	97.8	97.9	97.9	98.0	97.9	98.0	97.9
	3		98.0	98.0	98.1	98.1	98.1	98.0	98.0	98.0	97.9	98.1
	4		97.9	97.8	97.8	97.9	97.8	97.8	97.8	97.7	97.8	97.8
	5		98.1	98.1	98.0	97.9	98.0	97.9	98.0	98.0	98.1	98.0
F	1	105.3	97.6	97.7	97.7	97.8	97.8	97.9	97.8	97.8	97.9	97.8
	2		98.0	98.0	97.9	98.1	98.1	98.0	98.0	97.9	97.9	98.0
	3		97.9	97.9	97.8	98.0	97.9	97.9	98.0	97.8	97.8	97.9
	4		97.8	97.7	97.8	97.8	97.7	97.8	97.6	97.7	97.6	97.7
	5		97.8	97.7	97.7	97.7	97.8	97.7	97.8	97.8	97.9	97.8
G	1	107.2	99.0	99.0	99.0	99.1	99.1	99.1	99.1	99.2	99.2	99.1
	2		99.4	99.3	99.3	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4
	3		99.1	99.0	99.1	99.1	99.2	99.2	99.2	99.2	99.1	99.2
	4		98.9	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.1	99.0
	5		99.1	99.0	99.1	99.2	99.2	99.1	99.2	99.1	99.2	99.2
H	1	108.5	101.2	101.2	101.3	101.4	101.4	101.3	101.5	101.5	101.3	101.4
	2		101.8	101.8	101.7	101.4	101.4	101.5	101.6	101.6	101.4	101.5
	3		101.4	101.3	101.4	101.4	101.4	101.5	101.6	101.5	101.4	101.4
	4		101.6	101.6	101.3	101.5	101.6	101.5	101.4	101.4	101.5	101.6
	5		101.4	101.3	101.5	101.4	101.3	101.3	101.1	101.2	101.0	101.2

*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมม

ตารางที่ ก.7 คุณสมบัติหยดน้ำฝนผลของโคโรนาดีสชาร์จในแนวนานในสภาวะหมอกไอเกลือ

ชนิด	ตำแหน่ง	ใหม่	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			เฉลี่ย
			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			วัดครั้งที่			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
A	1	100.4	27.3	27.2	27.2	27.4	27.4	27.3	27.3	27.4	27.4	27.4
	2		30.1	30.0	30.0	30.2	30.2	30.2	30.3	30.2	30.2	30.2
	3		27.9	27.8	27.8	28.0	27.9	27.9	27.8	27.9	27.8	27.9
B	1	104.1	30.4	30.5	30.4	30.3	30.4	30.4	30.5	30.5	30.4	30.5
	2		28.0	28.1	28.1	28.0	27.9	28.0	27.9	27.9	27.9	28.0
	3		30.1	30.2	30.2	30.3	30.2	30.2	30.1	30.1	30.2	30.2
C	1	103.4	27.2	27.1	27.1	27.3	27.2	27.3	27.2	27.2	27.1	27.3
	2		21.1	21.2	21.2	21.3	21.3	21.3	21.4	21.3	21.4	21.3
	3		25.4	25.4	25.3	25.2	25.2	25.3	25.3	25.3	25.4	25.3
D	1	106.0	34.2	34.2	34.1	34.0	34.1	34.0	34.1	34.1	34.1	34.1
	2		36.5	36.4	36.4	36.6	36.5	36.6	36.5	36.6	36.5	36.6
	3		42.9	43.0	42.9	42.9	42.9	43.0	42.9	42.8	42.9	42.9
E	1	105.6	53.5	53.5	53.6	53.7	53.7	53.8	53.6	53.6	53.7	53.6
	2		52.3	52.2	52.3	52.4	52.4	52.5	52.3	52.3	52.2	52.3
	3		45.6	45.5	45.5	45.7	45.6	45.7	45.7	45.8	45.7	45.7
F	1	105.3	37.5	37.6	37.6	37.5	37.6	37.5	37.4	37.4	37.3	37.6
	2		41.3	41.4	41.4	41.5	41.4	41.5	41.4	41.5	41.5	41.5
	3		53.5	53.5	53.5	53.5	53.4	53.4	53.5	53.6	53.5	53.5
G	1	107.2	68.6	68.7	68.7	68.6	68.6	68.7	68.8	68.9	68.9	68.7
	2		57.6	57.6	57.7	57.8	57.8	57.9	57.9	57.8	57.8	57.8
	3		78.0	77.9	77.9	77.9	77.8	77.9	77.8	77.8	77.7	77.9
H	1	108.5	55.5	55.6	55.6	55.9	55.8	55.8	55.8	55.9	56.1	55.9
	2		68.1	68.2	68.2	68.5	68.5	68.4	68.1	68.1	68.0	68.2
	3		69.1	69.1	69.0	68.7	68.8	68.8	69.1	68.9	68.9	68.9

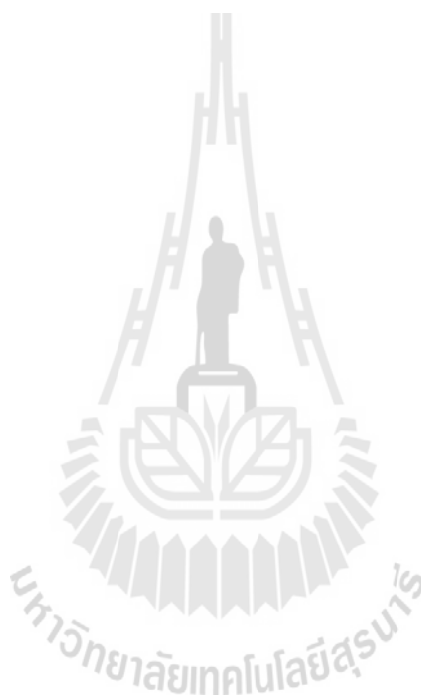
*หน่วยทั้งหมดในตารางมีค่าเป็นมมมมมม

ภาคผนวก ข
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Rawonghad. R and Marungsri, B. (2015). **Aging Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulator under Corona Discharge Conditions.** Asia pacific conference on engineering and applied science., Osaka, Japan.



Aging Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulator under Corona Discharge Conditions

Ratchaphon Rawonghad and Boonruang Marungsri*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Ave., Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

*Email: bmslvve@sut.ac.th

Abstract

This paper presents experimental results on aging deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulators under corona discharge conditions. Eight types of high temperature vulcanized (HTV) silicone rubber having different amounts of alumina trihydrate (ATH) with and without surface treatment were used as test specimen. Two types of electrode configuration for corona discharge generation, point-point and point-plane electrodes were used. Point-point electrode was used for generate corona discharge parallel with specimen surface and point-plane electrode was used for generate corona discharge perpendicular with specimen surface. Aging test was continuously conducted for 1000 hrs. under 10.5 kV AC. Clean fog was injected for 8 hrs. and was stopped for 16 hrs. every day during test. After aging test, severe surface aging was observed on tested specimen under point-point electrode when comparing with and point-plane electrode. In spite of with and without surface treatment, degree of surface aging decreases with increasing amount content of ATH. Chemical analysis results confirmed the experimental results.

Keyword: Aging Deterioration, Silicone Rubber, Housing Material, Polymer Insulator, Corona Discharge

1. Introduction

Recently, polymer insulators show better performances over conventional type insulator such as porcelain and glass types. However, due to it made of polymeric material, ageing deterioration is most concerned about among various performances of polymer insulators. So, accelerate aging test has been widely performed on silicone rubber (cross linked PDMS) with difference additive. To improve the property of silicone rubber, alumina trihydrate ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: ATH) will be filled as the additive into polymer to reduce surface tracking and erosion. ATH additive can increase hydrophobic property that affects degradation of polymer insulator [1-3]. For increase the strength on polymer surface, silica fume will be treatment on the surface so polymer will not been tearing apart so easy [4].

For long time in services, Aging deterioration is most concerned about among various

performances of polymer insulators. Electrical discharge activities on insulator surface, corona and dry band arc discharges, can initiated surface deterioration. Accelerate aging test is widely used to evaluate anti-tracking and anti-aging of silicone rubber surface[5-8].

In this study, in order to comparing the effect of electrical field on polymer surface, two conditions of corona discharge, point-point and point-plane electrodes, were used. Accelerate aging test in this paper is adapted from salt fog ageing test based on IEC 61109 specifications.

2. Experimental

2.1 Specimens

Eight types of silicone rubber sheet having 2 mm in thickness made of high temperature vulcanized silicone rubber (HTV) with/without alumina trihydrate (ATH) content and with/without surface treatments, were used in this studied. Details of specimen illustrated in Table 1 and Fig. 1.

In case of corona discharge perpendicular with specimen surface, specimen dimensions are 3 cm in width and 7 cm in length, as shown in Fig. 2. In case of corona discharge parallel with specimen surface, specimens having 3 cm in width and 19 cm in length attached with metal electrodes on the both ends were used, as shown in Fig. 3.

Table 1: Characteristic of specimens

Silicone Rubber Types	A	B	C	D	E	F	G	H
ATH(%Wt)	0	50	100	150	0	50	100	150
Surface Treatment	×	×	×	×	/	/	/	/

* × : Without surface treatment

/: With surface treatment

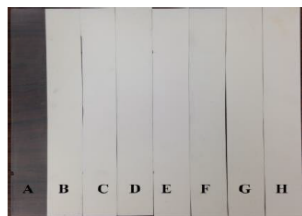


Fig. 1 Eight type of specimens.

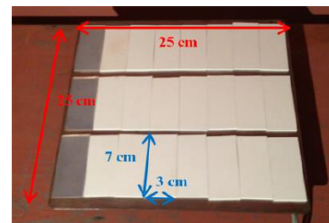


Fig. 2 Specimen for perpendicular corona discharge.

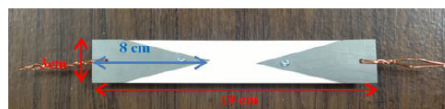


Fig. 3 Specimen for parallel corona discharge.

2.2 Test Arrangement and Test Methods

Fog chamber having 9.6 m^3 in volume was used. All specimens were installed in the test chamber, as shown in Fig. 4. Test arrangement is illustrated in Fig. 5. Test was conducted by test conditions, as shown in Table 2.

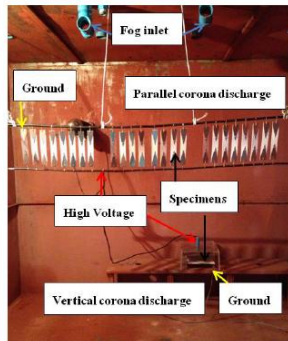


Fig. 4 Specimens Installation

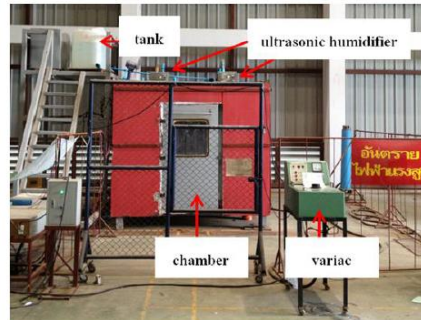


Fig. 5 Test Arrangement

Table 2 Test Conditions

	Test Conditions
Test chamber	4 m^3
Test voltage	AC 10.5 kV Continuously Applied
Fog generate	Ultrasonic Humidifier
Fog injection rate	0.5 l/hr/m^3
Test sequence(in 24 hours)	fog injected for 8 hours and stopped for 16 hours
Timing (1 cycle)	1000 hr.

3. Experimental Results and Discussion

3.1 Visual observation

After ageing test for 1000 hrs., visual observation was conducted to analyse the physical change on specimen surface. In case of perpendicular corona discharges, no discharge activity was observed on specimen surface during test cycle. Any significant surface damaged was not observed on all tested specimen surfaces. In case of parallel corona discharge, many discharge activities were observed on specimen surface during test cycle. Significant surface damaged was not observed on all tested specimen surfaces. Severe surface damaged was observed on specimen surface near the tip of electrode. Surface tracking was observed along surface between the two electrodes. Tested specimens are shown in Fig. 6 and Fig. 7. Severer surface damaged was observed on the specimen without surface treatment

when comparing the specimen without surface treatment. In addition, severer surface damaged was observed on the specimen with lower amount of ATH content when comparing the specimen with higher amount of ATH content.



Figure 6: Specimens under vertical corona discharge test.



Figure 7: Specimens under parallel corona discharge test.

3.2 Hydrophobicity

One of the properties that indicated aging of insulator was hydrophobic property. Surface hydrophobicity was classified based on STRI classification guide and IEC/TS 62073 [9-10]. Surface hydrophobicity of all new specimens is shown in Fig. 9.

After tested, surface hydrophobicity levels are shown in Fig. 10 and Fig. 11. The measurement results are shown in Table III. Under perpendicular corona discharge, no change in hydrophobicity was measured. In case of under parallel corona discharge, significant reduction in hydrophobicity was measured.



Fig. 9 New specimens

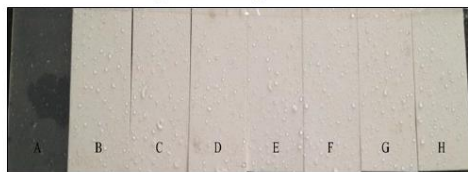


Fig. 10 Tested specimens under for perpendicular corona discharge

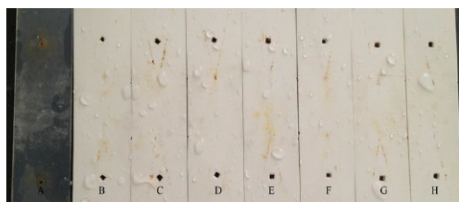


Fig. 11 Tested specimens under parallel corona discharge

Table 3 Reduction of Hydrophobicity

Type	Hydrophobicity Classification				
	New Specimen	Point-plane corona	Point-point corona		
			Energized End	Middle	Ground End
A	HC1	HC1	HC6	H6	HC6
B	HC1	HC1	HC5	HC4	HC4
C	HC1	HC1	HC5	HC4	HC3
D	HC1	HC1	HC4	HC3	HC3
E	HC1	HC1	HC4	HC4	HC3
F	HC1	HC1	HC4	HC3	HC4
G	HC1	HC1	HC3	HC3	HC2
H	HC1	HC1	HC2	HC3	HC3

3.3. Chemical Analysis Results

Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) is chemical analysis technique use to determine the change of chemical bonds in tested specimen. The absorption used frequency at $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ (Mid-IR spectra). IR spectra are expressed in wave numbers versus their intensities [4]. In this study, main chain (Si-O bond) at wave number 1007 cm^{-1} and side chain (Si-CH₃ bond) at wave number 1259 cm^{-1} were analysed. The reduction of Si-O bond and Si-CH₃ bond indicates surface deterioration. Surface of tested specimen was cleaned by ethyl alcohol to remove surface contaminant before chemical analyse. ATR-FTIR spectra of new specimen are illustrated in Fig.12. By the same analysis technique, ATR- FTIR spectra of tested specimen illustrated in Fig. 13 – Fig. 15, respectively. As analysis results illustrated in Table 4, reduction of chemical bond confirmed visual observation results. Larger reduction of chemical bonds was measure from tested specimens under perpendicular corona discharge when comparing tested specimens under parallel corona discharge. In case of perpendicular corona discharge, no significant reduction of chemical bonds was measured from all specimens even with/without surface treatment. In case of parallel corona discharge, significant reduction of chemical bonds was measure. Larger reduction of chemical bonds was measured from tested specimen without

surface treatment when comparing tested specimen with surface treatment. Largest reduction of chemical bonds was measured from the tested specimen without ATH content and surface treatment. Although having the same ATH content, large reduction of chemical bonds was measured from tested specimen with surface treatment.

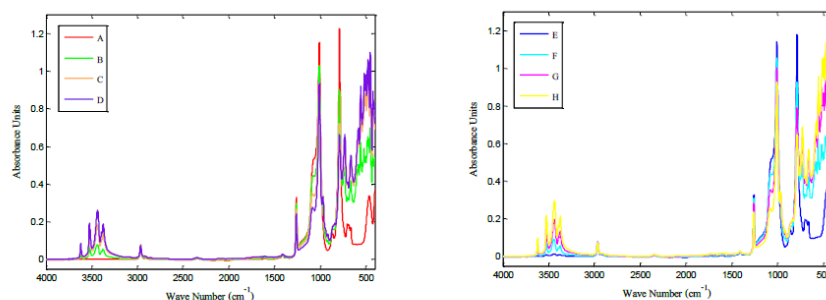


Fig. 12 New Specimens

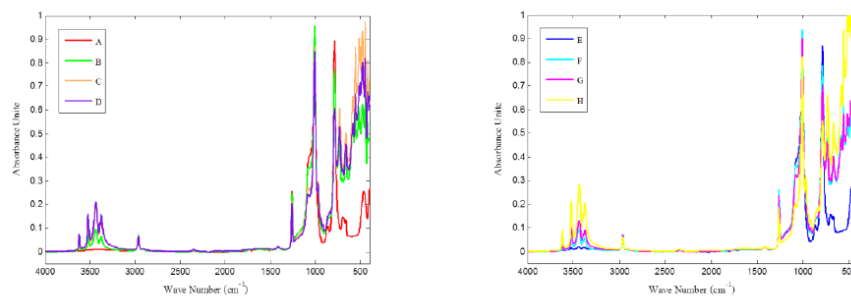


Fig. 13 Specimens under perpendicular corona discharge

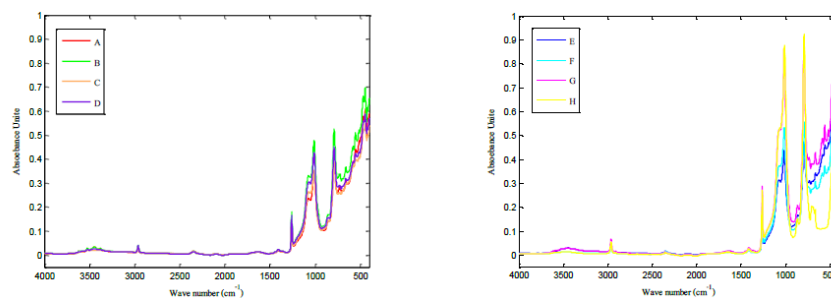


Fig. 14 Specimens under parallel corona discharge (Energized end)

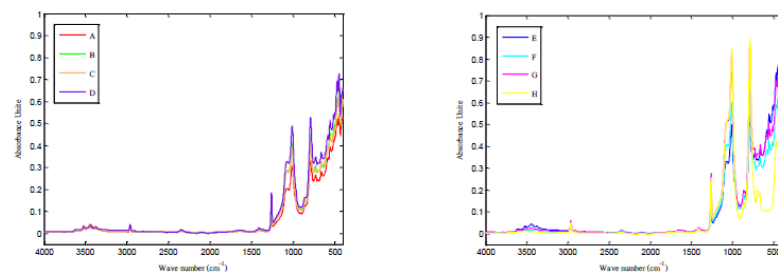


Fig. 15 Specimens under parallel corona discharge (Middle)

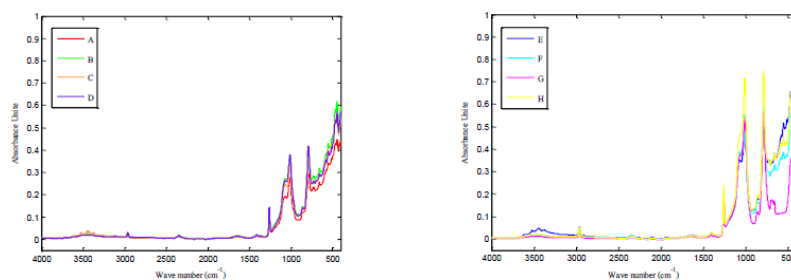


Fig. 16 Specimens under parallel corona discharge (ground end)

Table 4 Surface analysis by ATR-FTIR

Specimen Type	Chemical Bond	New Specimen	perpendicular corona discharge	Under parallel corona discharge		
				Energized end	Middle	Ground end
A	Si-CH ₃	100%	76.5%	41.3%	34.6%	34.9%
	Si-O	100%	75.8%	30.2%	26.5%	23.9%
B	Si-CH ₃	100%	84.1%	60.4%	50.3%	47.9%
	Si-O	100%	93.6%	46.2%	40.1%	36.3%
C	Si-CH ₃	100%	79.6%	50.3%	53.7%	49.2%
	Si-O	100%	94.1%	37.6%	41.7%	36.1%
D	Si-CH ₃	100%	83.8%	68.8%	76.3%	59.3%
	Si-O	100%	91.5%	45.7%	52.5%	40.7%
E	Si-CH ₃	100%	76.6%	51.6%	56.9%	62.7%
	Si-O	100%	76.7%	38.0%	43.8%	45.4%
F	Si-CH ₃	100%	84.9%	63.1%	71.5%	65.0%
	Si-O	100%	89.5%	50.8%	57.5%	52.8%
G	Si-CH ₃	100%	83.0%	96.5%	97.9%	67.8%
	Si-O	100%	90.4%	86.8%	82.9%	53.8%
H	Si-CH ₃	100%	79.5%	96.6%	96.1%	97.8%
	Si-O	100%	89.7%	95.3%	92.0%	77.9%

4. Conclusion

Artificial fog ageing test based on IEC 61109 of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulators was conducted. The following conclusions were given.

- (i) Different arrangement of electric field stress caused different degree of surface damaged.
- (ii) Severer surface damaged was observed on the specimen without surface treatment when comparing the specimen without surface treatment.
- (iii) Severer surface damaged was observed on the specimen with lower amount of ATH content when comparing the specimen with higher amount of ATH content.
- (iv) Chemical analysis results confirm that the amount of ATH filler and surface treatment are effective to improve the anti-erosion performance and can delay the reduction of hydrophobicity of silicone rubber.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to thank you Suranaree University of Technology, Thailand ,for kind financial support.

REFERENCES

- [1] S.J. Clarson, J.A. Semlyem, “*Siloxane Polymer*”, Prentice hall, New Jersey, 1993
- [2] CIGRE TF33.04.07, “*Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymer Insulators*”, CIGRA Pub. 142, June 1999.
- [3] T. Zhao and R. A. Bernstorf, “Ageing Test of Polymeric Housing Material of Non – ceramic Insulators”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 14, No. 2, March/April 1998, pp. 26 – 33.
- [4] J. V. DeGroot, Jr. and C. W. Macosko, “Aging Phenomena in Silica-Filled Polydimethylsiloxane”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.217, May 1999, pp. 86–93.
- [5] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, “Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.91, December 2005, pp. 1448 – 1454.
- [6] B. Marungsri, “*Fundamental investigation on salt fog ageing test of silicone rubber housing materials for outdoor polymer insulators*”, Doctoral thesis, Chubu University, Japan, 2006.
- [7] S.Thong-om, W. Payakcho, J. Grasaso and B. Marungsri, “Study of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.5, No. 8, August 2011, pp. 1335-1341.
- [8] B. Marungsri, H. Komiya, I. Aoyama, A. Ishikawa and R. Matsuoka, “Salt fog ageing test results of silicone rubber for outdoor polymer insulators”, *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, June 2003, pp. 393 - 396.
- [9] IEC/TS 62073, “*Guide to the measurement of wettability of insulator surface*”, 2003
- [10] STRI Guide, “*Hydrophobicity classification guide*”, 92/1, 1992.



ภาคผนวก ค

มาตรฐานเกี่ยวข้องกับงานวิจัย



STRI Guide 92/1

Guide 1, 92/1
Hydrophobicity Classification
Guide

HYDROPHOBICITY CLASSIFICATION GUIDE

1 Scope

The superior electrical performance of composite insulators and coated insulators stems from the hydrophobicity (water-repellency) of their surfaces. The hydrophobicity will change with time due to exposure to the outdoor environment and partial discharges (corona).

Seven classes of the hydrophobicity (HC 1-7) have been defined. HC 1 corresponds to a completely hydrophobic (water-repellent) surface and HC 7 to a completely hydrophilic (easily wetted) surface.

These classes provide a coarse value of the wetting status and are particularly suitable for a fast and easy check of insulators in the field.

2 Test equipment

The only equipment needed is a common spray bottle which can produce a fine mist (fig. 1). The spray bottle is filled with tap water. The water shall not contain any chemicals, as detergents, tensides, solvents.

Complementary equipment which could facilitate the judgement are a magnification glass, a lamp, and a measuring-tape.



Fig 1 Example of a suitable spray bottle for the test.

3 Test procedure

The test area should be 50-100 cm². If this requirement could not be met it should be noted in the test report.

Squeeze 1-2 times per second from a distance of 25 ± 10 cm. The spraying shall continue for 20-30 seconds. The judgement of the hydrophobicity class shall be performed within 10 seconds after the spraying has been finished.

4 Criteria

The actual wetting appearance on the insulator has to be identified with one of the seven hydrophobicity classes (HC), which is a value between 1 and 7. The criteria for the different classes are given in table 1. Typical photos of surfaces with different wetting properties are shown on page 4.

Also the contact angle (θ) between the water drops and the surface must be taken into account. The contact angle is defined in fig. 2. There exist two different contact angles, the advancing contact angle (θ_a) and the receding contact angle (θ_r). A drop exhibits these angles on an inclined surface (fig. 2).

The receding angle is the most important when the wetting properties of an insulator shall be evaluated. The inclination angle of the surface affects the θ_r (appendix A), but will not be corrected for in the test report.

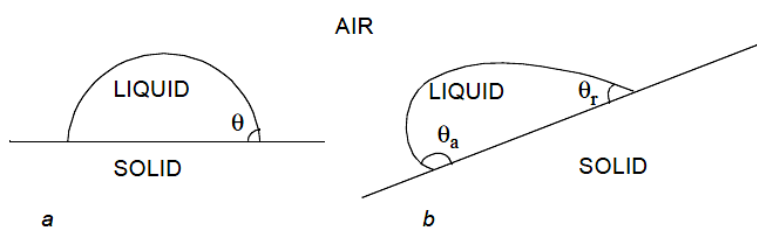
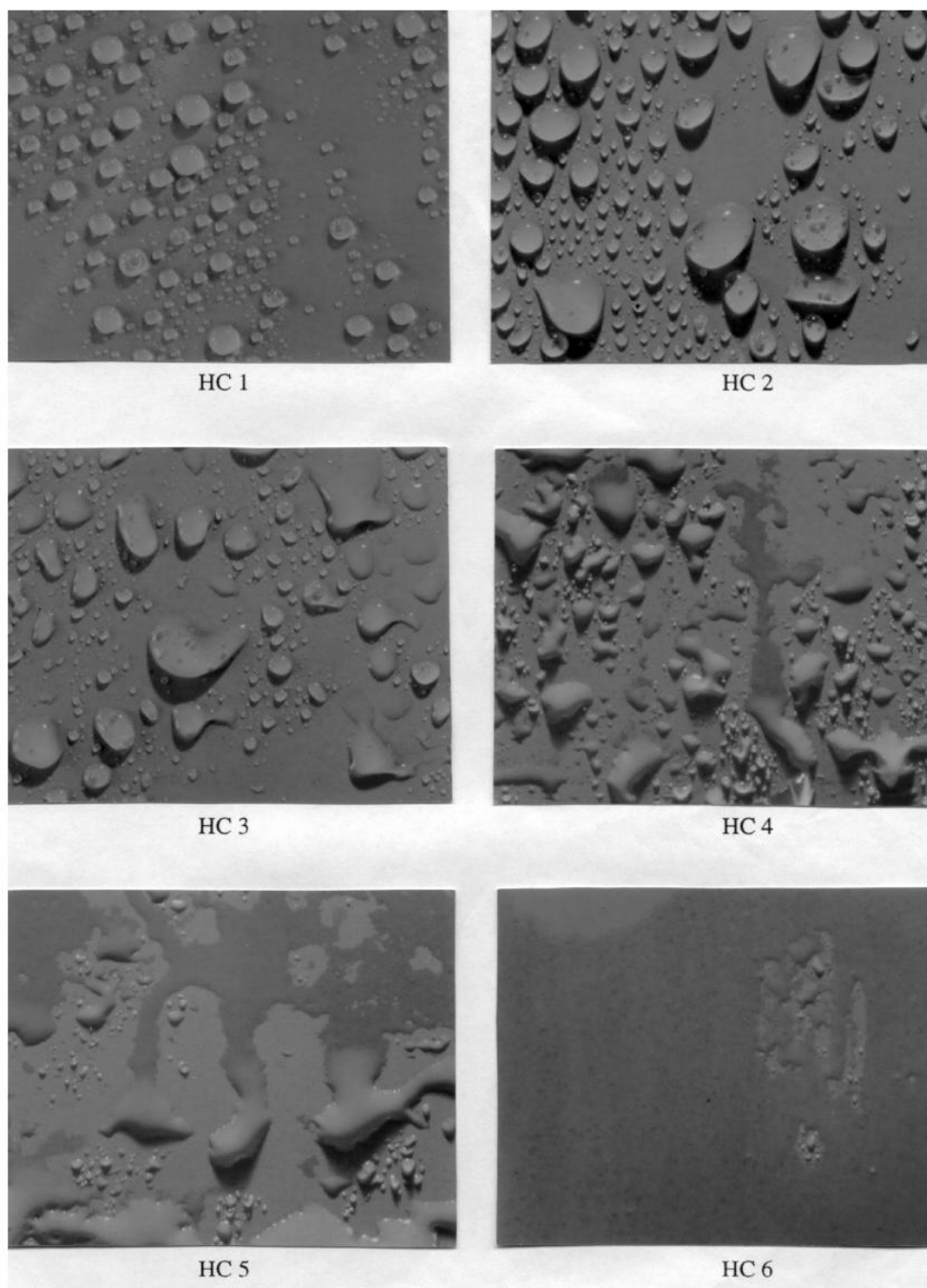


Fig 2 Definition of contact angles.
 a. horizontal plane
 b. inclined plane
 θ_a = advancing angle
 θ_r = receding angle

Table 1 Criteria for the hydrophobicity classification (HC).

HC	Description
1	Only discrete droplets are formed. $\theta_r \approx 80^\circ$ or larger for the majority of droplets.
2	Only discrete droplets are formed. $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ for the majority of droplets.
3	Only discrete droplets are formed. $20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ for the majority of droplets. Usually they are no longer circular.
4	Both discrete droplets and wetted traces from the water runnels are observed (i.e. $\theta_r = 0^\circ$). Completely wetted areas $< 2 \text{ cm}^2$. Together they cover $< 90\%$ of the tested area.
5	Some completely wetted areas $> 2 \text{ cm}^2$, which cover $< 90\%$ of the tested area.
6	Wetted areas cover $> 90\%$, i.e. small unwetted areas (spots/traces) are still observed.
7	Continuous water film over the whole tested area.

*Fig 3**Typical examples of surfaces with HC from 1 to 6
(natural size).*

5 Test report

The test report shall include the following information:

1. General information
 - Location, station, line
 - Date and time of the judgement
 - Weather conditions (temperature, wind, precipitation)
 - Performed by
2. Test object
 - Type of insulator
 - Identity (item no., position)
 - Voltage
 - Date of installation or application of coating (type of coating)
 - Mounting angle (vertical, horizontal, inclined x deg)
3. Hydrophobicity class
 - HC for different positions: along the insulator ¹ (shed no.), along the surface within each shed sequence (top, bottom, core, large shed, small shed, etc.)
 - Differences (if any) around the insulator circumference

An example of a test report design is given in appendix B.

6 Comments

The hydrophobicity classification could be difficult to perform in high winds. If such difficulties, or other, are present this should be noted in the test report.

The test report form could preferably be drawn in advance and fastened on a plate for an easier recording during the examination.

1. For long insulators may only some selected sheds from the upper, middle and lower part of the insulator are examined.

APPENDIX A

CONTACT ANGLE HYSTERESIS

Real surfaces are usually rough or compositionally heterogeneous. A liquid drop resting on such a surface may reside in the stable equilibrium (the lowest energy state), or in a metastable equilibrium (energy trough separated from neighbouring states by energy barriers). The *equilibrium contact angle* θ_e corresponds to the lowest energy state for a system. On an ideally smooth and compositionally homogeneous surface, the equilibrium contact angle is the *intrinsic contact angle* θ_0 . The intrinsic contact angle is related to the various interfacial tensions by the Young equation,

$$\gamma_{LV} \cos \theta_0 = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (\text{Eq. A1})$$

where γ_{LV} is the surface tension of the liquid in equilibrium with its saturated vapour, γ_{SV} is the surface tension of the solid in equilibrium with the saturated vapour of the liquid, and γ_{SL} the interfacial tension between the solid and the liquid.

The equilibrium contact angle on a rough surface, or on a heterogeneous surface, are often not observed experimentally. Instead, the system often resides in a metastable state, exhibiting a metastable contact angle. In this case, advancing and receding angles are different, known as hysteresis. The difference $\theta_a - \theta_r$ is the extent of hysteresis. The contact angle hysteresis increases with increasing surface roughness and heterogeneity.

Consider a liquid drop having a steady contact angle on a horizontal plane surface. If the surface is ideally smooth and homogeneous, addition of a small volume of the liquid to the drop will cause the drop front to advance, and the same contact angle will re-establish. Subtraction of a small volume of the liquid from the drop will cause the drop front to recede, but the same contact angle will again re-establish.

On the other hand, if the surface is rough or heterogeneous, addition of liquid will make the drop to grow without moving its periphery, and the contact angle becomes larger. When sufficient liquid is added, the drop will suddenly advance with a jerk. The angle at the onset of this sudden advance is the maximum advancing contact angle. Removal of the liquid will make the drop become flatter without moving its periphery, and the contact angle will become smaller. When enough liquid is removed, the drop front will suddenly retract (if not $\theta_r=0$). The angle at the onset of this sudden retraction is the minimum receding contact angle. In the laboratory, the hydrophobicity can be investigated by adding and subtracting liquid from a drop resting on a horizontal surface and measure the maximum advancing and minimum receding angles.

Both the advancing and the receding angles can be seen in one drop when the surface is tilted. The contact angles are related to the tilt angle by

$$mg \sin \alpha = L\gamma(\cos \theta_a - \cos \theta_r) \quad (\text{Eq. A2})$$

where m is the drop mass, g the gravitational acceleration, α the tilt angle, L the drop length, and γ the liquid surface tension. The θ_a and θ_r at which the drop just starts to roll down the tilted plate are the maximum advancing angle and the minimum receding angle, respectively. However, if there is no hysteresis, the drop will roll down at the slightest tilt of the surface.

Reference

S., Wu: "Polymer Interface and Adhesion", Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1982.

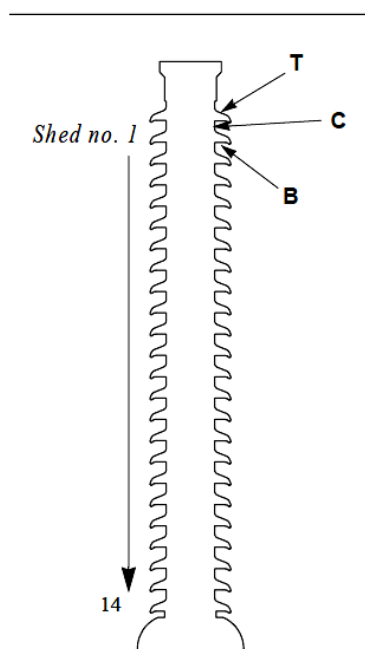
APPENDIX B**EXAMPLE OF A TEST REPORT FORM**

Location: Date: Time:

Type of insulator: Identity:

Mounting angle: System voltage:

Date of installation:

Hydrophobicity Classification (HC)

Shed (no.)	Position		
	T	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

Weather conditions: temperature wind precipitation

Comments:
.....

Issued by:



TECHNICAL SPECIFICATION

IEC TS 62073

First edition
2003-06

Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces

*Mesure de l'hydrophobicité
de la surface des isolateurs*



Reference number
IEC/TS 62073:2003(E)

GUIDANCE ON THE MEASUREMENT OF WETTABILITY OF INSULATOR SURFACES

1 Scope and object

The methods described in this technical specification can be used for the measurement of the wettability of the shed and housing material of composite insulators for overhead lines, substations and equipment or ceramic insulators covered or not covered by a coating. The obtained value represents the wettability at the time of the measurement.

The object of this standard is to describe three methods that can be used to determine the wettability of insulators. The determination of the ability of water to wet the surface of insulators may be useful to evaluate the condition of the surface of insulators in service, or as part of the insulator testing in the laboratory.

2 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following definitions apply.

2.1

wettability

ability of a surface to be wetted by a liquid (e.g. water)

2.2

hydrophobicity and hydrophilicity

2.2.1

hydrophobicity

low level of wettability by water of a surface. A hydrophobic surface has a low surface tension and thus is water-repellent

2.2.2

hydrophilicity

high level of wettability by water of a surface. A hydrophilic surface has a high surface tension and thus is wetted by water (in the form of a film)

2.3

surface tension

interface tension

region of finite thickness (usually less than 0,1 μm) in which the composition and energy vary continuously from one bulk phase to the other. The pressure (force field) in the interfacial zone has a gradient perpendicular to the interfacial boundary. A net energy is required to create an interface (surface) by transporting the matter from the bulk phase to the interfacial (surface) zone. The reversible work required to create a unit interfacial (surface) area is the surface tension and is defined thermodynamically as follows:

$$\gamma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P,n}$$

where

γ is the surface (interfacial) tension or surface energy;

G is the Gibbs free energy of the total system;

A is the surface (interfacial) area;

T is the temperature;

P is the pressure;

n is the total number of moles of matter in the system.

The surface tension (γ) is usually expressed in mN/m ($1 \text{ mN/m} = 1 \text{ dyn/cm}$).

2.4

static contact angle

when a drop of liquid rests on the surface of a solid, and a gas is in contact with both, the forces acting at the interfaces must be in balance. These forces are due to surface tensions acting in the direction of the respective surfaces. From Figure 1 it follows that:

$$\gamma_{\text{GL}} \cos \theta_s = \gamma_{\text{GS}} - \gamma_{\text{SL}}$$

where

θ_s is the static contact angle of the edge of the drop with the solid surface,

γ_{GL} is the surface tension of the gas-liquid interface,

γ_{GS} is the surface tension of the gas-solid interface, and

γ_{SL} is the surface tension of the solid-liquid interface.

NOTE The above equation (Young's equation) is only valid for ideal and smooth surfaces.

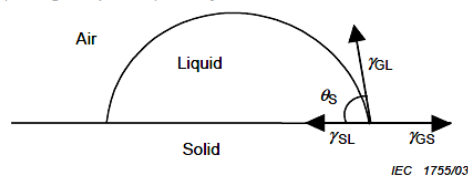


Figure 1 – Definition of the static contact angle

The right side of the above equation (the difference between the surface tensions of the gas-solid and the solid-liquid interfaces) is defined as the surface tension of the solid surface. It is not a fundamental property of the surface but depends on the interaction between the solid and a particular environment.

When the gas is air saturated with vapour of the liquid, γ_{GL} will be the surface tension of the liquid. If the contact angle is 0° , the liquid is said to just wet the surface of the solid, and in this particular case (since $\cos \theta_s = 1$), the surface tension of the solid will be equal to the surface tension of the liquid.

2.5

advancing and receding contact angle

droplet on an inclined solid surface exhibits two different angles. The advancing contact angle (θ_a) is the angle inside the water droplet between the solid surface and the droplet surface at the lower part of the droplet on the inclined surface (see Figure 2).

The receding contact angle (θ_r) of a droplet on an inclined surface is the angle inside the droplet between the solid surface and the droplet surface at the droplet rear (highest part on the inclined surface). If the receding contact angle is zero, a completely wetted trace of water is formed as the drop moves along the solid inclined surface (see Figure 2).

The general physical relation between the advancing and receding contact angle and the static contact angle defined in 2.4 is: $\theta_r \leq \theta_s \leq \theta_a$

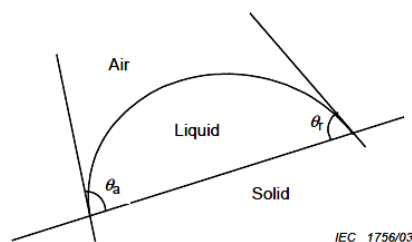


Figure 2 – Definition of the advancing angle (θ_a) and the receding angle (θ_r) inside a liquid drop resting on an inclined solid surface

2.6

wettability class

WC

hydrophobicity class

specific level of the scale used in the spray method (Method C)

NOTE Seven (7) classes, WC/1 to WC/7, have been defined. WC/1 corresponds to the most hydrophobic surface and WC/7 to the most hydrophilic surface.

3 Methods for measurement of wetting properties

Three methods for wettability measurement, differing in accuracy, simplicity, size of measured surface area and applicability, are described in this standard and are as follows:

- a) the contact angle method;
- b) the surface tension method;
- c) the spray method.

Guidance relative to the specific use of the three methods is found in Annex A.

4 Method A – Contact angle method

4.1 General

The contact angle method is a measurement that involves the evaluation of the contact angle formed between the edge of a single droplet of water and the surface of a solid material. If done on a horizontal surface, the advancing and receding contact angles can be measured by adding water to or withdrawing water from the droplet.

The contact angles depend strongly on the surface roughness and contact angles measured on polluted surfaces may differ significantly from contact angles measured on smooth, clean and planar surfaces.

4.2 Equipment

Different commercial equipment for measuring the contact angle is available. Simple measurements are made using a magnifying device with a graduated reticle (goniometer) fixed on a frame with a syringe for application of the droplet on the test specimen. Another method involves magnifying the droplet using a light projector (behind the droplet) and projecting an image of the droplet onto a graduated background. Some equipment includes camera, display and computer for analysis of the measurements.

4.3 Measurement procedure

4.3.1 General recommendations

General recommendations include:

- a) the receding contact angle (θ_r) reflects the wetting properties of an insulator more than the advancing contact angle (θ_a) and the static contact angle (θ_s);
- b) it is often necessary to cut out a test specimen from the insulator under investigation. The test specimen selected should be as planar as possible and the size should allow for the application of at least three droplets on separate surface areas adjacent to each other. The surface to be measured should not be touched and the specimen should be carefully stored until the measurement has been performed. The measurement should be performed as soon as possible;
- c) the water used should not contain impurities affecting the water surface tension (e.g. tensides, solvents, oil residues, etc.). De-ionized water is suitable;
- d) the volume of water in the droplet is not very critical. Volumes in the range 5 μl to 50 μl may be used. 50 μl is the recommended volume. For rough surfaces, a larger droplet volume may be needed. To limit a possible influence of the water droplet volume, the volume should be kept as constant as possible when comparing different specimens;
- e) the measurement of the contact angles should be performed as soon as possible (within a minute) after the application of the droplet on the surface. This is especially important when the ambient temperature is high and the relative humidity is low, which increases the rate of evaporation of the droplet. If the measurement is performed in a chamber with saturated water vapour, it eliminates the influence of evaporation.

NOTE Small droplet volumes have the advantage that the contact angle is less influenced by gravity. On the other hand, for rough surfaces and other surfaces that could have high advancing contact angles and low receding angles, a too small droplet volume makes the measurement of the dynamic contact angles very difficult. A small droplet volume will also be more sensitive to evaporation, which could affect the measurement. The optimal droplet volume may thus be dependent on type of surface and ambient temperature and humidity

4.3.2 Static contact angle measurements

The measurement of the static contact angle (θ_s) can be performed by applying a water droplet to the horizontal surface of a test specimen, using a pipette or a syringe with a scale.

4.3.3 Dynamic contact angle measurements

The measurement of the receding contact angle (θ_r) can be performed on a horizontal plane by withdrawing water from the droplet by using a syringe with a scale (see Figure 3). θ_r is the angle at the moment when the liquid front recedes. Measurement of θ_r should be performed on both projected sides of the droplet. At least three measurements on droplets applied on adjacent areas on the test specimen shall be performed. If three droplets are applied, this gives a total of six values.

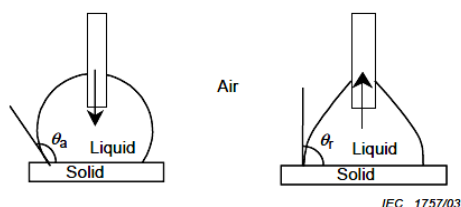


Figure 3 – Measurements of the advancing angle (θ_a) and the receding angle (θ_r) by adding or withdrawing water from a droplet

It is recommended to keep the capillary pipette of the syringe immersed in the droplet during the entire measurement in order to avoid vibrations and distortions of the droplet that otherwise may affect the result.

There exist other methods to measure the dynamic contact angles. Examples of such methods are given in Annex B.

NOTE Prior to the measurement of θ_r the advancing contact angle (θ_a) may be measured by adding water to the droplet. θ_a is the angle at the moment when the water droplet front starts to advance on the surface.

4.4 Evaluation

To obtain a good indication of the wettability of the whole insulator, several contact angle measurements should be performed on different areas along and around the insulator. Low or zero receding angles on all measured areas indicate an easily wetted insulator, especially if also the advancing angles are low or zero. On the contrary, high receding (and advancing) angles indicate that the insulator is hydrophobic. Measurement on a single spot of the insulator surface is only valid for that location and is not sufficient to draw conclusions on the wettability of the whole insulator.

5 Method B – Surface tension method

5.1 General

The determination of the surface tension of an insulator surface is based on the phenomenon that drops of a series of organic liquid mixtures, with gradually increasing surface tension, have different ability to wet the insulator surface. Any trace of surface-active impurities in the liquid reagents or on the surface may affect the results. It is, therefore, important that the surface to be tested should not be touched or rubbed, that all equipment is clean and that reagent purity is carefully controlled.

This method is an extension of IEC 60674-2¹, which is used for the determination of the surface tension of polyethylene and polypropylene films. In particular this method implies the adoption of a larger number of liquids to cover a wider range of surface tension, which is needed to perform measurements on both hydrophobic and hydrophilic insulators. There may be restrictions in using this method on polluted insulator surfaces (see Annex A).

5.2 Safety precautions

The organic liquids used as reagents may affect health if not used properly. Formamide (HCONH_2) may cause skin irritation and is particularly dangerous in direct contact with eyes. Ethylene-glycolmonoethyl-ether ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) (or ethyl cellosolve) is a highly flammable solvent. Both formamide and ethyl cellosolve are toxic. Adequate safety precautions should be adopted, e.g. safety goggles should be worn and there should be adequate ventilation when handling these liquids and performing the measurements.

5.3 Equipment and reagents

5.3.1 Preparation of reagents

Tables C.1, C.2 and C.3 of Annex C are used for the preparation of the required mixtures. For surface tension outside the range 30 mN/m to 56 mN/m, reference is made to mixtures in Tables C.2 and C.3 of Annex C. Commercially available marker pens already prepared with solutions of different surface tension may be an alternative to making own mixtures.

5.3.2 Equipment

Three different applicators are available to apply the reagent solutions on the insulator surface:

- cotton-tipped wooden applicators;
- small soft paintbrushes fixed into the caps of the bottles with the reagents;
- commercially available marker pens already prepared with solutions of different surface tension.

For applicators a) and b), additional equipment is required:

- two graduated bottles of 50 ml;
- other bottles, 100 ml with caps and labels. The bottles should be cleaned with chrome-sulfuric acid and rinsed with distilled water.

NOTE 1 If desired, add dye (e.g. Victoria Pure Blue BO at a maximum concentration of 0,03 %) to each of the different reagent mixtures. The dye used should be of such a colour as to make drops clearly visible on the surface of the organic material considered. Furthermore, the dye must be of such a chemical composition that it will not measurably affect the wetting tension of the liquid mixtures.

NOTE 2 It is recommended that the surface tension of the liquid mixture be checked weekly. Any surface tension method applied in the laboratory is suitable. Although the shown liquid mixtures are relatively stable, exposure to temperatures above 30 °C and a relative humidity in excess of 70 % should be avoided.

5.4 Measurement procedure

Wet the extreme tip of the cotton applicator (if cotton applicators are used) with one of the reagent mixtures or remove the soft paintbrush fixed into the cap of the bottle with the reagent. Use only a minimum amount of liquid as an excess of reagent may affect the result.

The same measurement procedure is then used with any of the three applicators.

¹ IEC 60674-2:1988, *Specification for plastic films for electrical purposes – Part 2: Methods of test*.

Spread the liquid lightly over an area of approximately 5 cm^2 (25 mm of diameter) of the insulator surface at the selected location. Note the time required for the continuous liquid coverage formed on the surface to break up into droplets. If the continuous liquid coverage holds for more than 2 s, proceed to a higher surface tension mixture, but if the continuous liquid coverage breaks into droplets in less than 2 s proceed to a lower surface tension mixture. For each application of a new reagent mixture, a new adjacent surface should be selected to avoid contamination from the previously applied reagent. If measurements on the same surface area are desirable and possible without disturbance, the surface may be gently cleaned with a dry cloth (without the use of any detergent) to remove the remaining reagent previously applied. If cleaning is not performed, it is recommended to start with the lower surface tension mixtures and progressively continue to higher surface tension mixtures to minimize erroneous results due to contamination from the previously applied reagent mixture. When a cotton applicator is used, a clean, new applicator shall be used each time to avoid contamination of the solution. If the soft paintbrushes fixed into the caps are used, the brush may be cleaned in a small volume of the reagent before it is re-inserted into the reagent bottle again.

Proceed in the direction indicated above continually repeating the prescribed steps until it is possible to select the right mixture according to the evaluation in 5.5.

5.5 Evaluation

The mixture is considered as wetting the insulator surface when it remains intact as a continuous coverage of the liquid for at least 2 s. Shrinkage of the periphery of the continuous liquid coverage does not indicate lack of wetting. Only breaking into droplets within 2 s indicates lack of wetting. Severe peripheral shrinking may be caused when too much liquid is placed upon the surface. The surface tension of the applied mixture (in mN/m), which remains intact during 2 s as close as possible, is called the surface tension of the measured insulator surface.

6 Method C – The spray method

6.1 General

The spray method is based on the wetting response that an insulator surface gives after exposure to a fine water mist for a short period. The wettability after the mist exposure is evaluated.

6.2 Equipment

The equipment needed is a device that can produce a fine mist, such as a common spray bottle. The spray bottle is filled with water. The water shall not contain any impurities, which could influence the surface tension of the water, such as detergents, solvents, etc.

NOTE 1 Additional equipment which may facilitate the measurement include a magnification glass (for an easier judgement of droplet shape) and a lamp.

NOTE 2 Tap water of high quality does usually not contain impurities that significantly influence the surface tension of the water. Tap water of high quality could thus be used for the measurement. If there are any uncertainties about the water quality, de-ionized water or distilled water should be used.

6.3 Measurement procedure

The test area should preferably be approximately 50 cm^2 to 100 cm^2 . The ratio between the length and width of the test area should not be larger than 1:3. If this requirement cannot be met, this should be noted in the measurement report. Apply the mist from a distance of $25 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}$. The surface shall be exposed to the mist for a period of 20 s to 30 s. Typically, the amount of water sprayed during the 20 s to 30 s should be within 10 ml to 30 ml. The measurements of the wettability shall be performed within 10 s after the spraying has been completed.

The measurement should be performed in such a way that a clear picture of the variation of the wettability along and around the insulator is obtained.

NOTE 1 For long insulators only some selected sheds from the upper, middle and lower part of the insulator may be examined.

NOTE 2 The measurement might be difficult to perform in high winds. If such difficulties are present it may be necessary to perform the spraying from a shorter distance than $25 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}$. This should be noted in the measurement report, together with any other possible deviations from given recommendations, e.g. smaller test area.

6.4 Evaluation

The appearance on the insulator surface after mist exposure has to be identified with one of the seven wettability (hydrophobicity) classes (WC), which is a value between 1 and 7. The criteria for the different WCs are given in Table 1. Typical photos of surfaces with different WCs are shown in Annex D.

A surface with the WC value 1 is the most hydrophobic surface and a surface with the WC value 7 is the most hydrophilic surface.

Two visual criteria are used to judge the WC value:

- a) the shape of droplets;
- b) the percentage part of the surface which is wetted.

NOTE The uncertainty in the visual evaluation is usually not larger than ± 1 wettability class.

Table 1 – Criteria for the determination of wettability class (WC)

WC	Description
1	Only discrete droplets are formed. Their shape when viewed perpendicular to the surface is practically circular. This corresponds to $\theta_r = 80^\circ$ or larger for the droplets.
2	Only discrete droplets are formed. The major part of the surface is covered by droplets with a shape, as seen perpendicular to the surface, still regular but deviates from circular form. This corresponds to $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ for the majority of droplets.
3	Only discrete droplets are formed. The major part of the surface is covered by droplets with an irregular shape. This corresponds to $20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ for the majority of droplets.
4	Both discrete droplets and wetted traces from the water runnels or water film are observed (i.e. $\theta_r = 0^\circ$ for some of the droplets). Less than 10 % of the observed area is covered by water runnels or film.
5	Both discrete droplets and wetted traces from the water runnels or water film are observed (i.e. $\theta_r = 0^\circ$ for some of the droplets). More than 10 % but less than 90 % of the observed area is covered by water runnels or film.
6	More than 90 % but less than 100 % of the observed area is covered by water runnels or film (i.e. small non-wetted areas/spots/traces are still observed).
7	Continuous water film is formed over the whole-observed area.

7 Documentation

The measurement report should include the following information:

a) General information

- 1) location, station, line or laboratory conditions;
- 2) method used (A, B or C);
- 3) date and time of the measurement and sample collection date and droplet volume for method A;
- 4) weather conditions (temperature, wind, precipitation);
- 5) who performed the test.

b) Test object

- 6) type of insulator or apparatus;
- 7) insulator material and shed profile;
- 8) identity (item No., position in substation or tower No.);
- 9) voltage class, arcing distance, creepage distance;
- 10) date of installation or application of coating (type of coating);
- 11) installation position (vertical, horizontal, angle);
- 12) information on the pollution state of the insulator.

c) Result

The results of the measurement performed at different positions should be documented, e.g. along the insulator (shed No.), along the surface within each shed sequence (top, bottom, large shed, small shed, trunk, etc.), and differences (if any) around the insulator circumference should be noted.

Annex A

(normative)

Guidelines regarding the applicability and comments on the limitations of the different methods described in this technical specification

A.1 General

The suitability of each method and its applicability depends not only on its associated procedure but also on the specific case to be evaluated. All three methods are well suited for wettability measurements in the laboratory. In the field, it may be difficult to use method A. Method B can be used without too much difficulty while Method C can readily be used. Some considerations relevant to each method are outlined below:

a) Method A : Contact angle measurement

- gives an accurate value of the wettability of the area measured,
- is more accurately performed in the laboratory than in the field,
- the measurement is easily performed on practically flat surfaces,
- if aging has affected the surface morphology, i.e. presence of cracks, fissures or filler, the measurement may be adversely affected, and
- requires many measurements if a complete evaluation of the insulator surface is required.

b) Method B : Surface tension measurement

- gives an accurate value of the wettability of the area measured provided the spatial variation in the wettability is compatible with the area required for the measurement,
- is fairly easy to perform,
- requires certain safety precautions,
- may be difficult to use if the surface is covered with a layer of loosely adhering pollution,
- may be affected by interaction between certain types of surface pollution and the measuring agents may occur, and
- requires many measurements if a complete evaluation of the insulator surface is required.

c) Method C : Spray method

- gives a global assessment of the wettability of the insulator surface and its variation along and around the insulator,
- is easy to perform and requires simple equipment,
- depends on subjective visual examination of the surface,
- can be used to evaluate bare and polluted surfaces, and
- may be affected by an interaction between certain types of surface pollution and the spray water (i.e. modification of the equivalent salt deposit density (ESDD) level of the surface contaminant applied for laboratory pollution tests).

A.2 Typical results obtained with the three methods

Typical results obtained with the three methods are as follows:

- a) Hydrophobic surface (not wettable)
 - high value of receding contact angle ($> 80^\circ$),
 - low value of surface tension (< 30 mN/m),
 - low WC value (WC = 1 or WC = 2).
- b) Intermediate surface (semi-wettable)
 - intermediate value of receding contact angle (10° to 80°),
 - intermediate value of surface tension (30 mN/m to 60 mN/m),
 - intermediate WC value (WC = 3 to WC = 5).
- c) Hydrophilic surface (wettable)
 - low value of receding contact angle ($< 10^\circ$),
 - high value of surface tension (> 60 mN/m),
 - high WC value (WC = 6 or WC = 7).

ประวัติผู้เขียน

นางสาวรัชกรณ์ ระวังเหตุ เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดชลบุรี แต่อาศัยใน จังหวัดฉะเชิงเทรา เริ่มศึกษาระดับอนุบาลและระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนเทพประสิทธิ์วิทยา อำเภอ เมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนดัดดรุณี อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี 2554 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอน ปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (2) ปฏิบัติการ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมี ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะที่ได้ศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมี ความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

